

국내 강철도교의 응력특성

Stress Characteristics of Steel Railway Bridges

경갑수* 이준석** 최일윤*** 홍성욱****
 Kyung, Kab-Soo Lee, Jun-Suk Choi, Il-Yoon Hong, Sung-Wook

ABSTRACT

Despite the number of steel bridges being under in service more than 50 years reaches about 50% in present, the quantitative estimation in maintenance on steel railway bridges is not possible because a ton of the field data in the bridges have not been plentifully accumulated. Therefore a series of field tests on the steel plate girder bridge and steel truss bridge, the typical types of steel railway bridges, are executed, and the stress characteristics according to the structural types of the bridges are quantitatively estimated in this study.

1. 서론

현재 국내에서 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.

하중재하위치가 명확하고 통과하중을 거의 정확하게 추정할 수 있는 철도교에서 강철도교량의 각 부재에 대한 응력발생특성을 정량적으로 평가하는 것은 공용기간이 오래된 강철도교량의 개소수를 고려할 때 강철도교의 합리적인 유지관리시스템의 구축에 매우 유익한 자료를 제공할 것으로 생각한다. 그러나 실제 교량구조형식에 따른 부재별 실측자료의 축적 및 분석자료의 부족에 의해 강철도교 유지관리에서 부재별 응력특성을 반영하는 평가시스템 구축까지는 아직 체계적으로 실시되고 있지 않다.

특히 강철도교량에 대한 피로손상평가지 구조물이나 부재의 피로손상에 영향을 미치지 않는 응력범위인 컷오프비율을 철도교에서의 발생응력특성을 충분히 고려하지 않은 채 현재 도로교에서 적용하고 있는 컷오프비율인 25%로 적용하고 있는 경우도 있으므로 정확한 피로평가를 위해서는 컷오프비율이 피로평가에 미치는 특성을 파악하는 것도 중요한 요소로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 강철도 교량의 대표적인 형식인 판형교와 강트러스교를 대상으로 일련의 현장계측을 실시한 자료를 분석하고, 이로부터 강철도교량의 구조형식별 각 부재의 응력발생특성을 정량적으로 평가하였으며, 위의 결과에 기초해서 현재 강철도교량에서 적용하고 있는 컷오프비율의 적정성 여부를 검토하고 합리적인 컷오프비율을 제안하고자 한다.

2. 대상교량의 개요

본 연구에서는 현재 국내 강철도교량의 대표적인 구조형식인 판형교와 트러스교를 대상으로 하였으며, 대상교량의 상세에 대해서는 표 1 및 표 2에서 나타내었으며, 각 대상교량에 대한 평면도 및 측면도는 Fig.1 및 Fig.2에서 나타내었다.

표 1. 강판형교의 개요

교량명	준공년도	구조형식	경간장	단·복차	설계하중
A-철교	1944년	3경간연속교	60.0m	복선	LS-25
B-철교	1931년	단순교	12.3m	단선	LS-22
C-철교	1905년	단순교	6.0m	단선	LS-22

* 한국해양대학교 토목환경공학부 조교수, 정회원
 ** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
 *** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
 **** 한림정보산업대학 토목과 조교수, 비회원

표 2. 강트러스교의 개요

교량명	준공연도	구조형식	경간장	단·복차	설계하중
D-철교	1926년	단순와렌교	62.7m	단선	LS-25
E-철교	1968년	단순와렌교	60.6m	단선	LS-22

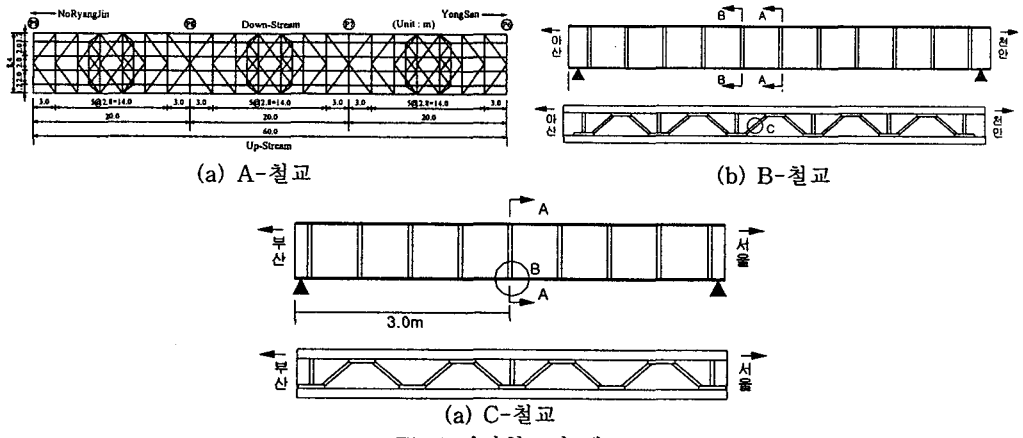


Fig.1 강판형교의 개요

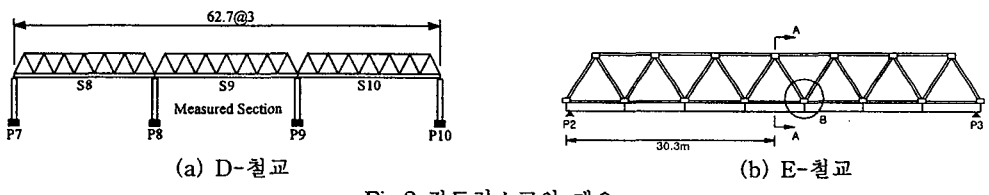


Fig.2 강트러스교의 개요

3. 변형률계이지 부착위치

본 연구에서 대상으로 한 강판형교와 강트러스교의 각 부재별 실동용력을 측정하기 위해서 변형률계지를 부착하였는데, 강판형교의 경우 Fig.3에서 나타낸 바와 같이 주형, 세로보, 가로보 및 브레이싱에 대해서 변형률계지를 부착하였으며, 강트러스교의 경우 Fig.4에서 나타낸 바와 같이 가로보, 세로보, 사재 및 하현재에 대해서 변형률계지를 부착하였다. 또한 무작위주행시험은 현재 본 연구대상교량을 통행하고 있는 여객열차와 화물열차를 대상으로 실시하였다.

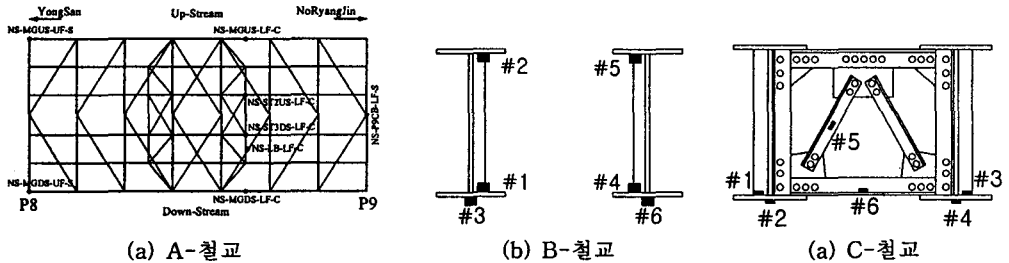
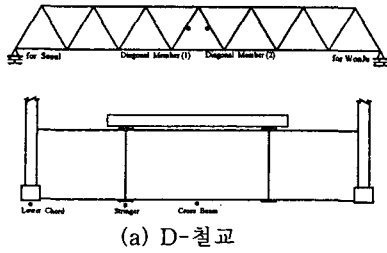


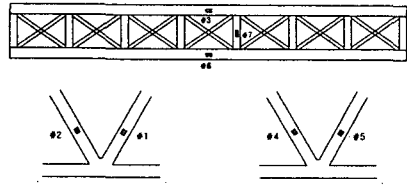
Fig.3 강판형교의 변형률계이지 부착위치

4. 현장계측결과

본 연구에서 대상으로 한 강판형교 구간의 각 부재에 대한 현장계측결과를 여객열차 증 가장 통행이 빈번한 무궁화호와 새마을호에 대해서 정리해서 나타내면 Fig.5 ~ Fig.7과 같다.

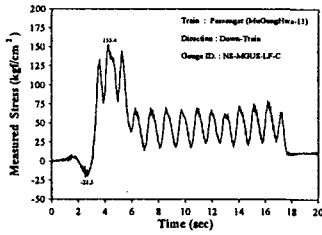


(a) D-철교

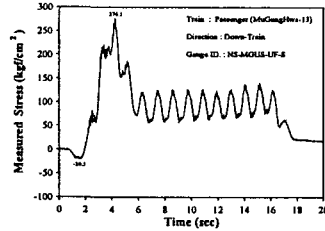


(b) E-철교

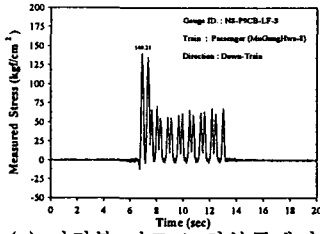
Fig.4 강트러스교의 변형률게이지 부착위치



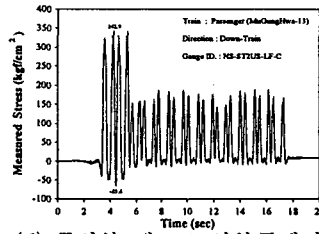
(a) 중앙부 주형 하부플랜지



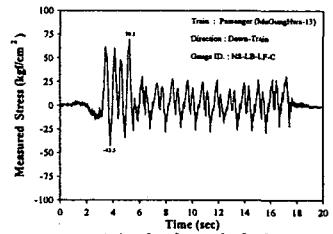
(b) 지점부 주형 상부플랜지



(c) 지점부 가로보 하부플랜지

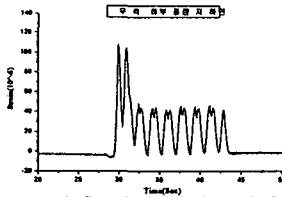


(d) 중앙부 세로보 하부플랜지

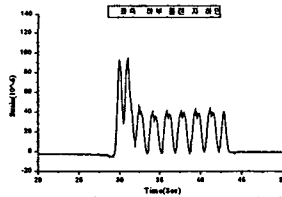


(e) 수평브레이싱

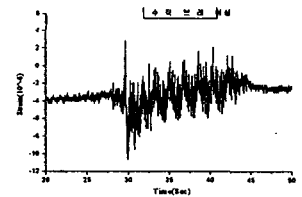
Fig.5 A-철교의 각 부재별 응력이력파형



(a) 우측 주형 하부플랜지

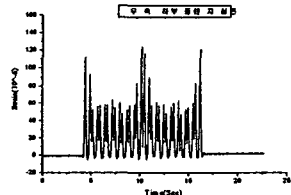


(b) 좌측 주형 하부플랜지

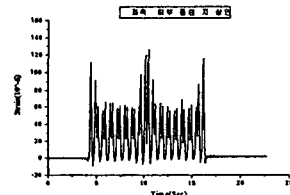


(c) 수평브레이싱

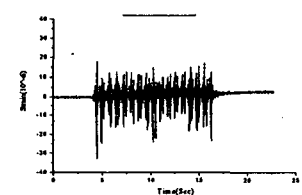
Fig.6 B-철교의 각 부재별 응력이력파형



(a) 우측 주형 하부플랜지



(b) 좌측 주형 하부플랜지



(c) 수직브레이싱

Fig.7 C-철교의 각 부재별 응력이력파형

Fig.5~Fig.7에서와 같이 연속교의 경우 열차가 인접경간 진입시 중앙부 주형 하부플랜지에는 연속교의 영향선 형상과 같이 처음에는 압축응력이 발생하고 기관차가 측정대상 경간을 통과할 때 가장 큰 인장응력이 발생하며, 이후에는 객차수만큼 작은 인장응력이 반복적으로 발생함을 알 수 있었다. 그러나 단순교의 경우는 열차가 측정경간을 통과하는 경우에만 응력파형이 발생하는 단순교의 거동을

나타내는 것을 알 수 있었다. 다만 시간이 짧은 C-철교의 경우는 작은 값이지만 일부 압축응력이 발생하고 있는데 이는 단경간에서의 작용충중의 크기 및 충격위치의 영향에 의한 것으로 판단된다.

열차통과시 중앙부 주형하부플랜지에서 발생하는 최대응력은 A, B, C-철교 모두 기관차 통과시에 가장 크게 나타나고 있으며, 열차통과위치에 따라 최대응력은 약 2~2.5배 정도 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. A-철교의 지점부 주형상부플랜지의 경우 중앙부는 주형하부플랜지에 비해서 최대응력이 약 1.8배 정도 크게 나타나고 있지만 응력이력파형의 특성은 거의 유사하였다.

또한 A교량 중앙부 주형하부플랜지와 가로보나 세로보 하부플랜지의 응력이력파형과 비교해 보면, 주형의 경우 시간길이에 따른 영향선의 특성에 의하여 객차수만큼 응력의 피크값이 발생하나 가로보나 세로보의 경우에는 차축수만큼의 피크값이 발생함을 알 수 있는데, 이러한 이유는 주형에 비해서 가로보나 세로보의 시간이 짧고 열차하중을 직접 지지하는 구조이기 때문으로 생각된다. 이로부터 강철도교의 피로는 시간이 짧을수록 영향이 큰 것을 알 수 있다.

한편, A-철교 지점부 가로보하부플랜지와 중앙부 세로보하부플랜지의 경우도 연속보의 거동특성을 나타내는데, 이는 실제 설계시에는 양단 힌지연결된 단순보로 설계되나 실제 구조물은 연결부의 강성의 영향으로 인하여 양단 고정보로 거동을 하는 것에 의한 영향으로 판단된다. 이와 같은 설계 및 실제거동의 차이에 의해 연결부에는 설계시 고려하지 않은 작용력에 의해 피로균열이 발생할 가능성이 있는데, 이러한 피로균열의 대표적인 사례가 칠거린 당산철교 세로보 연결부의 피로균열이다.

또한 A-철교 세로보의 발생응력이 다른 부재들에 비해서 크게 나타나고 있는데, 이는 세로보가 열차하중의 영향을 직접적으로 받기 때문으로 생각되며, 이로 인해 다른 부재에 비해 열차통행위치에 따라 발생응력의 차이가 최대 6.2배 정도에 이르는 것을 알 수 있다. 그리고 A, B, C-철교의 2차부재인 수평브레이싱이나 수직브레이싱의 경우 발생응력범위는 주부재에 비하여 작게 나타나지만 부재특성상 진동에 의한 응력성분이 많이 포함되어 있는 경향을 나타내므로 피로평가에서는 진동 등의 효과를 고려하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

한편 강트러스교 구간의 각 부재에 대한 현장계측결과를 여객열차 중 가장 통행이 빈번한 무궁화호에 대해서 정리해서 나타내면 Fig.8 및 Fig.9와 같다.

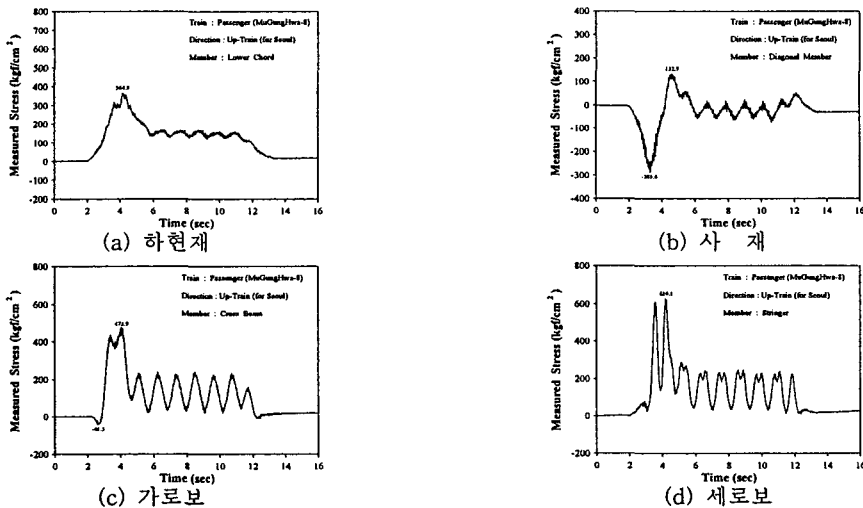


Fig.8 D-철교의 각 부재별 응력이력파형

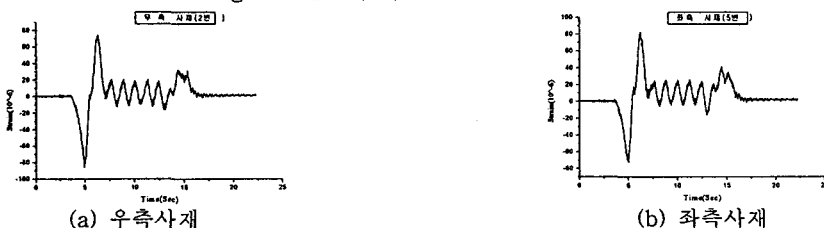


Fig.9 E-철교의 각 부재별 응력이력파형

Fig.8의 응력이력파형의 특성을 보면 D-철교의 경우 하중이 직접 재하되는 바닥을 부재중에서 세로보는 판형교와는 달리 단순보의 거동특성을 나타내고 있는데 이는 오랜 공용기간으로 인한 세로보 단부의 연결부 강성저하에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나, 가로보의 경우는 판형교와 같이 연속보의 거동특성을 나타내고 있으며, 응력값을 보면 가로보와 세로보 모두 트러스 부재에 비해서 응력변화가 크게 나타나고 대차하중의 영향도 비교적 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다.

D, E-철교 트러스 부재의 응력특성은 사재의 경우 열차주행에 따라 사재에 대한 영향선과 같이 인장 및 압축응력의 피크값이 번갈아 나타나며, 하현재의 경우는 시간내의 다수의 축하중 작용에 의한 축하중 영향의 감소 및 바닥을 시스템에 의한 열차하중 분배에 의해 하중이 큰 기관차 하중의 영향만 현저하게 나타나며, 객차하중에 의한 응력의 변화는 비교적 미미한 것을 알 수 있다. 이로부터 트러스교의 열차하중에 의한 발생응력은 가로보와 세로보에서 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 바닥을 구조가 대상교량을 주행하는 열차하중을 직접 지지하는 구조이기 때문으로 생각된다.

앞에서 설명한 2개 형식의 강판형교와 강트러스교에 대한 응력이력파형으로부터 세로보 및 가로보는 설계가정과는 달리 양단 연결부에서 고정단모멘트가 발생되어 연속보와 유사한 거동을 나타내기 때문에 향후 강철도교 유지관리에서는 이러한 것을 고려하여 피로손상을 평가하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

또한 리벳형 강철도교에서 측정된 공칭응력범위는 피로한계이하를 나타내므로 국내의 리벳강철도교는 오랜 공용년수임에도 불구하고 측정부재의 피로수명은 건전한 것으로 판단되지만 피로현상은 부재연결부에서 국부적으로 나타나기 때문에 향후 연구에서는 국부적인 응력이력에 대한 자료획득 및 이들에 대한 정량적인 분석이 필요할 것으로 생각된다.

5. 응력빈도히스토그램

응력이력측정결과에 기초해서 강판형교와 강트러스교 각 부재에 대한 응력빈도히스토그램을 Rainflow Counting Method을 이용해서 작성하였다. 응력빈도히스토그램 작성시 부재의 피로손상에 거의 영향을 미치지 않을 정도의 미소한 응력수준에 대해서 컷오프를 실시하는데, 일반적으로 도로교에서는 통과차량의 구성을 고려하여 최대응력의 25%이하의 응력에 대해서 컷오프를 실시한다.

본 연구에서는 컷오프를 실시하지 않은 경우와 각 5%씩 컷오프비율을 증가시키면서 최대 25%까지 컷오프를 실시하였으며, 본 연구에서 대상으로 한 강판형교에 대해서 컷오프 0%와 컷오프 25%에 대한 대표적인 응력빈도히스토그램을 작성한 결과를 나타내면 Fig.10 ~ Fig.12와 같다.

Fig.10 ~ Fig.12에서와 같이 강판형교의 경우 주형, 가로보, 세로보 및 수평브레이싱 모두에서 기관차와 객차하중에 의한 응력변동범위가 분명하게 나타나고 있으며, 특히 세로보의 경우 이러한 현상이 더욱 현저하게 나타나는 것을 알 수 있었는데, 이는 응력이력파형결과에서도 설명한 바와 같이 세로보의 경우 교량에 작용하는 열차하중을 직접 지지하는 구조이기 때문인 것으로 생각된다.

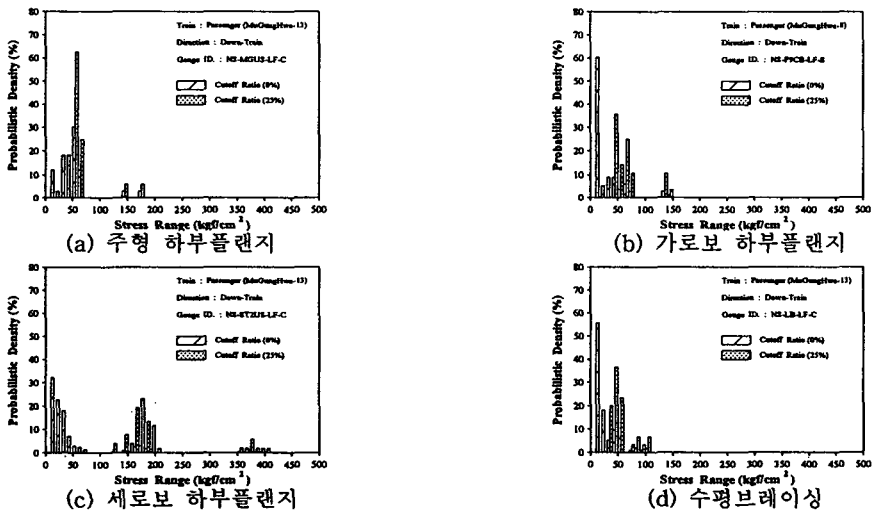
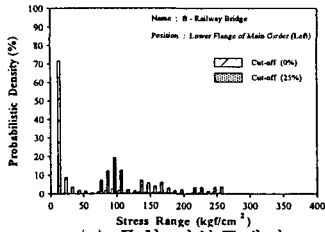
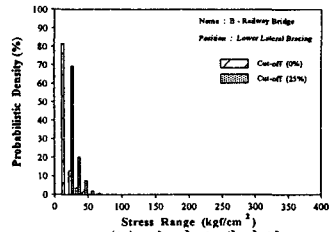


Fig.10 A-철교의 각 부재별 응력빈도히스토그램

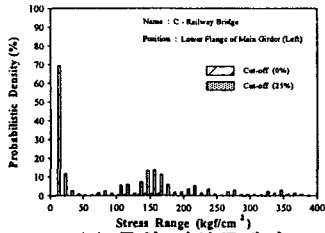


(a) 주형 하부플랜지

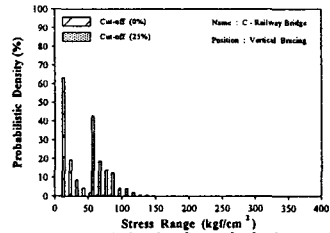


(b) 수평브레이싱

Fig.11 B-철교의 각 부재별 응력빈도히스토그램



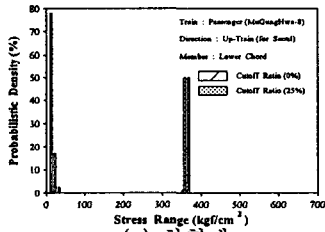
(a) 주형 하부플랜지



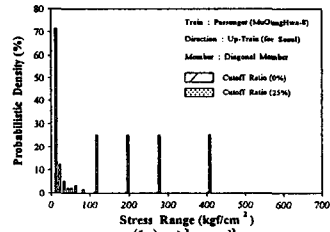
(b) 수직브레이싱

Fig.12 C-철교의 각 부재별 응력빈도히스토그램

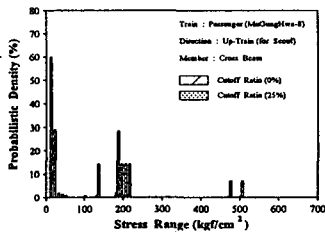
한편 강트러스교에 대한 응력이력추정결과를 이용해서 컷오프 0%와 컷오프 25%에 대한 응력빈도 히스토그램을 작성한 결과를 나타내면 Fig.13 및 Fig.14와 같다.



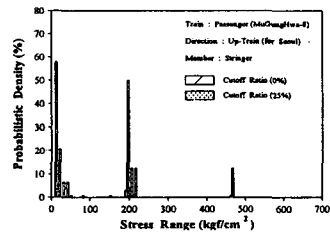
(a) 하현재



(b) 사재

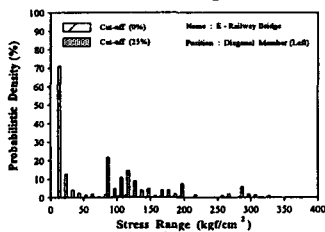


(c) 가로보

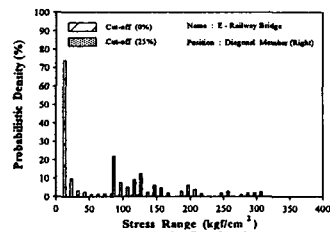


(d) 세로보

Fig.13 D-철교의 각 부재별 응력빈도히스토그램



(a) 좌측사재



(b) 우측사재

Fig.14 E-철교의 각 부재별 응력빈도히스토그램

Fig.13 및 Fig.14에서와 같이 강트러스교의 경우는 트러스부재와 바닥틀 부재에서 컷오프비율에

다른 응력변동히스토그램이 다른 양상을 보이고 있는데, 트러스부재 중에서 하현재의 경우 컷오프비율을 25%로 적용하는 경우 객차하중에 의한 응력변동범위가 상쇄되고 기관차 하중에 의한 응력변동범위가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이로부터 강트러스교에 대한 피로안전성 및 피로수명 평가시 전부재에 대해 일괄적으로 컷오프비율을 25%를 적용하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 생각된다.

6. 등가응력

컷오프비율에 따른 등가응력의 변화특성을 정량적으로 평가하기 위해서 최소 0%에서 최대 25%까지 각 5%별로 컷오프비율을 달리해서 강판형교와 강트러스교의 각 부재별 등가응력을 산정한 결과를 나타내면 Fig.15 및 Fig.16과 같다. 본 연구에서 컷오프비율을 달리하며 등가응력을 평가한 것은 변동응력이 작용하는 구조물에서 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.

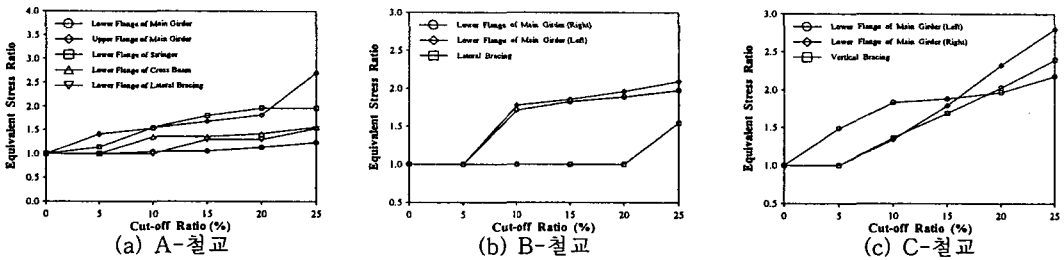


Fig.15 컷오프비율에 따른 강판형교의 등가응력

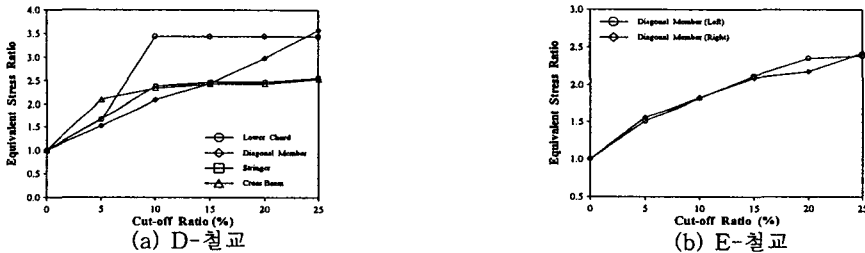
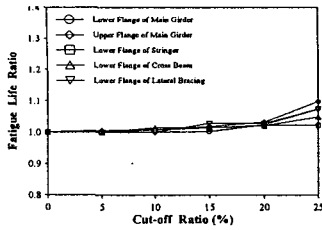


Fig.16 컷오프비율에 따른 강트러스교의 등가응력

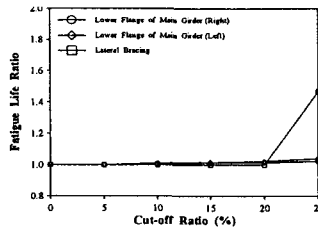
Fig.15 및 Fig.16에서와 같이 강판형교와 강트러스교의 바닥 부재인 가로보와 세로보의 등가응력은 컷오프비율 약 10%~15% 정도에서 수렴하는 경향을 나타내고 있으며, 트러스부재인 사재와 하현재의 경우에는 컷오프비율 20% 정도에서 수렴하는 경향을 나타내고 있었다. 이러한 이유는 응력이력파형 산정결과에서 설명한 바와 같이 가로보와 세로보는 하중을 직접 지지하기 때문에 실교통하중에 의한 발생응력이 거의 정확하게 반영되어 컷오프비율의 영향이 작기 때문이다.

그러나 트러스 부재인 사재와 하현재의 경우 기관차와 객차 통과시의 발생응력의 차이가 크기 때문에 컷오프비율이 낮은 경우 객차하중에 의한 영향이 사재되어 발생응력의 영향을 정확하게 평가하기 어렵다. 이로부터 강철도교에 대한 피로안전성 및 피로수명 평가시 보다 안전측의 평가를 하기 위해서 적용가능한 합리적인 컷오프비율을 약 15% 정도에서 설정하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

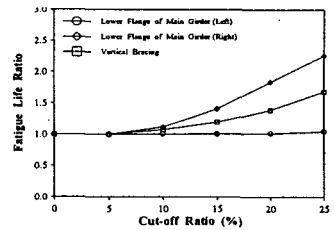
한편 위에서 나타낸 등가응력 산정결과에 기초해서 컷오프비율이 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수정마이너법칙을 이용해서 컷오프비율에 따른 피로수명 산정결과를 나타내면 Fig.17 및 Fig.18과 같다. Fig.17 및 Fig.18에서와 같이 강판형교와 강트러스교의 바닥 부재인 가로보와 세로보의 피로수명은 컷오프비율 약 15% 정도까지는 거의 일정한 경향을 나타내고 있으며, 트러스 부재인 사재와 하현재의 경우에는 컷오프비율 20% 정도까지는 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, 컷오프비율이 피로수명에 거의 영향을 미치지 않는 것으로부터 강철도교에서는 컷오프비율을 15~20%로 설정하는 것이 강철도교의 피로평가에 효율적인 것을 알 수 있었다.



(a) A-철교

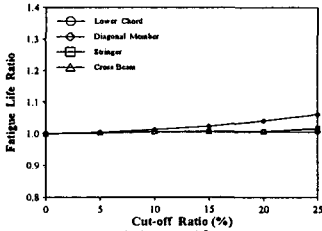


(b) B-철교

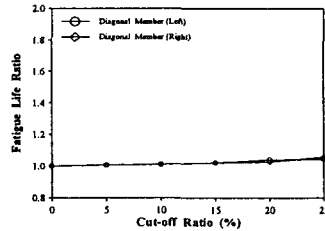


(c) C-철교

Fig.17 컷오프비율에 따른 강판형교의 피로수명



(a) D-철교



(b) E-철교

Fig.18 컷오프비율에 따른 강트러스교의 피로수명

7. 결 론

- (1) 강판형교에서 연속교의 세로보 및 가로보는 설계가정과는 달리 양단 연결부에서 고정단모멘트가 발생되어 연속보와 유사한 거동을 나타내었다.
- (2) 강트러스교의 수평브레이싱이나 수직브레이싱과 같은 2차부재의 경우 발생응력범위는 주부재에 비하여 작지만 진동에 따른 2차응력성분이 많이 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (3) 강트러스교의 사재나 하현재는 기관차하중의 영향이 현저하게 나타났으며, 객차하중의 영향은 비교적 미미하였다.
- (4) 리벳형 강철도교의 주부재의 공칭응력범위는 대부분 피로한계 이하를 나타내고 있으므로 피로안전성은 충분히 확보하고 있었다.
- (5) 강철도교의 합리적인 컷오프비율을 현재 도로교에서 적용하고 있는 컷오프비율과 달리해서 약 15%~20%로 조정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- (6) 강철도교량에 대한 유지관리시 열차하중에 의한 응력변동범위가 비교적 심한 바닥틀 구조인 가로보와 세로보에 대해서 보다 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) 이 범희, “강철도 트러스교의 응력분포특성에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문, pp.7-8, 1997.
- (2) 이 승수, “강철도교의 응력발생모형을 이용한 피로수명추정에 관한 연구”, 수원대학교 대학원 석사학위논문, pp.1-2, 1997.
- (3) 이 성욱, “철도강구조물의 유지관리”, 한국강구조학회지, 제12권, 제3호, pp.30-35, 2000.
- (4) 정 태호, “부식에 의한 단면손실이 강철도교의 건전성에 미치는 영향”, 한양대학교 대학원 석사학위논문, pp.30-73, 2001.
- (5) 경갑수, 이준석, 최일윤, 홍성욱, “국내 강철도교의 열화손상 사례분석”, 2002년도 한국강구조학회 학술발표대회논문집, pp.32-pp.40, 2002.
- (6) Albrecht P., Naeemi A. H., “Performance of Weathering Steel in Bridges”, Report 272, Nat. Cooperative Highway Res. Program, 1984.
- (7) Komp M. E., “Atmospheric Corrosion Ratings of Weathering Steels - Calculations and Significance”, Materials Performance, Vol.26, No.7, pp.42-44, 1987.
- (8) 日本鋼構造協會編, “鋼構造物の疲勞設計指針・同解説”, 技報堂出版, pp.5-pp.12, 1993.