

# 강철도교의 피로평가시스템 개발

## Development of Fatigue Assessment System for Steel Railway Bridge

경갑수\*                      최일윤\*\*                      이준석\*\*\*                      이준호\*\*\*\*  
Kyung, Kab-Soo              Choi, Il-Yoon                  Lee, Jun-Seok                  Lee, Jun-Ho

### ABSTRACT

As a method to execute efficient maintenance of steel railway bridge, in this paper, program for fatigue assessments of structural member of steel railway bridge were developed. This program is composed with 3 unit module program which variable stress analysis, fatigue assessment and fatigue crack propagation. The validity of developed program was verified from evaluating the result of filed measurement and program output.

### 1. 서론

2001년 12월 강철도교 통계자료조사에 의하면 1136개의 강철도교 가운데 공용년수가 50년을 초과하는 강철도교가 751개교의 64%를 차지하고 있어 노후화된 강철도교가 비교적 많은 것으로 조사되었다. 다만, 노후화된 강철도교가 비교적 피로에 대해 높은 저항특성을 가진 리벳형식의 강교량인 것으로 조사되었다. 그러나 1970년 중반이후에는 리벳형식의 강철도교를 대신하여 용접형식의 강철도교가 건설되기 시작하여 현재에 이르고 있다. 따라서 대다수의 용접형 강철도교의 공용년수가 30여년을 초과하고 있으므로 피로손상이 누적되어 2차부재 등에서 피로균열이 발견되고 있다. 이러한 피로균열은 강철도교 전체의 내하력이나 수명에 직접적으로 영향을 미치지 않으나 방치하는 경우에는 구조물에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 또한 강철도교는 사용 재료인 강재의 연성적인 특성에 의해 지속적인 반복하중에 따른 손상에 의해 피로균열이 발생하더라도 콘크리트 교량은 달리 정기적인 유지관리를 실시하면 이들 피로균열을 제어할 수 있어 교량구조물을 반영구적으로 사용할 수 있다. 그러므로 노후교량이나 피로손상을 받고 있는 교량의 지속적인 사용성 확보 및 기존 선로의 속도향상 등에 대응하기 위해서는 강철도교의 피로손상을 정확하게 판단하고 조치를 취할 수 있는 유지관리 체계를 구축하는 것은 중요한 것으로 판단된다. 그러나 현재 강구조물 유지관리는 담당기술자의 정성적이고 주관적인 판단에 의해 이루어지고 있는 요소들이 많다. 따라서 정량적이고 객관적인 유지관리 기법 구축 및 효율적인 유지관리 체계구축을 수행할 수 있는 요소기술을 개발하는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 유지관리 요소기술의 일환으로 강철도교의 잔존수명 및 피로평가를 실시할 수 있는 시스템 개발을 통하여 대상 구조물의 잔존수명 및 피로평가를 수행하는 시스템을 개발하고자 한다.

\* 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 스마트구조물연구그룹 선임연구원, 공학박사, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 레도·토목연구본부 본부장, 공학박사, 정회원

## 2. 시스템 개요

본 연구에서 개발한 강철도교 피로해석 및 잔존수명평가 시스템은 응력변동해석, 피로조사, 피로균열진전해석의 3가지 단위모듈 프로그램으로 구성되어 있다. 본 평가시스템에는 국내기준 및 일본 강구조 협회(JSSC ; Japan Society of Steel Construction) 등의 국내외의 피로설계기준을 적용하여 강철도교의 피로해석 및 잔존수명을 평가 할 수 있도록 구축되어 있다.

### 2.1 응력변동해석

본 단위 모듈 프로그램의 목적은 강철도교 잔존수명 평가의 기본인자인 응력범위를 평가대상의 구조상세부위에 대해 계산하는 것이다. 따라서 여기서 계산되어진 응력변동은 개별 단위 모듈 프로그램인 피로조사 및 피로균열 진전해석에서 기본자료로도 사용될 수 있다. 이 단위 모듈 프로그램의 기본 구성을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 작용하중은 2가지로 분류된다. 하나는 일정응력범위를 발생시키는 설계하중 등과 같은 표준하중을 사용하는 방법이며, 다른 하나는 변동응력범위를 산출하기 위하여 Montecarlo Simulation방법에 의해 실제 공용하중을 대상 교량에서 적용시키는 것이다.

이러한 활하중이 그림 2와 같은 영향면 위를 이동할 때 발생하는 변동응력을 계산하기 위해서는 영향면 위의 임의의 점에서의 종거가 계산되어 하중점 좌표가 영향면내의 어떤 삼각형 평면에 포함되었는가를 판단하고, 하중점 좌표를 그 평면의 평면식에 대입하여 영향면 종거를 계산한다. 그 종거와 하중의 곱이 하나의 하중에 의해 발생하는 응력이므로, 이 작업을 영향면상에 있는 모든 하중에 대해서 실시하면 어느 시점에서의 응력계산이 완료된다. 앞의 계산 값들을 Rainflow Counting Method에 의해 응력범위 빈도분포 작성한다.

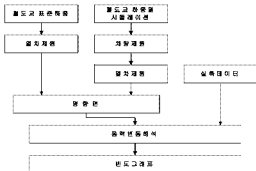


그림 1 응력변동해석 프로그램 흐름

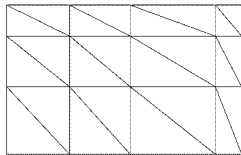


그림 2 영향면의 분할

### 2.2 피로조사

강철도교의 평가 대상 구조상세의 피로수명을 평가하는 단위 모듈 프로그램이다. 응력변동해석의 결과 또는 외부 실측 데이터를 사용하여 여기서 실시된 피로조사에 의해 대상구조 상세에 대한 잔존수명 등을 계산하여 대상교량의 전체적인 피로수명을 산출한다. 그림 3에 피로조사 단위 모듈 프로그램의 기본 구성을 나타내었다.

본 프로그램에서의 피로조사의 기본적인 방법 LS-22 등과 같은 설계하중 또는 공용열차하중 등의 하중조건하의 대상 구조부재에서 발생하는 응력범위와 설계기준에서 규정하는 허용피로응력범위(일정진폭응력범위 또는 변동진폭응력범위)를 비교하여 대상 구조부재의 피로안전성을 평가하는 것을 말한다.

본 프로그램에서 적용되는 피로설계시 및 유지관리에서의 일반적인 피로조사의 개념을 그림 4에 나타내었다. 여기서의 간편피로조사는 일반적으로 일정진폭에 의한 피로조사를 말하며, 상세피로조사는 변동진폭에 의한 피로조사를 말한다.

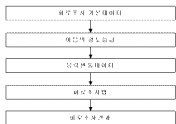


그림 3 피로조사 프로그램 흐름



그림 4 일반적인 피로조사 흐름

## 2.3 피로균열진전해석

균열을 가지는 대상 구조상세의 균열진전에 따른 피로 수명을 파괴역학적인 방법에 의해 계산하는 단위 모듈 프로그램으로 균열부재의 구조상세에 대한 피로수명을 계산하는 단위모듈 프로그램이다. 단위모듈 프로그램의 기본적인 흐름을 그림 5에 나타내었다.

## 3. 강철도교 피로해석 및 잔존수명평가 시스템

### 3.1 용력변동해석

#### 3.1.1 기본데이터(1)

그림 6은 프로그램의 3가지 기본모듈프로그램 모듈을 실행하기 위한 기본데이터(I),(II),(III)의 3가지 항목이며, 그림 7이 기본데이터(1)의 용력변동해석에 관련된 항목이다.

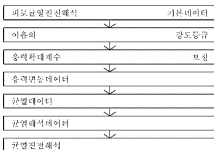


그림 5. 피로균열진전해석 프로그램 흐름

항목이며, 그림 7이 기본데이터(1)의 용력변

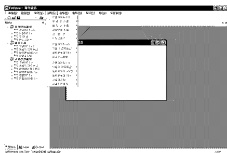


그림 6. 입력데이터

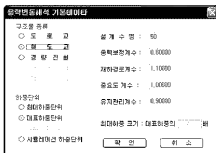


그림 7. 용력변동해석의 기본데이터

#### 3.1.2 하중 데이터

원도교에 대한 하중데이터 입력에서 "표준하중", "시뮬레이션 하중"의 2가지의 하중에 대한 선택 수가 있다.

표준하중에 의한 해석은 실제하중을 사용하는 해석으로 국내의 실제하중인 고속철도, LS-22, LS-18 이외에 일본의 철도하중이 제공되어있다.

시뮬레이션에 의한 해석에서는 대상 강교방을 통과하는 하중을 모사하는 하중으로 차량하중 및 열차제원을 Montecarlo Simulation에 의해 재현하는 것으로 국내 및 일본의 데이터가 제공되어있다.

### 3.1.3 영향면

앞에서 기술한 그림 2의 영향면을 입력하는 창으로서 본 프로그램에서의 영향면은 그림 8, 9, 10에 나타난 3가지 입력방식인 “구조해석”, “파일명 입력”, “사용자 입력”의 방법으로 구성되어 있다.



그림 8. 파일명 입력



그림 9. 사용자 입력

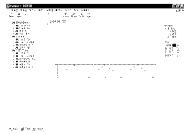


그림 10. 괄구조해석

## 3.2 피로조사

피로조사란 IS-22 등과 같은 설계 표준하중 또는 대상교량을 통과하는 선계의 공용연차하중 등의 설계조건하의 대상 구조부재에서 발생하는 응력범위와 설계기준에서 규정하는 허용피로응력 범위(일정진폭응력범위 또는 변동진폭응력범위)를 비교하여 대상 구조부재의 피로안전성을 평가하거나 또는 수평 Miner법칙에 의한 누적손상으로부터 피로안전성을 평가하는 것을 말한다.

### 3.2.1 기본데이터(2)

여기서는 그림 11에서 나타난 것과 같이 피로해석 기준, 피로해석 조사개수, 이음의 종류, 하중의 형태, 구조물 특성에 관한 데이터를 입력하는 것으로 구성되어 있다.

### 3.2.2 이음의 강도등급

여기서는 피로조사 대상구조상세의 피로저항 값인 피로강도 등급을 기본데이터(2)에서 선택한 피로해석 기준에 기초하여 입력하는 창으로서 입력방식으로는 파일입력, 대화상자입력, 사용자입력의 방법으로 입력한다. 그림 12에 대화상자 입력의 일례를 나타낸다.

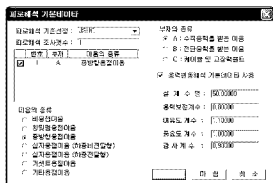


그림 11. 피로해석 기본데이터

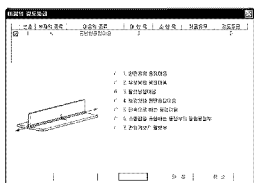


그림 12. 이음강도등급 입력

### 3.2.3 응력변동데이터

여기서는 피로조사 대상구조상세의 하중강도 값인 응력변동범위 값을 입력하는 창으로서 입력 방법으로는 “파일입력”, “직접입력”, “응력변동해석 값의 사용”의 방법으로 입력한다. 그림 13에 앞에서 기술한 응력변동해석 결과의 빈도그래프를 사용한 사례를 나타내었다.

### 3.2.4 피로조사

피로조사는 간헐식에 의한 피로조사, 등가응력범위에 의한 피로조사, 누적손상도에 의한 피로조사가 있다. 본 프로그램에서는 각 조사방법을 모두 선택하여 결과를 출력할 수 있다.

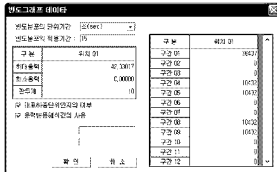


그림 13. 응력변동데이터 입력

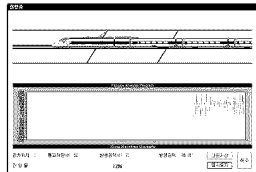


그림 14. 응력변동범위 시물레이션

## 4. 프로그램의 적용사례

### 4.1 대상교량

본 연구에서는 개발 프로그램의 타당성과 활용성을 검토하기 위하여 1998년에 건설된 경부선상에 위치한 지간 6m의 용접기교인인 죽계천 상행선교량을 대상으로 본 프로그램을 사용하여 응력변동 히스토그램을 도출하고 이것을 사용하여 대상교량의 피로조사를 실시하였다.

### 4.2 해석결과

그림 14에 나타낸 것과 같은 국내 기준역차 하중을 사용한 시물레이션 해석을 일정단위기간 동안 실시하고 이들 결과를 Rainflow 계수법을 사용하여 그림 15와 같은 응력빈도 히스토그램을 얻었다. 프로그램에서는 그림에 나타낸 것과 같이 응력빈도 히스토그램을 응력범위 폭 몇 컷오프(피로 평가시 영향을 미치지 않는 범위)를 실시할 수 있도록 되어 있다. 그림 16에 대상교량의 피로조사 결과를 나타내었다. 대상 교량은 피로에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있는 것을 알 수 있었다.

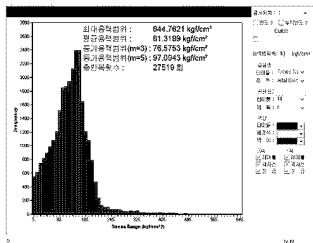


그림 15. 응력빈도분포

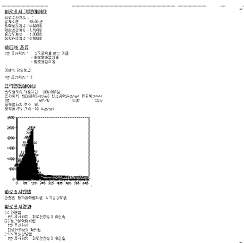


그림 16. 피로조사결과

## 5. 결론

본 연구에서는 강철도교의 보다 효율적인 유지관리를 위하여 현장 기술자가 쉽게 접근할 수 있으며, 또 현장의 자료를 사용하여 강철도교 구조부재의 피로수명을 정량적, 정성적으로 평가하는 프로그램인 강철도교 잔존수명 및 피로안전성 프로그램을 개발연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

개발된 프로그램을 사용하여 실제교량을 대상으로 피로조사를 실시한 결과 대상교량은 충분한 피로 안전성을 확보하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 프로그램에 적용된 알고리즘의 타당성 및 프로그램의 유용성을 확인 할 수 있었다. 그러나 본 프로그램의 사용성 및 활용성을 향상시키기 위해서는 프로그램의 Pre-/ Post-Processing의 기능 등과 사용예제의 개발 등을 통하여 보다 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 하는 등의 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

본 프로그램과 관련된 기본적인 알고리즘과 피로안전성 평가에서의 적절성 및 타당성에 대해서는 별도의 논문을 통하여 향후 소개하고자 한다.

## 참 고 문 헌

1. 철도청 통계연보, 2001.121
2. 철도청, 강철도교의 잔존수명평가 및 유지관리기법 개발(II), 2003
3. 경갑수, 이준석, 최일운, 이승용, 홍성욱, 현장계측결과에 기초한 강철도교의 응력특성, 2003 한국강구조학회 학술발표회, 2003. 6
4. 경갑수, 홍성욱, 부식이 강트러스 철도교의 응력특성에 미치는 영향, 2002 대한토목학회 학술발표회, 2002.11
5. 경갑수, 이준석, 최일운, 홍성욱, "국내 강철도교의 연화수상 사례분석", 2002년도 한국강구조학회 학술발표대회논문집, pp.32-pp.40, 2002.
6. 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.
7. (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
8. ECCS - Technical Committee 6 - Fatigue, "Good Design Practice - A Guideline for Fatigue Design" (2000)
9. ERRI - DT 176, "Statistical Analysis of Fatigue Tests on Steel Riveted Connections" (1986)
10. 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
11. UIC CODE 778-1 R, "Recommendation for the Consideration of Fatigue in the Design of Metal Railway Bridges" (1981)