

미국 I-35W 미시시피강 교량(No.9340)의 붕괴

Collapse of I-35W Mississippi River Bridge (No.9340)



황 윤 국*

Hwang, Yoon Koog



정 연 주**

Jeong, Youn Ju



임 경 국***

Lim, Kyung Kook



윤 성 배****

Yoon, Sung Bae

1. 머리말

2007년 8월 1일 퇴근시간에 미국 35번 주간고속도로(I-35W)상의 미시시피강을 횡단하는 교량(교량번호 9340, 이하 No.9340 교량이라 칭함, Fig. 1 참조)이 붕괴되는 사고가 발생하였다. 13년전에 성수대교 붕괴사고를 경험한 우리에게도 매우 놀라운 사건이었기에 건설기술의 선진국임을 자임하는 미국의 입장에서는 매우 당혹스러운 사건이었으리라. 현재 미국의 관련기관(NTSB, National Transportation Safety Board)에서 붕괴사고 원인을 조사 중에 있으므로 현 시점에서 붕괴사고의 원인을 언급하기에는 시기상조일 것이다. 그러나, 붕괴된 교량의 현황과 유지관리 이력 자료의 사전 인지(認知)는 향후 붕괴원인이 규명되었을 때 이의 이해를 돕는데 유용하게 활용

될 것으로 사료된다. 따라서, 본 원고에서는 미네소타 DOT (Department of Transportation)의 관련자료를 중심으로 붕괴된 No.9340 교량의 현황과 유지관리 이력에 대해 간략하게 살펴보고자 한다.

2. No.9340 교량 현황

붕괴된 No.9340 교량의 기본적인 도면과 체원은 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. No.9340 교량은 1967년에 준공되어 40년 동안 사용되어져 왔으며, 미시시피강을 직접 횡단하는 주교량(3경간 트러스교)과 양단의 접속교량(11경간 강판형교)으로 구성되어 있다. 전체 교량길이는 1,907 ft(약 581 m)이고, 이중 트러스교는 약 301 m, 접속교량은 약 280 m를 차지하고 있다. 교폭은 113 ft(약 34 m, 왕복 8차선)으로 1960-70년대에 준공된 교량들에 비해 넓은 교폭을 갖고 있다.

No.9340 교량에서 이번 붕괴가 발생한 트러스교에 대해 살펴보면, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 2기의 트러스가 서로 연결된(floor beam 트러스에 의한 용

* 한국건설기술연구원 복합구조연구실실장, 책임연구원, 공학박사

** 한국건설기술연구원 복합구조연구실 선임연구원, 공학박사

*** 건설교통부 사회기반시설본부 도로환경팀장

**** 건설교통부 사회기반시설본부 도로환경팀 사무관

E-mail : yjeong@kict.re.kr 031-910-0136

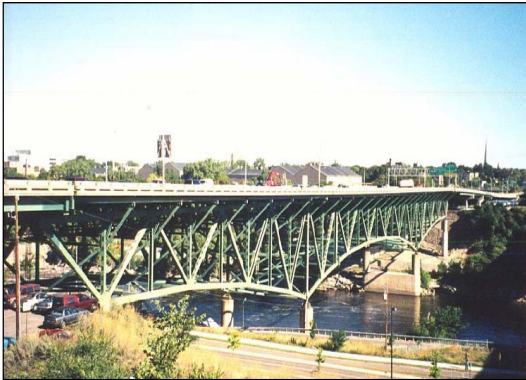


Fig. 1 No.9340 교량의 전경(우측사진에서는 왼쪽 교량)

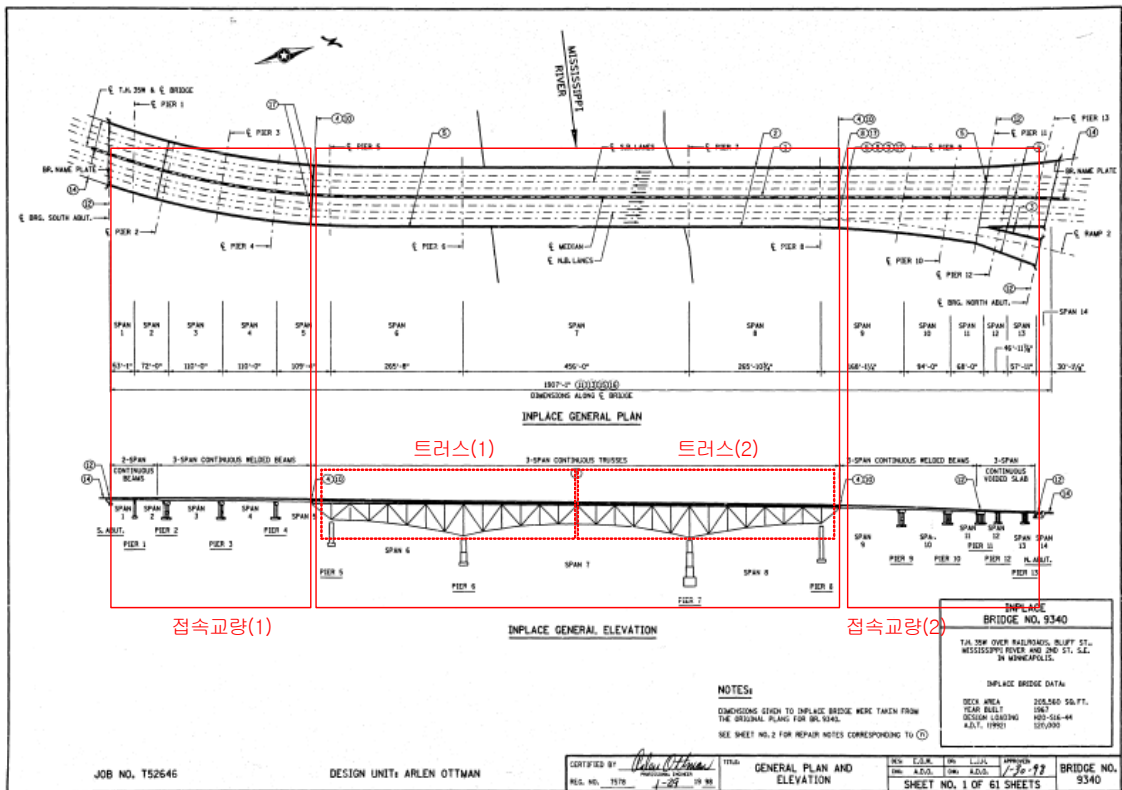


Fig. 2 No.9340 교량 도면(Minesota DOT, 1998)

접) 3경간 연속 트러스교(266 ft + 456 ft + 266 ft)의 형태를 지니고 있다. 접속교량과의 연결은 각 트러스 양단 교각에서 접속교량 방향으로 돌출된 캔틸레버 형태의 트러스(약 11.6 m)에 의해 이루어진다.

2기의 트러스는 중앙의 연결부위를 중심으로 대칭을 이루고 있으며, 각 트러스는 26개의 상현재와 28개의 하현재 및 기타 부재(수직재, 사재, 브레이싱 등)로 구성되어 있다. No.9340 교량의 구조성능은 미국의

Table 1 No.9340 교량 현황

항 목	내 용
1. 개통년도	○ 1967년
2. 교량길이	○ 전체 : 1,907 ft(약 581 m) - 주교량 : 988 ft(301 m, 81+139+81 m) - 접속교량 : 919 ft(280 m)
3. 교량폭	○ 113 ft(약 34 m, 왕복 8차선)
4. 상부구조	○ 주교량 : 3경간 연속 트러스 ○ 접속교량 : 강판형교
5. 바닥판	○ 철근 콘크리트 바닥판(두께 9 in, 약 23 cm)
6. 구조성능	○ 운행제한기준 80,000 lb(36.2톤)의 설계표준트럭에 대해 안전 ○ 136,000 lb(61.7톤)의 운행허가차량에 대해 안전
7. 일일교통량	○ 140,000대(중차량 5,700대 포함)
8. 예상수명	○ 50년(일반교량 75-100년), 2020-2025년 교체 예정

중차량 운행제한기준인 80,000 lb(약 36.2톤)의 표준설계트럭에 대해 안전하며, 총중량 136,000 lb(축수와 축간거리에 따라 약 61.7톤) 까지의 운행허가차량에 대해서도 안전한 것으로 나타나고 있다(Minesota DOT, 2007). 또한, 2006년 교통통계자료에 의하면 No.9340 교량의 일일교통량은 약 140,000대로 미네소타주에서 3번째로 많은 교통량을 나타내고 있으며(I-94 Dartmouth : 157,000대, I-694 교량 : 150,000대), 이중 중차량의 통행량은 일일교통량의 약 4.07 %(약 5,700대)를 나타내고 있다(Minesota DOT, 2007).

3. 유지관리 이력 현황

3.1 주요 개보수 이력

No.9340 교량은 1967년 준공 당시 왕복 6차선(편도 3차선)으로 개통되었지만, 1988년에 각 차선방향의 왼쪽 갓길을 차선으로 변경하여 왕복 8차선(편도 4차선)으로 차선 확장을 실시한 것으로 나타나고 있다(Minesota DOT, 2007). 또한, 인근의 Saint Anthony 폭포의 영향으로 겨울철에 교면 결빙현상이 자주 발생하여 1999년 10월에 교면 결빙방지용 화학약품(Pottassium acetate 용해액) 자동 살포를 위한 자동-온도 노출 시스템을 교량 바닥판에 설치하였다(Wikipedia, 2007).

이외에 붕괴사고 당시에는 콘크리트 바닥판의 재포장 작업이 이루어지고 있었다. 바닥판의 재포장 작업은 잭햄머(45 lb)를 이용하여 바닥판 상부 콘크리트를 약 5cm 제거 후 재포장하는 작업으로, 사고당시 각 차선방향의 바깥쪽 두 차선은 작업완료 상태로 약 50%의 공정을 나타내고 있었다(Minesota DOT, 2007). No.9340 교량의 주요 개보수 현황은 다음과 같다.

- 1967년 : 개통, 왕복 6차선(편도 3차선)
- 1988년 : 차선 확장, 왕복 8차선(각 차선방향 왼쪽 갓길을 차선으로 변경)
- 1999년 : 교량 바닥판에 교면 결빙방지용 자동-온도 노출 시스템 설치
- 2007년 : 붕괴사고 당시, RC 바닥판 재포장 작업 진행중(공정률 50%)

3.2 주요 교량점검 결과

No.9340 교량은 1993년 이전에는 매 2년마다 1993년 이후부터는 매 1년마다 교량 점검을 실시하고 있으며, 이에 따라 최근 점검은 2006년에 실시되었고 금년에는 가을에 예정되어 있었다. 또한, Fracture Critical bridge(교량의 붕괴를 초래할 수 있는 강재 인장부재가 존재하는 교량)로 분류되어 관리되고 있었다. 이 중 No.9340 교량의 상태에 대해 비교적 최근 자료인 2000년 이후의 연구보고서 3건의 주요 내용을 소개하고자 한다.

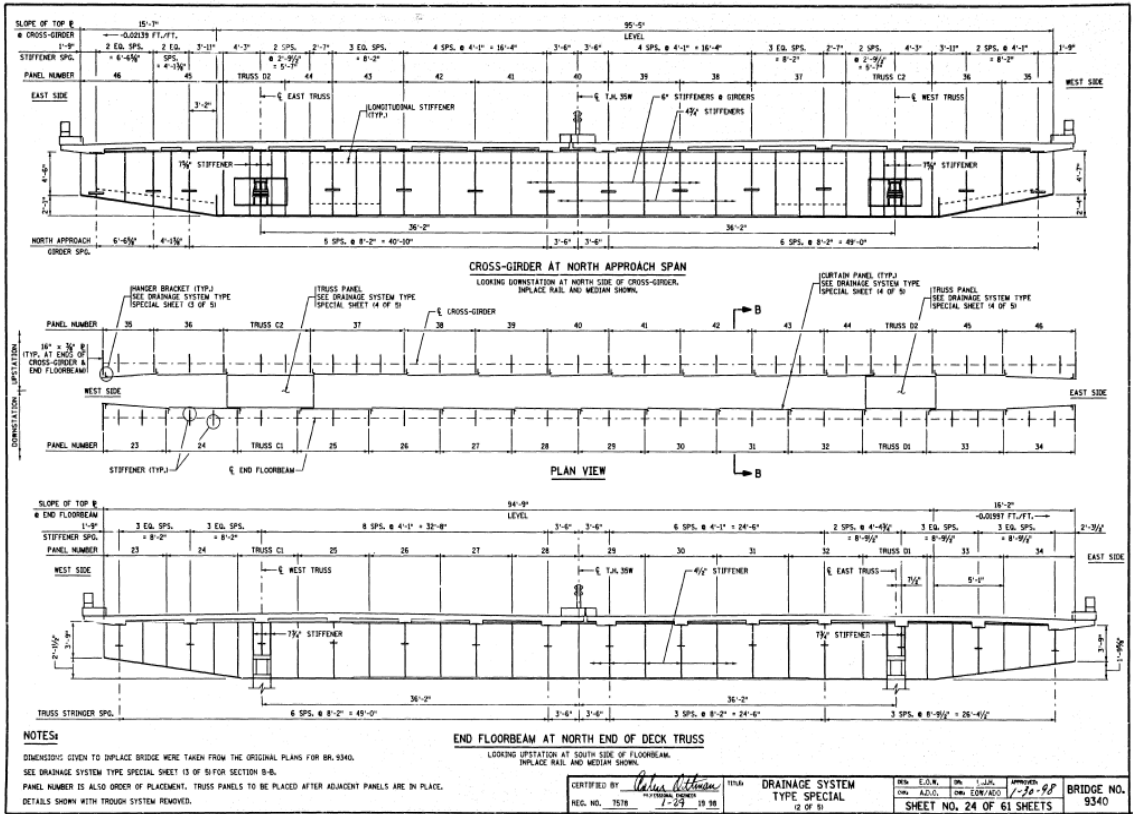


Fig. 3 접속교량의 횡거더(위)와 트러스교의 floor beam(아래)

(1) 미네소타 대학 연구보고서(2001)

2001년 미네소타 대학의 연구보고서(University of Minnesota, 2001)에서는 실제 동행트럭 하중하에서 트러스교의 변형률을 측정하고 이를 이용한 트러스교의 피로응력 분석을 실시하였으며, 다음의 3가지 사항을 명시하고 있다.

- 트러스교와 연결되는 접속교량의 양단부 횡거더 (cross girder)에서 균열관측(1997년)
- 트러스 시스템의 redundancy 부족
 - 트러스 시스템의 특정 부재 파괴가 트러스 전체 파괴로 이어질 수 있음을 의미
- 트러스교에서 피로균열은 발생하지 않았지만 낮은 피로상세(poor fatigue detail)를 나타냄

여기서, 접속교량 단부의 횡거더는 트러스교가 연결되는 곳으로(Fig. 3 참조), 이 부재의 균열과 연결부

가동단 bearing의 기능 상실은 횡거더의 면외 비틀림과 순차적인 균열발생을 초래할 수 있음을 지적하고 있다. 그러나, 최종적으로 가까운 장래에는 피로균열로 인한 문제점은 발생하지 않을 것으로 결론짓고 있다.

(2) 미네소타 DOT 교량점검 보고서(2006)

가장 최근의 교량점검 기록인 Fracture Critical Bridge Inspection Report-Bridge #9340 (Minnesota DOT, 2006)에서는 No.9340 교량의 주요 점검결과를 다음과 같이 기술하고 있으며, 이들 결함은 No.9349 교량에 대해 "구조적 결함(Structural deficient)"으로 판정한 1990년부터 반복적으로 나타나고 있다.

- 상부구조 등급 : poor rating
- 페인트 열화에 따른 일부 부위의 부식

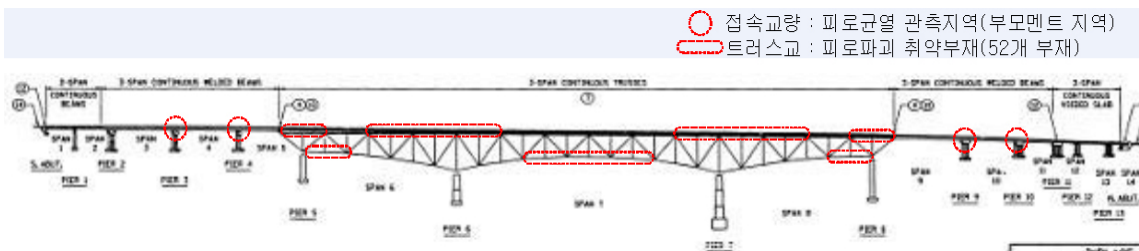


Fig. 4 피로균열 관측 부위 및 취약 부재

- 트러스 부재와 floor beam에서의 용접 불량 상세
- 가동단 bearing의 기능 상실(고정단화)
- 접속교량(강관형교)의 부모멘트 지역에서 다수의 피로균열 관찰(Fig. 4 참조)
 - 위치 : 다이아프램의 웹 stiffener가 상부 플랜지에 용접되지 않은 곳
 - 이들 피로균열은 이전에 발생되었고 1998, 1999년에 보수되었음.
 - 1년 뒤의 피로균열 성장 확인을 위한 추적관리를 명시함.



Fig. 5 붕괴된 I-35W 미시시피강 교량(No.9340)

(3) URS Co. 연구보고서(2006)

2006년 URS 연구보고서(URS, 2006)에서는 AASHTO의 fatigue guide spec.과 LRFD 매뉴얼에 따라 트러스교에 대한 피로분석을 실시하여 다음의 3가지 사항을 제안하고 있다.

- 트러스교에서 피로 파괴에 취약한 52개 트러스 부재를 규정(Fig. 4 참조)
- 이들 52개 트러스 부재에 대한 redundant plate 보강 필요성 제기
- 52개 트러스 부재의 의심스러운 모든 용접 부위에 대한 검사 실시와 결함제거 필요

4. 맺음말

지금까지 지난 8월 1일 붕괴사고가 발생한 미국 I-35W 미시시피강 교량(No. 9340)의 주요 현황과 주요 유지관리 이력에 대해 간략히 소개하였다. No.9340 교량은 예상수명 50년으로 설계되어 2020-2025년에 교체될 예정이었으나, 40년의 사용수명을 끝으로 붕괴

되고 말았다. 붕괴사고후 미네소타 DOT가 즉시 공개한 장기간의 교량점검자료와 관련된 연구보고서, 도면 등은 금번 붕괴사고의 원인 규명에 큰 도움이 될 것이며, 관계기관의 지속적인 자료 축적과 신속한 대응 또한 감탄스러울 뿐이다. 향후 미국의 관련기관 조사를 바탕으로 붕괴사고의 원인이 규명되었을 때, 본 원고가 독자들의 이해를 돕는데 조금이나마 도움이 되기를 바라며, 건설교통부와 한국건설기술연구원은 미국 NTSB의 붕괴원인 조사 활동에 대한 지속적인 모니터링을 통해, 향후 붕괴원인이 규명되었을 때 이에 대한 재조명의 기회를 가질 계획이다. 이번 미국의 교량 붕괴사고를 계기로 국내의 교량점검과 데이터베이스(BMS) 운영 등 교량 유지관리 운영 실태를 되돌아보는 계기가 되기를 간절히 바라며 이만 마무리하고자 한다.

참고문헌

1. URS Co., Fatigue Evaluation and Redundancy

- Analysis: Bridge No. 9340, Minesota DOT, Minneapolis, U.S. 2006.
- 2. University of Minesota, Fatigue Evaluation of the Deck Truss of Bridge 9340, Minesota DOT, U.S. 2001.
- 3. Minesota DOT, Fracture Critical Bridge Inspection: Bridge #9340, Minneapolis, U.S. 2006.
- 4. Minesota DOT, <http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/facts.html>, Fact Sheet - Aug. 13, 2007.
- 5. Minesota DOT(1998), Construction Plan for Deck Repair Bridge 9340, Minneapolis, U.S.
- 6. Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/I-35W_Mississippi_River_bridge, I-35W Mississippi River bridge, 2007.

구조물 비파괴 검사 및 계측 공학 / 신.간.소.개



발 행 : (사)한국구조물진단학회
 발행일 : 2006년 11월 12일
 면 수 : 261면 / 4*6배판
 판매가 : 20,000원
 출판사 : 구미서관

이 책은 비파괴 검사 및 안전진단개요·구조물의 비파괴 검사 및 유지관리, 비파괴 검사이론 및 기술, 구조물 건전도 계측, 4개의 장으로 구성되어 있으며, 각종 비파괴 검사 및 계측에 관하여 자세히 다루고 있다. 이 책은 건설, 구조물지단, 유지보수, 보수보강, 리모델링, 시설물관리, 문화재 관리 등에서 종사하는 실무기술자들과 대학의 참고교재로 유용할 것이다.

< 목 차 >

- 제1장 비파괴 검사 및 안전진단 개요
- 제2장 구조물의 비파괴 검사 및 유지관리
- 제3장 비파괴검사 이론 및 기술
- 제4장 구조물 건전도 계측