

# 국내 강철도교의 피로특성

## Fatigue Characteristics of Steel Railway Bridges

정갑수\*      최철윤\*\*      이준석\*\*\*      이희현\*\*\*\*      이준호\*\*\*\*\*  
Kyung. Kab-Soo   Choi. Il-Yoon   Lee. Jun-Seok   Lee. Hee-Hyun   Lee. Jun-Ho

### ABSTRACT

In order to evaluate that factors such as span length, member type and train loading affect on fatigue of steel railway bridges, in this paper, a series field tests were carried out for some plate girder bridges. From the result estimated by rainflow counting method to analyses real strain-time curve obtained from the field test, it was known that the fatigue effect is more significant in the bridge having short span length and the secondary members regardless of train load types.

### 1. 서론

강철도교의 효율적인 유지관리를 위한 피로평가에서 강철도교의 특성, 예를 들면 강철도교의 구조형식, 설계하중, 공용년수, 경간 등의 특성은 파악하는 것은 효율적인 피로평가의 중요한 인자들로 생각된다. 이것은 강교량의 피로는 앞에서 기술한 어떤 하나의 인자만에 의해 영향을 받는 것이 아니라 이들 인자가 복합적으로 영향을 미치게 되므로 교량의 피로평가가 달라질 수 있기 때문이다.

이러한 것을 고려하여 본 연구에서는 국내 강철도교 특성은 상부구조형식, 설계하중, 공용년수, 경간 등으로 분류하고 이들 인자간의 관계에 대해 조사하여 향후 보다 효율적인 피로평가를 위한 기초자료로서 활용하고자 한다.

또, 강철도교 특성 조사 결과로부터 플레이트 기더교가 강철도교의 대부분을 차지하는 것을 고려하여 구조형식, 기간, 공용년수가 다른 몇 개의 플레이트 기더 형식의 강교량을 선택하여 현장 계측을 실시하고, 이들 현장 계측 데이터를 이용한 피로평가를 수행하여 국내 강철도교의 피로특성에 대하여 비교 분석하였다.

### 2. 국내 강철도교의 특성

국내 강철도교는 2002년 12월 현재 국내 원도교는 2534개교, 암거, 기타 등은 포함하면 3179개이며, 이들의 총연장은 176,336km이다. 이 중 강철도교가 1359개교 42.7%를 차지하고, 연장은 총 96,927km이다.

\* 한국해양대학교 건설환경공학부 부교수, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 스마트구조물연구그룹 책임연구원,  
\*\*\* 한국철도기술연구원 재료토목연구본부 책임연구원  
\*\*\*\* CTC(주) 대표이사  
\*\*\*\*\* 한국해양대학교 건설환경공학부 석사과정

## 2.1 강철도교의 상부구조 형식

그림 1을 보면 강철도교의 상부구조에는 다양한 형식의 교량이 적용되고 있는 것을 알 수 있는데, 이들 형식 가운데 강철도교의 대표적인 형식인 판형교가 91%(1242개)로 가장 많은 비율을 차지하고 있다. 따라서 향후 강철도교의 피로평가 및 유지관리의 효율성을 고려하여 판형교를 대상으로 한 강철도교의 특성을 조사하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

현재 공용되고 있는 판형교의 형식은 리벳교와 용접교로 분류할 수 있는데, 박스교량이 국내에 처음으로 건설된 것은 1963년으로 보고되고 있다. 판형교에 용접거더의 적용 추세를 조사하기 위하여 판형교의 준공연도별 교량 분포를 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에 나타난 것과 같이 판형교의 50% 이상은 1930년대의 본격적인 철도건설 시기에 건설되었으며, 이후 1950년대 전후복구 사업에 의하여 증가하였다가 1970년까지는 점진적으로 감소되었는데 이 시기의 교량의 대부분은 리벳형식의 교량이다. 1970년대 초 경제 개발 및 철도노선 개발계획에 따라 1970년대 후반부터 다시 강철도교의 건설이 증가하고 있는데, 이 시기부터 용접교가 본격적으로 사용되고 있는 것으로 판단된다. 이로부터 용접교의 공용년수는 30년을 초과한 것으로 판단되므로 향후 피로손상에 주의한 유지관리가 필요할 것으로 판단된다. 그러므로 향후 피로평가 시스템의 효율적인 운영을 위해서는 피로 특성이 다른 리벳교와 용접교를 구분하여 관리하고 효율적인 보수보강 방안을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

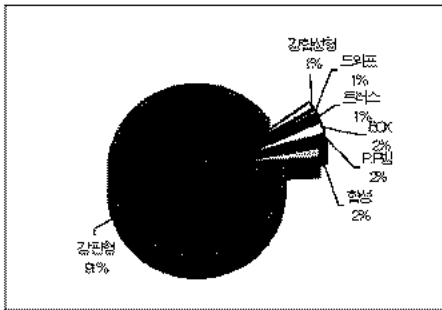


그림 1. 강철도교의 상부구조형식에 따른 분류

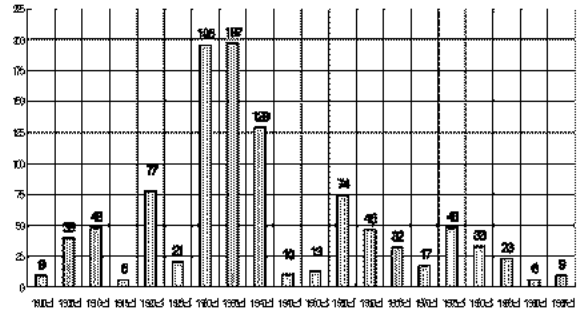


그림 2. 판형교의 준공연도별 분류

## 2.2 강철도교의 하중

국내강철도교의 설계하중은 선로의 등급에 따라 분류되는데, 선로에 따른 설계하중의 변화는 1966년 강철도교 설계표준시방서 해설 및 1978년 강철도교 설계표준시방서 해설(안)에서 변경되어 1980년 강철도교 설계표준시방서 및 1999년 철도교 설계기준에서는 설계하중을 1, 2급선에는 LS-22, 3, 4급선에는 LS-18를 사용하도록 규정하고 있다.

그림 3에 나타난 것과 같이 2001년 12월 조사에 의하면 국내 강철도교에 사용된 설계하중은 LS-22가 가장 많으며, 그 다음이 LS-18인 것으로 조사되었으며, 설계하중은 경간이 길어질수록 LS-18하중으로 설계된 교량이 감소하는 것을 알 수 있다.

## 2.3 강철도교의 공용년수

그림 4는 공용년수별 설계하중을 나타낸 것이다. 공용년수가 50년 이상의 교량이 약 66%이며 약 40년 이상의 교량이 약 11%로 이들 비율이 약 77%를 차지하고 있는데 이들 교량의 대부분은 그림 2에 나타난 것과 같이 리벳교량으로 판단된다. 이들 리벳형식의 강교량은 비교적 피로성능이 좋은 구조상세를 갖고 있으므로 피로의 관점에서 보면 유지관리 측면에서는 가로보와 세로보와의 연결부 등과 같은 일부 구조상세에 대한 피로균열 발생에 유의하여야 될 것으로 생각된다. 또 LS-18로 설계된 교량의 개수는 공용년수가 짧을수록 감소하였으며, 그 비율도 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 최근에 건설된 강철도교는 철도의 고속화 및 중량화를 고려하여 전

부 LS-22로 설계하고 있는 경향을 반영한 것이다.

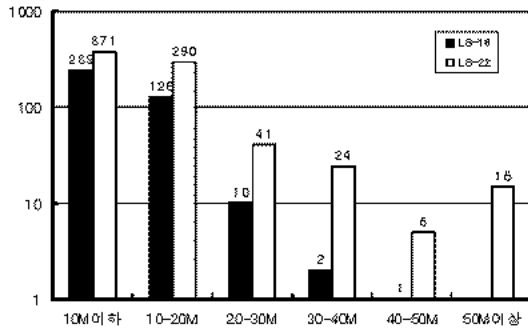


그림 3. 경간별 설계하중

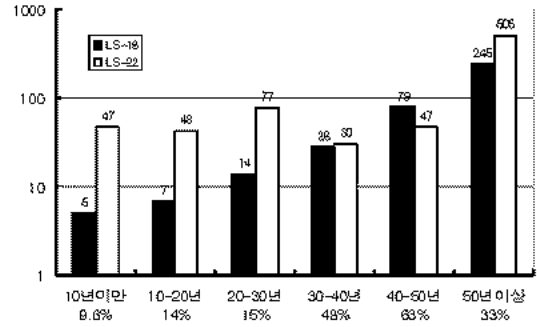


그림 4. 공용년수별 설계하중 분류

그림 5는 공용년수별 경간분류를 나타낸 것이다. 과거에 비하여 공용년수가 작은 교량에서도 경간이 길어지는 비율이 점차 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 최근 건설되는 교량은 경간 단을 고려한다면 용역범위 측면에서는 피로에 유리한 경향을 나타내고 있다. 이러한 것에 대해서는 4에서 설명한다.

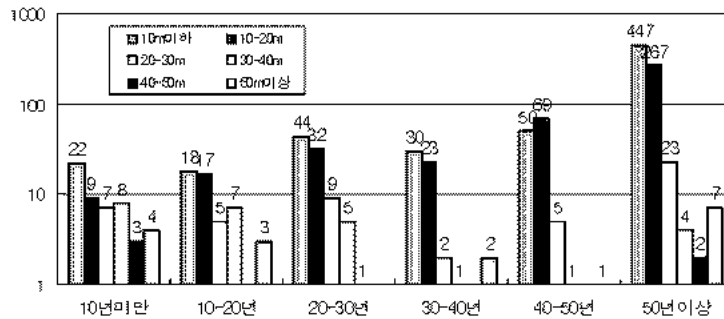


그림 5. 공용년수별 경간 분류

### 3. 현장계측

#### 3.1 개요

파로에 미치는 교량 특성의 영향을 평가하기 위하여 일련의 현장계측을 실시하였다. 지간이 10m이하와 10~20m사이의 화물차 비율이 높은 중앙선에 있는 환형 강교량에 대해서 계측을 실시하였다. 이 계측 데이터로부터 지간과 통과열차 하중의 변화에 따른 응력변도그래프의 형상특성을 조사하였다.

대상교량은 지간 10m이하의 A 및 B 교량, 10~20m의 C교량으로 표 1과 그림 6~8에 각 교량의 제원 및 계측위치를 나타내었다. 여기서는 본 연구에 사용된 계측 위치만을 나타내었다.

표 1. 대상교량 제원 및 조사 데이터

| 대상교량 | 지간  | 운공년도  | 대표적 계측 위치 |      | 설계하중  | 비 고 |
|------|-----|-------|-----------|------|-------|-----|
|      |     |       | 주부재       | 2차부재 |       |     |
| A    | 6m  | 1998년 | #1        | #14  | LS-22 | 용접형 |
| B    | 9m  | 1940년 | #1        | #10  | LS-22 | 리벳형 |
| C    | 20m | 1960년 | #2        | .    | LS-18 | 리벳형 |

교량 길이에 따른 응력파형의 특성 분석 및 대상교량의 피로평가에 사용되는데 응력범위 및도크래프 작성을 위한 계측은 각 대상교량의 대표적인 응력범위 및도크래프 데이터를 위해 24시간 계측을 실시하였다.

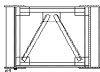


(a) 단면도

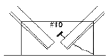


(b) 상부 거셋플레이트

그림 6. A30량 게이지 부착위치



(a) 단면도



(b) 상부 거셋플레이트

그림 7. B30량 게이지 부착위치



(a) 단면도

그림 8. C30량 게이지 부착위치

### 3.2 실측 응력파형 특성 분석

그림 9에 A, B, C교량에서 24시간 계측된 실측응력파형의 일례를 나타내었다.

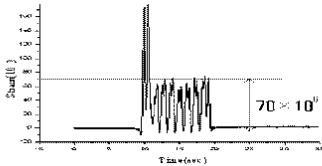
면적 지간길이에 따른 응력파형의 특성을 A교(지간 6m)와 C교(지간 20m)를 대상으로 비교하였다. A교 및 C교는 모두 여객, 화물 열차에 관계없이 교량에 가장 먼저 진입하는 구간이 가장 무거운 기관차에서 최대 변형률이 발생한 후에 연속적으로 진입하는 객차다. 화차의 축중에 따라 연속적인 변형률 파형이 나타나는데 것을 알 수 있다. 그러나 실측응력 파형에서 열차 주행에 따른 응력범위의 변화는 지간이 긴 C교량에 비하여 짧은 A교량에서 열차 주행에 따른 축중의 영향이 더욱 크게 나타나고 있다. 예를 들면, A교와 C교 모두 기관차 통과에 의한 최대 변형률 범위는 약 180 $\mu$  정도를 나타내고 있으나, 연속적으로 진입되는 객차에 의한 최대 변형률은 A교에서는 약 70 $\mu$ , C교에서는 50 $\mu$  이하, 화물차에 의한 최대 변형률은 A교에서 약 150 $\mu$ , C교에서 약 50 $\mu$ 를 나타내며 지간이 짧은수록 주축 열차의 축중에 의한 영향이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 A교의 정수는 교량위에 동시 재하되는 축수의 굵이 1개이므로 하중이 재하되므로, 즉 최대 응력이 발생한 후 하중이 완전히 교량위에서 제거된 후에 다음 축중이 교량에 재하되기 때문에 축중의 영향이 명확하게 나타난다. 이것에 비하여 C교의 정수는 교량위에 여러 개의 축수의 굵이 동시 재하되므로 하중이 완전히 제거되지 않은 상태에서 주축 축중이 재하되므로 이는 영향이 반복적으로 영향을 미치 축중수에 의하여 효과가 감소되기 때문이다. 이러한 영향 때문에 A교의 파형은 굵이 깊은 형태를 나타내나 C교의 파형은 굵이 작은 형태를 나타낸다. 이로부터 교량 지간에 따른 변형률 범위 크기의 변화는 교량 피로손상에 영향을 미치는 하나의 중요한 요인인 것을 알 수 있다. 이어서 피로에 미치는 영향에 대해서는 4에서 기술한다.

다음에 주부재와 2차 부재의 영향을 비교하여 보면 다음과 같다.

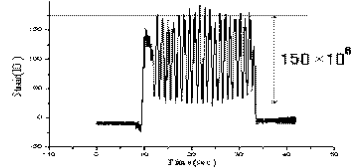
주부재에 대한 실측응력 파형인 그림 9 (a), (c)는 전체적으로 통과 열차의 축중이 명확하게 나타나며 또한 응력파형도 축중의 영향만을 나타내는 특징을 갖는 것을 알 수 있다.

그러나 2차 부재의 실측응력파형인 그림 9 (b), (f)의 응력파형은 파형의 형태가 상당히 복잡하여 축중만이 주기가 아닌 아주 많은 진동성분의 주기를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한 축

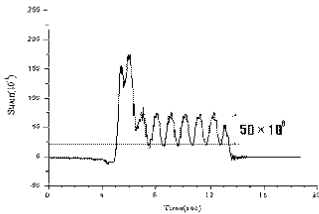
중의 크기가 클수록 그 진동성분의 진폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 동일 교량에서도 피로손상은 피로범주가 낮은 주로 2차 부재에서 발생할 가능성이 높은 것을 나타내므로, 향후 피로손상을 억제하기 위해서는 교량의 진동성분을 억제하는 것이 효율적이라고 생각된다.



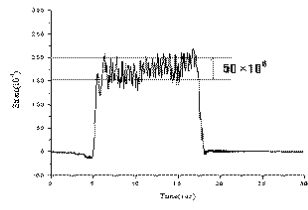
(a) A교 우측하부 플랜지 (여객-무궁화)



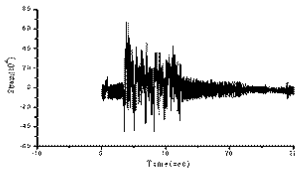
(b) A교 우측하부 플랜지 (화물-시멘트 Bulk)



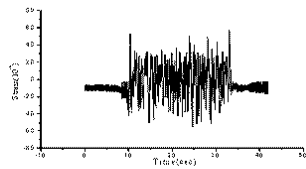
(c) C교 좌측하부 플랜지 (여객)



(d) C교 우측하부 플랜지 (화물)



(e) A교 상부 거셋플레이트 (여객-무궁화)



(f) A교 상부 수평브레이싱 (화물-Bulk)

그림 9. 실측 응력파형

#### 4. 빈도그래프를 통한 계측 자료 분석

3.2의 파형을 통한 자료를 자체 개발한 프로그램에서 Rainflow 계수법을 사용하여 응력범위 빈도그래프를 나타내었으며, 시간에 따른 응력범위 빈도그래프의 특성을 분석하였다.

##### 4.1 빈도그래프

대상교량은 일일 통과 열차의 종류가 다양하므로 시간에 대한 빈도그래프의 특성을 파악하기 위해서는 동일차량, 동일 통과 대수에 대하여 자료를 분석하는 것이 합리적이므로 1일 교통량 데이터를 여객차와 화물차로 분류하여 분석하였다.

화물차의 경우는 화물차량 하중이 다양하여 교량에 재하되는 하중 크기가 다양하게 변화하는 특성을 나타내며, 세마음호, 무궁화호, 통일호와 같은 여객열차의 경우는 차량의 형식 및 하중에 대한 편차가 비교적 편차가 적게 나타나므로 이들 하중특성을 분류하여 적용하면 강철도교에서의 시간길이에 대한 빈도그래프의 특성을 적절하게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

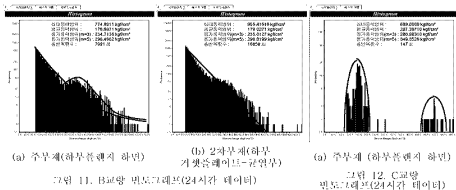
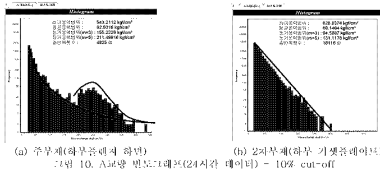
표 2. 이력열자와 화물열자의 승객별위 및도크레프 비교

| 구분  | 이력열자   | 화물열자  | 승객열자수                          |
|-----|--|---|--------------------------------|
| B교량 | <p>                     열차종류: 이력열자<br/>                     열차번호: 602-1965 kg/hr*<br/>                     열차길이: 116-1527 kg/hr*<br/>                     열차중량: 207-1561 kg/hr*<br/>                     열차속도: 173-0173 kg/hr*<br/>                     열차정지: 228-7278 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 660 명                 </p> | <p>                     열차종류: 화물열자<br/>                     열차번호: 890-36673 kg/hr*<br/>                     열차길이: 172-7012 kg/hr*<br/>                     열차중량: 250-3236 kg/hr*<br/>                     열차속도: 282-1120 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 2566 명                 </p> | 이력<br>(7대)                     |
|     | <p>                     열차종류: 이력열자<br/>                     열차번호: 607-0649 kg/hr*<br/>                     열차길이: 120-6218 kg/hr*<br/>                     열차중량: 173-0173 kg/hr*<br/>                     열차정지: 226-6218 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 1736 명                 </p>   | <p>                     열차종류: 화물열자<br/>                     열차번호: 905-4154 kg/hr*<br/>                     열차길이: 91-3816 kg/hr*<br/>                     열차중량: 242-2688 kg/hr*<br/>                     열차정지: 214-2024 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 2666 명                 </p>   | 화물<br>(12대)                    |
| C교량 | <p>                     열차종류: 이력열자<br/>                     열차번호: 608-0550 kg/hr*<br/>                     열차길이: 198-3843 kg/hr*<br/>                     열차중량: 287-1929 kg/hr*<br/>                     열차정지: 539-7043 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 122 명                 </p>  | <p>                     열차종류: 화물열자<br/>                     열차번호: 908-48910 kg/hr*<br/>                     열차길이: 215-9384 kg/hr*<br/>                     열차중량: 290-2544 kg/hr*<br/>                     열차정지: 250-7497 kg/hr*<br/>                     승객열자수: 99 명                 </p>   | 이력<br>(13대)<br><br>화물<br>(10대) |

표 2로부터 지간길이에 따른 열차종류별 승객별위 및도크레프의 특성을 보면 다음과 같다. 먼저 주부체에 대한 승객별위 및도크레프를 보면 지간이 짧은 B교량에서 이력열자에 대한 및도크레프는 기관차에 의해 발생되는 높은 승객별위의 분포와 객차에 의한 낮은 승객별위의 분포로 구분되어, 전체적으로는 지수함수 분포를 이루고 있다. 또한 화물열자도 이력열자와 비슷한 분포형상을 나타내나 폭중이 크기 때문에 중간열역이 크게 나타나는 특성이 있다. 그러나 지간이 긴 C교량은 열차종류에 관계없이 기관차 및 객차/화차의 중량특성이 반영되어 두 개의 대수분포를 나타내는 특성을 보이고 있다. 한편 2차 부체의 경우는: 그림 9의 승객열역에 나타난 것과 같이 집중성분이 많아 전체 승객별위에 걸쳐서 고주 분포되어 있어 적산열역의 지수함수 분포모양을 나타내: 것을 알 수 있다.

그림 10에서 12까지는 전체 1열 데이터로부터 얻어진 교량별 승객별위 및도크레프를 나타내었다. A, B, C 교량의 주부체를 비교해 보았을 때 지간이 짧은 A, B교량은 승객별위가 전체 승객별위에 걸쳐서 나타나며 C교량에 비하여 높은 승객별위의 값들이 상당의 많이 나타나: 특성은 가지며, 분포형상은 그림 10(a), 11(a)의 및도크레프의 특성을 볼 때 전체적으로 지수분포의 형태를 나타내나 중간열역에 화물차의 영향으로 보이는 특이한 영역은 분 수 있었다. 그러나 지간이 긴 C교량은 승객별위값만이 특정 승객별위에 분포되어 있으며, 그림 12에 나타난 것과 같이 2개의

대수분포 형상을 나타낼을 볼 수 있다. 한편, 2차부재의 경우는 그림 9 (c) 거룻플레이트 및 (f) 수평 브레이싱의 파형에서 볼 수 있듯이 전동성분이 많으며 표 2 및 그림 10(b), 11(b)의 2차부재의 빈도그래프에서 이력열차, 화살열차, 전체(이력+화살)의 데이터를 비교하여 보았을 때 그림 10(b)는 거의 직선형태에 가까운 저수분포 형태로서 거의 일정한 형상을 갖고 있다. 이로부터 2차부재의 경우는 하중의 크기에 의해 응력범위의 값들은 차이가 날 수 있었지만 지간에 의한 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.



#### 4.2 피로조사

자재 개발 피로평가가 프로시저를 사용하여 3개의 대상교량에 대해서 피로평가를 실시하였다. 계측위치의 부재상세에 따른 피로경도등급은 JSSC규정에 의해 선정하였다.

피로해석 결과 A, B, C로량의 주부재의 피로수명은 모두 무한수명을 갖는 것을 알 수 있었다. 이는 열차 통과시 발생하는 최대응력 범위가 설계기준에서 제시한 허용피로응력 범위보다 작은 값을 갖기 때문이다. 그러나, 2차부재의 경우는 A로량의 경우는 피로수명이 약 100년으로 산정되었으며, B로량의 경우는 5년 전후로 나왔다. B로량의 피로수명이 적은 이유는 거룻플레이트의 균열 부를 대상으로 계측하였고 열원 교량량도 A로량에 비하여 2배정도 많은 영향인 것으로 판단된다.

또한 응력범위 빈도그래프상에서 피로에 영향을 미치지 않는 응력범위를 고려하기 위한 cut-off를 2차부재에 적용한 결과를 보면 균열발생 유무에 관계없이 표 3에 나타낸 것처럼 15% cut-off까지는 피로수명에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 피로분열이 발생한 B로량의 2차부재에 비하여 균열이 발생하지 않은 A로량의 경우는 30% cut-off까지는 영향을 미치지

않는 것을 알 수 있다. 이로부터 강철도교에서의 cut-off는 주부재에서는 거의 영향을 미치지 않으나 2차부재의 경우는 cut-off의 정도에 따라 피로수명이 달라짐을 알 수 있다. 이는 피로강도등급이 주부재 보다 낮기 때문이다. 따라서 향후 철도교에서의 적절한 cut-off비를 제시하는 것은 합리적인 피로수명 산출에 중요한 요인이 되리라고 생각된다.

표 3. 피로조사 결과

| 대상교량<br>cut-off    | A 교량 피로수명(년) |        | B 교량 피로수명(년) |        | C 교량 피로수명(년) |
|--------------------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
|                    | 주부재          | 2차부재   | 주부재          | 2차부재   | 주부재          |
| 0%                 | 무한수명         | 91     | 무한수명         | 4.1    | 무한수명         |
| 5%                 |              | 91     |              | 4.1    |              |
| 10%                |              | 91     |              | 4.1    |              |
| 15%                |              | 91     |              | 4.1    |              |
| 20%                |              | 91     |              | 4.32   |              |
| 25%                |              | 91     |              | 4.61   |              |
| 30%                |              | 93     |              | 5.11   |              |
| 40%                |              | 146    |              | 7.09   |              |
| 이음종류               | 비용접이음        | 거룻용접이음 | 비용접이음        | 거룻용접이음 | 비용접이음        |
| 피로강도등급<br>(JSSC규정) | D            | G      | C            | G      | C            |

## 5. 결론

본 연구에서는 강철도교의 보다 효율적인 관리를 위하여 기술자들이 빈도그래프의 특성으로부터 대상교량의 제반사항 및 조건을 파악하기 쉽게 하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 연구에서 기술한 내용은 다음과 같다.

- 1) 국내의 강철도교는 판형교가 91%로 가장 많은 비율을 차지하며, 리벳교에 비하여 피로에 취약한 용접교의 공용년수가 30년을 초과하였다. 그리고 지간이 10m이하 및 10~20m의 교량의 공용년수가 50년 이상인 교량이 많으며, 최근 철도의 고속화, 중량화 추세에 따라 20m이하의 판형교에 대하여 보수보강 방안을 수립하는 것이 필요하다.
- 2) 지간이 긴 교량과 짧은 교량을 대상으로 실측응력 파형을 비교하였을 때 지간이 짧은 교량은 축중이 1개가 재하되고 하중이 완전 제거된 후에 다음 축중이 재하되므로 상호간 축중의 재하에 영향을 미치지 않으므로 파형의 끝이 깊게 나타난다. 반면, 지간이 긴 교량은 여러개의 축중이 동시에 재하되어 상호 축중의 재하에 영향을 미치므로 파형의 끝이 깊지 않게 나타난다. 이런 파형의 특성과 활하중에 의한 응력분담율의 증가로부터 지간의 길이가 피로손상에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있다.
- 3) 실측파형의 특성으로부터 볼 수 있듯이 지간이 짧은 교량은 파형의 끝이 깊으므로 응력범위 빈도그래프에 높은 응력범위분포의 빈도수가 지간이 긴 교량의 응력범위의 빈도수 보다 많은 것을 알 수 있다. 그리고 응력범위 빈도분포의 특성을 보면 지간이 짧은 교량은 지수형상의 분포로 넓게 퍼져있는 것을 볼 수 있으며 지간이 긴 교량은 기판차와 객차/화차의 분포가 확실히 구분된 대수분포의 형상으로 나타남을 볼 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 철도청, 강철도교의 잔존수명평가 및 유지관리기법 개발(II), 2003
2. 日本鋼構造協會編, 鋼構造物の疲労設計指針同解説, 技報堂出版, pp.5-pp.12, 1993.
3. (財)鐵道總合技術研究所, 鐵道構造物等設計標準同解説 - 鋼合成構造物, 2000
4. K.S. Kyung, S.W. Hong, H.H. Lee and J.C. Jeon, Deterioration and Stress Characteristic of Steel Railway Bridges in Korea, Proceeding of the JSPS-DOST Regional Symposium, 2002.9