

특집기사

미국 I-35W 미시시피강 교량(No.9340) 붕괴 원인에 대한 고찰

Aftermath of Recent Bridge Disaster in US



엄 준 식*
Eom, Jun Sik

1. 서 론

미국연방도로국(Federal Highway Administration)의 통계에 따르면 미국 전역에는 595,363개(2005년 현재)의 교량이 존재하고 있다. 이 중 73,533개의 교량이 구조적 결함을 가지고 있으며 82,802개의 교량이 기능적 문제점이 있는 것으로 조사되어 총 156,335개(26.3%)가 현재의 교통량을 감당하기에 충분하지 않은 것으로 조사되고 있다. 또한 미국 내 교량의 25퍼센트 이상이 건설된 지 50년 이상이 지난 것으로 파악되고 있어 이러한 부적격 판정을 받은 교량의 수는 시간이 경과함에 따라 계속 증가할 것으로 보인다.

미국 국회 교통예산안에 따르면 이러한 부적격 교량에 대해 단순히 현재의 교량 건강 상태를 유지하기 위해서 매년 7조원 정도의 예산이 필요하며, 현재 부적격 판정을 받은 교량을 모두 허물고 재건설한다면 74조원 이상의 막대한 예산이 소요될 것으로 예측되

고 있다. 그러나 현재 교량의 신설 및 유지관리 분야를 모두 포함한 지출은 8조 2000억원 정도로 신설 교량에 많은 예산이 소요된다고 가정한다면 유지관리 분야에 사용되는 예산은 절대적으로 부족한 것으로 파악된다.

Texas A&M University의 교량전문가인 Jean-Louis Briaud의 조사한 바에 따르면 1966년부터 2005년 사이에 미국에서는 약 1500개의 교량이 붕괴된 것으로 파악되며 매년 수십명의 인명이 교량 붕괴 사고에 의해 목숨을 잃는 것으로 조사되고 있다. 또한 부적격 교량에 대해 통과제한하중을 설정함으로써 빚어지는 교통비용 증가 등을 고려하면 천문학적인 사회 비용 및 경제적 손실이 부적격교량에 의해 소요되는 것으로 판단된다. 따라서 본고에서는 최근 미국 미네소타주에서 발생한 교량 붕괴 사고에 대한 사고사례를 간략히 보고하여 미국내 교량의 안전성 실태를 이해하는데 보탬이 되고자 한다.

2. 미국 미네소타주 미네아폴리스 교량 붕괴 사고

* 상지대학교 건설시스템공학과 교수

E-mail : eompro@gmail.com 033-730-0478

최근 미국에서는 대형 교량 사고가 빈발하고 있으며 있으며 가장 최근의 대형 사고는 미국 미네소타주 미네아폴리스 시내 미시시피강을 연결하는 I-35W에 위치하고 있는 교량의 붕괴사고이며 현재까지 12명 사망, 3명 실종, 약 100명 정도의 부상자가 있는 것으로 파악되고 있다.

2.1. 교량의 개요

이 교량은 미네아폴리스 시내 한 가운데 이용한 미시시피강을 가로지르는 8차선고속도로 교량으로 매일 약140,000대 이상의 차량이 이 교량을 이용해 왔다. 이 교량의 총길이는 581m으로 중앙부 지간이 약 150m인 3경간 연속 트러스교이다. 이 교량은 1967년 11월에 완공되었다. 교량이 위치하고 있는 미네아폴리스 시는 한겨울 기후가 영하 40도 까지도 내려가는 매우 추운 날씨를 가지고 있으며 또한 제설작업을 위해 다량의 소금을 사용하는 지역이다. 따라서 많은

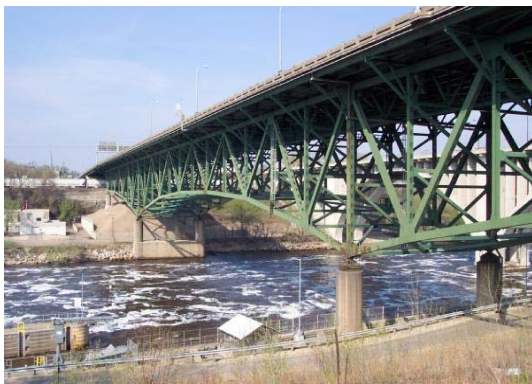


Fig. 1 붕괴전 미네아폴리스 I35W 교량 전경

교량이 부식에 의한 성능 저하 문제를 가지고 있는 상황이다.

2.2 붕괴전 I35W교량에 대한 안전성평가

미네소타주교통부 (MNDOT, Minnesota Department of Transportation)에서는 I35W교량에 대해 실시한 1990년 안전성 평가 결과 “구조적결함 (Structurally Deficient)을 가지고 있음”으로 평가하였으며 National Bridge Inventory의 2003년 보고서에는 이 교량의 각 요소에 대하여 평가 결과가 Table1에 정리되어 있다.

여기서 판정결과의 기준 점수는 7, 8, 9점이 Good, 6점이 Satisfactory, 5점이 Fair, 4점이 Poor, 3점은 Serious, 2점은 Critical, 1점은 Closed로서 이 교량의 경우 상부구조의 상태가 매우 좋지 않은 상황이었다는 것을 알 수 있다. 각 항목의 상태를 집계한 종합점수인 Bridge Sufficiency Rating이 80퍼센트 이하의 교량은 보수보강이 필요한 것을 의미하며



Fig. 2 붕괴전 미네아폴리스 I35W 교량 하부 전경

Table 1 I35W교량에 대한 안전성평가 결과표

평가항목	판정결과
Deck Condition	Fair (5점/9점 만점)
Superstructure Condition	Poor (4점/9점 만점)
Substructure Condition	Satisfactory (6점/9점 만점)
Scour	Foundations determined to be stable.
Bridge Railings	Meets currently acceptable standards.
Structural Evaluation	Meets minimum tolerable limits to be left in place as-is.
Bridge Sufficiency Rating	50%

50% 이하의 점수를 얻은 교량은 교량의 상태가 매우 불량하며 재건설이 필요할 수도 있다는 것을 의미한다. I35W교량은 이 항목에서 50퍼센트의 점수를 얻음으로서 교량의 대대적인 보수보강 또는 재건설이 요구될 정도로 교량의 건강상태가 좋지 못함을 알 수 있다.

2003년 미네소타대학 연구팀에서는 이 교량에 대하여 강제 피로에 대한 연구용역을 수행하였으며 그 결과 대상 교량의 각 부분에 작용하는 응력은 피로한계를 초과하지 않으며 또한 육안조사로는 전혀 피로균열이 발생하지 않았다고 보고하였으며 피로균열이 발생할 가능성은 매우 작다고 진단하였다. 그러나 보고서에서는 또한 교량에 피로에 취약한 부분이 있음을 지적하며 이 부분에 대해 2년주기 그리고 매우 취약한 부분에 대해서는 6개월 주기로 검사할 것을 제안하였다.

또한 이 미네소타대학의 보고서에서는 이 대상 교량이 여유도(Redundancy)가 없는 교량으로서 1개의 트러스 부재의 파괴가 구조물 전체의 파괴를 유발할 위험성이 있다고 보고하였다.

2003년 미국의 대형 건설사인 URS Corporation은 MNDOT로부터 이 교량에 대한 안전성 평가 용역을 수행하였으며 2006년 중간 보고서에서 이 교량에 대해 균열파괴의 가능성을 제거하기 위해 대대적인 보강이 필요하다는 결론을 내렸다. 또한 이 보고서에는 좀 더 정밀한 피로균열에 대한 연구가 필요함을 언급하였으며 2007년 1월 추가보고서에서 52개의 트러스 멤버에 대해 여유도 (Redundancy)를 확보하기 위해 추가적인 보강이 필요하다는 결론을 내렸다. MNDOT에서는 이 교량에 대한 교체시기를 2020년으로 잠정적으로 예정하고 있었던 것으로 알려졌다.

2.3 I35W교량의 붕괴

2007년 8월1일 오후 6시 5분경 I35W교량이 갑자기 붕괴되어 교량의 교각과 상판이 완전히 무너졌으며 러시아워에 발생한 이 사고로 현재까지 사망 12명, 실종 3명, 그리고 부상자가 100명 이상으로 집계되었으며 부상자 중 중상자가 많아 사망자의 수는 더욱 늘어날 것으로 우려되고 있다. 붕괴 당시 교량 위에서는 콘크리트 포장 보강공사가 진행중 이었다.



Fig. 3 붕괴 후 전경

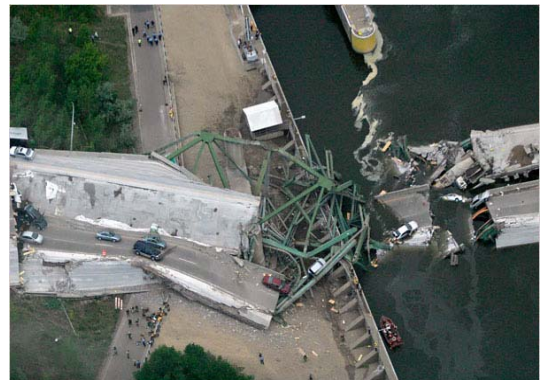


Fig. 4 붕괴 후 전경

2.4 I35W교량의 붕괴원인

전문건설링회사인 Lichtenstein & Engineers는

현재 MNDOT와 용역을 체결하여 이 교량의 붕괴에 대한 사후 원인조사(Forensic Analysis)를 수행 중이다. 미국교통안전국(National Transportation Safety Board, NTSB)에서는 사고 원인 조사를 완료하기 위해 12개월에서 18개월 정도의 기간이 걸릴 예정이라고 발표하였으며 연구결과 발표를 통해 정확한 사고원인이 규명될 예정이다. 이 연구 결과가 발표되기까지는 정확한 붕괴 원인에 대해 논하는 것이 조심스러우나 현재 잠정적으로 붕괴원인의 가능성으로 지목되고 있는 원인들은 많은 교량전문가들에 의해 여러 가지가 논의되고 있다. 본고에서는 세 개의 제기되고 있는 가능성에 대하여 소개하고자 한다.

첫 번째로 연결판 (Gusset Plate)의 부식 또는 피로균열에 의한 파괴이다. 연결판은 트러스의 각 부위를 리벳, 볼트, 또는 용접을 통해 연결하는 부재로서 매우 중요한 부재이지만 피로균열, 그리고 부식에 대한 강도저하에 취약하다는 문제점이 자주 제기되어 왔다. 현재 NTSB에서는 연결판 부분의 설계결함 가능성에 대해 연구하고 있다. 이 가능성이 제기되고 있는 주요한 이유는 1996년 미국 오하이오주 클리블랜드 시 인근에서 붕괴된 I90교량과 I35W교량의 설계가 Fig. 5에서 보듯이 매우 유사하기 때문이다.

클리블랜드 소재 I90 교량은 1950년대에 건설되어 1996년 노후페인트 재도장공사가 진행 중 붕괴되었다. 다행히 붕괴 당시 이 교량에는 공사로 인해 차량 통행이 금지되어 있었으며 교량의 상부구조가 약 7.5cm정도 침하되며 파괴가 진정되어 인명피해는 발생

하지 않았다. 오하이오주 교통부(Ohio Department of Transportation, ODOT)와 NTSB의 조사 결과가 이 교량에 사용된 거сет플레이트가 부식에 의해 유효단면적이 감소하여 요구되는 하중을 감당하지 못하고 피로균열이 발생해 붕괴가 이루어진 것으로 결론지었다. 따라서 유사한 형태의 교량인 I35W교량에 대해서도 같은 형태의 파괴가 발생했을 가능성에 대하여 조사하고 있다.

또 하나의 가능성은 교량이 붕괴되던 시기에 교량의 상판 보강공사가 진행되고 있었다는 것이다. 붕괴 당시 8차선이던 교량은 4차선을 통제하고 나머지 4차선으로 차량을 통행시키며 약 5cm 정도의 콘크리트 슬래브를 덧씌우는 공사가 진행 중이었으며 이를 위해 교량위에 여러대의 공사용 작업차량을 포함한 추가적인 하중이 재하된 상태였다. 이는 다시 한번 클리블랜드 인근 I90교량의 붕괴상황과 매우 흡사한 상황이다. I90교량은 붕괴될 당시 부식된 페인트를 재도장하기 위해 교량을 폐쇄하고 여러 대의 작업용 차량과 사다리차 등이 교량위에 위치하고 있었으며 이러한 상황이 교량에 편심재하 등을 초래하여 교량의 붕괴를 가속화했을 가능성도 제기되고 있다.

또 하나의 붕괴 시나리오로 의심받는 부분은 교량의 교좌부분의 파괴 가능성이다. 이 교량의 총 길이는 581m인 장대교량으로서 매우 무거운 사하중과 활하중을 지지하고 있으나 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 단지 4개의 교각으로 지지되고 있다. Fig. 5에서 교각 위의 교좌장치의 상태를 볼 수 있다.



Fig. 5 클리블랜드 인근 붕괴 I90교량 (좌) 와 I35W교량(우) 비교

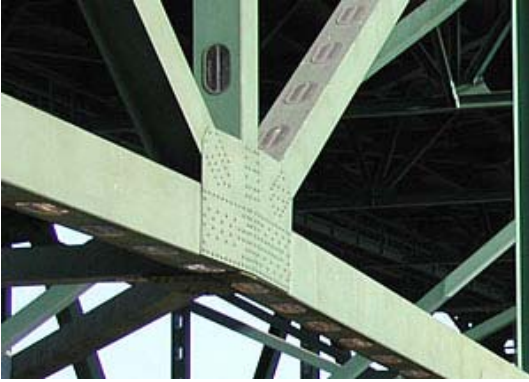


Fig. 6 I35W교량의 붕괴전 Gusset Plate 사진

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 이 교량의 교좌 장치는 매우 열악한 관리 상태를 보이고 있다. 특히 부식이 심하게 되어있는 상태여서 베어링이 온도변화 등에 의한 교량의 수축 및 팽창에 따라 자유롭게 움직이지 못하고 교좌장치 자체뿐 아니라 연결부분 주위의 상부 구조 및 하부구조에 의도하지 않은 추가적인 응력을 발생시켰을 것으로 추측된다.

2.5 교량 붕괴 후 동향

현재 MNDOT에서는 붕괴원인 규명을 위해 Lichtenstein & Engineers와 Wiss Janney Elstner 등의 교량 전문 회사와 용역을 체결한 상태이며 이와 별도로 미국의 대형 건설사인 Parsons Brinkerhoff와 미네소타주의 교량 관련 유지관리기법에 대한 전반적인 재검토, 그리고 주내 교량의 안전진단의 우선순서 등을 결정하는 계약을 하였다. 현재 미국 전역에는 756개의 유사한 형태의 트러스 교량이 있으며, 이미 몇몇 감독기관에서는 이들 교량에 대한 안전점검을 위해 교량 통행을 통제하고 있는 상황이다. NTSB에서는 교량의 붕괴 원인에 대한 조사에 1년에서 1년6개월의 기간이 소요될 것으로 예측하고 있으며 연구 결과에 따라 유사한 형태의 교량에 대한 구체적인 보수 및 보강대책이 수립될 예정이다.

3. 종합분석

교량 구조물의 붕괴는 많은 인명피해와 재산상 손



Fig. 7 I35W교량의 교좌장치

실을 초래한다. 2007년 8월1일 붕괴된 I35W교량은 최소 9명 이상의 사망자와 3명 이상의 실종자, 그리고 100명 이상의 부상자 등의 인명피해와 경제적 손실을 가져왔다. 2006년에는 캐나다 퀘벡주의 교량이 붕괴되며 5명의 사망자가 발생한 사고가 있었으며, 우리나라에서는 지난 1994년 게르버트리스교인 성수대교 중앙현수지간과 주경간부의 앵커트러스를 연결하는 부분의 피로균열로 인한 붕괴사고로 32명의 사망자가 발생한 적이 있다. 성수대교의 예와 같이 피로 누적에 따라 발생하는 피로균열은 붕괴직전까지 계속된 반복 하중에 의해 서서히 진행되며 이에 따라 정기적인 점검 및 유지관리를 통해 교량의 치명적 붕괴를 예방할 수 있다. 비록 I35W 교량의 경우 아직 공식적인 조사 결과는 나오지 않았지만 교량의 붕괴 전 및 후의 사진, 그리고 부식된 교좌장치 등을 미루어 판단할 때 교량에 대한 유지관리가 충분하지 않았으며 이에 따라 대형 사고가 발생했다는 추측을 할 수 있다. 이와 같은 예를 참고하여 볼 때 교량의 사고를 예방하기 위해서 정기적이고 체계적인 유지관리가 매우 중요하다고 생각된다. 따라서 각 교량관리기관은 관리 대상 교량에 대한 정확한 이해와 구체적인 계획을 통해 교량의 합리적인 관리 및 보수가 이루어져야 유사한 사고의 재발을 최소화할 수 있다고 판단된다. 본고는 공식적인 조사결과가 발표되기 이전에 신문기사와 인터넷 등을 통해 얻은 정보와 전문가들의 인터뷰 자료 등을 수집해 작성하였으며 따라서 추후 발표될 공식 조사결과와는 차이가 있을 수 있음을 미리 알려준다.