

강교량 피로균열진전 프로그램 개발 및 검증

Development and Verification of Fatigue Crack Growth Program for Steel Bridges

경갑수* 권순철** 김이현*** 이준석**** 이희현*****

Kyung, Gab Soo Kwon, Soon Chul Kim, Hee Hyun Lee, Jun Seok, Lee, Hee Hyun

Abstract

In this paper, the program which can be estimate the fatigue life for the efficient management of steel bridge is developed and verified. From the analyses used the fatigue crack growth program developed for the several type of crack shape, it was known that the analyses results well agrees with the experimental results and the previous studies. From above the results, the validity of algorithms applied at the program and the usefulness of the program were verified. Therefore, it is expect that the program will use in the evaluation of fatigue life for the management and repair retrofit filed.

(국문요약)

본 연구에서는 강철도교의 보다 효율적인 유지관리를 위해 강철도교 구조부재의 피로수명을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하고 그 타당성을 검토하였다. 본 피로균열성장해석 개발프로그램을 사용하여 몇 가지 균열 형상에 대한 해석을 실시한 결과, 실험결과 및 기존 보고의 해석결과와 잘 일치하는 것으로 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 개발프로그램의 프로그램에 적용된 알고리즘의 타당성 및 프로그램의 유용성을 확인 할 수 있었던바 향후 유지관리 및 보수 보강 후의 강교량의 피로수명평가 등에 본 프로그램의 활용성이 기대될 것으로 판단된다.

1. 서론

현재 공용중인 국내 강철도교의 유지관리에서의 중요 과제의 하나로는 기존 철도의 속도향상에 따른 강교량 구조물의 내구성 확보, 기존선로 직선화 및 선로개량에 따른 노후 강교량의 건전성 확보와 사용성 유무의 판단 등이 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 판단을 위해서는 평가 시점에서의 대상 강교량의 정확한 내하력 및 내구성 등에 관한 충분한 자료가 필요하다.

국내 강철도교의 내구성 저하는 주로 피로와 부식에 의한 것으로 보고되고 있다. 이 가운데 부식은 도장열화와 관계가 깊다. 현재 공용중인 강철도교의 경우를 보면, 교량 경관의 중요성 및 기타 여러 가지 요인에 의하여 정기적으로 도장이 실시되고 있어서 부식 손상이 강교량 전체의 내구성 저하를 초래하지는 않을 것으로 판단된다.

한편 철도의 경우는 작용 축중이 도로교에 비하여 무겁고, 또 현행 강철도교의 50%이상이 지간 10m 이하의 단경간 구조이므로 축하중 영향이 크게 나타나 강철도교는 피로에 취약한 환경에 노출되어 있다. 다만 현재 공용중인 강철도교의 경우 비교적 피로에 높은 저항성을 갖는 리벳형식의 강교량이 많기 때문에 강철도교의 피로현상은 일부 피로저항이 취약한 구조상세에 대해 적합한 유지관리 및 피로손상에 대한 정확한 평가가 실시된다면 피로에 대한 안전성을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 선로 개량 및 직선화 구간에 피로균열 등과 같은 피로손상이 발생된 강교량이 존재하는 경우는 현재의 피로손상이 향후 어느 정도 기간까지 사용성을 확보할 수 있는가 등을 평가하는 것이 중요할 것이다. 이러한 경우는

* 한국해양대학교 건설환경공학부 부교수, 정회원

** 한국해양대학교 건설환경공학부 박사과정

*** 한국철도기술연구원 철도구조물 연구팀 선임연구원

**** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 본부장

***** (주)CTC 대표이사 공학박사

대상 강철도교의 피로손상에 대한 피로안전성의 평가 및 보수보강의 필요성 판단, 보수보강 후의 피로안전성 등의 평가하는 것이 요구된다.

피로안전성 평가 방법으로는 S-N선도를 사용하는 평가법, 기존 균열에 대한 피로균열진전해석에 의한 평가법이 대표적인 방법으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 이들 2가지 방법에 대한 피로안전성 평가를 현장 기술자가 용이하게 실행하여 강철도교 유지관리 효율성 확보를 목적으로 2가지 방법에 기초한 프로그램을 개발하고자 실시하였다. 본 논문에서는 이들 연구가운데 균열진전해석 개발프로그램의 소개 및 예제 적용을 통한 개발프로그램의 타당성 및 적용성 등을 검증하고자 한다.

2. 피로균열진전해석 프로그램

2.1 개요

피로균열진전해석은 반복하중하의 강구조물의 결함이나 기하학적 형상 변화부 등에서 발생하는 피로 균열을 대상으로 균열진전수명을 계산하는 것이다.

일반적으로 피로균열진전은 식 (2.1)과 같이 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 에 의해 나타낼 수 있다. 따라서 대상구조물에서의 피로균열진전수명 N 은 식 (2.1)을 초기균열 a_i 에서 한계 균열 a_c 까지 적분하여 식 (2.2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\dots \tag{2.1}$$

여기서, C 및 m 은 각각 재료상수이다.

$$\dots \tag{2.2}$$

여기서 ΔK 는 복잡한 함수형태로 주어지므로 식 (2.2)을 직접 적분할 수 없는 경우가 많으므로 대부분 수치적분에 의해서만 계산되어 진다.

피로균열진전 식은 응력확대계수범위가 어떤 한계값 이하(하한계응력확대계수범위 ΔK_{th})가 되면 피로 균열이 진전하지 않는 것을 고려하는 경우를 포함하면에는 다음과 같은 식으로 다시 정리할 수 있다. 본 연구에서는 국내 기준에 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 등과 같은 기본적인 기준값이 제시되어 있지 않아 일본 강구조협회의 강구조물 피로설계지침의 내용을 참조하였다.

$$\dots \tag{2.3}$$

$$\dots \tag{2.4}$$

$$\dots \tag{2.5}$$

2.2 개발프로그램에서의 균열

(1) 균열의 종류

개발프로그램에서는 균열을 내부균열과 표면균열로 분류하였다. 이 균열은 그림 2.1과 같이 균열깊이 a , 균열길이 b 에 의해 기하학적 형상을 정의할 수 있으며, 균열형상은 크게 타원형, 반타원형, 1/4타원형, 관통균열 등으로 분류할 수 있다.

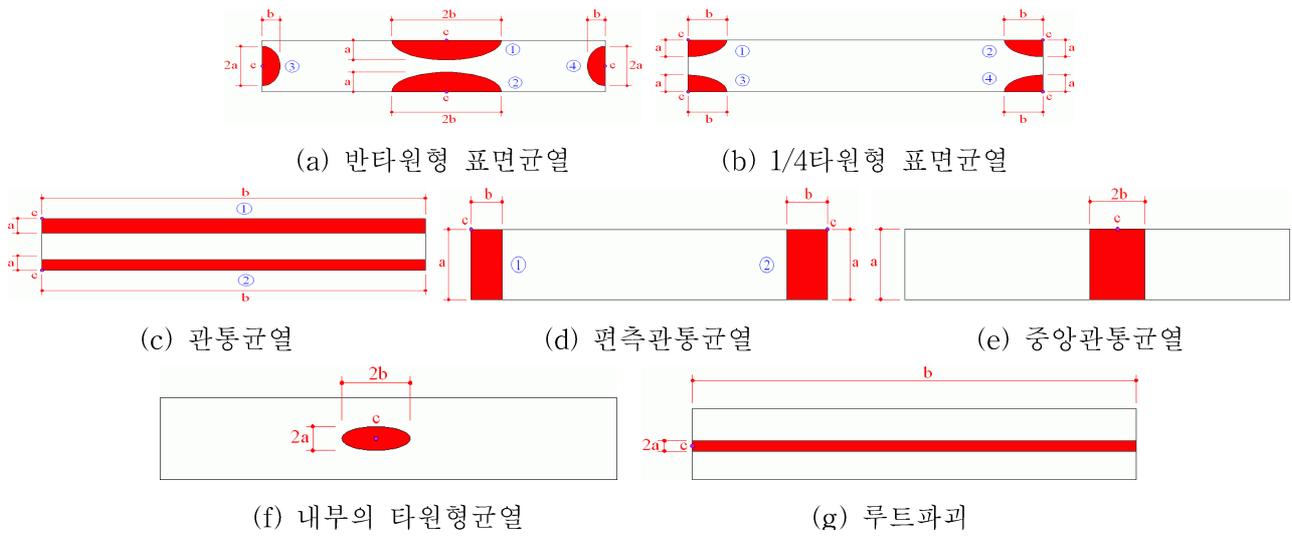
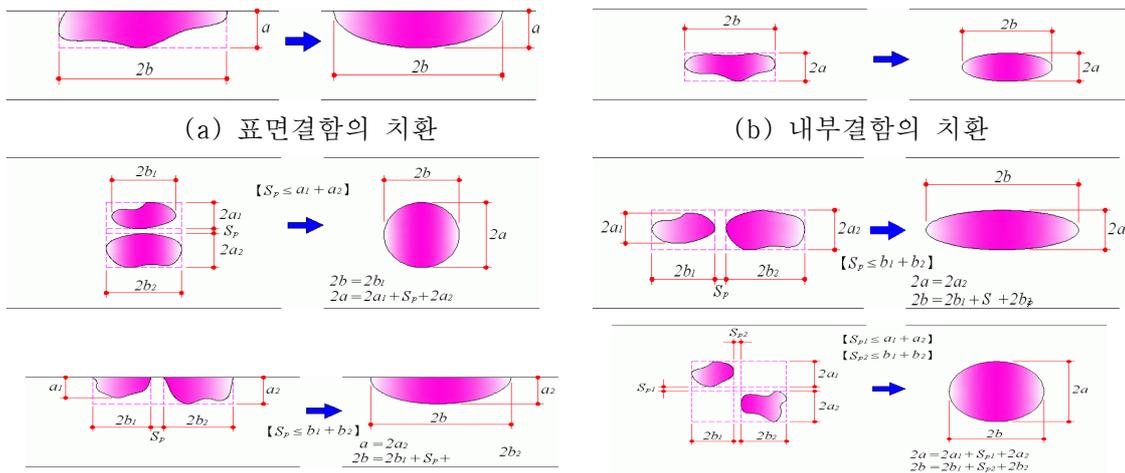


그림 2.1 균열형상

(2) 균열의 판별

프로그램에서는 균열을 기존의 연구 결과와 같이 비파괴검사 등에 의해 검출된 균열형상에 기초하여 그림 2.2와 같이 몇 가지 대표적인 형상의 균열로 치환하여 피로균열진전해석을 수행하도록 하였다.

언더컷 등과 같은 표면결함은 그림 2.2 (a)와 같이 직사각형에 내접하는 반타원형 균열로 치환하고, 블로우홀과 같은 내부결함은 결함을 둘러싼 직사각형에 내접하는 타원형 균열로 치환하였다. 동일면내에 복수결함이 인접해서 존재하는 경우는 그 간격이 그림 2.2 (c)와 같은 조건을 충족하는 경우에는 각 균열을 합체시킨 하나의 결함으로 본다. 또 결함면이 응력작용방향에 대해 기울어져 있는 경우에는 결함을 응력방향과 직각단면으로 투영하여 이것을 균열로 한다.



(c) 복수결함의 치환

그림 2.2 결함의 균열로의 치환

2.3 균열의 합체

강구조물의 피로균열은 일반적으로 국부응력이 가장 크거나 초기균열이 가장 크거나 하는 등의 가장 열악한 조건하에 놓여 있는 위치의 결함으로부터 발생하게 되는데, 경우에 따라서는 이들 피로균열은 균열이 진전되면서 주위의 다른 결함에서 발생된 피로균열과 합체하여 성장되는 경우가 있다.

이와 같은 복수균열을 해석하기 위해서는 균열 상호간의 간섭효과, 균열의 합체조건, 균열합체후의 균열형상, 균열치수의 재정의가 필요하다. 따라서 본 프로그램에서는 이와 같은 복수균열의 정의를 다음과

같이 하였다.

그림 2.3과 같이 각각의 결합에서 발생된 인접한 2개의 피로균열은 각 균열의 균열이 (a_1, b_1) , (a_2, b_2) 의 전면이 접촉된 시점에서 합체된 것으로 하였으며, 합체후의 균열깊이 a_3 은 a_1, a_2 의 어느 쪽의 큰 쪽과 같게 되고, 균열폭 b_3 은 b_1 과 b_2 의 합으로 하였다.

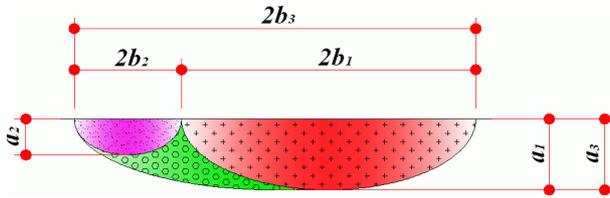


그림 2.3 균열의 합체

3. 피로균열진전해석 프로그램검증

강철도교의 대표적인 용접부에서 가장 많이 발생되는 대표적인 균열을 대상으로 개발된 프로그램을 수행하고 적용성 및 활용성을 검토하였다.

3.1 표면반타원균열

언더컷, 오우버랩 등과 같은 응력집중부로부터 발생하는 표면 반타원균열에 대한 피로균열성장해석 계산을 위한 기본 데이터는 다음과 같다.

- 부재의 크기 : 두께 16mm, 폭 70mm, 이음등급 : F등급, 응력범위 : 70MPa

이들 균열에 대한 기본 데이터를 기초로 본 연구에서 개발된 프로그램을 적용한 결과를 나타낸 것이 그림 3.1~3.8과 같다.

그림 3.1과 같이 기본데이터에서는 균열진전해석 대상의 개수, 이음의 종류, 사용강재를 지정하고, 그림 3.2의 이음의 강도등급에서는 사용자 편의성을 고려하여 강도등급을 쉽게 지정할 수 있도록 하였다.



그림 3.1 기본데이터

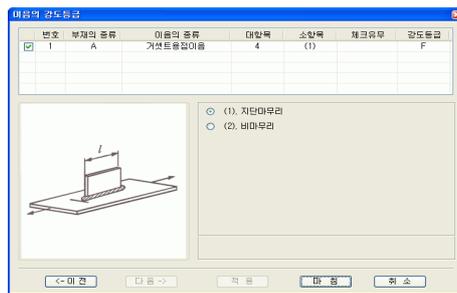


그림 3.2 이음의 강도등급

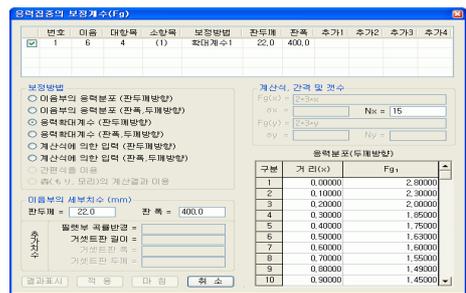


그림 3.3 보정계수(Fg)

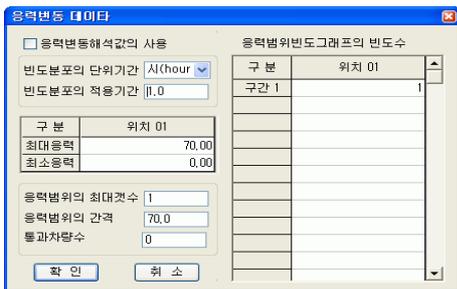


그림 3.4 응력변동데이터



그림 3.5 균열데이터

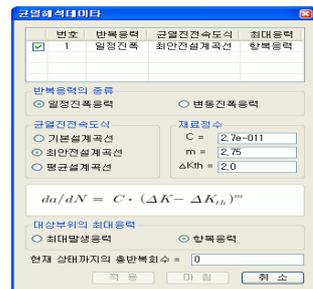


그림 3.6 균열해석데이터

피로균열진전해석에서 결함형상에 대한 보정계수 가운데 가장 중요한 응력집중에 대한 보정계수를 구하는 것은 그림 3.3과 같이 이음부의 응력분포에 의한 방법, 응력확대계수의 직접 입력법, 수식에 의한 방법, 간편식에 의한 방법을 선택하여 적용할 수 있도록 되어 있으며, 그림 3.5와 같이 균열데이터는 그림 2.1의 모든 균열형상에 따른 값을 편리하게 입력할 수 있도록 되어 있다. 또한 2.1에서 기술한 피로 균열진전해석에 관한 피로균열진전 해석데이터는 그림 3.6에 나타난 것과 같이 사용자 입력이 가능하도록 하여 다양한 검토가 이루어질 수 있도록 되어 있다.

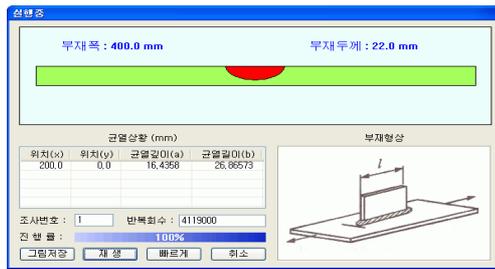


그림 3.7 균열진전해석 실행



그림 3.8 균열진전해석결과

그림 3.7은 균열진전해석과정의 일례를 나타내었다. 해석화면에서는 균열형상의 변화추이, 현재균열의 형상값, 부재의 형상 등을 나타내어 사용자가 해석결과를 확인하면서 해석이 수행되도록 하여 사용자의 이해력 증진을 도모하고자 하였다. 그림 3.8에 표면균열에 대한 해석결과와 예를 나타내었다. 이 해석결과로 얻어진 피로수명은 2.94×10^6 로 실제 피로시험에서 얻어진 실험결과 3.6×10^6 과 비교하면 20%내외의 오차를 나타내고 있는데, 이것은 해석에서의 응력확대계수 등의 균열진전에 따른 보정계수의 오차 및 한계균열의 정의 등에 의한 오차로 생각된다. 따라서 향후 이들 정보에 대한 보다 정확한 입력 데이터가 제공되면 보다 정확한 해석결과가 얻어질 수 있을 것으로 판단된다. 이로부터 개발된 해석프로그램의 타당성을 검증할 수 있었으며, 해석결과와 추정잔존수명은 대상균열에 대한 정량적인 수명을 나타낼 수 있으므로 향후 효율적인 철도교량의 유지관리에 일익을 담당할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 내부 블로우홀 결함

기공, 블로우홀 등과 같은 내부용접결함으로부터 발생하는 균열에 대한 피로균열성장해석 계산을 위한 기본 데이터는 다음과 같다.

- 부재의 크기 : 두께 12mm, 폭 100mm, 이음등급 : D등급, 응력범위 : 100MPa, 블로우홀의 크기 : 2.0 mm



그림 3.9 균열진전해석 실행



그림 3.10 균열진전해석결과

이 예제는 일본 강구조물 피로설계지침에 있는 설계 예제를 사용한 것으로 예제에서의 계산 결과는 피로수명은 2.029×10^6 이며, 본 개발프로그램의 해석결과와는 2.196×10^6 으로 거의 동일한 결과가 얻어

진 것을 확인할 수 있었다.

3.3 균열의 합체

복수의 균열이 존재하는 경우에 인접한 균열과의 합체가 발생하는 경우가 발생한다. 따라서 개발프로그램에서는 그림 3.11과 같이 두 개의 표면반타원균열로부터 진전되는 균열이 균열진전에 의해 그림 3.12와 같이 하나의 표면반타원균열로 합체되는 것도 가능하게 되어 있다.

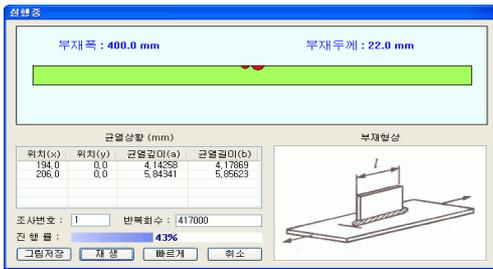


그림 3.11 균열합체 전

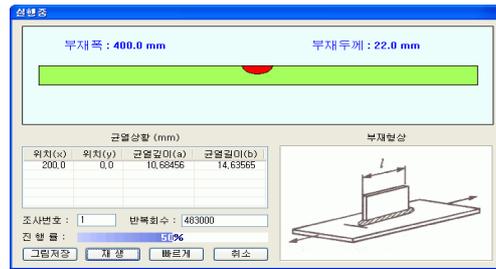


그림 3.12 균열합체 후

4. 결론

본 연구에서는 강철도교의 보다 효율적인 유지관리를 위하여 현장 기술자가 쉽게 접근할 수 있으며, 또한 현장의 자료를 사용하여 강철도교 구조부재의 피로수명을 정량적, 정성적으로 평가하는 프로그램인 강철도교 잔존수명 및 피로안전성 프로그램의 개발연구의 타당성을 검토하였다.

본 피로균열성장해석 개발프로그램을 사용하여 몇 가지 균열 형상에 대한 해석을 실시한 결과, 실험결과 및 기존 보고의 해석결과와 잘 일치하는 것으로 알 수 있었다. 일부 다소 차이가 있는 경우는 정확한 데이터의 미비 때문인 것으로 판단된다. 특히 균열진전해석을 위한 기초적인 자료가 국내에 축적되어 있지 않아 향후 보다 많은 자료가 축적되면 보다 합리적이고 실용적인 해석결과가 얻어질 것으로 예상된다.

이상의 결과로부터 개발프로그램에 프로그램에 적용된 알고리즘의 타당성 및 프로그램의 유용성을 확인할 수 있었던 바 향후 유지관리 및 보수 보강 후의 강교량의 피로수명평가 등에 본 프로그램의 활용성이 기대될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철도청, 강철도교의 잔존수명평가 및 유지관리기법 개발(Ⅱ), 2003
2. 경갑수, 이준석, 최일윤, 이승용, 홍성욱, 현장계측결과에 기초한 강철도교의 응력특성, 2003 한국강구조학회 학술발표회, 2003. 6
3. 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, 1993.
4. (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
5. UIC CODE 778-1 R, "Recommendation for the Consideration of Fatigue in the Design of Metal Railway Bridges" (1981)
6. ECCS - Technical Committee 6 - Fatigue, "Good Design Practice - A Guideline for Fatigue Design" (2000)
7. ERRI - DT 176, "Statistical Analysis of Fatigue Tests on Steel Riveted Connections" (1986)
8. 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

9. 慶甲秀, 高强度鋼を用いた溶接鋼橋梁の疲勞強度向上に関する研究, 1995