

# 부식의 영향을 받는 강교 부재의 피로 취약도 평가

## Fatigue Vulnerability Evaluation of Steel Bridge Members Affected by Corrosion

김동조\* · 김효진\*\* · 이형철\*\*\* · 이상호\*\*\*\*

Kim, Dong-Jo · Kim, Hyo-Jin · Lee, Hyeong-Cheol · Lee, Sang-Ho

### Abstract

A methodology to evaluate fatigue vulnerability of steel bridge members affected by corrosion and truck traffic variation is proposed. A fatigue limit state function including corrosion and traffic variation effects is established to make the criterion whether the steel bridge member is damaged by fatigue. Corrosion effects are expressed as increase of the average corrosion depth, and the traffic variation effects are modeled as the accumulated number of stress cycles. Reliability analysis is carried out by Monte-Carlo simulation method for the fatigue limit state function. The methodology proposed is verified by comparing reference study and applying for the steel bridge in service.

**key words** : Fatigue vulnerability, Corrosion, Truck traffic variation, Steel bridge

### 1. 서 론

주요 기반시설물인 교량의 경우 태풍이나 홍수등과 같은 자연재해에 의한 재난뿐만 아니라 구조물 자체의 결함이나, 노후화, 유지관리상의 문제에 의해서 발생하는 인위적인 재난 또한 큰 피해를 유발하는 요인이 될 수 있다. 강교에 있어서는 이러한 문제점 중 가장 큰 요인이 부식 및 피로의 영향을 들 수 있다. 따라서, 부식이나 피로 현상을 규명하고, 시간에 따른 성능변화를 효과적으로 평가하고, 개선시키고자 하는 연구가 수반되지 않고서는 강교에 있어서 재난방지라는 궁극적인 목적을 달성했다고 말하기는 어려우며, 피로성능에 대해서도 재난방지라는 큰 틀에서 의사결정을 지원할 수 있도록 하는 정량적 지표마련이 필요하다.

본 연구에서는 부식의 영향을 묘사하는 부식-피로균열 관계모델 구성이 용이한(Ramsamooi and Shugar, 2001) S-N곡선 접근 방법에 기반하여 피로신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 한편, 강구조물의 성능저하의 주요 요인인 부식의 영향을 고려하기 위해서, 부식이 발생하고 있는 강교 부재에 대해 다양한 하중에 의한 성능저하를 평가한 연구들이 수행되어져 왔으나 주로 휨과 전단강도, 또는 지지력 등의 성능저하나 사용성 저하에 미치는 영향에 대한 연구들이 주로 수행되었을 뿐(Czarnechi and Nowak, 2006), 피로에 미치는 부식의 영향을 반영하여 피로 신뢰도를 예측하고자 하는 연구는 미미한 형편이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 공용중인 교량 중 많은 부분을 차지하고 있는 강교를 대상으로 가장 빈번하게 발생하는 손상유형인 피로손상에 대해서 부식과 교통량 등 주요 열화요인에 따른 강교 부재 또는 구조세부가 지니는 시간에 따른 피로 취약도를 평가할 수 있는 방법론을 제안하고자 한다. 이를 위해서 강교 부재의 시간에 따른 부식깊이의 증가로 인한 부재 단면의 감소가 피로강도의 저하에 미치는 영향을 평가하는 방법을 제안하고, 트럭통행량으로 주어지는 실교통량의 변화양상에 따른 피로하중 산정을 합리화하는 방안을 제안하였다.

\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학전공 · 박사과정 · E-mail: kdjdoc@csem.yonsei.ac.kr

\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학전공 · 연구교수

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학전공 · 석사과정

\*\*\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학전공 · 정교수

## 2. 강교부재의 시간에 따른 피로 취약도 평가 방법론

강교의 시간경과에 따른 피로 취약도를 평가하기 위해서 기존의 구조신뢰성 해석에서 사용되는 일반적인 피로한계상태함수를 부식으로 인한 영향과 실제 강교의 공용기간별 교통량 변화의 영향을 반영할 수 있도록 개선하는 방법을 제안한다. 이로부터 최종적으로 시간에 따른 부식의 영향이 고려된 강교부재의 취약도 곡선을 도출하는 방법론을 제안하고자 하며 이와 같은 방법론의 흐름을 Fig. 1에 도시하였다.

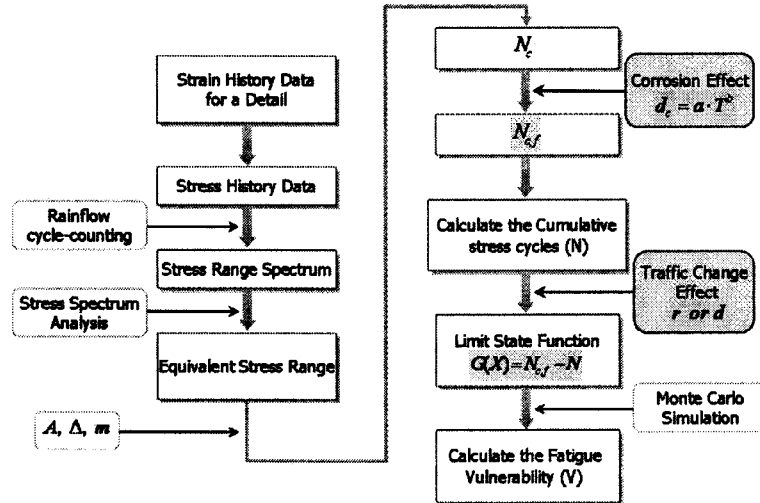


Figure 1 Fatigue vulnerability assessment algorithm of steel bridge according to time history

피로 취약도를 평가하기 위해서는 첫 번째, 등가변동응력범위를 도출해야 하는데, 이를 위해서 본 연구에서는 실측한 변형률 데이터를 바탕으로 작성된 변동응력 스펙트럼을 이용하여 변동응력범위를 산출하는 모델을 사용하였으며, 시설안전기술공단에서 변동응력측정기를 이용하여 실측한 데이터를 사용하였다(Fig. 1).

두 번째, 이렇게 산출된 등가응력범위를 S-N 곡선에 적용하여 피로파괴에 도달하는 데까지 발생하는 임계 응력반복횟수  $N_c$ 를 산정하며, 여기에 부식의 효과를 고려한 임계 응력반복횟수  $N_{cf}$ 를 도출한다. 한편 본 연구에서는 부식의 진행정도를 시간에 따른 평균부식깊이  $d_c(t)$ 를 변수로 하여 표현하며 일반적인 부식 진행에 대해서는 다음과 같은 모델이 주로 사용된다(Jiang and Staehle, 1997).

$$d_c(t) = a \cdot t^b \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 강재의 노출시간(년)이고,  $a$ 와  $b$ 는 환경적인 요인에 따른 변수이다. 이들 변수는 강재의 재료와 환경에 따라 달라지므로 랜덤 변수로서 취급된다.

세 번째, 상기에서 얻어진 부식효과를 고려한 임계 응력반복횟수  $N_{cf}$ 와 비교하기 위한 트럭의 통행량으로 인해 발생하는 반복응력의 누적된 반복횟수  $N(T)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(T) = 365 \cdot C_s \cdot ADTT_{SL} \cdot T \quad (2)$$

여기서,  $ADTT_{SL}$ 은 강교의 한 차선에 대한 트럭의 일평균 통행량이고,  $C_s$ 는 트럭 한 대가 통행할 때 강교 부재에 발생하는 반복응력의 횟수, 그리고  $T$ 는 강교의 현재까지의 공용시간(년)을 의미한다.

넷째, 피로에 대한 취약도 여부를 판정할 수 있는 기준을 수립하기 위해 한계상태함수를 설정한다. 이를 위한 한계상태함수는 하중효과를 의미하는  $S$ 와 이에 대한 구조물의 구조적인 저항능력을 의미하는  $R$ 의 조합으로 표현되는 것으로서, S-N 곡선방법으로 표현되는 피로에 대한 한계상태함수의 일반식은 다음과 같다.

$$G(X) = R - S = \frac{A \cdot \Delta}{S_{re}^m} - N \quad (3)$$

여기서,  $A$ 와  $m$ 은 S-N 곡선으로부터 얻을 수 있는 구조형상 또는 재료와 관계된 상수이고,  $S_{re}$ 는 구조세부에 대한 응력스펙트럼으로부터 정의된 Miner의 등가응력범위이며,  $\Delta$ 는 Miner의 한계누적손상지수를 의미한다. 이 때, 식 (3)과 같은 일반식에 부식과 공용기간 동안 변화하는 교통량의 영향을 반영한 최종적인 피로한계상태함수는 다음과 같다.

$$G(X) = \frac{A \cdot \Delta}{[S_{re} \cdot (1 + 0.2 \cdot a \cdot T^b)]^m} - 365 \cdot C_s \cdot ADTT_{total}(T) \quad (4)$$

다섯째, 식 (4)로 정의되는 피로한계상태함수를 구성하는 각 확률변수의 분포특성이 반영된 랜덤 수들을 반복적으로 추출하여 충분한 수의 확률변수의 표본집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수 값을 차례로 한계상태함수에 대입하고 그 결과를 0과 비교하여 구조물이 피로에 대해서 안전한지 여부를 판단하는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행한다. Monte-Carlo 시뮬레이션 방법은 기본 개념이 단순하며, 한계상태함수에 어떠한 변형도 가하지 않고 원형을 그대로 유지한 채 파괴확률을 구할 수 있어 상대적으로 다른 방법에 비해 정확한 값을 얻을 수 있다. 마지막으로 상기에서 얻어진 구조물의 안전판단 결과로부터 피로 취약도 곡선을 도출하게 된다.

### 3. 제안된 피로 취약도 평가방법의 검증

제안된 피로 취약도 평가 방법론의 검증을 위해서 Zhao 등(1994)이 해석한 교량을 예제로 하여 피로 취약도 곡선을 도출하였으며, 해석결과를 서로 비교하여 제안된 방법론의 실효성을 검증하였다. 또한 실제 공용중인 교량에 적용함으로써 제안된 피로 취약도 평가방법론의 적용성을 확인하였다.

#### 3.1 방법론 검증예제

Zhao 등(1994)은 70-ft 지간을 지닌 강박스 거더교를 대상으로 피로 신뢰성 해석을 수행하였으며, 신뢰성 해석에 사용된 변수에 대한 확률값은 Table 1과 같다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 부식을 고려하지 않는 경우에 비해 부식을 고려한 경우에는 피로의 신뢰도지수가 크게 저하됨을 확인할 수 있었다.

Table 1 Statistics for variables of specimen bridge(Zhao et al., 1994)

변수	분포 형태	평균	변동계수
$A$	Lognormal	$1.072 \times 10^{10}$	0.45
$m$	Constant	3.0	.
$\Delta$	Lognormal	1.0	0.30
$S_0$	Constant	6.334	.
$S_{re}^m$	Constant	$(\sqrt{2}S_0)^m T(1+m/2)$	.
$N$	Constant	$1.0 \times 10^6 \sim 5.5 \times 10^6$	.

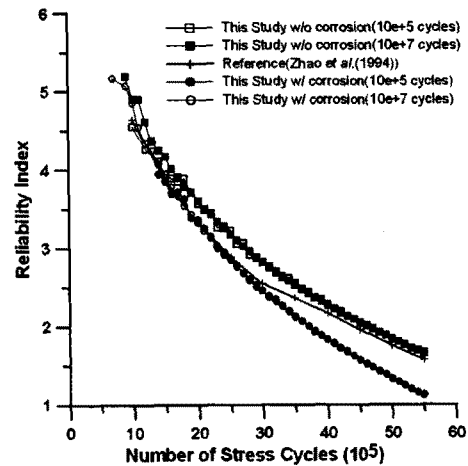


Figure 2 Comparison of the results between this study and the reference study by Zhao et al.(1994)

#### 3.2 공용중인 교량의 피로 취약도 평가

실제 공용중인 교량의 피로 취약도를 평가함으로써 본 연구에서 제안한 방법론의 적용성을 살펴보고자 한다. 대상교량의 선정시 강교형식이며, 변동응력 데이터의 수집이 가능한지 여부를 고려하였다. 본 연구에서는 직접적으로 실험을 수행하지는 않았으며 시설안전기술공단에서 실측한 변동응력 데이터, 서울특별시 및 건설

교통부에서 제공하는 교통량 정보 제공시스템의 자료를 이용하여 교통량을 분석하고 응력범위를 산정하였다. 대상교량은 1등급 교량으로서 Fig 3과 같으며, 강상판형과 강박스 형식이 혼용된 형식이며, 본 연구에서는 강상판형 부분을 대상으로 하였다.

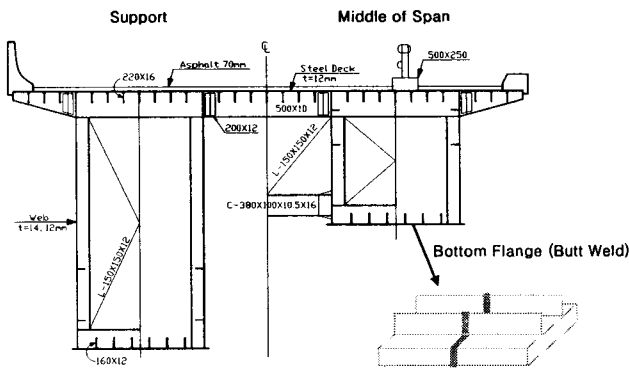


Figure 3 Structural configuration for specimen bridge

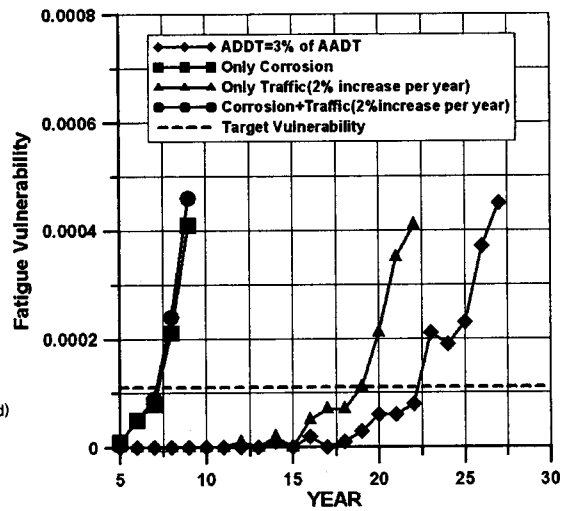


Figure 4 Influence of corrosion and traffic change to the fatigue vulnerability

Fig. 4에는 전체 교통량중 트럭 교통량이 3%인 경우, 부식만을 고려한 경우, 매년 트럭교통량이 2%씩 증가하는 경우, 부식과 트럭하중으로 동시에 고려한 경우에서의 강교 부재의 피로 취약도 곡선을 도시하고 한계피로 취약도와 비교하였다. Fig.4를 통해서 부식이 고려되지 않는 경우에는 20년이 넘어야 한계 피로 취약도에 도달하는 데 비해 고려되는 경우에는 10년도 안되어 한계 취약도를 넘어서는 것으로 나타난 바와 같이 부식이 피로 취약도의 가장 주요 인자임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 구조신뢰성 이론을 적용하여 부식과 교통량의 변화가 고려된 시간에 따른 피로 성능저하를 평가할 수 있는 피로 취약도 평가 방법론을 제안하였으며, 이러한 방법론을 몇 가지 예제를 통해 검증한 바, 피로 취약도 평가 방법론의 실효성과 적용성을 확인하였으며, 부식이 피로 성능저하에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 방안을 제시하여, 강교량 구조적 문제발생의 큰 원인 중 하나인 피로파괴에 따른 재난 발생을 방지할 수 있도록 하는 의사결정지원 지표를 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 실시한 건설핵심기술연구개발사업(과제명: 국가 주요 기반시설물 안전관리 네트워크 구축)의 연구비 지원을 받아 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. Czarnecki, A.A. and Nowak, A.S. (2006) Time-variant reliability profiles for steel girder bridges. *Structural Safety*, in press.
2. Ramsamooj, D.V. and Shugar, T.A. (2001) Modeling of corrosion fatigue in metals in an aggressive environment. *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. S301-S309.
3. Jiang, X.C. and Staehle, R.W. (1997) On the activation energy in the chemical-mechanical correlation model. *Corrosion*, Vol. 53, No. 11, pp. 869-879.
4. Zhao, Z., Haldar, A. and Breen, F.L. (1994) Fatigue-reliability evaluation of steel bridges. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 1608-1623.