

강철도교의 활하중-사하중 비에 따른 확률기반 피로수명 평가

이상목, 이영주*
울산과학기술원 도시환경공학부

Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Steel Railway Bridges according to Live-Dead Loads Ratio

Sangmok Lee, Young-Joo Lee*

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

요약 강철도교에 대한 확률기반 피로 수명 평가를 위한 많은 연구들이 그간 있어 왔지만, 대부분 상대적으로 단순한 피로 균열 진전 모델을 기반으로 한 연구들이었다. 이 모델은 최소 응력이 0이고 일정한 응력변동 진폭을 가정하기 때문에, 철도교의 피로수명 평가에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 보다 고도화된 균열 진전 모델을 이용해 강철도교의 피로 수명을 평가하는 새로운 확률기반 기법을 제안하였다. 또한 이 기법은 철도교에서 흔히 발생하는 다양한 하중 변동 진폭을 **rainflow cycle counting algorithm**을 사용해 고려할 수 있어, 보다 현실적인 피로 수명을 평가할 수 있다. 제안된 기법을 강철도교 예제 모델에 적용하여 피로 수명을 주요 부재 및 시스템에 대해 평가하였다. 또한 다양한 활하중-사하중 비가 피로 수명에 끼치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 활하중-사하중 응력 비가 0에서 5/6까지 증가함에 따라 부재와 시스템 수준 모두에서 피로 수명이 30년 내외까지 줄어드는 것을 확인하였다.

Abstract Various studies have been conducted to evaluate the probabilistic fatigue life of steel railway bridges, but many of them are based on a relatively simple model of crack propagation. The model assumes zero minimum stress and constant loading amplitude, which is not appropriate for the fatigue life evaluation of railway bridges. Thus, this study proposes a new probabilistic method employing an advanced crack propagation model that considers the live-dead load ratio for the fatigue life evaluation of steel railway bridges. In addition, by using the rainflow cycle counting algorithm, it can handle variable-amplitude loading, which is the most common loading pattern for railway bridges. To demonstrate the proposed method, it was applied to a numerical example of a steel railway bridge, and the fatigue lives of the major components and structural system were estimated. Furthermore, the effects of various ratios of live-dead loads on bridge fatigue life were examined through a parametric study. As a result, with the increasing live-dead stress ratio from 0 to 5/6, the fatigue lives can be reduced by approximately 30 years at both the component and system levels.

Keywords : Advanced crack propagation model; fatigue life; live-dead loads ratio; probabilistic fatigue life evaluation; steel railway bridge

1. 서론

현대 사회에서 많은 사람들의 일상생활에 중요한 역

할을 하는 철도 시스템은 피로에 취약한 것으로 알려져 있다[1]. 특히 철도교는 생애주기 동안 반복적인 철도 하중에 노출되어, 피로 손상 및 파괴의 위험성을 갖고 있

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(18SCIP-B066018-06)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Young-Joo Lee(Ulsan National Institute of Science of Technology)

Tel: +82-52-217-2825 email: ylee@unist.ac.kr

Received November 11, 2018

Revised December 31, 2018

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

다. 따라서 효과적인 철도교 설계 및 유지관리를 위해서는 피로 수명을 보다 정확하게 평가할 필요가 있다. 그러나 교량의 노후화, 열차 하중, 주변 환경과 관련된 다양한 불확실성 요인들로 인해 정확한 피로 수명을 평가하는 것에 많은 어려움이 있으며, 철도교의 실제 하중을 반영할 수 있는 적절한 피로 균열 진전 모델을 사용하는 일도 피로 수명 평가에 있어 중요하다.

교량의 피로 수명 평가에는 흔히 두 가지 접근 방법이 사용된다. 첫 번째 방법은 일정한 응력변동 진폭(S)과 파괴까지의 하중 재하횟수(N) 사이의 관계를 실험적으로 결정하는 S-N 곡선 방법이다. Miner's rule[2]이라고도 하는 Palmgren-Miner 선형 손상 가설을 통해 피로 파괴까지의 하중재하 횟수를 예측함으로써 S-N 곡선을 피로 수명 평가에 사용한다. 한편, 두 번째 접근법인 파괴 역학(Fracture Mechanics) 기반 방법에서는 초기 균열과 균열진전 특성을 주로 사용하며, 균열 선단에서의 응력장도 고려한다.

이러한 두 가지 접근 방법은 각각의 장단점을 갖고 있다. 예를 들어 S-N 곡선 방법은 교량 설계 단계에서의 피로 수명 평가에 주로 사용되고, 파괴 역학적 방법은 균열 길이에 따른 피로 수명을 평가하거나 효율적인 검사와 유지관리 전략 수립을 위한 의사결정에 이용된다[3].

하지만 S-N 곡선은 실험을 통해서만 구할 수 있기 때문에, 교량의 현재 상태에 기초한 확률론적 수명 평가에 활용하기에는 제한적이며, 따라서 확률기반 수명 평가에는 파괴 역학적 방법이 자주 이용된다. 이 방법은 특정 크기의 초기 균열이 하중에 의해 성장하는 것을 피로 주기와 연관시키는 방법이며, 현재까지 비교적 다양한 관련 연구가 수행되어 왔다. Fisher (1984)[4]는 파괴 역학적 방법과 관련 이론들을 이용해서 강 교량의 피로 균열 현상에 대한 25개 이상의 사례연구를 수행하였다. Agerskov & Nielsen (1999)[5]는 변동 하중 조건에서 강교의 누적 피로 손상에 대해 연구하였고, 파괴 역학 해석을 통해서 용접 연결부의 피로 수명을 결정하였다. MacDougall *et al.* (2006)[6]는 균열 성장을 평가하기 위해서 선형 탄성 파괴 역학 모델을 사용하여 단경간 및 중경간 교량의 피로 수명 차이를 강 스프링과 공기 스프링 차량의 연속적인 통행 효과에 대해서 각각 정량화하였다. Xiao *et al.* (2006)[7]은 Kinuura 교량의 구조 요소들로부터 얻은 실험 데이터와 선형 탄성 파괴 역학 이론을 기반으로 하여 2-3mm 용접부의 부족이 맞대기 용접

연결부의 피로 강도가 낮아지게 한다는 것을 발견하였다. Imam *et al.* (2008)[8]은 리벳 연결 철도교에 대한 확률론적 피로 평가 방법론을 제안하였고, 이후에 열차 하중 데이터를 활용하여 영국에서 흔히 볼 수 있는 단경간 리벳 연결 철도교의 피로 평가를 수행하는 데에 제안된 방법을 적용하였다. 이와 유사하게, Park *et al.* (2005)[9], Zhao *et al.* (1994)[10], Madsen (1983)[11]은 파괴 역학적 방법을 이용해서 교량의 피로 신뢰성 해석을 수행하였다. 또한 Lukić & Cremona (2001)[12]은 피로에 의해 손상을 입은 강제 요소에 대한 확률론적 평가를 위한 균열 진전 모델을 제안하였고, 이를 일반적인 강교에 적용하였다. 또한 Lee *et al.* (2017)[13]과 Lee & Cho (2016)[14]는 교량의 구조건전성 모니터링 결과를 바탕으로 확률기반 피로수명을 업데이트하는 기법을 제안하였다.

이렇듯 철도교 요소들의 피로 파괴 평가를 위한 모델을 제시하는 연구들은 많지만, 확률론적 피로 수명에 중점을 둔 기존 연구들의 기법들은 부재의 최소 응력과 일정한 하중 변동 진폭 조건을 갖는 상대적으로 단순한 균열 진전 모델을 사용하기 때문에 철도교의 피로수명 평가에는 적합하지 않다. 그동안의 실험 결과에 따르면 구조물의 피로 수명은 평균응력과 응력변동 진폭에 따라 변하며[15, 16], 철도교의 경우 이는 활하중과 사하중의 비에 따라 결정된다.

따라서 본 연구에서는 강철도교의 보다 정확한 피로 수명 평가를 위해서 향상된 균열 진전 모델을 이용한 새로운 확률론적 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 균열 진전 모델이 부재의 최소 응력과 계속 변하는 하중 변동 폭을 적절히 반영할 수 있도록 일련의 공식이 유도된다. 제안된 방법을 검증하기 위해, 철도교 수치모델을 구축하여 피로 수명을 평가하였다.

2. 확률기반 피로 수명 평가

구조신뢰성 문제에서 파괴 확률을 계산하기 위해서는 관심 사건을 확률 변수들과 결정론적 파라미터들의 함수인 한계 상태 함수로 정의하는 과정이 필요하다[5, 7]. 앞서 언급되었듯이 많은 연구자들이 교량의 피로 신뢰성 해석을 위해서 S-N 곡선 방법 또는 선형 탄성 파괴 역학을 기반으로 다양한 방법들을 개발하였다. 흔히 사용되

는 선형 탄성 파괴 역학 기반의 수치적 모델은 Paris 식이다[17, 18]. Paris 식을 바탕으로 Lee & Cho (2016)[17]와 Lee & Song (2014)[18]는 피로 파괴로 인한 구조적 위험성을 평가하기 위해 일련의 공식을 유도하였다. 이렇게 유도된 공식은 부재의 최소 응력이 0인 것과 일정한 하중 변동 진폭을 가정하는 Paris 식[17]을 기반으로 하였기 때문에, 열차하중으로 인한 부재의 최소 응력과 하중 변동 진폭이 가변적인 실제 철도교에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Lee & Cho (2016)[14]와 Lee & Song (2014)[18]에 의해 제안된 한계 상태 함수를 수정하여 실제 철도교의 피로 수명 평가에 적용 가능하도록 하였다.

먼저 Walker 식[16]을 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \right)^{m_0} \quad (1)$$

여기서 a 는 균열 길이, N 은 하중 재하횟수를 나타내고, C_0 , m_0 , γ 는 재료특성 값, R 은 응력 비, ΔK 는 응력확대계수의 폭을 나타낸다. 그리고 응력 비(R)는 반복 하중의 한 주기에서 최대 응력(σ_{max})에 대한 최소 응력(σ_{min})의 비로 정의된다.

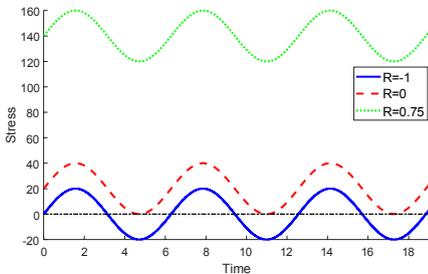


Fig. 1. Cyclic loading for various values of R

Fig. 1은 다양한 응력 비(-1, 0, 0.75)에 따른 주기 하중을 보여준다. 응력 비가 -1인 경우, 동일한 크기의 압축과 인장이 반복적으로 작용한다. 응력 비가 0일 때는 최소 응력이 0이면서 인장 하중이 지배적인 특별한 경우에 속한다. 이 조건에서는 R 이 0이 되어 Walker 식이 Paris 식과 같아지게 된다. 하지만 일반적인 철도교의 경우, 사하중이 활하중에 비해 큰 편이며, 만약 활하중과 사하중의 비가 1/3이라면, 응력 비는 0.75가 되고, 이때 교량은 Fig. 1에 나타나 있는 녹색 그래프와 같은 응력

진동을 경험하게 된다.

한편 식 (1)에서, 응력확대계수 폭은 Newman 근사법 [19]을 통해서 계산할 수 있다.

$$\Delta K = \Delta S \cdot Y(a) \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서 ΔS 는 응력 폭, $Y(a)$ 는 기하함수를 나타내는데, 여기에서 응력 폭은 그 정의에 따라 앞서 언급된 S-N 곡선에서 S 가 나타내는 진폭의 두 배를 의미한다. 그리고 $Y(a)$ 는 균열 형상에 따라 달라지는 무차원 파라미터이다. 식 (2)을 식 (1)에 대입하면 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{[Y(a) \cdot \sqrt{\pi a}]^{m_0}} da = C_0 \left(\frac{\Delta S}{(1-R)^{1-\gamma}} \right)^{m_0} dN \quad (3)$$

만약 하중 진폭이 일정하다면, Lee & Cho (2016)[14]과 Lee & Song (2014)[18]에서 기술된 바와 같이 식 (3)은 구조물의 피로 수명 평가를 위한 식으로 전개될 수 있다. 하지만 열차가 교량 위를 통과할 때 단일 부재에서 발생하는 응력이 계속 변화하기 때문에 식(3)은 있는 그대로 사용될 수는 없으며, 적절히 수정될 필요가 있다.

Rainflow cycle counting algorithm[20]은 특히 기계공학 분야에서 다양한 변동 폭을 갖는 하중을 다루면서 구조물의 피로 수명을 평가하는 데 사용된다. 일반적으로 이 알고리즘은 계측 결과나 시뮬레이션 결과를 통해서 얻는 하중, 응력 또는 변형률 이력으로부터 주기를 추출한다. 그런 다음 주기를 집계하고 다양한 하중 변동 폭과 평균값에 따른 여러 주기와 반주기를 얻는다. 이 알고리즘은 누적 피로 손상 가설(Paris 식과 Miner's rule)을 따르기 때문에, 임의의 하중 조건에서 예상 피로 수명을 이론적으로 계산할 수 있는 이점을 가지고 있다[20].

응력 폭(ΔS_i)과 해당 하중재하 횟수(n_i), 응력 비(R_i)가 식 (3)의 초기 상태에서 현재 시점까지의 적분을 위해서 사용되고, 따라서 현재 균열 길이와 지속 시간 사이의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_a^a \frac{1}{[Y(a) \cdot \sqrt{\pi a}]^{m_0}} da = C_0 \cdot v_0 \cdot T \cdot \sum_{i=1}^{N_{amp}} \left[n_i \left(\frac{\Delta S}{(1-R)^{1-\gamma}} \right)^{m_0} \right] \quad (4)$$

여기서 a^0 는 초기 균열 길이, v_0 는 열차하중 재하 빈도, T 는 지속 시간, N_{amp} 는 전체 응력 변동 수를 나타낸다. 균열 길이가 임계 균열 길이(a^c)를 초과할 때 균열 파괴가 일어난다고 가정한다면, a^0 에서 a^c 까지 소요되는 시간(T)은 다음과 같다.

$$T = \frac{\int_{a^0}^a \frac{1}{[Y(a) \cdot \sqrt{\pi a}]^{m_0}} da}{C_0 \cdot v_0 \cdot T \cdot \sum_{i=1}^{N_{amp}} \left[n_i \left(\frac{\Delta S}{(1-R)^{1-Y}} \right)^{m_0} \right]} \quad (5)$$

주어진 시간 구간 $[0, T_s]$ 에서 j 번째 부재 파괴에 대한 한계상태함수는 다음과 같이 표현된다.

$$g(\mathbf{X}) = T_j^0 - T_s \quad (6)$$

$$= \frac{\int_{a^0}^a \frac{1}{[Y(a) \cdot \sqrt{\pi a}]^{m_0}} da}{C_0 \cdot v_0 \cdot T \cdot \sum_{i=1}^{N_{amp}} \left[n_i \left(\frac{\Delta S}{(1-R)^{1-Y}} \right)^{m_0} \right]} - T_s$$

여기서 \mathbf{X} 는 확률변수 벡터, T_j^0 는 j 번째 부재가 피로 파괴에 도달하는 시간을 나타낸다. 구조 신뢰성 문제에서, $g(\mathbf{X}) \leq 0$ 은 일반적으로 파괴가 일어났음을 의미한다.

철도교를 다수의 부재들로 구성된 하나의 구조 시스템으로 본다면, 교량 시스템의 파괴는 개별 부재들의 파괴 사건들에 대한 Boolean function에 의해 표현될 수 있다. 그리고 Boolean function으로 표현된 시스템 사건의 확률을 얻기 위해서는 시스템 신뢰성 해석이 필요하다. 본 연구에서는 어느 하나의 부재가 파괴되면 교량 전체가 파괴된다고 가정하고, 이때의 시스템 파괴확률 (P_{sys})을 다음과 같이 표현한다.

$$P_{sys} = P \left[\bigcup_{j=1}^{N_{mem}} (T_j^0 < T_s) \right] \quad (7)$$

피로 파괴확률을 계산하기 위해서는 신뢰성 해석이 수행되어야 하는데, 부재 수준에서는 식 (6), 시스템 수준에서는 식 (7)이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 개발된 다양한 신뢰성 해석 방법들 가운데 FORM(First Order Reliability Method)과 SORM(Second Order Reliability Method)[21]을 사용하여 부

재 수준에서의 신뢰성 해석을 수행한다. 신뢰성 해석 소프트웨어인 FERUM(Finite Element Reliability Using Matlab)[22]의 코드 일부를 수정하여 사용하였는데, 이 소프트웨어는 University of California, Berkeley에서 개발되었다. 그 다음에는 다수의 부재들로 구성되는 하나의 시스템에 대한 파괴 사건을 시스템 사건으로 표현한 후, 시스템 수준의 신뢰성 해석을 수행한다. 본 연구에서는 어느 하나의 부재가 파괴되면 교량 시스템 전체가 파괴된다고 가정하기 때문에 큰 규모의 병렬 시스템의 확률계산이 가능한 multivariate normal integral method[23]을 이용하여 시스템 확률을 계산하였다. 여기부터 논문을 작성한다.

3. 수치예제

3.1 강철도교 예제

피로 수명 평가를 위해 제안된 방법의 검증을 위해, Fig. 2에 나타나 있는 강철도교 모델에 적용하였다. 예제 교량은 총 길이 95m, 높이 21m, 폭 10m이고, American Society for Testing and Materials (ASTM) A36 강으로 모델링되었다.

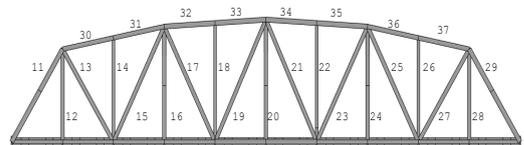


Fig. 2. Steel railway bridge example

보통의 American Amtrack 열차로 가정한 시험 열차가 교량을 통과할 때 부재의 축 응력은 동적 해석을 통해서 분석될 수 있다. 동적 해석 결과, 가장 큰 응력이 발생하는 부재의 번호(Fig. 2 참조)들을 순서대로 나열하면 13, 27, 8, 6, 7인 것으로 확인되었다. 이 부재들에 발생하는 최대응력은 Table 1에 정리하였으며, 그 중에서도 13과 27 부재에서 발생한 응력 수준이 다른 부재들에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 아울러 열차가 지나가는 중에 부재 응력이 어떻게 변하는지를 분석하였고, 그 중 13과 27 부재의 응력 이력이 Fig. 3에 나타나 있다.

Table 1. Maximum stress values of the five structural members with the overall highest stress values

Member No.	13	27	8	6	7
Maximum stress (MPa)	32.82	32.48	21.26	20.73	20.73

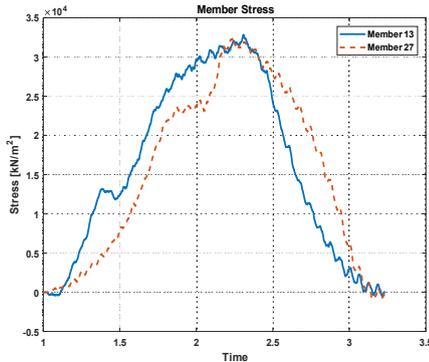


Fig. 3. Stress history for Members 13 and 27

다음으로, 앞서 구한 응력 이력에 rainflow cycle counting algorithm이 적용된다. 이 알고리즘은 다양한 하중 변동 폭을 고려한 기계요소 또는 구조물의 피로 수명 평가를 위해 널리 활용되어 왔다. 일반적으로 이 알고리즘은 계측 또는 시뮬레이션을 통해 얻은 하중, 응력 또는 변형률 이력을 사용해서 주기를 구하지만, 본 연구에서는 Nieslony (2009)[20]이 개발한 rainflow counting 코드를 교량 트러스 모델의 시뮬레이션 결과에 적용하여 응력 폭과 재하횟수를 구하였다. 이렇게 구한 데이터는 식 (6)에 적용되어 파괴확률을 계산하기 위해 사용되었다.

한편 식 (6)의 응력 비(R)는 사하중과 활하중의 비를 토대로 결정할 수 있다. 이는 교량의 피로 수명 평가에 있어서 평균 응력의 영향을 고려할 수 있게 한다. 본 예제에서는 우선 전체 하중(사하중과 활하중의 합)에 대한 사하중의 비인 응력 비(R)를 0.75로 가정하였는데, 이는 활하중이 사하중의 1/3임을 의미한다. 아울러 교량 피로 수명에 있어서 평균 응력에 대한 영향을 분석하기 위해, 다양한 응력 비(R)에 따른 파라미터 연구가 추가적으로 수행되었다.

3.2 확률변수와 결정론적 파라미터

본 연구에서는 확률변수의 통계적 특성은 관련 문헌 [13,18,24-27]을 참고하여 결정되었다. 각 확률변수의 평

균, 변동계수, 분포유형이 Table 2에 요약되어 있다. 본 수치예제에서는 확률변수들은 각각 정규분포(normal distribution), 로그정규분포(log-normal distribution), 지수분포(exponential distribution)로 가정되었지만, 만약 확률분포의 불확실성을 보다 정확히 표현할 수 있는 겐벨분포(Gumbel distribution) 또는 와이불분포(Weibull distribution)와 같은 다른 분포가 있다면, 이 역시 해석에 사용할 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 방법이 앞서 언급된 확률분포들을 포함해 총 16 가지의 확률분포에 대한 신뢰성 해석을 가능하게 하는 FERUM을 사용하기 때문이다. 아울러 본 예제에서는 C만 확률변수로 고려되었고, m과 γ 은 각각 3.344와 0.7352로 가정되었는데, 이 또한 문헌조사를 통해 결정되었다.

Table 2. Statistical properties of random variables (RVs)

RVs	Mean	Coefficient of variation	Distribution type	# of RVs
C	$1.537 \times 10^{-12} \text{ m/cycle} / (\text{MPa} \cdot \text{mm})^m$	0.2258	Log-normal	5
a^0	0.11mm	1.0	Exponential	5
I	1.0	0.1	Log-normal	1

(#: number)

상관계수의 경우, 모든 개별부재들에 대해 Paris 식의 파라미터 C의 상관계수와 초기 균열 길이(a^0)의 상관계수를 각각 0.6으로 간주하였다. 이는 부재들이 같은 업체에서 생산되었고, 따라서 부재간의 재료특성이 높은 상관관계를 가짐을 나타낸다. 이를 제외한 모든 확률변수들은 서로 독립으로 가정하였지만, 이에 대한 별도의 데이터가 있다면 다른 상관계수 값들도 적용 가능하다.

그 밖의 결정론적 파라미터로는, L-bracket 폭(b)은 650mm, 임계 균열 길이(a^c)는 12.7 또는 19.05mm, 일평균 열차운행은 20으로 결정하였다. 식 (2)에서 기하함수 $Y(a)$ 는 I형강에 대한 다음의 함수를 적용하였다[25].

$$Y(a) = 1.122 - 0.231 \left(\frac{a}{b} \right) + 10.550 \left(\frac{a}{b} \right)^2 - 21.710 \left(\frac{a}{b} \right)^3 + 30.382 \left(\frac{a}{b} \right)^4 \quad (7)$$

4. 해석결과

Fig. 4는 대상 부재들의 사용 기간에 따른 신뢰성 지수를 보여준다. 전반적으로 교량의 신뢰성 지수는 사용 기간이 증가함에 따라 감소하는데, 이는 교량의 사용 증가가 피로 파괴 확률의 증가로 이어진다는 것을 의미한다.

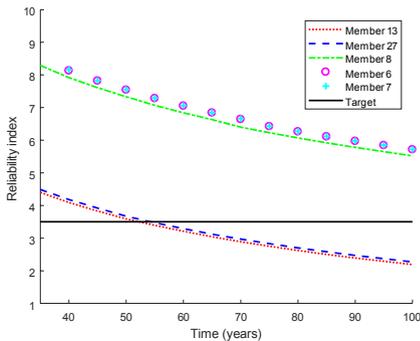


Fig. 4. Reliability indices for five selected members obtained via proposed method ($R=3/4$)

한편 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에서는 설계 기준에서 목표 신뢰성 지수를 3.5로 제한하고 있는데, 이는 Lee & Cho (2016)[14]와 Lee *et al.* (2017)[13]에서 언급되었듯이 파괴확률 2.33×10^{-4} 에 해당하는 값이다. 이에 본 예제에서는 이 목표 신뢰성 지수를 기준으로 삼아서 대상 부재들의 피로 수명을 평가하였다(Fig. 5 참조). 그 결과, 13과 27 부재의 피로 수명은 각각 52.3년과 54.3년으로 평가되었고, 반면에 다른 부재들은 100년을 초과하는 것으로 분석되었다. 3.1절에서 언급되었듯이, 이러한 차이는 주로 13과 27 부재가 상대적으로 큰 응력을 받기 때문에 발생한다. 이렇듯 13과 27 부재가 가장 짧은 피로 수명을 갖기 때문에, 이후 해석에서는 이 두 부재에 중점을 두고자 한다.

한편, 대상 부재들에 대해서 Walker 식의 파라미터와 초기 균열 길이의 상관계수를 0.6, 목표 신뢰성 지수를 3.5로 가정하면, 예제 교량 시스템의 피로 수명은 70.7년으로 평가된다.

이와 같은 방식으로 다양한 응력 비에 따른 부재 수준과 시스템 수준에서의 피로 수명이 평가될 수 있다. 본 연구에서는 응력 비(R)를 0, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6로 달리하면서 해석을 수행하였다. 각 응력 비에 따른 해석 결과가 Fig. 5에 나타나있고, 해당 피로 수명이 Table 3에 정리되어 있다. 이 해석 결과로부터 응력 비가 증가함에 따라

대상 부재들과 교량 시스템의 피로 수명이 감소함을 확인할 수 있다.

Table 3. Statistical properties of random variables (RVs)

R	Fatigue life (years)		
	Member 13	Member 27	System
0	75.4	78.2	70.7
2/3	56.3	58.6	53.0
3/4	52.3	54.3	49.0
4/5	49.1	51.0	46.1
5/6	46.8	48.6	44.1

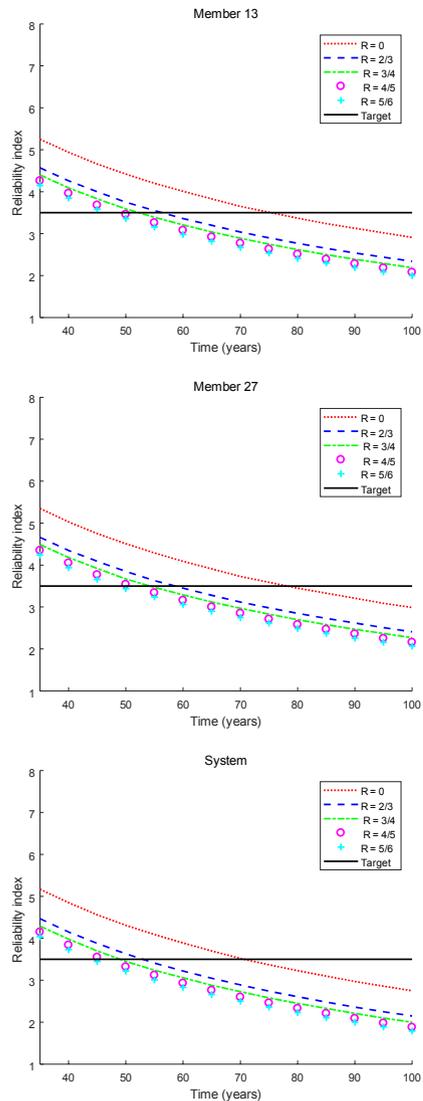


Fig. 5. Reliability indices for two selected members and the entire system, as derived via the proposed method

5. 결론

본 연구에서는 강철도교의 피로 수명 평가를 위해 향상된 균열 진전 모델을 사용한 새로운 확률적 방법을 제시하였다. 이전 연구들의 한계점을 극복하고 보다 정확하게 강철도교의 피로 수명을 평가하기 위해서 부재의 최소 응력과 하중변동 폭에 대한 변화를 고려할 수 있는 향상된 균열 진전 모델인 Walker 식이 사용되었다. 또한 다양한 하중 변동 폭을 고려해 피로수명 평가를 수행하기 위해 rainflow cycle counting algorithm이 도입되었다. 이들을 바탕으로 일련의 공식이 유도되었으며, 유도된 식을 한계상태함수로 고려한 신뢰성 해석에 의해서 피로 파괴 확률을 계산하고 피로수명을 평가할 수 있게 하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해서 강철도교 예제에 적용하여 신뢰성 지수와 피로 수명 평가를 통해 얻은 결과를 분석하였다. 그 결과, 제안된 방법이 강철도교의 피로 수명을 성공적으로 평가할 수 있음을 보였다. 평균 응력이 증가함에 따라 피로 수명이 감소함을 보였고, 제안된 방법으로 철도교의 활하중-사하중 비가 피로 수명에 끼치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.

References

- [1] C.-S. Kim and G.-H. Kang, "Fatigue analysis of reduction gears unit in rolling stock considering operating characteristics." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 3, pp.1085-1090, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2011.12.3.1085>
- [2] M.A. Miner, "Cumulative damage in fatigue." *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, No. 3, pp.159-164, 1945.
- [3] M.K. Chryssanthopoulos and T.D. Righiniotis, "Fatigue reliability of welded steel structures." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, No. 11, pp.1199-1209, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.007>
- [4] J.W. Fisher, *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*. JohnWiley & Sons, New York, NY, USA, 1984.
- [5] H. Agerskov and J.A. Nielsen, "Fatigue in steel highway bridges under random loading." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 2, pp.152-162, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1999\)125:2\(152\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1999)125:2(152))
- [6] C. MacDougall, M.F. Green and S. Shillinglaw, "Fatigue damage of steel bridges due to dynamic vehicle loads." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp.320-328, 2006.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2006\)11:3\(320\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2006)11:3(320))
- [7] Z.-G. Xiao, K. Yamada, J. Inoue and K. Yamaguchi, "Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck." *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 4, pp.409-416, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.017>
- [8] B.M. Imam, T.D. Righiniotis and M.K. Chryssanthopoulos, "Probabilistic fatigue evaluation of riveted railway bridges." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, pp.237-244, 2008.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2008\)13:3\(237\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2008)13:3(237))
- [9] Y.-S. Park, S.-Y. Han and B.-C. Suh, "Fatigue reliability analysis of steel bridge welding member by fracture mechanics method." *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 19, pp.347-359, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2005.19.3.347>
- [10] Z. Zhao, A. Haldar and F.L. Breen, "Fatigue-reliability evaluation of steel bridges." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, pp.1608-1623, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1994\)120:5\(1608\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1994)120:5(1608))
- [11] H.O. Madsen, *Probabilistic and deterministic models for predicting damage accumulation due to time varying loading*. Danish Engineering Academy, Lyngby, Denmark, 1983.
- [12] M. Lukić and C. Cremona, "Probabilistic assessment of welded joints versus fatigue and fracture." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, pp.211-218, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2001\)127:2\(211\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2001)127:2(211))
- [13] Y.-J. Lee, R.E. Kim, W. Suh and K. Park, "Probabilistic fatigue life updating for railway bridges based on local inspection and repair." *Sensors*, Vol. 17, No. 4, p.936, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s17040936>
- [14] Y.-J. Lee and S. Cho, "SHM-based probabilistic fatigue life prediction for bridges based on FE model updating." *Sensors*, Vol. 16, No. 3, p.317, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s16030317>
- [15] J.-S. Moon, "Fatigue behavior of PP-LFT used in FEM carrier with variation of stress ratio." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 1, pp.8-14, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2015.16.1.8>
- [16] N.E. Dowling, C.A. Calhoun and A. Arcari, "Mean stress effects in stress life fatigue and the Walker equation." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* Vol. 32, No. 3, pp.163-179, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01322.x>
- [17] P.C. Paris, P.C and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws." *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, No. 3, pp.528-534, 1963.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
- [18] Y.-J. Lee and J. Song, "System reliability updating of fatigue-induced sequential failures." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 140, No. 3, 04013074-1~16, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1201/b16387-769>
- [19] J.C. Newman and I.S. Raju, "An empirical stress intensity factor equation for the surface crack." *Engineering of Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp.185-192, 1981.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(81\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8)
- [20] A. Nieslony, "Determination of fragments of multiaxial

service loading strongly influencing the fatigue of machine components.” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, No. 8, pp.2712-2721, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.010>

- [21] A. Der Kiureghian. *Fisrt- and second-order reliability methods*. chap.14, CRC press, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [22] B. Sudret and A. Der Kiureghian. *Stochastic finite element methods and reliability: a state-of-the-art report*. Berkeley, CA, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, CA, USA, 2000.
- [23] A. Genz, “Numerical computation of multivariate normal probabilities.” *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 1, pp.141-149, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.2307/1390838>
- [24] T. Moan and R. Song, “Implications of inspection updating on system fatigue reliability of offshore structures.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp.173-180, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1286601>
- [25] H. Tada, P.C. Paris and G.R. Irwin. *The stress analysis of cracks handbook*. ASME, New York, NY, USA, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.801535>
- [26] N. Yazdani and P. Albrecht, “Crack growth rates of structural steel in air and aqueous environments.” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 32, No. 6, pp.997-1007, 1989.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(89\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0013-7944(89)90015-5)
- [27] Y.-J. Lee and J. Song, “Finite-element-based system reliability analysis of fatigue-induced sequential failures.” *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 108, pp.131-141, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.05.007>

이 영 주(Young-Joo Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경 시스템공학부 (토목공학석사)
- 2012년 5월 : Univ. of Illinois, Urbana-Champaign (토목공학박사)
- 2012년 6월 ~ 2013년 5월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 연구조교수
- 2013년 6월 ~ 2018년 8월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 조교수
- 2018년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 부교수

<관심분야>

구조공학, 신뢰성공학, 교량공학, 내진 해석 및 설계

이 상 목(Sangmok Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (토목공학학사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 건설환경공학과 (구조공학석사)
- 2014년 2월 ~ 2014년 12월 : (주)에담엔지니어링 토목사업부 사원
- 2015년 1월 ~ 2015년 7월 : 코스피(주) 구조설계팀 사원

- 2015년 9월 ~ 2016년 2월 : 울산과학기술원 도시환경공학부 석사후연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 박사과정

<관심분야>

구조공학, 신뢰성공학