

기후변화 적응을 위한 LH건설 토목구조물의 설계기준
검토 및 개정방안 연구 (I)

연구자원 2013-17호

기후변화 적응을 위한 내건설 토목구조물의 설계기준 검토 및 개정방안 연구 (I)

지은이 김효진 · 김영진 · 박종배 · 정종석 · 임해식 · 유한규 · 황석주

발행인 윤석중

발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원

편집 김효진 · 김영진 · 박종배 · 정종석 · 임해식 · 황석주

주소 (우)305-810 대전광역시 유성구 전민동 462-2

전화 042) 866-8441

전송 042) 866-8431

전자우편 hyojin@h.or.kr

이 책의 내용을 쓰거나 할 때는 저작권자와 토지주택연구원의 허락을 받아야 합니다.

- 이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구검토 한 기초자료로서 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계없습니다.
- 우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.



연구지원 2013-17

기후변화 적응을 위한 LH건설 토목구조물의 설계기준 검토 및 개정방안 연구 (I)

A Review of Design Criteria of LH Infrastructures Due to Climate Change (I)

토지주택연구원

참여연구진

연구총괄

김효진 토지주택연구원 건설환경연구실 연구위원

참여연구원

김영진 토지주택연구원 건설환경연구실 수석연구원

박종배 토지주택연구원 건설환경연구실 수석연구원

정종석 토지주택연구원 건설환경연구실 수석연구원

임해식 도시설계처 설계3부 부장

유한규 한양대학교 토목환경공학과 교수

황석주 토지주택연구원 건설환경연구실 연구원

심의 및 자문위원 (가나다순)

김경석 도로교통연구원 선임연구원

김낙석 경기대학교 토목공학과 교수

김성태 (주)대흥이엔지 대표

문성호 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수

박대호 한양대학교 건설환경공학과 교수

박병철 국립방재연구원 시설연구관

유남재 강원대학교 토목공학과 교수

윤기용 선문대학교 토목공학과 교수

윤여진 건양대학교 건설환경공학과 교수

윤찬영 강릉원주대학교 토목공학과 교수

이도현 토지주택공사 토지주택연구원 선임연구위원

이용수 한국건설기술연구원 연구위원

이정희 도시설계처 설계2부 차장

임남형 충남대학교 토목공학과 교수

정은성 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수

최찬희 도시설계처 설계3부 차장

황영철 상지대학교 건설시스템공학과 교수

차례

| | |
|--|---------------|
| 제1장 서론 | 1 |
| 1. 연구배경 및 목적 | 3 |
| 2. 기후현황 | 8 |
| 2.1 과거 기후현황 | 8 |
| 2.2 현재 기후현황 | 20 |
| 2.3 미래 기후현황 | 22 |
| 3. 국내외 연구동향 | 33 |
| 3.1 국내연구동향 | 33 |
| 3.2 국외연구동향 | 38 |
| 3.3 국내 연구과제 현황 | 39 |
| 4. 소결 | 40 |
| 제2장 (제1세부) 사면 및 토석류 | 41 |
| 1. 국내외 토석류 발생량 산정방법 조사 | 43 |
| 1.1 침식심도 개념 및 방법 | 43 |
| 1.2 대규모 홍수시의 토사유출량 추정(스트림파워) | 44 |
| 1.3 계획유출량 산정 | 45 |
| 1.4 토양유실량예측공식(USLE) | 48 |
| 1.5 단일 강우시의 토양유실량의 추정(RUSLE 수정범용토양유실식) | 52 |
| 2. 국내외 토석류 발생량 산정방법 적정성 분석 | 58 |
| 2.1 토석류 발생량 산정방법 활용 | 58 |
| 2.2 물리적인 토양침식량 산정기법 | 66 |
| 2.3 토석류 규모 분석의 한계 | 71 |

| | |
|---|------------|
| 3. 토석류 제어대책 관련 국내외 설계기준 및 유지관리 기준 조사 분석 | 72 |
| 3.1 사방기술교본 | 72 |
| 3.2 산악지 도로설계 매뉴얼 | 81 |
| 3.3 하천설계기준 | 91 |
| 3.4 한국도로공사 도로설계요령(토공편) | 98 |
| 4. 유관기관별 설계기준 및 유지관리 비교 | 105 |
| 제3장 (제2세부) 도시기반시설(교량) | 107 |
| 1. 연구의 필요성 | 109 |
| 2. 자연재해 관리단계 검토 | 109 |
| 2.1 자연재해 예방 및 대비단계 | 109 |
| 2.2 대응단계 | 110 |
| 2.3 자연관리단계에 적합한 강교량 | 111 |
| 3. 기후변화에 따른 교량 파손 사례 및 분석 | 114 |
| 3.1 교량 현황 | 114 |
| 3.2 일반적인 교량구조물의 피해 | 117 |
| 3.3 교량피해 현황 분석 | 119 |
| 3.4 결론 | 137 |
| 4. 최신 신기술 신공법 현황 및 특징 | 139 |
| 제4장 (제2세부) 도시기반시설 (도로 및 도로시설물) | 147 |
| 1. 연구의 필요성 | 149 |
| 2. 기후변화에 따른 도로피해 사례 | 150 |
| 3. 국내외 도시홍수 저감을 위한 배수시스템 | 151 |
| 4. LH 도로건설현황 및 설계기준 | 152 |
| 4.1 LH 도로건설현황 | 152 |
| 4.2 LH 도로설계 기준 | 153 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 5. 문헌조사 | 156 |
| 5.1 도로 배수시스템 및 배수취약 구간 분석 | 156 |
| 5.2 배수성 및 투수성 포장 | 159 |
| 5.3 기후변화에 따른 포장의 파손 | 164 |
| 6. 2차년도 연구계획 | 167 |
| 6.1 연구내용 및 수행방법 | 167 |
| 7. 외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용 | 168 |

■ 참고문헌

| | |
|-------------|------------|
| 국내문헌 | 173 |
| 국외문헌 | 178 |

표차례

| | |
|--|----|
| [표 1-1] 과거 주요호우 및 태풍피해현황의 우선순위(1위~20위) | 8 |
| [표 1-2] 최근 10년 간 원인별, 월별 우심피해 발생률(2002~2011) | 11 |
| [표 1-3] 2001년 7월 14일~15일 주요 지역의 호우 특성 비교 | 12 |
| [표 1-4] 서울 주요 지역별 강우특성 | 13 |
| [표 1-5] 시군별 강우량 현황 | 14 |
| [표 1-6] 지속기간별 강우량 빈도분석 결과 | 14 |
| [표 1-7] 2005년도 8월 경상남도 강우량 현황 | 15 |
| [표 1-8] 빈도분석 결과(전라남도 순천시) | 16 |
| [표 1-9] 빈도분석 결과(전라남도 여수시) | 17 |
| [표 1-10] 빈도분석 결과(전라남도 고흥군) | 18 |
| [표 1-11] 인천시 강우강도 및 침수세대 분석 | 19 |
| [표 1-12] 최근 30년 여름철 누적강수량 및 집중호우 경향 | 20 |
| [표 1-13] 현재(1980~2009년) 대비 미래 한반도 평균 기온 및 강수량 전망 | 32 |
| [표 1-14] 한국건설교통기술평가원 연구과제 현황 | 39 |
| [표 2-1] Dimensions of USLE factors | 49 |
| [표 2-2] Soil loss unit | 49 |
| [표 2-3] Rainfall erosivity factor | 51 |
| [표 2-4] 토지 상태인자 산정 기준 | 56 |
| [표 2-5] 실제 적용되고 있는 토석류 발생량 산정방법 | 58 |
| [표 2-6] 일본의 토사유출 원단위 | 63 |
| [표 2-7] WEPP 모형의 기본 입력자료 | 67 |
| [표 2-8] 안정성등급의 분류 | 70 |
| [표 2-9] 합리식에 적용되는 유출계수 | 74 |
| [표 2-10] 토석류 및 유송잡물 차단 시설별 비교 사례 | 84 |

| | |
|--|-----|
| [표 2-11] 차단시설물의 선택 | 88 |
| [표 2-12] 차단시설 설치방안 비교·검토 | 89 |
| [표 2-13] 사방댐의 천단폭 | 98 |
| [표 2-14] 주요 토석류대책공의 종류 | 103 |
| [표 3-1] 중·소규모 교량 | 111 |
| [표 3-2] 가교 | 112 |
| [표 3-3] 교량교체공법 | 113 |
| [표 3-4] 홍수로 인한 도로교의 피해현황(1964년~2010년) | 121 |
| [표 3-5] 준공연도 구분에 따른 교량시설기술발달 특성 | 130 |
| [표 3-6] 홍수로 인한 교량피해유형 구분 | 136 |
| [표 3-7] 업체별 교량 현황 | 139 |
| [표 3-8] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(PSC 계열) | 141 |
| [표 3-9] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(P,F/강합성 계열) | 143 |
| [표 3-10] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(Rahmen 계열) | 145 |
| [표 4-1] 국가 및 LH공사 도로건설 현황 | 153 |
| [표 4-2] 도로건설 집계표(1982년~2007년) | 153 |
| [표 4-3] LH 단지 내 도로 및 주차장 아스팔트 포장단면 | 154 |
| [표 4-4] AASHTO 설계법의 층별 최소두께 | 154 |
| [표 4-5] 도로배수 시설의 설계빈도 | 155 |
| [표 4-6] 배수구조물 통수능력 향상을 위한 강우강도 발생빈도 상향 | 156 |
| [표 4-7] 배수 취약구간 주요조사 내용 | 157 |
| [표 4-8] 도로배수 취약구간 발생 세부원인 | 157 |
| [표 4-9] 수리·수문 분석 대상 배수취약구간 | 158 |
| [표 4-10] 유럽의 배수성 포장 현황 | 160 |
| [표 4-11] LH 건설 도로형태에 시공가능한 배수성포장 및 투수성포장 | 164 |
| [표 4-12] 효과적인 수분민감성 예측 방법 | 165 |
| [표 4-13] 수정된 Lottman(AASHTO T283)의 아스팔트 혼합물 수분처리방법 | 166 |
| [표 4-14] Boiling Water Test | 167 |
| [표 4-15] 외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용 | 168 |

그림차례

| | |
|--|----|
| [그림 1-1] 2011년 이상기후 발생 현황 | 4 |
| [그림 1-2] 과거(1971~2008) 강수량 | 5 |
| [그림 1-3] 미래강수량 변화 전망(A1B) | 5 |
| [그림 1-4] 지난 40년간 대한민국의 기후변화 | 5 |
| [그림 1-5] 최근 10년 간 시설별 피해액 | 6 |
| [그림 1-6] 최근 10년 간 원인별 피해액 | 6 |
| [그림 1-7] 최근 10년 간 원인별, 월별 우심피해 발생률(2002~2011) | 10 |
| [그림 1-8] 기후변화 폭우재해 취약성 | 21 |
| [그림 1-9] 기후변화 폭우재해 취약성 세부 | 21 |
| [그림 1-10] 20세기말(1971~2000) 대비 21세기말(2071~2100)의 기온(℃)과 강수량(%) | 23 |
| [그림 1-11] 1971~2000년 대비 1860~2099년 1.5m 기온의 변화 | 24 |
| [그림 1-12] 1971~2000년 대비 1860~2099년 강수의 변화 | 24 |
| [그림 1-13] RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 1971~2000년 대비 2070~2099년의 강수분포 | 25 |
| [그림 1-14] 동아시아 지역의 기온 변화 | 27 |
| [그림 1-15] 동아시아 지역의 강수량 변화 | 27 |
| [그림 1-16] 1980~2009년 대비 1950~2099년 연평균 기온의 변화 | 29 |
| [그림 1-17] 1980~2099년 대비 1950~2099년 연평균 강수의 변화 | 29 |
| [그림 1-18] RCP 4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후(℃)와 미래변화(℃) 분포 | 30 |
| [그림 1-19] RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후(℃)와 미래변화(℃) 분포 | 30 |
| [그림 1-20] RCP 4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후(mm/day)와 미래변화(%) 분포 | 31 |
| [그림 1-21] RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후(mm/day)와 미래변화(%) 분포 | 31 |
| [그림 1-22] 온실가스 감축이 없는 경우(RCP 8.5), 2001년~2010년을 기준으로 한 미래(2041~2050) | 32 |
| [그림 2-1] 토사유출량 검토 방법 | 45 |
| [그림 2-2] 계획유출유목량 산정 시 나타나는 패러미터의 정의 | 47 |

| | |
|--|-----|
| [그림 2-3] 토양 침식성 인자의 계산도표 | 54 |
| [그림 2-4] 토석류 발생량 도출 과정 | 64 |
| [그림 2-5] 스캔자료를 이용한 3차원 모형의 생성 | 65 |
| [그림 2-6] 지상 LiDAR 스캔자료에서의 수목제거 | 65 |
| [그림 2-7] 무한사면 안정성 모델 | 68 |
| [그림 2-8] 입경별, 배수구역 유역면적별 유사전달물 | 71 |
| [그림 2-9] 댐의 합력 | 75 |
| [그림 2-10] 물받이공사의 수직벽과 측벽 | 77 |
| [그림 2-11] 본댐과 앞댐과의 관계 | 78 |
| [그림 2-12] 콘크리트 사방댐 본댐과 부댐 | 78 |
| [그림 2-13] 댐의 측벽 | 78 |
| [그림 2-14] 물방석 | 78 |
| [그림 2-15] 흙댐의 심벽과 포화수선의 위치 | 79 |
| [그림 2-16] 구조도 | 80 |
| [그림 2-17] 콘크리트 사방댐 | 81 |
| [그림 2-18] 개폐식 토석류 차단시설 사례 | 85 |
| [그림 2-19] 연성형 및 암거유입부 토석류 차단시설 사례 | 86 |
| [그림 2-20] 토석류 및 유송잡물 차단시설의 선정과정 | 87 |
| [그림 2-21] 도로 주변에 토석류 차단시설 설치(안) | 88 |
| [그림 2-22] 토석류 및 유송잡물 차단시설 설치 사례 | 89 |
| [그림 2-23] 사방댐의 구조 및 명칭 | 92 |
| [그림 2-24] 현하상 경사에 따른 계획퇴사경사 설정 | 95 |
| [그림 2-25] 물넘이 구조와 비탈경사 | 96 |
| [그림 2-26] 토석류 방어와 배수구조물 보호를 위한 방법들 | 103 |
| [그림 3-1] 국내 전체 교량현황 | 115 |
| [그림 3-2] 교량 상태별 유지관리 비용의 추세 | 116 |
| [그림 3-3] 집중호우로 파손된 교량 | 116 |
| [그림 3-4] 교량에 발생할 수 있는 피해의 형태 및 원인 | 119 |
| [그림 3-5] 홍수로 인한 도로교의 피해현황(1964년~2008년) | 120 |
| [그림 3-6] 교량 난간 파손 사례 | 122 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| [그림 3-7] 교대부근 석축 유실 | 122 |
| [그림 3-8] 라멘교 교량 상판 파손 | 122 |
| [그림 3-9] 교각 유실 | 122 |
| [그림 3-10] 교각 침식 | 123 |
| [그림 3-11] 난간의 앵커볼트 지지길이 부족 | 123 |
| [그림 3-12] 뒤채움재 유실 | 123 |
| [그림 3-13] 교량 붕괴 사례 | 123 |
| [그림 3-14] 제방 사면 유실 | 123 |
| [그림 3-15] 교량 하류부 수중보 붕괴 | 123 |
| [그림 3-16] 교각 침하 및 상판 부등침하 | 124 |
| [그림 3-17] 유송잡물로 교각 세굴 | 124 |
| [그림 3-18] 오류교 피해전경 | 125 |
| [그림 3-19] 임장교 피해전경 | 125 |
| [그림 3-20] 연운교 상류측 피해전경 | 126 |
| [그림 3-21] 연운교 하류측 피해전경 | 126 |
| [그림 3-22] 교량에 걸린 부유물 | 127 |
| [그림 3-23] 홍수에 떠내려 온 중장비 | 127 |
| [그림 3-24] 다수교 유실 전경 | 127 |
| [그림 3-25] 교각에 부유물 집적 및 교량 주변 침수 | 127 |
| [그림 3-26] 동산동교의 접속부 제방 유실 | 128 |
| [그림 3-27] 도로, 옹벽 유실 | 128 |
| [그림 3-28] 토석류에 의한 도로붕괴 | 129 |
| [그림 3-29] 도로유실 | 129 |
| [그림 3-30] 낙석으로 인한 피해 | 129 |
| [그림 3-31] 준공연도 구분에 따른 피해교량 개소수 분포도 | 132 |
| [그림 3-32] 기능상실교량 | 132 |
| [그림 3-33] 부분파손교량 | 132 |
| [그림 3-34] 기타피해교량 | 132 |
| [그림 3-35] 교장별 피해교량 분포도 | 134 |
| [그림 3-36] 경간장별 피해교량 분포도 | 135 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| [그림 3-37] 피해원인유형 분포도 | 136 |
| [그림 3-38] 피해부재 분포도 | 137 |
| [그림 4-1] 연도별 서울시 도로파손 보수면적/건수 및 비용 | 150 |
| [그림 4-2] 월별 강수량 및 도로파손 보수 건수 | 150 |
| [그림 4-3] 크론스베르크 단지 내 도로, 주차장 주변 수로 | 151 |
| [그림 4-4] High Point 단지 내 도로 주변 수로 | 152 |
| [그림 4-5] 도로배수시설의 구분 | 155 |
| [그림 4-6] 일본의 배수성포장 실적 | 160 |
| [그림 4-7] 토목연구소 내 투수성 시험포장 단면 | 161 |
| [그림 4-8] 인터록킹 콘크리트 블록포장 체계의 구성요소 | 163 |

제1장
서론

1

제1장 서론

1. 연구배경 및 목적

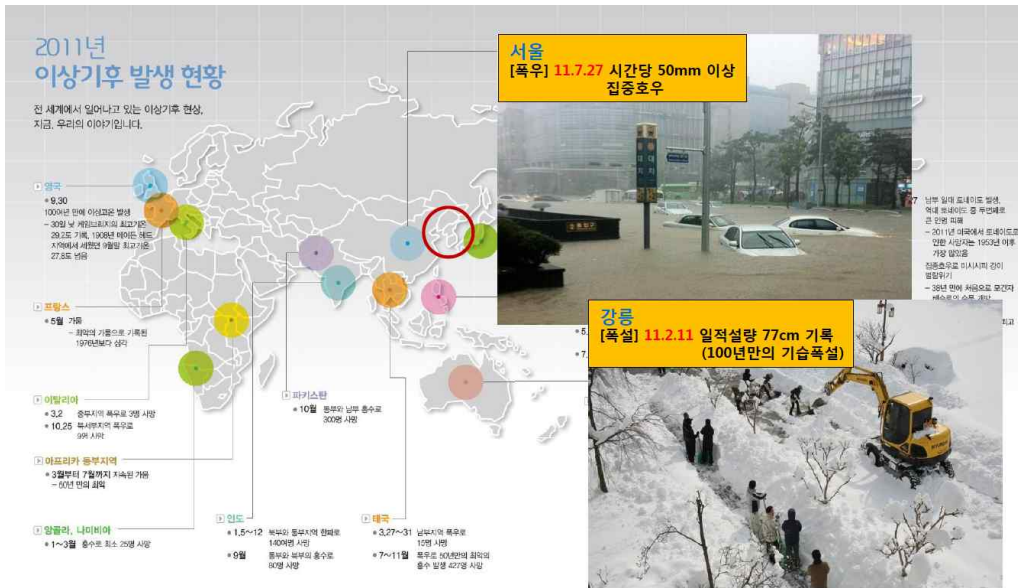
IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제4차 보고서에 따르면 지구의 평균기온은 1900년 이후 0.74°C 상승, 평균해수면(1961~2003)은 1.8mm/yr 상승, 북극해빙면적(1978년 이후)은 $2.7\%/10\text{yr}$ (여름 $7.4\%/10\text{yr}$) 감소하는 등의 결과로 기후변화는 명백하다고 제시하고 있다. 우리나라의 기후변화 추세는 전 지구적 변화경향과 비슷하거나 다소 높게 나타나고 있다. 강우량의 변화는 지난 100년(1912~2008년) 동안 6개의 관측지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)에서 약 $19\%(220\text{mm}/100\text{yr})$ 증가하였다. 또한, 기후변화가 강우량에 미치는 영향은 1910년대 평균 연 강우량은 $1,156.6\text{mm}$ 에서 2000년대 $1,357.4\text{mm}$ 로 약 19% 증가하였으며, 20세기말(1971~2000)에 대비하여 21세기말(2071~2100)에는 약 17% 가 증가할 것이라 전망되었다(김영호, 2011).

국립기상연구소 2007년 연구발표에 의하면 강수량은 많아지나 강수일수는 적어지고 있어 국지성 집중호우의 빈발은 더욱 심각해질 것으로 예상되고 있다. 이미 홍수발생의 척도가 되는 1시간 강우강도는 과거 최고기록이 118.6mm/hr 에서 1998년 지리산 호우 시 145mm/hr 를 기록하는 등 집중호우의 빈도와 규모가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이에 따라 하천, 댐, 하수관거 등 사회기반시설의 설계빈도는 관리주체별로 별도로 설치되고 있으며, 1960년~1970년대에 설치된 기반시설이 많으므로 이미 시설물 내용연한(耐用年限)¹⁾이 40~50년에 접근하므로 대폭적인 개보수가 필요한 것으로 나타나고 있다. 각종 사회기반시설물의 설계기준을 예상되는 대형재난에 대비하여 상향조정하고 기존 시설물의 보강은 보강기준이 상향될수록 안전하다는 장점도 있으나 이

1) 어떠한 구조물의 설치 이후 구조물의 재질 및 특성에 따라 제 기능을 할 수 있는 기한을 의미하며, 대규모 댐 등에서는 구조물의 한계비용-편익분석의 기준이 된다.

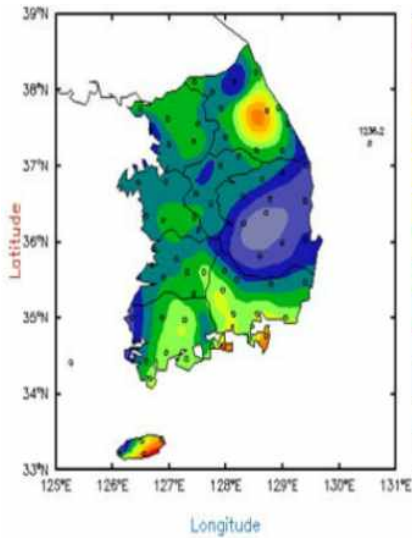
에 따른 국가의 재정부담과 원하는 수준이 안전도를 적정하게 단계적으로 설정하여 추진되어야 할 것이며, 취약성이 가장 큰 시설을 우선적으로 추진하기 위한 개보수 우선순위를 설정하는 것이 중요하다(국립방재연구원, 2008).

지난 40여 년간 대한민국에서 관측된 기후특성을 살펴보면 그림 1-4와 같다. 평균기온과 열대일수, 호우일수는 증가하는 경향을 나타내고 결빙일수와 혹한일수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 지난 40년간의 변화를 살펴보면 기온과 강수 등의 평균적 기후환경의 변화가 뚜렷이 확인된다.

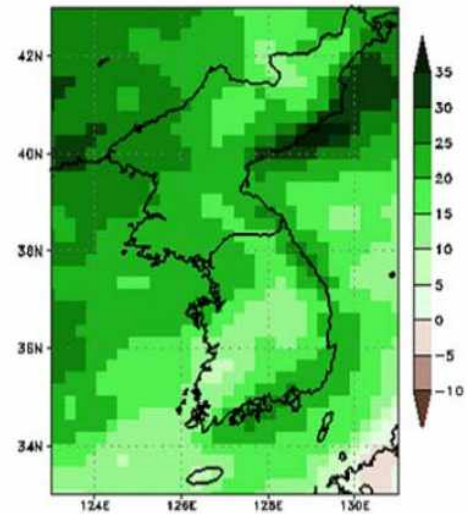


[그림 1-1] 2011년 이상기후 발생 현황

출처: 녹색성장위원회 · 기상청, 2011년 이상기후보고서, 2011

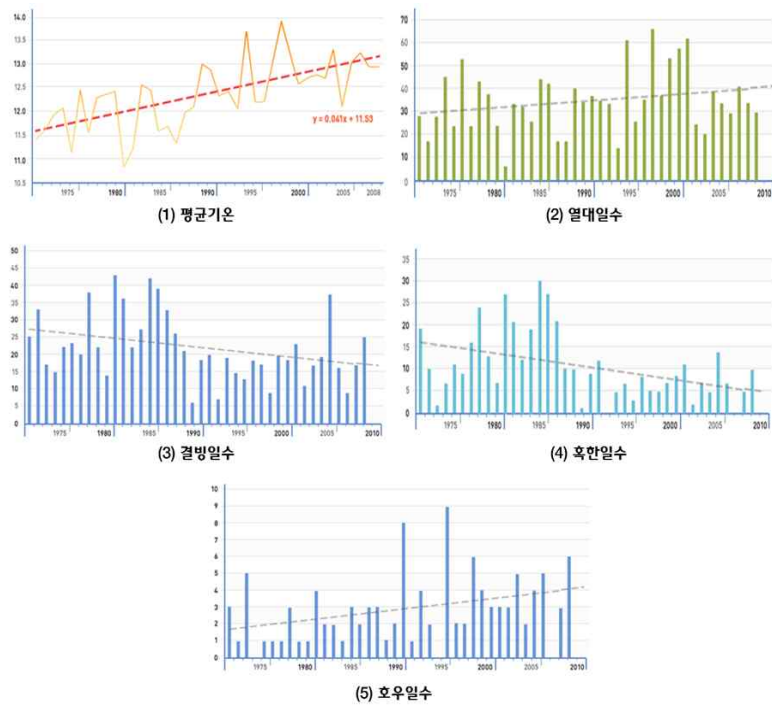


[그림 1-2] 과거(1971~2008) 강수량



[그림 1-3] 미래강수량 변화 전망(A1B)

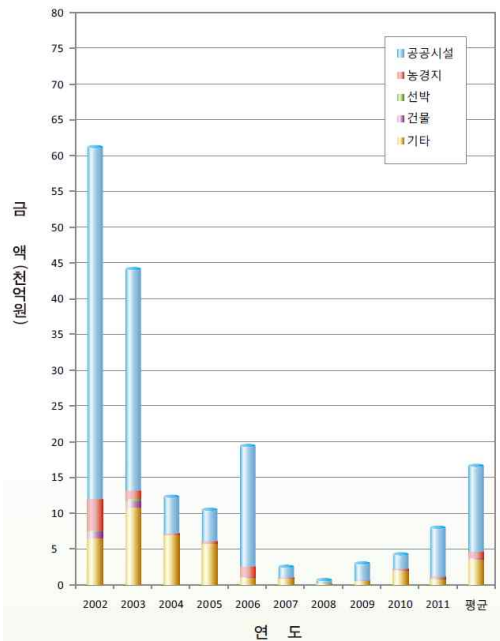
출처: 기상청, 국립기상연구소, 기후변화 이해하기 ||, 2009



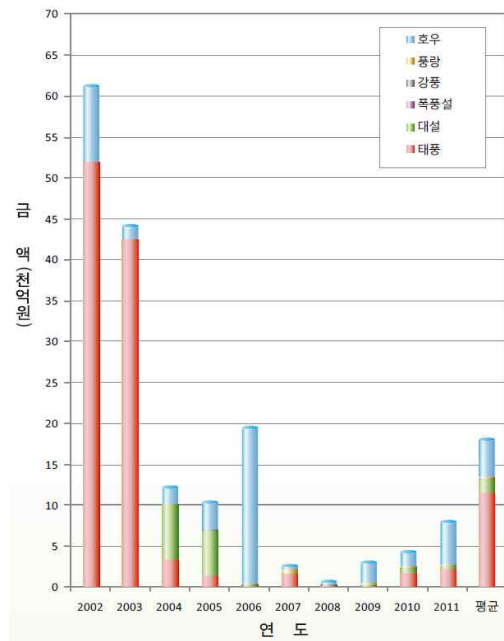
[그림 1-4] 지난 40년간 대한민국의 기후변화

출처: 서울특별시 기후대기환경정보, <http://cleanair.seoul.go.kr>

지구온난화에 의해 발생하는 강수량 증가, 대형 태풍 발생빈도 증가 등의 현상으로 피해가 점점 더 증가할 것으로 판단된다. 이러한 기후변화는 설계기준 빈도를 상대적으로 낮아지게 하는데 이에 기후변화를 고려한 확률강우량을 재산정하고, 방재시설물의 빈도를 상향 조정하여 피해를 저감해야 할 것으로 판단된다. 그림 1-5와 그림 1-6에 최근 10년 간 시설별, 원인별 피해액을 나타내었다. 시설별 피해액에서 사회기반시설인 공공시설의 피해가 가장 많이 나타났으며 원인별 피해액은 태풍과 호우 피해가 주로 나타났다. 기상청에서는 현재와 비교하여 21세기말(2071~2100) 한반도의 기온은 약 4℃ 상승, 강수량은 17%가 증가할 것으로 전망하였으며, 현재의 기후도 이를 뒷받침 하듯이 집중호우, 태풍 등이 자주 발생하여 홍수피해가 증가하고 있다. 이에 기후변화를 고려한 확률강우량을 재산정하는 산정방법이 필요한 실정이다(김영호, 2011).



[그림 1-5] 최근 10년 간 시설별 피해액



[그림 1-6] 최근 10년 간 원인별 피해액

출처: 소방방재청, 2011년 재해연보, 2012

현재 우리나라에서는 하천관리, 수공구조물 설계, 수자원 계획 등의 기준이 되는 설계수문량을 산정하기 위해 일반적으로 강우자료를 이용하여 확률강우량을 산정한 후 설계홍수량을 산정하고 있다. 이와 같이 설계수문량 산정에 중요한 확률강우량의 산정을 위해 강우자료를 이용한 빈도해석에 관한 연구가 1960년대부터 활발히 이어져 오고 있으며, 실제 정부기관(국립방재연구소, 1998; 건설교통부, 2000; 국립방재연구소, 2002)에서도 이를 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 그 예로 2000년 건설교통부에서 발행된 “한국 확률강우량도 작성”, 1998년 국립방재연구소에서 강우분석 프로그램인 FARD98을 개발하였고, 2002년에는 기존의 FARD98을 개선한 FARD2002를 개발하여 실무자들이 쉽고 편리하게 정확한 확률강우량을 산정할 수 있도록 하였다. 그러나 최근 세계 곳곳에서 이례적인 폭우, 폭설, 가뭄 등의 기상이변이 속출하고 있으며, 이와 같은 기상이변이 자주 나타남에 따라 확률수문량의 재산정 역시 불가피하게 되었다(허준행 등, 2006).

온실효과로 인한 지구평균기온의 상승은 지구 전체적인 수문순환에도 영향을 미쳐 특히 강수 형태의 급격한 변화를 야기하고 있다고 알려져 있다(Mansell, 1997). 강수량의 변화는 홍수와 가뭄과 같은 대규모 재해와 직접적인 연관이 있어 수문 및 수자원 분야에서 매우 민감하게 다루어지는 문제이다. 기후변화와 이에 수반되는 수문현상들은 전 세계적으로 공통된 문제이며 한반도 지역도 예외일 수는 없다. 하지만 한반도 내에서도 지형의 영향과 위경도의 차이에 따라 기후변화가 진행되는 양상은 지역적으로 편차를 보이고 있으므로 지역적인 분석이 요구된다. 더욱이 우리나라의 경우 연강우량의 약 2/3가 여름철에 집중되는 현상과 국토의 약 70%가 산간 지형으로 구성되어 있어 집중형 강우가 지형 효과를 수반하게 된다고 했을 때 국지적으로 예상치 못한 극치 호우 사상이 발생할 위험이 있다. 일반적으로 이수 및 치수를 위한 수공구조물의 설계와 하천의 정비기본계획 수립 등에서 가장 중요하게 참고 되는 기준은 빈도(Frequency)와 지속시간(Duration)에 따른 확률강우량을 산정하여 결정되는 침투유량이라고 할 수 있다. 과거 강우자료를 이용하여 빈도 해석한 결과로 산정한 확률강우량은 지역적 혹은 전국적인 분포도로 실무에 이용되어 왔다. 기후변화로 인한 홍수나 가뭄의 강도 증가 및 극치 사상의 빈도 증가를 기존에 적용하던 설계강우량을 적용할 경우 안전성에 문제가 발생할 수

있다. 최근의 기후변화 위험성은 분명해지고 있으며 건설교통부(현 국토해양부)에서 2000년 기준으로 작성하여 이용해오던 확률강우량보다 극치 사상을 염두에 두어 안전도측면에서 좀 더 개선된 확률강우량의 제시를 비롯해 기존 확률강우량과 비교를 통하여 지역적인 취약성 분석이 필요하다(이승춘, 2009).

2. 기후현황

2.1 과거 기후현황

2.1.1 과거 주요호우 및 태풍피해현황의 우선순위(1위~20위)

과거 우리나라에서 발생한 주요호우 및 태풍피해현황은 표 1-1과 같다. 가장 큰 피해를 입힌 것은 2002년이었으며 2000년 이후 주요호우 및 태풍피해는 10위 내 6번의 빈도를 나타내어 최근 10년 간 강우로 인한 피해가 높은 것으로 나타났다.

[표 1-1] 과거 주요호우 및 태풍피해현황의 우선순위(1위~20위)

| 구분 | 주요피해원인 | 최대일강우량(mm) | 주요피해지역 | 피해순위 |
|-------|--------------------------------|---|-------------------|------|
| 2002년 | 태풍(RUSA) 8/30~9/1 | 강릉:870.5 동해:319.5 속초:295.5 대관령:712.5 | 전국 | 1 |
| 2003년 | 태풍(MAEMI) 9/12~9/13 | 남해:453 대관령:397 고흥:304 | 전국 (서울, 인천 제외) | 2 |
| 2006년 | 집중호우 및 태풍(EWINIAR) 7/9~7/29 | 홍천:255.5 남해:264.5 산청:229.5 | 전국 | 3 |
| 1998년 | 집중호우 7/31~8/18 | 강화:481 보은:407.5 양평:346 | 전국 (제주 제외) | 4 |
| 1999년 | 집중호우 및 태풍(OLGA) 7/23~8/4 | 철원:280.3 춘천:237.2 | 전국 | 5 |
| 2002년 | 호우 8/4~8/11 | 양평:320 | 전국 (제주 제외) | 6 |

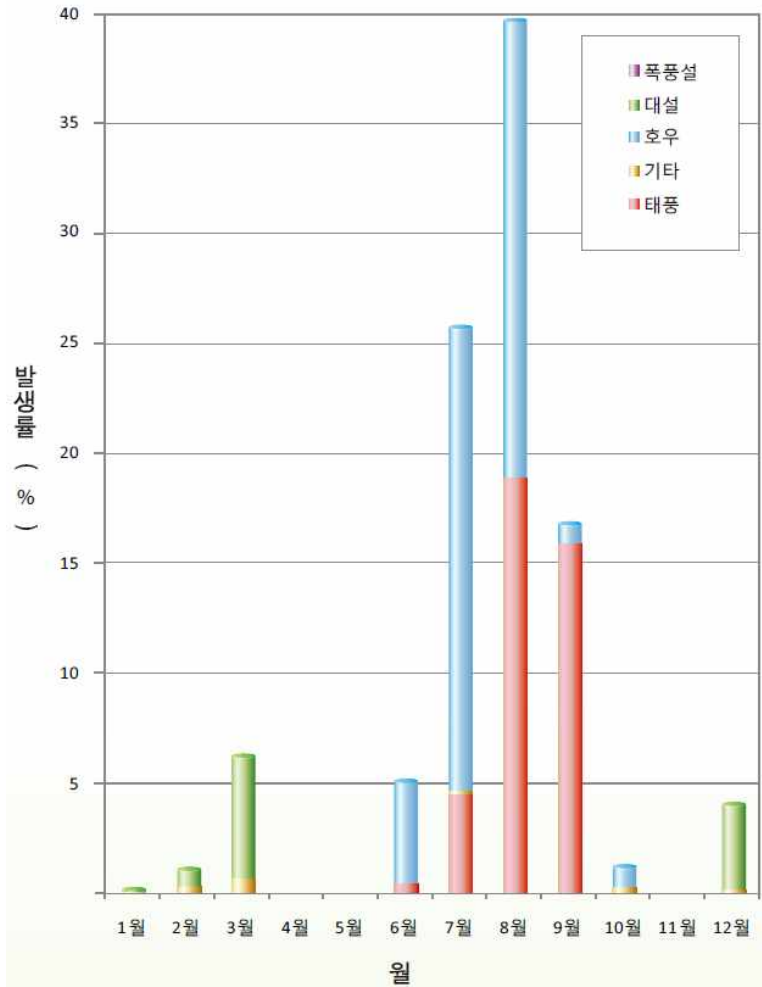
주) 태풍통과구역과 최대풍속은 제외함.
출처: 소방방재청, 2011년 재해연보, 2012

[표 1-1] 과거 주요호우 및 태풍피해현황의 우선순위(1위~20위)(계속)

| 구분 | 주요피해원인 | 최대일강우량(mm) | 주요피해지역 | 피해순위 |
|-------|----------------------------------|---|---------------------------|------|
| 1990년 | 집중호우 9/9-9/12 | 대관령:330.8 강릉:297.5 수원:276.3 원주:250.5 서울:247.5 | 서울, 경기, 강원, 충북 | 7 |
| 2004년 | 폭설 3/4-3/5 | 최심적설량 대전, 문경:49cm | 충남, 충북, 경북, 경남 | 8 |
| 1987년 | 태풍(HELMA) 7/15-7/16 | 제주:163.6 완도:139.1 고흥:216.8 강릉:173.5 부산:135.7 | 남해, 동해 | 9 |
| 1995년 | 집중호우 및 태풍(JANIS) 8/19-8/30 | 양평:119.5 보령:361.5 태백:140 | 경기, 강원, 충남, 충북 | 10 |
| 1987년 | 집중호우 7/21-7/23 | 대전:303.3 제주:224.7 부여:517.6 이리:238.5 | 중부 | 11 |
| 1996년 | 집중호우 7/26-7/28 | 철원:268 서울:168.6 춘천:141.5 | 경기, 강원, 인천, 서울 | 12 |
| 2005년 | 대설 12/3-12/24 | 최심적설량 정읍:59.3cm | 광주, 충남, 전북, 전남 | 13 |
| 1989년 | 호우 7/25-7/27 | - | 충남, 충북, 전남, 전북 | 14 |
| 1991년 | 태풍(GLADYS) 8/22-8/26 | 부산:439 울산:417.8 거제:341.2 양산:391.6 창원:414.5 | 부산, 강원, 경북, 경남 | 15 |
| 2005년 | 호우 8/2-8/11 | 광주:382 고성:327 양평:303.5 장수:285.5 | 경기, 충북, 전북, 경북, 경남 | 16 |
| 2011년 | 호우 7/26-7/29 | 동두천:449.5 문산:322.5 서울:301.5 인제:211 | 서울, 부산, 인천, 경기, 강원 | 17 |
| 1998년 | 태풍(YANNI) 9/29-10/1 | 포항:516.4 | 대구, 울산, 전북, 전남, 경북, 경남 | 18 |
| 2000년 | 호우, 태풍(PRAIROON) 8/23-9/1 | 동두천:501 인천:421 서울:392 보령:555 군산:645 | 전국 | 19 |
| 1984년 | 집중호우 8/31-9/4 | 속초:314.2 강릉:204.5 서울:266.2 | 서울, 경기, 강원 | 20 |

2.1.2 최근 10년 간 원인별 우심피해 발생률

최근 10년 간 우심피해 864건 중 415건의 호우 우심피해가 발생하였다. 415건의 호우 우심피해 중 182건(43.9%), 178건(42.9%)이 여름철인 7월, 8월에 발생한 것으로 나타났다(그림 1-7, 표 1-2).



[그림 1-7] 최근 10년 간 원인별, 월별 우심피해 발생률(2002~2011)

출처: 소방방재청, 2011년 재해연보, 2012

[표 1-2] 최근 10년 간 원인별, 월별 우심피해 발생률(2002~2011)

| 구분 | | 합계 | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 |
|----|-------------------|-----|-----|------|------|----|----|-----|------|------|------|------|-----|------|
| 합계 | 회수 | 864 | 3 | 10 | 56 | | | 42 | 222 | 340 | 145 | 11 | | 35 |
| | 비율 ^(주) | 100 | 0,3 | 1,2 | 6,5 | | | 4,9 | 25,7 | 39,4 | 16,8 | 1,3 | | 4,1 |
| 태풍 | 회수 | 342 | | | | | | 4 | 39 | 162 | 137 | | | |
| | 비율 | 100 | | | | | | 1,2 | 11,4 | 47,4 | 40,1 | | | |
| 호우 | 회수 | 415 | | | | | | 38 | 182 | 178 | 8 | 9 | | |
| | 비율 | 100 | | | | | | 9,2 | 43,9 | 42,9 | 1,9 | 2,2 | | |
| 대설 | 회수 | 93 | 2 | 7 | 50 | | | | | | | | | 34 |
| | 비율 | 100 | 2,2 | 7,5 | 53,8 | | | | | | | | | 36,6 |
| 기타 | 회수 | 14 | 1 | 3 | 6 | | | | 1 | | | 2 | | 1 |
| | 비율 | 100 | 7,1 | 21,4 | 42,9 | | | | 7,1 | | | 14,3 | | 7,1 |

주) %

출처: 소방방재청, 2011년 재해연보, 2012

2.1.3 과거 집중호우 분석

2.1.3.1 2001년 서울 집중호우

2001년 7월 14~15일에는 서울 지방을 비롯한 인천, 경기, 강원지역에 기록적인 집중호우가 발생하였으며, 이로 인하여 막대한 홍수 피해가 발생하였다. 약 66명의 인명 피해와 5,553세대의 이재민이 발생하였고 주택 약 95,481세대가 침수되었으며, 약 1,816억원의 피해가 발생하였다. 특히 호우는 일요일 자정부터 새벽 3~4시까지 서울지역에 집중적으로 발생하였으며, 대도시의 특성상 그 피해 규모는 매우 컸다. 홍수 피해는 주로 하천 연안의 저지대의 광범위한 지역에 침수피해를 발생시켰으며, 일부 하천이 범람하였다. 서울 지역에는 1시간 최대 약 99,5mm의 집중호우가 발생하였다(표 1-3). 당시 강우 기간(14~15일 14시)의 누적강우량은 서울지방에서 약 310,1mm를 기록하였다. 또한 인천 220,5mm, 강화 156,5mm, 동두천 175,4mm, 양평 149,5mm, 철원 143,7mm, 홍천 168,0mm 등의 강우량을 기록하였다(표 2-3). 2001년

의 강우는 국지성이 매우 강하여 서울·경기도 지방에서도 30~310mm의 큰 편차를 보였다. 한편, 강원도 지방은 51~217mm, 경상남북도 지방은 10~231mm, 전라남북도 지방은 6~84mm 등의 분포를 보였다.

[표 1-3] 2001년 7월 14일~15일 주요 지역의 호우 특성 비교

| 구 분 | 1시간최다강우량(mm) | 총 강우량(mm) | 강우지속시간(hr) | 시간별평균강우량(mm/hr) | 연평균강우량(mm) | 연강우량대비(%) |
|-------|--------------|-----------|------------|-----------------|------------|-----------|
| 철 원 | 32.5 | 143.7 | 22.8 | 6.3 | - | |
| 동 두 천 | 68.0 | 175.4 | 22.7 | 7.7 | - | |
| 서 울 | 99.5 | 310.1 | 22.0 | 14.1 | 1369.8 | 23 |
| 인 천 | 71.3 | 220.5 | 18.1 | 12.2 | 1170.1 | 19 |
| 강 화 | 68.0 | 156.5 | 12.4 | 12.6 | 1321.1 | 12 |
| 양 평 | 57.5 | 149.5 | 14.0 | 10.7 | 1280.7 | 12 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제3권 제3호, 2001

표 1-4의 강우 기록치는 각 구청에서 측정한 시간 단위 기록에 근거한 것으로서, 10분 단위 기록으로부터 산정한 결과치보다는 다소 작을 것을 감안하더라도 당시의 강우가 기록적이었음을 보여 주고 있다. 특히 1~6시간 강우기록은, 서울의 대부분지역에서 우수배수시스템의 계획빈도 10년을 크게 상회함으로써, 서울지역 여러 곳에서 침수 피해가 불가피하였음을 알 수 있다. 2001년도의 집중호우 피해의 주요 문제점은 도시하천의 과다 점용, 도시개발에 따른 유출 요인의 증가, 하천연안 저지대의 주거 밀집지역, 계획빈도를 초과하는 강우의 빈번한 발생과 시민의식 4가지로 요약할 수 있다. 특히, 서울지역의 하수도는 경제성을 고려하여 시간 당 5~10년 빈도의 강우에 대비하는 규모로 설계되어 있으며, 빗물펌프장의 경우도 대부분 10년이 내의 규모로 건설되고 있다. 그러나 1996년, 1998년 및 금년 7월의 강우는 이러한 계획빈도를 크게 초과하는 규모이다. 2001년 7월 15일의 1시간 강우량 99.5mm는 그 빈도가 약 28년에 해당됨으로써 계획빈도를 크게 초과하였으며, 이로 인하여 발생한 일부 지역에서의 침수피해는 불가피한 것으로 보인다.

[표 1-4] 서울 주요 지역별 강우특성

| 구 분 | | 지속시간 | 1시간 | 2시간 | 3시간 | 6시간 | 24시간 | 비 고 |
|---|-----------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| ’01 년 7 월 15 일 실 측 강 우 | 서울기상청 | 우량(mm) | 90.0 | 142.5 | 201.4 | 247.4 | 273.4 | 시간단위산정 |
| | | 재현기간(년) | 28 | 44 | 105 | 136 | 7 | |
| | 의정부(건) | 우량(mm) | 74.0 | 125.0 | 160.0 | 185.0 | 202.0 | |
| | | 재현기간(년) | 9 | 20 | 23 | 18 | 2 | |
| | 퇴계원(건) | 우량(mm) | 87.0 | 169.0 | 234.0 | 294.0 | 315.0 | |
| | | 재현기간(년) | 23 | 148 | 348 | 683 | 14 | |
| | 관악구 (관악구청) | 우량(mm) | 100.0 | 191.0 | 245.0 | 265.0 | 361.0 | |
| | | 재현기간(년) | 54 | 406 | 521 | 248 | 31 | |
| | 강북구 (강북구청) | 우량(mm) | 73.0 | 136.0 | 197.0 | 266.0 | 294.0 | |
| | | 재현기간(년) | 9 | 33 | 90 | 257 | 10 | |
| | 성북구 (상월곡동) | 우량(mm) | 78.0 | 151.0 | 218.0 | 247.0 | 274.0 | |
| | | 재현기간(년) | 12 | 65 | 193 | 134 | 7 | |
| | 노원구 (공릉2동) | 우량(mm) | 76.0 | 152.0 | 214.0 | 245.0 | 270.0 | |
| | | 재현기간(년) | 11 | 68 | 167 | 126 | 7 | |
| | 서초구 (만포뽕프장) | 우량(mm) | 93.0 | 156.0 | 211.0 | 245.0 | 268.0 | |
| | | 재현기간(년) | 34 | 81 | 150 | 126 | 7 | |
| | 동대문구 (휘경뽕프장) | 우량(mm) | 76.0 | 146.0 | 209.0 | 242.0 | 262.0 | |
| | | 재현기간(년) | 11 | 52 | 139 | 114 | 6 | |
| | 성동구 (독성뽕프장) | 우량(mm) | 84.0 | 147.0 | 200.0 | 233.0 | 257.0 | |
| | | 재현기간(년) | 18 | 54 | 100 | 84 | 6 | |
| | 동작구 (흑석뽕프장) | 우량(mm) | 74.0 | 146.0 | 198.0 | 222.0 | 247.0 | |
| | | 재현기간(년) | 9 | 52 | 93 | 59 | 5 | |
| | 강남구 (강남구청) | 우량(mm) | 90.0 | 140.0 | 183.0 | 221.0 | 244.0 | |
| | | 재현기간(년) | 28 | 39 | 54 | 57 | 4 | |
| | 성북구 (성북구청) | 우량(mm) | 73.0 | 134.0 | 192.0 | 214.0 | 239.0 | |
| | | 재현기간(년) | 9 | 30 | 75 | 45 | 4 | |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제3권 제3호, 2001

2.1.3.2 2001년 7월 경기도 집중호우

2001년 7월 14일~15일 기간의 경기도 지역 피해우심시군의 강우기록은 다음 표 1-5와 같다. 포천군은 7월 14일 24시~7월 15일 01시 사이에 시간강우량 93.0mm를 기록하였으며, 광명시는 7월 15일 02시~7월 15일 03시 사이에 시간강우량 104.0mm의 기록적인 강우가 발생하였다. 또한 안양시, 구리시, 남양주시, 가평군은 7월 15일 3시~7월 15일 04시 사이에 시간강우량 79.0mm, 83.0mm, 64.0mm, 51.0mm를 각각 기록하였다. 시간강우기록을 살펴볼 때 2001년 7월 경기도 집중호우는 새벽에 단기간에 집중되었고, 강우의 중심이 경기 북단에서 남쪽으로 이동하였음을 알 수 있으며, 인접한 시·군 간에도 강우량의 차이가 큰 것으로 나타났다. 또한 강우시작과 함께 강우가 집중하는 전방 집중형 강우형태를 가지고 있어 도시배수에 있어서는 가장 열악한 강우가 발생하였다. 빈도분석 결과(표 1-6) 광명시의 1시간 강우량 104mm는 100년 빈도, 포천군의 1시간 강우량 93mm는 200년 빈도로 나타났으며, 2시간 지속시간의 경우 구리시는 155mm로 150년 빈도, 포천군은 160mm로 200년 빈도 이상인 것으로 나타났다. 또한 3시간 및 6시간 지속시

간의 경우에도 구리시와 포천군은 200년 빈도 이상인 것으로 나타났다. 2001년 7월 14~15일 기간의 지속기간별 강우량 빈도분석 결과 광명시, 구리시, 포천군은 하천시설물 및 도시내수배제시설의 설계빈도를 훨씬 초과하는 강우가 내린 것을 알 수 있으며, 안양시와 남양주시도 도시내수배제시설의 설계빈도를 초과하는 강우가 있었음을 알 수 있다.

[표 1-5] 시군별 강우량 현황

| 시 군 일 시 | 안양시 | | 광명시 | | 구리시 | | 남양주시 | | 포천군 | | 가평군 | |
|------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | 시간 | 누가 | 시간 | 누가 | 시간 | 누가 | 시간 | 누가 | 시간 | 누가 | 시간 | 누가 |
| 7월14일 24시 | | 15.0 | | 37.0 | | 32.0 | | 23.0 | | 103.0 | | 25.0 |
| 7월15일 01시 | 1.0 | 1.0 | 52.0 | 52.0 | 4.0 | 4.0 | 2.0 | 2.0 | 93.0 | 93.0 | 0.0 | 0.0 |
| 02시 | 25.0 | 26.0 | 35.0 | 87.0 | 68.0 | 72.0 | 36.0 | 38.0 | 48.0 | 141.0 | 7.0 | 7.0 |
| 03시 | 41.0 | 67.0 | 104.0 | 191.0 | 72.0 | 144.0 | 43.0 | 81.0 | 37.0 | 178.0 | 38.0 | 45.0 |
| 04시 | 79.0 | 146.0 | 21.0 | 212.0 | 83.0 | 227.0 | 64.0 | 145.0 | 25.0 | 203.0 | 51.0 | 96.0 |
| 05시 | 8.0 | 154.0 | 7.0 | 219.0 | 23.0 | 250.0 | 8.0 | 153.0 | 3.0 | 206.0 | 13.0 | 109.0 |
| 06시 | 7.0 | 161.0 | 2.0 | 221.0 | 20.0 | 270.0 | 21.0 | 174.0 | 0.0 | 206.0 | 10.0 | 119.0 |
| 12시 | | 180.0 | | 233.0 | | 283.0 | | 193.0 | | 215.0 | | 186.0 |
| 24시 | | 184.0 | | 240.0 | | 291.0 | | 201.0 | | 221.0 | | 190.0 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제3권 제3호, 2001

[표 1-6] 지속기간별 강우량 빈도분석 결과

| 시군명 | 구 분 | 1 hr | 2 hr | 3 hr | 6 hr | 12 hr | 24 hr |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 안양시 | 강우량 | 79 | 120 | 145 | 161 | 183 | 199 |
| | 빈도(년) | 20 | 40 | 30 | 10 | 10 | 5 |
| 광명시 | 강우량 | 104 | 139 | 191 | 226 | 233 | 276 |
| | 빈도(년) | 100 | 50 | 200 | 80 | 20 | 20 |
| 구리시 | 강우량 | 83 | 155 | 223 | 270 | 285 | 323 |
| | 빈도(년) | 20 | 150 | 200이상 | 200이상 | 80 | 30 |
| 남양주시 | 강우량 | 64 | 107 | 143 | 182 | 199 | 224 |
| | 빈도(년) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 20 |
| 포천군 | 강우량 | 93 | 160 | 208 | 273 | 307 | 324 |
| | 빈도(년) | 200 | 200이상 | 200이상 | 200이상 | 80 | 10 |
| 가평군 | 강우량 | 51 | 89 | 102 | 136 | 188 | 215 |
| | 빈도(년) | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제3권 제3호, 2001

2.1.3.3 2005년 8월 전라북도, 경상남도 집중호우

2005년 8월 2~3일에 전라북도 지역을 중심으로 집중호우가 발생하였다. 정읍시는 이번 호우기간 동안 가장 많은 강우량을 기록한 지역으로 정읍시 관내 읍면동 및 AWS의 총 강우량 평균은 241mm로 나타났으며 정읍시 신태인 읍에서는 총 강우량 430mm로 최고 기록을 나타내었다. 또한 최대시우량을

분석한 결과 정읍시의 영월면에서는 최대시우량 108mm로서 500년 빈도 이상의 국지성 집중호우가 발생하였다. 또한, 부안군 줄포면의 강우량은 8월 2~3일의 강우기간 중 8시간 동안 354.5mm의 기록적인 폭우로 부안군 관내 평균 강우량 192mm의 2배에 가까운 기록을 나타냈으며, 최대시우량은 8월 3일 81.5mm로 관측되었다. 그리고 전주시에서는 총 강우량 310mm, 6시간 최대 강우량 203mm로 500년 빈도 이상의 집중호우, 진안군 총 강우량 218mm, 장수군 총 강우량은 계북면 327mm, 천천면 318mm, 장계면 279mm가 발생하였고 무주군 총 강우량은 344mm, 최고시우량 68mm로 무주군 유사 이래 최고의 강우기록을 나타내었고 대부분의 전북 지역에서 200mm 이상의 강우가 관측되었다.

또한, 2005년 8월 8~9일 집중호우로 인해 경상남도 5개 시·군 지역에 많은 피해가 발생하였다. 8월 8일 사천, 고성 일대 호우주의보가 발령되었으며, 남해군 설천면 지역에 시우량 85mm(8월 8일 14시 기준), 일우량 449mm의 집중호우로 산사태가 발생하였고 비가 내리면서 홍수량 증가로 하천이 범람하여 제방, 호안 및 하천 시설물이 유실되는 많은 피해가 발생하였다. 또한, 고현면 지역에서는 시우량 58mm(8월 8일 14시 기준), 일우량 354mm 집중호우로 대사천이 범람하면서 하류부 농경지가 침수되는 등 크고 작은 호우피해가 발생하였다. 총강우량 분석 결과 김해시는 162mm로 5년 빈도에 불과했으나 남해시의 경우 449mm로 500년 빈도에 해당할 정도로 국지성 집중호우가 발생하였으며, 최대시우량은 고성군의 경우 44mm로 3년 빈도에 불과하나 남해시의 경우 85mm로 80년 빈도에 해당하면서 지역별로 현격한 강우량의 차이를 보였다(표 1-7).

[표 1-7] 2005년도 8월 경상남도 강우량 현황

| 지역 | 총강우량(mm) | 빈도(년) | 최대시우량(mm/hr) | 빈도(년) |
|----|----------|-------|--------------|-------|
| 김해 | 162 | 5 | 96 | 50 |
| 고성 | 242 | 30 | 44 | 3 |
| 사천 | 213 | 20 | 64 | 10 |
| 진주 | 138 | 30 | 58 | 10 |
| 남해 | 449 | 500 | 85 | 80 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제7권 제3호, 2005

2.1.3.4 2006년 7월 전라남도 태풍 및 집중호우

2006년 7월 9일~10일 기간 중 제3호 태풍 에위니아로 인하여 전라남도 순천시, 여수시, 고흥군에 집중호우가 발생하였다. 순천시는 순천관측소 기준으로 2006년 7월 9일에 30.0mm, 7월 10일에 135.5mm의 강우가 발생하였다. 순천시 관내 12개 읍·면·동의 2006년 7월 10일 강우관측결과 1일 누계치는 송광면에서 최대 222mm가 관측되었으며, 순천시 평균은 1일 누계 181.2mm로 나타났다. 표 1-8의 빈도분석결과를 보면 1시간 강우량 기준으로 낙안면에서 8년 빈도로 최대값을 나타냈고 대체적으로 강우규모는 5년 빈도 이하로 나타났으며, 24시간 강우량을 기준으로 보면 3년~7.5년의 빈도값을 나타내었다. 따라서 빈도분석결과 강우규모가 10년 빈도 이하이므로 순천시의 피해는 집중호우 보다는 하천의 구조적 원인 등의 기인한 것으로 판단된다.

[표 1-8] 빈도분석 결과(전라남도 순천시)

| 지 역 | 빈 도 분 석 | | | |
|-----|------------|--------|-------------|--------|
| | 1시간강우량(mm) | 빈 도(년) | 24시간강우량(mm) | 빈 도(년) |
| 승주읍 | 43.0 | 4.5 | 203.9 | 6.0 |
| 송광면 | 41.0 | 4.0 | 222.9 | 7.5GUM |
| 외서면 | 39.0 | 3.5 | 188.8 | 5.5분포형 |
| 낙안면 | 57.0 | 8.0 | 200.8 | 6.0채택 |
| 별량면 | 47.0 | 5.0 | 164.7 | 4.0 |
| 해룡면 | 49.0 | 5.5 | 198.8 | 6.0 |
| 서 면 | 38.0 | 3.5 | 172.7 | 4.5 |
| 황전면 | 45.0 | 4.5 | 169.7 | 4.5 |
| 월등면 | 46.0 | 5.0 | 160.7 | 4.0 |
| 주암면 | 28.0 | 2.5 | 136.1 | 3.0 |

주) 주암면은 순천관측소 자료임

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제8권 제3호, 2006

그리고 여수시는 2006년 7월 9일 19:00시에서 10일 22시30분까지 총 2일간 강우량은 263mm가 관측되었다. 여수시 관내 10개 읍·면·동의 동기간 강우관측결과 2일 누계치는 삼일동에서 최대 242mm가 관측되었으며, 여수시 평균은 2일 누계 187.8mm로 나타났다. 표 1-9의 빈도분석결과를 보면 1시간

강우량 기준으로 돌산읍에서 25년 빈도로 최대값을 나타내었으며 대체적으로 강우규모는 20년 빈도 이하로 나타났고 24시간 강우량을 기준으로 보면 대부분의 경우 15년 빈도 이하의 값을 나타내었다. 따라서, 여수시의 피해는 강우 총량의 과다보다는 짧은 시간(1시간 이하)에 발생한 집중호우의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

[표 1-9] 빈도분석 결과(전라남도 여수시)

| 지 역 | 빈 도 분 석 | | | |
|-----|------------|--------|-------------|--------|
| | 1시간강우량(mm) | 빈 도(년) | 24시간강우량(mm) | 빈 도(년) |
| 돌산읍 | 72.00 | 25.0 | 260.1 | 13.5 |
| 소라면 | 72.00 | 25.0 | 203.1 | 4.5 |
| 율촌면 | 49.00 | 4.0 | 269.2 | 16.0 |
| 화양면 | 49.00 | 4.0 | 201.9 | 4.5 |
| 남 면 | 48.00 | 3.5 | 240.0 | 9.0 |
| 화정면 | 38.00 | 2.0 | 164.7 | 2.5 |
| 삼산면 | 69.00 | 20.0 | 265.1 | 14.5 |
| 학 동 | 69.00 | 20.0 | 267.2 | 15.5 |
| 서강동 | 57.00 | 7.0 | 232.0 | 8.0 |
| 삼일동 | 59.00 | 8.5 | 243.7 | 10.0 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제8권 제3호, 2006

또한, 고흥군은 2006년 7월 10일 1일간 강우가 발생하였으며 총강우량은 236mm로 나타났다. 고흥군 관내 16개 읍·면의 동기간 강우관측결과 1일 누계치는 군청에서 최대 230mm가 관측되었으며, 고흥군 평균은 1일 누계 179.5mm로 나타났다. 표 1-10의 빈도분석결과를 보면 1시간 강우량 기준으로 군청에서 7년 빈도로 최대값을 나타내었으며 대체적으로 강우규모는 5년 빈도 이하로 나타났고, 24시간 강우량을 기준으로 보면 대부분의 경우 5년 빈도 이하의 값을 나타내었다. 따라서, 고흥군의 피해는 집중호우보다 다른 원인에 기인한 것으로 판단된다.

[표 1-10] 빈도분석 결과(전라남도 고흥군)

| 지 역 | 빈 도 분 석 | | | |
|-----|------------|--------|-------------|--------|
| | 1시간강우량(mm) | 빈 도(년) | 24시간강우량(mm) | 빈 도(년) |
| 군 청 | 67.0 | 7.0 | 237.0 | 5.0 |
| 도양읍 | 61.0 | 5.5 | 197.9 | 3.5 |
| 풍양면 | 47.0 | 3.0 | 178.8 | 3.0 |
| 도덕면 | 34.0 | 2.0 | 153.7 | 3.0 |
| 금산면 | 39.0 | 2.5 | 149.2 | 2.5 |
| 도화면 | 46.0 | 3.0 | 193.4 | 3.5 |
| 포두면 | 57.0 | 4.5 | 234.0 | 5.0 |
| 봉래면 | 62.0 | 5.5 | 213.7 | 4.0 |
| 동일면 | 62.0 | 5.5 | 189.8 | 3.5 |
| 점암면 | 47.0 | 3.0 | 184.3 | 3.5 |
| 영남면 | 55.0 | 4.5 | 214.5 | 4.5 |
| 과역면 | 55.0 | 4.5 | 214.9 | 4.5 |
| 남양면 | 39.0 | 2.5 | 187.3 | 3.5 |
| 동강면 | 38.0 | 2.5 | 171.7 | 3.0 |
| 대서면 | 43.0 | 3.0 | 195.3 | 3.5 |
| 두원면 | 43.0 | 2.0 | 195.3 | 3.5 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제8권 제3호, 2006

2.1.3.5 2010년 9월 서울 및 인천 집중호우

2010년 9월의 서울의 집중호우는 주로 서울 중부와 남부에 집중되었으며, 저지대 상습침수지역인 강서구 화곡동, 사당 4거리뿐만 아니라, 광화문 세종로 사거리가 침수되는 등 많은 피해를 발생시켰다. 9월 21~22일 이틀 간 집중호우로 인한 누적강수량은 259.5mm를 기록하였다. 특히 강서구 화곡동의 경우 1시간 최대강수량 98.5mm를 기록하였다. 이는 약 50년 빈도에 해당하는 강우량이며, 13~16시 사이에 발생된 224mm의 강수는 약 500년 빈도에 해당하는 지속시간 3시간 강우량이다(문영일&윤선권, 2010). 그러나 관악구는 서울대 내에 있는 기상청 강우관측기록과 6시간 최대강우량이 100mm 정도 차이가 있었으며, 양천구도 기상청 자료와 신월5동 강우기록이 3시간 강우량에서 40mm 정도 차이가 있었고 재현기간은 639.8년을 기록하였다. 관악구는 설계기준을 초과하는 강우와 고지대에서 빠르게 유출되는 노면수, 그리고 하수관거 용량부족 및 역류 등 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 저지대 주

거지가 침수되었다. 특히, 관악구는 도림천 서측 지반고가 14.1m인데 반해 홍수위가 15.5m(30년 빈도)를 초과하면서 도림천으로 직방류하는 고지배수로가 배수역할을 하지 못하였다(방재연구지, 2010). 따라서 이를 지역별로 살펴보면, 일 누적강우량이 도봉구 방학동에는 86.5mm를 기록한 반면, 강서구의 화곡동에서는 287.5mm를 기록하는 등 지역적으로 강수량의 편차가 최고 200mm이상을 나타내는 전형적인 국지성 집중호우 형태를 보였다(배재현, 2012).

표 1-11을 보면 인천의 경우 서구의 1시간 최대강우량은 81.0mm로 재현기간 28.5년, 3시간 최대강우량은 324.4mm로 재현기간 324.4년을 기록하였으며, 기상청 강우관측소가 없는 계양구, 부평구, 남구, 남동구 등도 서울과 유사하게 지역적으로 국지성 집중호우가 발생했을 것으로 예측되었다(방재연구지, 2010).

[표 1-11] 인천시 강우강도 및 침수세대 분석

| 구 별 | 침수 세대 | 강우량(기상청 AWS 1시간 간격 자료) | | | | | | | |
|-----|-------|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | 1hr | | 3hr | | 6hr | | 24hr | |
| | | 강우량 | 빈도 | 강우량 | 빈도 | 강우량 | 빈도 | 강우량 | 빈도 |
| 서 구 | 1,089 | 81.0 | 28.5 | 203.0 | 324.4 | 251.0 | 204.8 | 267.5 | 6.3 |
| 중 구 | 101 | 45.8 | 2.8 | 107.6 | 8.0 | 112.7 | 3.6 | 127.2 | 1.9 |

출처: 국립방재연구원, 방재연구지 제12권 제4호, 2010

2.1.3.6 2011년 7월 서울 집중호우

2011년 7월 26~28일에 발생한 집중호우의 경우, 강남지역을 포함한 서울 남부지역에 많은 피해를 주었다. 특히, 이로 인해 우면산 산사태가 발생함으로써 18명이 사망하고 남부순환로 방배동 구간이 이를 이상 통제되기도 했다. 3일간 누적강수량은 595mm였으며, 1시간 최대강수량 기준으로 관악구 107mm, 서초구 85.5mm, 강남구 71mm를 기록하였다. 특히, 3일간 내린 595mm의 강수량은 평년연강수량(1,450.5mm)의 41%에 이르는 막대한 양이다(신상영 등, 2011). 2011년 집중호우 또한 지역적으로 큰 차이가 나는 국지적 양상을 보였는데, 서남권의 관악구가 107mm였던 반면, 동북권의 노원구는 3.5mm에 불과하였다.

2.2 현재 기후현황

2.2.1 여름철 강수량 및 집중호우 경향

심우배와 지승희(2012)는 최근 30년 간 우리나라 여름철 누적강수량 및 집중호우, 극단적 강수가 증가 추세에 있다고 하였다. 1980년대에서 2011년대까지의 평균 여름철 누적강수량과 집중호우 일수는 점차 증가하는 것으로 나타났다(표 1-12).

[표 1-12] 최근 30년 여름철 누적강수량 및 집중호우 경향

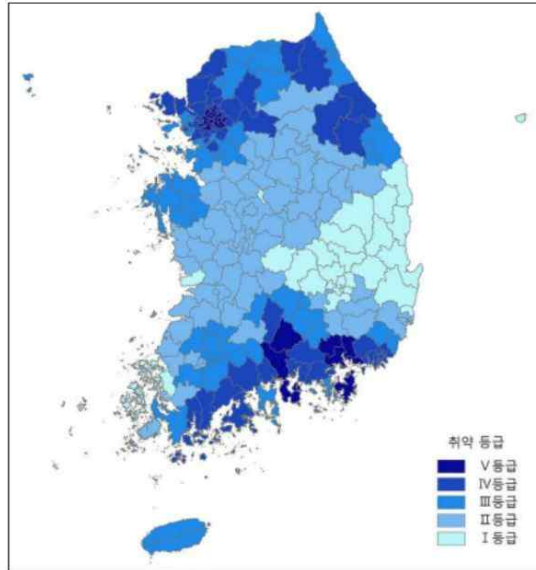
| 구분 | 평균 여름철 누적강수량 (mm) | 집중호우 일수 | | | |
|--------|-------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 100mm/일 이상 | 30mm/h 이상 | 40mm/h 이상 | 50mm/h 이상 |
| 2011년 | 1048.1 | 102 | 133 | 69 | 23 |
| 2000년대 | 768.7 | 54 | 82 | 37 | 14 |
| 1990년대 | 713.7 | 49 | 70 | 29 | 13 |
| 1980년대 | 694.5 | 43 | 60 | 26 | 10 |

출처: 심우배, 지승희, 기후변화에 따른 폭우재해 취약성 분석 및 도시방재방안, 국토연구원 국토정책 Brief, 2012

2.2.2 기후변화에 따른 도시의 재해 취약성 분석

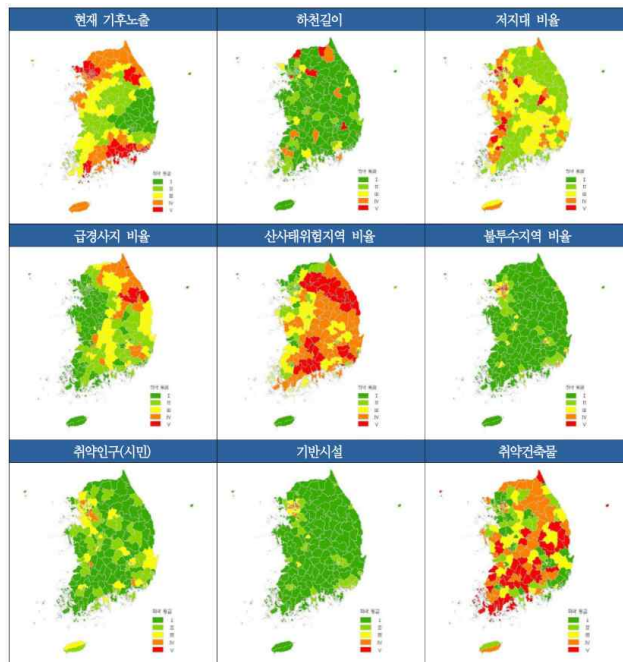
심우배와 지승희(2012)는 기후변화에 따른 도시의 재해 취약성 분석을 하였는데 현재 상태의 취약성 분석 결과, 전국 232개 지자체(창원시 통합이전 기준)중에서 88개(37.9%) 지자체가 폭우재해 취약지역(Ⅳ, Ⅴ 등급)으로 나타났으며, 서울을 포함한 수도권, 강원권 및 지리산을 중심으로 한 호남·영남권의 남해안 일대가 취약한 것으로 나타났다(그림 1-8).

폭우재해 취약지역(Ⅳ, Ⅴ 등급)의 지자체로는 수도권이 48개(54.5%)로 가장 많으며, 영남권 28개(31.8%), 호남권 7개(7.9%), 강원권 5개(5.6%)이며, 해당 취약지역 모두가 폭우에 대한 기후노출이 높고, 인구, 기반시설 등이 집중된 대도시가 상대적으로 취약한 것으로 나타났다. 수도권 취약지역은 저지대 불투수비율, 폭우재해에 취약한 시민, 기반시설 등의 비중이 매우 높게 나타났으며, 강원권은 하천, 급경사지, 산사태위험지역비율 등의 비중이 매우 높게 나타났다(그림 1-9).



[그림 1-8] 기후변화 폭우재해 취약성

출처: 심우배, 지승희, 기후변화에 따른 폭우재해 취약성 분석 및 도시방재방안, 국토연구원 국토정책 Brief, 2012



[그림 1-9] 기후변화 폭우재해 취약성 세부

출처: 심우배, 지승희, 기후변화에 따른 폭우재해 취약성 분석 및 도시방재방안, 국토연구원 국토정책 Brief, 2012

2.3 미래 기후현황

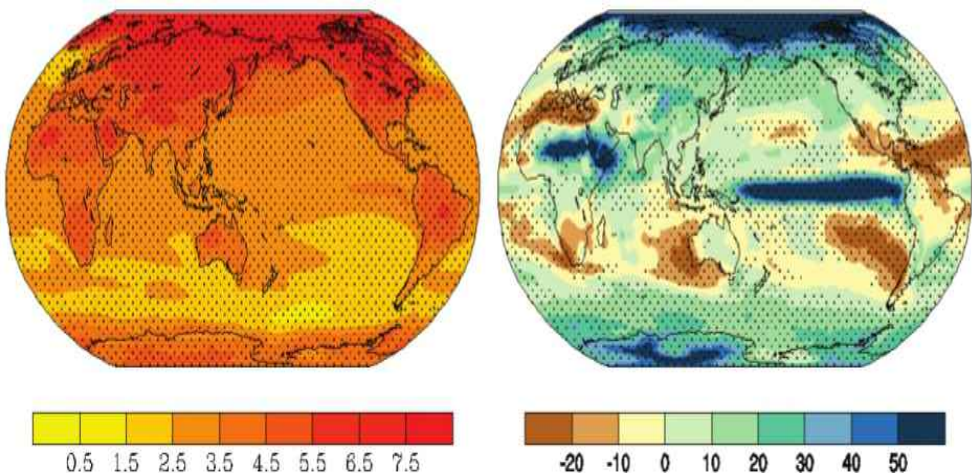
2.3.1 전지구 미래전망

오늘날 기온변화 속도는 자연적으로 변화가 가장 컸던 빙하기 말보다 30배 빠르다는데 주목할 필요가 있다. 다음 세기 예상되는 전 지구 평균기온 2~5℃ 상승은 인간 활동으로 변화되는 기후가 자연변화 속도의 수십 배에 달한다는 것을 의미하기 때문이다. 우리가 일반적으로 감지할 수 있는 것은 평균적인 기후변화가 아니라 홍수, 가뭄, 폭염, 한파와 같은 극한 현상인 것이다. 이 중 가장 큰 피해를 일으키는 변화는 물 순환과 관련되어 있다. 전 지구 평균 기온이 1℃ 상승하면 대기 중 수증기 함유량이 증가하고 이에 따라 강수량이 약 1.5% 늘어나지만, 이 강수량의 증가는 전 지구적으로 시간과 공간에 따라 고르게 나타나지는 않는다(그림 1-10). 일반적으로 온난화에 의해 물 순환은 강화되어 현재 비가 많이 오는 지역에서는 상승기류가 발달해 더욱 많은 비가 내리고 이에 따라 호우의 가능성이 증가된다.

국립기상연구소에서는 최근 국제 공인된 새로운 온실가스 시나리오(RCP, Representative Concentration Pathway)²⁾에 근거하여 미래 기후변화 시나리오를 산출한 바 있다. 온실가스 시나리오란 RCP 시나리오와 SRES 시나리오 2가지 종류가 있으며, RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영한 것이다. RCP에서 4가지 대표 온실가스 농도는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5가 있다. RCP란 IPCC 5차 평가 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였으며 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 '대표(Representative)'라는 표현을 사용하였다. 그리고 온실가스 배출 시나리오는 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 '경로(Pathways)'라는 의미가 포함된다. RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력으로 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^2 이고 지상에 도달되는 태양복사가 약 $238W/m^2$ 이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당된다.

2) - RCP 2.6: 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우
- RCP 4.5: 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우
- RCP 6.0: 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우
- RCP 8.5: 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우(BAU 시나리오)

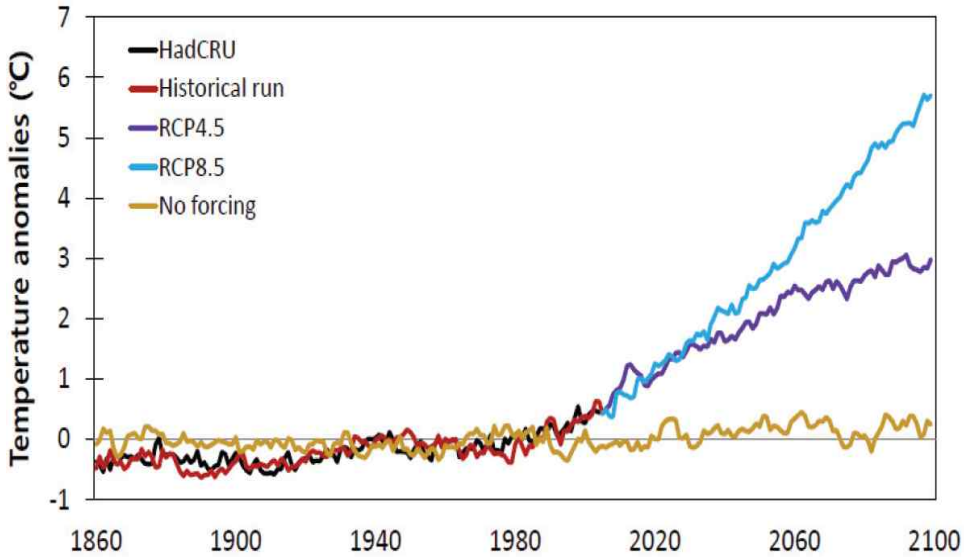
이 결과에 따르면 20세기 말에 비해 21세기 말에 온실가스 감축이 없을 경우(RCP 8.5) 지구 평균기온은 4.8℃ 상승하고, 온실가스 감축을 할 경우(RCP 4.5)에는 2.8℃ 상승할 것으로 전망하였다(그림 1-11). 그리고 강수는 현재기후를 기준으로 그 변화를 퍼센트(%)로 표현하면 강수는 RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 말에 약 4.5%, RCP 8.5 시나리오에서는 약 6.2%가 증가될 것으로 전망되었다(그림 1-12). 기온과 강수는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 모두 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP 8.5에서 상승폭이 더 높게 나타났다. 전지구 미래기후의 전망을 공간적으로 살펴보면, 대부분의 지역에서 기온이 상승할 것으로 나타났지만 강수의 경우에는 지역적으로 차이를 보였다(그림 1-13) 강수의 미래 변화에서 연평균, 여름철, 겨울철의 영역 평균된 값은 RCP 4.5 시나리오에서는 각각 4.5%, 3.9%, 4.9%로 나타났고, RCP 8.5 시나리오에서는 6.2%, 4.9%, 7.3%로 나타나 여름철보다 겨울철 강수가 뚜렷하게 증가할 것으로 나타났다. 또한, 두 시나리오에서 모두 전지구 평균 강수는 증가할 것으로 나타났지만 지역적으로는 증감 지역으로 대비되었다. 연평균 강수량은 북아프리카와 남유럽, 그리고 호주지역에서 상당한 감소가 전망되었다. 고농도 시나리오일수록 강수가 증가하는 지역은 더 증가하고, 감소하는 지역은 더 감소하는 것으로 나타났다.



[그림 1-10] 20세기말(1971~2000) 대비 21세기말(2071~2100)의 기온(℃, 왼쪽)과 강수량(% , 오른쪽)

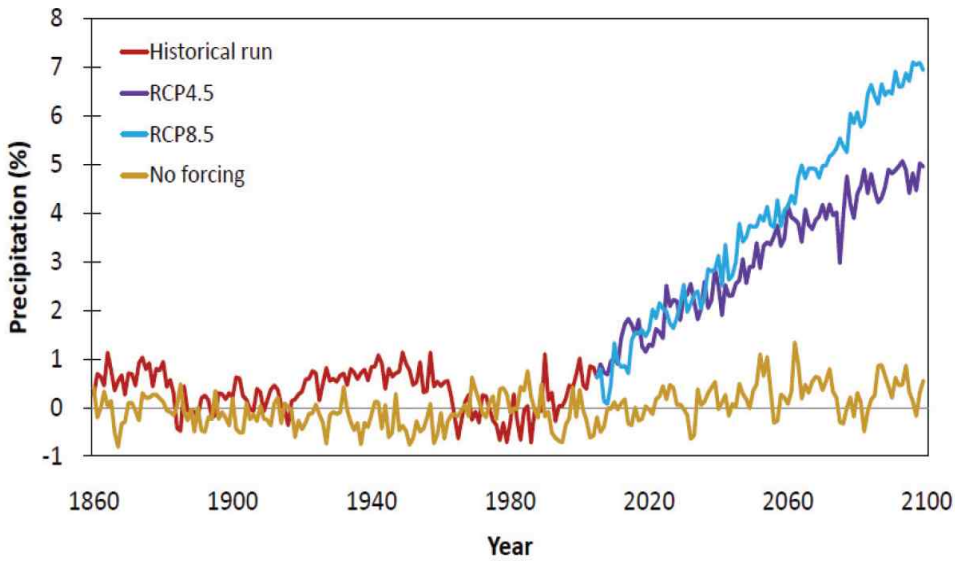
주) 검은 점은 신뢰수준 99%(기온)와 90%(강수량)을 의미한다.

출처: 조천호, 기후변화의 과거와 미래, 재난안전, 제14권 제4호, 2012



[그림 1-11] 1971~2000년 대비 1860~2099년 1.5m 기온의 변화³⁾

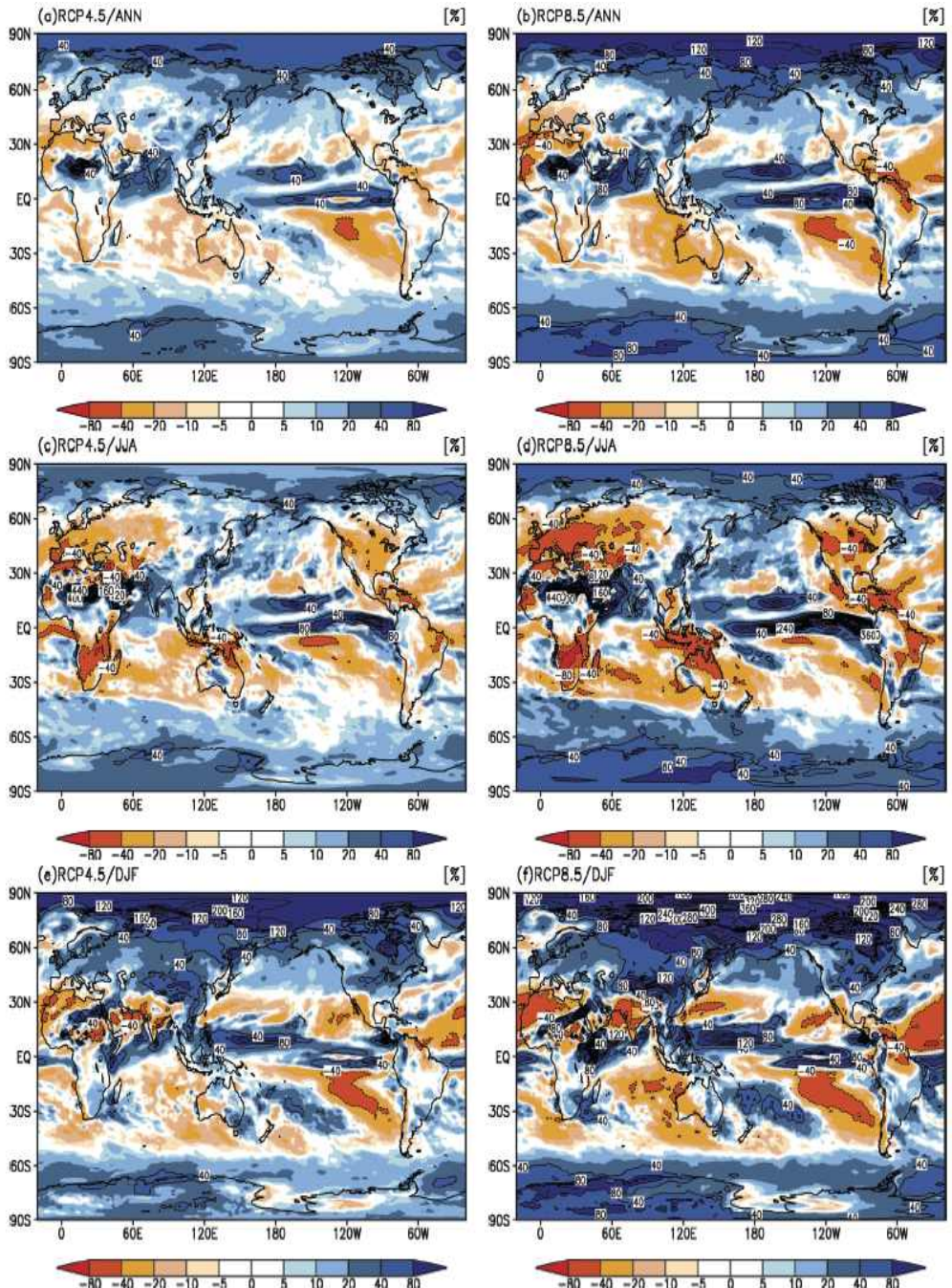
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011



[그림 1-12] 1971~2000년 대비 1860~2099년 강수의 변화³⁾

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

3) 검정색, 빨간색, 보라색, 파란색, 노란색은 각각 관측(HadCRU), 과거모의실험, RCP 4.5 시나리오, RCP 8.5 시나리오, 1850년 강제력으로 고정된 제어실험을 나타낸다.



[그림 1-13] RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 1971~2000년 대비 2070~2099년의 강수분포⁴⁾

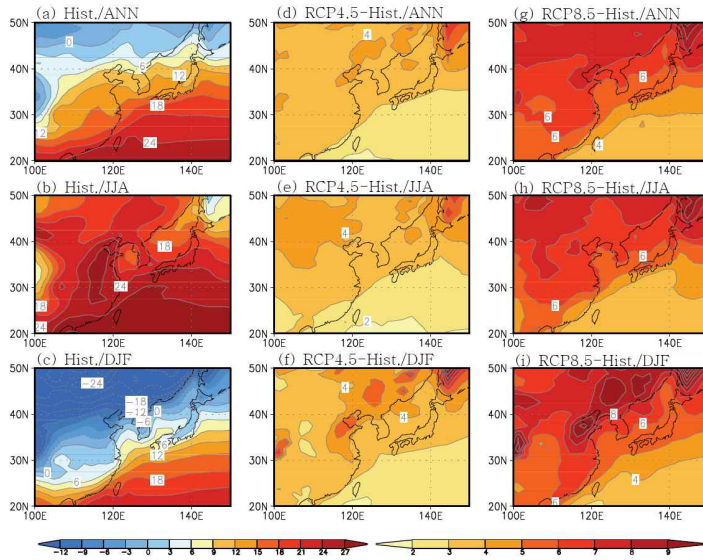
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

4) (a), (b): 연평균 (c), (d): 여름철, (e), (f): 겨울철

2.3.2 동아시아 기후변화 전망

많은 선행연구들에서 지구온난화에 따른 동아시아 지역의 기온 상승과 강수량 증가를 전망하고 있다(Min et al., 2006; Lu et al., 2007; Moon et al., 2008; Yun et al., 2008). HadGEM2-AO모델을 이용하여 동아시아지역의 미래기후를 전망하였다. 그림 1-14, 1-15에 현재기후를 1971~2000년 30년 간의 기후값으로 선정하고 미래기후는 대표농도경로(RCP) 시나리오인 RCP 4.5와 RCP 8.5에 근거하여 2070~2099년 30년 간의 기후값으로 산정하여 현재기후 대비하여 변화를 나타내었다. 연평균, 여름철, 겨울철 모두 동아시아 전 지역에서 온도상승을 전망하고 있으며 특히 고위도에서의 온도상승이 크게 나타날 것이라 전망된다(그림 1-14). 동아시아 영역 평균된 값의 변화를 살펴보면 연평균값은 RCP 4.5는 3.3℃, RCP 8.5는 5.7℃ 상승한다. 또한, 여름철은 각각 3.3℃, 5.7℃ 상승하며 겨울철은 3.5℃, 6.1℃ 상승하여 여름철보다는 겨울철 온도상승이 클 것으로 전망된다.

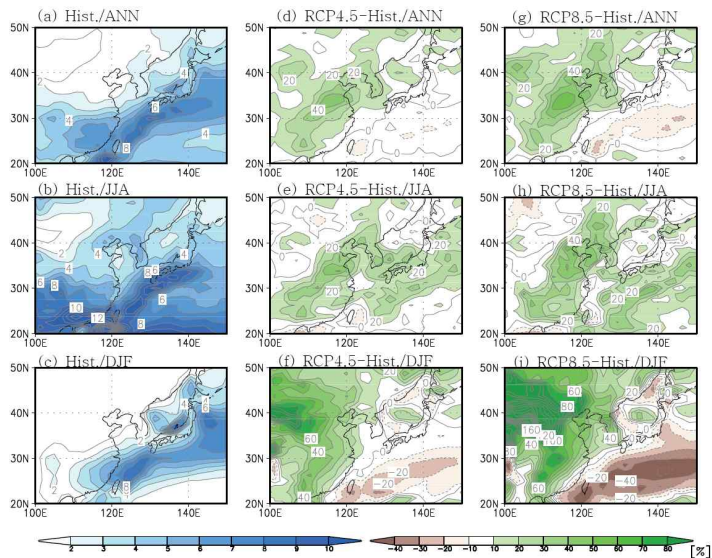
강수 전망에 있어서는 여름철엔 동아시아 지역 대부분에서 강수증가가 나타나고 있다. 반면 겨울철에는 남중국해에서 일본 남해상에 이르는 지역에서 강수량이 감소하는 것으로 전망하고 있으며 나머지 지역에서는 전반적으로 강수량이 증가하는 것으로 나타났다(그림 1-15). 동아시아 영역 평균된 강수량의 변화를 살펴보면, 연평균값은 RCP 4.5는 5.0%, RCP 8.5는 5.5% 증가한다. 또한, 여름철은 각각 10.8%, 15.3% 증가하며 겨울철은 0.6% 증가, 7.3% 감소가 전망된다. 겨울철엔 시나리오에 따라 강수량의 변화가 거의 없거나 RCP 8.5의 경우는 오히려 감소하는 것으로 전망하고 있는 반면 여름철은 강수량이 큰 폭으로 증가하고 있으며 강제력이 강화될수록 강수량이 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 1-14] 동아시아 지역의 기온 변화⁵⁾

주) ANN: 연평균, JJA: 여름철 평균, DJF: 겨울철 평균, 단위: $^{\circ}\text{C}$

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011



[그림 1-15] 동아시아 지역의 강수량 변화

주) (a)~(c) 단위: mm/day, (e)~(i) 변화율 단위: %

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

5) (a, 연평균) (b, 여름철), (c, 겨울철): 현재기후(1971~2000)에서의 온도의 기후값

(e 연평균) (f, 여름철), (g, 겨울철): RCP 4.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후(2070~2099)의 기온 변화

(g, 연평균) (h, 여름철), (i, 겨울철): RCP 8.5에 근거한 현재기후 대비 미래기후(2070~2099)의 기온 변화

2.3.3 우리나라 기후변화 전망

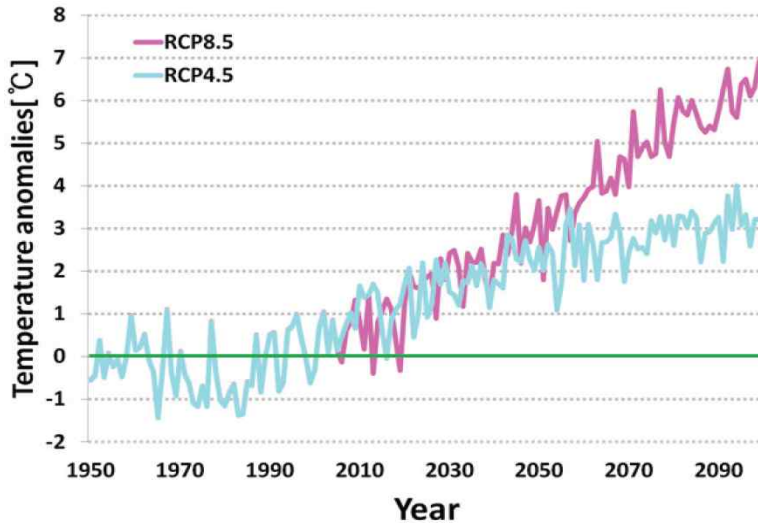
우리나라가 위치한 동아시아 지역은 복잡한 지리적 특성 때문에 기후 변동성이 크며, 최근에는 기후변화에 따라 극한 기후의 발생 빈도 및 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 우리나라 상세 기후변화를 전망하기 위해 현재 기후(1980~2009년)를 기준으로 21세기 말까지의 변화를 살펴보았다. 먼저, 1950년부터 2099년까지 한반도 영역을 평균한 기온과 강수의 변화를 그림 1-16과 1-17에 나타냈다. 기온의 경우에는 증가추세가 뚜렷이 나타나며, 현재와 비교하여 RCP 4.5 시나리오 하에서는 5.6℃까지 상승할 것으로 전망된다.

반면에, 강수의 경우에는 증가 추세가 약하게 나타나며, 21세기 후반에는 RCP 4.5 시나리오 하에서는 15.8%, RCP 8.5 시나리오 하에서는 18.7%가 증가할 것으로 전망된다. 이와 같이, 기온과 강수 모두 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 상승추세를 보이고 있으며, 고농도 시나리오인 RCP 8.5에서 상승 폭이 더 높게 나타난다. 우리나라 상세 기후변화를 공간적으로 살펴보면, 대부분의 지역에서 기온이 상승(그림 1-18~1-19)하고, 강수가 증가(그림 1-20~1-21)할 것으로 전망된다.

기온의 미래변화에서 21세기 전반(2020~2049)과 21세기 후반(2070~2099) 시기로 구분하여 한반도 평균값을 살펴보면, RCP 4.5 시나리오에서는 각각 1.8℃, 3.0℃ 상승하고, RCP 8.5 시나리오에서는 2.2℃, 5.6℃ 상승한다. 기온의 상승은 전체적으로 비슷하지만 남부 지역보다는 중북부 지역에서 크다. 한편, 강수의 미래 변화에서 21세기 전반과 21세기 후반에서의 한반도 평균 변화값이 RCP 4.5 시나리오에서는 각각 8.4%, 15.8% 증가로 전망되고, RCP 8.5 시나리오에서는 5.2%, 18.7% 증가로 전망되어, 21세기 말에 가까워질수록 강수 증가가 뚜렷하다. 강수의 증가는 지역적으로 변화의 폭이 매우 크며, 전반적으로 남해안과 중서부 지역에서 두드러지게 나타난다. 우리나라 기온과 강수의 미래변화를 비교하면 중요한 특징이 나타난다. 기온의 경우에는 경년 변동성 및 공간 변동성이 상대적으로 작고 점진적인 증가 추세는 매우 강하다. 반면에, 강수의 경우에는 경년·공간 변동성이 크고 증가 추세는 상대적으로 약하다. 그러므로 강수에 대한 미래 전망은 기온과 비교해 불확실성이 크다고 할 수 있다.

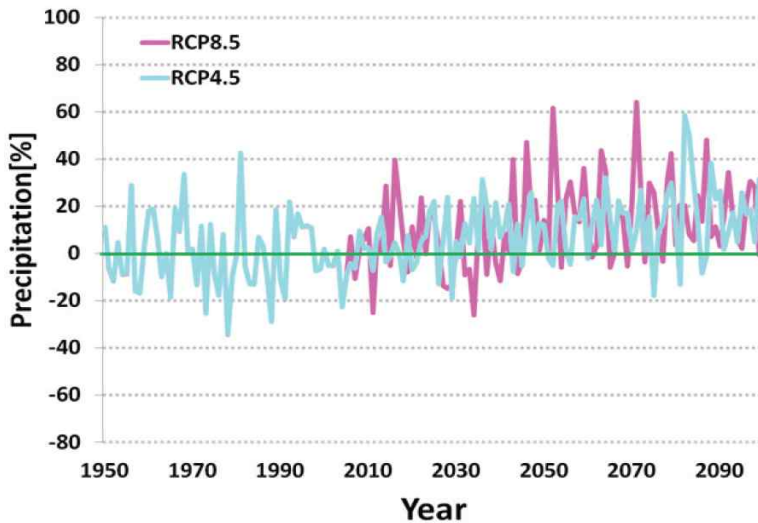
그리고 표 1-13에 20년 동안의 RCP 시나리오별, 시기별, 계절별 한반도 평

균 기온 및 강수의 미래변화 전망을 나타내었다. 우리나라는 기온 상승에 따라 겨울이 짧아지고 여름이 길어지며, 폭염과 열대야, 집중 호우의 발생 빈도와 강도는 증가할 것으로 전망된다(그림 1-22).



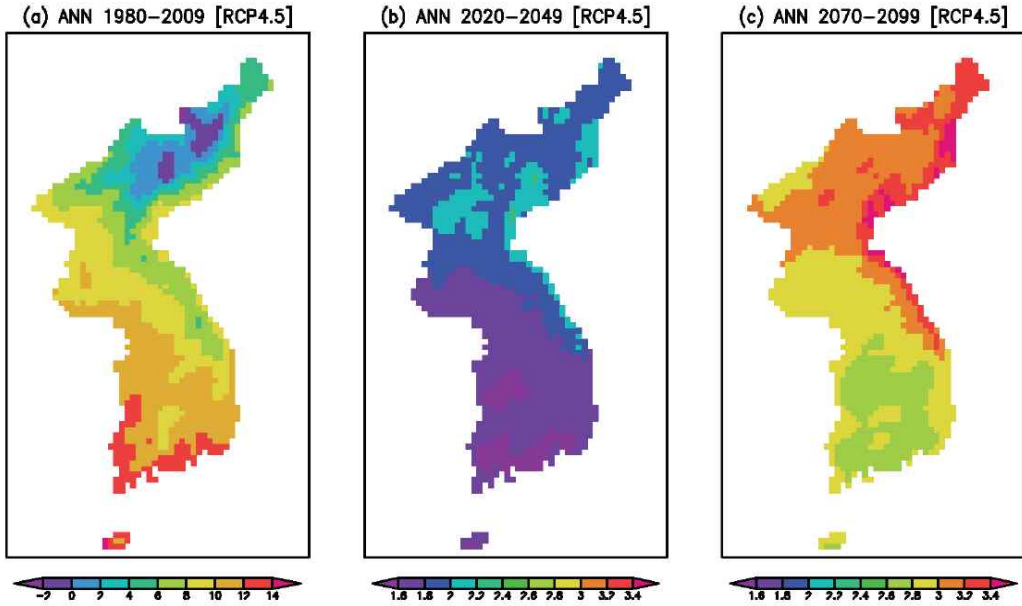
[그림 1-16] 1980~2009년 대비 1950~2099년 연평균 기온의 변화

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

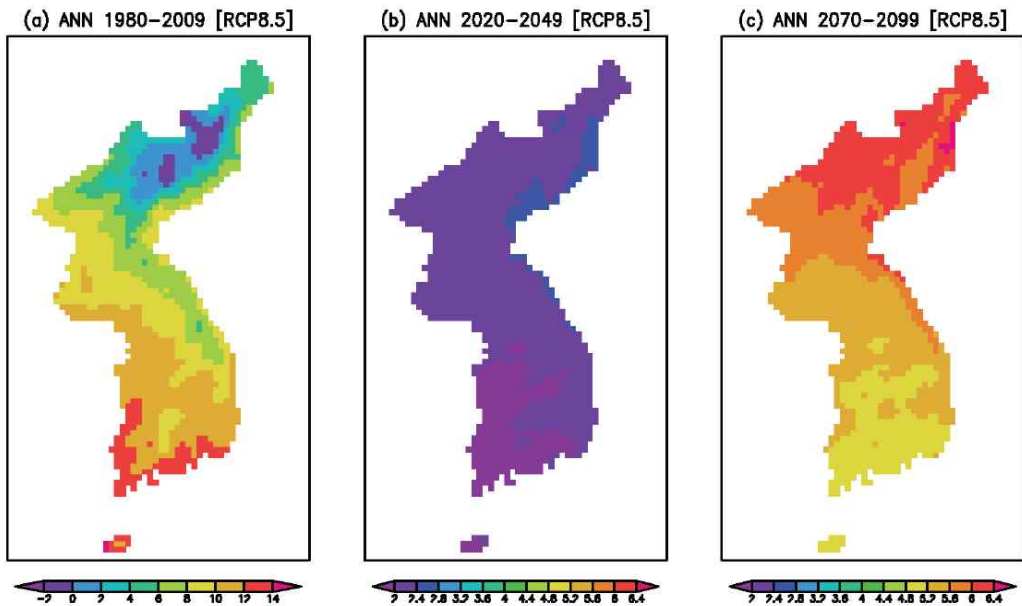


[그림 1-17] 1980~2009년 대비 1950~2099년 연평균 강수의 변화

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

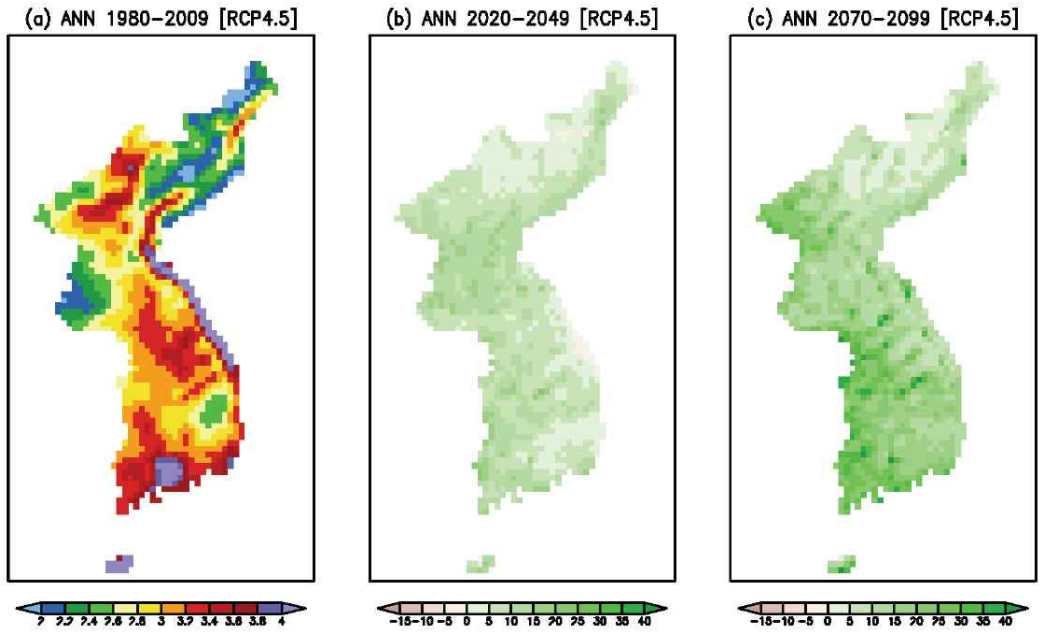


[그림 1-18] RCP 4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후(℃)와 미래변화(℃) 분포⁶⁾
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

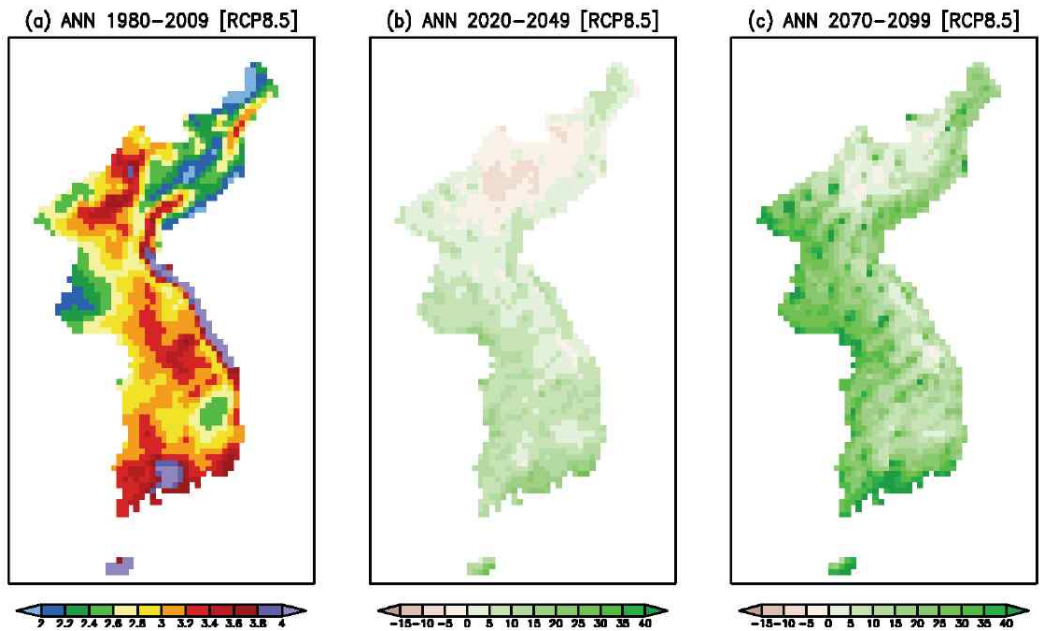


[그림 1-19] RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 기온의 현재기후(℃)와 미래변화(℃) 분포⁶⁾
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

6) (a) 현재기후(190~2009), (b) 21세기 전반(2020~2049), (c) 21세기 후반(2070~2099)



[그림 1-20] RCP 4.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후(mm/day)와 미래변화(%) 분포⁶⁾
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011



[그림 1-21] RCP 8.5 시나리오에 의해 모의된 연평균 강수의 현재기후(mm/day)와 미래변화(%) 분포⁶⁾
출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011

[표 1-13] 현재(1980~2009년) 대비 미래 한반도 평균 기온 및 강수량 전망

| RCP 시나리오 | | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-----------|------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 2020~2049 | 2070~2099 | 2020~2049 | 2070~2099 |
| 한반도 평균 | 기온 (℃) | 연평균 | 1.8 | 3.0 | 2.2 | 5.6 |
| | | 봄 | 1.5 | 2.6 | 2.0 | 5.1 |
| | | 여름 | 1.4 | 2.9 | 2.1 | 5.4 |
| | | 가을 | 1.7 | 3.0 | 2.1 | 5.6 |
| | | 겨울 | 2.7 | 3.4 | 2.5 | 6.3 |
| | 강수량 (%) | 연평균 | 8.4 | 15.8 | 5.2 | 18.7 |
| | | 봄 | 6.0 | 10.2 | 5.7 | 17.7 |
| | | 여름 | 8.9 | 16.3 | 2.9 | 14.6 |
| | | 가을 | 12.1 | 23.2 | 0.5 | 12.8 |
| | | 겨울 | 14.3 | 27.5 | 45.9 | 81.4 |

출처: 국립기상연구소, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011, 2011



[그림 1-22] 온실가스 감축이 없는 경우(RCP 8.5), 2001년~2010년을 기준으로 한 미래(2041~2050) 폭염, 열대야와 집중호우의 변화

출처: 조천호, 기후변화의 과거와 미래, 재난안전. 제14권 제4호, 2012

3. 국내외 연구동향

전 지구적 기후변화에 따라 발생하는 기상현상(태풍, 해일, 강우 등)은 점점 대형화되고 있는 추세이다. 기상현상의 대형화 추세에 따른 재산·인명피해가 심각해지므로, 국내·외 연구에서 기후변화를 고려한 확률강우량의 산정기법 제시와 방재방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(김영호, 2011).

3.1 국내연구동향

우리나라에서는 1960대 이후 확률강우량 연구가 진행되었으며 그 당시에는 자기우량계 자료를 이용했으나 자료기간이 충분치 않고 관측지점이 너무 부족한 탓에 전역에 걸친 확률강우량 산정에는 미흡한 실정이었다. 근현대에 들어와서는 산업화에 따른 인구의 도시집중과 공업도시의 포장면적 증가로 인해 유출양상도 달라져 도달시간이 짧아지고 첨두량이 증가하는 등의 문제와 기후변화의 대두로 인해 장기적인 설계 강우강도보다 단기적인 설계 강우강도가 중요한 실정이다(이승춘, 2012).

그동안 확률강우량은 실제 강우사상 자체뿐만 아니라 과거의 우량자료를 이용하여 빈도 해석한 결과를 가지고 지점별 또는 전국적으로 분포도를 작성하여 왔다. 그리고 전국적으로 일관성 있는 계획설계와 실용적인 면에서 편리를 도모하기 위해서 전국에 걸친 확률강우량 산정과 이를 이용한 확률강우량의 작성이 절실히 요구되고 있다. 최근까지 지역적으로 확률강우량을 산정한 연구 사례는 다수 있으나 전국적인 규모의 확률강우량을 산정한 것은 건설교통부(2000)에서였다. 과거부터의 확률강우량에 관한 연구를 살펴보면 안수한과 신용배(1964)가 서울지방의 강우특성에 관한 연구를 하였고, 이원환(1967)이 국내 지역별 강우특성과 확률강우량 산정에 관한 연구를 하였다. 이를 시초로 하여 국내에서 확률강우량에 대하여 많은 연구가 이루어졌다.

그 사례로는 이원환과 박상덕(1993)이 서울지방의 통합형 확률강우 강도식을 제시하여 기 확률 강우강도식과 통합형 확률강우 강도식을 비교·제시하였으며, 허준행 등(1999)은 지속기산별 강우자료의 적정 분포형 선정을 통한 확률강우 강도식의 유도에서 전국 22개 지점에 대한 확률강우 강도식을 유도하여 실무에 적용될 수 있도록 하였다. 서주석(2007)은 권역별 소유역에 대한 강

우강도-지속기간-재현기간 관계곡선유도에 대해 연구하였다. 서울 지역과 수원 지역의 민감도 분석을 위한 연구로 이종태 등(2005)은 다양한 강우조건에 따른 도시유출모형, SWMM의 매개변수들이 계산 결과치에 주는 민감도 분석하였으며 3개 배수구역에 대해 모형을 적용하였다. 강우조건의 변화에 따라 전반적으로는 불투수면적비, 관로경사, 초기 침투능 등이 민감도가 크게 분석되었고 강우규모 증가에 따라 관로 경사 및 조도계수에 영향이 증가되었고, 강우규모가 작아질수록 지표면 유출 관련 매개변수가 민감하였다. 이정훈 등(2007)은 민감도 분석방법 중 절대 및 상대 민감도 분석 방법을 사용하여 각 유역의 지형학적 수문학적 매개변수들의 민감도 분석을 통해 상관관계를 확인하였으며 결과로 CN값이 개발 전후 5% 증가 시 유출량은 약 10%정도 증가한다는 것을 HEC-HMS모의와 자료의 분석을 통해 확인 하였다. 박진혁 등(2008)은 자체 개발한 물리적기반의 격자다층 분포형 홍수유출모형을 이용하여 남강댐유역을 대상으로 유출해석을 하고, 최적 매개변수 산정을 위하여 각 매개변수별 민감도 분석을 실시하였으며 개발된 분포형 모형에서 유출에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 토양 조건 중에서 투수계수와 층 분할 비율이라는 것을 알 수 있었다.

강우 자료의 특성 및 변화 양상을 분석하기 위해 오제승 등(2007)은 국내 61개 지점의 강우자료를 사용하여 게릴라성 호우 및 국지성 호우가 빈번하게 발생하기 시작한 1998년을 기준으로 강우의 변동 특성을 분석하였고 분석은 두 가지 방법으로 수행하였다. 첫 번째로 지속시간별 초과 강우의 발생 횟수를 산정하여 분석하였고 두 번째로 각 지점의 연도별 10분, 1시간, 1일 최대 강우량을 산정하여 변동성 분석하였다. 지속시간별 초과 횟수의 분석에서는 임의의 초과 시간 기준에 대해 모든 지속시간에서의 변동성이 통계적으로 유의성을 나타내었으며, 최대 강우량을 사용한 분석에서도 이러한 변동성이 확인되었다. 오태석 등(2009)은 강우의 발생 시계열을 연별, 계절별 및 월별로 구성하여 분석하였고 분석 방법은 시계열 자료의 평균과 표준편차의 변동성 분석과 경향성 분석을 수행하였다. 분석 결과 강우자료의 고유 특성인 무작위성에 의하여 뚜렷한 통계적 결과는 나타나지 않았으나 최근 10년간 강우량은 증가하였으며, 강우일수는 감소하는 추세를 보였다. 이재준 등(2010)은 통계학적 기법인 Wald-Wolfowitz 검정, Mann-Whitney 검정을 이용하여 변동

성 분석과 Wavelet Transform을 이용하여 주기성을 분석하였고 분석 결과로 연평균 상대습도, 연평균기온에서 공통적으로 변동성이 나타났으며, 연강수량, 연강수일수, 연일조시간은 지역에 따라 상이한 결과를 보였다. 손태석 등(2010)은 월, 계절, 연 평균 강우와 지속시간별 연최대 강우량 및 강우강도(30mm 이상)를 Trend 분석하였고 분석기법은 T-Test, Hotelling Pabst Test, Non Linear Test, Mann-Kendall Test, Sen Test이고 0.99, 0.95, 0.90의 유의수준별로 분석하였다. 김광섭 등(2011)은 지역특성에 따른 우리나라의 여름철(6~8월) 극한강수의 정량적 변화와 호우빈도의 변화특성을 파악하기 위해 전국 59개 기상관측소 자료를 이용하여 지속시간별 강수량의 월별 최고치와 한계치를 초과한 강수일수를 대상으로 Mann-kendall 검정을 수행하였다. 분석결과를 지역특성에 따른 여름철 극한 강수의 변화특성은 연강수량의 공간분포와 같이 지형의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

그리고 이동률 등(2001)이 엘니뇨와 라니냐 현상과 확률강우량의 상관성에 대해 연구한 바 있으며, 윤용남 등(2004)은 기후변화의 영향을 반영한 확률강우량의 변화를 연구하였고 이승춘(2010)은 최근 기후변화가 한반도 강우에 영향을 미쳤을 것으로 생각되는 1990년대를 기준으로 과거 시계열 자료를 이용, 기후변화에 따른 확률강우량의 지역적 변동성을 분석하여 강우패턴의 변화에 취약한 지역(대부분 해안지역)을 선정하였다. 오세정(2004)은 지구온난화에 의한 설계홍수량의 변화를 산정, 기후변화에 따른 하천유역의 홍수에 대한 유출변화를 분석하였다.

기후변화 시나리오와 관련된 연구를 살펴보면 임은순 등(2006)은 한반도의 복잡한 지형적 특성이 반영된 고해상도 시나리오를 생산하기 위한 방법론을 제시하고, 생산된 시나리오를 이용하여 다양한 시공간 규모에 대한 기후특성을 파악하였으며, 나양선(2010)은 A2 시나리오에 따른 확률강우량 산정기법을 제시 후 기후변화에 따른 설계강우 및 홍수변화에 관한 연구를 수행하였다. 김병식 등(2008)은 미래의 기후변화가 극한 강우에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하기 위해 B2 기후변화 시나리오를 적용하여 미래기간 2030s(2031~2050)에 대한 극한강우 특성분석과 I-D-F 분석을 실시하였다. 그리고 임혁진 등(2006)은 CA-Markov 기법을 이용하여 기후변화가 2050년, 2100년 소양강댐 유역의 수문환경에 미치는 변화 양상을 파악하고자 CCCma

CGCM2 기후모형을 이용하였으며, 기후변화 시나리오는 A2, B2 자료를 적용하여 분석하였다. 최대규(2010)는 우리나라의 과거기후와 GCM(General Circulation Models)의 결과를 비교하여 GCM의 기후재현성에 따른 미래지수 변화에 대한 영향분석 및 유역단위의 수자원 영향평가를 수행하였으며 권진욱(2009)은 남북한 과거 기상관측 자료를 이용, 한반도의 기후변화 추세 분석 및 Random Cascade 모형을 이용한 GCM 기후변화 모의 스케일을 상세화 시켰다. 또한 최경순(2010)은 여러 가지 GCM 결과의 평균(GCM-AVG.), 최소치(GCM-LOW) 및 최대치(GCM-HIGH)에 대하여 수문자료 모의를 실시, 물관리 모의모형을 구축함으로써 대청댐 유역을 중심으로 기후변화에 따른 수자원 민감도를 분석하였다. 김웅태 등(2004)은 기후변화의 영향이 유역의 물 순환에 어떻게 영향을 주는지 알아보기 위하여 GCM 모의결과를 이용하여 기온 및 강수량 자료를 Markov 연쇄에 의해 모의발생 하고, 강우-유출 모형을 이용하여 100년 동안의 일단위 유출을 계산하였으며, 강동현 등(2006)은 기후변화에 대한 미래의 수자원 영향평가를 위한 강우자료 선정에 있어 지역 규모로 내삽한 GCM 강우자료를 분위사상법을 적용한 결과, 보정한 결과가 상당부분 관측치와 가까워짐을 확인할 수 있었다.

윤선권(2012)은 기후변화에 따른 도시하천의 홍수위험 및 취약성 분석에 관한 연구를 수행하여 기후변화 시나리오를 바탕으로 미래 기후변화 영향분석을 위해 경향성 분석과 미래강수 예측하였고, RCM 기후변화 시나리오 Downscaling을 공간적 분해방법을 개발하였으며 시간분포 모형을 개발하여 기후변화 시나리오 자료의 시간적 분해 가능성을 제시하였다. 또한 도시유출 모형에 의한 기후변화에 따른 유출량 산정하였으며 Monte Carlo Simulation 기법을 통한 도시하천 유역의 기후변화 위험 및 취약성 분석을 수행하였다. 권원태 등(2007)이 한반도 지역의 최근 10년(1996-2005) 기후특성에 대한 연구를 통해 한반도 지역의 평균기온 상승과 강수량의 증가를 확인하였다 또 한 권현한 등 (2009)은 기후변화 시나리오를 이용하여 한반도에서의 극치 강우량에 대한 시공간적 특성 변화에 대해 분석하여, 강수의 공간적 편차와 강수량의 변동성이 있다고 결론지었다.

수자원 계획이나 수공구조물의 설계 등에서 확률적 해석 방법인 빈도분석을 위해서는 수문시계열 자료 특히, 강우 자료는 정상성과 독립성(무작위성)을

지나는 것이 매우 중요하다 기록기간이 짧고 신뢰성이 부족한 점 등의 문제로 왜곡된 결과를 초래할 수 있다는 이유로 수문 설계에서 사용되는 시계열 자료는 사전에 특성을 분석할 필요가 있다(이승춘, 2012). 특히, 지구온난화로 인한 기후변화와 엘리뇨, 라니냐와 같은 기후변동으로 인한 강우의 변동은 과거에는 없었던 규모의 가뭄과 홍수를 겪었던 1990대를 기점으로 관심이 고조되어 왔다(한국수자원학회, 2007). 국내에서는 강우의 특성 분석을 목적으로 유재성 등(1999)이 연강우량을 대상으로 경향성, 정상성, 지속성을 분석하여 우리나라 기상청 61개의 관측소 중 몇 군테를 제외한 모든 자료가 경향성이 없고 정상적이며 무작위하게 독립적으로 발생하는 정상 자료임을 확인한 바 있다. 또한 정성인 등(2007)은 확률강우량의 정상성을 판단을 목적으로 연구한 바 있다. 그리고 국내에서는 1990년대 중반부터 기후변화 연구가 수자원 분야에서 시작되어 15년 정도의 연구 경험을 가지고 있으나, 산발적으로 수행되었고 표준화가 이루어지지 못해 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 특히 기후변화에 따른 수공구조물의 영향분석과 관련한 연구는 매우 부족한 실정이다. 안상진 등(2003)은 “호우로 인한 수공구조물 홍수피해 영향” 연구를 통해 호우발생 시 수공구조물의 피해 정도를 연구하였고, 임정열 등(2006)은 “피해 결과 분석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측” 연구를 통해 통계적인 방법을 이용하여 국내 댐의 파괴 원인을 정밀하게 분석하였다. 구조물의 정량적 위험도 평가와 관련한 연구로 공정식 등(2009)은 “영주댐 신뢰성 분석” 연구를 통해 실제 수공 구조물의 위험 영향 인자의 확률론적 신뢰성 분석을 통한 정량적 위험도 평가를 수행하였다. 이종현 등(2009)은 “지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안전성” 연구를 통해 취약도 분석을 통한 구조물의 내진 성능평가 연구를 수행하였으며, 이진학 등(2004)도 “지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가” 연구를 통해 지진취약도 분석을 통한 교량 구조물의 내진 성능 평가 및 위험도 분석을 수행하였다. 구조물의 위험도 및 성능평가와 관련한 국내 연구는 그 연구 성과의 신뢰도가 높고 관련 연구가 정착한 반면, 기후 변화를 고려한 수위 변화에 따른 수공구조물의 영향 분석과 관련한 연구는 매우 부족한 실정이다.

3.2 국외연구동향

세계적으로 기후변화가 진행되고 있다는 것은 많은 연구에 의해 밝혀진 바이며 최근에는 기후변화의 근거 연구만이 아니라 기후변화의 영향평가 및 대응에 관련한 연구들도 활발히 진행되고 있다. 미국, 영국, 독일, 호주, 일본 등 선진국들의 기후변화 대응 노력은 1990년대 초부터 시작되었으며 법적인 기반을 정비하고 전문가를 양성하여 체계적인 연구를 수행하고 있다(이승춘, 2009).

미국에서는 1935년에 Yarnell이 미국전역에 대한 단기간 확률강우량도를 제작하였으며, Yarnell Charts라고 하여 널리 사용되었다. 1961년에 미국 기상청은 과거의 연구 결과를 분석·종합하고, 미국전역에 대하여 강우 지속기간 30분~24시간, 재현기간 2년~100년의 확률강우량도를 작성하였는데 현재까지 광범위하게 이용되고 있다(서주석, 2007). 또한, 1973년에 Miller 등은 미국 서부 11개 주에 대해 지점별 산악지형 인자와 확률강우량을 고려한 지점수량 내삽방법을 채택하여 강우 지속기간 6시간~24시간, 재현기간 2년~100년의 확률강우량도를 작성하여 연방과 주정부 차원에서 활용하였다.

Bella, V. A 등(2009)은 지역기후모형(RCM)의 결과를 G2G(Grid to Grid) 모형에 적용하여 기후변화가 유출량에 미치는 영향을 평가하였으며, QuintanaSegui 등(2009)은 지역기후모형(RCM)을 대상으로 통계학적 축소기법인 분위사상법(Quantile Mapping)을 이용하여 불확실성을 보정 정량화한 후 분포형 모형에 적용 유출모의를 시행하였다. 또한, Semadeni-Davies, A 등(2009)은 지역기후모형(RCM)을 고려한 DHI MOUSE 모형을 이용하여 도시지역 합류식관거 시스템에 미치는 영향을 평가하였으며, Dankers, R 등(2007)은 HIRHAM 지역기후모형의 강우를 이용, LISFLOOD Model에 적용하여 홍수유출량 증가를 예측하고 그 영향을 평가하였다.

그리고 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석에 대한 국외 연구동향을 살펴보면 선진국에서는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성을 연구하는 논문이 발표되어 지금까지 30여년의 연구가 진행되어 왔다. 하지만 기후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 관련 연구는 비교적 부족하며 그 연구 내용 또한 매우 부정확한 것이 현실이다. Dario Roside 등(2007)은 "Seismic risk assessment of levees" 연구를 통하여 취약도 분석

을 통한 구조물의 지진 영향 평가를 수행하였으며, 그 외에도 Kazi R.Karim 등(2001)의 "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation", Masanobu Shinozuka 등(2000)의 "Nonlinear static procedure for fragility curve development" 등과 같은 연구에서 취약도 분석을 통한 구조물의 성능평가를 수행하였다. 기후변화에 대비하여 설계기준을 제시한 실질적인 사례는 영국과 일본 등에서 찾아볼 수 있다. 영국은 2115년까지 기후변화의 극한 기상 예측치를 공고하고 지역개발계획 및 방재시설기준을 적용하여 시행중이다. 예를 들어 2025년까지는 최대강우강도 5%, 하천최대유량 10%를 추가하여 적용하고 2055년까지는 최대강우강도 10%, 하천최대유량 20%를 추가하는 방식이다. 영국은 이러한 실질적 가이드라인 작성 뿐 아니라 해수면 상승에 대비하여 템즈강 수문 증고를 계획 중에 있다. 숫자를 통해 설계기준을 제시한 영국과 달리 일본에서는 기후변화 영향평가 방법과 적응계획 절차를 통해 개념적인 적응 가이드라인을 제안하고 있으며, 스미다강과 요도강과 같이 대하천이 통과하는 도심지역의 치수안전도 확보를 위하여 일반 제방보다 규모가 큰 이른바 슈퍼제방을 설치하여 기후변화로 인한 수량증가에 대비하고 있다(김울안 이, 등. 2010).

3.3 국내 연구과제 현황

3.3.1 한국건설교통기술평가원 연구과제 현황

한국건설교통기술평가원의 기후변화와 관련한 연구과제는 표 1-14와 같다.

[표 1-14] 한국건설교통기술평가원 연구과제 현황

| 연구책임자(소속) | 총 연구기간 | 과제명 |
|----------------|---------------------------------|---|
| 황영삼 (인천대학교) | 2012년 10월 05일~ 2015년 10월 04일 | 기후변화에 대비한 기성시가지 복합화 도시계획시설의 도시방재력 강화를 위한 설계기법개발 |
| 심우배 (국토연구원) | 2011년 12월 16일~ 2015년 06월 29일 | 도시 기후변화 폭우재해 적응 안전도시 기술 개발 |
| 이태구 (세명대학교) | 2011년 09월 30일~ 2014년 09월 29일 | 기후변화 대응형 도시 빗물관리시스템 연구 |
| 권현한 (전북대학교) | 2011년 09월 29일~ 2014년 09월 28일 | 기후변화 대비 댐 및 저수지 안정성 평가를 위한 위험도 해석기법 개발 |

[표 1-14] 한국건설교통기술평가원 연구과제 현황(계속)

| 연구책임자(소속) | 총 연구기간 | 과제명 |
|--------------------|---------------------------------|--|
| 김영오 (서울대학교) | 2009년 12월 30일~ 2012년 12월 29일 | 기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 |
| 김형수 (인하대학교) | 2012년 04월 02일~ 2012년 09월 01일 | 기후변화 시나리오에 따른 수자원 적응전략 수립 연구 기획 |
| 여운광 (명지대학교) | 2010년 12월 23일~ 2011년 06월 22일 | 하천관리 선진화 기술 기획-Part1, 기후변화 대응 하천 운영 및 관리 기술 기획 |
| 양현모 (주)기술과가치 | 2008년 09월 05일~ 2009년 03월 04일 | 기후변화 대응 물 관리기술 기획 |
| 윤석영 (한국건설기술연구원) | 2005년 06월 30일~ 2010년 06월 29일 | 이상기후에 대비한 시설기준 강화 |

출처: 건설교통기술평가원(<http://www.kictep.re.kr>)

4. 소결

삶아진 개구리 증후군(Boiled frog syndrom)이라는 것이 있다. 개구리를 비커 안에 넣고 알콜램프에 불을 붙인 후 서서히 가열을 하였다. 개구리는 비커의 위쪽이 개방되어 있었음에도 불구하고 따뜻한 비커에 자리하였고 결국 뜨거워질 줄 몰랐던 개구리는 뜨거운 비커 안에서 선택의 여지없이 삶아졌다. 이처럼 변화라는 것은 갑자기 엄청난 규모로 다가오지 않으며 서서히 다가오기 때문에 먼저 변화를 감지하고 인식하여 이에 적응 및 대응하지 않는다면 우리도 개구리와 같은 신세가 될 수 있을 것이다. 과거자료를 이용하여 현재를 모의하고 쉽지 않은 상황에 미래를 예측한다는 것은 많은 불확실성을 포함하고 있다. 기상 또는 기후는 일정한 형태와 일관성이 없어 그 자체만으로 많은 불확실성을 가지고 있다. 어떤 모형이나 통계적인 방법도 현실은 물론 미래를 정확히 예측할 수 없다. 그러나 본 연구에서는 미래의 자료나 현상을 정확하게 맞추는 것이 아니라 미래에 발생할 수 있는 가능성과 잠재성을 인지하고 그에 대한 대응을 하는 것에 목적이 있다. 이에 양질의 과거자료를 확보하고 이 자료를 이용하여 과거부터 현재까지 나타나고 있는 변화를 분석하고 미래의 기상요소 또는 강우의 변화를 예측하여야 한다.

제2 장

사면 및 토석류

2

제2장 (제1세부) 사면 및 토석류

1. 국내외 토석류 발생량 산정방법 조사

1.1 침식심도 개념 및 방법

토석류의 형태는 경사가 급한 자연사면에 파괴된 토사가 사면표면을 따라 흘러내리는 사면형 토석류(open slope debris flow)와 파괴된 쇄설물 또는 계곡내의 퇴적물이 계곡수와 합쳐지면서 계곡을 따라 흐르는 계곡형 토석류(channelized debris flow)로 구분된다. 흙과 물이 혼합된 형태로 계곡을 흐르는 토석류의 규모에 대한 정의는 특정 지점을 통과하는 유출량(discharge), 특정지점에 퇴적되는 토석량, 피해규모 등의 관점에 따라 다르게 정의되지만 일반적으로 퇴적되는 토석량(부피)으로 정의하는 것이다(Jakob, 2005, D' Agostino et al, 2001).

토석류 규모는 지형적으로 경계를 가진 유역 내에서 유출되는 토석량으로 산정할 수 있는데 이는 초기파괴 규모, 계곡 내에 퇴적되어 있는 토석의 양과 상태, 계곡을 흐르는 유량과 계곡의 곡선형태, 토석류가 흐르는 계곡의 지형 경사 그리고 계곡 내의 방어구조물 여부에 따라 그 토석량이 달라지는 등 많은 지역적, 지형적 영향인자에 의존하게 된다. 현실적으로 이러한 모든 영향인자를 고려하기는 어려우며 보편적으로 사용되는 방법은 침식심도 개념(erosion depth concept) 또는 침식율 개념(yield rate concept)으로 불리는 방법을 이용하는 것인데 토석류가 시작-이동-퇴적되는 현상을 수식으로 표현한 것으로서 계곡의 길이, 계곡의 폭, 계곡의 침식두께와 퇴적두께를 각 위치별로 적용하여 발생 가능한 토석량의 부피를 추정하는 방법이다.(Hunger et al. 1984; Vandine, 1985, Hunger et al, 2005).

$$V_t = V_i + \sum (L_i \times B_i \times Y_i) - \sum (L_i \times B_i \times D_i)$$

여기서, V_t : 총 토석부피(m^3) V_i : 초기발생부피(m^3)
 L_i : 계곡의 단위길이(m) B_i : 계곡의 평균폭(m)
 Y_i : 계곡부의 침식두께(m)
 D_i : 계곡부에서의 퇴적두께(m)

계곡부의 침식두께와 퇴적두께는 과거의 토석류 발생사례로부터 조사된 자료를 이용하거나 자료가 없는 경우는 계곡에 대한 실제 현장조사를 통하여 계곡의 침식가능두께와 퇴적두께를 측정 또는 불가피하게 가정하여 구하게 된다. 이 방법은 개념적으로 간단하지만 (1) 유역 내에 발달한 계곡 중 토석류에 기여하는 계곡의 선정 여부, (2) 침식이 발생하는 계곡부와 퇴적이 발생하는 계곡부의 구분, (3) 강우량에 따라 초기 파괴량이 달라지는 문제, (4) 계곡부의 유량에 따라 침식량이 달라질 수 있는 등의 한계가 있다(Hunger, 2005). 또한, 토석류가 발생하지 않은 유역에서 토석류 발생가능 규모를 예측하기 위해서는 초기파괴위치와 초기 파괴량, 토석류의 이동가능 거리, 이동구간 내에서의 침식가능두께, 퇴적두께를 산정해야 한다. 다시 말해, 초기 파괴량과 이동구간 등의 예측을 거의 할 수 없다는 의미와 같고 토석류가 발생한 후에 토석량을 계산하는 것과 같으므로 실제 토석류 예방시설물의 설계의 어려움이 있다.

1.2 대규모 홍수시의 토사유출량 추정(스트림파워)

유출하는 토사량의 간이 추정방법으로 스트림 파워 이론을 적용하여 홍수 시 유출직후의 토사량을 정리한다. 이 식에는 많은 부유토사가 포함되어 있다고 할 수 있다.

$$D = \alpha(A \cdot R \cdot I)\beta$$

여기서, D : 홍수 시 유출 토사량(m^3) A : 유역면적(km^2)
 R : 일 강우량(mm)
 I : 유출 토사량을 추정하는 지점에서 200m 상류까지의
 평균하도구배
 α, β : 계수(평균값으로 α 는 10, β 는 2.0)

1.3 계획유출량 산정

1.3.1 계획유출토사량 산정

일본의 国土交通省(2007)에 의하면 계획유출토사량은 사방댐 설치 지역에서 예상되는 이동가능토사량(불안정 토사)과 운반가능토사량을 일차적으로 검토한다.

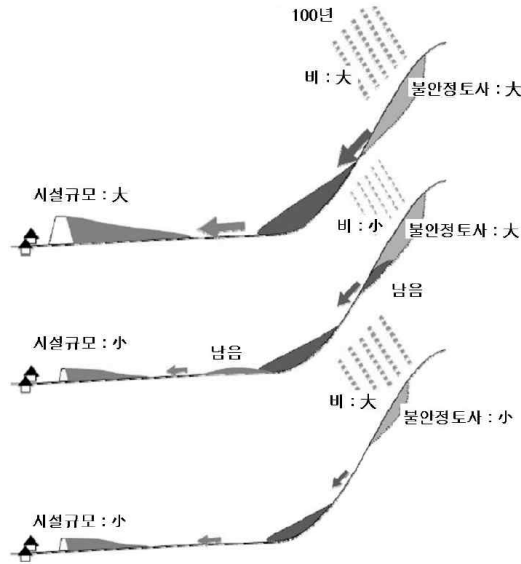


그림 13. 토사유출량 검토 방법(嶋 大尚, 2009 加筆)

[그림 2-1] 토사유출량 검토 방법

그림 2-1과 같이 이동가능 토사량이 많아도 비가 적게 오는 지역이라면 운반 가능량은 당연히 이동가능 토사량보다 작을 것이므로 이러한 지역에 대규모의 사방댐을 설치할 필요가 없을 것이다. 계획유출토사량은 이동가능토사량 V_{dy1} 과 운반가능토사량 V_{dy2} 을 비교하여 그 중에서 작은 값을 사용하여 사방댐의 규모를 설정한다.

$$V_{dy1} = \text{불안정한 토사의 체적} \quad V_{dy2} = \frac{P_p \cdot A \cdot 10^3}{1 - K_v} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} \right) K_{f2}$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

여기서, P_p : 계획규모년초과확률 강우량(mm) A : 유역면적(km^2)
 C_d : 유동 중 토석류농도 K_{f2} : 유출보정률
 K_v : 공극률(보통 0.4정도)
 σ : 자갈의 밀도($2,600kg/m^3$ 정도)
 ρ : 물의 밀도($1,200kg/m^3$ 정도)
 ϕ : 계상퇴적토사의 내부마찰각 ($30\sim40^\circ$, 일반적으로 35° 를 아용)
 θ : 계상구배 (토석류피크유량을 산출할 때는 현재상구배를 아용)

위 식들은 흙의 거동에 대한 메커니즘 분석에 의해 제안된 식이라기보다는 경험에 의해서 제안된 식으로서 이동가능토사량 V_{dy1} 과 운반가능토사량 V_{dy2} 의 예측이 과소평가 시 만약 하류에 민가가 위치한 경우 민가에 직접적으로 미치는 인명 및 재산 피해가 막대할 것으로 예상된다.

1.3.2 계획유출유목량 산정

계획유출유목량은 추정된 발생유목량 V_{wy} 에 유목유출률을 곱해서 산출하며 계획유출유목량(발생한 유목의 계곡 출구에서의 유출량)은 토석류 · 유목대책 시설이 없는 경우 0.8 ~ 0.9 정도라고 보고되었다(石川 등, 1989). 한편, 발생유목량 V_{wy} 은 다음 식과 같다(国土交通省, 2007).

$$V_{wy} = \frac{B_d \times L_{dy13}}{100} \times \sum V_{wy2} \quad V_{wy2} = \pi \cdot H_w \cdot R_w^2 \cdot \frac{K_d}{4}$$

여기서, V_{wy} : 발생유목량(m^3)
 B_d : 토석류 발생 시에 침식이 예상되는 평균 계상폭(m)
 L_{dy13} : 발생유목량을 산출하는 지점에서 유역의 최고
도달점까지의 유로를 따라 측정한 거리(m)
 V_{wy2} : 재료의 단위중량(m^3)
 $\sum V_{wy2}$: 샘플일 조사 $100m^2$ 당 목재의 부피($m^3/100m^2$)
 H_w : 수목의 높이(m)
 R_w : 흉고직경(m)
 K_d : 흉고계수

식에 사용된 기호에 대한 정의를 도식적으로 표현하면 그림 2-2와 같다. 강

우에 의하여 유목량이 어느 정도 발생할 것인가는 계획유출토사량과 맞물려 있어 정확한 평가가 어렵지만 현재 통계적 방법을 사용하여 유목량산출을 예측하고 있는 실정이다.

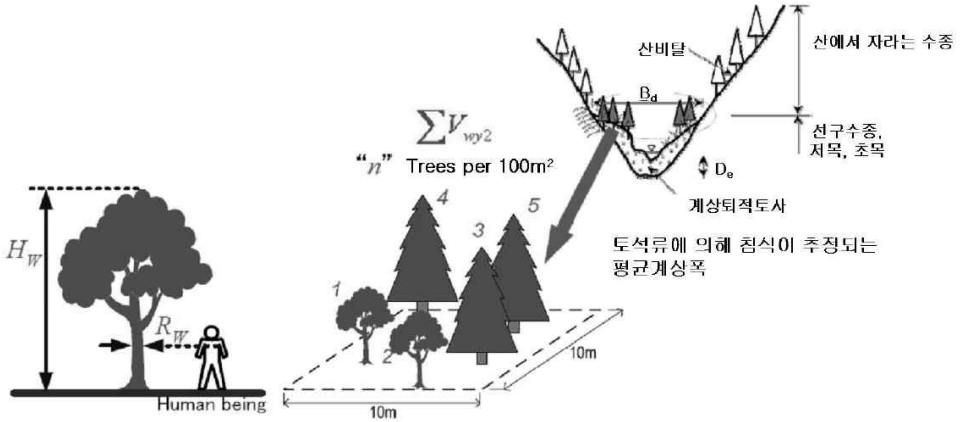


그림 14. 계획유출유목량 산정 시 나타나는 패러미터의 정의(嶋 大尚, 2009 加筆)

[그림 2-2] 계획유출유목량 산정 시 나타나는 패러미터의 정의

1.3.3 계획유하허용량 설정

계획유하허용량은 토사량과 유목에 대하여 모두 0으로 한다(国土交通省, 2007). 하지만 토사량은 하류에서 재해를 일으키지 않을 정도의 토사량에 대해서는 어느 정도 유하를 허용하는 경우도 있으나 자세한 기준은 현재 마련 되어있지 않다.

1.3.4 토석류 피크유량산출방법

토석류 피크유량산출방법은 유출토사량을 근거로 구하는 것을 기본으로 하나, 동일유역에서 실측치가 있어 토석류 피크유량 추정이 가능한 경우 그 값을 이용하는 것으로 한다. 평균 피크유량과 토석류 총 유량의 관계는 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q \quad \sum Q = \frac{C_* \cdot V_{dap}}{C_d}$$

여기서, Q_{sp} : 토석류 피크유량(m^3/s) $\sum Q$: 토석류 총유량(m^3)
 V_{dap} : 1과 토석류에 의해 유출하는 것으로 생성된 토사량(공극포함 m^3)
 C_d : 토석류 농도 C_* : 계상퇴적토사의 용적농도(0.6정도)

일본의 경우 토석류 피크 유량 Q_{sp} 는 토석류 총유량 $\sum Q$ 의 1%로 예상하고 있으나 경험적인 수치 일뿐 이론에 근거한 명확한 설명이 부족한 부분으로 향후 연구를 통하여 보다 명확히 제안되어야 할 것이다.

1.3.5 제석계획

일본에서는 토석류·유목처리계획상 제석이 필요한 경우에는 반출로 부설 등 토사 및 유목 반출방법 및 반출토의 버릴 장소, 제석(유목 제거 포함)의 실시 빈도 등 제석(유목 제거 포함)계획을 토석류·유목처리계획에서 검토한다. 제석에는 정기적 제석과 긴급제석이 있다. 정기적인 제석은 평상시 유출한 토사 및 유목 등으로부터 주로 계획퇴적량을 확보하기 위하여 행하며, 긴급제석은 토석류 발생 등의 出水에 의해서 유출된 토사 및 유목으로부터 계획 포착량·계획퇴적량을 확보하기 위하여 수행한다. 한편, 제석을 실시할 때에는 투과부 단면을 폐색한 자갈이 느슨해지면서 돌발적으로 하류로 흘러내려갈 위험이 있으므로 제석은 하류에서가 아니라 상류에서 실시한다.

1.4 토양유실량예측공식(USLE)

USLE 공식은 경지계획시 농지보전방법을 결정하고, 오염통제를 위한 비점원 토양유실량을 추정하는데 사용되는 경험공식으로 다음과 같다.

$$A = RKLSCP$$

여기서, A : 년평균토양유실량 R : 강우침식성인자
 K : 토양특성인자 L : 경사장인자
 S : 경사도인자 C : 작물인자
 P : 보전인자

이들 USLE공식에 사용되는 각 인자들은 표 2-1과 같이 A, R, K 가 차원을

가지며, L, S, C, P 는 무차원이다(Wischmeir & Smith, 1976; Foster 등, 1981; Haan 등, 1982; Lal, 1994).

[표 2-1] Dimensions of USLE factors

| Factor | Symbol | Dimensions* |
|-------------------------|---------|---------------|
| Rainfall intensity | I | L/T |
| Rainfall kinetic energy | e or KE | LF/L2L |
| Storm erosivity | EI | LFL/L2T |
| Soil loss | A | M/L2T |
| Annual erosivity | R | LFL/L2TT |
| Soil erodibility | K | ML2T/L2LFL |
| Slope length | L | (L/L)m |
| Slope steepness | S | dimensionless |
| Crop management | C | dimensionless |
| Conservation | P | dimensionless |

* F=force, L=length, M=mass, T=time, m=exponent, L2=area

여기서는 국내에서의 연구자료를 중심으로 USLE 공식에 대한 제인자중 특히 단위와 차원을 가진 강우인자와 토양특성인자의 적용공식과 단위를 조사하였으며, 표 2-2는 토양유실량과 관련된 단위와 인용자료를 나타낸 것이다.

[표 2-2] Soil loss unit

| Factor | Units* | Reference |
|------------------|-------------|---|
| Soil loss (A) | ton/acre-yr | Wischmeier and Smith(1978) |
| | MT/ha(-yr) | 정 등(1976a), 박과 유(1977), 지(1982), 황(1989), 이(1994) |
| | kg/m2-yr | 황 등(1993) |
| | MT/10a | 안과 이(1976), 신과 신(1980), 정 등(1985), 오 등(1991) |
| | kg/10a | 신 등(1976), 정 등(1989), 오 등(1989) |
| | Mg/ha | 김과 박(1994), Schwab et al.(1994) |

* MT=metric ton, Mg=megagram.

1.4.1 강우침식성인자(R)

강우침식성인자는 강우의 운동에너지와 30분 최대강우강도(I_{30})와의 곱인 EI_{30} 에 대한 1년동안의 합으로 나타내며, 강우자료는 12.7mm(0.5 inch) 이상의 연속된 강우로 무강우시간이 6시간 이상일 때 독립사상이며, 독립 1회

강우가 12.7mm 이하인 강우는 15분 이내의 강우량이 6.35mm(0.25 inch)보다 큰 것을 사용한다.

강우의 운동에너지는 e 또는 $KE = a + b \log_{10} I$ 형태의 강우강도와의 관계식이 가장 보편적으로 사용되고(Lal, 1994). 강우의 총 운동에너지는 강우의 개별 운동에너지 \times 그 강우강도에 해당하는 강우량으로 표현되며, R인자는 EI_{30} 또는 $EI_{30}/100$ 으로 구하게 된다. 여기서 임의 강우의 운동에너지 총량은 다음식과 같다.

$$E = \sum (e \cdot I \cdot t)$$

여기서, E : 강우의 총 운동에너지
 t : 강우강도의 지속시간
 I : 강우강도

USLE의 강우인자와 관련된 연구로 박(1976)은 우리나라 14개 지점에 대하여 $KE = 916 + 331 \log I$ 를 이용하여 MTf/ha 의 단위로 변환하고 320.8~625.0의 강우에너지값을 발표하였으며, 고와 신(1979)은 12개 지역의 1969~1978년 자료를 이용하여 EI_{30} 값의 범위 275~780을 계산하였다. 정 등(1983)은 우리나라 51개소의 강우자료를 이용하여 강우인자 R값을 계산하고, EI_{10} , EI_{30} , EI_{60} 값을 비교하여 EI_{30} 사용의 적절성을 제시하였고, 신 등(1983)은 강우인자의 복잡한 계산과정의 단점을 보완하기 위하여 강우가 많은 2개월간의 강우량 합을 이용하는 IAS Index 방법을 제안하여 EI_{30} 값의 추정이 가능함을 보여주었으며, 오 등(1989)은 수원 84~86년간의 자료를 이용하여 EI_{30} 값을 604.2~702.6이고 평균 651.9로 분석하였다. 표 2-3은 강우 침식성인자의 공식과 계산과정에 관련된 U.S. 및 SI 등의 단위를 요약한 것이며, 국내에서 많이 사용되었던 강우인자 계산공식을 단위와 관련시켜 U.S. 단위와 SI 단위간의 변환을 검토하고자 하였다.

[표 2-3] Rainfall erosivity factor

| Factor | | Units * | Reference |
|----------------------------------|--|--|---|
| Kinetic energy (e , KE) | $e = 916 + 331 \log_{10} I$ $e = 1074 (I > 3 \text{ in/hr})$ | $e = ft \cdot tonf/acre \cdot inch$ $I = inch/hr$ | Wischmeier and Smith(1978), 박(1976) |
| | $e = 1.213 + 0.890 \log_{10} I$ | $e = kgf \cdot m/m^2 \cdot mm$ $I = mm/hr$ | Wischmeier and Smith(1958), 황 등(1993) |
| | $e = 12.1 + 8.9 \log_{10} I$ | $e = m \cdot Mg/ha \cdot mm$ $I = mm/hr$ | Wischmeier and Smith(1958) |
| | $e = 210.3 + 89 \log_{10} I$ $e = 289 (I > 7.6 \text{ cm/hr})$ | $e = m \cdot MTf/ha \cdot cm$ $I = cm/hr$ | Wischmeier and Smith(1978), 조와 박(1981), 지(1982), 정 등 (1983), 신 등(1983), 김과 박 (1994), 이(1994) |
| | $e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$ $e = 0.283 (I > 76 \text{ mm/hr})$ | $e = MJ/ha \cdot mm$ $I = mm/hr$ | Foster et al. (1981) Schwab et al.(1993) |
| | $e = 11.87 + 8.73 \log_{10} I$ $e = 28.3 (I > 76 \text{ mm/hr})$ | $e = J/m^2 \cdot mm$ $I = mm/hr$ | Morgan(1986) |
| Annual erosivity (R) | $R = \Sigma (E \cdot I_{30})$ or $\Sigma (E \cdot I_{30})/100$ | $ft \cdot tonf \cdot inch/acre \cdot hr(-yr)$ | Morgan(1986) |
| | | $m \cdot MTf \cdot cm/ha \cdot hr(-yr)$ | |
| | | $MJ-mm/ha-hr-yr$ | Foster et al. (1981). Schwab et al.(1993) |

* tonf=ton-force, kgf=kg-force, MTf=metric ton-force, MJ=megajoule.

1.4.2 토양수식능인자(K)

토양수식능인자는 어떤 토양의 고유한 침식성을 정량적으로 나타낸 것으로 토성, 유기물함량, 투수성 등과 관련이 있다. 이 K값은 직접법(Soil survey method)과 간접법에 의하여 결정될 수 있으며, 직접법은 시험포로부터 유실량을 측정하여 USLE식에서 K값을 구하는 것이고, 간접법은 과거자료에서 얻은 토양별 K값을 이용하여 주어진 토양과 그 특성을 비교하여 추정하는 방법으로 계산표(nomograph)를 이용하거나 다음 식을 이용하며, 일반적으로 U.S.단위로 K값의 범위는 0.03~0.69이다(Wischmeier and Smith, 1978; Golden 등, 1986).

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)$$

여기서, M : (% Silt + % 극세사) (100-% 점토)

a : 유기물함량(%) b : 토양단위강도 c : 토양투수성 등급

우리나라의 경우, 정 등(1976), 신 등(1976)은 Nomograph, 이(1994)는 위의 식을 이용하였으며, 정 등(1976a, b)은 인공강우에 의한 야산개발지에서의 시험결과에서 산출된 0.15~0.32값과 nomograph를 이용한 K값을 비교하고 nomograph에 의해 산정된 K값의 이용가능성, 그리고 경사지 밭과 산림지 토양 83개의 토양통에 대한 토양침식성인자 K값을 nomograph에서 산정하고 평균 0.27이며 전체적으로는 0.05~0.51의 값을 제시하였다. 토양인자에 대해서는 강우인자 계산공식과 아울러 상응되는 단위를 관련시켜 검토하고 토양 특성인자, 토양유실량의 U.S. 및 SI단위 상호간의 변환계수를 얻고자 하였다.

1.5 단일 강우시의 토양유실량의 추정(RUSLE 수정범용토양유실식)

USLE식에서 목장이나 삼림과 같은 실험지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위하여 R 인자의 수정, 계절적 변화에 대한 인자 K 의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 LS 인자 수정과 C 인자를 산정하는 새로운 계산과 정의 개발 등을 첨가하여 RUSLE기법이 Renard(1991) 등에 의하여 개발되었다. RUSLE는 유역에서 발생하는 토양침식량을 산정하는 것으로, 유사전달률(sediment delivery ratio, SDR)개념을 도입하여 토양침식량에서 토사유출량을 산정하여야 한다. 또한 이와 같이 산정된 토사유출량은 중량단위($t/year$)이므로 단위중량을 산정하여 침사지 등의 용량 결정에 필요한 체적단위($m^3/year$)의 토사유출량으로 환산하는 것이 필요하다.

$A = RKLSVM$ (단위면적당 토양유실식)

여기서, A : 강우침식인자 R 의 해당기간 중 단위면적당 토양침식량 ($t/storm$)
 R : 강우침식도($10^7 J/ha \cdot mm/h$)
 K : 토양침식성인자($t/ha/R$) LS : 지형인자
 VM : 토양침식조절인자

1.5.1 강우침식인자(R)

강우침식인자(R)는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로서 연평균 강우침식인자와 단일호우 강우침식인자를 구한다.

연평균 강우침식인자 R 은 정필균(1983) 등이 기상청 관할 51개 관측소의 1960 ~ 1980년대 6 ~ 21년간의 자료를 이용하여 구한 값을 활용하며 속초 지역인 경우 255를 적용한다.

단일호우 강우침식인자는 단일호우에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 이자로서 단일호우의 재현기간과 지속기간을 결정하는 것이 필요하게 된다. 실무에서는 통상재현기간은 설계홍수량 산정 시와 동일한 30년 빈도, 지속기간은 24시간을 주로 채택하고 있다.

$$R = \sum E \cdot I_{30} \quad E = \sum e \cdot \Delta P \quad e = 0.029[1 - 0.72\exp(-0.05I)]$$

여기서, R : 단일호우강우침식인자($10^7 J/ha \cdot mm/h$)
 I_{30} : 설계재현기간의 30분 강우강도(mm/h)
 E : 강우 총에너지($10^7 J/ha$)
 ΔP : 강우지속기간 구분시 간격당 강우증가량(mm)
 I : 강우강도(mm/h)

1.5.2 토양침식인자 (K)

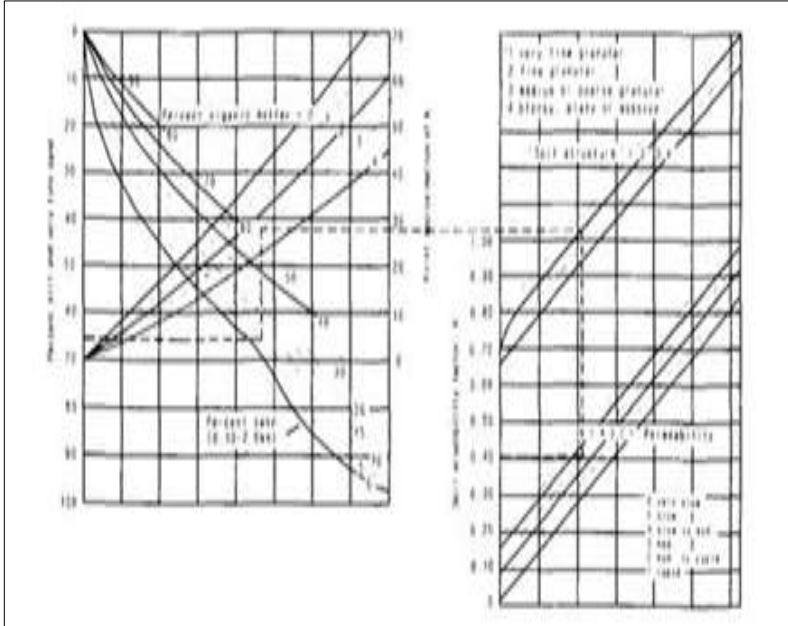
토양침식인자는 토양이 강우에 의한 침식에 저항하는 능력을 나타내는 인자로서 미사질 성분을 많이 가진 토양이 침식성이 높은 반면, 유기성을 가지고 표토가 단단한 투수성이 높을수록 침식성이 낮다. 일반적으로 토양침식인자는 $0.13 \sim 0.91t/ha/R$ 의 범위를 갖는다.

토양침식인자(K)는 비교적 체계화된 Wischmeier의 계산도표(monograph) 또는 공식화된 값을 이용한다(표 2-3).

$$K = 1.32 \left[\frac{2.1 \times 10^{-4} \cdot (12 - CM) \cdot M^{0.14} + 3.25(S_1 - 2) + 2.5(P_1 - 3)}{100} \right]$$

$$M = (MS + VFS) \cdot (100 - CL)$$

여기서, K : 토양침식인자($t/ha/R$) CM : 유기물 백분율(%)
 M : 입경에 있어서 주종을 이루는 토립자와 토사 전체에 대한 비율에 대한 함수
 S : 토양구조 지수(1-4) P_1 : 투수지수(1-6) MS : 실트백분율(%)
 CL : 점토백분율(%) VFS : 극세사백분율(%)



[그림 2-3] 토양 침식성 인자 K 의 계산도표

1.5.3 지형인자 (LS)

지형인자 LS 는 경사가 9%이고 길이가 72.6ft인 표준 침식 경사면을 무차원 시킨 것으로 실무에서 적용된 결과를 분석한 결과 몇 가지의 문제점이 발견되었다. 첫 번째는 토사발생 경사면의 결정을 어떤 방법으로 선정하는 가이다. 상당수의 경우 소유역 전체를 토사발생경사면으로 선정하나 이는 실제 USLE공식을 제안할 때의 가정에 위배되는 것으로 토사발생이 발생하는 사면 별로 소유역을 구분하여 산정하여야 한다. 또한 전체 유역을 격자로 나누어서 각 격자의 경사길이와 경사를 구하여 이를 유역에 대해 적용하는 경우가 있는데 이는 지형정보시스템의 계산절차를 수작업으로 전환한 것으로 사면별로 소유역을 구분하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 두 번째는 경사를 산정할 때 사면의 경사를 이용하지 않고 유로의 경사를 사용하는 문제이다. 이는 주로 산악지형의 경우에 많이 발생되며 실제 작업을 하여 비교한 결과 산악지형의 경우 경사면의 기울기가 20%이상인 경우가 많이 있으며 이러한 경우 LS 의 값이 매우 크게 되어 토사발생량을 축소시키기 위한 것으로 판단된다. 사면길이가 길고 경사도가 급할수록 침식률이 높고 사면길이가 짧거나 평탄

할수록 침식률이 낮기 때문에 지형인자 LS 는 침식률을 조정하는 역할을 한다. 따라서 지형인자는 다음과 같은 경사도에 대한 관계식으로 구한다(하천설 계기준 2002).

$$LS = \left(\frac{l}{22.1}\right)^m \left(\frac{65.4 S^2}{S^2 + 10,000} + \frac{4.6S}{\sqrt{S^2 + 10,000}} + 0.065\right)$$

여기서, l : 경사면의 길이(m)
 S : 경사(%)
 m : 경사에 따라 변하는 지수 ($S < 1\%$ 이면 0.2,
 $1 < S < 3\%$ 이면 0.3, $3.5 < S < 4.5\%$ 이면 0.4,
 $S > 5\%$ 이면 0.5값을 가진다.)

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{11.16 \sin \theta}{3.0 \cdot (\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$$

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad (\sin \theta < 0.09)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.05 \quad (\sin \theta \geq 0.09)$$

여기서, λ : 평면에 투영된 사면길이(m)
 m : 사면경사 길이의 멍지수
22.13 : 표준시험지길이(72.6ft)
 β : 세류 및 세류간 침식의 비
 θ : 사면경사각(°)

1.5.4 토양상태인자(VM)

토지 상태인자 VM 은 토양피복인자 C 의 곱으로 표현되는 값으로 필요시 변 적 가중하여 그 유역의 대표 값을 구한다(Transportation Research Board of USA, TRB).

[표 2-4] 토지 상태인자 산정 기준

| 상태 | VM |
|---------------------------|------------|
| 1. 나지 상태 | |
| 6-8인치까지 평형해진 상태 | 1.00 |
| 비가 한 번 온 상태 | 0.89 |
| 12인치까지 느슨한 상태 | 0.90 |
| 12인치까지 거친 상태 | 0.80 |
| 불도저로 긁은 상태 | 1.30 |
| 뿌리를 제외한 동일상태 | 1.20 |
| 불도저로 사면을 긁은 상태 | 1.20 |
| 뿌리를 제외한 동일상태 | 0.90 |
| 모든 방향으로 불규칙한 거친 자국이 있는 상태 | 0.90 |
| 씨 뿌리고 거름 준 상태 | 0.64 |
| 6개월 후 동일한 상태 | 0.54 |
| 씨 뿌리고 거름 준 후 12달 후 | 0.38 |
| 굳지 않은 경작지 | 0.01 |
| 굳은 경작지 | 0.02 |
| 다져진 흙 | 1.24~1.71 |
| 긁힌 것 외 교란되지 않은 상태 | 0.66~0.30 |
| 밭갈이만 할 때 | 0.76~1.31 |
| 평평한 톱밥 2인치 깊이 | 0.61 |
| 2. 아스팔트 유제 | |
| 1,250 gallons/acre | 0.02 |
| 1,210 gallons/acre | 0.01~0.019 |
| 605 gallons/acre | 0.14~0.57 |
| 302 gallons/acre | 0.28~0.60 |
| 151 gallons/acre | 0.65~0.70 |
| 3. Dust binder | |
| 605 gallons/acre | 1.05 |
| 1,210 gallons/acre | 0.29~0.78 |

[표 2-4] 토지 상태인자 산정 기준(계속)

| 상태 | VM |
|---|-----------|
| 4. 그 외 화학약품 | |
| 1000lbs fiberGlass Roving with 60~150gallonsasphaltemulsion /acre | 0.01~0.05 |
| Aquatain | 0.68 |
| Aerospray 70, 10 percent cover | 0.94 |
| Curasol AE | 0.30~0.48 |
| Petroset SB | 0.40~0.66 |
| PVA | 0.71~0.90 |
| Terra-Tack | 0.66 |
| 목질섬유 혼합, 1000 lb/acre fresh | 0.05~0.73 |
| 목질섬유 혼합, 1400 lb/acre fresh | 0.01~0.36 |
| 목질섬유 혼합, 3500 lb/acre fresh | 0.009~0.1 |
| Portland cement + Latex 1000 lbs/acre+8gallons/acre | 0.13 |
| 1500lbs/acre + 12gallons/acre | 0.006 |
| 5. 씨뿌리기 | |
| 임시적, 0 to 60 days | 0.40 |
| 임시적, after 60 days | 0.05 |
| 영구적, 0 to 60 days | 0.40 |
| 영구적, 2 to 12 months | 0.05 |
| 영구적, after 12 months | 0.01 |
| 6. 잡목 | 0.35 |
| 7. 인공그물의 톱밥피복 | 0.04~0.10 |
| 8. 뿌리 덮개 | 0.01~1.00 |

2. 국내외 토석류 발생량 산정방법 적정성 분석

2.1 토석류 발생량 산정방법 활용

사방시설에 대한 연구 또는 직접 설계 및 시공을 하고 있는 국내 기관 및 기업들이 토석류 발생량 산정을 위하여 어떠한 식을 활용하고 있는지 조사하였으며, 각 방법들에 대한 특징을 분석하였다. 산림청 산하 국립산림과학원과 국내에서 사방시설을 가장 많이 발주하고 있는 산림조합중앙회에서는 토석량 예측방법으로 RUSLE를 활용하고 있다. 최근 토석류로 인해 도로 유실 및 파손의 심각성을 느끼면서 한국도로공사도 토석류 대책을 위해 많은 연구를 하고 있다. 그러나 아직 토석류 발생량을 예측하는 방법에 대한 제시는 하지 않고 있으며, 토석류가 발생한 후에 토석량을 계산하는 침식심도 개념만을 제시하고 있어 예방시설물의 설계의 어려움이 있다. 실제로 사방댐을 설계/제작/설치하는 기업을 분석해 본 결과 (주)대흥이엔지는 RUSLE 및 스트림파워법 그리고 토석류가 발생한 지역의 경우 실제 발생한 양을 침식심도 개념을 적용하여 토석량을 계산하고 가장 큰 값을 적용하고 있으며, (주)지오브로그코리아에서는 RUSLE 및 원단위법을 적용하고 있다. 원단위법은 상당히 간단하지만 신뢰성이 상당히 부족하여 기초설계시만 적용하는 수준이다.

[표 2-5] 실제 적용되고 있는 토석류 발생량 산정방법

| | 토석류 발생량 산정방법 | | | | | 비고 |
|----------|--------------|-------|-------|------|---------|----|
| | MUSLE | RUSLE | 스트림파워 | 원단위법 | 침식심도 개념 | |
| 국립 산림과학원 | X | O | X | X | X | |
| 한국도로공사 | X | X | X | X | O | |
| 산림조합중앙회 | X | O | X | X | X | |
| 대흥이엔지 | X | O | O | X | △ | |
| 지오브로그코리아 | X | O | X | O | X | |

이 중 많이 적용되고 있는 RUSLE법은 세류 및 세류 간 침식에 의한 단기 및 중기 또는 연평균 토사유출량 산정을 하는 방법으로서 유역특성이 불균일한 곳에 적용이 가능하며 계절별 피복조건 및 다양한 침식조절기법 영향이 고려된다는 장점이 있으며, 연평균 토사유출량 산정결과의 신뢰성이 가장 뛰어난 방법으로서 국내에서 많이 활용되고 있는 방법이다. 그러나 유사 직경이

1.0mm 이하에서 적용하는 침사지 설계를 위한 방법으로서 실제 토석류 발생량을 예측하기에는 무리가 있다.

2.1.1 MUSLE 모형(Modified Universal Soil Loss Equation)

Williams(1977)과 Williams & Brendt(1972)은 배수면적이 2.7~4380acre이고, 평균경사는 0.9~5.9%, 사면길이는 258~570ft인 Nebraska와 Texas의 Reisel 근처 유역의 778개 강우자료를 사용하여 RUSLE의 강우 에너지 인자(R)를 여러 개의 매개변수로 바꾸어 유역의 토사 유출량을 예측하는 MUSLE 기법을 개발하였다. MUSLE 모형은 USLE 모형을 개량한 것으로 근본적인 차이점은 USLE 모형이 토양침식의 주요 원인을 강우낙하에너지에 의한 지표면 충격에너지로 해석하고 있는데 비해 MUSLE 모형은 이러한 충격에너지로 인해 유출량이 발생하고 이러한 유출량이 유역의 하류를 통과하는 토양 침식량과 관계가 있다고 보며 그 외 기본인자들의 조건들은 거의 비슷하다. 토사 전달률(D_R)이 이미 반영된 식으로 토사유출량 산정 시 전달률을 고려할 필요가 없다. Williams(1976)는 RUSLE에 사용한 강우에너지 항인 EI_{30} 지수를 유출에너지 항으로 대체하는 방법으로 균등유역에서는 집중형 인자접근(lumpes parameter approach)기법을 비균등유역에서는 유사추적 기법을 제안하였다.

2.1.1.1 집중형 인자기법(Lumped Parameter Approach)

집중형 인자기법은 전 유역을 하나의 특성인자로 표현한 유출에너지를 나타내는 인자로 유출량과 침투유량의 곱인 $Q \cdot q_p$ 를 이용하여 표현하였다(Williams, 1976).

$$Y = 11.8(Q \times q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

여기서, Y : 단일호우에 의한 토사유출량(tons)
 Q : 유출량(m^3)
 q_p : 침투유량(m^3/sec)
 K, LS, C, P : 면적가중치를 적용한 USLE 인자의 평균값

2.1.1.2 토양침식인자(K: Soil erodibility factor)

토양침식인자 K는 토양형태에 의한 점착력을 나타내거나, 강우에 의해 발생하는 토사이송에 대한 저항력, 혹은 유출 전단력 등을 나타내는 척도로서 사용된다.

2.1.1.3 지형특성인자(LS: Slope length-steepness factor)

지형특성인자(LS : Slope length-steepness factor)는 사면경사와 길이가 토양손실에 미치는 영향을 예측하는데 활용된다.

2.1.1.4 사면길이인자(L)

MUSLE에서는 사면길이인자 L의 산정공식은 동일하게 유지된다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m$$

여기서, λ : 단위의 평면에 투영된 사면의 길이(m)
22.1 : 표준 침식밭의 단위길이(m)

2.1.1.5 사면경사인자(S)

지형학적 인자가 침식에 미치는 영향은 세류 및 세류 간 침식에 미치는 영향을 반영하고 있는 무차원 인자 L과 S를 이용하여 산정할 수 있다. 사면경사인자 S는 사면경사가 토양손실에 미치는 영향을 예측하는데 활용된다.

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03, \sin\theta < 0.09 \quad S = 16.8\sin\theta - 0.5, \sin\theta \geq 0.09$$

2.1.1.6 식생피복인자(C: Cropping-Management factor)

식생피복인자 (C : Cropping-Management factor)는 지표의 덮임상태, 토양상태, 경작조건 등이 토양침식율에 미치는 영향을 나타내는 지표로서 사용된다. 무차원 상수인 C는 특정조건하에서 식생지역의 토양유실량과 나지의 토양유실량과의 비로서 나타낸 값으로 정의되며, 일반적으로 식물이 자라지 않는 나지에서는 1의 값을 갖고, 물이나 습지에서는 0으로 정의하고 있다. 또

한, 도시지역 등 거주지 지역에서는 0.01의 값을 갖는다.

2.1.1.7 토양보존인자(P: Conservation practice factor)

토양보존인자 (P : Conservation practice factor)는 어떤 토양보존대책을 세운 사면의 상·하 방향 경사지로부터의 토양보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의한다. 이것은 등고선 경작, 등고선 대상재배, 등고선 단구효과, 지표하 배수, 건조한 농경지의 조도의 효과를 평가하기 위해서 사용된다. 일반적으로 도시지역 등 거주지 지역은 1로 정의하고, 물이나 습지 등의 지역은 0의 값으로 정의한다.

2.1.2 RUSLE 모형(Revised Universal Soil Loss Equation)

RUSLE는 유역에서 발생하는 토양침식량을 산정하는 것으로, 유사전달률(sediment delivery ratio, SDR)개념을 도입하여 토양침식량에서 토사유출량을 산정하여야 한다. 산정된 토사유출량은 중량단위($t/year$)이므로 단위중량을 산정하여 침사지 등의 용량 결정에 필요한 체적단위($m^3/year$)의 토사유출량으로 환산하는 것이 필요하다. 우리나라에서 주로 사용하고 있는 유역의 토양 침식량을 추정하는 방법은 토사의 퇴적이나 이송을 고려하지 않는다. 그러므로 산정된 토양 침식량은 실제 유역출구에서의 토사 유출량과는 큰 차이를 보일 수도 있으므로 유출점에 도달하기 전에 발생한 퇴적을 비롯한 기타 유사의 이송 특성을 고려하기 위해서 토사 전달률의 개념이 필요하다. 일반적으로 토사 전달률에 영향을 미치는 요소는 유역면적, 유역의 주장 및 경사, 하천의 발달 정도, 강우특성, 침식토사의 특성, 지표면 피복상태, 경사면의 길이, 표면조도 등이 있다.

RUSLE 모형은 주로 침사지 설계에 적용되고 있으며, 토사발생량이 보수적인 편이다. 일반적으로 지형이 완만한 곳에서의 계산량은 실제 토석류 발생량과 차이가 있다.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \times D_R$$

여기서, A : 단위면적당 침식되는 토사 발생량(tonnes/ha)
 R : 강우 침식성인자(MJ · mm/ha · hr)
 K : 토양침식성인자(tonnes/ha · R)
 L : 침식사면의 길이인자
 S : 침식사면의 경사인자
 C : 식생에 의한 토양의 피복인자
 P : 토양보전 대책인자
 D_R : 토사 전달률(%)

2.1.3 USLE와 SCS-CN 연계모형

SCS-CN방법은 실제보유수량 F 와 최대잠재보유수량 S 의 비가 직접유출량 Q 와 총강우량 P 의 비와 같다는 비례가정에서 시작된다. USLE와 SCS-CN 방법을 연계한 모형은 SCS-CN방법의 직접유출량 Q 와 총강우량 P 의 비인 유출계수가 토사유출량 Y 와 토양침식량 A 의 비인 토사운반률과 같다는 가정을 필요로 한다(Mishra 등, 2006).

$$\frac{Q}{P} = \frac{F}{S} = \frac{P}{P+S} = \frac{Y}{A}$$

다시 초기손실을 고려하면 토사유출량 Y 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Y = \frac{(P - I_a)A}{P - I_a + S}$$

최대잠재보유수량 S 가 0일 경우, CN값은 100이 되는데 이는 완전 불투수 지역으로 이때 발생하는 총강우 P 는 모두 직접유출 Q 가 되어 유역에서 빠져 나가게 된다. 이때 토양침식량 A 역시 모두 운반되어 토사유출량 Y 는 토양 침식량 A 와 같게 된다. 반대로 최대잠재보유수량 S 가 ∞ 가 되어 CN값이 0이 되면 이는 완전 투수지역으로 직접유출 Q 가 0이 된다. 따라서 토사유출량 Y 역시 0이 된다. 다시 말해 토사유출량 Y 는 SCS-CN방법의 유출계수로 결정된다고 할 수 있다(Mishra 등, 2006).

2.1.4 스트림파워

유출하는 토사량의 간이 추정방법으로 스트림 파워 이론을 적용하여 홍수 시 유출직후의 토사량을 정리한다. 이 식에는 많은 부유토사가 포함되어 있다고 할 수 있다. 일 강우량과 경사로 유출 토사량을 계산하여, 상대적으로 간단한 방법이다.

$$D = \alpha(A \cdot R \cdot I)\beta$$

여기서, D : 홍수 시 유출 토사량(m^3)
 A : 유역면적(km^2) R : 일 강우량(mm)
 I : 유출 토사량을 추정하는 지점에서 200m 상류까지의
 평균하도구배
 α, β : 계수(평균값으로 α 는 10, β 는 2.0)

2.1.5 원단위법

지표의 상태에 따른 단위면적당 토사침식량으로부터 추정하는 것으로 일본의 “골프코스의 설계 및 시공(1984)”에서 제시한 사방설계기준의 원단위를 사용한다(표 2-6). 지표의 상태를 4가지로만 나누어 실제 지형의 다양성을 포함시킬 수 없고, 토사유출량도 직접적인 환경을 고려하지 않아서 적용할 수 있는 범위가 매우 작고, 실제 토사유출량과도 많은 차이가 있다. 이에 따라 신뢰성 또한 매우 부족하다.

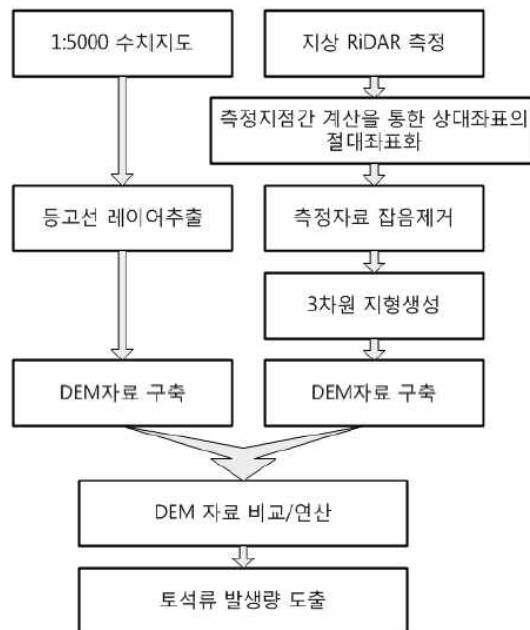
[표 2-6] 일본의 토사유출 원단위

| 지표의 상태 | 토사유출량($m^3/년/ha$) | 두께(mm) |
|-----------|---------------------|------------|
| 나지, 황폐지 등 | 200~400 | 20~40 |
| 간벌지, 초지 등 | 15 | 1.5 |
| 택벌지 | 2 | 0.2 |
| 보통의 입지 | 1 | 0.1 |

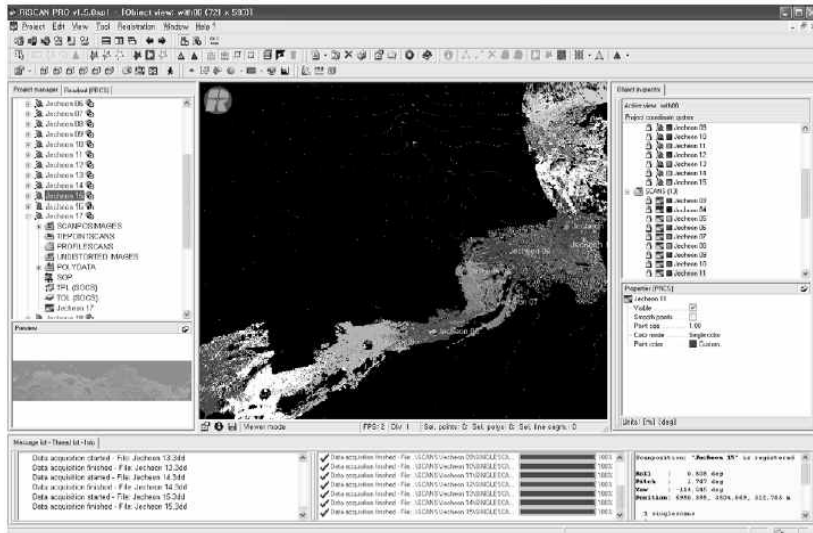
2.1.6 GIS와 LiDAR를 이용한 방법

재해현장 스캔자료와 1:5000 축척의 수치지도를 이용한 분석으로 현장의 스캔에 사용한 장비는 RIEGL사의 LMS-Z210ii로 반사율 80% 기준에서 최대

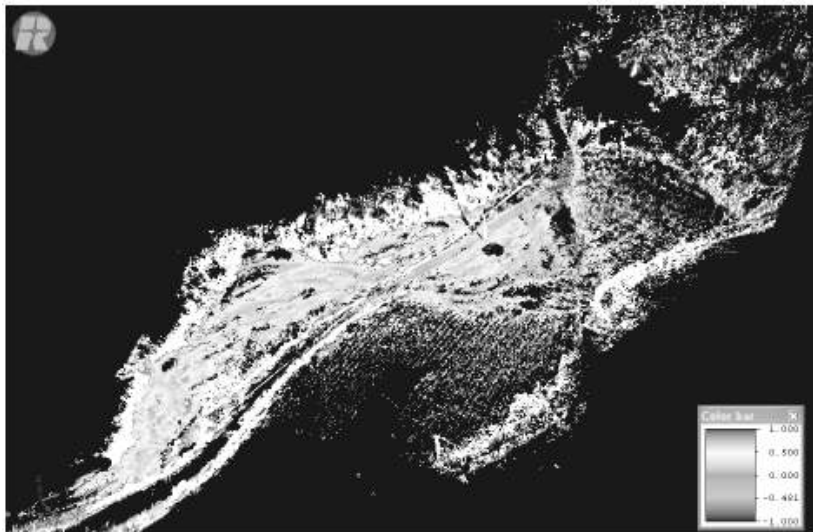
측정거리 650m, 수직 0℃ ~ 80℃, 수평 0℃ ~ 360℃ 범위로 15mm의 오차수준으로 포인트를 획득할 수 있으며, 카메라와 GPS를 장착하면 측정 포인트의 RGB값 및 절대좌표를 획득할 수 있다. GPS는 HUACE사의 X90 2주파 RTK(Real Time Kinematic) 장비로 국토지리원에서 구축한 VRS(Virtual Reference System)RTK시스템을 이용하면 수평방향 $\pm 10mm + 1ppm$, 수직방향 $\pm 20mm + 1ppm$ 의 정확도를 가진다. 피해 발생 전의 1:5000 수치지도를 이용하여 토석류 피해지역의 수치고도모형(DEM : Digital Elevation Model)을 만들고 이를 발생 전 지형으로 가정하고 발생 후 지상 LiDAR를 이용하여 획득한 자료와 비교하여 토석류 발생량을 추정할 수 있다. 추정과정은 지상 LiDAR 장비를 이용하여 대상지역의 지형정보를 측량한다. rkr 지점에서의 스캔자료는 상대좌표로 구성되어 있으므로 스캔지점간의 스캔자료의 연산을 통한 절대좌표로의 변환이 필요하다. 따라서 측정 시 측정 지역의 중첩이 가능한 지점을 적절히 선정해야 한다.



[그림 2-4] 토석류 발생량 도출 과정



[그림 2-5] 스캔자료를 이용한 3차원 모형의 생성



[그림 2-6] 지상 LiDAR 스캔자료에서의 수목제거

절대좌표로 변환된 지형정보에는 아직 인공지형물이나 수목 등의 불필요한 정보가 존재하며 이를 제거해야 실제 지형에 해당하는 정보를 얻을 수 있다. 측정정보에 대한 잡음의 제거 방법은 수작업으로 일일이 대조하여 지면점 외의 수목이나 인공구조물을 제거하는 방법, 반사율에 의한 제거 방법, 각종 필

터(Elevation Threshold Expanding Window, Maximum Local Slope, Morphological 등)를 활용한 방법 등이 있다. 이러한 방법에 의해 잡음이 제거된 지형자료를 이용하여 DEM자료를 구축하고 1:5000 수치지도를 활용하여 생성한 DEM과의 연산을 통해 토석류 발생량을 산정할 수 있다.

2.1.7 비유사량법

유역의 침식량과 유사량이 같다는 기본가정을 바탕으로 하여 유역의 출구에 서 관측된 유사량을 추정하여 유역평균함으로써 비유사량을 구하고, 이를 이용하여 연평균 토양침식량을 추정하는 방법이다.

2.2 물리적인 토양침식량 산정기법

2.2.1 WEPP 모형(Water Erosion Prediction Project; Flanagan and Livingston, 1995)

WEPP 모형은 물리적 기반의 과정 지향적(process-based)모형으로서 유출량 뿐만 아니라 단일 경사지나 유역 출구로부터 배출되는 토사유출량을 산정할 수 있으며, 모형은 인터넷에서 쉽게 구할 수 있다. 전체 패키지는 경사지 프로젝트(hillslope project)와 유역 프로젝트(watershed project)로 불리는 두 가지 계산모드로 이루어져 있다. 전체 WEPP 모형은 다양한 부모형들로 이루어져 있다. WEPP 모형은 연속방정식과 운동과 이론을 이용해 고랑관개수리학을 모형화한다. 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$$

여기서, Q : 유량 x : 사면거리
 A : 단면적 t : 시간
 Z : 고랑의 단위길이 당 누가침투량

다음 식은 같은 운동과 이론의 가정이 따른다.

$$S_f = S_o \quad S_f : \text{마찰경사(friction slope)} \quad S_o : \text{고랑경사(furrow slope)}$$

입력 자료의 경우 RUSLE 모형은 기본적으로 강우자료, 지형자료, 토양자료, 토지이용과 관련한 경작자료 등을 필요로 하는데 반해 WEPP 모형은 기상, 토양, 지형, 작물 재배 및 관리, 관개, 유역구조, 수로 등에 관한 다양하고 복합적인 입력 자료들을 요구한다. 특히 기상자료, 토양자료, 그리고 작물 재배 및 관리 자료에 있어서는 RUSLE 모형에 비해 훨씬 많은 종류의 입력변수들을 요구하고 있다. 다음 표 2-7은 WEPP 모형의 구동에 있어서 필수 기본 입력 자료들을 보여주고 있다.

[표 2-7] WEPP 모형의 기본 입력자료

| 자료 | 내 용 |
|------------|--|
| 기상 자료 | 강우량, 강우 지속시간, 강우강도, 일(또는 월) 평균 최고/최저기온, 이슬점온도, 8시/18시 풍속과 풍향, 태양복사량(일사량), 해당 기상관측소의 위치(위도, 경도, 고도) |
| 지형 자료 | 해당 경사지나 유역의 지형도, 경사도, 경사면길이, 경사방향, 경사위치 |
| 토양 자료 | 토양통(soil series), 토양층위(토심), 토성, 점토 및 모래함량, 자갈함량, 유기물 함량, 양이온치환능, 토양 알베도(albedo), 세류간/세류 침식능, 한계 전단응력, 기선 유효 수리전도도(baseline effective hydraulic conductivity), 초기 포화도 |
| 작물관리 자료 | 작물종류, 파종 수확시기, 엽면적지수(leaf area index), 피복도, 뿌리분포, 생산량 등 32개 (WEPP에서는 다양한 작물에 대해 데이터베이스화하여 제공) |
| 유실량 자료 | 토양유실량, 물유출량 |

Fleming(1977)은 강우유출모형에 있어서 입력되는 매개변수를 크게 물리적(physical) 매개변수, 수문기상(hydrometeorologic) 매개변수, 내부처리(process) 매개변수로 구분하였는데 이에 따른 WEPP 모형의 매개변수는 다음과 같다.

- 물리적 매개변수: 경사지 또는 유역의 지형자료, 해당 기상관측소의 위치자료, 토양성분자료
- 수문기상 매개변수: 강우자료, 기온자료, 풍속/풍향자료, 태양복사량, 이슬점온도
- 내부처리 매개변수: 토양의 세류 침식능, 세류간 침식능, 한계 전단응력, 유효 수리전도도, 토양 알베도, 양이온치환능, 초기 포화도, 작물 관리자료

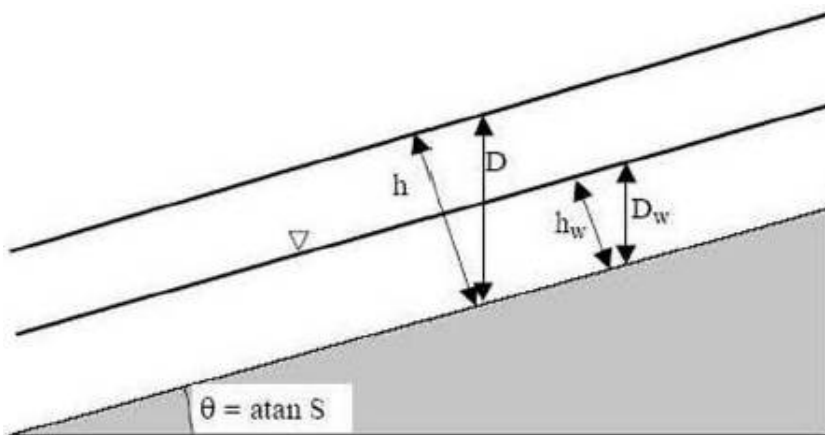
이러한 매개변수 중에서 물리적 매개변수와 수문기상 매개변수는 해당 시험 유역에 대한 실측자료와 기상관측소의 기록자료 등에서 구하고, 내부처리 매개변수는 측정이 불가능한 매개변수로서 민감도 분석을 통한 보정 대상이 되는 매개변수들이다.

2.2.2 SINMAP(Stability Index MAPping)

SINMAP은 Pack 등(1998)이 제안한 모델로서 정상상태의 습윤지수를 바탕으로 한 모델이며, Montgomery and Dietrich(1994)의 모델에서와 같이 지표 하흐름의 속도에 비해서 침투되는 시간이 매우 짧기 때문에 침투과정을 무시하고 모든 강우는 지표하로 침투하여 정상상태로 형성한다고 가정하여, 임계 강우와 지속시간을 구하는 모델이다. SINMAP의 수문모델에 적용된 정상상태라는 가정은 1)~3)과 같다.

- 1) 임의의 점에서 상부사면의 기여면적은 지표하흐름을 표현해주는 척도라고 봄
- 2) 재충전율(recharge rate)과 유출율(discharge rate)은 평형을 이루고 있다고 가정
- 3) 임의의 점에 대한 기여면적은 모든 우량은 그 점을 통해 유출되었다고 가정

1)의 가정을 만족하기 위해서는 2)와 3)이 충족되어야 한다.



[그림 2-7] 무한사면 안정성 모델

그림 2-7과 같은 무한사면 모델에서의 안전율은 다음의 식과 같이 계산되는데

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta [\rho_s q (D - D_w) + (\rho_s q - \rho_w q) D_w] \tan\phi}{D \rho_s q \sin\theta \cos\theta}$$

여기서, C_r : 나무뿌리에 의한 점착력

C_s : 흙의 점착력 ϕ : 내부마찰각

여기서, $h = \cos\theta$, 상대습윤지수를 $w = D_w/D = h_w/h$, 복합 점착력을

$C = (C_r + C_s)/(h\rho_s q)$, 물과 흙의 밀도비를 $r = \rho_w/\rho_s$ 로 가정하면

$$FS = \frac{C + \cos\theta [1 - wr] \tan\phi}{\sin\theta} \text{로 표현된다.}$$

SINMAP에서의 3가지 가정을 이용하면 습윤지수는 수평투수량계수를 T, 재충전율을 R, 비유역면적을 a라 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$w = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T \sin\theta}, 1\right)$$

위 식들에서 $C \sim U(C1, C2)$, $R/T \sim U(x1, x2)$, $\tan\phi \sim U(t1, t2)$ 인 무작위 분포로 가정하여 입력하면 안정성지수(stability Index)를 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$SI = FS_{mm} = \frac{C1 + \cos\theta \left[1 - \min\left(x2 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) r \right] t1}{\sin\theta}$$

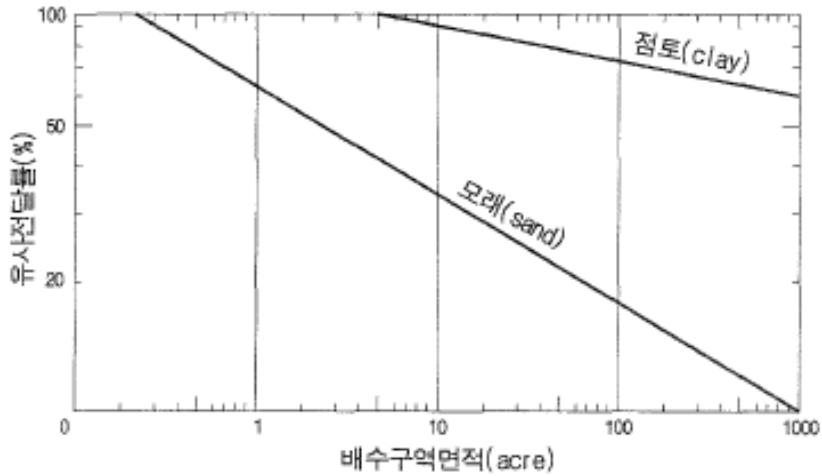
이를 이용하여 지형, 물성들의 입력변수를 이용하여 SI를 계산하고 표 2-8과 같이 안정성등급을 정의하여 사면의 안정성을 분류할 수 있다.

[표 2-8] 안정성등급의 분류

| Condition | Class | Predicted State | Parameter Range | Possible Influence of Factors Not Modeled |
|-------------------|-------|----------------------------|--|--|
| $SI > 1.5$ | 1 | Stable slope zone | Range cannot model instability | Significant destabilizing factors are required for instability |
| $1.5 > SI > 1.25$ | 2 | Moderately stable zone | Range cannot model instability | Moderate destabilizing factors are required for instability |
| $1.25 > SI > 1.0$ | 3 | Quasi-stable slope zone | Range cannot model instability | Minor destabilizing factors could lead to instability |
| $1.0 > SI > 0.5$ | 4 | Lower threshold slope zone | Pessimistic half of range required for instability | Destabilizing factors are not required for instability |
| $0.5 > SI > 0.0$ | 5 | Upper threshold slope zone | Optimistic half of range required for stability | Stabilizing factors may be responsible for stability |
| $0.0 > SI$ | 6 | Defended slope zone | Range cannot model instability | Stabilizing factors are required for stability |

2.2.3 유사전달률(Sediment delivery ratio, SDR)

원 지점에서 침식된 토립자들은 흐름에 연행·이송되어 하류로 내려가다가 경사가 완만해지는 곳이나 움푹 파인 지점 또는 장애물 등에 의해 중간에 퇴적될 수 있다. 이렇게 원 지점에서 침식된 토립자들 중 하류 일정지점까지 내려오는 입자들의 비를 유사전달률이라 한다. 유사전달률은 사면 및 도랑의 유사전달 능력을 나타낸다. 이 값은 토립자의 크기, 조직은 물론 토지이용, 지형 등에 따라 작게는 0에서 크게는 1까지 변하나, 개략적으로 유역면적에 반비례하고 입자가 작을수록 커진다. 그림은 토사입경 및 유역면적과 유사전달률과의 관계를 보여준다. 여기서 실트의 경우 보수적인 측면에서 점토로 보고 유사전달률을 구할 수 있을 것이다. 한 지점에서 토사유출량(유사량)은 상류 배수구역에서 토양침식량에 유사전달률을 곱하여 산정한다.



[그림 2-8] 입경별, 배수구역 유역면적별 유사전달률

2.3 토석류 규모 분석의 한계

침식을 개념을 이용한 토석류 규모의 산정은 실용적인 범위에서 실제 발생한 량을 근접하게 예측하는 것으로 나타나 향후 토석류 규모 예측에 있어서 적용이 가능할 것으로 보인다. 하지만 토석류가 발생하지 않은 유역에서 토석류 발생가능 규모를 예측하기 위해서는 초기파괴위치와 초기 파괴량, 토석류의 이동가능 거리, 이동구간 내에서의 침식가능두께, 퇴적두께를 산정해야 하는 어려움이 여전히 남아 있다. 유역에서 유출되는 토석량의 산정에 있어서 침식되는 양의 산정뿐만 아니라 유역 내에서 퇴적되어 유출되지 않는 토석량의 산정도 중요하다. 토석류 이동과정 중에 퇴적되는 구간이 충분한 경우에는 유출지점까지 토석류가 이동하지 않는 경우도 발생하므로 이동경로의 특성을 고려하여 퇴적되는 토석량에 대한 고려도 필요할 수 있음을 염두에 두어야 한다. 지형변수와와의 상관성을 분석하는데 강우의 특징(강우강도, 총강우량)에 따라 동일한 유역이라 하더라도 발생하는 토석류의 규모가 달라질 수 있는데 이를 고려한다면 강우특징에 따라 지형변수와 토석류 규모사이의 관계는 상이하게 나타날 수 있다.

3. 토석류 제어대책 관련 국내외 설계기준 및 유지관리 기준 조사 분석

국내 토석류 제어대책공법은 1984년 개정된 “사방사업법”의 사방댐 설치사업에 속하는 것으로 산림청 치산과에서 담당하는 구조물로 분류되고 있다. 토석류 대책공법과 관련된 설계 및 유지관리에 대한 국내 기준으로 산림청에서 발간한 “사방기술교본”이 유일하다고 할 수 있다. 사방기술교본은 산지 계곡의 침식예방이 주목적으로서 직접적인 피해를 받는 하천 및 도로관리에 적용하기에는 무리가 있으므로 도로에 피해를 주는 계곡에 대한 토석류 대책공법은 국토해양부에서 별도로 제시하고 있다.

본 연구에서는 산림청에서 발행한 “사방기술교본” 및 국토해양부에서 발행한 “산악지 도로설계 매뉴얼”, “하천설계기준”, “건설공사 비탈면 설계기준”, “도시부 도로배수 시설설계 잠정지침”을 조사하였으며, 토석류의 피해에 큰 영향을 받는 고속도로를 관리하는 주체인 한국도로공사에서 발행하는 “도로설계요령(토공편)”을 조사 분석하고 그 내용을 간략히 수록하였다.

3.1 사방기술교본

사방기술교본에는 사방댐의 시공장소, 시공요령, 본댐과 부댐 등 설계 방법을 자세히 제시하고 있으므로 국내 사방댐 설계는 사방기술교본을 기본적으로 활용하며 필요한 경우에만 추가적인 검토를 수행하는 실정이다. 그러나 볼투과형 사방댐으로 분류되는 콘크리트 사방댐을 설계하는 방법만 제시되어 있으며, 투과형댐 및 최근 들어 많이 적용되는 강재를 활용한 사방댐에 대한 설계기준은 언급이 없으며, 더불어 유지관리에 대한 부분도 부족하다고 판단된다. 다음은 사방기술교본에서 제시한 사방댐 설계 기준이다.

3.1.1 사방댐

3.1.1.1 시공장소

상류유역의 산지가 안정되었거나 계간과 산각이 불안정하여 호우시마다 풍화토층의 침식붕괴와 산사태 등의 발생으로 토사, 석력이 流下堆積(유하퇴적)함으로써 하류의 전, 담, 가옥, 타 산업시설 등에 피해가 있거나 예상되는 황폐계간을 대상으로 한다.

- 계상의 양안에 암반이 있는 지역
- 상류부의 계곡이 넓고 경사가 완만하여 貯砂(저사) 효과가 큰 장소
- 支流(지류)의 합류점 부근에서는 합류점의 하류부

3.1.1.2 시공요령 및 설계방법

바닥파기는 견지반이 나올 때까지 충분히 판다. 댐의 방향은 일반적으로 퇴사나 토사력을 유지, 고정하고자 하는 횡 공작물은 상류의 유심선(퇴사된 후의 가정 유심선)에 직각방향으로 하나 부득이 곡선부의 설치경우는 홍수시 유심선의 접선에 직각방향으로 한다. 댐의 계획지점에서 상·하류의 한쪽 계안이 유수의 충격에 의하여 침식을 받을 우려가 있는 때에는 댐 방향이나 방수로의 위치변경 또는 기슭막이공사로 보강한다.

댐의 종류 및 형식은 일반적으로 직선중력식을 적용하나 축설하고자 하는 입지환경조건을 감안하여 양질의 기암노출지로서 폭이 좁은 지역은 높은 콘크리트로 설계하고 常水(상수)가 거의 없고 계상에 토사가 많이 퇴적되어 토층이 깊고 석재가 적은 계천에서는 흙댐을, 상수가 적고 석재공급이 어려운 암반노출 계천에서는 돌·흙 혼합쌓기댐을 설치한다.

찰쌓기를 할 때에는 3m²당 1개의 排水口(배수구)를 설치한다. 대수면의 비탈은 돌, 콘크리트댐에서는 수직으로 하거나 1:0.1~0.2로 하고 흙 또는 혼합쌓기댐에서는 1:0.1~0.15로 한다. 반수면의 비탈은 돌, 콘크리트댐에서는 1:0.2~0.3, 흙댐에서는 1:0.1~0.15로 한다. 댐의 높이는 시공목적, 地盤(지반)의 상황, 계획기울기, 시공지점의 상태 등을 고려하여 결정한다. 규모가 큰 붕괴지에서 산각의 침식방지를 목적으로 할 경우에는 비교적 높게 하며 계안붕괴지(溪岸崩壞地)에서 산지의 침식방지를 목적으로 할 경우에는 일반적으로 낮게 한다. 토석류 방지용 댐은 충분한 여유를 갖는 높이로 하고 貯砂(저사)를 목적으로 할 경우에는 가급적 높게 정한다.

계획기울기(계획물매, Planning gradient)는 현 계상기울기(계상물매, Channel bed gradient)의 1/2~2/3을 표준으로 하나 유역인자에 의한 계획기울기 추정표를 이용하는 것이 좋다.

방수로의 위치는 댐 반수면의 끝부분, 물받침부위와 암반의 지질, 댐 축설지점의 상하류 양안의 상태 등을 고려하여 결정하는데, 축설지점의 암반인 쪽에

설치하며 암반이 없는 경우는 중앙부에 설치한다. 방수로의 형상은 일반적으로 역사다리꼴을 많이 이용하며 방수로 양옆의 기울기는 1:1 즉 45°를 표준으로 한다.

홍수 후의 유수는 토석을 함유하고 있어 청수의 경우에 비하면 유속이 떨어지고 수위가 높아질 뿐만 아니라 집중호우시에 유출되는 流木(유목)과 대 전석 등 장애요인으로 방수로는 물론 어깨부를 월수하여 댐 시설을 파괴시키는 결과를 초래하게 되므로 방수로의 크기는 가능한 한 200~500%로 충분히 여유를 갖도록 설계한다. 방수로의 크기는 시수량법, 합리식법, 홍수위흔적법 등에 의하여 산출할 수 있으나 일반적으로 최대홍수유량(합리식)에 의하여 결정하며 될 수 있는 한 해당되는 계류의 홍수위 흔적을 대조하여 결정한다. 그러나 규모가 작은 댐에서는 비류량(比流量, Specific discharge)에 의하여 측정하는 것이 편리하다. 시공 후 바로 퇴사가 예상될 경우는 開水路(개수로, Open channel)로 유량을 계산하며 시공 후 2~3회의 대 홍수 후에도 쉽게 퇴적이 예상되지 아니하는 특수한 경우는 縮流(축류, Contracted weir)로 계산한다. 단, 어떠한 경우라도 방수로단면의 일류심(h1)은 1m 이상으로 하고, 방수로 하장은 최소한 3m 이상으로 하는 것이 안전하다.

합리식 $Q=0.002778CIA(m^3/sec)$ 에서 0.002778CI 값은 비류량이라 한다.

여기서, Q : 최대홍수유량 C : 유출계수
 I : 최대강우량(mm/hr) A : 유역면적(ha)

[표 2-9] 합리식에 적용되는 유출계수⁷⁾

| 구 분 | 협준한 산지 | 제3기층 산악 | 기복이 있는 토지와 수림 | 산지천 | 평지 소하천 | 유역의 반이상이 평탄한 대하천 |
|---------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|------------------|
| 유출계수(C) | 0.75~0.90 | 0.70~0.80 | 0.50~0.75 | 0.75~0.85 | 0.45~0.85 | 0.50~0.75 |

댐어깨부분은 월류되지 않는 것을 원칙으로 계획홍수위(計劃高水位, Design high water level) 이상의 안전한 높이로 한다. 댐 어깨 부분은 암반인 경우

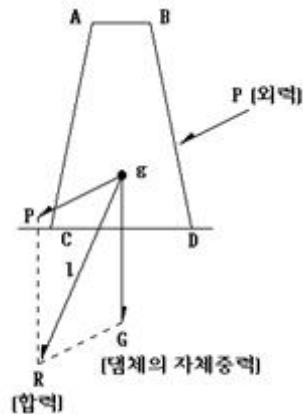
7) 우리나라 황폐계류에서는 사력생산지: 0.9이상, 사력유과지: 0.8이상, 사력퇴적지: 0.7이상 되도록 한다.

1~2m, 토사인 경우에는 2~3m를 양안에 넣어야 한다.

중력식 사방 댐의 댐마루(天端)두께는 유속, 사력의 크기, 월류수심, 상류쪽의 기울기 등을 고려하여 결정하여야 하며, 대체로 다음 두께를 표준으로 한다. 유출사력의 입경이 작은 황폐소계류에서는 0.8m, 일반 황폐계류에서는 1.5m, 홍수에 의해서 큰 전석의 유하위험성이 있는 곳에서는 2.0m, 대규모 토석류발생 위험성이 있거나, 산사태로 측압을 받게 되는 위험성이 있는 곳에서는 2.0~3.0m이다.

중력식 콘크리트 사방댐의 댐 길이가 25m 정도를 초과할 경우에는 원칙적으로 수직 줄눈을 설치해야 한다. 중력식 사방 댐의 안정을 위한 단면은 다음과 같은 조건을 만족해야만 한다

중력댐의 轉倒(전도)에 대한 안정조건은 합력(R)작용선이 堤底(제저, CD)의 중앙 1/3보다 하류측을 통과하면 댐 몸체의 상류측에 張力(장력)이 생기므로 합력작용선이 제저의 1/3내를 통과해야 한다.



[그림 2-9] 댐의 합력

滑動(활동)에 대한 안정조건은 활동에 대한 저항력의 총화가 원칙적으로 수평 외력의 총화이상으로 되어야 한다.

堤體(제체)의 파괴에 대한 안정조건은 제체 각부에 작용하는 응력도는 제체 각부를 구성하는 재료의 허용응력도를 초과하지 않아야 한다.

기초지반의 지지력에 대한 안정조건은 댐밑(堤底)에 발생하는 최대응력이 기

초지반의 허용지지력을 초과하지 않아야 한다.

물빼기구멍(排水孔, 水抜孔, 水抜口, Drip hole, Weep hole)의 크기, 수, 설치 위치는 설치목적에 따라 결정하지만 좁은 계곡에서는 댐 아래쪽의 계상선(溪床線)에 1개만을 설치하고 계곡이 넓을 때에는 주류(主流)가 변화하므로 몇 개소에 설치하는 것이 좋다. 크기는 20~40cm 정도로서 직사각형 또는 정방형이 바람직하나 시공편의상 PVC관도 무방하다. 하류댐의 물빼기 구멍은 상류댐의 기초보다 낮은 위치에 설치한다. 여러 개를 설치할 때는 하단의 물빼기 구멍은 溪床線(계상선), 또는 댐 높이의 1/3되는 곳에 설치하고 상부에 설치하는 물빼기 구멍은 몇 개를 수평으로 배치하도록 한다. 큰 댐에서 최상단의 물빼기 구멍은 토석류가 격돌할 때, 상부의 파괴원인이 되기 쉬우므로 방수로 바닥에서부터 1.5m이하에 설치한다.

댐의 반수면 하단의 세굴을 방지하기 위하여 물받이(水卵工), 앞댐(副댐), 막돌놓기(拓石, Energy dissipators by stone) 공사를 해야 한다. 물받침(물받이, 水卵工, Apron) 길이(L)는 일반적으로 다음 공식에 의하여 산출한다.

$$L=(1.5\sim2.0)(H+t)-nH$$

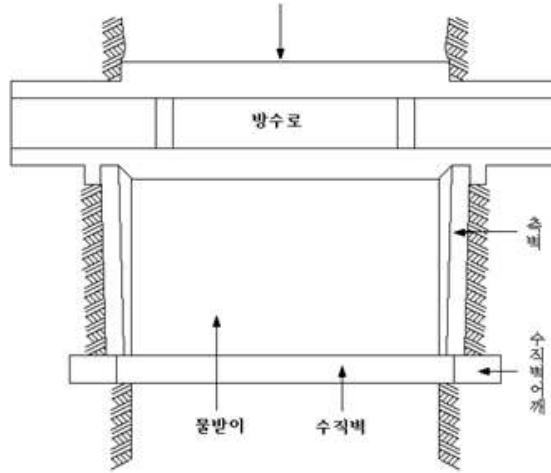
여기서, H : 사방댐의 높이
t : 방수로 깊이(일류심)
n : 반수면 비탈

1.5는 높은 댐에서, 2.0은 낮은 댐에서 이용한다.

일반적으로 간이 설계는 1)~3)과 같다.

- 1) H+t 가 6m 이하 경우.....2배
- 2) H+t 가 6m 이상 경우.....1.5배
- 3) 유효고가 3m 이하 경우.....2.5~3배

물받이 공사의 기울기는 계상기울기에 준하며 물받이의 끝돌림(수직벽)의 밑넣기(根入)깊이는 물받이보다 적어도 1.0m이상 깊게 하여야 한다.



[그림 2-10] 물받이공사의 수직벽과 측벽

물받이 두께는 보통 0.5~1.5m로서 댐의 높이가 5m일 때는 0.5~1.0m, 댐의 높이가 10m일 때는 1.5m로 하며 두께가 1.25m이상일 경우에는 물방석(水褥工, Water cushion)을 설치한다. 물방석의 깊이는 보통 0.3~1.0m를 표준으로 하고 높은 댐에서는 2.0m내외로 한다. 물받이 두께 결정공식 $DW=\alpha(0.6H+3t-1.0)$, (여기서 $\alpha=0.2$ (경험수치))를 이용하기도 한다.

댐의 측벽은 방수로 어깨의 수직선보다도 외측 0.5~1.0m 이상의 후방에 기초를 두어야 하며 측벽 하류단(下流端)의 천단고를 원칙적으로 부(副)댐(앞댐)의 어깨높이와 같게하며 천단 두께는 0.3~0.5m를 표준으로 한다. 본댐(本댐, Main dam)과 앞댐(副댐, Counter dam)은 縱斷的으로 중복되어야 하며 중복 높이는 본댐 높이의 1/3~1/4 정도를 표준으로 하며 다음 식에 의하여 구하기도 한다.

가끼(姉)의 실험식($h'=0.6H+3t-1.0-4d$)

여기서, h' = 중복높이(m)
 t : 월류수심(m)

H : 유효낙차(m)
 d : 계상석력의 유수방향 길이(m)

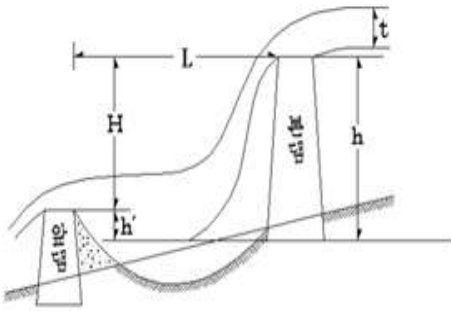
가마(蒲)의 경험식

$$h' = \frac{H+t}{6}$$

물방석의 경우

$$h' = \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3} \right) H$$

본담과 앞담과의 간격은 $L \geq (1.5 \sim 2.0)(H+t)$ 식에 의하여 결정한다. 담이 높은 경우 1.5, 낮은 담인 경우는 2.0을 적용한다.



[그림 2-11] 본담과 앞담과의 관계



[그림 2-12] 콘크리트 사방담 본담과 부담



[그림 2-13] 댐의 측벽



[그림 2-14] 물방식

사방담의 기초지반은, 충분한 지지력과 마찰저항력을 가지고, 댐하류면의 세굴 및 파이프 등에 의한 파괴에 대해서도 안전하지 않으면 안된다. 측벽은 물받이의 양쪽이 월류수로 침식될 경우에 설치하며 기초바닥을 물받이를 시공하는 경우에는 기초바닥과 같은 높이로 하고 물받이를 시공하지 않을 경우에는 측벽의 상류단은 주댐의 기초저면을 한도로 하며, 하류단은 부담의 방수로의 천단보다 1m정도 근입시킨다. 사방담의 기초의 밀넣기(根入) 및 양안에 있어서 댐어깨의 추가넣기(突入)의 깊이는, 지반의 불균질성과 풍화의 속도 등을 고려해서, 안전한 깊이가 되도록 하지 않으면 안된다. 사방담의 堤體(제체)와 굴착면 사이에 콘크리트 등으로 사이채움을 하여 제체와 현 지반을 밀

착시켜서, 굴착면 풍화와 붕괴를 방지하지 않으면 안된다. 또, 제체어깨부분의 양안의 굴착면에는 댐어깨 보강시설(석재 찰쌓기 등) 등을 설치해서 그 붕락을 방지하여야 한다. 사방 댐의 기초지반이 충분한 강도를 갖지 못한 곳에서는 그 상황에 따라서 기초말뚝박기공사 등의 기초처리를 하지 않으면 안된다. 메쌓기댐 높이는 4m를 최대로 하며 독마루나비(천단폭)는 댐높이의 1/2정도로 하고 기울기는 1:0.3~0.5로 한다.

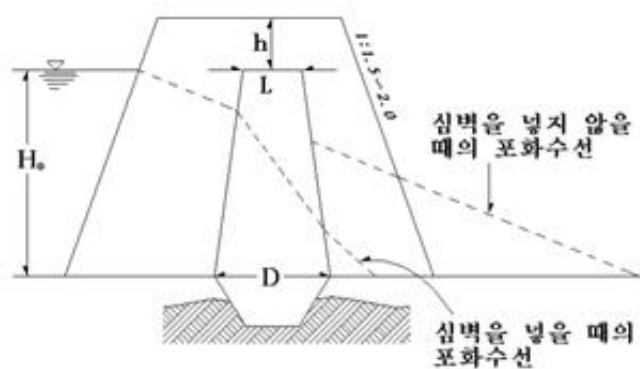
혼합쌓기댐(Mixed masonry dam)을 설치할 때에는 석축은 메쌓기로 하고 독마루(堤冠) 및 반수면 방수로 부분만은 찰쌓기로 해야 한다. 댐 높이는 5m전후로 하고 댐마루 넓이는 0.5~3.0m, 기울기는 1:0.3~0.5로 하는 것이 좋다.

흙댐은 石灰二和土(석회이화토) 또는 점토로 내심벽(心壁, Core wall) 또는 방수로 부분에 외심벽을 만든다. 내심벽은 방수로까지 들어가도록 하고 위 넓이는 독마루 넓이의 1/2로, 외심벽의 기초로 돌 또는 콘크리트로 축조한다.

흙댐의 심벽은 점토의 경우 비탈기울기는 $1/12 \sim 1/8$, $h \geq 1.0 \sim 1.5$ m,

L (심벽의 상단부 두께) $\geq 1.2 \sim 2.5$ m, $D \geq (1/3)H_0$ 로 하며,

콘크리트의 경우는 $L = 70 \sim 200$ cm, $D = (1/7 \sim 1/6)H_0$ 로 한다.



[그림 2-15] 흙댐의 심벽과 포화수선의 위치

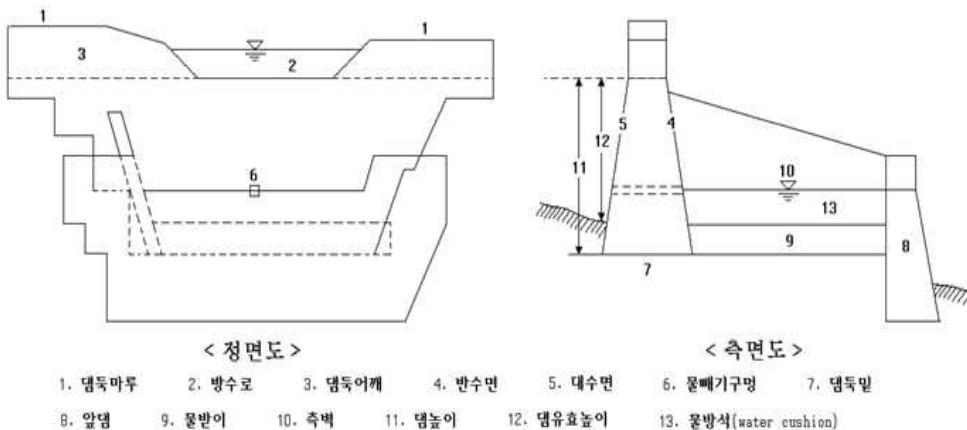
흙댐의 높이는 보통 높이 2~5m, 반수면 기울기는 1 : 2, 대수면 기울기는 1 : 1~2, 댐마루나비는 $\frac{\text{댐높이}}{5} + 1.5$ m로 한다. 방수로로는 돌붙이기나 콘크리트붙이기를 하며 때로는 댐 밑부분을 보호하기 위하여 물받침을 설치하기도 한다.

통나무댐은 질이 좋은 석재가 없고 운반이 불편한 곳에서 적당하지만 안정도가 낮고 부패하기 쉬우므로 별로 시공하지 않는다. 높이는 4m이하로 한다.

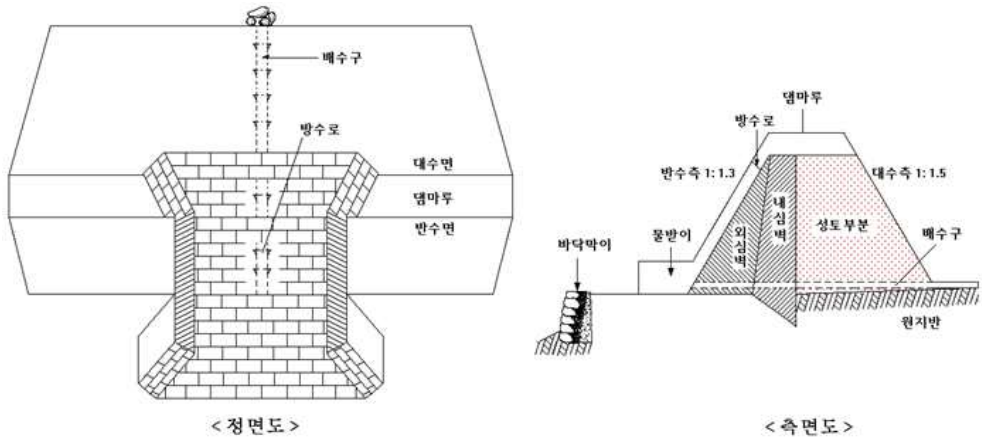
돌망태댐은 돌망태의 유연성을 이용하여 돌망태를 조립하고 축설하는 댐으로 땅밀림지대, 산사태지 등 연약지반에 설치하면 효과적이다. 터파기는 1m정도로 하고 말뚝으로 제체를 유지해야 하며 높이는 3m이하로 한다. 철선 등이 부패하기 쉬워 내구성이 낮으므로 지반이 안정되면 콘크리트로 피복하는 것이 좋다. 콘크리트 틀댐(Concrete crib dam)은 콘크리트블록으로 틀을 만들고 내부에 호박돌을 채워 축설하는 댐으로 모래와 자갈이 많은 야제에서 이용된다. 댐의 높이는 3~5m로 한다.

호박돌 콘크리트댐은 거푸집을 사용하여 내부에 호박돌 콘크리트를 채워 축설하는 댐으로 상하류면과 댐마루(천단)를 표면콘크리트로 10cm정도 바르고 기초바닥에도 15~20cm의 기초 콘크리트 치기를 한다.

鐵鋼製(철강제) 틀댐은 종래의 틀구조(기성 콘크리트 틀)에서 나타나는 탄력성의 부족을 탄성이 큰 강제를 이용하고 연결부분을 판구조로 함으로써 구조물의 탄력성을 개선하려는 공법이다. 시공이 용이하고工期(공기)가 단축되며 경제적이다.



[그림 2-16] 구조도



[그림 2-17] 콘크리트 사방댐

3.2 산악지 도로설계 매뉴얼

산악지 도로설계 매뉴얼은 산악지 구간에 도로를 신설하거나 개량하는 도로 설계에 관한 사항을 기술하여 도로법에 의한 고속국도, 일반국도, 국도대체우회도로, 국가지원지방도에서 다음의 경우에 해당하는 지역을 통과하는 도로에 적용하는 매뉴얼이다.

- 산림청의 산사태 위험지도상 1,2 등급으로 분류되는 지역
- 표고 400M 이상 산지를 접한 계곡 등 영향권내의 지역
- 산사태 및 토석류 등으로 피해가 발생한 지역
- 산악지를 통과하는 지역으로 건설기술관리법 제5조의 2의 규정에 의한 도로, 수리수분, 토질및기초, 구조, 지질및지반 분야의 전문가로 구성된 설계자문위원회에서 현행 설계기준보다 배수규격 확대 등 특별히 설계기준 강화가 필요하다고 판단되는 지역

본 매뉴얼에서는 토석류 및 유송잡물에 대한 정의와 토석류 발생형태를 구분하고 차단시설물의 계획 방법과 조사방법, 차단시설의 종류비교 및 대책, 그리고 유지관리에 대해 폭넓게 제시하고 있으나, 실제 설계에 필요한 규모산정을 위한 설계기준은 제시되어 있지 않다. 다음은 산악지 도로설계 매뉴얼에 수록된 토석류 및 유송잡물 설계에 관한 내용이다.

3.2.1 토석류 및 유송잡물 발생 조사

3.2.1.1 토석류 및 유송잡물 발생 조사

(가) 노선에 따른 발생 예상 지점 조사

우수가 집중되는 계곡부의 하상경사가 15° 인 지점부터 상류의 집수 면적이 0.05km^2 이상이고, 수로 바닥상에 토석류로 될 수 있는 퇴적물이 존재할 경우를 기준으로 하여 발생 예상 지점을 조사한다. 또한, 계곡부에서 토석류와 함께 흘러내린다고 예상되는 유목(流木) 등 유송잡물에 대해서도 조사한다.

하상 경사가 15° 인 지점부터 상류의 집수 면적이 0.05km^2 미만이어도 지질, 용수 등의 해당지역의 붕괴 이력이 있다면, 토석류 발생예상지점으로 예측된다. 이상의 작업은 지형도, 항공사진 등으로 개략 조사한 후, 현지답사를 실시하여 수정한다.

(나) 토석류 및 유송잡물 발생 빈도 조사

기존의 재해 자료, 현지답사 등을 통해 해당 계곡류에 있어서 최근의 토석류 발생 시기, 빈도를 구한다.

(다) 토석류 및 유송잡물을 발생시키는 강우 조건을 추정하기 위한 조사

강우 상황의 유사성을 고려하여 지역을 분할하고, 과거에 토석류를 발생시킨 강우와 많은 강우량에도 불구하고, 토석류 발생까지 이르지 않은 강우에 관한 자료를 해당지역 내에서 수집하며, 토석류 발생과 미발생 경계의 강우 조건을 구한다. 해당 지역 내에 토석류를 발생시킨 강우가 없을 경우에는 발생되지 않은 강우의 상한을 가지고 가정의 토석류 발생 강우 조건으로 하는 한편, 지형, 지질적으로 유사한 다른 지역의 정보도 이용한다.

3.2.1.2 토석류 및 유송잡물의 규모성질 추정에 관한 조사

토석류의 규모나 대책을 검토하기 위하여, 토석류의 규모, 피크(peak)유량, 유속 등을 검토한다.

토석류의 유출 토사량의 추정 시 최대 입경의 추정은 현지답사를 통해 가능하나, 토석류의 최대 유량, 유속, 단위 체적 중량 등은 토석류 및 유송잡물의 현지 관측에 근거하여 경험식을 참고로 추정한다.

대상 계곡부에 토석류가 발생한 기록이 있다면, 지형·지질의 유사성을 확인하여 추정 시에 참고로 한다.

(가) 유출 토사량

토석류로 유출되는 토사량은 유역면적의 수로전체의 퇴적 토사량으로 하며 현지답사를 통해 추정한다.

토석류는 수로바닥 퇴적물의 두께와 유역면적을 포함하는 계곡의 길이를 곱하여 추정할 수 있다.

토석류의 최대 입경은 토석류가 예상되는 수로바닥 퇴적물을 현지답사하고, 약 100개 이상의 큰 자갈 입경 빈도 분포를 조사하여 누가 곡선의 95%를 가지고 최대 입경으로 한다.

3.2.1.3 기존의 토석류 차단 시설 또는 사방 시설의 유무, 제원에 관한 조사
이미 설치된 차단 시설의 유무를 확인하고, 시설의 높이, 길이 등의 제원을 조사하여 자료를 정리한다. 지형도에는 기존의 차단시설과 토석류가 발생한 지역, 토석류 발생 예상 지점, 범람 예상 구역을 기입한 토석류 및 유송잡물 발생 예측지점을 작성하는 것이 바람직하다. 또한, 기존의 도로에 대해서 개량이 필요한 지점도 조사 기입한다.

토석류의 퇴적범위를 예측하는 것은 도로 시설물의 피해를 최소화하기 위한 사항으로 중요하다.

3.2.2 토석류 및 유송잡물 차단시설의 종류

토석류 및 유송잡물의 차단은 방어구조물이나 제어시설을 여러 개소에 설치하여 방류량을 줄임으로써 침식을 방지하고 하류지역의 피해를 방지한다. 이 경우 나무 등의 조림을 다시 실시함으로써 비탈면 표층부를 안정화시키고, 계곡부의 유출면의 마찰력을 증가시켜 유속을 줄이는 방법이 병행되는 것이 바람직하다.

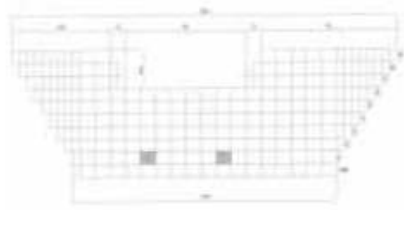
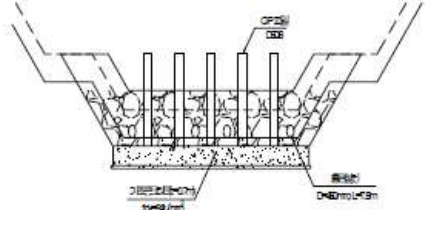


비교적 하류지역인 선상지나 퇴적지의 적절한 장소에 토석류를 억지하거나 조절할 수 있는 제어시설은 사방댐 등의 사방시설을 설치하는 방안이다. 사방댐은 하상경사가 큰 계곡에서 급류로 인한 종 횡 침식으로 계상과 계안에서

발생하는 돌, 자갈, 모래, 흙 등과 같은 침식 및 붕괴물질을 억제하여 토석류 피해를 저지하기 위하여 계곡을 횡단하여 설치하는 구조물이다. 이 때 고려해야 할 사항은 토석류 및 유속잡물의 전면부를 저지시키고, 조립질 물질을 강제로 퇴적시키기 위해서 토석류의 경사를 급격하게 줄여야 한다는 점이다.

[표 2-10] 토석류 및 유속잡물 차단 시설별 비교 사례

| 구분 | 콘크리트 사방댐 | 철강재 사방댐 (경사형, 버트레스, 슬릿형) |
|-------|---|--|
| 개요 | 기초 및 양안어깨부, 본체를 모두 콘크리트 구조로 설치하여 유속잡물 및 토석류를 차단하는 구조물 | 기초 및 양안어깨부는 콘크리트구조, 본체는 철강구조로 설치하여 유속잡물 및 토석류를 차단하는 구조물 |
| 개요도 |  |  |
| |  |  |
| 시공 방법 | 콘크리트기초부 굴착 필요 현장콘크리트 타설(수중) 하류측 세굴방지시설(별도공) | 콘크리트기초부 굴착 필요 현장볼트체결에 의해 조립 |

[표 2-10] 토석류 및 유송잡물 차단 시설별 비교 사례(계속)

| 구분 | 주철 조립식 사방댐 | 돌붙임 사방댐 |
|-------|---|--|
| 개요 | 기초 및 양안어깨부, 본체를 모두 주철틀 구조로 설치하여 유송잡물 및 토석류를 차단하는 구조물 | 기초 및 양안어깨부, 본체를 모두 콘크리트 구조로 설치하여 유송잡물 및 토석류를 차단하는 구조물 |
| 개요도 |  |  |
| |  |  |
| 시공 방법 | 콘크리트기초부 굴착 필요 현장에서 부재 조립 전석 및 쇄석 사용으로 열악한 시공여건에 적합 | 콘크리트기초부 굴착 필요 현장콘크리트 타설 하류측 세굴방지시설(물방석) |



[그림 2-18] 개폐식 토석류 차단시설 사례(워싱턴주, 미국)



[그림 2-19] 연성형(몬테나, 왼쪽) 및 암거유입부(오른쪽) 토석류 차단시설 사례

3.2.3 차단시설 예정지 선정

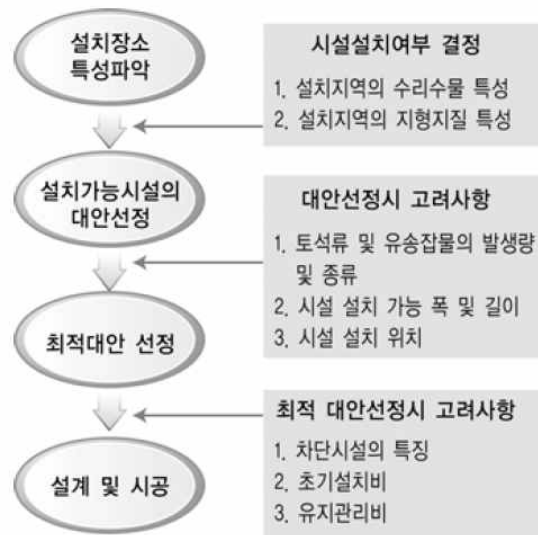
차단시설의 설치 예정지는 산악지가 많은 국도 및 지방도의 비탈면 계곡부에 위치하는 시설 중 상류로부터 토석류 및 유송잡물의 발생이 예상되는 곳을 선정하며, 집중호우 시 도로 등에 피해를 끼칠 우려가 많은 지역을 우선적으로 선정한다. 설치장소의 지질특성은 지형, 하상경사, 식생의 상황, 지반특성 등을 의미하는 것으로 유송잡물의 발생 여부, 발생량, 차단시설의 규모를 결정하는 요소로서, 계획 대상 구역의 현황 조사 자료, 과거 재해 자료, 유사 지역의 자료 등을 기준으로 정한다. 설치장소의 수리특성은 홍수특성, 홍수빈도, 홍수피해 가능성 등을 고려하여 토석류 및 유송잡물 차단시설 설치장소를 결정할 때 고려한다.

3.2.4 차단시설의 결정

유송잡물 차단시설을 선택할 때는 교통흐름의 안전이 최우선적으로 고려한다. 유송잡물 차단시설의 효과를 극대화하기 위해서는 다음과 같은 항목들을 검토한다.

- 설치지역의 수리 및 지질특성
- 설치장소의 길이와 폭
- 유송잡물의 종류 및 발생량
- 차단시설의 특성 및 유지관리 방안
- 경제성(초기설치비, 유지관리비 등)

유송잡물 차단시설을 어떻게 다루는 가와 배치하는 장소 및 활용방안 등은 매우 중요한 문제이다. 유송잡물 차단시설의 종류 및 설치위치 등을 결정하기 위한 검토사항은 대상 지역의 특성에 따라 다르기 때문에 유송잡물 차단시설의 기능이 가장 유효하게 발휘하도록 고려한다. 토석류 및 유송잡물 차단시설이 제 기능을 발휘할 수 있도록 주기적인 점검, 유지보수를 하도록 한다. 도로관리청은 도로부지 내에 차단시설이 필요한 지역에 설치하며, 도로부지의 구역에 차단시설의 설치가 필요한 경우, 산림청 등 관계기관에서 설치하도록 협의한다.

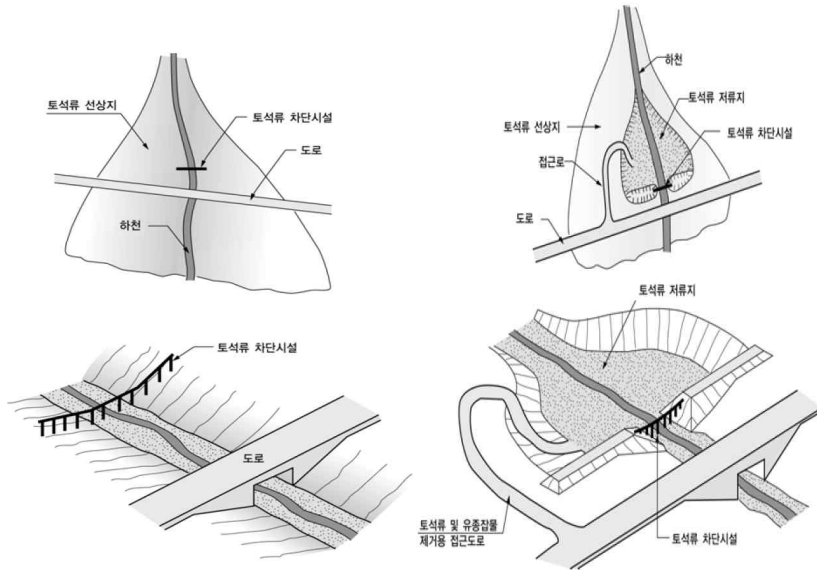


[그림 2-20] 토석류 및 유송잡물 차단시설의 선정과정

3.2.5 설치장소의 특성파악

설치장소의 수리특성이란 홍수특성, 홍수빈도, 홍수피해 가능성 등의 어떤 배수구조물의 설계기준으로 채택되는 설계홍수량을 의미하며, 유송잡물 차단시설의 설치 필요성을 결정할 때 고려되는 중요한 요소 가운데 하나이다.

설치장소의 지질특성이란 지형, 하상구배, 식생의 상황, 지반특성 등을 의미하는 것으로 유송잡물의 발생 여부, 발생량, 차단시설의 규모를 결정하는 요소로서, 계획 대상 구역의 현황 조사 자료, 과거 재해 자료, 유사 지역의 자료 등을 기준으로 정한다.



[그림 2-21] 도로 주변에 토석류 차단시설 설치(안)

3.2.6 설치 가능시설의 대안선정

차단시설이 설치될 장소의 길이나 폭, 설치 위치 등을 고려하여 설치 가능한 시설의 대안들을 선정한다. 차단시설의 대안을 선정함에 있어 가장 중요한 요소는 토석류 및 유송잡물의 종류이다. 종류에 따른 차단시설은 표 2-11과 같다. 예상되는 종류가 2가지 이상일 경우, 2중으로 차단시설을 설치하여 도로 시설의 피해를 최소화 할 수 있다.

[표 2-11] 차단시설물의 선택

| 시설 유송잡물 | (우회시설) Deflector | (거치대) Rack | (수직관) Riser | (격자틀) Crib | (분리대) Fin | (사방댐) Dam |
|------------|---------------------|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| LFD | | ◎ | | ◎ | | |
| MFD | ◎ | ◎ | | | | ◎ |
| HFD | ◎ | | | | ◎ | ◎ |
| FD1 | | | ◎ | | | ◎ |
| FD2 | | | ◎ | | | ◎ |
| CD | | | ◎ | ◎ | | ◎ |
| B | ◎ | | | | | |

LFD:소규모 부유물(Light Floating Debris) MFD:중규모 부유물(Medium Floating Debris)
HFD:대규모 부유물(Heavy Floating Debris) FD1:유동물질(Flowing Debris)
FD2:세립질 암편(Fine Detritus) CD:조립질 암편(Coarse Detritus) B:표석
(Boulders)



[그림 2-22] 토석류 및 유송잡물 차단시설 설치 사례

3.2.7 최적 대안의 선정

유송잡물 차단시설의 종류와 설치될 장소의 공간 특성, 설치위치 등을 고려하여 대안들을 선정한 후에는 최적의 대안을 선정한다. 최적의 대안을 결정할 때에는 앞서 조사된 유송잡물의 특성, 설치공간의 특성, 차단시설의 특성, 시공 및 유지관리 용이성, 초기설치비 및 유지관리비 등의 경제성을 종합적으로 고려한다.

[표 2-12] 차단시설 설치방안 비교 · 검토

| 구분 | 우회시설 (Deflector) | 거치대 (Rack) | 수직관 (Riser) | 격자틀 (Crib) | 분리대 (Fin) | 교량/암거 |
|------------|----------------------|---------------|----------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| 차단 메카니즘 | 우회 | 차단 | 차단 | 차단 | 차단 | 통과 |
| 유송잡물 종류 | 나뭇가지, 통나무, 큰 암 | 점토, 실트, 모래 | 점토, 실트, 모래, 나뭇가지 | 굵은 자갈, 암설 | 통나무, 목재 | 대규모 유송잡물 |
| 시공위치 | 암거 유입부 | 암거 유입부 | 암거 유입부 | 암거 유입부 | 암거 유입부 | 도로 |
| 크기 | 암거크기의 1.1배 이상 | 3~6m | 암거 직경보다 30cm정도 크게 설치 | 암거 크기 | 다양 | 다양 |

[표 2-12] 차단시설 설치방안 비교·검토(계속)

| 구분 | 우회시설 (Deflector) | 거치대 (Rack) | 수직관 (Riser) | 격자틀 (Crib) | 분리대 (Fin) | 교량/암거 |
|------|--|--|--|--|--|--|
| 재료 | 철재(레일) | 목재, 콘크리트, 철재 등 다양 | 철재 | 목재 | 콘크리트 | 콘크리트 |
| 검토결과 | 구조적 안정성과 흐름에 대한 저항력이 뛰어나 대형암거, 유속이 빠른 흐름, 대형 통나무, 호박돌 등과 같은 유송 잡물에 효과적임. | 유 송 잡 물 의 충격을 직접 받기 때문에 흐름의 속도가 빠른 경우 에는 경사지게 설치하거나 타이어 등을 설치하여 충격을 완화 시킴 | 제방여우가 충 분한 지역에 설치하며, 직경 130cm 이하의 암거에 이용됨. 충격에 저항력이 약하기 때 문에 빠른 유 속을 보이는 곳에는 설치하 지 않음. | 흐름 경 사 의 미세한 변화에도 암거 유입 부에 유송 잡물의 퇴 적이 발생 하는 소규모 암거에 적절함. | 대형암거에 사 용되며 유송잡 물이 부유물일 경우에 적당한 구조물 교량교 대에 유송잡물 이 집적되는 것을 방지하는 데 사용되기도 함. | 대규모의 붕괴나 유송 잡물차단시설만으로는 대응할 수 없을 것 같 은 도로구간이나 유송 잡물 차단시설을 설치 할 공간을 확보하기 어려운 곳에는 터널, 교량 등에 의한 구조 형식의 선정 등으로 대응하는 것이 바람직 함. |

3.2.8 토석류 및 유송잡물 차단시설의 유지관리

차단시설을 설계할 경우 유지관리를 고려한다. 교통량이 많고 중요한 도로의 배수구조물일 경우 유지관리의 기준이나 빈도가 더 엄격할 것이다. 이러한 유지관리 계획에 따라 차단시설의 결정이 이루어지기도 하는데, 예를 들면 유지관리가 어려운 경우 유지관리가 덜 필요한 차단시설을 사용하게 되는 것이다. 일반적으로 제방이 높은 경우는 유지관리 설비의 접근이 어렵다. 그러나 제방이 높으면 저류공간이 그만큼 증가하므로 유지관리의 빈도를 줄일 수 있다. 유지관리 장비의 접근이 용이하지 않을 경우에는 크레인 같은 장비를 이용하여 교통의 흐름을 두절시키지 않고 유송잡물을 제거할 수 있다. 따라서 차단시설이 제 기능을 발휘할 수 있도록 주기적인 점검·유지보수를 하고, 관련 기록을 유지한다. 점검은 시설물의 외관을 수시로 점검하고 성능의 이상 유무를 확인하기 위하여 정기적으로 실시하며 호우 등의 재해가 발생한 후에는 즉시 점검을 실시한다.

- 차단시설의 외관
- 차단시설 부재의 변형의 상태
- 차단시설의 상태(위치, 방향)
- 토석류 및 유송잡물 포착상황

차단시설이 자연 재해에 의해 변형 또는 파손 등 기능 수행 상 문제가 있다고 판단되었을 경우에는 즉시 복구한다. 파손이 경미한 경우에는 보수하고, 보수가 곤란한 경우엔 철거 후 다시 시공한다.

차단시설의 시공 및 보수에 관한 기록을 유지한다. 차단시설이 파손 또는 변형된 경우, 파손 위치, 정도, 원인 등을 면밀히 조사하여 기록·관리하고 다음 설계 및 시공 시 이를 반영한다.

- 시공 위치 및 간단한 주변 도로 현황
- 시공 일시, 시공 개시 및 종료 시각
- 차단시설의 형식, 길이, 높이, 너비
- 기타 시공 상 특이 사항

점검 및 보수시의 기록 사항은 다음과 같다.

- 위치, 점검 일시
- 파손 내용과 사유 및 변형 상태
- 보수 일시

3.3 하천설계기준

하천설계기준에서는 유역에서 토사의 생산 및 유출에 의한 토사재해를 방제하는 사방시설의 설계에 필요한 기준을 제시하고 있으며 많은 내용이 수록된 사방기술교본(산림청)의 내용 중 사방댐 부분에 대해서만 정리되어 있다. 즉 사방기술교본과 같이 투과형 사방댐에 대한 설계 방법 및 하중산정방법, 유지관리법 등에 대한 기준은 언급되어 있지 않다. 다음은 하천설계기준에 수록된 사방댐에 관련된 내용이다.

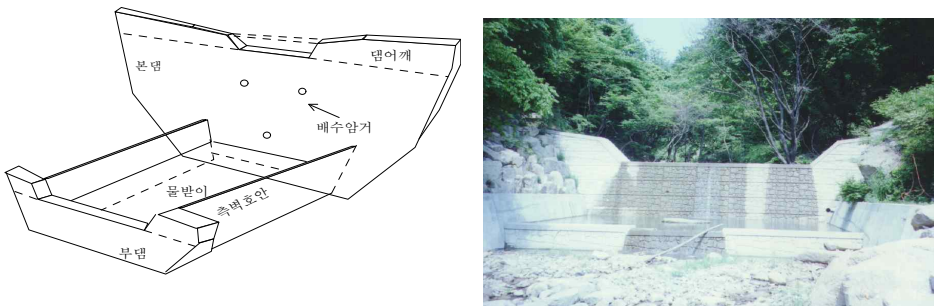
3.3.1 사방댐 설계

사방시설 설계는 주변 지형 및 하도와 안전하게 조화를 이루며, 발생 토사량을 효과적으로 저감할 수 있도록 설계한다. 하상유지공은 중단침식 방지를 통해 하상 안정, 하상 퇴적물 유출 방지, 그리고 공작물 기초 보호가 이루어지도록 설계한다. 유로공은 하상유지공과 호안을 동시에 설치한다. 침사지는 필요에 따라 토석류 발생을 방지하는 공사와 병행하여야 한다. 사방 시설은 주변 환경과 조화를 이루고, 자연 환경을 보호할 수 있도록 최대한 고려해야 한다. 사방시설은 토사의 생산 및 유출에 의한 토사재해를 방지할 수 있고, 자체 붕괴로 인한 피해를 최소화하는 구조물이어야 한다. 또한 계획 토사량을 억제하고 유수에 안전하며 자연 생태계 환경을 보호할 수 있는 구조로 한다. 그리고 각종 수리, 수문량, 지형, 하도, 하천 생태와 주변 환경 등의 변화를 고려하여 계획되어야 한다. 사방시설은 각종 수리, 수문량, 지형, 하도, 하천 생태와 주변 환경 등의 변화를 고려하여 계획하여야 한다.

3.3.2 형식 및 설계순서

사방댐은 댐설치 위치의 지형, 지질을 파악하고 댐의 목적에 대한 적합성, 해당 지역과 어울리는 자연친화성, 경제성, 안전성 등의 각 요소를 고려하여 댐 형식을 결정한다. 설계 순서는 댐 형식결정, 물넘이와 본체, 기초, 그리고 댐 어깨 등의 순서로 설계한다.

사방댐의 구조 및 각 부분의 명칭은 그림 2-23과 같다.



[그림 2-23] 사방댐의 구조 및 명칭

3.3.2.1 사방댐 형식·설계순서 및 고려할 점

- (1) 자연 친화성, 경제성 및 안전성의 각 요소를 고려하여 댐형식의 선정에 필요한 개략 계산을 한 후 댐 형식을 결정한다.
- (2) 물넘이, 본체 및 기초를 설계한다. 물넘이는 댐 하류 하상 세굴을 방지하고, 댐 기초의 안정 및 양안 붕괴가 되지 않도록 충분히 고려하고, 낙하 월류수와 부유사의 충돌 및 양압력에 안전하여야 한다.
- (3) 댐어깨, 바닥보호 시설, 부(副)댐, 물받이, 측벽 호안, 배수암거 등의 부속물을 설계한다. 바닥보호시설(護床工事)은 부댐 수직벽 하류의 하상 세굴을 방지할 수 있도록 설계한다. 또한 측벽 호안은 물넘이에서 떨어지는 유수에 의해 댐과 부댐, 수직벽 사이에서 발생할 수 있는 측방 침식을 방지할 수 있도록 설계한다.
- (4) 사방댐 형식은 댐 목적을 고려해서 그 기능을 충분히 발휘하고, 안전성 및 경제성 측면에서도 적합하도록 선정한다. 낮은 댐 형식은 경제성 측면에서 지형, 지질에는 크게 좌우되지 않는 것이 통상이며 오히려 시공의 난이도, 지역적 조건 등에 따라 결정되는 경우가 많다. 높은 댐 형식은 주로 댐 부지의 지형, 지질, 하상, 기상 등의 자연조건과 자재확보의 난이도, 운반수단, 운반능력 등의 지역조건에 따라 좌우되는데 규모, 공기, 노동력 등의 시공조건에 따라 영향을 받는다.
- (5) 콘크리트 댐 형식은 지형에 따라 크게 좌우된다. 골짜기 폭이 좁고 상류에 포켓이 있는 곳이 일반적으로 댐의 적지이며 중력식 콘크리트댐은 현재 가장 많이 건설되고 있는 형식이고, 지형적으로 제약이 적은 형식이다. 아치식 콘크리트댐은 하중을 아치작용에 의해 측방 암반에 전하기 때문에 하중을 안전하게 지지하는 양안부가 필요하며 지질의 좋고 나쁨에 좌우된다. 또, 아치식 콘크리트댐은 골짜기 폭이 좁을수록 유리하고 지질적 조건이 좋은 경우에는 골짜기 폭이 높이의 3배 정도까지는 중력식 콘크리트댐보다도 경제적이 되는 경우가 많다.
- (6) 일반적으로 암반기초는 전단마찰저항과 지지력 및 침식과 투수에 대한 저항이 비교적 높으므로 댐형식에 대한 제약이 적다. 특히 견고한 암반이며 또, 지형적으로 허용하면 아치식 콘크리트댐이 유리하나 대부분 중력식 콘크리트댐을 선정하는 것이 보통이다. 토사 기초는 일반적으로 댐에는

적합하지 않지만 특수한 기초처리를 함으로서 가능하게 되는 경우도 있다.

- (7) 홍수 시에 토사를 유출할 우려가 있는 곳과 토석류가 빈발할 우려가 있는 곳에서는 지형, 지질 문제가 없어도 아치식 콘크리트댐은 피하는 것이 바람직하다.
- (8) 철망댐, 스크린댐 등의 댐에 대해서는 댐형식의 특징을 충분히 고려해서 기능, 안전성을 확인한 후 선정할 필요가 있다. 특히 이 댐들은 댐 측벽의 지형, 지질 및 사태지, 연약지반 등의 특수한 지반조건 및 자재확보의 난이도, 운반수단, 공기 등에 좌우되는 경우가 많다.

3.3.3 위치와 높이

3.3.3.1 사방댐의 위치

- (1) 일반적으로 월류수에 의한 하류 비탈끝의 세굴 및 양안침식에 의한 파괴방지를 위하여 하상 및 양안에 암반이 있고 공사비의 절감을 위하여 상류부의 폭이 넓은 협착부 지점이 좋다.
- (2) 하상에 암반이 없는 경우는 그 하상의 상황에 따라서 물받이, 또는 부뎀을 계획하여 하류의 비탈끝을 보호하여야 한다. 이 경우, 침투수의 파이프에 의한 물받이의 파괴, 부뎀의 수직벽 직하류의 세굴 등을 충분히 고려하여 계획한다.
- (3) 댐을 계획하는 경우, 일반적으로 지천의 합류점 부근에서는 양쪽 지류의 기초댐으로서의 역할을 할 수 있도록 합류점의 하류부에 댐 위치를 선정한다.

3.3.3.2 계단식 댐군(群)의 위치선정

- (1) 계단식 댐군에서는 한 댐의 계획퇴사선이 원래의 하상과 접하는 점을 상류댐의 계획위치로 한다.
- (2) 종방향 침식 또는 횡방향 침식이 현저한 구역 또는 하안붕괴구역이 긴 경우에는 계단식의 댐군을 계획한다. 이 경우 댐의 퇴사선은 계획경사(현하상경사의 1/2)를 사용한다. 종단도에 있어서 최하류 댐으로부터 시작하여 순차적으로 계획경사선을 그어 나가면 계획위치는 자연히 정해지나, 댐 지점으로서 적합성, 기초근입 등을 고려할 필요가 있다.

3.3.3.3 댐 높이

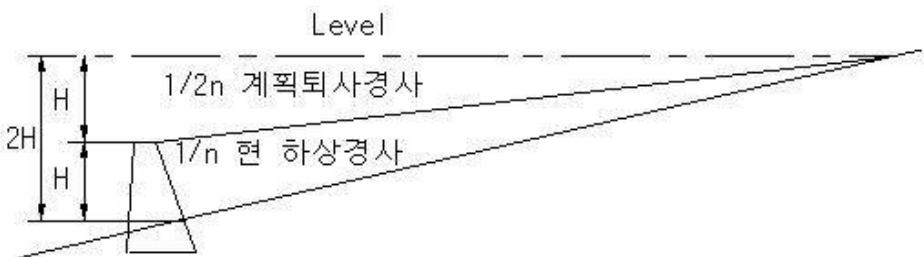
- (1) 댐 높이는 계류의 사방기본계획으로부터 설정한다.
- (2) 댐 높이는 지반 및 암반조사를 실시하여 결정하는데, 여기서 암반조사란 지질의 조건, 투수성, 지지력, 단층의 유무, 주향(走向, strike), 절리(節理, joint) 등을 조사하는 것을 말한다.

3.3.4 방향

- (1) 사방댐의 방향 : 사방댐은 물넘이 중심점에서 계획장소 하류의 유심선(流心線)에 직각으로 정한다.
- (2) 계단식 댐의 방향 : 계단식의 댐군에 있어서 각 댐의 방향은 각 댐의 물넘이부의 중심선(물넘이 마루의 하류단)에서 계획지점 하류의 유심선에 직각으로 정하며, 각 댐의 물넘이 중심점은 직상류댐의 물넘이 중심점에서 유심선상으로 정한다.

3.3.5 퇴사량의 계산

- (1) 퇴사경사는 현 하상경사의 1/2로 한다(그림 2-24). 단 하상경사가 급하고 유출토사의 입경이 크며 유출토사가 다량인 경우에는 2/3~3/4 정도를 채용하는 경우가 있다.



[그림 2-24] 현하상 경사에 따른 계획퇴사경사 설정

- (2) 사방댐의 계획퇴사량은 댐지점 상류의 횡단도에 의하여 산출한다.

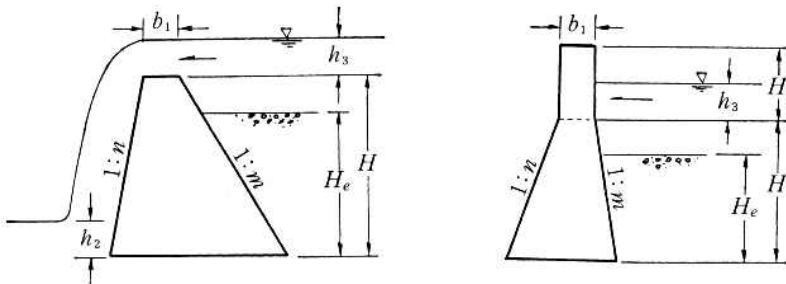
3.3.6 구조

3.3.6.1 물넘이

- (1) 댐의 물넘이는 계획유량이 충분히 흐를 수 있는 단면을 가지고, 동시에 댐상류와 하류의 지형, 지질, 하안 상태 및 유수의 방향 등을 고려해서 그 위치를 정한다. 계획유량의 규모는 중요도에 따라 다르게 설정하되, 통상 연초과확률 1/100 정도 또는 기왕 최대 중 큰 값으로 한다.
- (2) 물넘이의 폭은 현 하도폭을 고려하여 정한다.

3.3.6.2 댐 하류면 비탈경사

댐 하류면 비탈은 월류되는 자갈에 의한 손상을 피하도록 하여야 하는데, 그림 2-25와 같이 하류면 비탈경사는 돌, 콘크리트댐에서는 1 : 0.2~0.6, 흙댐에서는 1 : 1.5~2.0 이상으로 완만하게 한다.



[그림 2-25] 물넘이 구조와 비탈경사(좌:월류부, 우:비월류부)

3.3.6.3 기초

- (1) 댐의 기초는 소요의 지지력과 전단 마찰저항력을 가지며, 침투수 등에 의해 파괴되지 않도록 하고, 필요에 따라 차수벽 등으로 보강한다.
- (2) 산사태 지역 또는 연약지반 등에 부득이 댐을 계획할 경우는 지반의 지지력에 적합한 형식 또는 구조를 선정하여야 한다.

3.3.6.4 댐어깨

- (1) 댐어깨는 홍수를 월류시키지 않게 하고 충분히 견고하여야 한다.
- (2) 댐어깨 마루에는, 토석류 대책댐에서는 하상경사 정도, 기타의 댐에서는 상류의 계획퇴사 경사 또는 그 이상의 경사를 두며, 특히 굴곡부에 축조하는 사방댐 요안(凹岸)의 마루높이는 철안(凸岸)의 마루높이보다 높게 계획한다.
- (3) 댐어깨는 계획홍수위에 여유고를 더한 안전한 높이 이상으로 해야한다.
- (4) 암반인 경우는 1~2m, 토사인 경우는 2~3m를 양안에 넣어야 한다. 특히 상류부의 댐으로 토석류 등의 큰 충격력이 예상되는 경우에는 댐어깨의 두께를 증가시키는 것을 검토하여야 한다.

3.3.6.5 배수암거

- (1) 사방댐에서 배수 목적은 시공 중의 우수전환, 퇴사 후 침투수를 배제하여 수압 경감, 홍수량과 유사량 조절 등이다.
- (2) 배수암거의 단면형상은 원형이나 정방형으로서 내경은 200~400mm 정도이다.

3.3.6.6 물받이

- (1) 물받이는 본댐 하류면의 세굴을 방지하기 위하여 설치한다.
- (2) 물받이 길이(L)는 다음 공식에 의하여 산출한다.

$$L = (1.5 \sim 2.0)(H + t) - nH$$

여기서 H는 본댐 물넘이 마루에서 부댐 물넘이 마루까지 높이(m), t는 축류 전 월류수심, n은 댐하류면 비탈경사(1.5~2.0)이다.

- (3) 물받이 두께는 보통 0.5~1.5m로서 댐 높이가 5m일 때는 0.5~1.0m, 10m일 때는 1.5m로 한다.
- (4) 본댐과 부댐은 종단적으로 중복되어야 하며 부댐의 중복높이는 본댐 높이의 1/3~1/4 정도를 표준으로 한다.

3.3.7 천단폭

사방댐의 천단폭은 유출토사 등의 충격에 견디고, 또 물넘이 부에서는 통과사력의 마모 등에도 견딜 수 있는 폭으로 할 필요가 있다. 이를 위해서 중력식 콘크리트댐의 천단폭은 일반적으로 표 2-13을 이용하고 있다. 그러나 아치식 콘크리트댐에서는 구조상에서 필요하게 되는 제정부의 두께에서 천단폭을 정하는 경우도 있다.

[표 2-13] 사방댐의 천단폭

| 천단폭(m) | 1.5~2.5 | 3.0~4.0 |
|--------|--|-------------------------------|
| 하상구성재료 | 모래섞인 자갈~옥석섞인 자갈 | 옥석~전석 |
| 유출토사형태 | 유출토사량이 비교적 적은 지구~상 시유출토사의 유출이 많은 지구 | 소규모 토석류 발생지구~대규모 토석 류 상습지구 |

3.3.8 단면계산

- (1) 사방댐의 단면계산은 일반댐의 단면계산과 동일한 방법으로 한다.
- (2) 사방댐에 작용하는 외력에는 수압, 퇴사압, 양압력 등이 있으나 댐의 형식, 목적별 분류 등에 따라 각각 취하여야 할 값이 다르므로, 그 댐의 설계조건에 따라 외력을 선택할 필요가 있다.
- (3) 중력식댐의 안정은 일반댐과 같이 전도, 활동 및 지반의 지지력에 대하여 검토하며, 안정조건을 만족시켜야 한다. 아치(arch)댐의 하도시공 단면은 수직의 U자형이 좋고 시공장소는 양안 및 하상 모두 양질의 견고한 암반이어야 한다. 특히, 댐 상부의 암반 상황은 경시되기 쉬우므로 충분한 조사가 필요하다.
- (4) 필댐의 안정은 일반 필댐의 안정검토 방법에 따라 검토한다.

3.4 한국도로공사 도로설계요령(토공편)

한국도로공사 도로설계요령에서는 토석류 대책공법을 설계하기 위한 토석류 특성값 산정방법 및 토석류 수심, 구조물에 가해지는 동적하중까지 제시하고 있다. 그러나 설계 요령집 같은 매뉴얼이 제작되어지지 않는다면 실무에서 이러한 식을 설계에 직접 적용하기에는 어려움이 있다.

3.4.1 토석류 특성 값 산정방법

대책공법의 종류, 규모, 위치 등 토석류 대책방안을 결정하기 위해서는 발생하는 토석류의 규모, 유량, 속도 등과 같은 토석류 특성 값들을 구하여야 한다. 이러한 토석류 특성 값은 유역 내 지형·지반·지질조건 및 식생 상태 그리고 강우량에 따른 토석류 발생의 시작·이동·퇴적의 복잡한 과정과 관련이 있으며, 대부분의 과거 토석류 발생사례의 관찰과 조사결과 그리고 간단한 이론과 접목된 반 경험적인 방법들을 이용하여 구하게 된다.

3.4.1.1 설계 토석량(design debris volume)

토석류 대책공법의 종류, 규모, 위치, 설치개수를 결정하기 위해서는 해당 유역에서 발생 가능한 토석량을 결정하는 것이 필요하다. 설계 토석량은 대책방안 고려위치 또는 시설물이 위치하는 구간까지 이동하는 토석의 총부피로 정의하며, 토석류 대책공법의 설계에 있어서 가장 중요한 값이다.

설계 토석량을 신뢰성 있게 결정하기 위해서는 유역에 대한 광범위한 조사를 요구하지만 토석류의 시작-이동-퇴적특성을 모두 고려하여 설계 토석량을 결정하기는 아직까지 어려움이 있다. 현 단계에서 가장 합리적인 접근방법은 유역의 면적 또는 토석류가 이동하는 계곡의 길이 등 유역의 크기를 특징짓는 값을 이용하여 설계 토석량을 산정하는 것이며, 가장 쉬운 접근방법은 초기 파괴위치의 토석량과 계곡부 조사를 통하여 측정된 계곡 폭과 침식심도 그리고 계곡의 전체길이를 곱한 토석량 값을 합하는 방법이다(Hung et al, 1984; Vandine, 1985).

3.4.1.2 첨두토석유량(peak debris discharge)

토석류 첨두유량은 임의 위치에서 단위시간 당 통과하는 물과 흙이 혼합된 토석류의 유량으로 정의하며, 기존에 도로 하부에 설치된 배수로의 설계 유량을 초과하는지를 판별하거나 다른 설계변수와의 상관관계로부터 토석부피 또는 토석흐름속도를 추정하는데 이용할 수 있다.

첨두토석유량은 설계토석량과 마찬가지로 토석류의 시작-이동-퇴적특성에 의하여 결정되며, 매우 많은 변수에 의하여 결정되므로 이론적으로 산정하기가 매우 어려운 상황이다. 완만한 경사에서 계곡바닥의 부분 침식에 의하여

발생하는 토석류 흐름의 침투 유량식을 이용하여 산정하는 방법(Takahashi, 1978), 그리고 토석류 평균유속을 산정하고 계곡의 단면적을 곱하여 산정하는 방법을 이용할 수 있다.

3.4.1.3 토석류 평균유속(debris flow velocity)

토석류 평균유속은 임의 위치에서의 토석류의 수심에 따른 평균유속으로 정의하며, 구조물에 가해지는 충격력의 산정과 침투토석유량의 산정 및 토석류의 흐름수심 결정에 사용한다.

토석류 평균유속은 실제로 측정하는 방법, 기존 토석류 흔적에서 추정하는 방법, 흐름모델을 이용한 이론적 공식들이 제안되어 있다. 실측하거나 추정한 바에 의하면 토석류의 평균유속은 유량과 바닥경사, 계곡의 특성에 따라 0.95~28m/sec 범위로 매우 다양하게 나타난다.

3.4.1.4 토석류의 수심 (flow depth)

토석류 수심은 침투유량 발생 시 토석류 횡단면에서의 평균적인 수심으로 정의하며, 토석류 선단파의 최대 흐름심도를 의미하지는 않는다. 토석류 흐름심도는 방어구조물의 높이 또는 토석류 우회수로를 설치할 경우 수로의 높이를 결정하는데 중요한 변수가 된다. 토석류 수심은 유량과 유속에 의하여 결정되며, 계곡의 단면 폭(B)를 갖는 직사각형 단면으로 가정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H = \frac{Q_d}{vB}$$

여기서, H : 평균유속을 가정한 토석류의 수심

Q_d : 침투토석유량 v : 토석류 평균유속 B : 계곡의 폭

토석류의 최대 수심은 서지파(surge)가 형성되는 흐름의 선단부분이 가장 크며, 점차적으로 수심이 작아지는 형태를 갖는다. 위 식으로 구한 수심은 평균적인 수심이며, 선단파의 최대 수심은 이 값을 약 1.5배 정도 크게 결정하는 것이 필요하다.

3.4.1.5 토석류의 이동, 퇴적 특성 (transport-deposition characteristics)

토석류 대책을 위해서는 토석류의 이동과 퇴적특성을 이해하는 것이 필요하다. 많은 관찰결과에 의하면 토석류 흐름과 이동을 유지하는 가장 큰 메커니즘은 흙과 물의 상대적인 농도 그리고 계곡바닥의 경사이다.

토석류 흐름이 유지되기 위해서는 약 $10^{\circ}0$ 이상의 계곡바닥경사가 필요하며, 또한 토석류의 고체 용적농도 또한 30% 이상의 값이 필요한 것으로 알려져 있다. 만약 계곡바닥경사가 $10^{\circ}0$ 미만인 경우토석류는 내부에 포함된 큰 암석을 이동시킬 정도의 에너지를 갖지 못하여 퇴적이 시작되며, 특히 계곡 폭이 넓어지는 경우 퇴적은 더 쉽게 발생된다. 반대로 토석류의 고체 용적농도가 약 80% 이상이 되면 토석류 내의 고체 입자간 마찰력이 지배적이 되며, 유체가 아닌 고체의 상태가 되어 흐름은 정지하게 된다.

이러한 토석류 특성을 고려하면 대책방안의 수립에 있어서 설치를 경사가 완만하거나 계곡 폭이 넓어지는 구간 아래쪽에 위치시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있고, 대책공법의 기능이나 형상에 있어서도 토석류에 포함된 유체를 만을 분리하거나 제거하여 토석류의 고체용적 농도를 증가시키는 방법을 이용하면 토석류 흐름을 쉽게 멈출 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.4.1.6 구조물에 가해지는 동적하중(dynamic thrust and impact)

토석류에 의하여 구조물에 가해지는 동적하중은 일정속도로 움직이는 토석류가 구조물에 가하는 동적추력(dynamic thrust)과 토석류에 포함된 큰 암석이 구조물과 부딪힐 때 구조물에 가해지는 동적충격하중(dynamic impact force)으로 구분할 수 있다.

토석류가 구조물에 가하는 동적추력은 모멘텀 방정식으로 유도하며, 다음과 같이 산정한다.

$$F_d = \rho A v^2 \sin \beta \quad (\text{또는 } F = \rho Q_d v \sin \beta)$$

$$F_i = \frac{Mv^2}{d} \quad (\text{or } F = \sqrt{Mv^2 K})$$

여기서, F_d : 동적추력 (kN) ρ : 토석류의 밀도 (kg/m^3)
 A : 토석이 흐르는 수로의 단면적 (m^2)
 v : 토석류 평균유속 (m/s)
 β : 방어구조물과 계곡의 각도($^\circ$)
 Q_d : 침투토석유량(m^3/s) F_i : 동적충격하중(kN)
 M : 큰 암괴의 질량 (kg) K : 구조물의 강성 (kN/m)
 d : 충돌 후 구조물에 발생하는 변위 (m)

동적추력은 계곡단면을 가득 채운 토석류가 구조물에 가하는 총 하중으로 간주한다. 계곡 폭 방향의 구조물 단위 길이 당 하중으로 환산하기 위해서는 이 값을 계곡 폭으로 나눠서 사용할 수 있다. 토석류에 포함된 큰 암석이 구조물에 부딪힐 때 구조물에 가하는 하중은 구조물 전체의 변위 또는 강성을 고려하여 유도하며 산정할 수 있다.

3.4.2 토석류 대책공법

- (1) 토석류가 발생할 우려가 있는 계류를 통과하는 경우, 충분한 유하단면을 확보할 수 있는 교량형식을 원칙으로 하지만, 도로구간의 종합적인 검토를 하여 부득이 흙쌓기나 땅깁기형식으로 통과할 필요가 있을 때는 적절한 토석류대책을 실시하여야만 한다.
- (2) 도로의 보전을 목적으로 한 토석류에 대해서 과거 재해실태 등을 조사·검토하고 유출 토석량을 산정하여 주요 유로 내의 이동가능 토석량을 대상으로 토석류에 대한 대책을 수립하여야 한다.
- (3) 토석류 대책공의 선정 시 계곡류의 상황이나 관련 법규, 관계기관과의 협의, 향후 유지관리 등 현장조건을 종합적으로 판단하여 결정한다.
- (4) 토석류 대책공의 선정에 있어서 통과형식이나 통과지점의 상·하류 상황 등의 현지조건을 고려하여 종합적이며 효과적인 대책시설의 배치가 되도록 검토함과 동시에 현지의 지형, 지질특성, 토석류의 발생빈도, 경제성, 시공성, 유지관리의 효율성 등을 포함하여 종합적으로 감안하는 것이 중요하다. 토석류 대책공은 토사를 포착·퇴적시키는 것과 통과부 상류와 통과부에서 흐름의 방향 등을 제어하여 안전하게 유하시키는 것으로 나뉜다. 주요 토석류의 대책공의 종류와 그 기능은 다음과 같다(표 2-14).

[표 2-14] 주요 토석류대책공의 종류

| 분 류 | 시 설 | 배치위치 | 주요기능 |
|--|--------------|------------|--------------------------------|
| 토사를 포착 · 퇴적시키는 주요시설 | 토석류 포착공 | 본선 상류의 계곡부 | 콘크리트 댐 등으로 토석류를 포착 |
| | 본선 쌓기 토사 포착공 | | 본선 쌓기 노체를 이용하여 그 상류측에서 토석류에 포착 |
| | 땅깎기부 최적 유로공 | 본선 직상류 | 경사 변화점에 토사를 퇴적 |
| | 토석류 최적 유로공 | 본선 상류 | 완경사부에서 토석류의 속도를 감소시켜 퇴적 |
| | 토사유출 방지공 | 본선 가장자리 | 도로 가장자리에 토사를 포착 |
| 통과부 상류 나 통과부에서 흐름의 방향 등을 제어하여 안전하게 유하 시키는 시설 | 토석류 발생 제어공 | 토석류발생원 | 토사류 발생을 억제 |
| | 토석류 유향 제어공 | 본선 상류 | 토사류의 흐름을 제어 |
| | 토석류 유도공 | 본선 상류 | 토사류를 안전한 장소까지 유도 |
| | 본선 횡단 구조물 | | 본선 아래를 Culvert등으로 토사를 유하 |
| | 폐색경감공 | 횡단 구조물의 입구 | 본선횡단구조물의 폐색을 경감 |
| | 상승방지공 | 본선 가장자리 | 토석류가 상승하여 노면에 도달하는 것을 방지 |

토석류 발생 시 적용 가능한 대책방안은 토석의 규모와 대책공법의 설치여건에 따라서 달라질 수 있으며 일률적으로 적용기준을 제시하기는 어렵다. 그림에서 나타난 바와 같이 토석류의 규모가 작아 도로에 피해를 줄 가능성이 적은 경우는 단순히 퇴적시키는 방법이나 배수로가 차단되는 것을 막을 수 있는 유송잡물 차단시설을 설치할 수 있지만 규모가 큰 토석류가 예상되고 도로로 토석이 침범할 것으로 예상되는 구간에서는 계곡 내에 토석을 차단시키거나 퇴적시킬 수 있는 인공적인 구조물을 설치하여야 한다.



횡단배수시설 기능유지를 위한 유송잡물 차단시설 (FHWA, 2005)

[그림 2-26] 토석류 방어와 배수구조물 보호를 위한 방법들



토석류 파쇄 및 퇴적유도를 위한 방어시설물



토석류를 여과시키는 투과형 방어시설물

[그림 2-26] 토석류 방어와 배수구조물 보호를 위한 방법들(계속)

3.4.3 토석류 대책시설의 유지관리

토석류 대책공을 실시하여도 일단 토석류가 발생하면 그 포착기능이 손실되거나 유목 등의 영향으로 재차 토석류에 충분한 대처가 불가능하기도 한다. 또 중·소규모의 홍수 시 유출토사에 의하여 저장용량이 서서히 감소될 우려도 있다. 따라서 토석류 대책시설은 그 기능이 계획대로 발휘되도록 적절한 유지관리를 실시할 필요가 있다. 구체적으로 저장 공간에 채워진 토사의 배출, 유목의 제거 본선 횡단 구조물의 유사(流砂)단면 확보 등을 실시하여야 한다. 토석류 대책시설은 대부분 자연경관이 수려한 계곡부에 위치하므로 경관을 고려하여야 하며, 또한 어류·양서류 등의 생태이동통로의 기능이 차단되지 않도록 계획되어야 한다.

4. 유관기관별 설계기준 및 유지관리 비교

| 구 분 | 내 용 / 설 계 기 준 | 유 지 관 리 |
|----------------------------------|--|--|
| 사방기술교본 (산림청) | <ul style="list-style-type: none"> 홍수량에 의한 방수로 설계 후 구성외력(6가지)에 의한 중력식 사방댐 안정성검토 기준 제시 물방석, 부댐, 어깨부 등 사방댐 설계기준 제시 시공방법, 시공위치, 표준도면 등 제시 투과형 사방댐에 대한 설계기준 없음 사방댐 규모산정을 위한 토석량 산정기준 없음 | <ul style="list-style-type: none"> 사방댐 유지관리에 대한 기준 없음 |
| 산악지 도로설계 매뉴얼 (국토해양부) | <ul style="list-style-type: none"> 토석류 및 유송잡물 설계에 대한 일반적 기술 차단시설의 종류 및 간략 비교 차단시설 예정지 선정기준 제시 차단시설물의 선택방법 제시 | <ul style="list-style-type: none"> 설계 시 유지관리고려 주기적 점검, 기록 유지 외관, 부재상태, 포착상황 정량적 판단 기준 없음 |
| 하천설계기준 (국토해양부) | <ul style="list-style-type: none"> 사방댐의 기능 및 설계일반, 계획일반 사방댐의 분류, 형식, 설계순서 제시 퇴사량 산정기준 제시 사방기술교본의 내용 정리 수준 | <ul style="list-style-type: none"> 유지관리 기준 없음 |
| 도로설계요령 (한국도로공사) | <ul style="list-style-type: none"> 토석류 특성 값 산정 기준 토석류 평균유속 및 수심 산정방법 제시 구조물에 가해지는 동적하중 제시 토석류 대책공법에 대한 종류 기능 제시 | <ul style="list-style-type: none"> 유지관리가 필요하다는 내용만 수록, 정량적 판단기준 없음 |
| 건설공사 비탈면 설계기준(국토해양부) | <ul style="list-style-type: none"> 토석류 대책시설 계획, 결정, 설계 일반 설계기준 없음 | <ul style="list-style-type: none"> 유지관리 기준 없음 |
| 도시부 도로배수 시설설계 잠정지침 (국토해양부) | <ul style="list-style-type: none"> 배수능력 확보차원에서의 점검내용 수록 설계기준 없음 | <ul style="list-style-type: none"> 퇴적된 토사량 정기적 관찰 및 제거 등 점검에 대한 지침 수록 유지관리 기준 없음 |

위와 같이 아직 구체적인 설계기준 및 정량적 유지관리에 대한 기준이 마련되어 있지 않아 표준도를 활용하여 크기만 변경하여 설계하는 실정이며, 일부 제시된 설계기준도 현장에서 실무자가 활용하기에는 어렵게 되어 있으므로, 토석류 대책공법에 대한 설계 및 유지관리 기준에 대한 마련이 시급하다고 판단된다.

제3 장
도시기반시설
(교량)

3

제3장 (제2세부) 도시기반시설(교량)

1. 연구의 필요성

매년 우리나라는 지속적으로 발생하는 태풍과 집중호우로 교량피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 이러한 교량피해는 중소규모 교량뿐만 아니라, 철도교와 국도교량 등에서도 지속적으로 발생하고 있다. 교량의 붕괴는 인명피해 뿐만 아니라 교량의 교체와 보수, 우회도로의 건설 및 그로 인해 발생하는 교통시간의 증가, 불편 및 경제활동의 피해 등으로 인해 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 끼치게 된다.

따라서 이상기후로 인하여 해당하는 하천교량 및 공사에서 많이 사용하고 있는 교량의 형식별 경간장 등 교량 선정에 대하여 검토하였다. 우리나라는 이미 도시화 비율이 1950년에는 27퍼센트에서 지난 2000년에는 80퍼센트에 도달했고 현재는 83퍼센트에 이른다. 오늘날 한국이 다른 아시아 국가들보다 1인당 국민소득이 높은 이유는 도시화 비율이 가장 높은 수준에 도달해 있기 때문이다. 아울러서 도심지의 쏠림현상으로 인하여 각종 재난으로 인한 피해 금액과 인명의 손상을 야기시키고 있는 실정이다. 이러한 도시화뿐만 아니라 교량의 파손 또한 심각한 수준으로서 공사 중에 파손과 공사 후의 이상기후에 따른 시설물의 손괴로 인하여 사회비용이 투자의 집중 대상으로 간주되고 있는 실정이다.

2. 자연재해 관리단계 검토

2.1 자연재해 예방 및 대비단계

자연재해 예방 및 대비단계란 자연재해에 취약한 구조물과 시설에 대한 보수보강을 실시하고, 장기적인 계획에 따라 구조물을 신설하거나 교체하는 단계이다.

(가) 홍수 여유고가 부족하거나 경간이 짧아 통수단면이 부족한 도로교량이나 철도교량에 대해 교량을 신설하지 않고, 보수·보강할 수 있는 공법

- 컴퓨터 교량 인상(Computer-Jacking System) 공법
- CLS(Computer Control Synchronous Lifting System)공법
- 저형고 거더 교체 공법
- 교량확장 및 유도상화 공법

(나) 형고가 작아 형하공간 확보에 유리하고, 형강을 사용하여 공기를 단축함과 동시에 지간장 20~40m를 확보하여 여유 있는 통수단면을 확보할 수 있어 중·소규모급 교량의 신설에 적용할 수 있는 교량

- Hicom(Hybrid Integrated Composite)라멘교
- Tall Beam교
- CPI Beam(Cover Plate I-Beam)교

2.2 대응단계

자연재해가 발생하였을 때 재해의 심각성을 줄이고, 피해확산 방지를 위한 활동을 하는 단계로 인명구조, 주민대피, 응급의료, 응급구호, 응급복구 등을 실시하는 단계이다. 자연재해로 긴박한 상황에서 교량이나 도로의 유실은 지역적 고립을 초래하여 대형피해를 초래할 가능성이 높다. 따라서 인명을 보호하고, 주민을 안전한 곳으로 대피시키기 위해서는 중요시설의 응급복구가 단 시간 내에 진행될 필요가 있다.

(가) 자연재해로 인하여 유실된 도로나 교량으로 인한 지역적 고립을 방지하기 위하여 응급복구용 도로나 교량을 시공하기 위한 공법

- 파형강관을 이용한 가교 및 가도
- DHB(Double H-Beam) 가교
- TSB 가교
- Over Bridge
- Layer Girder 공법/Speed Bridge


2.3 자연관리단계에 적합한 강교량

우리나라의 자연재해의 93%가 풍수해로 인한 피해이며, 풍수해의 경우 6월을 시작으로 9월까지 집중적으로 해마다 반복되는 특징을 갖고 있어, 자연재해로 인한 피해복구사업은 차년도 자연재해가 발생하는 시기이전까지 짧은 기간 실시되어야 하는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 강교량은 구조성능이 우수하고, 공장에서 제작되어 우수한 품질을 확보하고 있을 뿐만 아니라 중량이 가벼워 장대교량과 같은 대형구조물이나 중요구조물에 많이 시공되고 있으며, 또한 강교량은 현장에서 조립 시공하므로 급속시공이 가능하여 노후화된 구조물의 급속교체나 급속시공이 요구되어지는 공사에 많이 적용되어 왔다. 중소규모 교량, 가교, 신속 교량교체 공법을 정리하면 표 3-1~3-3과 같다.




[표 3-1] 중·소규모 교량

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|--------------|---|---|
| Hicom 라멘교 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 강구조와 SRC구조로 복합된 상하부구조일체형 복합라멘교 - 낮은 형고로 홍수위 확보 유리 - 압연H형강 사용으로 급속시공 - 주경간장 30~40m |
| Tall Beam교 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 주형단면 상부에 종/횡으로 강결 연결구조를 형성 콘크리트와 합성시킨 강합성 플레이트 거더교 - 형고가 작아 통수단면에 유리 - 현장 시공성 우수 - 주경간장 20~30m |
| CPI Beam교 |  | <ul style="list-style-type: none"> - H형강에 Cover Plate를 접합, 프리스트레스를 도입 최소 형고로 최단시간에 교량을 건설할 수 있는 경제적인 공법 - 형고 대비 장경간 교량으로 통수단면 확보 유리 - 주경간장 17~35m(단순)/21~40m(연속) |

[표 3-1] 중 · 소규모 교량(계속)

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|---------|---|--|
| 파형강판교량 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 파형강판을 이용한 아치형 교량 - 시공기간 단축으로 민원 최소화 - 연성재료를 사용한 축력지배구조 - 주경간장 3~20m |

[표 3-2] 가교

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|-------------|---|---|
| DHB가교 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 지점부 겹보의 H형강과 가설받침을 적용하여 장지 간, 다경 간 연속이 가능한 가설교량 공법 - 진동, 처짐 등 사용성 향상 - 온도수축 팽창 응력 최소화 |
| TSB공법 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 장경 간 조립식 가교로 부유물 걸림을 방지해 주어 통수단면적을 확보 - 풍화암까지 근접 쇄굴에 대한 전도의 위험을 최소화 - 공장제작 및 현장조립을 통하여 공기를 획기적으로 단축 |
| OVER BRIDGE |  | <ul style="list-style-type: none"> - 공장에서 제작한 상부 구조를 트레일러로 운반 후 기존 교량 위에 설치하여 차량을 통과시키는 이동식 가교 - 교통 통제 및 우회 도로가 없이 교량의 보수 및 개축 공사 등에 사용 - 설치 시간은 지간 30m 2차선 기준 30분 |

[표 3-2] 가교(계속)

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|--------------|---|---|
| 긴급복구용 교량 |  | <ul style="list-style-type: none"> - Layer Girder 공법 : 주형을 두 개의 layer로 구성 경제적 단면을 구성하는 공법 - Speed Bridge : 고성능 강재를 사용 공장 제작된 부재를 현장에서 PIN 연결로 단순 조립하여 가설할 수 있는 교량 |
| 파형강판 가교 및 가도 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 강판의 강성을 증가시킨 파형강판을 이용 재해 등으로 인한 도로 및 교량의 유실 또는 붕괴 시 현장에서 단순한 볼트연결로써 구조물을 완성 - 공사기간 1~2일 정도로 신속 복구 |

[표 3-3] 교량교체공법

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|----------|---|---|
| 컴퓨터 교량인상 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 홍수여유고가 부족한 교량의 교대, 교각 상부에 조립식 Bracket과 유압나사잭을 설치 후, 컴퓨터 제어장치로 정밀 자동제어 인상 - 시공 중에 원활한 열차운행 가능(별도 우회로 불필요) |
| CLS 공법 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 강재브라켓을 교각 좌우측에 거치하고 강봉으로 연결지정한 후 중앙 컴퓨터 제어에 의해 설치된 유압잭으로 교량 상부구조를 균등인상하는 공법 - 하천 홍수위 상승으로 인한 기존교량의 통수단면적 확보를 위한 인상 |

[표 3-3] 교량교체공법(계속)

| 구조물의 종류 | | 특성 |
|----------------|---|--|
| 저형고 거터교체 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 기존거터를 저형고 거터로 교체하여 부족한 홍수여유고를 확보하는 방안 - 형고조절을 통한 홍수계획고 확보 가능한 경우 또는 교량기면 상승불가라는 제약조건이 있는 경우에 적용 |
| 교량확장 및 유도상화 |  | <ul style="list-style-type: none"> - 무도상 판형교의 「교량확장」과 「유도상화」를 병행 실시하여, 계획 홍수량에 따르는 공간장을 확보 - 홍수시의 통수단면을 유지하도록 교통통제 없이 하는 기존교량 개량 공법 |

3. 기후변화에 따른 교량 파손 사례 및 분석

최근 저탄소 녹색성장의 일환으로 교량의 변화도 생기고 있는 실정이다. 다양한 형식과 공법의 적용으로 인하여 붕괴 및 파손 사례도 빈번하게 발생하고 있는 실정이다. 최근 발생되는 국지성 집중호우는 하천에 유입되는 유량을 급속히 증가시켜 급류를 형성하여 하도 형상을 변화시키고 하천횡단시설물에 충격을 가해 그 피해가 증가하고 있다. 특히, 1980년대 이전에 가설된 교량의 경우 하상세굴(침식)으로 인한 교각피해가 심각하여 노후교량에 대한 재해예방사업(구조잔해 철거 포함)이 요구된다고 할 수 있다. 또한 만곡수충부의 교대부 피해는 일반적인 피해양상이지만 교량이 하천과 관련되어 있는 하천횡단구조물이라는 개념과 함께 하천시설의 상하류에 호안공 설치가 필요하다는 것을 의미한다.

3.1 교량 현황

우리나라는 2008년도를 기준으로 고속국도, 일반국도, 지방도 등 전국적으로 도로교가 25,792개(국토해양부, 2009)에 달하고 있으며, 도로망의 급격한 확장에 따라 교량의 신규가설이 급속하게 증가하여 왔고, 앞으로도 지속적으로

증가될 것으로 예상된다. 이에 따라 교량의 유지관리를 위한 소요예산도 급증하게 되어, 한정된 예산을 어떻게 합리적으로 사용하느냐가 큰 과제가 되고 있다. 교량의 안전진단 및 유지관리는 그동안 내구성 및 내하성에 집중되어 왔으나, 실제 교량피해의 원인의 대부분을 차지하고 있는 홍수 시 기초세굴로 인한 교량 피해예측 및 저감에 대한 연구와 투자는 매우 미흡한 실정이다.

매년 우리나라는 지속적으로 발생하는 태풍과 집중호우로 교량피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 이러한 교량피해는 중소규모 교량뿐만 아니라, 철도교와 국도교량 등에서도 지속적으로 발생하고 있다.

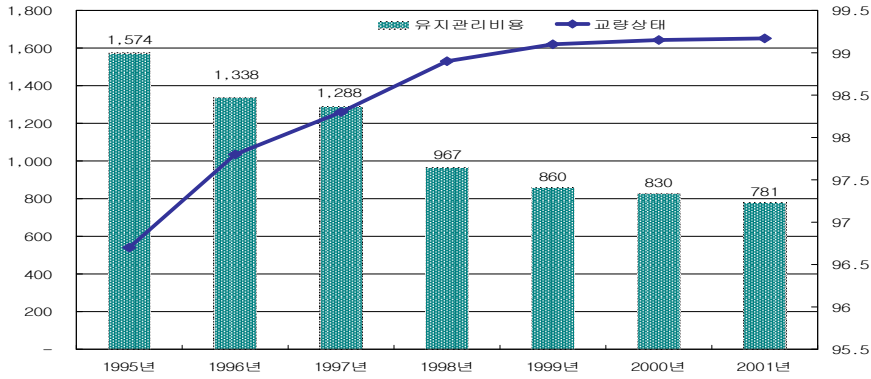
교량의 붕괴는 인명피해 뿐만 아니라 교량의 교체와 보수, 우회도로의 건설 및 그로 인해 발생하는 교통시간의 증가, 불편 및 경제활동의 피해 등으로 인해 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 끼치게 된다.

그리고 우리나라 전국의 교량을 교량형식의 대부분인 약 75%는 라멘교, 슬래브교, PSC교가 차지하는 것으로 조사되었으며, 교량형태별 유지관리 비용 또한 상당한 부분을 차지하고 있다(그림 3-1, 그림 3-2).



출처 : 국토해양부 (각급 도로관리청 자료)

[그림 3-1] 국내 전체 교량현황



[그림 3-2] 교량 상태별 유지관리 비용의 추세

주 : 교량상태는 C등급(보통인 상태)이상인 교량의 개소수를 전체 교량수에 대하여 백분율로 나타낸 것임.

시설물 유지관리 따라 이들 교량의 상태등급은 높아지는 반면 유지관리비는 감소하고 있으나 급격한 기후변화에 따라 이들 교량이 피해를 입을 가능성도 상대적으로 매우 높아지고 있는 것이 현실이다. 일례로 2002년 8월 장마 후 발생한 태풍 루사로 인하여 전국 교량 83개소, 소교량 504개소가 피해를 입었고, 일주일간의 폭우로 전국교량 20,219개 중 587개 교량(3% 피해 발생)이 피해를 입었다. 이러한 피해사례에도 기후변화에 따른 교량의 설계기준에 관련된 국내 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, 따라서 교량이 제 기능을 발휘하기 위한 기후변화 대응을 위한 설계기준 연구가 필요하다.



[그림 3-3] 집중호우로 파손된 교량

출처 : 동아일보

세부항목별 피해사례로는 지간장이 40m 이하인 교량에서의 피해는 하폭이 적으면 적을수록 통수 단면적의 부족으로 인한 교각 하부의 세굴 및 유속의 흐름에 의한 피해가 많이 발생하고 있다. 따라서 길이에 대한 교장별 분석이 필요하며, 이를 초과하는 교량에 관한 것은 세굴에 대비한 보호공법과 세굴의 영향으로 인한 교각부에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다(그림 3-3).

교량의 피해경감대책으로는 교각에 횡방향으로 작용하는 하중에 대한 교각의 세굴방지대책 및 보호콘크리트 등에 대한 검토가 필요하며, 통수능에 따른 형 하공간부족이 발생하는 지역에 대한 상부슬래브의 높이 조절에 따른 거더 등의 두께 조절에 대한 연구와 부족에 따른 구조적 안전성에 대한 검토가 필요하다고 사료된다.

LH는 지금까지 전국적으로 많은 교량을 건설하여 왔으며, 현재 전국적으로 설계진행 중인 교량만도 약 1,000여개에 달해 이들 교량의 기후변화를 고려한 설계기준에 대한 적정성을 재검토할 필요가 있다.

3.2 일반적인 교량구조물의 피해

교량의 피해는 대체적으로 다음과 같은 과정으로 이루어진다. 우선 외력의 작용에 의해 발생하는 피해이다. 이에는 홍수 유량과 수위, 유속 등이 관계되는데, 이러한 외력은 현재의 하도 특성 및 구조물 특성 등과, 만성적 하상 저하, 구조물의 오래된 정도 등 재해의 요인에 따라 월류, 침수, 세굴 등의 수리현상이 발생된다. 그 결과 구조물의 여러 부위에서 다양한 형태의 피해가 발생하게 된다. 이때, 피해형태와 이를 발생시키는 수리현상의 사이에는 극히 높은 상관관계가 있고, 이들 피해형태를 크게 3가지로 구분하여 정리하였다.

3.2.1 국부 세굴

만곡부에 홍수류가 도달하면 충격력으로 국소적인 세굴이 발생하고, 이런 지역에 위치하고 있는 교량은 피해를 받기 쉽다. 또, 교각과 세굴방호공에 국소류가 발생하여 국소 세굴을 일으키기도 하는데, 이 때 발생하는 유체력은 부가적인 피해를 발생시킬 수 있다. 이 국부 세굴에 의해 하상의 침하가 계속된다면 교각 자체에 불안정이 발생되어 결국에는 유실되는 결과가 일어난다. 유체력에 의한 피해로는 교각과 교대의 기초를 이탈시키고, 경사가 발생하며 이

는 결국 침하를 유발하고 절손되거나 전도파괴되는 경우를 발생시키기도 한다. 이러한 과정이 지속되면서 경년 변화에 의해 강도의 저하를 유발할 수 있다.

3.2.2 하천 통수능의 저하

만곡부에 수격이 형성되거나, 교각, 세굴방호공에 국소류가 발달하고, 홍수류에 의해 유하되는 유하물질에 의해 흐름의 소통장애가 발생하고, 하천단면이 협소하여 침수를 유발함에 따라 발생하는 피해유형이다.

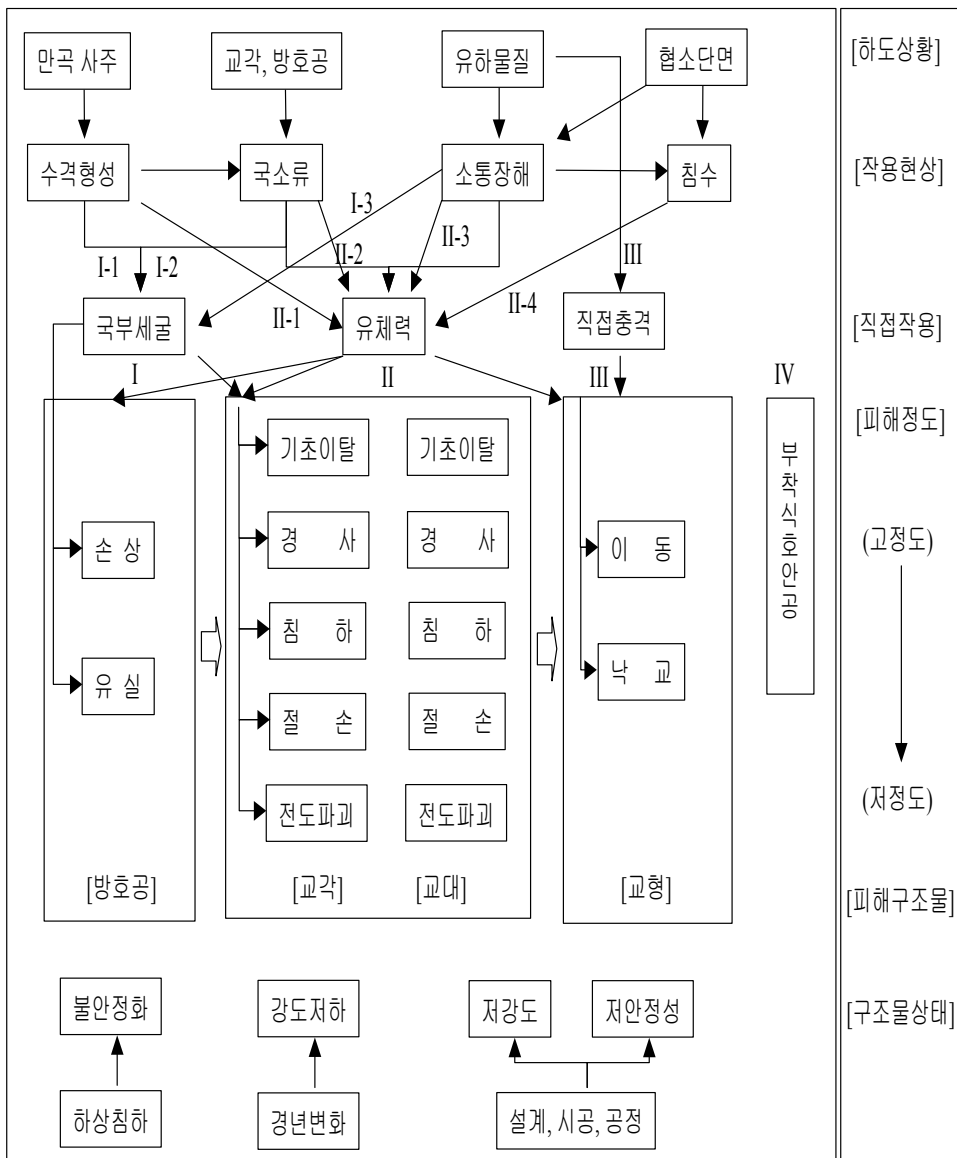
이러한 모든 현상은 유체력의 증가를 유발하고, 결과적으로 이는 교각과 교대 또는 그 기초공에 기초이탈, 경사, 침하, 절손 및 전도파괴를 유발하는 원인이 된다. 결국 교량 자체의 강도를 저하시키고, 침수에 의해 교량 자체의 이동이 발생하기 쉬우며 교량에 균열이 발생하여 낙교되는 결과가 발생할 수도 있다.

3.2.3 직접충격

홍수류가 극히 발달한 상태에서의 유하물질의 직접적인 충격은 갑자기 교량에 피해를 유발할 수 있다. 유하물질이 쌓이게 되어 통수 단면이 감소하게 되면 그 충격은 더욱 커지게 되어 결국 교량의 이동과 낙교를 일으키게 된다.

급격한 파괴나 낙교가 발생하지 않을 경우는 이러한 과정은 해마다 되풀이되는 홍수현상에 의해 서서히 그 강도와 기능을 상실해 갈 수도 있다.

앞서 전술한 절차로 교량의 피해가 진행되는 것이 일반적이다. 이와 같이 교량에 손실이 발생하는 과정 및 피해의 형태와 원인을 그림 3-4에 체계적으로 정리하였다.



[그림 3-4] 교량에 발생할 수 있는 피해의 형태 및 원인

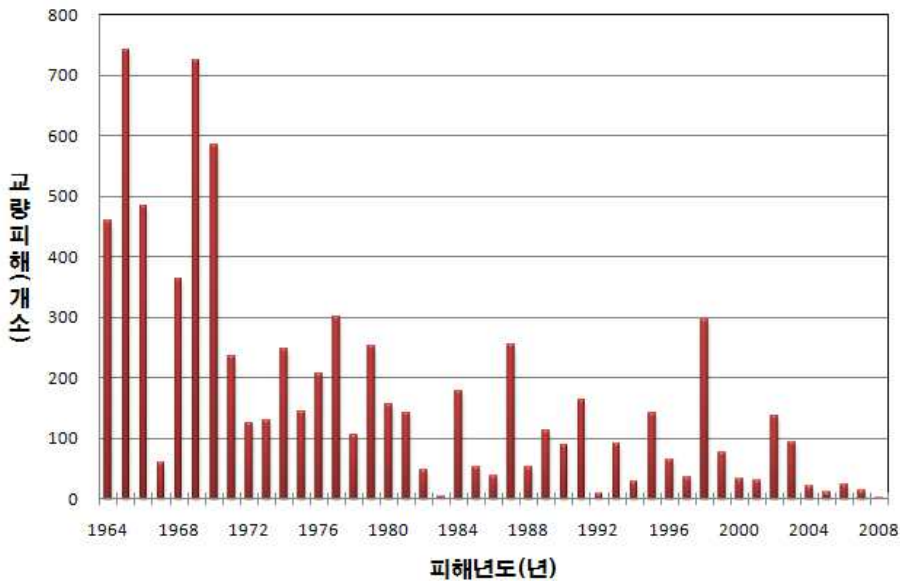
3.3 교량피해 현황 분석

3.3.1 홍수로 인한 교량 피해 현황 및 분석

우리나라는 2008년도를 기준으로 고속국도, 일반국도, 지방도 등 전국적으로 도로교가 25,792개(국토해양부, 2009)에 달하고 있으며, 도로망의 급격한 확장에 따라 교량의 신규가설이 급속하게 증가하여 왔고, 앞으로도 지속적으로

증가될 것으로 예상된다. 1964년부터 2008년까지의 홍수로 인한 도로교 피해 현황을 그림 3-5와 표 3-4에 각각 나타내었다. 1964년부터 2008년까지 45년 동안 총 7,534개의 도로교가 홍수로 붕괴된 것으로 조사되었으며, 전 세계적으로도 교량 피해의 가장 큰 원인은 홍수로서 홍수 시 교량 피해로 인한 막대한 인명과 재산피해의 발생 가능성은 상존한다.

교량 설계 및 시공기술의 고도화와 노후교량의 개축 등으로 홍수로 인한 교량피해는 점차 줄어드는 경향을 보이고 있으나, 2002년의 태풍 “루사”와 2003년의 태풍 “매미”로 많은 교량 피해가 발생하였음을 고려하면, 교량 피해는 태풍과 호우의 강우강도에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 최근 국지성 집중호우와 설계빈도를 상회하는 강우강도 등의 외적요인에 따라 홍수 시 교량의 안전이 크게 위협받고 있는 현실에서 교량 붕괴로 인한 재산피해 뿐만 아니라 인명피해의 발생 가능성도 매우 높다.



[그림 3-5] 홍수로 인한 도로교의 피해현황(1964년~2008년)

[표 3-4] 홍수로 인한 도로교의 피해현황(1964년~2010년)

| 지역 년도 | 전체 | 서울 | 부산 | 대구 | 인천 | 광주 | 대전 | 울산 | 경기 | 강원 | 충북 | 충남 | 전북 | 전남 | 경북 | 경남 | 제주 |
|----------|-------|-----|----|----|----|----|----|----|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|----|
| 전체 | 7,534 | 109 | 91 | 18 | 7 | 52 | 7 | 6 | 1,343 | 906 | 391 | 575 | 360 | 1,091 | 1,018 | 1,462 | 98 |
| 2010 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2009 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2008 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2007 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 9 |
| 2006 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 5 | 0 |
| 2005 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 4 | 1 | 0 |
| 2004 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 2 | 1 | 7 | 3 | 2 | 0 |
| 2003 | 92 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 26 | 0 | 2 | 1 | 1 | 24 | 35 | 0 |
| 2002 | 136 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 | 14 | 14 | 0 | 5 | 60 | 36 | 0 |
| 2001 | 30 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 8 | 4 | 0 | 2 | 2 | 0 | 9 | 1 | 0 |
| 2000 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 6 | 2 | 3 | 2 | 14 | 3 | 0 |
| 1999 | 76 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 4 | 26 | 3 | 3 | 23 | 8 | 0 |
| 1998 | 296 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 48 | 15 | 12 | 13 | 7 | 28 | 117 | 54 | 0 |
| 1997 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 12 | 4 | 1 | 5 | 1 | 7 | 0 |
| 1996 | 64 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 16 | 42 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| 1995 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | - | 33 | 24 | 27 | 3 | 13 | 1 | 30 | 5 | 0 |
| 1994 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 6 | 1 | 15 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 1993 | 90 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 9 | 3 | 0 | 10 | 2 | 28 | 36 | 0 |
| 1992 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1991 | 162 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 17 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 110 | 0 |
| 1990 | 89 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 49 | 15 | 10 | 1 | 0 | 1 | 9 | 1 | 0 |
| 1989 | 112 | 0 | 0 | 1 | 0 | 45 | 0 | - | 1 | 3 | 0 | 1 | 3 | 40 | 6 | 11 | 1 |
| 1988 | 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | 19 | 2 | 13 | 0 | 0 | 1 | 16 | 0 | 0 |
| 1987 | 255 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | - | - | 17 | 0 | 13 | 87 | 9 | 26 | 38 | 59 | 0 |
| 1986 | 37 | 0 | 0 | 1 | 0 | - | - | - | 2 | 0 | 2 | 8 | 3 | 4 | 8 | 7 | 2 |
| 1985 | 53 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | - | - | 1 | 3 | 1 | 0 | 5 | 33 | 7 | 2 | 0 |
| 1984 | 177 | 15 | 1 | 0 | 6 | - | - | - | 43 | 21 | 1 | 8 | 16 | 5 | 23 | 38 | 0 |
| 1983 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1982 | 47 | 0 | 0 | 1 | 0 | - | - | - | 1 | 8 | 0 | 0 | 0 | 7 | 7 | 23 | 0 |
| 1981 | 141 | 0 | 0 | 11 | 0 | - | - | - | 5 | 6 | 0 | 2 | 3 | 61 | 20 | 33 | 0 |
| 1980 | 155 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 3 | 4 | 22 | 9 | 0 | 33 | 71 | 13 | 0 |
| 1979 | 252 | 2 | 0 | - | - | - | - | - | 12 | 0 | 0 | 9 | 7 | 98 | 20 | 103 | 1 |
| 1978 | 105 | 1 | 0 | - | - | - | - | - | 9 | 0 | 24 | 7 | 13 | 23 | 16 | 12 | 0 |
| 1977 | 300 | 8 | 0 | - | - | - | - | - | 173 | 1 | 35 | 74 | 0 | 5 | 0 | 0 | 4 |
| 1976 | 205 | 0 | 1 | - | - | - | - | - | 47 | 89 | 2 | 1 | 40 | 14 | 4 | 7 | 0 |
| 1975 | 143 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 77 | 8 | 0 | 5 | 12 | 21 | 12 | 8 | 0 |
| 1974 | 248 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 3 | 5 | 3 | 18 | 11 | 95 | 5 | 108 | 0 |
| 1973 | 129 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 2 | 0 | 1 | 0 | 52 | 7 | 2 | 64 | 1 |
| 1972 | 124 | 1 | 0 | - | - | - | - | - | 3 | 2 | 5 | 4 | 0 | 23 | 9 | 77 | 0 |
| 1971 | 234 | 7 | 0 | - | - | - | - | - | 30 | 40 | 2 | 79 | 8 | 43 | 14 | 11 | 0 |
| 1970 | 585 | 1 | 19 | - | - | - | - | - | 37 | 65 | 14 | 29 | 29 | 85 | 154 | 76 | 76 |
| 1969 | 724 | 8 | 59 | - | - | - | - | - | 37 | 54 | 34 | 69 | 36 | 154 | 65 | 204 | 4 |
| 1968 | 362 | 5 | 3 | - | - | - | - | - | 27 | 65 | 4 | 12 | 9 | 24 | 70 | 143 | 0 |
| 1967 | 58 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 21 | 19 | 5 | 5 | 0 | 1 | 3 | 4 | 0 |
| 1966 | 483 | 33 | 0 | - | - | - | - | - | 157 | 72 | 1 | 22 | 9 | 136 | 19 | 34 | 0 |
| 1965 | 742 | 6 | 0 | - | - | - | - | - | 218 | 232 | 16 | 14 | 34 | 67 | 44 | 111 | 0 |
| 1964 | 458 | 17 | 0 | - | - | - | - | - | 205 | 47 | 84 | 36 | 12 | 28 | 20 | 9 | 0 |

이에 따라 교량의 유지관리를 위한 소요예산도 급증하게 되어, 한정된 예산을 어떻게 합리적으로 사용하느냐가 큰 과제가 되고 있다. 교량의 안전진단 및 유지관리는 그동안 내구성 및 내하성에 집중되어 왔으나, 실제 교량피해의 원인의 대부분을 차지하고 있는 홍수 시 기초세굴로 인한 교량 피해예측 및 저감에 대한 연구와 투자는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 그림 3-6에서 그림 3-17과 같은 교량 하자 및 파손현상들이 발생하여 소중한 국고의 낭비로 이어진다.



[그림 3-6] 교량 난간 파손 사례



[그림 3-7] 교대부근 석축 유실



[그림 3-8] 라멘교 교량 상판 파손



[그림 3-9] 교각 유실



[그림 3-10] 교각 침식



[그림 3-11] 난간의 앵커볼트 지지길이 부족



[그림 3-12] 뒤채움재 유실



[그림 3-13] 교량 붕괴 사례



[그림 3-14] 제방 사면 유실



[그림 3-15] 교량 하류부 수중보 붕괴



[그림 3-16] 교각 침하 및 상판 부등침하



[그림 3-17] 유송잡물로 교각 세굴

3.3.2 집중호우로 인한 중·소규모 교량피해현황 분석

3.3.2.1 개요

2002년 8월 4일부터 11일까지 한반도 전역에 걸쳐서 내린 집중호우에 의하여, 전국적으로 교량 83개소, 소교량 504개소가 피해를 입었다. 하천을 횡단하는 교량은 홍수 시 하천의 통수기능을 저하시켜 하천의 범람이나 제방의 붕괴를 유발시키는 요인이자 홍수로 인하여 피해를 입을 수 있는 대상이기도 하다. 최근 발생한 집중호우의 경우에는 하천에 유입되는 유량을 급격히 증가시켜 급류를 형성하여 하도형상을 변화시키고, 하천을 횡단하는 교량에 충격을 가해 그 피해가 증가하고 있다. 따라서, 하천을 횡단하는 교량을 건설하기 위하여서는 재해를 경감시키기 위한 종합적이고, 체계적인 판단이 필요하다. 최근 하천설계기준에서는 하천을 횡단하는 교량의 최소경간장을 12.5m로 규정하고 있다.(건설교통부, 2000) 그러나 2002년 현재 대부분의 중소하천을 통과하는 중소규모의 교량은 경간장이 8m~12m정도이므로 이는 호우로 인한 교량의 피해를 피하기 어렵다는 것을 알 수 있다(건설교통부, 2002).

3.3.2.2 교량의 피해사례

국립방재연구소는 집중호우로 인한 홍수재해발생 3일 후인 2002. 8. 14~8. 18 (5일 간)동안 강원도, 충청북도, 충청남도에 발생된 피해교량을 대상으로 현장조사를 수행하였다(국립방재연구소, 2002). 이 중 전형적인 교량의 피해 사례를 살펴보았다.

(1) 오류교 피해

오류교는 충청북도 음성군 대소면 오류2리 군도에 위치한 교량으로, 1978년에 준공되었으며, 교장이 56m(7@8m), 폭이 6.6m인 철근콘크리트 슬래브교량이다. 그림 3-18에서 보는 바와 같이 3번째 교각이 심각하게 침하하였다. 이는 사질토인 하상에 직접기초인 교각을 가설하여 세굴에 취약할 수밖에 없는 구조적인 문제 때문으로 판단되며, 세굴로 인하여 발생하는 교량의 피해를 전형적으로 보여주고 있다. 또한, 유송잡물이 교각상단에 걸려있는 것을 보아 알 수 있듯이 유송잡물이 하천의 흐름을 저항하며, 교각에 큰 압력을 가하여 호우 시 교각이 설계하중 이상의 하중이 작용하였을 것으로 생각된다.

(2) 임장교 피해

임장교는 충청남도 청양군 목면 신흥리 지방도 625호에 위치한 교량으로, 지방2급 하천인 본의천이 국가하천 금강에 합류되는 지점에 위치하고 있다. 준공연도는 1986년이고, 교장은 40m, 폭 5.5m인 철근콘크리트 슬래브교량이다. 임장교는 하부구조의 중요성을 부각시키는 피해사례로 임장교의 도면을 입수하지 못하여 교각의 위치가 분명치 않으나 제방 앞턱이나 앞비탈 기슭에 위치하였을 것으로 생각되어지며, 그림 3-19에서 보는 바와 같이 금번 호우로 인하여 상류로부터 떠내려온 유송잡물과 잡석들로 인하여 교각이 붕괴되며 교량이 전체적으로 붕괴된 것으로 판단된다.



[그림 3-18] 오류교 피해전경



[그림 3-19] 임장교 피해전경

(3) 연운교 피해

연운교는 충청남도 천안시 북면 연춘리 농어촌도로에 위치한 교량으로 준공 연도는 미상이고, 교장이 64m(8@8m), 폭이 3m인 철근콘크리트 연속 라멘 교량이다. [그림 3-20]에서 보는 바와 같이 급변 폭우로 인하여 상류로부터 많은 양의 유송잡물이 유입되어 촘촘한 교각(경간장 8m)에 걸려 통수단면이 감소함으로 인해 월류하고, 이로 인해 형성된 강력한 소류력이 하상을 침식하였다. 또한 하천 최심부 교각 기초에 발생한 세굴과 급류가 유송잡물과 토사가 뒤엉킨 덩어리로 작용하며 수압의 증가시켜 교각이 유실되면서 피해가 크게 발생하였다. 교량의 형식이 연속라멘철근콘크리트이기 때문에 주변교각에 모두 피해를 가져왔다. 그림 3-20은 유송잡물과 토사가 뒤엉킨 덩어리가 교각에 걸리며 통수단면을 감소시키며 발생한 와류가 큰 소류력을 발생시키며 하상을 침식하는 전형적인 모습을 보여주고 있으며, 그림 3-21은 교량을 월류한 급류가 발생시킨 와류가 하상을 침식한 현상을 보여주고 있다.



[그림 3-20] 연운교 상류측 피해전경



[그림 3-21] 연운교 하류측 피해전경

3.3.2.3 홍수 피해 원인 분석을 통한 교량설계 개선 방안

중소하천을 가로지르는 교량은 대부분 경간장이 짧고, 형하공간이 낮으며, 공용년수가 오래된 RC슬래브 교량 또는 세월교이다. 따라서 짧은 경간장과 낮은 형하공간으로 인하여 그림과 같이 유송잡물이 교각에 걸려 통수단면을 감소시키고 교량에 큰 수압을 작용시켜 교량이 붕괴되거나 홍수위의 상승 및 월류로 인한 피해(그림 3-122~3-25)가 가중되는 피해가 발생된다. 그러므

로 중소하천의 소규모 교량은 충분한 형하공간과 경간장을 확보하여 통수기능을 유지할 수 있는 형식으로의 개선이 요구된다. 또한 신속한 피해복구를 위하여 급속시공이 가능하여 사회 인프라의 주요 성능을 조기에 발휘할 수 있는 형식으로의 개선도 필요하다.



[그림 3-22] 교량에 걸린 부유목
(덕산천 덕산리 용수교)



[그림 3-23] 홍수에 떠내려 온 중장비
(인제군 덕산리)



[그림 3-24] 다수교 유실 전경
(강원도 평창군 평창읍 다수리)



[그림 3-25] 교각에 부유물 집적 및 교량 주변 침수 (강원도 평창군 용평면)

교량의 교대가 하천내부에 위치하여 하천의 단면이 급축소 되는 지점이나 만곡부 등에서는 그림 3-26과 그림 3-27과 같이 제방이 침식되어 붕괴되거나 월류로 인한 침수피해가 발생한다. 이와 같은 피해는 홍수위 산정에 있어 하천의 단면변화에 대한 고려를 충분히 하지 못한 경우나 설계빈도 이상의 홍수위로 인하여 발생하며 또한 교량의 설계에 있어 통수단면에 대한 고려가 불충분한 경우에 발생한다.

그러므로 강우강도의 변화에 대한 고려와 만곡부와 단면변화부를 고려한 홍수위 산정, 통수단면을 고려한 교량계획 등과 같은 설계적인 측면과 대규모 제방 등의 설치, 중요구간의 호안 확대 설치 등과 같은 시공적인 측면을 고려하여야 할 것으로 판단된다.



[그림 3-26] 동산동교의 접속부 제방 유실
(강원도 평창군 용평면 계천평)



[그림 3-27] 도로, 옹벽 유실
(인제군 가리산천)

도로의 하부를 통과하는 세천에서는 교량을 대신하여 배수암거를 시공하는 경우가 많이 있다. 이 경우 부유물과 토사, 홍수량 등을 충분히 고려하지 못하여 통수기능을 발휘하지 못하여 월류되어 침수되거나 붕괴되는 피해가 발생한다. 그러므로 도로의 하부를 통과하는 세천에서는 부유물과 토사, 홍수량을 충분히 고려하여 통수기능을 확보할 수 있는 형식으로 배수암거를 개선하거나 교량으로 대체할 필요가 있다. 홍수나 토석류에 쓸려 내려오는 유송잡물은 흘러내려 하천상을 횡단하는 교량의 교각에 걸려 교량에 과도한 하중을 가해 교량을 붕괴시키거나 수중보를 형성함으로써 홍수위를 상승시켜 하천의 월류로 인한 침수피해를 유발하는 원인이 된다. 또한, 토석류는 단위중량이 커서 하천을 횡단하는 교량에 큰 수압을 작용시키며 토석류의 이동·퇴적 모두가 큰 피해를 유발하게 된다(그림 3-28).



[그림 3-28] 토석류에 의한 도로붕괴(인제군 한계천)

우리나라는 지형적으로 국토의 2/3가 산지인데다 대부분 토심이 얇고 경사가 심하여 집중호우 시 토압이 상승하여 산사태가 발생하기 쉬운 특성을 가지고 있다. 이와 같은 산사태는 산기슭 촌락에 인명피해를 유발 할 수 있으며, 유송잡물과 토석류의 원인이 되어 하천을 횡단하는 교량을 가로막아 교량의 붕괴 또는 월류로 인한 침수피해를 유발한다. 또한, 도로변의 절개지에서는 집중호우로 낙석 및 산사태의 유발요인이 되고, 배수로, 집수정, 배수암거의 용량이 충분하지 못하여 도로유실의 원인으로 작용하게 된다.



[그림 3-29] 도로유실
(강원도 강릉시 성산면 오봉리)



[그림 3-30] 낙석으로 인한 피해
(충북 충주시 동량면 조동리 충주댐 우안도로)

3.3.3 준공년도별 분석

언제 가설된 교량이 홍수재해에 취약한가? 라는 질문을 제시하면 일반적으로 실무자들은 주민자력 시공된 새마을교량이 취약하다고 대답한다. 이 대답은 사실이나 보다 구체적으로 교량피해경향을 파악하기 위하여 피해정도에 따른

경향을 분석하였다. 표 3-5에 준공연도는 국내 교량가설 기술발달에 따른 특성을 고려하여 1970년 이전에 준공된 교량, 1970~1979년(1970년대), 1980~1989년(1980년대), 1990년 이후에 준공된 교량(1990년대)으로 구분하였다. 교량시공전문기술이 없이 자력시공으로 건설된 새마을교량(1970년대) 및 그 이전교량의 경우, 교량안전도에 대한 기술부족 및 노후화로 인해 이미 다수의 교량이 교체되었으나 아직도 잔존하고 있는 교량이 홍수에 취약하다는 것을 알 수 있다. 한편, 표준설계도에 따라 가설된 교량(1980년대)의 경우에는 부분파손교량이 5개소로 다수 발생하였다. 이는 주변 환경을 고려치 않고 표준설계도를 그대로 가설하여 기능상실패해뿐만 아니라 부분파손피해가 발생된 것이라 사료된다. 그러나 도로교 설계기준에 근거하여 가설된 교량(1990년대)의 경우 기능상실 및 부분파손피해가 3개소에서 발생하였으며 이 결과로 설계기준에 근거한 설계 및 시공이 교량의 안전에 효과가 어느 정도 있다는 것을 나타내고 있다고 사료된다. 다만, 도로교 표준시방서 콘크리트교가 1978년도에 제정되어 4차 개정까지 되었으나, 1992년 2차 개정 시 홍수방재관련 설계항목이 추가된 이후 2000년도 도로설계기준으로 개정될 때까지 보완되지 않았음을 고려해보면, 1990년대 준공된 교량도 홍수피해에 대하여 완전히 안전하다고 할 수 없다고 사료된다. 최근 들어 하천시설기준(건설교통부, 2000) 및 홍수방재를 위한 중소규모교량 설계지침(행정자치부, 2002)에 교량의 홍수방재개념을 도입시키기 위한 노력이 수행되고 있으나, 이미 다수의 교량이 가설되었기 때문에 집중호우가 발생할 경우 교량피해는 지속적으로 발생될 것이라 사료된다. 따라서 기존 가설된 교량에 대한 홍수방재대책을 마련할 필요성이 있다 할 것이다.

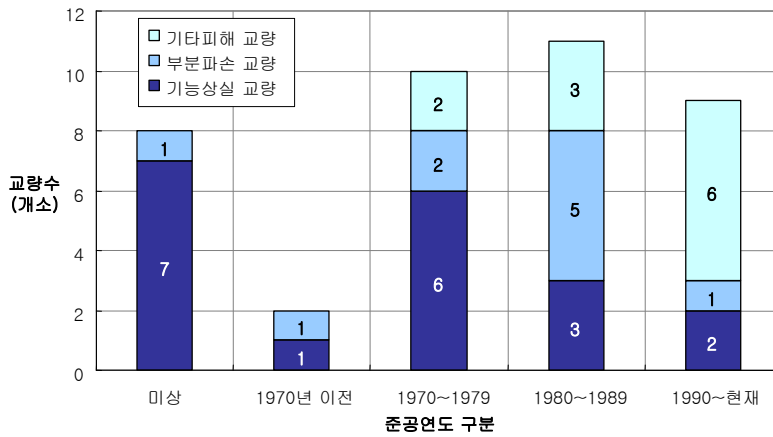
[표 3-5] 준공연도 구분에 따른 교량가설기술발달 특성

| 준공연도 구분 | 특 성 |
|-------------|---------------------|
| 미상 | 새마을교 등 비법정교량이 다수 |
| 1970년 이전 | 노후교량 |
| 1970년~1979년 | 새마을 교량 (주민자력시공) |
| 1980년~1989년 | 기술자 도입단계 교량 (표준도사용) |
| 1990년~현재 | 설계기준에 근거하여 가설된 교량 |

준공년도별 교량의 피해교량 개소수는 그림 3-31과 같다.

피해정도를 기능상실교량, 부분파손교량, 기타피해교량으로 구분할 수 있다. 우선 홍수로 인해 교량 구조부재가 손상을 입어 교량으로서 기능을 상실한 경우는 기능상실교량(그림 3-32), 교량구체는 큰 피해를 입지 않았지만 부속시설의 일부파손이 발생한 경우는 부분파손교량(그림 3-33)으로 구분할 수 있다. 그리고 교량의 피해는 없지만 주변제방 및 호안이 일부 유실된 경우(기타피해교량(그림 3-34))으로 구분한다. 그림 3-31에서 알 수 있듯이, 피해정도를 고려하지 않은 경우 1980년대 가설된 교량이 11개소로 가장 많이 발생하였고, 이어 1970년대 가설된 교량이 10개소에서 발생하였다. 또한 준공연도 미상 및 1970년대 이전에 가설된 교량과 1990년대 가설된 교량이 각각 8개소, 9개소로서 준공연도에 따른 특별한 피해경향은 발견되지는 않았다. 그러나, 기능상실교량만을 고려하였을 때 1970년대 가설된 교량은 6개소로서 가장 많으며, 이어 1980년대 및 1990년대에는 각각 3개소, 2개소로 경감하고 있음을 알 수 있다. 한편 부분파손교량과 기능상실교량을 누적하였을 경우에는 1970년대 및 1980년대 가설된 교량이 8개소로 동일하였다.

교량시공전문기술이 없이 자력시공으로 건설된 새마을교량(1970년대) 및 그 이전교량의 경우, 교량안전도에 대한 기술부족 및 노후화로 인해 이미 다수의 교량이 교체되었으나 아직도 잔존하고 있는 교량이 홍수에 취약하다는 것을 알 수 있다. 한편, 표준설계도에 따라 가설된 교량(1980년대)의 경우에는 주변환경을 고려치 않고 표준설계도를 그대로 가설하여 기능상실피해뿐만 아니라 부분파손피해가 발생한 것이라 사료된다. 그러나 도로교 설계기준에 근거하여 가설된 교량(1990년대)의 경우 설계기준에 근거한 설계 및 시공이 교량의 안전에 효과가 어느 정도 있다는 것을 나타내고 있다고 사료된다. 다만, 도로교 표준시방서 콘크리트교가 1978년도에 제정되어 4차 개정까지 되었으나, 1992년 2차 개정시 홍수방재관련 설계항목이 추가된 이후 2000년도 도로설계기준으로 개정될 때까지 보완되지 않았음을 고려해보면, 1990년대 준공된 교량도 홍수피해에 대하여 완전히 안전하다고 할 수 없다고 사료된다.



[그림 3-31] 준공연도 구분에 따른 피해교량 개소수 분포도



[그림 3-32] 기능상실교량(충남 천안시 매송교)



[그림 3-33] 부분파손교량(충남 청원군 사담교)



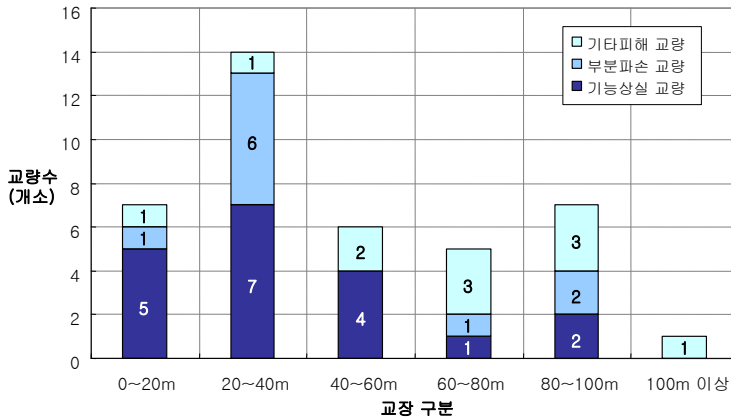
[그림 3-34] 기타피해교량

3.3.4 교장별 분석

하폭에 따른 교량피해경향을 파악하기 위하여 교장별 피해분포를 분석하였다. 교장은 20m 단위로 구분하였으며, 그림 3-35에 교장 구분별 피해교량 분포를 도시하였다.

그림 3-35를 살펴보면 교장이 20~40m 인 교량이 14개소로 가장 많은 피해를 입었으며, 20m 이하 및 80~100m 인 교량이 7개소의 피해를 입은 것을 알 수 있다. 그러나 기능상실교량만을 고려하였을 경우 20~40m의 교량이 7개소로서 피해빈도가 두드러짐을 알 수 있다. 이는 일반적으로 하폭이 20~40m 인 경우 하천지역은 산지에서 평지로 전환되는 구간이 대부분이며, 이 구간에서는 하천흐름의 변동이 심하고, 급류가 발생하며, 하상퇴적 및 세굴작용이 활발하기 때문에 교량피해가 가장 많이 발생할 수 있는 것으로 사료된다. 또한 하폭 20~40m인 하천을 횡단하기 위해서는 교량경간을 2~3개로 분할하여 교각을 가설해야 하기 때문에 통수면적이 줄어들어 교각기초부의 세굴 등 홍수에 대해 취약한 경향을 보이고 있는 것으로 분석된다. 따라서 교량설계에 있어 이에 대한 충분한 고려와 홍수로 인한 피해를 경감시키기 위한 노력이 필요하다고 할 것이다. 우리나라의 경우 전국토의 70%가 산지로 구성되어 있음으로 인해 산지와 평지가 양존하는 지역에 주민의 주거공간이 발달하고 있다. 또한 이 지역에는 하폭 20~40m 인 하천이 대다수이며 주민 생활편의를 위해 다수의 교량이 가설되어 있는 실정이다. 그러나 이 지역은 교량이 홍수에 대하여 가장 취약한 지역임에도 불구하고 교량규모의 적음으로 인해 설계 시 홍수에 대한 대책이 적극적으로 마련되지 못한 실정이다. 따라서 중소규모교량을 설계할 경우에는 반드시 홍수에 대한 안전성을 확보하도록 노력해야 할 것이다.

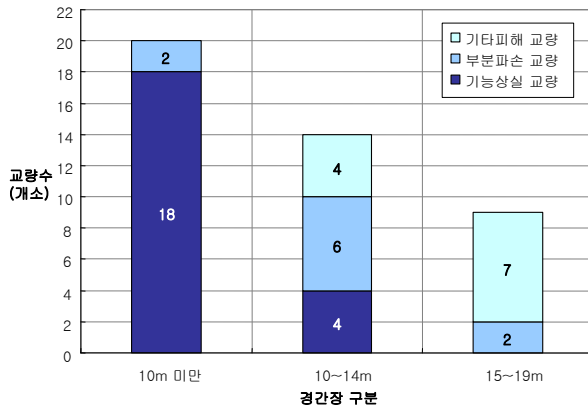
그리고 교량 구조물뿐만 아니라 교량에 의해 영향을 받는 교량 상하류부에 위치한 하천시설에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 교량 상하류에 제방호안을 설치하며, 접속도로부의 배수시설 등 교량구체와는 관계가 없는 주변 시설에 대한 홍수방재개념이 교량설계 시 고려되어야 한다.



[그림 3-35] 교장별 피해교량 분포도

3.3.5 경간장별 분석

하천에 가설된 교각은 하천흐름을 방해하여 유수의 통수능을 저하시킨다. 따라서 교량의 최소 경간장 확보는 교량설계 시 중요한 설계항목이다. 금번 현장조사에서는 경간장별 피해교량 분포를 분석함으로써 현재 설계기준에서 제시한 최소경간장이 교량의 홍수피해에 미치는 영향을 검토하였다. 경간장은 5m 단위로 구분하였으며, 일반적으로 경간장이 5m 이상이기 때문에 0~5m 및 5~10m 는 10m 미만으로 하였다. 그림 3-36에서는 경간장 구분별 피해교량 분포를 나타내고 있다. 그림 3-36을 보면 10m 미만의 교량의 경우 18 개소에서 기능상실피해가 발생하였다. 또한 10~14m인 경우에는 4개소, 15~19m인 경우 0개소로서 경간장이 증가함에 따라 그 피해가 적게 나타남을 알 수 있다. 따라서 경간장 확보가 교량안전을 위해서 중요하다는 것을 알 수 있다. 또한 15m 이상인 경우 그 피해빈도가 급격히 저하된 것을 고려하면 하천설계기준에서 제시한 최소경간장 12.5m는 교량의 안전을 위해서 반드시 확보되어야 함을 나타낸다고 사료된다(건설교통부, 2000). 또한, 교량의 주변제방 및 부속시설에 대한 피해를 최소화하기 위해서는 구체적인 홍수방재 설계항목의 개발이 필요하다고 판단된다. 특히 이 자료는 20m 이하의 소하천을 횡단하는 교량은 단경간 교량으로 설치함으로써 홍수피해를 경감할 수 있다는 것을 나타내므로 이에 대한 연구가 활발히 이루어져야 함을 시사하고 있다.



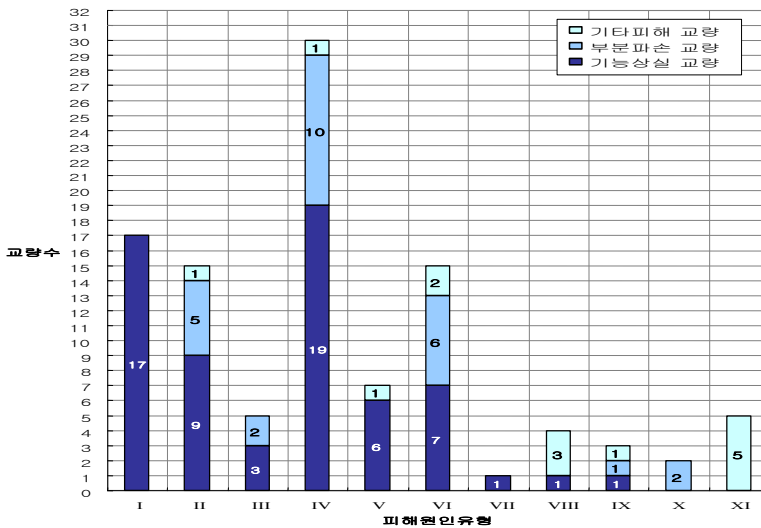
[그림 3-36] 경간장별 피해교량 분포도

3.3.6 피해원인별 분석

홍수에 의한 교량의 피해원인을 파악하기 위하여 표 3-6에 정리된 바와 같이 교량피해원인을 11가지로 구분하였다. 또한 다수의 원인이 복합적으로 작용하여 피해를 야기 시킬 수 있기 때문에 각각의 교량에 대하여 피해원인을 다수 중복하여 고려하였고 그 결과를 그림 3-37에 도시하였다. 경간장 부족으로 통수능 저하된 교량(피해유형 IV)은 경간장 12.5m 이하인 교량을 표시한 것이다. 조사결과 하상세굴로 인한 교각의 침하유실(피해유형 I)이 17개소에서 발생되었으며, 유송잡물에 의한 통수능 저하(피해유형 II) 및 만곡수충부에서 교대부 및 제방유실 (피해유형 VI)이 15개소에서 발생되었다. 따라서 하상세굴에 의한 교각의 피해, 유송잡물로 인한 통수능 저하 및 만곡수충부에서의 교대 및 제방의 유실에 대한 피해에 대한 대책을 교량설계 시 고려해야 한다. 또한, 기존구교의 영향으로 신설된 교량 4개소에서 피해가 발생하였다(그림 3-37). 이는 대부분의 구교를 대체하는 신설교량은 구교와 인접하여 건설하게 되므로 구교는 신설교량건설로 인하여 특히 하부구조가 취약해질 가능성이 크므로 신설교량이 준공되면 홍수재해를 예방하기 위하여 구교는 반드시 철거하여 함을 시사한다.

[표 3-6] 홍수로 인한 교량피해유형 구분

| 유형 | 피해원인내용 |
|------|----------------------|
| I | 하상세굴로 인한 교각의 침하·유실 |
| II | 유송잡물에 의한 통수능 저하 |
| III | 교장이 하폭보다 부족하여 통수능 저하 |
| IV | 경간장 부족으로 통수능 저하 |
| V | 제방고보다 교량도로면이 낮은 경우 |
| VI | 만곡수충부에서의 교대부 및 제방유실 |
| VII | 하천 합류부에 위치하여 와류발생 |
| VIII | 기존구교(신교)의 영향 |
| IX | 상하류 수중보의 영향 |
| X | 주변 옹벽(석축)기초부 취약 |
| XI | 기타 (접속도로 배수시설 미비 등) |

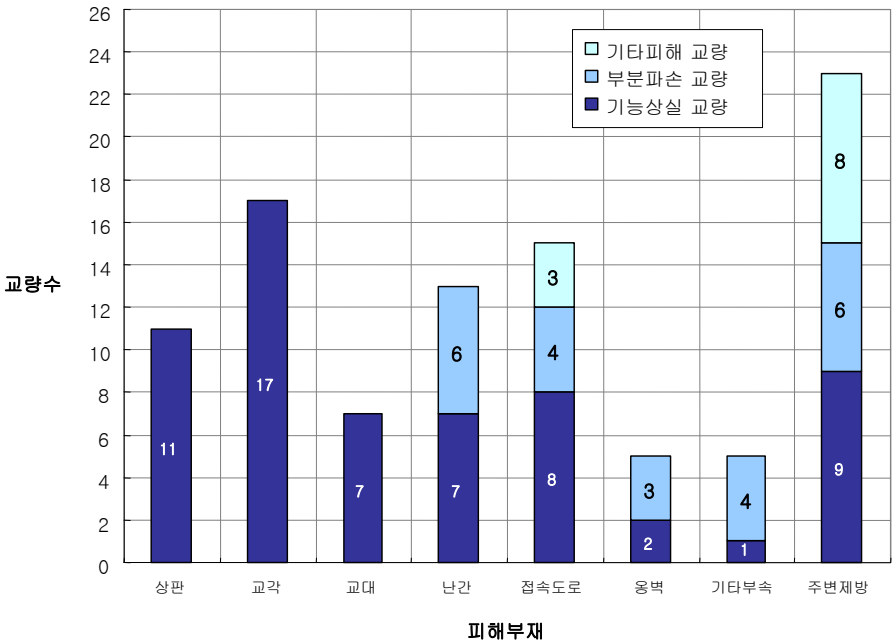


[그림 3-37] 피해원인유형 분포도

3.3.7 피해부재별 분석

피해가 발생된 부재를 정리하여 그 결과를 그림 3-38에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 교량 주변제방이 23개소로 가장 피해를 많이 입었으며, 교각이 17개소, 접속도로(교대 뒷채움흙)이 15개소, 난간부가 13개소로 피해를

입었음을 알 수 있다. 피해가 다수 발생된 부재는 홍수에 취약한 부분이며 이 부재에 대한 피해경감대책이 보다 구체적으로 마련될 필요가 있다. 특히 가장 피해가 많이 발생하는 시설이 주변제방이라는 것은 교량이 구조체만이 아니고 하천에 가설됨으로서 인해 주변 하천시설에 영향을 미치고 있다는 것을 나타낸다. 또한, 접속도로 및 난간부의 파손은 홍수가 교량을 월류하여 발생된 것으로서 교량을 설계할 때는 홍수 시 교량의 안전대책을 고려해야 함을 나타낸다고 할 수 있다.



[그림 3-38] 피해부재 분포도

3.4 결론

홍수로 인해 매년 다수의 교량이 피해를 입는데도 불구하고 그간 우리가 홍수로 인해 피해를 입는 교량에 대하여 개개 피해교량의 피해원인 및 대책을 제시하였으나, 다수의 피해교량 자료를 근거로 교량피해 경향을 파악하는데 다소 등한시 한 것이 사실이다. 2002년 8월 4일부터 11일까지 한반도 전역에 걸쳐서 내린 집중호우피해는 일정기간 강우에 의해 다수의 교량피해가 발생

하였기 때문에 가능한 많은 현장을 조사하여 홍수에 의한 교량피해 경향을 파악할 수 있었다. 전수조사가 수행되지 못함에 아쉬움이 있으나 조사를 통해서 국내 교량피해 경향을 다양한 관점에서 파악하려고 시도해보았는데 그 의의가 있다. 현장조사(국립방재연구소, 2002)를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

① 하천시설기준(건설교통부, 2000) 및 홍수피해 방지를 위한 중소규모교량 설계지침(행정자치부, 2002)을 마련하여 교량설계에 홍수방재개념을 도입하기 위한 노력을 하고 있으나, 1970년대 및 1980년대 준공된 다수의 교량은 이미 홍수에 대한 취약성을 가지고 있어 추후 국지성 집중호우가 발생할 경우 교량피해는 지속적으로 발생될 것이라 판단된다. 따라서 기존 가설된 교량에 대한 홍수방재대책을 마련할 필요성이 있다 할 것이다.

② 교장별 피해교량 분석결과 교장이 20~40m인 경우 다수 교량에서 피해가 발생하였음을 고려하였을 때, 우선적으로 중소규모교량에 대한 홍수방재대책이 요구된다고 판단된다. 특히 1970년대 및 1980년대 준공된 교량은 수명이 20~30년이 되어 노후화가 되고 있으며, 교각기초형식이 대부분 직접기초로서 세굴에 의한 피해가 다수 발생할 수 있어, 재해예방차원에서 교량개선사업이 적극적으로 수행되어야 할 것이다.

③ 경간장별 피해교량 분포를 분석함으로서 교량의 경간장 확보가 교량설계에 중요하다는 것을 파악하였다. 2000년도 개정된 하천시설기준에서는 교량 경간장을 최소 12.5m로 제시하고 있으며 이 최소경간장 확보가 교량의 홍수피해를 경감시키는데 중요한 설계항목임을 알 수 있었다. 또한, 20m 이하의 소하천을 횡단하는 교량은 단정 간 교량을 설치함으로서 홍수피해를 경감할 수 있다는 것을 확인하였다.

④ 하상세굴로 인한 교각의 침하유실, 유송잡물에 의한 통수능 저하, 만곡수충부에서 교대부 및 제방유실이 주된 교량피해원인으로 파악되었다. 특히 가장 피해가 많이 발생하는 부재가 주변제방이라는 것은 교량이 구조체만이 아

니고 하천에 가설됨으로서 인해 주변 하천시설에 영향을 미치고 있다는 것을 나타낸다.

⑤ 피해원인 및 피해부재별 분석결과에서 알 수 있듯이 교량의 홍수방재대책은 일부부재의 보강으로 되는 것이 아니고, 교량은 수십 년간 변하지 않는 콘크리트 구조물인데 반하여 하천은 매년 홍수로 하천형상이 변화된다. 따라서 하천과 구조물의 상호작용을 종합적으로 판단하여야 하므로 교량을 설계 시에는 하천에 대한 지식을 가지고 있는 수공학자가 참여토록 하는 방안을 마련하는 것이 요구되어진다.

⑥ 기후변화 적응을 위한 교량 설계기준은 한층 강화될 것으로 예상되는바 이에 대한 경제적 효과 등을 검토하여 실효성 있는 기준이 마련되어야 할 것이다.

4. 최신 신기술 신공법 현황 및 특징

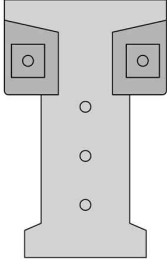
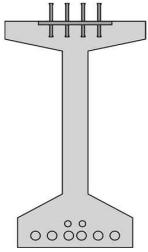
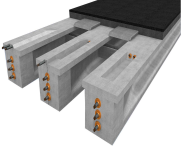
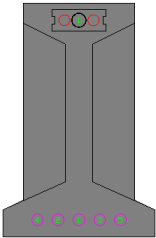
[표 3-7] 업체별 교량 현황

| 구분 | NO | 교량형식 | 최대경간 (m) | 제원 (m) | | 공사비 (만원) | 계획 | 구조 | 시공 | 유지 관리 | 실적 | 특허 /신기술 | 업체명 |
|-----------|----|-------------------------|-------------|----------|-----------|-------------|----|----|----|----------|------|------------|----------------------|
| | | | | 검토 경간 | 형고 | | | | | | | | |
| PSC 계열 | ① | IPC Girder | ≤45 | 45 | 2.55 | 157 | △ | ◎ | △ | ○ | 60 ↑ | 신기술 | 인터컨스텍 |
| | ② | PSC e-Beam | ≤45 | 45 | 2.25 | 167 | ○ | ◎ | △ | ◎ | 60 ↑ | 신기술 | 우경건설 |
| | ③ | DR Girder | ≤45 | 45 | 2.25 | 164 | ○ | ◎ | △ | ○ | 60 ↑ | 신기술 | (주)장현산업 |
| | ④ | Bicon Girder | ≤45 | 45 | 2.25 | 154 | ○ | ○ | ○ | ◎ | 23 | 신기술 | 삼현피에프 |
| | ⑤ | WPC Girder | ≤45 | 45 | 2.55 | 162 | ○ | ○ | ◎ | △ | 34 | 신기술 | EnE건설 |
| | ⑥ | SS Girder | ≤45 | 45 | 1.90 | 187 | ○ | ○ | ○ | △ | 8 | 특허 | 피에스건설 |
| | ⑦ | 변단면 PC빔 | ≤45 | 45 | 2.25~2.85 | 158 | ○ | ○ | ○ | ○ | 7 | 특허 | 에이스이엔씨 |
| | ⑧ | UDPC | ≤45 | 45 | 2.55 | 166 | △ | ◎ | △ | ○ | 60 ↑ | 특허 | 만세코리아 |
| | ⑨ | PNP Girder | ≤45 | 45 | 2.45 | 165 | △ | ◎ | △ | ○ | 11 | 신기술 | (주)비앤지건설턴트 |
| | ⑩ | Seg Beam | ≤60 | 45 | 2.15 | 190 | ○ | ◎ | ○ | ○ | - | 특허 | (주)인터컨스텍 |
| | ⑪ | uSCI PSC SLAB Girder | ≤45 | 45 | 2.15 | 157 | ○ | ○ | ◎ | ◎ | 1 | 특허 | 뉴콘텍이엔씨(주) 홍아건설(주) |

[표 3-7] 업체별 교량 현황(계속)

| 구분 | NO | 교량형식 | 최대경간 (m) | 제원 (m) | | 공사비 (만원) | 계획 | 구조 | 시공 | 유지 관리 | 실적 | 특허 /신기술 | 업체명 |
|---------------------|----|--------------------|-------------|----------|------|-------------|----|----|----|----------|------|------------|----------------------|
| | | | | 검토 경간 | 형고 | | | | | | | | |
| Preflex 강/ 합성 | ① | RPF Beam | ≤55 | 45 | 1.80 | 219 | ◎ | ◎ | △ | ○ | 60 ↑ | 특허 | 동양R,P,F (주)호성 |
| | ② | D-Preflex | ≤55 | 45 | 1.80 | 231 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | 16 | 특허 | 아이비엘이앤씨 |
| | ③ | PSI Preflex | ≤55 | 45 | 1.70 | 275 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | 42 | 특허 | 길교이앤씨 |
| | ④ | UP-DOWN Preflex | ≤55 | 45 | 1.80 | 237 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | 60 ↑ | 특허 | 중산건설(주) |
| | ⑤ | A-Preflex | ≤55 | 45 | 1.60 | 220 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | 60 ↑ | 특허 | 삼표이앤씨(주) |
| | ⑥ | MSP 합성거터 | ≤55 | 45 | 1.80 | 213 | ◎ | ◎ | △ | ○ | 60 ↑ | 신기술 | 노빌테크 |
| | ⑦ | 복부파형강판 CWI빔 | ≤55 | 45 | 2.15 | 190 | ○ | ◎ | ○ | ○ | 22 | 특허 | 동양 PSC |
| | ⑧ | CFTA Girder | ≤55 | 45 | 2.35 | 300 | ○ | ○ | △ | △ | - | 특허 | 신행건설 |
| | ⑨ | Precom 합성거터 | ≤55 | 45 | 1.80 | 204 | ◎ | ◎ | ○ | ○ | 60 ↑ | 특허 | 삼현피에프 |
| | ⑩ | CPI Beam | ≤55 | 45 | 1.63 | 225 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | 60 ↑ | 특허 | 우경건설(주) |
| 라멘 계열 | ① | TANK 합성형 라멘교 | ≤35 | 35 | 1.30 | 223 | ◎ | △ | ○ | ○ | 2 | 특허 | 리튼브릿지 |
| | ② | ID 라멘교 | ≤35 | 35 | 1.40 | 190 | ○ | ○ | ◎ | △ | 35 | 특허 | 중산건설 |
| | ③ | PSI 강합성형 라멘교 | ≤35 | 35 | 1.30 | 229 | ◎ | ○ | ○ | ○ | 42 | 특허 | 길교이앤씨 |
| | ④ | S&C 라멘교 | ≤35 | 35 | 1.20 | 225 | ◎ | △ | ○ | ○ | 36 | 특허 | S&C산업 |
| | ⑤ | 무교대 일체식 슬래브교 | ≤35 | 35 | 1.40 | 220 | △ | ○ | ○ | ○ | 2 | 특허 | 뉴콘텍이앤씨(주) 홍아건설(주) |

[표 3-8] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(PSC 계열)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|--------------------------|---|--|--|
| IPC Girder 인터컨스텍 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 단계적 긴장력 도입에 의한 PSC I형 거더의 제작기술 (신기술만료) • 단부의 측면에 설치된 정착 장치와 연속 텐션을 이용한 PSC I형거더 합성형교의 연속화공법 (신기술) | <ul style="list-style-type: none"> • 다단계 긴장 • 비부착 강선 추가 (유지관리용) |
| PSC e-Beam 우경건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> • PSC I형 거더의 상연에 강 판을 매설하고, 부모멘트 구간에 강판 및 강선을 연결한 교량의 연속화 공법 (신기술) | <ul style="list-style-type: none"> • 다단계 긴장 • 중앙부 강판매입으로 인한 중립축 상승 편심효율 증대 • 강재와 철근, PS강연선에 의한 완전 연속가능(1 Shoe) • 유지보수 정착구 별도마련 |
| DR Girder (주)장현산업 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 거더 단부의 상부에 긴장재의 이완과 재긴장이 가능한 정착 시스템을 이용한 프리스트레스드 콘크리트 거더 공법 (신기술) | <ul style="list-style-type: none"> • 다단계 긴장 • 반단면 Precast+조립보가로보+현장타설 혼용 • 내하력 저하 시 2차 PS강선으로 추가긴장(전부 비부착 강선, 긴장력 조절장치) |
| Bicon Girder 삼현피에프 |  | <ul style="list-style-type: none"> • PS강선 및 강봉의 일체긴장 시스템을 이용하여 prestress을 도입한 PSC(BIOCN)거더 공법 (신기술) | <ul style="list-style-type: none"> • 역T형 단면 상연에 강봉 삽입 • PS강선 긴장 시 압축력을 강봉이 부담 • 유지관리 비부착 강선 별도매입 • 중립축이 낮아 동단면 대비 처짐 및 진동성능 유리 |

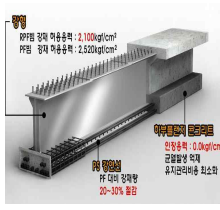
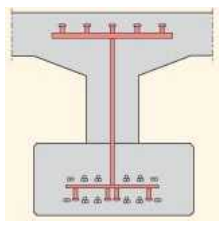
[표 3-8] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(PSC 계열)(계속)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|---------------------------|---|---|--|
| WPC Girder 이엔이건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> WPC 박스거더 교량공법 (신기술) | <ul style="list-style-type: none"> BOX형태의 폐단면 구성으로 좌굴 및 비틀림 강성이 높음 슬래브 타설시 거푸집과 동바리 공정 필요 없음 중공부 매립형 EPS블록 사용 |
| SS Girder 피에스건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> 프리스트레스트 합성 콘크리트 빔 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 거더상단의 돌출강재 합성으로 강성증대 전단철근+돌출강재가 바닥판과의 합성효과 증대 바닥판하면 철근배근 시 거더 상부 강재에 관통, 시공성 불량 |
| 변단면 PC Beam 에이이엔씨 |  | <ul style="list-style-type: none"> 보의 높이를 변화시킨 교량용 기성 철근콘크리트 메인빔 (특허) 강성이 증가된 PSC빔 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 빔의 하연을 곡선형으로 제작하여 미관 향상 강성보강용 철근사용으로 강성 및 편심효과 증대 연속 지점부의 강성이 큰 장점 |
| UDPC 만세코리아 |  | <ul style="list-style-type: none"> 신설 연속 합성형 교량에 있어 주형의 상승하강에 의한 프리스트레싱 도입 시 공법 (신기술 만료) 지점상승하강을 이용한 PSC 빔의 연속화 공법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 강판을 이용한 빔을 연결하여 상승 및 하강을 통해 부모멘트 바닥판에 압축력을 도입 연속화부 교좌장치 1개소 (1Shoe) 연속교 대칭교량에 적용가능 |
| PnP Girder 비엔지 컨설턴트 |  | <ul style="list-style-type: none"> 프리캐스트 바닥판의 선재하 하중효과를 이용하여 거더 상단 단블럭에서 2차 긴장력을 도입한 PSC 합성 거더 시공기술(신기술) | <ul style="list-style-type: none"> 다단계 긴장 2차강선 정착위치를 거더 상부에 설치하여 시공성과 안전성 향상 유지보수 정착구의 설치로 내하력 저하시 추가 긴장력 도입 |



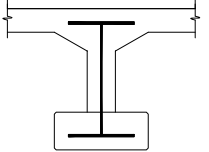
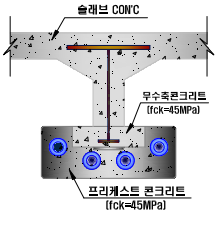

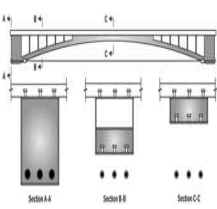
[표 3-8] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(PSC 계열)(계속)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|---------------------------------------|---|--|---|
| Seg Beam 인터컨스텍 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 분절 프리스트레스 콘크리트 거더에 세그먼트 및 그 제조방법 (특허) • 분절 프리스트레스 콘크리트 I형거더에 세그먼트 이음방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 고강도 콘크리트 사용(70MPa)으로 낮은 형고 및 장경간 교량 시공이 가능 • 공장에서 제작하여 현장에서 조립하는 분절거더 • 접합블럭에 고강도 (70MPa~90MPa) 콘크리트를 사용 |
| uSCI PSC SLAB Girder 홍아건설(주) |  | <ul style="list-style-type: none"> • 프리캐스트 PSC 단일 슬래브 거더를 일점지지구조나 강결일체구조로 연결지정한 연속다가구 프리캐스트 PSC단일 슬래브 거더교 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 슬래브와 거더를 단일화하여 슬래브 타설 공종 배제 • 슬래브와 거더 일체화에 의한 강성증가로 형고 축소 • 연속교 구현으로 인한 모멘트 재분배로 구조안전성 증가 (1 Shoe) • 1 Shoe 적용으로 교각 코핑폭 축소 |

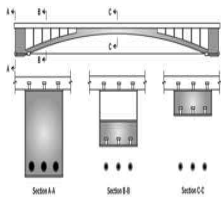


[표 3-9] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(P.F/강합성 계열)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|--------------------------|---|---|---|
| RPF Beam 동양 RPF |  | <ul style="list-style-type: none"> • 프리스트레스 프리플렉스 합성섬의 설계 및 제작기술 (신기술 만료) • 개방형 구조로 이루어진 단부 지지체를 이용한 프리스트레스 프리플렉스빔 단부 보강구조 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • Unbonded PS강연선을 추가 배치 긴장함으로써 PF빔 대비 강재량을 20~30%절감 효과 발생 • 강선도입으로 하부플랜지 콘크리트부에 인장응력(균열)에 유리 |
| D-Preflex 아이비엘 이앤씨 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 분할재긴장에 의한 리프리스트레스 프리플렉스 강합성섬의 제작방법 (특허) • 프리스트레스 강합성섬의 브라켓 보강형 단부정착판 보강구조 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 분할재긴장에 의한 프리스트레스 손실량 감소 및 PC강선 사용에 의한 강재량 감소로 경제성 우수 • 임시 수직보강재를 이용한 PF하중 재하시 안전성 향상 |

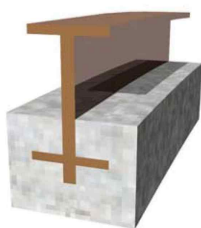
[표 3-9] 최신 신기술 시공법 현황 및 특징(P.F/강합성 계열)(계속)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|-----------------------------------|---|--|---|
| PSI Preflex 걸교아전씨 |  | <ul style="list-style-type: none"> 단부절취형 프리플렉스 합성 형교 및 그 시공방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 5점재하를 이용하여 사용하중에 의한 모멘트로 프리플렉션 하중을 도입 최적 및 경제적이 가능 |
| UP-DOWN Preflex 중산건설 (주) |  | <ul style="list-style-type: none"> 신설 연속 합성형 교량에 있어 주형의 상승하강에 의한 프리스트레싱 도입시 공법 (신기술 만료) 벌리는 모양으로 하중을 재 하하는 프리플렉스형의 제작방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 지점 상,하강 공정으로 부모멘트 바닥판에 압축응력 도입 3경간 대칭 교량에 적용시 최대 효율 (2경간 15%정도 강재량 감소, 3경간 25%정도 강재량 감소) 연속화부 교좌장치 1개소(1Shoe) |
| A-Preflex 삼표건설 (주) |  | <ul style="list-style-type: none"> 프리플렉스 거더 제작방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 강재의 복원력으로 하부 케이싱 콘크리트에 압축응력을 도입하는 일종의 프리스트레스 공법 연속화부 교좌장치 1개소 (1Shoe) |
| MSP 합성거더 노빌테크 |  | <ul style="list-style-type: none"> 다단계 긴장구조를 가지는 하부플랜지 매립형 합성거더의 제작기술 (신기술) 하부플랜지 매립 및 일체 연결구조의 프리스트콘크리트 패널 합성법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 미리 압축응력이 도입된 프리캐스트 콘크리트 패널에 I형 강거더를 합성 시간경과에 따른 압축응력손실을 단계별 긴장으로 보상함으로 균열제어 |
| 복부파형 강판 CWI빔 동양PSC |  | <ul style="list-style-type: none"> 복부 파형강판과 콘크리트를 스티드로 결합시킨 합성 구조 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 주형 복부를 입체화된 파형강판으로 대체함으로써 자중 경감효과와 경간장과 경제성을 증진 파형강판의 아코디언효과에 의한 Prestress 효율 향상 가능 연속화부 교좌장치 1개소(1Shoe) |
| CFTA Girder 신행건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> 아치형상의 교량용 복합거더를 이용한 교량 시공방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 콘크리트로 충전된 강재거더(아치리브)의 단부에서 긴장력을 도입하여 자립식 아치를 이루도록 한 공법으로, 충전 강판 구조, 프리스트레스 구조 및 아치 구조의 특징을 복합화한 공법 |

[표 3-9] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(P.F/강합성 계열)(계속)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|-------------------------|---|--|--|
| CFTA Girder 신형건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 아치형상의 교량용 복합 거더를 이용한 교량 시 공방법(특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트로 충전된 강재거더(아치리브)의 단부에서 긴장력을 도입하여 자립식 아치를 이루도록 한 공법으로, 충전 강관 구조, 프리스트레스 구조 및 아치 구조의 특징을 복합화한 공법 |
| Precom 합성거더 삼현피에프 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 프리스트레스 강합성 보의 제작 방법 및 이에 의하여 제작된 강합성보 (특허) • 강재가 콘크리트 자중을 부담하는 강합성 거더의 제작장치 및 그 제작 방법 (특허) • 프리스트레스 강합성 거더의 pc강연선의 배치 구조(특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 강재에 거푸집을 매는 공정으로 콘크리트가 자중에 대해 무응력으로 제작됨 |
| CPI Beam 우경건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 컴퓨터 제어 유압실린더 다지점 동시 작동시스템을 이용한 프리스트레스 거더의 제작방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • I형 압연강재의 상하부 플랜지에 고강도Plate를 접합하여 프리스트레스를 도입한 공법 |

[표 3-10] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(Rahmen 계열)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|-------------------------|---|--|---|
| TANK 합성형라멘교 리튼브릿지 |  | <ul style="list-style-type: none"> • 단면강성이 보강된 강재빔을 이용한 합성빔의 제작방법 및 단면강성이 보강된 강재빔을 이용한 합성빔을 이용한 라멘교 시공방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> • 강형상부플랜지에 수직강판을 용접하여 강형에 자중 PF하중도입과 강성이 증가하여 처짐이 감소하여 장지간을 할 수 있는 공법 |

[표 3-10] 최신 신기술 신공법 현황 및 특징(Rahmen 계열)(계속)

| 교량형식 | 형 상 | 신기술/특허 | 공법특징 |
|-------------------------------|---|---|--|
| ID 라멘교 중산건설 |  | <ul style="list-style-type: none"> 바닥판 타설시 우각부가 힌 지구구조를 갖는 프리스트레스 트프리캐스트 유닛 거더와 바닥판 합성부 철근으로 강결된 우각부를 형성하는 라멘교량공법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 중공BOX 형식의 콘크리트 단면에 프리스트레스를 도입하여 PSC거더를 제작하고, 미리 시공된 하부구조의 벽체와 거더를 바닥판 타설시 까지 단순지지 상태를 유지하도록 연결하는 라멘형식 |
| PSI 강합성형 라멘교 길교이엔씨 |  | <ul style="list-style-type: none"> 프리스트레스된 철골철근 콘크리트 합성형 라멘교 및 그 시공 방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 상부 프리플렉스 합성형을 먼저 시공된 벽체 또는 기둥부 철근콘크리트 위의 받침강형에 회전에 자유로운 단순지지 형태로 거치 |
| S&C 라멘교 S&C산업 |  | <ul style="list-style-type: none"> 프리스트레스트 합성보를 라멘 교량의 슬래브의 중앙부에 설치하고 기둥의 상부 설치된 강재와 연결하여 설치된 합성형 라멘 교량 및 이의 시공방법 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 정모멘트부의 프리플렉스 합성형을 부모멘트부의 철골·철근 콘크리트 구조와 일체화한 라멘교로서 자중단계부터 라멘구조형식으로 저항하도록 구성되어 시공 중 및 완성 시 구조계를 일관성 있게 라멘구조로 채택된 공법 |
| 무교대 일체식 슬래브교 홍아건설(주) |  | <ul style="list-style-type: none"> 무받침, 무신축이음 및 무교대 교량 구조체 (특허) | <ul style="list-style-type: none"> 접속슬래브와 본체구조를 일체 다가구화하고 상부구조와 하부구조를 강결하여 신축이음장치와 받침을 배제하고 교대구조를 단주 PILE로 지한 공법 |

제4 장
도시기반시설
(도로)

4

제4장 (제2세부) 도시기반시설 (도로 및 도로시설물)

1. 연구의 필요성

최근 우리나라 기후변화는 태풍규모의 대형화, 기온상승, 강수량 증가가 나타나고 있으며, 장래예측은 최근 기후변화보다 더 급격하게 기후변화가 예상된다. 태풍빈도는 과거 80년 동안(1904~1990) 3.5회에서 최근 20년간(1991~2010) 2.9회로 감소했으나, 태풍의 위력은 더 강력하고 피해규모도 커지고 있다(재산피해 상위 4개는 최근 발생된 태풍). 21C말 기온변화는 RCP 4.5 시나리오 시 약 3.0℃, RCP 8.5 시나리오 시 약 5.6℃ 온도가 상승예측되고 있다(RCP: IPCC 5차 평가보고서를 위해 IPCC가 권고하는 온실가스 대표 농도경로). 강수량은 RCP 4.5에서 15.8%, RCP 8.5에서 18.7% 증가 예측되며, 강수패턴은 큰 강수의 발생확률이 증가 예측되고 있다. 이러한 기후변화에 따라서 교통사고 증가, 도로시설물은 배수용량초과에 따른 도시홍수와 지속적인 수분 침투에 의한 아스팔트콘크리트 포장 파손, 하천 및 산간지역 도로붕괴 등의 심각한 피해를 초래하고 있다.

사고발생비율은 맑은 날보다 약 11% 높게 발생하고 도로의 곡선구간이 직선구간보다 약 2.6배 높게 발생한다.

따라서 LH가 건설한 도로시설물의 설계기준 검토하고 기후변화에 따른 설계기준 개정 검토가 필요함. 특히 집중호우에 따른 도로 배수시스템 및 수분침투에 의한 아스팔트콘크리트 포장 파손에 대한 설계기준 검토는 필수적이다.

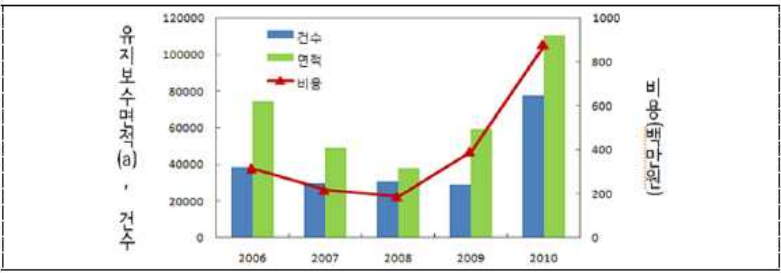
또한, 기후변화에 대응하기 위해서 한국도로공사, 서울특별시 등 관련 지자체에서 신속한 노면배수와 강우 침투에 의한 우수를 보유하여 도시 홍수가 최소화에 유리한 배수성 및 투수성 포장에 대한 관심 증대 및 적용 확대를 계획하고 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

2. 기후변화에 따른 도로피해 사례

국민권익위, 생활불편민원 등 국민의 소리 조사결과에 따르면, 집중호우와 관련된 민원은 지난 1년 6개월간(11.1월~12.6월) 1,998건이 접수되었으며, 민원 유형별로 분류한 결과 도로파손이 230건(11.5%)으로 가장 많았고, 다음으로 배수로 피해 188건(9.4%), 공사장피해 172건(8.6%), 하천범람피해 146건(7.3%) 등의 순으로 나타났다.

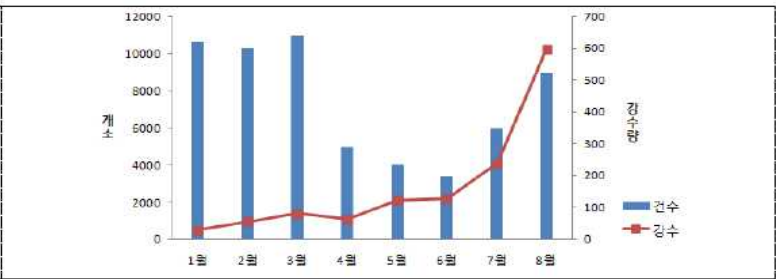
최근 여름철 집중호우 및 겨울철 폭설 등 이상기후로 인하여 서울시 도로파손이 가속화하고 있음을 그림 4-1에 나타내었다.

2010년 1월 4일 25.4cm(1937년 이후 최대), 9월 21일 폭우(1908년 이후 역대 2위), 폭염 지속 등 기상이변으로 도로파손 건수, 면적, 비용이 상당히 증가하였다. 그림 4-2는 강수량이 증가하는 7월과 8월에 도로파손 건수가 증가함을 보여준다.



자료 : 서울시, 2011, 내부자료

[그림 4-1] 연도별 서울시 도로파손 보수면적/건수 및 비용



자료 : 서울시 도시안전본부, 2010, 내부자료 ; 기상청 홈페이지 2010

[그림 4-2] 월별 강수량 및 도로파손 보수 건수

기후변화에 따른 LH의 피해 사례는 과거의 기상패턴으로 수립된 도시 배수처리 시스템에 의한 침수 피해와 도로의 파손으로 나타났다.

침수 피해의 예방하기 위해서는 도시배수시설의 시설기준(표면배수, 우수관로, 배수펌프시설, 지하침투시설 및 저류시설 등) 강화와 시설물별 강우 설계 강도 및 도시배수시설의 최적화(종류, 규모, 위치 등)의 설계 기준 개선이 필요하다. 도로의 파손형태는 노상 및 노반의 유실로 인한 균열 및 단차, 포트홀이 대부분의 차지한다. 이 중 노상의 유실로 인한 균열 및 단차는 적절한 배수시스템으로 방지 가능하다.

3. 국내외 도시홍수 저감을 위한 배수시스템

오래전부터 독일, 미국, 일본 등지에서는 도시 홍수의 예방, 수자원의 절약과 환경 개선 등을 위하여 빗물을 분산식(자연 순응형)으로 관리하여 오고 있다. 독일 크론스베르크 주거 단지와 키르히슈타익펠트 단지는 빗물을 최대한 단지 내에 침투 및 저류시키기 위해 ‘자연에 가까운 배수체계’를 구현하였으며, 단지 내 우배수 시설 및 투수구덩이, 트렌치 등의 빗물관리시설과 연계하여 단지 곳곳에 수로를 적용하였다.



[그림 4-3] 크론스베르크 단지 내 도로, 주차장 주변 수로

미국 시애틀의 재개발 지구인 High Point 주거단지의 경우 단지 전반에 걸쳐 일반적인 배수시설과 빗물관리시설을 적절히 적용하고 있으며, 빗물을 집 주 위에서 저류, 침투시키고, 보도, 도로변의 수로를 통해 빗물의 순환을 도모하고 있다.



[그림 4-4] High Point 단지 내 도로 주변 수로

일본 도심에서의 빗물관리시설 설치 목적은 용수공급 이외에도 홍수제어 효율의 증대, 수자원 보전, 하천오염의 감소, 지하수의 함양, 배수관망시스템의 건설경비 절감 등의 효과를 위한 것이다. 에무시하이츠하쿠 집합주택은 치바현에 위치하고 있으며, 침투통, 투수성 포장, 지하저류보가 설치되어 있다. 침투통은 총 31개, 투수성포장의 면적은 414㎡이고 지하저류보의 면적은 180㎡이다. 츠츠지가오카 하이츠 주택단지를 비롯한 3개단지는 1980년대 조성된 단지들로 침투통 및 침투유공관, 침투측구, 투수성 포장 등 환경친화적 우수처리시설들을 설치하고 있다.

국내에서도 서울, 안양, 파주, 의왕, 의정부, 안산, 군포 및 구리시 등의 지자체에서 빗물이용시설에 대한 조례나 지침을 제정하는 등의 움직임이 나타나고 있고, 건교부 등에서도 관련 법률을 제정하려고 하고 있다.

4. LH 도로건설현황 및 설계기준

4.1 LH 도로건설현황

국가 및 공사가 건설한 도로의 총연장은 90,095km이며, 그 중 LH는 5,046km(2007년 12월말 기준)를 건설하여 총연장 대비 약 5.6%, 한국도로공사 건설물량 대비 1.5배를 건설하였다(표 4-1). LH에서 건설하는 도로는 단지지와 단지 또는 택지와 택지를 연결 하는 60km/hr 이하의 속도를 중심으로 개발하고 있으며, 건설면적 및 차선 수가 한국도로공사보다 넓고 많다. 공사가 취득하여 개발 및 공급하는 토지는 주거단지가 34%, 산업단지 22%, 공공시설용지(기타포함) 54%를 차지하고 있으며, 이중 도로건설은 전체 공급토지

의 19%를 차지하고 있고, 공공시설용지중 도로건설이 차지하는 분담비율은 약 43%를 차지할 정도로 비중이 크다(표 4-2). 최근의 도로건설은 저소음포장, 투수성 및 배수성포장에 따른 비용증대가 발생할 것으로 판단된다.

[표 4-1] 국가 및 LH공사 도로건설 현황

| 구 분 | 도로 건설 연장(Km) | | | | 총 대비 (B/A, %) | 도공대비 (B/C, 배) |
|--|--------------|---------|---------|--------|------------------|------------------|
| | 총연장(A) | LH공사(B) | 도로공사(C) | 기타도로 | | |
| 연 장 | 90,095 | 5,046 | 3,447 | 81,652 | 6% | 1.5배 |
| 1) 한국도로공사 대비 1.5배의 도로 건설 2) 자료는 준공사업지구를 대상으로 1982년~2007년까지 400개 지구 대상 | | | | | | |

[표 4-2] 도로건설 집계표(1982년~2007년)

| 구 분 | 준공 사업지구 | 개발 총면적(km ²) | 도로면적(km ²) | 비율 |
|------|------------|-----------------------------|------------------------|-----|
| 개발현황 | 400 | 373 | 73.1 | 20% |

4.2 LH 도로설계 기준

LH 포장설계 기준은 동결깊이를 고려한 설계를 원칙으로 교통량 예측이 가능한 도로는 미국의 AASHTO 설계법, 교통량 예측이 어려운 곳(일반적으로 단지 내 포장)은 일본의 TA 설계법으로 포장구조해석을 실시하여 설계하고 있으며, 추가적으로 필요한 사항은 국토해양부 도로포장 설계시공지침을 준용하고 있다. 현재 LH는 공용성을 근거한 국토해양부의 한국형 포장설계법을 적용을 위한 검토 단계에 있다.

투수아스팔트콘크리트포장 및 투수콘크리트포장은 보도, 자전거도로, 광장 등과 같이 교통하중을 크게 고려하지 않는 곳에 적용된다.

단지 내 도로 및 주차장 아스팔트 포장단면은 2004년 8월 이후 시공성 및 현장조건에 맞추어 표 4-3과 같이 아스팔트 포장단면을 정하여 시행하고 있다.

[표 4-3] LH 단지 내 도로 및 주차장 아스팔트 포장단면

(단위: cm)

| 표층 | 기 층 | | 보조기층 | 동 상 방지층 | 계 |
|----|--------|----------|------|------------|-------|
| | 역청안정기층 | 입도조정쇄석기층 | | | |
| 5 | 5 | 20 | 10 | 10~45 | 50~85 |

이는 미국의 AASHTO 설계법의 최소두께를 준용한 것으로 판단되며, 표 4-4
는 AASHTO 설계법의 층별 최소두께를 보여준다.

[표 4-4] AASHTO 설계법의 층별 최소두께

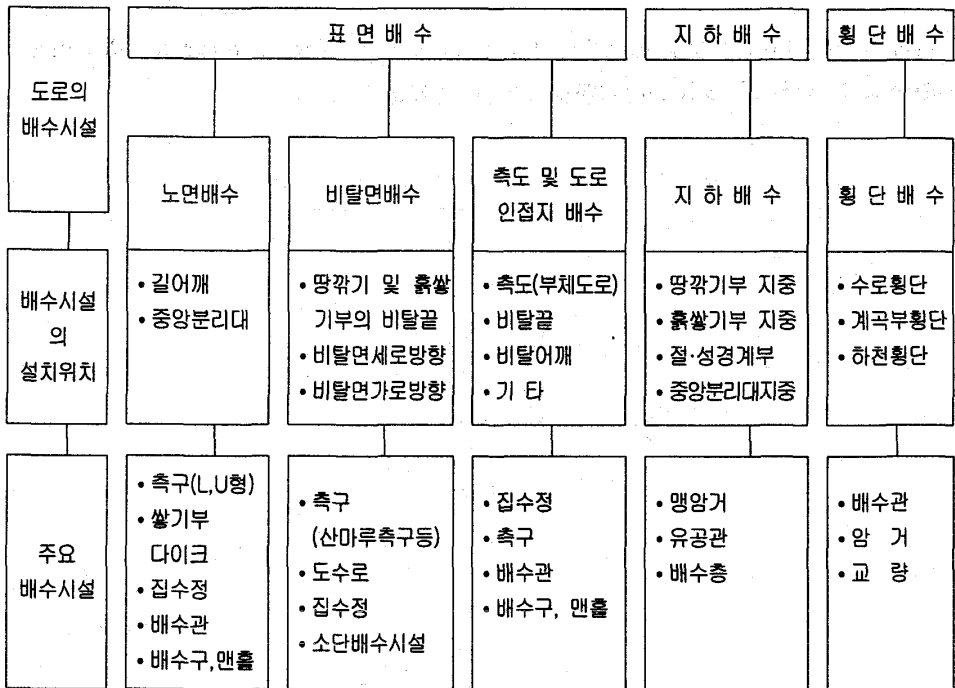
| 층 종 류 | 최소두께 (cm) |
|------------------------|-----------|
| 아스팔트 콘크리트 표층 | 5 |
| 아스팔트 안정 처리 기층(보조 기층 위) | 5 |
| 린 콘크리트 보조 기층 | 15 |
| 아스팔트 콘크리트 기층 | 10 |
| 입상 재료 기층 | 15 |
| 쇄석 보조 기층 | |
| 모래/자갈 선택층 위에 부설되는 경우 | 15 |
| 모래/선택층 위에 부설되는 경우 | 20 |
| 비선택 모래/자갈 보조 기층 | 20 |
| 슬래그 보조 기층 | 20 |
| 시멘트 또는 토사약액처리 보조 기층 | 20 |

LH는 국토해양부 도로배수 시설설계 및 유지관리 지침을 준용하여 사용하고
있으며 국토해양부에서 2012년 6월 도시부 도로배수시설 설계 잠정지침을 발
간하여 1년 후에 적용 예정이다.

도로배수는 표면배수, 지하배수, 횡단배수로 구분되며, 그림 4-5에서 구분된
배수형태에 따른 배수시설의 설치위치와 주요 배수시설의 보여주며, 표 4-5
는 도로배수시설의 설계빈도를 나타내고 있다.

[표 4-5] 도로배수 시설의 설계빈도

| 배수시설 | 발생빈도(년) |
|-----------------------|-------------------|
| 암거 및 배수관(도심지, 집단가옥 등) | 25(50) |
| 노면 및 쌓기부깎기부 /비탈면 배수시설 | 10 |
| 집수정 등 배수 구조물간 접속부 | 접속하는 시설물중 빈도가 큰 값 |



[그림 4-5] 도로배수시설의 구분

강우강도는 현행 기준은 강우강도-지속시간-재현기간(I-D-F)곡선 또는 강우강도공식에 의해 결정하도록 되어 있지만, 국토해양부의 도시부 도로배수시설 설계 잠정지침(2012년 6월)은 지속기간은 5분을 원칙으로 하며, 지속기간을 5분 이하로 고려하는 것이 좋고 필요한 경우는 분 단위 강우자료를 직접 해석하여 사용할 수 있다고 명시되어 있다.

5. 문헌조사

5.1 도로 배수시스템 및 배수취약 구간 분석

한국도로공사는 기후변화에 대응하기 위하여 배수구조물 통수능력 향상을 위해 강우강도 발생빈도 상향조정하였다.

[표 4-6] 배수구조물 통수능력 향상을 위한 강우강도 발생빈도 상향

| 구 분 | ’00년까지 | 01~02년 | 03~05(평지) | ’06년 이후(산지) |
|--------------------------------|--------|--------|-----------|-------------|
| 암거 및 배수관 | 25년 | 25년 | 25년 | 100년 |
| 측도 및 인접지 배수시설 (V형, U형, 산마루) | 5년 | 10년 | 10년 | 20년 |
| 노면 및 비탈면 배수시설 (다이크, 도수로) | 3~5년 | 5년 | 10년 | 20년 |

집중호우를 대비하여 도수로 유입부 확대, 집수시설 경사조정 및 규격 확대 등 도로배수시설물을 개선하였고 이러한 강우강도 발생빈도 상향 및 도로배수시설물 기준개선 노력에도 불구하고 현재 공용중인 도로 피해 발생이 급증하고 있으며, 이는 현재 설계기준이 1990년대 중반까지의 관측자료를 활용함에 따라 최근 기후변화에 대응이 현 설계기준으로 적절한 대처가 곤란하다고 판단하고 있다.

따라서 향후 한국도로공사의 설계개선 방향은 교통사고에 직접 영향을 주는 노면배수 발생빈도를 상향, 연속배수시설 도입, 표준횡단경사 상향 조정 등이며, 또한 노면수의 신속한 처리가 위하여 배수성 포장을 확대 적용하였다.

-강우강도 발생빈도 10년(평지)와 20년(산지)→20년(평지)와 25년(산지)
도로배수의 취약구간 발생 원인을 표 4-7에서 보는 바와 같이 기하구조, 배수시설, 포장, 구조물로 나누어 조사를 실시하였다.

[표 4-7] 배수 취약구간 주요조사 내용

| 구 분 | | 주요조사 내용 |
|----------|--------|-------------------------------|
| 기하 구조 | 평면선형 | 평면곡선반경, 평면곡선길이 |
| | 횡단/편경사 | 편경사 적정여부 |
| | 종단선형 | 종단선형 적정여부, 종단경사 적정여부, 종단곡선 길이 |
| | 잔출입시설 | 잔출입시설 적정여부, 가감속차로, Ramp 편경사 |
| 배수 시설 | 설치위치 | 배수구조물의 설치위치 적정성 검토 |
| | 설치간격 | 노면배수시설의 설치간격 검토 |
| | 유지관리 | 현장을 통한 유지관리 여부 검토 |
| 포장 | 노면포장 | 포장상태 여부 조사(포장 재료별) |
| 구조물 | 교량터널 | 교량 및 터널 접속구간 배수불량 검토 |
| | 인터체인지 | I.C 접속구간의 급변 경사(종, 횡단) 검토 |

배수 취약구간 조사결과는 시공 및 기타로 인한 배수 취약구간 46%, 기하구조가 원인이 된 취약구간은 32%, 수리·수문이 원인이 된 취약구간은 22%로 분석되었으며, 도로배수 취약구간 발생 세부원인은 표 4-8과 같다.

[표 4-8] 도로배수 취약구간 발생 세부원인

| 구분 | 세부 원인 | 구분 | 세부원인 |
|----------|------------------|---------------|------------------|
| 기하 구조 | 편경사 변화구간(-2~2%) | 시공 및 기타 | 길어깨 포장 불량 |
| | 길어깨 구매 불량 | | 토사측구 불량 |
| | 종단 오목 저점부 배수불량 | | 연약지반 처짐 발생 |
| | 종단 선형 불량(0.3%이하) | | 교면 배수구 유지관리 불량 |
| 수리 수문 | 중분대 집수정 설치간격 부족 | | 포장 단차 발생 |
| | 성토부 도수로 간격 과다 | | 교량 접속부 뒤통춤 처짐 발생 |
| | 절토부 집수정 설치간격 부족 | | 타이크 높이 부족 |

조사결과에 따르면 시공 및 기타로 분류된 세부원인 중에서 토사측구 불량률이 52%를 차지하여 주된 원인으로 분석되었으며, 도로 기하구조로 분류된 세부원인은 편경사 변화구간의 도로배수 불량률이 가장 큰 비중인 53%를 차지하였으며, 수라수문의 세부원인은 중분대 집수정의 설치간격 부족이 49%로 가장 큰 비중을 차지하였다.

도로배수 취약구간의 수리·수문 원인 분석을 위하여 전국 도로 중에서 강우시 배수취약구간 분석 대상을 표 4-9와 같이 쌓기부 도수로, 깔기부 집수정, 중앙분리대 집수정에서 설치간격 부족 또는 통수능력 초과 등의 현상이 발생하는 21개 구간 선정하였다.

[표 4-9] 수리·수문 분석 대상 배수취약구간

| 구 분 | 쌓기부 도수로 | 깔기부 집수정 | 중앙분리대 집수정 | 합 계 |
|------|---------|---------|-----------|-----|
| 개소 수 | 3 | 3 | 21 | 21 |

배수시설의 설치간격을 적정여부를 분석하기 위하여 분단위 강우강도 산정방법 적용과 시단위 강우강도 산정방법의 적용 결과에 따르면 분단위 강우강도는 현재 설계에 사용 중인 시단위 강우강도보다 평균적으로 95% 증가하였으나, 예외적으로 중분대 집수정 3개 구간은 17% 감소하였다. 노면 배수시설의 설치간격은 쌓기부 도수로 구간에서 평균 49% 설치간격 감소, 중분대 집수정에서의 12개 구간에서 평균 50% 감소하였으나 깔기부 집수정 구간에서의 설치간격은 평균 274% 증가하였다. 이는 시단위 강우강도 산정방법은 배수구역의 지역특성을 충분히 고려할 수 없다는 것을 의미한다.

5.1.1 도로 배수시스템 개선 시사점

현행 기준인 시단위 강우강도 산정방법은 배수지역의 지역특성을 충분히 고려하지 못하므로 적정한 시간단위의 강우강도 산정방법을 개선하여 배수시설의 단면규격 및 설치간격 조정 등의 개선 필요하다. 도로배수 취약구간 발생 원인에서 유지관리 불량으로 인한 배수시설의 단면 감소 및 파손에 의한 통수능력 초과함으로 유지관리 방안을 강화하도록 개선이 필요하다.

5.2. 배수성 및 투수성 포장

5.2.1 배수성 포장

배수성포장은 공항 활주로의 수막현상을 방지하기 위하여 1950년대 중반 영국의 공항포장에 공극 20%정도의 아스팔트포장으로 처음 시공되었으나, 포장의 내구성 문제로 인하여 본격적인 적용이 미루어지다가 1980년대에 접어들면서 아스팔트 바인더의 특성을 개선한 고점도 개질 아스팔트의 개발로 내구성 문제가 해결되면서 그 시공 면적이 전 세계적으로 확대되고 있다.

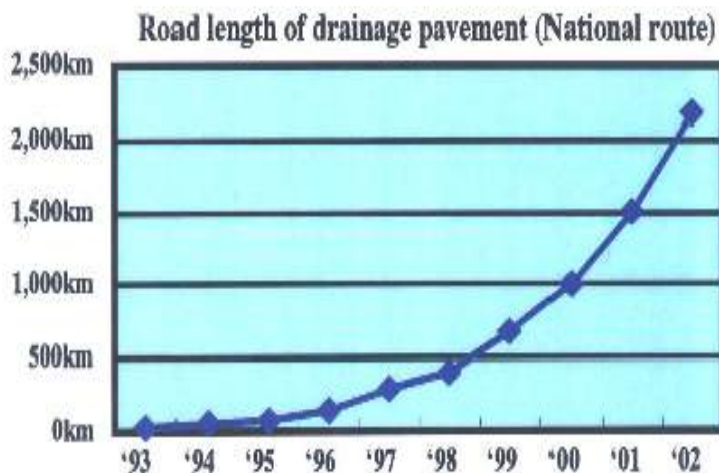
배수성포장의 장점은 다른 포장형식에 비해 도로교통소음의 감소, 우천 시 미끄럼 저항을 향상, 수막현상 방지에 의한 교통사고율 감소, 도시의 열섬효과와 저감 등을 들 수 있다.

배수성포장의 유형은 아스팔트포장이 일반적이며, 국내에서 시공실적이 가장 많은 포장이며, 국내에 최초로 시공된 것은 1997년 경부고속도로 양산 구간에 시공된 약 200m의 시험포장이며 이때 적용된 시방기준은 일본의 규격에 따른 것이었다. 그 후 1998년 건설신기술로 배수성포장이 지정됨에 따라 1999년 국도 19호선에 처음 시공되었고, 점차 국도이외에 도로로 확대되어 가고 있다.

또한, 서울시는 2006년부터 2010년까지 300km 구간 포장에 오백억 원을 투입하고 2010년 이후에는 서울시내 20m 이상 모든 도로에 이 공법을 적용할 계획이며, 이 포장의 문제점은 고가의 아스팔트 바인더, 일부 구간에 골재가 탈리되는 라벨링 현상 및 측면 배수시설 미비로 인한 포장체에 빗물에 의한 동결융해로 인한 내구성 저하, 유지관리대책 미비로 인한 공극 막힘이다.

미국의 배수성포장은 우천 시 미끄럼 저항성 확보에 중점을 두며 아스팔트 바인더는 AC-20, AC-30의 사용을 권장하고 있으며 개질 아스팔트 바인더를 적용하여 현장 평가를 수행하고 있으며, 배합설계 시 아스팔트 함량은 6~7.5%에서 결정되며 공극률은 15%를 목표로 하고 있다.

일본은 그림 4-6에서 보는 바와 같이 1987년 배수성포장을 시작하여 1992년 약 18만m²의 시공 실적을 기록하고 있으며 매년 급격히 증가하고 있으며, 공극률 15~20%, 투수계수는 10⁻¹cm/sec 이상으로 설계하도록 규정하고 있다.



[그림 4-6] 일본의 배수성포장 실적

유럽의 배수성포장은 1970년대 중반에서 1980년대에 도입되어 매년 증가하고 있으며, 배수성포장의 공극률은 20%를 목표로 개질 아스팔트를 적용한 혼합물을 사용하고 있다. 유럽의 배수성포장 현황은 아래의 표 4-10과 같다.

[표 4-10] 유럽의 배수성 포장 현황

| 국가명 조사항목 | 독일 | 오스트리아 | 프랑스 | 이탈리아 | 벨기에 | 네덜란드 |
|-------------|----------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------------------|
| 채용기준 | 1986년 | 1984년 | 1980년 | | 1979년 | 1972년 |
| 목 적 | 소음대책 물뿔방지 | 소음대책 물뿔방지 | 소음대책 (시가지) 미끄러짐 배수(고속) | 소음대책 물뿔방지 | 소음대책 배수성 | 안전성 혼잡완화 소음대책 |
| 시공실적 | 100만㎡ | 300만㎡ | 400만㎡ | 300만㎡ | 300만㎡ | 70만㎡ |
| 바인더 | SBR, SBS, EVA, 셀룰로오스 섬유 | | SBS, CRM, 셀룰로오스, 합성섬유 | | | SBS가 주로 사용, 섬유 첨가 |

출처: 친환경 4S포장 시스템 연구, 중앙대학교

5.2.2 투수성 포장

투수성포장은 표면배수를 억제하여 식생과 흙속의 생태환경을 개선하고 지하수를 보전하는 친환경포장이며, 노면의 기온을 저하시켜 열섬효과를 저감한다. 이 포장 공법의 유형은 투수아스팔트포장, 투수콘크리트포장, 투수블록포장 등이 있으며, 동결기 투수포장재 내부의 수분동결로 인한 동결융해의 우려가 있으며, 기존의 구조체에 비해 다소 강도가 떨어질 수 있어 시공되는 곳은 주로 보도, 경차도, 주차장, 자전거도로, 산책로 등에 시공되고 있다.

보도와 자전거도로의 투수콘크리트 강도는 180kg/cm^2 이상, 주차장 및 광장과 같이 차량이 통행하는 곳의 강도는 210kg/cm^2 이상이며, 두께는 용도와 차량통행 유무에 따라 7~20cm이다.

투수아스팔트포장은 배수성포장과 거의 유사한 개질아스팔트 바인더를 사용하며, 기대수명은 8년 정도이며, 일반적인 아스팔트 콘크리트포장보다 기대수명이 짧으며, 이것은 일부 구간에 골재가 탈리되는 라벨링 현상에 의한 내구성 저하와 동결융해에 의한 내구성 저하 때문이라고 예측된다.

따라서 투수 아스팔트포장을 시공할 현장조건이 우수침투로 인해 성토구조의 안정성에 문제가 발생할 우려가 있는 현장, 적설 한랭지, 지하수위가 높은 경우, 기존 포장이나 인접 구조물과의 접합부가 있는 지역은 투수 아스팔트포장의 구조, 사용재료, 시공방법 등에 대하여 충분한 검토가 필요하다.

일본에서는 투수성포장을 적용하는데 노상이나 노반의 지지력 저하를 고려하여 계획교통량이 100대/일·방향 이하의 도로에서 검토되었으며, 현재 시험 중인 투수성 포장의 단면을 그림 4-7에 나타내었다.

| | 0341 공구 | 0342 공구 | 0343 공구 | 0344 공구 |
|------|-------------|---------------|---------------|------------------|
| | A공구 | C공구 | D공구 | B공구 |
| 표층 | 투수성 AS 4cm | 투수성 AS 4cm | 투수성 AS 4cm | 투수성 AS 4cm |
| 기층 | 투수성 AS 5cm | 투수성 AS 5cm | 투수성 AS 5cm | 투수성 AS 5cm |
| 상층노반 | 투수안정처리 10cm | 투수안정처리 10cm | 투수안정처리 10cm | 투수안정처리 10cm |
| 하층노반 | C-40 30cm | C-40 30cm 투수관 | C-40 30cm 투수관 | C-40 30cm 투수관 |
| 노상 | CBR=6 21cm | CBR=6 21cm | CBR=6 21cm | 자유층 10cm 11cm |
| | 원지반 CBR=8cm | 원지반 CBR=8cm | 원지반 CBR=8cm | 원지반 CBR=8cm |

[그림 4-7] 토목연구소 내 투수성 시험포장 단면

제1공구 구간으로 15m×5m이고 2003년 12월에 시공되었으며, 투수성 AS는 고점도 AS를 사용하였고 투수 안정처리층은 개질 II형 AS를 사용하였으며, 공극률은 모두 20%로 설계하였다.

투수콘크리트 포장은 우수를 공극이 많은 다공질 콘크리트 표층을 통해 노상으로 침투시키는 포장이며, 노상, 필터층(모래층), 투수성기층, 투수성 표층으로 구성되며, 투수 콘크리트 재료는 10^{-2} cm/sec 정도의 높은 투수계수를 유지하기 위하여 잔골재를 거의 사용하지 않은 단입도 형태의 혼합물이 사용된다. 국내에서는 투수콘크리트포장에 대한 연구는 거의 전무한 실정이며, 투수콘크리트포장의 일종인 칼라투스콘을 교통하중이 적은 자전거 전용도로, 주차장, 광장, 보행자도로, 산책로 등에 적용하고 있는 중이다.

미국에서는 미연방도로국의 방침에 의해 고속도로 및 일반국도에 적용을 하기 위한 연구가 진행되고 있고, 유럽은 1970년대 후반부터 개발을 시작하여 현재는 주차장 등에 적용하고 있으며, 일반도로 등에 시험포장을 실시중이다. 투수콘크리트 블록포장은 다양한 색, 모양과 투수기능을 가진 인터록킹 블록이 개발되고 있으며, 이 포장은 투수기능 뿐만 아니라 다양한 종류의 블록을 인접구조물과의 색상 조화를 통하여 심미적인 아름다움을 창조할 수 있다.

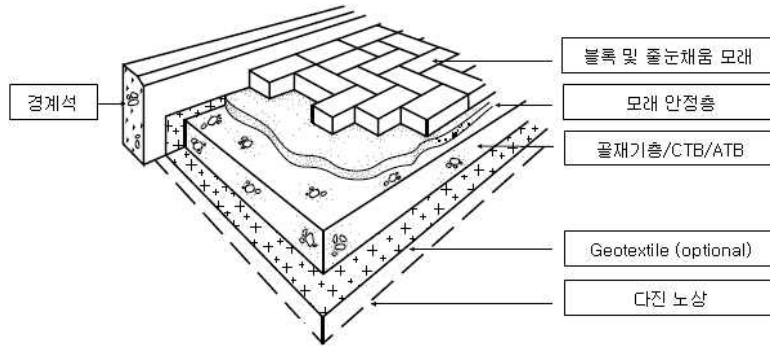
또한, 부분 파손 시 교체가 쉽고 과속방지턱을 설치할 필요 없이 차량속도를 제한할 수 있어 단지 내 거주자의 안전을 도모할 수 있다.

투수콘크리트 블록포장의 구성 체계는 그림 4-8에서 보는 바와 같이 투수콘크리트 블록, 줄눈채움재, 경계석, 기층, 다진 노상으로 구성되어지며, 투수성블록의 품질은 휨강도 30kgf/cm^2 이상, 투수계수 10^{-2} cm/sec 이상이 되도록 제조한다.

모래층의 두께는 3cm이며, 10cm의 부순 돌 기층위에 둔다. 투수콘크리트 블록의 두께는 보도, 자전거도로, 광장 등에 사용 시 6cm 건물진입로 등 차량의 진출입이 발생하는 곳은 8cm를 사용한다.

국내사례로는 여의도 공원의 산책로를 1998년 10월에 투수콘크리트포장으로 시공하였지만 3년이 지난 시점에 투수기능을 거의 상실하였으며, 2001년 5월에 마포 상암1지구 택지개발 및 고양시 화정도 롯데마트에 투수아스팔트포장으로 시공하였지만 1년이 지난 시점에 공극이 막혀 투수기능을 거의 상실하였다.

국외사례로는 스웨덴 스톡홀름 인근 주택가 및 네덜란드 암스테르담 인근 주택가 등에서 녹지조성에 대한 목적으로 투수블록포장으로 시공하였으며, 일본 신주쿠역 주변 및 공영주차장에는 열섬효과 저감을 위해 시공하였으며, 또한 일본 Triton 광장은 도시경관 및 식재용으로 투수블록포장을 시공하였다.



[그림 4-8] 인터록킹 콘크리트 블록포장 체계의 구성요소

5.2.3 배수성 및 투수성 포장의 시사점

기존 배수성 및 투수성 포장의 연구는 열섬 저감효과, 소음저감효과, 수막현상 방지 및 시인성 개선으로 교통사고 감소 등에 연구 중점을 두고 있다.

이러한 포장은 일반 아스팔트포장보다 50~80% 정도 더 비용이 소요되지만, 삶의 질 향상 및 쾌적한 환경요구 증대에 따라 지자체에서 LH로 요구가 증대되어 시공실적이 증대되고 있다.

또한, 배수성 포장 및 투수성 포장은 노면배수를 신속히 진행시키고 통수능력을 보유하고 있어 집중호우에 따른 홍수피해를 경감할 수 있어 관심이 증대되고 있는 상황이다.

그러나 강우강도에 따른 배수성 및 투수성포장의 통수능력과 내구성 검증에 관한 연구는 미흡한 실정이어서 본 연구에서 이러한 사항을 규명하고 한다.

문헌조사와 LH의 배수성 및 투수성 포장의 설계기준을 근거로 LH에 적용 가능한 배수성포장 및 투수성포장을 재료별로 분류하면 표 4-11과 같다.

문헌조사와 LH 투수성 포장의 설계기준에 따라 투수성 포장의 시공 시에 고려할 사항은 우리나라의 지역조건, 차량의 진출입이 빈번한 곳, 대규모 성토

지역, 지하수 및 유수가 침입할 가능성이 있는 지역, 동결이 우려되는 내륙지역 등에서는 충분한 대책이 필요하다.

우리나라 지역조건은 유럽 및 일본의 경우와 달리 대규모 주택단지 및 상업단지에는 지하주차장과 같은 지하구조물이 거의 필수적으로 건설되어있어 이를 단지에 투수성포장을 시공한 경우에 지하구조물 상부에 누수가 발생할 가능성이 높다.

[표 4-11] LH 건설 도로형태에 시공가능한 배수성포장 및 투수성포장

| 도로형태 | 배수성포장 | 투수성포장 | | |
|--------------|-------|-------|------|----|
| | 아스팔트 | 아스팔트 | 콘크리트 | 블록 |
| 승용차 중심의 일반도로 | ○ | | | |
| 단지 내 도로 | ○ | △ | △ | △ |
| 주차장 | | ○ | ○ | ○ |
| 자전거도로 | | ○ | ○ | ○ |
| 광장 | | ○ | ○ | ○ |
| 보행자 도로 | | ○ | ○ | ○ |
| 산책로 | | ○ | ○ | ○ |

기후변화에 대비하기 위해서 단지 및 택지개발지구에서 배수성 및 투수성 포장을 효과를 높이기 위해서는 우수를 모으는 시설인 집수정 및 우수관거의 충분한 설계가 필요하다.

또한, 우수를 효율적으로 활용하기 위해서는 배수성포장이나 투수성포장에서 배출된 우수를 모으는 시설인 집수정 및 우수관거를 빗물저류시설을 연결하여 충분한 수량을 확보한 후 도로주변의 식생에 물을 공급한다거나 하절기에 수량을 노면에 살포하여 온도를 낮추는 등 우수를 이용할 다양한 방안에 대한 검토가 필요하다.

5.3 기후변화에 따른 포장의 파손

최근 강우, 강설 및 중차량 교통량 증대로 아스팔트 포장에서 포트홀(pothole) 발생이 증대되고 있으며, 포트홀은 교통안전의 심각한 저해요인이 되고 주행 쾌적성을 저하시키고 있다.

포트홀을 발생시키는 물이 피로균열, 거북등균열 및 연약한 입상재료 기층을 통하여 표층으로 침투하는 봄 해빙기와 강우기에 많이 발생한다.

포트홀 발생원인은 포장의 균열부 주위로 우수가 침투하여 아스팔트 혼합물 간의 접착이 부실하게 되고, 포장 위를 차량이 통과할 때 교통하중에 의한 포장 파손 현상이 발생되며, 포장체의 가장 취약한 부분에서 아스팔트 혼합물의 탈리 및 박리가 발생하며 생긴다.

NCAT Report No.92-1에 따르면 SHRP에 의해 수분민감도 평가기법의 적절한 실험절차가 개발되어지고 명확한 입증이 이루어질 때까지 아스팔트 혼합물의 수분민감성 평가를 위한 시험법은 수정 Lottman(AASHTO T283) 시험을 추천하고 있으며, 수정 Lottman의 최소 TSR(Tesile Strength Ratio)값은 0.7로 명시되어 있다.

수분민감도 평가기법 조사에서 각 시험방법들의 연관된 효과성을 0에서 9등급으로 나누어 조사한 결과를 표 4-12에 나타내었다.

[표 4-12] 효과적인 수분민감성 예측 방법

| 시험방법 | 적용하고 있는 State의 수 | 평균 등급 | |
|------------------------------------|---------------------|-------|--------|
| | | 등급 | 효과성 |
| Boiling Water | 9 | 5 | 약간 알맞은 |
| Static-Immersion(AASHTO T183) | 3 | 4 | 약간 |
| Lottman(NCHRP 246) | 3 | 7.5 | 약간 |
| Tunncliffe and Root(ASTM D4867) | 9 | 5 | 약간 알맞은 |
| Modified Lottman(AASHTO T283) | 9 | 7.5 | 높은 |
| Immersion-Compression(AASHTO T165) | 11 | 5 | 약간 알맞은 |

수정된 Lottman(AASHTO T283)의 아스팔트 혼합물 수분처리방법의 장점은 실험실, 플랜트, 혹은 현장배합이 가능하고 부가적인 레벨에서의 차이점 탐색, 현장 적용성과의 좋은 상관관계, 강도의 80%가 남았을 경우 좋은 상관관

계를 획득할 수 있다. 단점으로는 시간이 필요하여 공극률 레벨을 얻기 위해 세 개의 공시체가 필요하다.

표 4-13은 수정된 Lottman(AASHTO T283)의 아스팔트 혼합물 수분처리방법을 요약하여 보여준다.

[표 4-13] 수정된 Lottman(AASHTO T283)의 아스팔트 혼합물 수분처리방법

| | |
|--------|---|
| 공시체 | 6개의 샘플(3개씩 2그룹) 사이즈 : 직경 4inch, 높이 2.5inch |
| 다짐 | ASTM Methods : D3387 |
| 공극률(%) | 6~8% 및 현장 적용 레벨 |
| 시험절차 | <p>그룹 1</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실험실에서 온도를 건조하게 유지 · 2시간 동안 25℃의 수조에 거치하여 실험 |
| | <p>그룹 2</p> <ul style="list-style-type: none"> · 5~10분 동안 13~67kPa속에 수침 · 진공상태를 제거하고 5~10분 동안 수침 · AASHTO T166규정에 의거 겔보기비중측정, 시료내 흡수된 물의 체적 계산, 포화도 결정 · 포화도 55~80%일 경우 다음 순서로 진행, 아닐경우 위의 순서 반복 · 시료를 10mL의 물이 담겨진 플라스틱 백에 위치 · 플라스틱 백을 $-18\pm3^{\circ}\text{C}$의 냉장고에 최소 16시간 거치 · 꺼낸 시료를 $60\pm1^{\circ}\text{C}$의 수조에 24 ± 1시간동안 거치 · 다시 $25\pm0.5^{\circ}\text{C}$의 수조에 24 ± 1시간동안 거치 후 실험 |
| 파손분석 | 간접인장강도 시험(ASTM D 4123) |

Boiling Water Test는 박리와 비 박리 혼합물 사이의 차이점에 대한 합리적인 결과를 제공하지만 수분민감성이 발생한 혼합물을 정의하는데 부족한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 배수성 및 투수성 포장과 같이 입도가 균등할수록

현장 공용성에 더 높은 상관관계를 제공한다.

Boiling Water Test의 장점은 필요 시료 최소, 효과적인 실험과 질적 제어 가능하고, 실험실 배합 및 현장배합 사용이 가능하다는 것이다. 단점은 주관론적 해석, 비다짐 혼합물의 강도 실추와 물의 순도가 아스팔트 코팅에 영향을 미칠 수 있으며, 벗겨지는 미립분에 대한 평가가 어려움 등이 있다.

표 4-14는 Boiling Water Test의 아스팔트 혼합물 수분처리방법을 요약하여 보여준다.

[표 4-14] Boiling Water Test

| | |
|----------|--|
| 공시체 | 현장 배합설계 AC 또는 각각의 골재 사이즈 (대략적으로 200 또는 300g 샘플) |
| 다짐 및 공극률 | 없음 |
| 시험절차 | <ul style="list-style-type: none"> · 1000ml 비커에 500ml의 증류수를 채움 · 혼합물의 아스팔트를 건어냄 · 10분 정도 끓이고, 유리막대로 세 번 벗겨냄 · 표면의 아스팔트를 건어냄 · 실내 온도를 낮추고, 종이 타월로 건조 |
| 파손분석 | <p>육안검사</p> <p>Texas Boiling Test (수분 민감도로 70%를 기준)</p> |

6. 2차년도 연구계획

6.1 연구내용 및 수행방법

과거의 기상패턴으로 수립된 도시 배수처리 시스템으로는 최근의 집중호우에 의한 피해를 예방하기에 한계가 있다. 따라서, 이상기후에 대비하여 시설물별 강우 설계강도, 도로배수시설(종류, 규모, 위치 등) 최적화 및 도로배수시설 시설기준 개선에 대한 연구를 진행한다.

- ① 도로배수시설 및 배수성/투수성 포장과의 연계성 분석
- ② 아스팔트포장의 대표적인 파손 인과 관계 분석

도로배수시설 최적화 및 도로배수시설 기준 개선을 위하여 LH건설 도로 및 도로시설물에 대하여 전국적으로 현장 조사를 실시한다.

그리고 대상 현장의 기하구조, 배수시설, 도로포장 상태를 조사하여 조사된 지역특성에 맞는 강우강도 적용하여 도로배수시설 평가하고, 아스팔트포장의 대표적인 파손 인과 관계 분석은 연구용역으로 실시한다.

문헌조사에 의해 대표적인 파손형태는 포트홀(pothole)이며 적합한 실험방법은 Modified Lottman(AASHTO T283)와 Boiling Water Test임을 알 수 있었다.

7. 외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용

외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용을 표 4-15에 나타내었다.

[표 4-15] 외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용

| 과업명 | 강우강도별 아스팔트콘크리트 포장 내구성 검증을 위한 실내시험 용역 |
|---------|--|
| 과업의 필요성 | ① 기후변화에 따른 여름철 집중호우에 대한 아스팔트포장의 파손이 빈번히 발행하여 기존 아스팔트포장의 설계기준 개정 검토 필요(대상 포장 : 밀입도 아스팔트 포장, 투수/배수성 아스팔트 포장) ② 강우강도에 따른 투수/배수성포장의 공극률별 수분 보유능력 및 연관된 배수시설 용량 검토 필요 ③ 강우강도에 따른 밀입도 아스팔트 포장, 투수/배수성포장의 수분 침투에 따른 내구성 및 강도 손실 규명 필요 |
| 과업의 범위 | ① 현 LH 설계기준으로 배합된 아스팔트 혼합물 (일반 및 투수/배수성)의 기후변화에 따른 강우강도별 수분손상 모사 실내시험 ② 현 LH 설계기준 아스팔트 혼합물의 강우강도별 수분손상 내구성 시험 및 강성 손실 검토 ③ 시험자료 분석 |

[표 4-15] 외부 위탁 연구용역 필요성 및 내용(계속)

| | |
|------------|---|
| 과업기간 | 착수일로부터 14개월 |
| 과업 세부내용 | <p>① 시료준비 및 시료제작</p> <ul style="list-style-type: none"> - 강우강도별(20mm/h, 40mm/h, 60mm/h, 80mm/h, 100mm/h, 150mm/h)로 LH설계기준 아스팔트 혼합물의 6개 시료 이상 준비 - 배수성/투수성 아스팔트 혼합물은 강우강도에 인한 배수 및 수분보유 능력을 시험하기 위하여 공극률별(10%, 15%, 20%, 25%)로 최소 6개 시료 이상 준비 <p>② 강우강도별 수분손상 모사 필수 실내시험</p> <ul style="list-style-type: none"> - AASHTO T283 시험 : Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage - A Semi-Circular Bend Technique for Determining Dynamic Fracture Toughness - ASTM D4546 - 08 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils - 동결융해 시험 <p>③ 시험자료 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 강우강도에 따른 아스팔트 혼합물의 수분손상 및 파괴 정량화 - 배수성/투수성 아스팔트 혼합물의 공극률별 배수/수분 보유 능력 및 내구성 자료 도출 - 아스팔트 혼합물의 수분손상 및 배수성/투수성 아스팔트 혼합물의 배수능력 관련 LH 설계기준 개선을 위한 자료 도출 |

참고문헌

참고문헌

국내문헌

강동현, 강부식(2006), 분위사상법을 이용한 GCM 정보의 후처리기법, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1049~1052.

건설교통기술평가원(<http://www.kictep.re.kr>).

건설교통부(2000), 하천설계기준.

건설교통부 (2002). 2002 교량현황조서.

국립기상연구소(2011), IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.

국립방재연구소(1998), 98.7.31~8.1 지리산 일원 호우피해 조사 및 분석, 현장조사보고서, NIDP-98-01, 행정자치부 국립방재연구소.

국립방재연구소(1999). 99. 8월 홍수에 의한 경기북부 및 강원지역 교량피해현장조사, 현장조사보고서-99-03.

국립방재연구소(1999), 방재시설물 종합정비 추진방안 연구(II) ; 하천방재시설물의 정비방안을 중심으로, 연구보고서-99-02.

국립방재연구소(2000), 풍수해 방재시설기준 제정에 관한 기초연구(II), 연구보고서-2000-05.

국립방재연구소(2001), 중북부지역 시설물피해 현장조사보고서 (2001. 7. 21~24 호우 : 강원도 홍천·인제·횡성), 현장조사보고서-2001-02.

국립방재연구소(2002), 강원·충남북 지역 교량피해 보고서(2002. 8. 14~8. 18).

국립방재연구소(2002), 2002 호우피해 현장조사 보고서(8.4~8.11), 현장조사 보고서-2002-01.

국립방재연구원(2001), 방재연구지 제3권 제3호.

국립방재연구원(2005), 방재연구지 제7권 제3호.

국립방재연구원(2006), 방재연구지 제8권 제3호.

국립방재연구원(2008), 방재연구지 제10권 제3호.

국립방재연구원(2010), 방재연구지 제12권 제4호.

국토해양부, 한국건설교통기술평가원, 도시홍수재해관리기술연구단(2008), 도시지역 설계 강우량의 결정 가이드라인, 건설기술혁신사업 제5차년도 최종보고서(부록).

국토해양부, 한국건설교통기술평가원, 도시홍수재해관리기술연구단(2008) 도시유역에 대한 지역빈도해석기술 가이드라인.

권원태, 부경은, 허인혜(2007), 한반도 최근 10년 기후특성. 한국수자원학회, 2007년도 학술발표회 논문집, 278~280.

권진욱(2008), 한반도 기후변화 추세분석 및 Random Cascade 모형을 이용한 GCM 기후변화 모의 스케일 상세화, 단국대학교 석사학위논문.

권현한, 김병식, 김보경, 윤석영(2009), 기후변화에 따른 극치강수량의 시공간적 특성 변화 분석, 한국수자원학회 2009년 학술발표회 논문집, pp. 1152~1155.

국립기상연구소(2009), 기후변화 이해하기 II -한반도 기후변화 현재와 미래-.

김병식, 김보경, 경민수, 김형수(2008), 기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향평가, 한국수자원학회 논문집 Vol. 41, No. 4, pp. 379~394.

김영호(2011), 기후변화를 고려한 한반도 주요지점의 확률강우량 산정, 홍익대학교 박사학위논문.

김울안이, 정민철, 공정식(2010), 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 최신

연구동향, 한국수자원학회 Vol. 43, No. 9, pp. 37~42, 2010.

김용태, 이동률, 유철상(2004), 기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석, 한국수자원학회논문집 Vol. 37, No. 4, pp. 305~314.

나양선(2009), 기후변화에 따른 설계 강우 및 홍수변화에 관한 연구, 세종대학교 석사학위논문.

녹색성장위원회, 기상청(2011), 2011년 이상기후보고서.

대한토목학회(2000), 도로교설계기준(2000년 개정).

문영일, 윤선권(2010), 9.21 국지성 집중호우에 의한 도심 홍수피해 원인분석과 대응방안 - 서울특별시를 중심으로, 한국수자원학회지, Vol. 43, No. 12, pp.23~32.

박진혁, 허영택(2008), 초기토양조건에 대한 분포형모형 유출민감도 분석, 대한토목학회 논문집, Vol. 28 No. 4B, pp. 375~381.

서울특별시 기후대기환경정보(<http://cleanair.seoul.go.kr>).

서주석(2007), 권역별 소유역에 대한 강우강도-지속시간-재현기간 관계곡선유도, 한밭대학교 석사학위논문.

소방방재청(2012), 2011년 재해연보.

손태석, 백명기, 이규열, 박경재, 신현석(2010), 기후변화를 고려한 부산시 강우특성분석, 한국수자원학회 2010년도 학술발표회 논문집, pp. 1099~1103.

신상영, 이석민, 박민규(2011), 서울의 침수피해특성과 수방정책 방향, 한국방재학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 4~10.

심우배, 지승희(2012), 기후변화에 따른 폭우재해 취약성 분석 및 도시방재방안, 국토연구원 국토정책 Brief.

안상진, 김진국, 전계원, 곽현구(2003), 호우로 인한 수공구조물의 홍수피해 영향, 건설기술논문집, Vol. 22, No. 1, pp. 77~86.

오세정(2004), 기후변화에 따른 하천유역의 홍수유출 변화분석, 고려대학교 석

사학위논문.

오제승, 김치영, 김원(2007), 강우자료의 변동 특성 분석, 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집, pp. 1602~1607.

유재성, 강인식, 박준일, 신형우(1999), 연강우량 자료를 이용한 수문시계열의 특성 분석, 경상대학교 생산기술연구소논문집, Vol. 15, pp. 191~199.

윤선권(2012), 기후변화에 따른 도시하천의 홍수위험 및 취약성 분석에 관한 연구, 서울시립대학교 박사학위논문.

이동률, 김응태, 이상복, 허준행(2001), 기후변동과 확률강우량의 변화, 한국수자원학회 2001년 학술발표회 논문집, pp. 403~408.

이승춘(2009), 기후변화에 따른 확률강우량의 지역적 변동성 분석, 단국대학교 석사학위논문.

이원환(1967), 국내 지역별 강우특성과 확률강우량 산정에 관한 연구, 한국토목학회지, Vol. 15, No. 3, pp. 28~38.

이원환, 박상덕(1992), 서울지방의 통합형 확률강우량도식, 한국토목학회 논문집, Vol. 12, No. 4, pp. 135~144.

이정훈, 김창성, 김문모, 여운광(2007), 수공구조물의 적정설계를 위한 유출모형 매개변수의 민감도 분석, 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집, pp. 1488~1492.

이종태, 허성철, 김태화(2005), 설계강우조건에 따른 SWMM 모형 매개 변수의 민감도 분석, 한국수자원학회논문집 Vol. 38, No. 3, pp. 213~222.

이종현, 이수철(2009), 지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안정성, 한국구조물진단학회 학술대회, Vol. 13, No. 2, pp. 145~152.

이진학, 윤진영, 윤정방(2004), 지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가, 한국지진공학학회논문집, 한국지진공학회, Vol. 8, No. 6, pp. 31~43.

이재준, 장주영, 곽창재(2010), 각종 수문기상인자의 경년별 특성변화 분석(II) -변동성, 주기성을 중심으로-, 한국수자원학회 논문집, Vol. 43, No. 5, pp.

483~493.

인수한, 신웅배(1964), 서울지방의 강우특성에 관한 연구, 대한토목학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 17~35.

임은순, 권원태, 배덕효(2006), 수자원 영향평가에 활용 가능한 지역기후변화 시나리오 연구, 한국수자원학회논문집, Vol. 39, No. 12, pp. 1043~1056.

임정열, 이종욱, 신동훈, 전재성(2006), 피해 결과 분석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측, 대한토목학회 학술대회, Vol. 26, No. 10, pp. 4112~4115.

임혁진, 권원태, 배덕효, 김성준(2006), CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석, 한국수자원학회논문집, Vol. 39, No. 5, pp. 241~245.

정성인, 유철상, 윤용남(2007), 확률강우량의 정상성 판단: 1. 기존 방법의 적용 및 평가, 한국방재학회논문집, Vol. 7, No. 5, pp. 79~88.

조천호(2012), 기후변화의 과거와 미래, 재난안전. Vol. 14, No. 4.

최경순(2010), 기후변화에 따른 수자원 민감도 분석, 목포대학교 박사학위논문.

최대규(2010), 미래기후변화에 대한 영향분석 및 유역단위의 수자원 영향평가, 부경대학교 석사학위논문.

한국수자원학회 수문기상분과 2007년도 분과위원회 연구과업보고서(2007), 기후변화 및 변동이 극한 강우 및 I-D-F 분석에 미치는 영향에 관한 연구, pp. 386~430.

허준행, 이정식(2006), 도시지역의 확률강우량 산정, 도시홍수재해관리기술연구사업단.

허준행, 김경덕, 한정훈(1999), 지속기간별 강우자료의 적정분포형 선정을 통한 확률강우강도식의 유도, 한국수자원학회 논문집, Vol. 32, No. 3, pp. 247~254.

국외문헌

BELL, V. A., et al. Use of soil data in a grid-based hydrological model to estimate spatial variation in changing flood risk across the UK. *Journal of Hydrology*, 2009, 377.3: 335-350.

DANKERS, Rutger, et al. Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the Upper Danube Basin. *Journal of Hydrology*, 2007, 347.3: 319-331.

ROSIDI, Dario. Seismic Risk Assessment of Levees. *Civil Engineering Dimension*, 2007, 9.2: pp. 57-63.

ROBSON, A.; REED, D. Flood estimation handbook. Institute of Hydrology, Wallingford, 1999.

KARIM, Kazi R.; YAMAZAKI, Fumio. Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2001, 30.12: 1839-1856.

DONG, Buwen. East Asian precipitation increase under the global warming. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2007, 43.3: 267-272.

SHINOZUKA, Masanobu, et al. Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126.12: 1224-1231.

Mansell M, G. The effect of climate change on rainfall trend and flooding risk in the west of Scotland. *Nordic Hydrology*, 1997, 28: pp. 37~50.

MIN, Seung-Ki, et al. East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO-G under IPCC SRES scenarios. *気象集誌*, 2006, 84.1: 1-26.

Moon, Ja-Yeon, et al. Possible Changes of East Asian Summer Monsoon

by Time Slice Experiment, *Atmosphere*, 2008, 18,1: 55–70.

QUINTANA SEGUÍ, Pere, et al. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *Journal of Hydrology*, 2010, 383,1: 111–124.

SEMADENI-DAVIES, Annette, et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system, *Journal of Hydrology*, 2008, 350,1: 100–113.

STURGES, Herbert A. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, 21,153: 65–66.

YUN, Kyung-Sook, et al. East Asian precipitation change in the global warming climate simulated by a 20-km mesh AGCM, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 44,3: 233–247.