

# 강철도교 바닥판 세로보 절취부의 피로균열 진전해석

## Fatigue Crack Propagation in Coped Stringers of Steel Railway Bridges

최동호\*

Choi, Dong-Ho

안우성\*\*

An, Woo-Sung

최항용\*\*\*

Choi, Hang-Yong

### ABSTRACT

The responses of the floor system of a railway bridge are investigated for fatigue life prediction of damaged members using fracture mechanics approach. Numerical analysis of the structure is performed in order to see the influence of track-structure interaction and continuity of the truss connection on the response of the bridge members. Fatigue crack growth analysis is carried through equivalent stress obtained from time-history analysis. The results of time-history analysis agree with measured responses. The fatigue propagation life increases as the curvature in the coped stringer increases.

### 1. 서 론

당산철교는 지하철 2호선의 당산역과 합정역을 연결하는 지하철교량으로, 운행이 시작된 후 12년 7개월이 경과한 1996년 12월에 운행을 중단하였다. 당산철교 바닥틀 시스템의 세로보에서 발생한 피로균열이 문제가 되었으며, 피로균열은 교량의 바닥틀 부분인 가로보와 세로보의 연결부에 집중되어 있었다. 당산철교는 무도상궤도로서 세로보의 플랜지 일부를 절단하여야 하는 구조이기 때문에 세로보의 휨강성이 저하되는 것은 물론 기하학적 불연속부에 의해 높은 응력집중을 야기하여 피로균열발생의 취약부가 된다.

당산철교의 양측 경간은 하로판형, 중앙 경간은 3개의 3경간 연속트러스교로 구성되어 있으며, 트러스교 구간은 무도상 복선구조로 된 플랫폼트러스 방식의 중로교 형식이다. 또한, 두쌍의 세로보가 각 한방향의 궤도를 지지하도록 설계되어 있으며, 세로보 길이는 8.94m이고 양단이 힌지인 단순보로 설계되어 있다.

본 연구에서는 피로균열이 발생한 바닥틀 구조상세에 대해서 파괴역학적인 방법에 의하여 피로수명을 추정하였다. 레일과 세로보의 중심선이 일치하지 않아서 발생하는 편심하중의 영향을 살펴 보았으며, LUSAS 상용 프로그램을 이용하여 바닥틀 시스템의 최대 응력이 발생하는 부재에 대하여 시간-이력 해석을 실시하였다. 시간-이력 해석 결과로부터 Rainflow counting method에 의해 응력범위의 Counting을 실시하여 등가응력을 산정하였으며, 바닥틀 시스템의 구조상세에 대한 피로균열 진전해석을 통하여 피로수명을 평가하였다.

\* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원  
\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정, 학생회원  
\*\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원

## 2. 유한요소해석

### 2.1 피로하중산정

열차하중, 공차중량, 혼잡률, 열차운행횟수 등은 감정연구보고서(대한토목학회, 1997)의 제원을 사용하였으며, 공차중량 및 승객하중은 4개 차축, 즉 8개의 차륜에 균등하게 분포된다고 가정하였다. 승객하중은 시간대별 승객인원이 전 열차에 균등히 탑승하였다고 가정하여 이를 공차중량에 균등하게 분배하였으며, 시간별 평균차륜하중은 보다 합리적인 피로하중을 산정하기 위하여 시간별로 구성된 전 열차에 대해 3승근 평균법으로 계산하였다. 피로하중의 산정을 위한 하중재하수는 운행기간동안의 총차량수와 같은 것으로 하였다.

본 해석에서는 피로거동을 평가함에 있어서 감정연구보고서(대한토목학회, 1997)의 동적주행시험 결과에 의거하여 설계 충격계수가 아닌 실제 충격계수  $i=0.07$ 를 적용하였다. 따라서, 충격계수를 고려한 피로하중은 총 운행기간을 고려한 피로하중에 충격계수를 곱하여 산정하였으며, 산정된 피로하중은  $5.385 \times 1.07 = 5.762$  tonf와 같다.

### 2.2 정적해석모델

#### 2.2.1 트러스 모델

당산철교 바닥틀 시스템 및 트러스 구조를 프레임 요소를 사용한 트러스 모델을 나타내면 그림 1과 같다. 하중재하는 산정된 피로하중을 활하중으로 고려하고, 사하중은 부재자중과 레일하중을 고려하였다. 트러스 부재에 사용된 단면제원은 감정연구보고서(대한토목학회, 1997)에 수록된 단면값을 사용하였다.

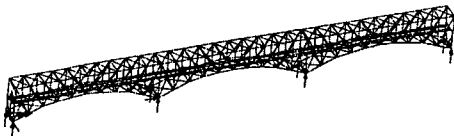


그림 1. 3차원 프레임해석 모델

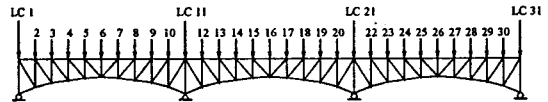


그림 2. 영향선 분석을 위한 하중재하 경우

열차의 이동에 따른 세로보의 응력의 변화를 살펴보기 위하여 영향선 해석을 수행하였다. 그림 2와 같이, 하중재하는 10량 열차차량의 첫 바퀴를 세로보와 가로보의 연결 중심점 위의 가로보 위에 재하하고 가로보 간격만큼 이동시켜 31개의 하중재하를 수행하였으며, 사하중은 부재자중과 레일하중을 고려하였다.

#### 2.2.2 국부상세모델

트러스교 상부 및 하부 직각절취부의 국부응력을 비교평가하기 위하여 트러스 해석 모델로부터 최대응력이 발생하는 경우에 대한 전체해석을 수행하였다. 트러스 해석 모델로부터 얻어진 하중조건 및 경계조건을 사용하여 최대응력 발생위치에 대한 국부해석을 실시하였으며, 사용된 국부상세해석 모델은 그림 3과 같다.

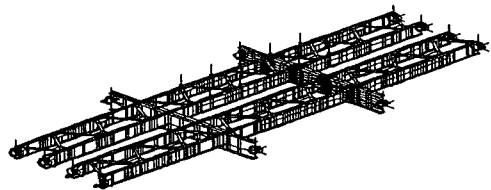


그림 3. 국부상세해석 모델

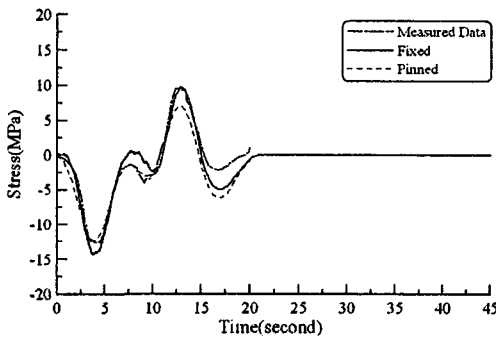
### 2.3 시간이력모델

본 연구에서는 트러스 구간에 대한 시간이력해석을 실시하여 세로보 절취부의 응력범위 빈도분포를 산정하였다. 구조해석에서는 전체 구조계에 대한 트러스모델을 기본모델로 하여 앞에서 산정된 피로하중을 적용하였으며, 트러스교 바닥틀 시스템의 최대응력 발생부재에 대한 절취부의 상부 응력 및 하부응력을 시간-이력해석을 통해 산정하였다.

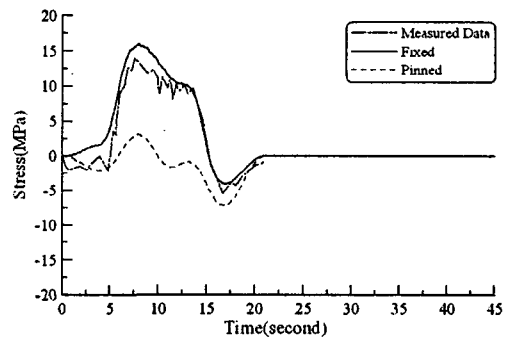
## 3. 시간이력해석결과

### 3.1 트러스부재 연결형태의 영향

본 해석의 검증 및 트러스부재(브레이싱과 트러스 주구)의 연결형태에 따른 영향을 살펴보기 위하여 감정연구보고서(대한토목학회, 1997)의 동적재하실험결과와 비교하였다. 그림 4에는 전동차가 시속 80km/hr로 주행할 때의 트러스 부재에 대한 동적재하 실험결과와 연결부 연결형태(고정, 힌지)에 따른 시간이력곡선을 비교하여 나타내었다. 상현재와 사재 모두 트러스부재의 연결형태를 고정으로 하였을 경우가 동적재하실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) 상현재(감정연구보고서의 E1T8부재)



(b) 사재(감정연구보고서의 E2D3부재)

그림 4. 트러스 부재에 대한 동적재하 실험결과와 연결부 연결형태(고정, 힌지)에 따른 응력 비교

### 3.2 하중 재하 방법의 영향

일반적으로 철도교의 설계시 하중을 세로보에 직접 재하하는 방법을 채택하고 있다. 이의 타당성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 3가지 하중재하 방법에 대한 연구를 수행하였다.

- ① 하중을 세로보에 직접 재하
- ② 하중을 AREA의 규정에 따라 세로보에 직접 재하
- ③ 침목과 레일 설치후 레일에 직접 재하

②의 경우는 그림 5에서와 같이 AREA(1994)의 규정에 의거하여 전동차 하중이 3개의 침목에 분배되는 것으로 가정하고, 하중은 세로보에 직접 재하하였다. 그림 6에서와 같이 Tie spacing은 침목의 중심간격인 0.4m를 적용하였다.

그림 7에는 트러스 부재에 대한 동적재하 실험결과와 3가지 하중재하 방법에 따른 시간-이력해석결과의 비교를 나타내었다. 세로보에 하중을 직접 재하한 경우와 AREA에 제시된 방법에 의한 결과는 발생응력이 거의 일치한 결과를 얻었으며, 강철도교에 설치된 Track tie를 고려하여 해석한 결과는 동적재하 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 일반적으로 사용되고 있는 ① 및 ②에 의한 방법은 실제 발생응력보다 다소 큰 값을 주는 것으로 판단된다.

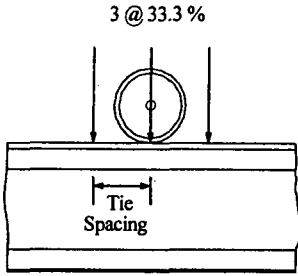


그림 5. AREA의 하중분배도

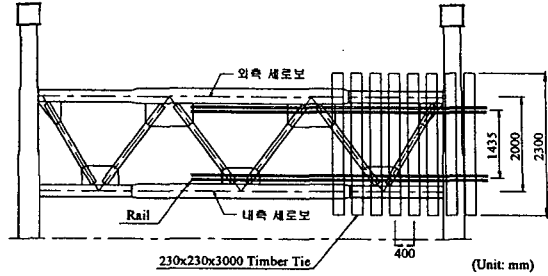
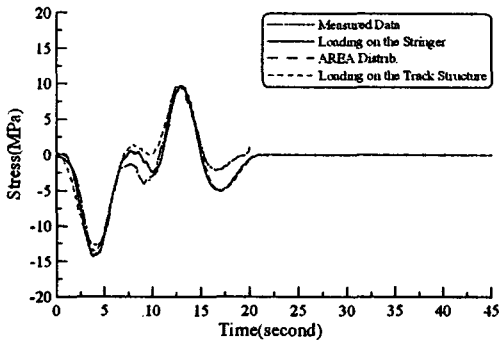
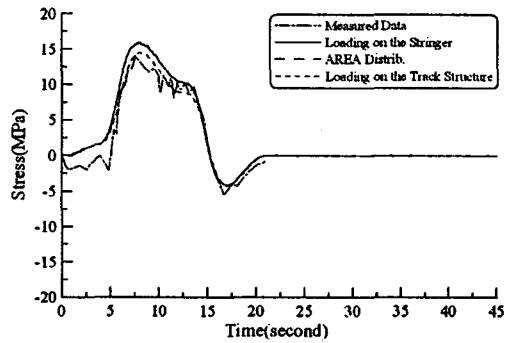


그림 6. 당산철교의 세로보 사이에 설치된 침목과 레일



(a) 상현재(감정연구보고서의 E1T8부재)

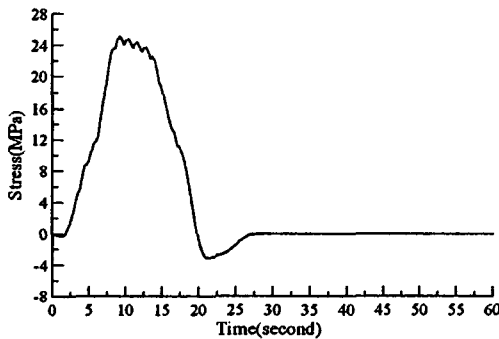


(b) 사재(감정연구보고서의 E2D3부재)

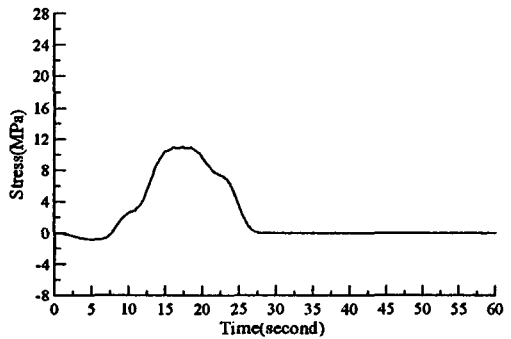
그림 7. 트러스 부재에 대한 동적재하 실험결과와 하중재하 방법에 따른 응력 비교

### 3.3 세로보 절취부의 시간이력해석 결과

최대응력이 발생한 지점부 세로보(11번째 세로보)와 지점부 이외에서 최대응력이 발생한 세로보(19번째 세로보)를 시간이력해석 대상부재로 선정하였으며, 이들 부재에 대한 시간이력해석 결과를 나타내면 그림 8과 같다.



(a) 11번째 세로보



(b) 19번째 세로보

그림 8. 최대응력 발생부재의 시간이력해석 결과

피로하중에 대하여 지점부 부근 세로보인 11번째 세로보의 발생응력범위는 약 25~-3MPa, 중앙 경간 부근 세로보인 19번째 세로보의 발생응력범위는 11~-1.5MPa로 산정되었다. 시간이력해석 결과로부터 얻어진 발생응력에 대해 Rainflow counting method를 사용하여 응력범위의 Counting을 실시하였으며, 등가응력은 산정된 응력빈도히스토그램으로부터 RMC 등가응력을 산출하였다.

#### 4. 피로해석

##### 4.1 피로균열 진전해석 방법

피로균열의 진전과정은 응력확대계수  $K$ 와 피로균열의 진전속도  $da/dN$ 에 의해 식 (1)과 같이 표현된다. 이로부터 피로수명의 예측은 식 (2)와 같이 피로균열의 진전속도를 초기균열길이( $a_i$ )에서부터 한계균열크기( $a_c$ )까지 적분함으로써 얻어질 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta K$ 는 응력확대계수범위,  $C$ ,  $m$ 은 재료상수이다. 이때, 응력확대계수  $K$ 는 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$K = F(a) \sigma \sqrt{\pi a} = F_e F_s F_w F_g \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

균열형상에 대한 보정계수  $F_e$ 는 편축관통균열로 가정하여  $F_e = 1$ 로 고려하였으며, 표면균열에 대한 보정계수는  $F_s = 1.12$ , 유한판 보정계수는  $F_w = \sqrt{\frac{2w}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2w}\right)}$ 을 사용하였다. 응력집중에 대한 보정계수는 Albrecht와 Yamada(1977)가 제안한  $F_g = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{b_i}}{\sigma} \left( \sin^{-1} \frac{b_{i+1}}{a} - \sin^{-1} \frac{b_i}{a} \right)$ 를 사용하였다.

##### 4.2 피로균열 진전해석 결과

피로균열 진전해석시, 초기균열길이  $a_i$ 는 정확한 값은 알 수가 없으나 세로보의 웨브를 직각으로 절취한 것을 고려하여 1mm로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 균열성장변수  $C$ 와  $m$ 은 JSSC피로설계지침(1994)에 의한 최대안전설계곡선(Conservative curve)에 대한 값을 사용하였다.

시간이력해석시에 일반적으로 고려하지 않은 자중에 의해 발생하는 평균응력의 영향을 살펴보기 위하여, 자중의 고려 유무에 따른 피로균열진전 해석결과를 그림 9에 나타내었다. 자중을 고려할 경우 11번째 세로보는 약 4%, 19번째 세로보는 약 3%, 27번째 세로보는 약 0.5% 정도 피로수명이 감소함을 알 수 있었다.

또한, 세로보 상부 절취부의 절취형상이 피로수명에 미치는 영향을 살펴보기 위해 R=1mm인 직각절취한 경우와 R=10mm인 원형절취한 경우에 대하여 피로균열진전 해석을 수행하였다. 보수이력 결과를 나타내기 위하여, 하중반복회수는 감정연구보고서(대한토목학회, 1997)의 1일 열차운행 기록을 바탕으로 세로보 절취부에 대하여 운행이후부터 보수를 실시한 시점까지의 통행량을 계산하여 산정하였다. 곡률반경에 따른 피로균열진전 해석결과를 나타낸 그림 10에서와 같이, 절취형상을 원형절취한 경우가 직각절취한 경우보다 11번째 세로보는 약 11%, 19번째 세로보는 약 3.5%, 27번째 세로보는 약 3.5% 정도 모든 세로보에서 피로수명이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 보수이력결과는 지점부를 제외한 최대 등가응력이 얻어진 19번째 세로보와 최소 등가응력이 얻어진 27번째 세로보사이에 분포함을 알 수 있었다.

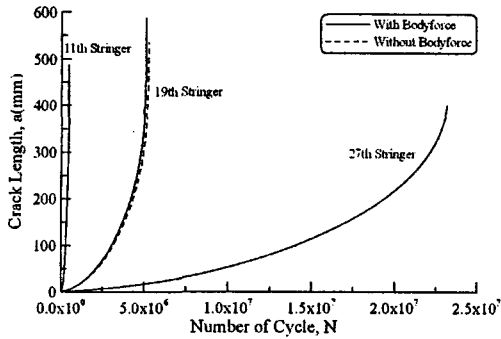


그림 9. 자중의 고려 유무에 따른 피로균열진전 해석결과의 비교

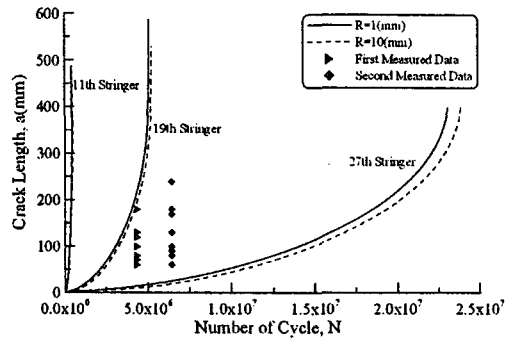


그림 10. 곡률반경에 따른 피로균열진전 해석결과의 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 피로균열이 발생한 바닥틀 구조상세에 대하여 시간이력해석을 통한 파괴역학적인 방법에 의해 피로균열 진전해석을 수행하여 피로수명을 산출하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 시간-이력해석 결과, 세로보에 하중을 직접재하한 경우와 AREA에 제시된 방법에 의한 결과는 발생용력이 거의 일치한 결과를 얻었으며, 실제 발생용력보다 다소 큰 값을 주는 것으로 판단된다.
2. 트러스 모델을 사용하여 산정된 시간이력곡선은 동적재하실험결과와 잘 일치하였으며, 지점부 부근의 세로보에서 최대 증가용력이 산정되었다.
3. 피로진전해석결과는 보수이력과 비교적 잘 일치하였으며, 고려된 모든 세로보에서 절취형상을 원형절취한 경우가 직각절취한 경우보다 피로수명이 증가함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00484-0(2003))지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 당산철교 증거보전사건 감정연구보고서(1997), 대한토목학회, 시설안전기술공단.
2. 당산철교 설계도면(1979), 서울특별시 지하철공사.
3. Kato, S. Yoshikawa, O. Terada, H., and Matsumoto, Y.(1985) "Studies on Fatigue Damages Based on Strain Measurements of a Highway Bridges," Proc. of JSCE Struc. Engrg./Earthquake Engrg. Vol. 2, No. 2, pp. 455-472.
4. John, W. Fisher, J.W. Ben, T., and Wang, D.(1990) "Fatigue Cracking of Steel Bridge Structures(II)," FHWA-RD, pp. 89-169.
5. Allen, R.J. Booth, G.S., and Jutla, T.(1988) "A review of fatigue crack growth characterization by linear fracture mechanics part II", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 11, pp. 71-108.
6. Albrecht, P. and Yamada, K.(1997) "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors," Proceedings of ASCE, Vol. 103, No. St2, pp. 377-389.