

부식이 강트러스 철도교의 응력특성에 미치는 영향

채원규 · 경갑수* · 이명구** · 홍성욱***

신구대학 토목과 · 한국해양대학교 토목환경공학부*

서울보건대학 안전시스템과** · 한림정보산업대학 토목과***

1. 서론

현재 우리나라에서 공용중인 강철도교의 50% 이상이 공용기간 50년 이상 경과된 교량으로 구성되어 있는데, 이와 같이 공용기간이 오래된 강교량의 내구성에 영향을 미치는 주된 열화손상으로 피로와 부식이 보고되고 있다. 이 가운데 부식열화현상에 관한 조사에 의하면 부식손상의 대부분은 국부적인 것으로 분류할 수 있으나 부식면적이 대상부재의 25%를 넘는 경우도 부재의 특성에 따라서는 1~6%에 이르는 것으로 보고되고 있다. 그러나 부식으로 인한 단면감소에 따른 응력발생특성에 대한 연구나 실교량에서의 각 부재별 부식손상 정도에 따른 실측자료의 축적이 미흡한 실정인어서 유지관리에서의 부식에 대한 정량적인 평가가 체계적으로 이루어지고 있지 않다.

그러므로 하중재하위치가 명확하고 통과하중을 거의 정확하게 추정할 수 있는 철도교에서 부식으로 인한 강철도교량 각 부재에 대한 응력발생특성을 정량적으로 평가하는 것은 공용기간이 오래된 강철도교량의 개소수를 고려할 때 강철도교의 합리적인 유지관리 시스템 구축에 매우 유의한 자료를 제공할 것이다. 따라서 본 연구에서는 강철도교량의 대표적인 형식인 단순 와렌트러스교를 대상으로 일련의 현장계측결과 및 유한요소해석을 실시하고, 이로부터 부식으로 인한 교량 각 부재의 응력발생특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 현장계측

2.1 대상교량 및 측정위치

본 연구에서 대상으로 한 교량은 1926년 준공되어 현재까지 약 75년간 공용한 리벳접합형식의 단순 강철도교량으로서, 그림 1에서 나타낸 바와 같이 총 3경간의 단순 와렌트러스교 형식과 총 12경간의 하로판형교 형식으로 구성되어 있다.

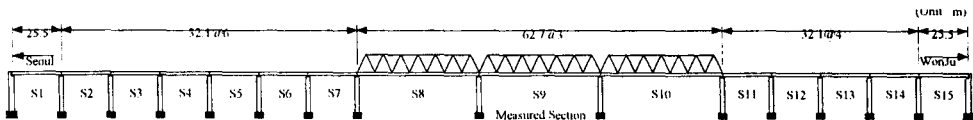


그림 1. 대상교량의 개요

부식손상에 따른 강철도교량의 거동특성을 정량적으로 평가하기 위해서 본 대상교량에 대한 외관조사를 통해서 부식손상이 발생하지 않은 건전한 부재에 대해서 여객열차를 대상으로 일련의 무작위주행시험을 실시해서 그림 2에서와 같이 9변경간 중앙부

의 사재, 가로보, 세로보, 하현재에 변형률게이지를 부착하고 주행열차에 대한 실동응력 과형을 측정하여 건전한 구조계에 대한 응답특성을 도출하였다.

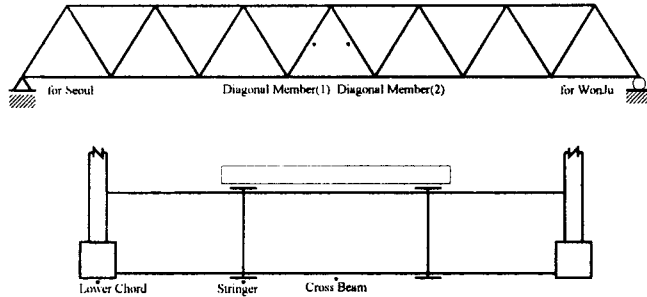


그림 2. 변형률게이지 부착위치 (9번경간 중앙부)

2.2 현장계측결과

대상교량의 각 부재에 대한 무작위주행시험결과로부터 도출한 실동응력과형의 일례를 나타내면 그림 3과 같다.

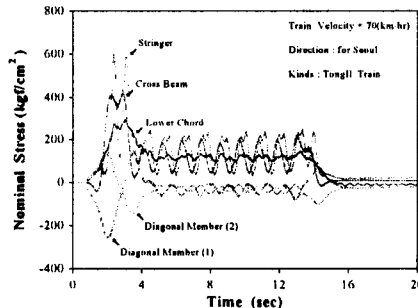


그림 3. 무작위주행시험결과

그림 3에서 하중이 직접 재하되는 바닥틀 부재인 가로보와 세로보는 보의 거동특성을 나타내어 다른 부재에 비해 응력의 변화가 크게 나타나고 대차하중의 영향도 비교적 잘 나타나고 있었다.

그러나 사재의 경우 열차주행에 따라 사재에 대한 영향선과 같이 인장 및 압축응력의 피크값이 번갈아 나타나고 있으며, 열차하중의 특성을 잘 나타내고 있었다. 하현재는 열차하중이 바닥틀 시스템에 의해 분배되어 하중이 큰 기관차 하중의 영향만 현저하게 나타나며 객차하중에 의한 응력의 변화는 미미한 것을 알 수 있었다.

이로부터 열차하중에 의한 발생응력은 가로보와 세로보에서 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 바닥틀 구조가 대상교량을 주행하는 열차하중을 직접 지지하기 때문인 것으로 생각된다.

2.3 등가응력 산정결과

피로수명 평가시 사용되는 등가응력 산정에 있어서 강철도교의 합리적인 컷오프 비율을 추정하기 위하여 그림 3에서 나타난 실동응력파형에 대해서 레인플로우법을 이용해서 응력빈도히스토그램을 작성하고 RMC법을 이용해서 컷오프비율을 최소 0%에서 최대 25%까지 각각 5%별로 변화시키면서 등가응력을 산정한 결과는 그림 4와 같다.

이와 같이 한 이유는 등가응력을 사용해서 피로평가를 실시하는 경우 컷오프 0%의 경우는 발생빈도가 높은 피로한계 이하의 작은 응력범위도 모두 고려하게 되므로 등가응력이 낮게 평가되어 피로수명을 과대평가할 수 있으며, 컷오프비율이 높게 되면 피로에 영향을 주는 응력범위도 제거되어 피로수명을 과소평가할 수 있기 때문이다.

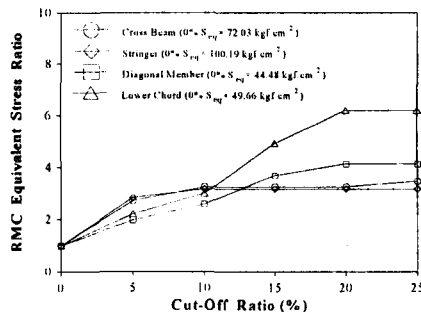


그림 4. 컷오프비율에 따른 등가응력

그림 4에서와 같이 바닥틀 부재인 가로보와 세로보의 등가응력은 컷오프비율 10% 정도에서 수렴하는 경향을 나타내고 있으며, 트러스부재인 사재와 하현재의 경우에는 컷오프비율 20% 정도에서 수렴하는 경향을 나타내고 있었다.

이러한 이유는 그림 3에서도 알 수 있는 바와 같이 가로보와 세로보는 하중을 직접 지지하기 때문에 실교통하중에 의한 발생응력이 거의 정확하게 반영되어서 컷오프비율의 영향이 작은 것을 알 수 있다. 그러나 트러스 부재인 사재와 하현재의 경우 기관차와 객차 통과시의 발생응력의 차이가 크기 때문에 컷오프비율이 낮은 경우 객차하중에 의한 영향이 삭제되어 발생응력의 영향을 정확하게 평가하기 어렵다.

이로부터 강트러스 철도교에 대한 피로안전성 및 피로수명 평가시 보다 안전측의 평가를 하기 위해서 적용가능한 합리적인 컷오프비율을 약 15% 정도에서 설정하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

3. 유한요소해석모델

유한요소해석모델은 그림 5와 같이 3차원 보요소를 이용하였으며, 해석프로그램은 LUSAS를 이용하였다. 또한 그림 6과 같이 열차의 이동하중을 단순화시켜 열차의 축하중에 충격계수를 곱한 하중만을 고려하였다. 한편 강교량의 공용년수의 목표값은 대략

75년을 법정공용년수로 설정하고 있으므로, 본 연구에서는 대상교량의 환경조건을 Albrecht와 Naeemi의 연구결과에 기초해서 산정해서 최대 3mm까지 단면이 손실되는 것으로 가정해서 일련의 매개변수해석을 실시하였다. 한편 일정량의 부식손상이 트러스의 전체거동에 미치는 영향을 공칭응력을 기준으로 판단하였으며, 유한요소해석에서 이용한 부식손상에 대한 매개변수는 무손상(ND), 전부재손상(AD), 트러스부재손상(TD) 및 바닥틀구조손상(FD)으로 구분하였다.

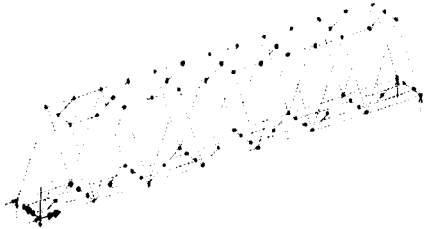


그림 5. 유한요소해석 모델링

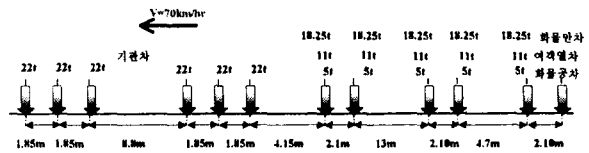
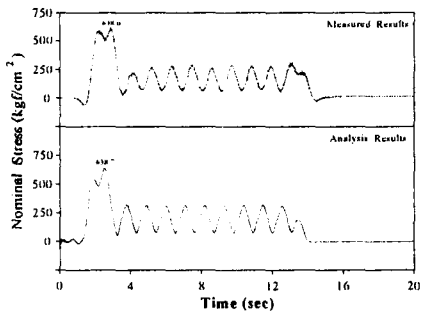


그림 6. 열차하중모델

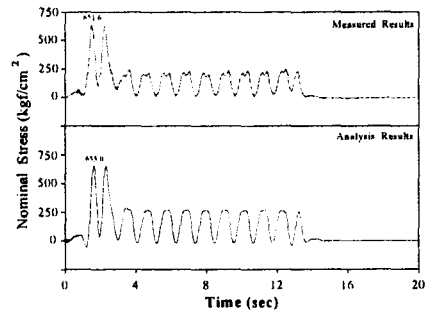
4. 유한요소해석결과

4.1 현장계측결과와의 비교

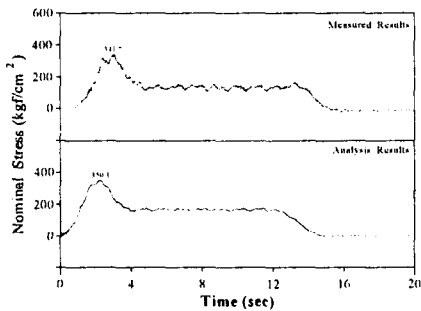
유한요소해석에서 얻어진 시간이력해석결과와 타당성을 검증하기 위해서 각 부재별 응력이력파형을 실동응력과형과 비교해서 나타내면 그림 7과 같다.



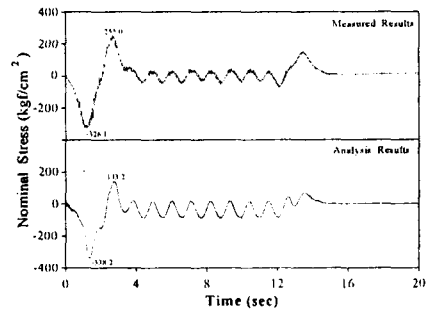
(a) 가로보



(b) 세로보



(c) 하현재



(d) 사재

그림 7. 시간이력해석결과와 현장계측결과와의 비교

그림 7에서와 같이 시간이력해석결과와 현장계측결과 최대응력값은 가로보는 1.02, 세로보는 1.00, 하현재는 0.98, 사재는 압축응력은 0.97, 인장응력은 1.78로 사재에서 발생하는 인장응력을 제외하고 대체적으로 해석결과와 실측결과가 거의 일치하는 경향을 나타내고 있었다. 또한 열차차량대수에 대한 재현성도 비교적 잘 나타내고 있으므로 본 연구에서 실시한 시간이력해석은 충분한 타당성과 재현성을 갖는 것을 알 수 있었다.

4.2 시간이력해석결과

유한요소해석모델의 타당성 결과에 기초해서 각 매개변수별로 일련의 유한요소해석을 실시하였으며, 그림 8에서는 비교적 단면손실에 따른 응력변화의 정도가 현저한 무손상인 경우와 전부재 손상인 경우에 대해서 각 부재별 시간이력해석결과에 의해 얻어진 응력이력선도를 나타내었다.

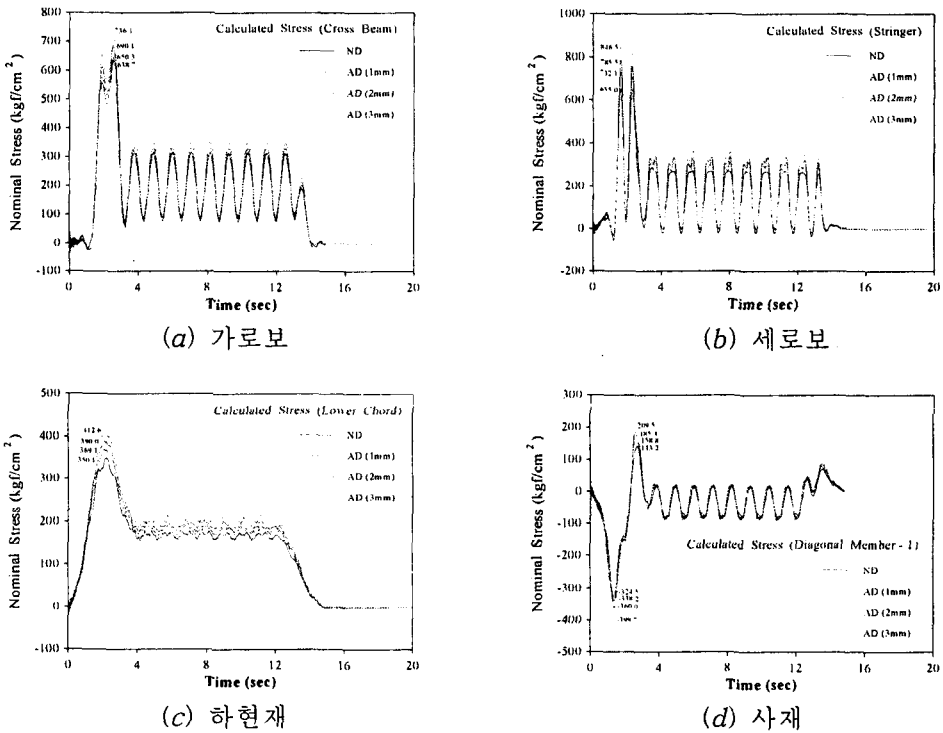


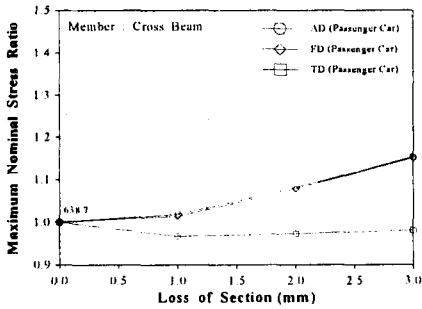
그림 8. 각 부재별 시간이력해석결과

그림 8과 같이 부재의 단면감소에 따라 동일한 열차하중에 의한 발생응력의 증가경향은 가로보와 세로보에서 가장 현저하였으며, 사재나 하현재의 경우 발생응력의 증가폭은 비교적 적었는데, 이로부터 단면감소에 따른 발생응력은 재하하중이 클수록, 그리고 열차하중이 직접 재하되는 부재에서 그 영향정도가 현저해지는 것을 알 수 있었다.

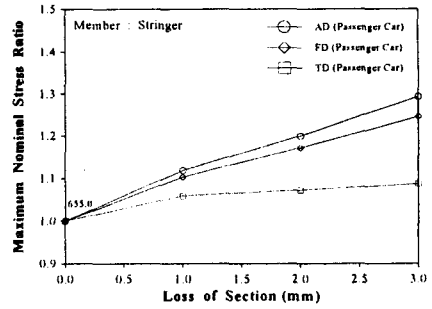
4.3 최대응력산정결과

그림 8에서 나타낸 시간이력해석결과로부터 열차주행시 각 손상유형에 따른 가로보,

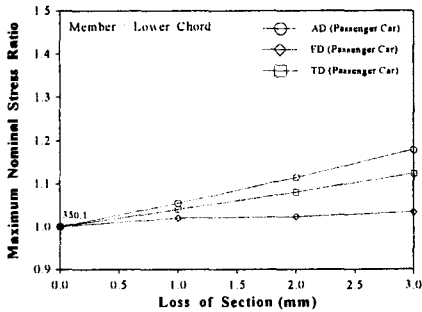
세로보, 하현재 및 사재에서의 최대응력 변화양상을 무손상인 경우에 발생하는 최대응력을 1로 해서 나타내면 그림 9와 같다.



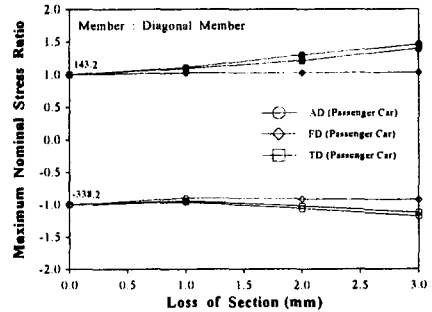
(a) 가로보



(b) 세로보



(c) 하현재



(d) 사재

그림 9. 각 손상경우에 따른 부재별 최대응력 변화특성

그림 9에서 최대응력은 단면감소에 따라 증가하는 일반적인 경향을 나타내었으나 최대응력의 증가경향은 부재특성 및 손상유형에 따라 다른 것을 알 수 있었다. 바닥틀 부재인 가로보와 세로보는 바닥틀 부재에서 손상이 발생하는 경우 발생응력이 손상정도에 비례해서 증가하는 경향을 나타내고 있고 트러스 부재에서 손상이 발생하는 경우 바닥틀 부재의 발생응력에는 큰 변화가 없으며, 특히 가로보의 경우 트러스 부재의 손상이 미치는 영향이 작은 것을 알 수 있었다.

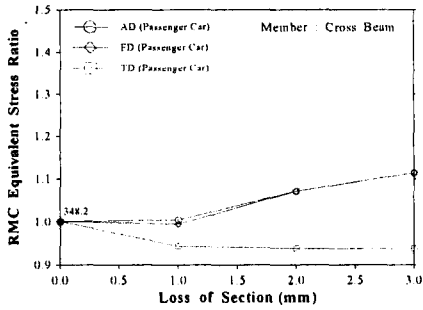
한편 트러스 부재인 사재와 하현재는 트러스 부재에서 손상이 발생하는 경우 발생응력이 손상정도에 비례해서 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 바닥틀 부재에서 손상이 발생하는 경우 트러스 부재의 발생응력에는 영향이 작은 것을 알 수 있었다.

4.4 등가응력 산정결과

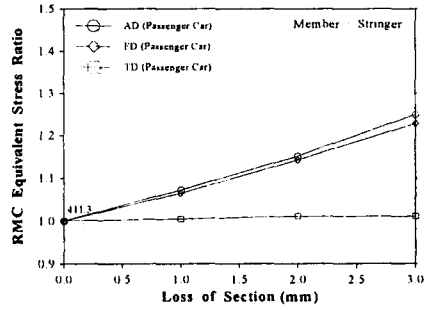
그림 8에서 나타낸 각 손상경우별 시간이력해석결과에 기초해서 산정한 응력빈도히스토그램으로부터 컷오프비율을 15%로 해서 각 부재별 RMC 등가응력을 산정한 결과를 무손상인 경우를 1로 해서 나타내면 그림 10과 같다.

그림 10은 그림 9에서 나타낸 최대응력 변화특성과 유사한 경향을 나타내고 있음을

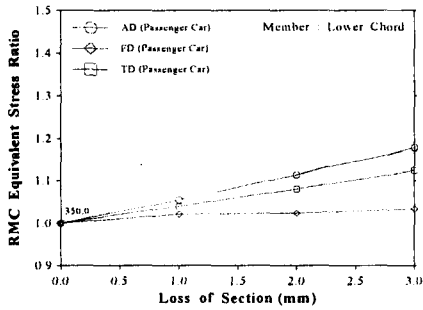
알 수 있는데, 사재의 경우 다소 차이가 존재하는 이유는 그림 3 및 그림 8에서 나타난 사재의 응력이력선도에서 알 수 있는 바와 같이 기관차하중과 객차하중에 의한 발생응력의 차이가 크기 때문인 것으로 생각된다.



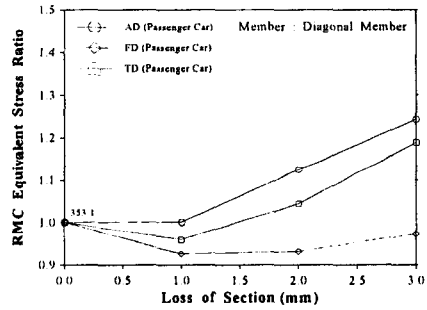
(a) 가로보



(b) 세로보



(c) 하현재



(d) 사재

그림 10. 각 손상경우에 따른 부재별 RMC 등가응력 변화특성

이로부터 트러스교의 경우 바닥틀 부재와 트러스 부재 상호간에 미치는 영향은 매우 미미하므로 강트러스 철도교의 부식에 대한 영향 평가시 바닥틀 부재와 트러스 부재를 구분해서 관리하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

5. 결 론

- (1) 단면감소에 따른 최대응력 및 등가응력의 변화특성은 바닥틀이나 트러스 부재 상호간에 미치는 영향은 상대적으로 미미하였다.
- (2) 강트러스 철도교의 부식에 대한 영향 평가시 바닥틀 부재와 트러스 부재를 구분해서 관리하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- (3) 강트러스 철도교의 합리적인 컷오프비율을 부재 및 하중특성을 고려해서 평가하는 것이 바람직한데, 약 15%로 전후로 설정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- (4) 일반적으로 부식으로 인한 단면의 손상은 국부적인 피트의 형태로 발생하므로 이에 대한 연구가 추가적으로 실시되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) 이범희, "강철도 트러스교의 응력분포특성에 관한 연구", 한양대학교 산업대학원 석사학위논문, pp.7-8, 1997.
- (2) 배헌규, "강철도교의 부식방지에 대한 연구", 서울시립대학교 산업대학원 석사학위논문, pp.1-2, 1999.
- (3) 이성욱, "철도강구조물의 유지관리", 한국강구조학회지, 제12권, 제3호, pp.30-35, 2000.
- (4) P.Albrecht, A.H.Naeemi, "*Performance of Weathering Steel in Bridges*", Report No.272, Nat. Cooperative Highway Res. Program, 1984.
- (5) M.E.Komp, "*Atmospheric Corrosion Ratings of Weathering Steels - Calculations and Significance*", Materials Performance, Vol.26, No.7, pp.42-pp.44, 1987.
- (6) D.I.Chang, H.H.Lee, "Impact Factors for Simple-Span Highway Girder Bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE Vol.120, No.3, pp.704-715, 1994.