

시간에 따른 부식열화가 고려된 피로취약도 곡선을 이용한 강교의 손상 평가

Damage Estimation of Steel Bridge Members by Fatigue Vulnerability Curves Considering Deterioration due to Corrosion with Time

김 호 진* / 이 형 철** / 전 석 기*** / 이 상 호****
Kim, Hyo-Jin / Lee, Hyeong-Cheol / Jun, Sukky / Lee, Sang-Ho

Abstract

A method for assessing fatigue vulnerability of steel bridge members considering corrosion and truck traffic variation with time is proposed to evaluate the reduction of fatigue strength in steel bridge members. A fatigue limit state function including corrosion and traffic variation effect is established. The interaction between the average corrosion depth and the fatigue strength reduction factor is applied to the limit state function as the reduction term of strength. Three types of truck traffic change is modeled for representing real traffic change trend. Monte-Carlo simulation method is used for reliability analysis which provides the data to obtain fatigue vulnerability curves. The estimation method proposed was verified by comparing with the results of reference study and applying to the steel bridges in service.

key words : steel bridges, fatigue vulnerability curves, corrosion, traffic variation, reliability analysis

요 지

본 연구에서는 강교 부재를 대상으로 시간에 따른 부식과 교통량(트럭통행량)의 변화 영향을 반영한 피로 취약도 평가 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통해 부식과 교통량 변화를 고려할 수 있는 피로에 대한 한계상태함수를 설정하였다. 부식의 영향은 평균부식깊이와 피로강도감소계수와의 관계를 이용하여 한계상태함수에서 피로저항의 감소로써 반영되었다. 트럭통행량의 변화는 세 가지 대표적인 변화양상을 설정하여 기간 별로 실제 변화에 맞게 모델링함으로써 한계상태함수에서 하중의 증가로 반영되었다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하도록 하였으며, 이를 바탕으로 시간이력 피로 취약도 곡선을 도출하였다. 검증예제와 실제 국내 강교에 적용하여 제안된 피로 취약도 평가방법을 검증하였다.

핵심용어 : 강교, 피로 취약도 곡선, 부식, 교통량 변화, 신뢰성 해석

1. 서 론

주요 기반시설물인 교량의 경우 태풍이나 홍수 등

과 같은 자연재해에 의한 재난뿐만 아니라 구조물 자체의 결함이나, 노후화, 및 유지관리상의 문제에 의해서 발생하는 인위적인 재난 또한 큰 피해를 유발하는 요인이 된다. 강교에 있어서는 이러한 문제를 발생시

* 정회원 · 연세대학교 건설공학연구소 연구교수 (E-mail : jlnski@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사

*** Department of Mechanical Engineering, University of Wyoming 교수

**** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail : lee@yonsei.ac.kr)

키는 가장 큰 요인이 부식 및 피로에 의한 성능저하를 들 수 있다. 따라서 부식이나 피로 현상을 규명하고, 시간에 따른 성능변화를 효과적으로 평가하는 연구가 수행되어 피로성능에 대해서도 재난방지라는 큰 틀에서 의사결정을 지원할 수 있도록 하는 정량적 지표 마련이 필요하다.

전통적인 피로해석 분야에서 구조물의 피로수명을 평가하는 데에는 S-N곡선 접근방법으로 잘 알려진 Miner 법칙(Miner, 1945)과 선형탄성파괴역학에 기반한 LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법(Paris와 Erdogan, 1963)의 두 가지 결정론적인(deterministic) 접근방법이 사용되어져 왔으며, 피로에 의한 손상의 확산 또는 피로균열의 진전문제 등은 선LEFM방법에 근거를 두고 유한요소법이나 무요소법과 같은 수치해석기법을 통하여 시뮬레이션 되어왔다. 특히 무요소법은 요소망의 구성에 대한 제약이 없어 균열진전양상을 손쉽게 시뮬레이션 할 수 있다는 장점 때문에 근래에 많은 연구가 진행되고 있다(Lee와 Yoon, 2004; Zi 등, 2004). 최근에는 연속체영역에서의 손상확산을 나노영역에서 접근하기 위해 다중스케일 해석기법을 도입하는 연구가 진행 중이다(Lee 등, 2004; Liu 등, 2006). 그러나 수치기법을 이용한 결정론적인 방법에서는 구조물의 제작오차(imperfection)를 고려하지 못하고 피로균열과 부식사이의 관계를 표현하는 신뢰할 만한 모델이 없는 관계로 본 연구에서는 구조신뢰성 이론에 기반한 확률론적 접근법을 적용한다.

확률론적인(probabilistic) 피로해석 분야에서도 구조신뢰성 이론과 함께 다양한 구조물의 피로와 피로파괴를 세부적으로 평가하는데 S-N곡선방법과 LEFM 방법이 적용될 수 있다. S-N곡선 방법에 비해서 LEFM 방법은 강재의 균열 생성과 전파에 대한 부식의 영향을 묘사하는데 있어서 아직까지는 일반적으로 받아들여지고 신뢰할만한 부식-피로균열 관계모델이 없는 것으로 알려져 있으며(Ramsamooj와 Shugar, 2001), 각각 경우마다의 특이성으로 인하여 균열과 부식의 관계를 일반화하는 것이 어렵기 때문에, 본 논문에서는 S-N곡선 접근방법에 기반하여 부식의 영향을 반영한 피로신뢰성 해석을 수행하였다.

해양구조물과 일부 항공산업에 있어서는 과거 30여년 동안 구조물의 세부, 요소, 또는 전체 시스템의 피로파괴에 대한 신뢰도를 평가하는데 있어서 S-N곡선 접근방법을 이용한 연구들이 성공적으로 수행되어져 왔으며(Tang와 Yao, 1972; Wirsching, 1979, 1980; Garbatov와 Soares, 1998), 1980년대 중반 이후로

강교에 대해서도 피로신뢰도 해석절차의 적용이 제안되어져 왔다(Yazdani, 1984; Yazdani와 Albrecht, 1987; Zhao 등, 1994). 이에 비해 강교에 대한 피로신뢰성에 대한 연구는 아직까지는 미약한 편이다. 한편, 부식이 강구조물의 성능을 저하시키는 주요 요인이 된다는 인식하에 부식된 강교 부재에 대해 다양한 모드의 하중에 의한 성능저하를 평가한 연구들이 수행되어져 왔다. 주로 강 거더교를 대상으로 부식이 휨과 전단강도, 또는 지지력 등의 성능저하나 사용성의 저하에 미치는 영향에 관한 연구 위주로 수행되었으며(Kayser와 Nowak, 1989; Estes와 Frangopol, 1999; Akgül와 Frangopol, 2004; Czarnecki와 Nowak, 2006), 강교의 주된 파괴모드 중 하나인 피로에 대해 부식의 영향을 반영하여 신뢰도를 예측하고자 하는 연구는 미미한 실정이다.

국내에서도 신뢰성 해석 방법에 기초하여 강교의 피로 수명을 예측하거나 강교 부재의 피로 신뢰성 해석을 수행한 연구들(조효남 등, 1999; 박연수 등, 2003)이 수행되어져 왔으나 부식과 같은 열화를 반영하지 않은 연구들이 대부분이었으며, 부식의 영향을 반영한 연구(한중식 등, 1993)라 하더라도 교량의 공용기간 동안 시간에 따른 피로 성능의 변화 예측보다는 단순히 강교 부재의 잔존피로수명을 예측하는 연구가 대부분이었다.

따라서 본 연구는 강교를 대상으로 가장 빈번하게 발생하는 손상의 유형인 피로손상에 대해서 부식의 진행 정도와 교통량의 변화 등을 반영하여 강교의 부재 또는 구조세부가 지닌 시간에 따른 피로 취약도를 평가할 수 있는 방법을 제안하였고, 제안된 방법을 통해서 피로에 대한 점검시기 또는 부재별 점검우선순위 등과 같은 유지관리 정책결정을 지원할 수 있는 시간 이력 피로 취약도 곡선을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 강교 부재의 시간에 따른 부식깊이의 증가로 인한 부재 단면의 감소가 피로강도의 저하에 미치는 영향을 반영하는 방법을 제안하였고, 피로하중으로 작용하는 교통량(트럭통행량)의 실제 시간적인 변화 양상을 반영하여 부재에 가해지는 하중을 합리화하는 방법을 제안하였다. 단, 본 논문에서는 실측한 피로응력범위 자료를 사용함으로써 실제의 하중효과가 모두 반영된 것으로 가정하였기 때문에 통행차량의 하중 및 통행특성에 따라 달라지는 것으로 알려진 하중효과(김상호 등, 1993)는 따로 고려하지 않았으며, 피로응력반복횟수는 실제 통행량의 증감에 비례하는 것으로 가정하였다.

2. 피로 취약도 해석 이론

2.1 구조적 취약도 해석의 정식화

구조신뢰성 이론은 구조물의 구조적인 위험도를 정량화하고, 구조물의 파괴확률을 산출함으로써 안전도와 사용성으로 대변되는 구조물의 신뢰도를 측정하는 지표로 사용되어져 왔으며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_f(t) = P[G(\mathbf{X}, t) \leq 0] \quad (1)$$

$$= \int \cdots \int_{G(\mathbf{X}, t) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(x, t) dx$$

여기서, P_f 는 구조물의 파괴확률이고, $G(\mathbf{X})$ 는 구조물의 파괴를 정의하는 한계상태함수이며, $f_{\mathbf{X}}(x)$ 는 기본 랜덤변수의 벡터인 \mathbf{X} 에 대한 결합확률밀도함수(joint probability density function), t 는 시간을 의미한다.

구조적 취약도(vulnerability)를 평가하는데 있어서, 식 (1)의 기본 랜덤변수 벡터인 \mathbf{X} 는 하중효과를 의미하는 S 와 구조적인 저항을 의미하는 R 로 나타낼 수 있다. 이들과 함께 구조적인 취약도는 주어진 하중강도에 대한 구조물 파괴의 조건부확률로 정의되어질 수 있다. 이는 다음과 같은 정량화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_f(t) = P[G(R, S, t) \leq 0 \mid S(t) = s] \cdot P[S(t) = s] \quad (2)$$

여기서, $V_f(t)$ 는 시간에 대한 구조적 취약도이고, 한계상태함수 G 는 구조 저항(structural resistance) R 과 하중효과(road effect) S , 시간 t 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(R, S, t) = R(t) - S(t) \quad (3)$$

사실, 식 (1)의 전통적인 신뢰도 식과 식 (2)의 취약도 공식 사이에는 근본적으로 차이가 없으며 다음은 그 사실을 잘 보여주고 있다. 식 (1)은 식 (3)의 한계상태함수를 통해 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$P_f = \int_0^\infty \int_0^S f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (4)$$

여기서, $f_{R,S}(r, s)$ 는 R 과 S 의 결합확률밀도함수를 의미한다. 전통적인 조건부확률이론에 의하면 $f_{R,S}(r, s)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_{R,S}(r, s) = f_{R|S}(r|s) f_S(s) \quad (5)$$

여기서, $f_{R|S}(r|s)$ 는 주어진 $S=s$ 에 대한 R 의 조건부 확률밀도함수이다. 따라서 주어진 하중 $S=s$ 에 대해서 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{f|S=s} = \int_0^S f_{R|S}(r|s) dr \int_0^\infty f_S(s) ds \quad (6)$$

또한 확률론적으로 식 (6)을 다시 쓰면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{f|S=s} = P[G(t) \leq 0 \mid S=s] \cdot P(S=s) \quad (7)$$

2.2 피로한계상태함수

피로 취약도 해석을 위한 한계상태함수는 S-N방법에 기초한 변수들을 이용하여 표현하여 식 (8)와 같이 쓸 수 있다.

$$G(\mathbf{X}) = N_c - N = \frac{A \cdot \Delta}{S_{re}^m} - N \quad (8)$$

여기서, N_c 는 피로파괴에 도달하는 데까지 걸리는 임계 응력반복횟수이고, N 은 작용한 응력 반복횟수의 누적값을 의미하며, A 와 m 은 S-N곡선에서 얻을 수 있는 구조형상 또는 재료와 관계된 상수이고, S_{re} 는 구조세부에 대한 응력스펙트럼으로부터 정의된 Miner의 등가응력범위이며, Δ 는 Miner의 한계누적손상지수이다.

3. 강교 부재의 시간이력 피로 취약도 평가 방법

강교의 시간이력 피로 취약도 평가를 위해서는 부재의 시간에 따른 열화로 인한 피로저항성능의 약화가 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 피로 한계상태함수에 부식으로 인한 영향과 실제 강교의 공용기간별 교통량 변화의 영향을 반영할 수 있도록 하고, 취약도 해석을 통해 시간에 따른 부식의 진행과 교통량의 변화로 인한 열화를 고려한 강교 부재의 취약도 곡선을 도출할 수 있는 방법을 제안한다.

3.1 부식 진행정도의 영향

부식과 같이 부재에 국부적인 열화를 발생시켜 부재 내에 응력집중을 유발함으로써 피로강도의 감소를

가져오는 현상을 정량화하는 도구로서 피로강도감소 계수(K_f)를 사용할 수 있다. 이 피로강도감소계수는 국부적인 변형과 같은 부재의 변화된 형상으로 인한 응력집중이 유발시키는 피로강도의 변화정도를 나타내는 계수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_f = \frac{\text{응력집중 없는 피로강도}}{\text{응력집중 하의 피로강도}} \quad (9)$$

일반적인 의미로서의 피로강도감소계수는 응력집중의 원인에 관계없이 응력집중이 발생한 이전과 이후의 피로강도의 비를 말하는데, 부식에 의한 응력집중으로 인한 피로강도의 감소를 표현하는 데에도 적용되어질 수 있다. 이러한 개념은 S-N곡선에서 쉽게 확인할 수 있으며, 그림 1은 피로강도감소계수의 일반적인 의미와 부식에 의한 피로강도감소계수를 잘 보여주고 있다. 따라서 부식에 의한 피로강도감소계수는 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$K_{fc} = \frac{\text{부식에 의한 응력집중 없는 피로강도}}{\text{부식에 의한 응력집중 하의 피로강도}} \quad (10)$$

시간의 흐름에 따른 부식의 진행을 피로 취약도에 반영하기 위해서는 피로강도감소계수 K_{fc} 를 시간에 관한 함수로 표현할 수 있어야 한다. 표 1의 피로강도감소계수는 형상이나 이음의 특성에 따라 분류한 구조 세부별 피로강도감소계수만을 나타낸 것이기 때문에, 부식과 같은 열화의 영향은 반영하지 않고 있다. 따라서 피로강도감소계수와 부식의 진행정도와의 관계를 정의하기 위한 연구들이 수행되었으며, Rahgozar 등 (2006)은 피로실험 결과를 바탕으로 식 (11)와 같이 피로강도감소계수를 평균부식깊이(d_c)에 대한 함수로 나타내었다.

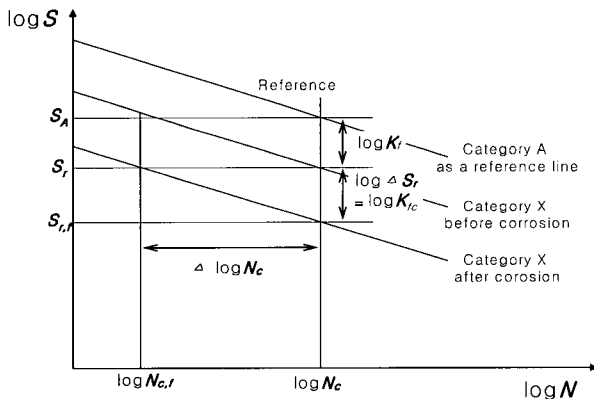


그림 1. S-N곡선 상에서의 부식에 의한 피로강도감소 계수와 한계누적피로응력반복횟수와의 관계

표 1. AASHTO(2004) 피로상세 별 피로강도감소계수

피로상세	피로강도감소계수(K_f)
A	1.00
B	1.49
C	1.95
C'	2.35
D	2.72
E	3.51
E'	4.19

$$K_{fc} = 1 + 0.2d_c \quad (11)$$

본 연구에서는 식 (11)를 이용하여 부식의 영향을 반영한 피로강도감소계수를 산정하였다. 한편, 평균부식깊이의 시간에 대한 모델은 꾸준히 제안되어져 왔으며, 일반적인 부식 진행에 대해서 다음과 같이 정리되었다(Jiang와 Staehle, 1997).

$$d_c(t) = a \cdot t^b \quad (12)$$

여기서, t 는 강재의 노출시간(년)이고, a 와 b 는 환경적인 요인에 따른 변수이다. 이들 변수는 강재의 재료와 환경에 따라서 달라지고, 부재의 기능과 노출된 환경의 불확실성 때문에 일정한 값으로 주어지지 않고 랜덤 변수로서 취급된다. 표 2는 이들 값에 대한 통계적인 특성을 나타내고 있으며(Kayser, 1988), 본 연구에서는 이 값들을 경우에 맞게 취하고 식 (12)와 식 (12)을 이용하여 부식에 의한 피로강도감소계수를 산출하였다.

3.2 실제 트럭 통행량 변화양상의 모델링

강교량 상의 트럭 통행량은 응력의 강교 부재 내에 반복적인 응력을 발생시키고 이로 인해 피로손상을 유발하는 주요 인자이다. 또한 강교의 구조와 시간장도 한 대의 트럭이 지나갈 때 발생하는 응력의 크기와 반복횟수에 영향을 미친다. 따라서 트럭의 통행량과 이로 인해 발생하는 응력의 누적된 반복횟수와의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다(AASHTO, 2004).

$$N(T) = 365 \cdot C_s \cdot ADTT_{SL} \cdot T \quad (13)$$

여기서, $ADTT_{SL}$ 은 강교의 한 차선에 대한 트럭의 일 평균 통행량이고, C_s 는 트럭 한 대가 통행 시에 강교 상의 부재에 발생하는 응력의 횟수, 그리고 T 는 강교의 현재까지의 공용 시간(년)을 의미한다. 변수 C_s 는 AASHTO(2004)에서 표 3과 같이 제시하고 있다.

표 2. 부식관련변수 a와 b의 통계적인 특성(Kayser, 1988)

확률변수		탄소강		내후성강	
		a(10 ⁻³ mm)	b	a(10 ⁻³ mm)	b
시골환경	평균	34.0	0.650	33.3	0.498
	변동계수(COV)	0.09	0.100	0.34	0.090
도시환경	상관계수(COC)	-	-	-0.05	-
	평균	80.2	0.593	50.7	0.567
	변동계수(COV)	0.42	0.400	0.30	0.370
해양환경	상관계수(COC)	0.68	-	0.19	-
	평균	70.6	0.789	40.2	0.577
	변동계수(COV)	0.6	0.490	0.22	0.100
	상관계수(COC)	-0.31	-	-0.45	-

표 3. 부재 특성별 트럭 한 대 통과시의 피로응력반복횟수, C_s(AASHTO, 2004)

길이방향 부재		지간 길이	
		> 12 m	≤ 12 m
단경간 거더형		1.0	2.0
연속 거더형	지점에서 지간 길이의 10% 이내 영역	1.5	2.0
	그 이외의 영역	1.5	2.0
캔틸레버 거더		5.0	
트러스		1.0	
가로 부재		지간 길이	
		> 12 m	≤ 12 m
		1.0	2.0

AASHTO(2004)에서는 하나의 교량에서 $ADTT_{SL}$ 은 트럭이 이용가능한 차선의 수를 고려한 계수인 p 를 일평균 트럭 통행량인 $ADTT$ 에 곱함으로써 구할 수 있다. 이는 표 4를 통하여 확인할 수 있다.

식 (13)은 공용기간 중 $ADTT$ 가 변화 없이 일정하다고 가정한 누적반복횟수이지만, 실제 교통량은 변하는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문에서는 대표적인 실제 교통량의 변화 양상을 표 5와 같이 세 가지

형태로 설정하고, 각 경우에 대한 응력누적반복횟수를 구하는 식을 정리하였다. 공용기간에 따라 실제 변화 특성에 맞게 각 경우를 조합하여 적용할 수 있다.

표 5에서 r 은 $ADTT$ 의 연간 증가율이고, d 는 $ADTT$ 의 연간 증가량을 의미하며, 실제 기간별 교통량의 변화 양상에 맞게 식 (13)에 적용함으로써 보다 실제적인 $N(T)$ 값을 얻을 수 있다.

표 4. 이용가능 차선 별 한 차선에 대한 트럭 통행량 변환 계수, p (AASHTO, 2004)

트럭 통행 가능 차선 수	p
1	1.00
2	0.85
3 이상	0.80

표 5. 트럭통행량의 변화 양상에 따른 T년 시의 $ADTT$ 와 총 누적 트럭통행량

통행량 변화 양상	T년에서의 $ADTT$	T년 시의 총 누적 차량통행량, $ADTT_{total}(T)$
변화 없음	$ADTT_0$	$ADTT_0 \times T$
일정량 변화	$ADTT_0 + d \cdot T$	$[2ADTT_0 + d(T+1)] \cdot \frac{T}{2}$
일정비율 변화	$ADTT_0(1+r)^T$	$ADTT_0 \cdot \left[\frac{(1+r)^T - 1}{\ln(1+r)} \right]$

3.3 열화 영향의 피로강도 한계상태함수에의 적용

앞서 정립한 부식과 교통량의 영향을 반영하기 위한 식들을 강교 부재의 피로취약도 평가를 위한 피로 한계상태함수에 어떻게 적용할 것인가에 대한 해답이 본 연구의 핵심 착안점이다. 부식에 의한 피로강도감소계수는 일정 반복횟수에 대한 응력범위의 감소를 가져온다. 이를 달리 표현하면 일정한 응력범위에서 견딜 수 있는 응력의 반복횟수의 감소를 의미한다. 따라서 피로강도 한계상태함수에서 한계반복횟수(N_c)는 부식에 의한 피로강도감소계수에 반비례하는 것으로 표현함으로써 부식의 영향을 반영할 수 있다. 이는 그림 1을 통해서도 확인할 수 있으며, 이를 이용해 부식의 영향을 반영한 $N_{c,f}$ 는 식 (14)와 같이 쓸 수 있다.

$$\log N_{c,f} = \log N_c - m(\log S_r - \log S_{r,f}) \quad (14)$$

여기서, $N_{c,f}$ 와 $S_{r,f}$ 는 각각 부식이 일어난 이후의 한계 응력반복횟수와 그에 대한 응력범위를 의미한다. 또한 $S_r/S_{r,f}$ 는 K_{fc} 를 의미하므로, 식 (14)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$N_{c,f} = \frac{N_c}{K_{fc}^m} \quad (15)$$

한편, 교통량 변화는 한계상태함수의 두 번째 항(현재까지의 누적반복횟수)으로 직접 적용이 가능하다. 결국, S-N방법에 기초하여 부식과 공용기간 동안 변화하는 교통량의 영향을 반영한 시간이력 피로 취약도 평가를 위한 피로한계상태함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G(X) = \frac{A \cdot \Delta}{[S_{rc} \cdot (1 + 0.2 \cdot a \cdot T^b)]^m - 365 \cdot C_s \cdot ADTT_{total}(T)} \quad (16)$$

식 (16)을 적용하기에 앞서 한계상태함수를 이루고 있는 변수들에 대한 정의가 선행되어야만 취약도 곡선을 도출해내기 위한 신뢰성 해석이 가능하게 된다.

3.4 한계상태함수 관련 변수모델

3.4.1 피로강도변수, A

응력범위(S)와 응력반복횟수(N)의 관계를 로그스케일로 보여주는 일반적인 S-N곡선으로부터 식 (17)과 같은 식을 얻을 수 있으며, 피로강도변수 A는

곡선이 $\log N$ 축과 만나는 교차점이 되고 변수 m 은 곡선의 기울기가 됨을 알 수 있다.

$$\log N_f = -m \cdot \log S_r + \log A \quad (17)$$

AASHTO(2004) 시방서에서는 95% 신뢰도에 따라 각 분류별로 설계값(A_d)을 규정하고 있다. 따라서 A_d 는 다음과 같이 평균값에서 표준편차의 2배수를 뺀 값이 된다.

$$A_d = \bar{A} - 2\sigma_A = \bar{A}(1 - 2\delta_A) \quad (17)$$

여기서, \bar{A} 는 A의 평균값이고, δ_A 는 A의 변동계수(COV)이다. Wirsching 등(1987)은 모든 분류항목에 대해서 A의 변동계수를 0.45라고 제안하였다. 또한 Fisher 등(1970)은 374개의 강재 빔을 대상으로 한 실험결과를 바탕으로 $\log N_f$ 가 정규분포에 가깝다고 밝혔다. 따라서 $\log A$ 도 정규분포를 따르며 A는 자연스럽게 대수정규분포를 따르게 된다.

한편, 국내의 도로교 설계기준의 피로상세범주에서 제시하는 허용피로응력에 대응하는 A값은 표 6과 같으며, 이는 AASHTO(2004)의 기준과 유사하다. 따라서 본 연구에서는 A를 대수정규분포를 따르고, 평균으로는 도로교 설계기준에서 제시하는 값을 사용하였으며, 변동계수는 Wirsching 등(1987)이 모든 분류항목에 대해서 제안한 0.45를 사용하였다. 또한 m 도 설계기준상에서 규정하고 있는 3.0을 사용하였다.

표 6. 설계기준상의 피로강도변수, A (건설교통부, 2000)

피로상세	A ($\times 10^8 \text{ kgf/mm}^2$)
A	87.0
B	41.4
B'	21.2
C	15.3
C'	15.3
D	7.65
E	3.83
E'	1.36

3.4.2 Miner의 한계누적손상지수, Δ

강 구조물에 대한 Miner의 한계누적손상지수는 주로 Wirsching(1979)을 위주로 한 연구를 통해서 조사되었는데, 해양구조물을 대상으로 한 다양한 피로 실험 자료들을 바탕으로 평균이 1.0이고 변동계수가 0.3인 대수정규분포를 따른다고 제안하였다(Wirsching 등,

1987; Wirsching와 Chen, 1988). 해양구조물뿐만 아니라 다른 분야에서도 변동하중에 의한 피로문제를 다룰 때에 Δ 의 대수정규분포 모델이 사용되어지고 있다. 본 연구에서도 대수정규분포를 따르며 평균이 1.0이고 변동계수가 0.3인 한계누적손상지수 Δ 를 사용하였다.

3.4.3 활하중에 의한 변동응력범위, S_{re}

트럭으로 대표되는 피로 활하중의 영향은 강교의 부재에 발생하는 변동응력으로 나타난다. 본 연구에서는 실측한 변형률 데이터를 바탕으로 작성된 변동응력 스펙트럼을 이용하여 변동응력범위를 측정하는 모델을 사용하였으며, 시설안전기술공단(1999)에서 변동응력측정기를 이용하여 실측한 데이터를 사용하였다. 변동응력은 차량의 통행에 직접적인 영향을 받을 것이므로 실제 교통량의 통계와 비례하여 발생하는 것으로 가정하였다.

3.5 시간이력 피로 취약도 평가 알고리즘

기존의 일반적인 S-N방법에 기반한 피로 신뢰성 해석 절차에 기반을 두고, 피로강도의 시간에 따른 변화를 평가하기 위하여 피로강도에 영향을 미치는 인자들 중에서 시간에 따라 달라지는 대표적인 요소인 부식 열화와 교통량 변화를 분류하여 이들의 시간의존성을 반영한 피로취약도 평가 알고리즘을 제안하였다. 그림 2는 본 연구를 통해서 제안된 부식의 진행 정도와 교통량 변화의 영향을 반영한 강교의 시간이력 피로취약도 평가를 위한 알고리즘을 나타낸 것이다.

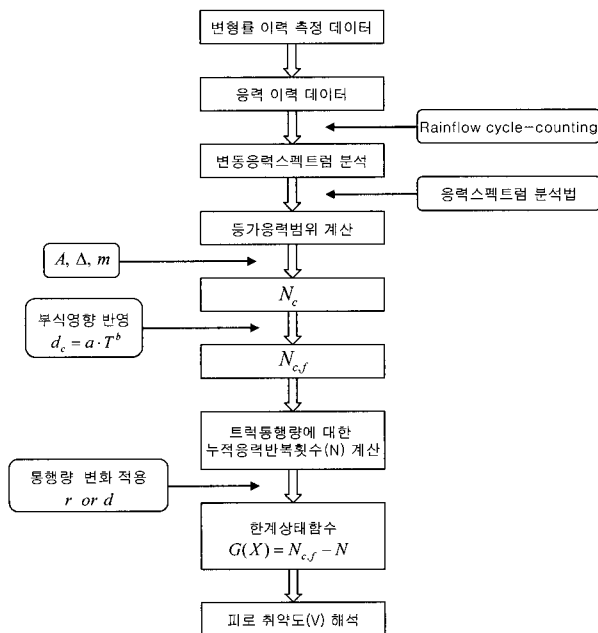


그림 2. 강교의 시간이력 피로 취약도 평가 알고리즘

4. 수치예제

4.1 평가방법 검증예제

Zhao 등(1994)이 21.34m(70ft) 지간을 가진 강박스 거더교의 피로 신뢰성 해석을 위해 사용한 대상 교량은 그림 3과 같고, 이에 대한 관련 변수들의 통계적인 특성은 표 7과 같다. 본 연구를 통해 제안된 알고리즘의 적용성 검증을 위해 변수모델에 상관없이 Zhao 등(1994)이 사용한 변수 값들을 그대로 적용하여 결과를 비교하였다. 이들의 연구는 AFOSM법을 적용하여 신뢰도 지수를 얻는 반면, 본 연구는 제안된 평가방법으로 Monte-carlo 시뮬레이션 해석을 통해 파괴확률에 해당하는 피로 취약도를 결과로서 얻게 되는 차이점이 있다. 즉, 해석결과 상호 간에 해석방법상의 차이로 인한 오차가 발생할 수 있음을 예상할 수 있으며, 이는 그림 4를 통해 확인할 수 있었다.

그림 4를 통해서 확인할 수 있듯이 Monte-Carlo 시뮬레이션 수행 시 횡수를 10^5 회와 10^7 회로 달리 하여 해석을 수행하였으며, 피로 취약도 해석 결과는 참고 연구의 결과와의 비교를 위해 신뢰도 지수로 변환하여 도표화 하였다. Zhao 등(1994)의 해석 결과와 비교했을 때, 본 연구의 해석 결과가 응력 범위의 같은 반복 횟수에서 전체적으로 약간 큰 신뢰도지수를

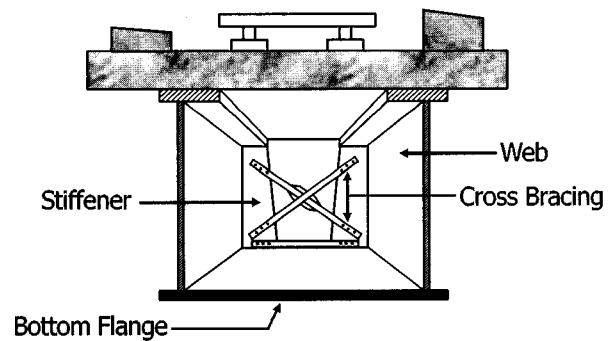


그림 3. 검증예제교량의 해석 대상부위 구조상세

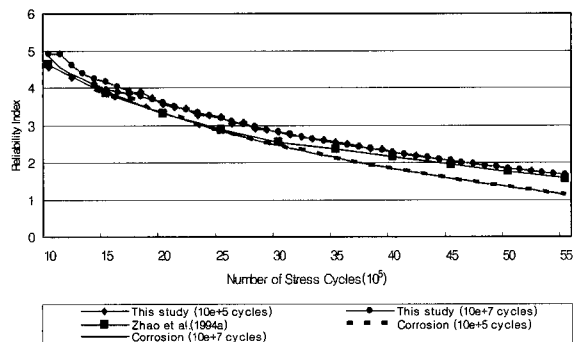


그림 4. 검증예제 참고문헌(Zhao 등, 1994) 결과와 제안된 알고리즘 적용결과와의 비교

표 7. 검증예제교량 관련 변수들의 통계적인 특성 값(Zhao 등, 1994)

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

보임을 확인할 수 있었으며, 시물레이션의 반복 횟수에 따른 결과의 차이는 그리 크지 않았으나 횟수가 큰 경우가 참고연구와 미세하게 가까운 값을 보였다. 이는 결과로서 신뢰도지수나 피로 취약도를 계산하는 방법상의 차이를 고려했을 때 유사한 결과를 제공할 수 있을 것이며, 본 연구를 통하여 제안된 피로 취약도 해석 방법을 통한 해석 결과가 시간에 따른 피로 취약도의 경향을 잘 묘사해 주고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 예제 교량의 부식 환경을 시골(Rural) 환경으로 가정하여 시물레이션을 수행한 결과는 부식을 고려하지 않은 경우들에 비해 부식에 의한 신뢰도지수의 감소를 잘 보여주고 있다. 따라서 본 연구를 통해 제안된 방법이 부식으로 인해 시간에 따라 증가하는 피로 취약도를 잘 묘사해 줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 적용예제 1

예제교량 1은 한강 상에 위치한 교량 중 하나로서 강상판형식과 강박스형식이 혼용된 형식이며 본 연구에서는 강상판형 부분을 대상으로 하였다. 그림 5는 대상 교량의 단면을 보여주고 있으며, 그림에서 볼 수 있듯이 지점 부위와 경간의 중앙 부위의 단면의 크기가 변화하는 변단면이며, 변동응력 데이터는 경간의 중앙에서 측정되었다. 해석대상 부재인 하부플랜지는 서로 맞대기용접이 되어 있고, 양방향으로 리브가 용

접 연결되어 있는 세부로서 도로교설계기준의 피로분류에 따르면 E'에 해당하며 해석에 필요한 관련변수들의 통계적인 특성은 표 8과 같다.

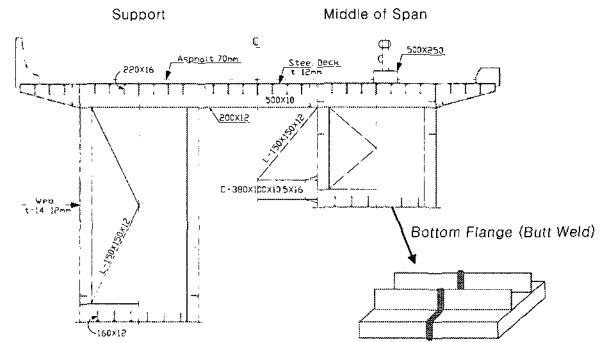
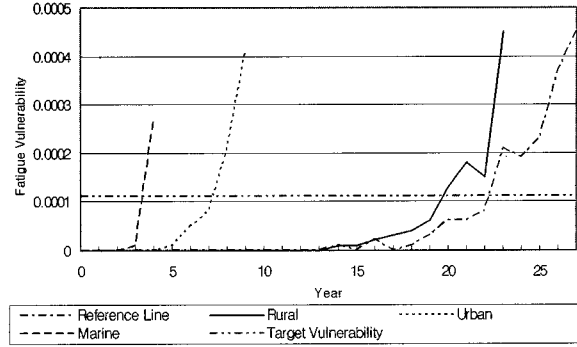
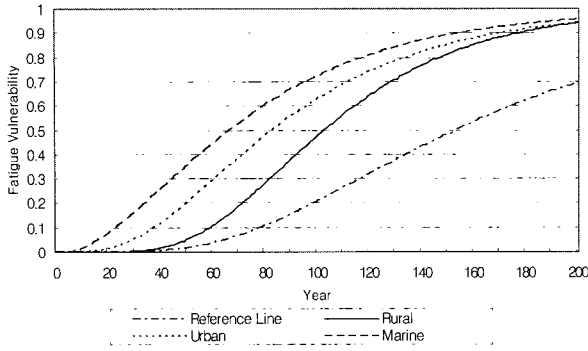


그림 5. 적용예제 교량 1의 대상부위 구조상세

본 교량에 대한 ADTT(일평균트럭통행량) 통계자료가 없는 관계로 인접교량의 통계자료를 바탕으로 활용 가능한 일평균차량통행량(AADT)의 3%를 ADTT로 추정하였다. 해석은 부식이 발생한 시점을 기준으로 하였으며, 부식환경에 따른 피로취약도의 차이를 알아보기 위한 경우(case1)와 실제 AADT의 연도별 통계를 바탕으로 모델링한 ADTT의 추정 변화양상을 적용한 경우(case2)로 나누어 수행하였다. 한계 취약도로서 일반적인 설계 시에 사용하는 한계파괴확률인 1.1×10^{-4} 을 적용하였다.

표 8. 적용예제 교량 1 관련 변수들의 통계적인 특성 값

변수	분포 형태	평균	변동계수	참고문헌
Fatigue category	E'	.	.	건설교통부(2000)
S_{re}	Constant	0.8266 kgf/mm^2	.	시설안전기술공단(1999)
A	Lognormal	$1.36 \times 10^8 \text{ kgf/mm}^2$	0.450	건설교통부(2000) Wirsching 등(1987)
Δ	Lognormal	1.0	0.300	Wirsching 등(1987)
m	Constant	3.0	.	건설교통부(2000)
a	Lognormal	$80.2 \times 10^{-3} \text{ mm}$	0.420	Kayser(1988)
b	Lognormal	0.593	0.400	
C_s	Constant	1.5	.	AASHTO(2004)
$ADTT_0$	Constant	2,500	.	서울특별시(2006)
r	Constant	assumption	.	.



(a) 전체 기간 동안 시간이력 피로 취약도의 변화
그림 6. 적용예제 교량 1에서 피로 취약도에 대한

(b) 한계 피로 취약도 부근 해석결과의 확대
부식 환경의 영향을 알아보기 위한 해석 결과

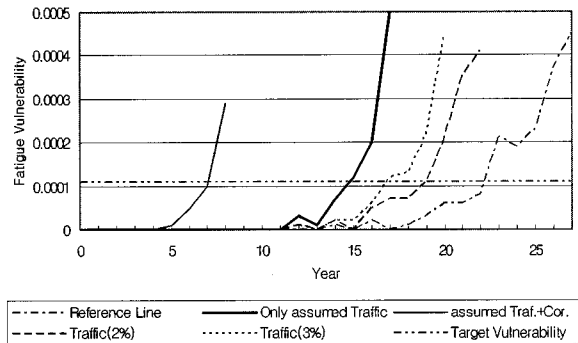
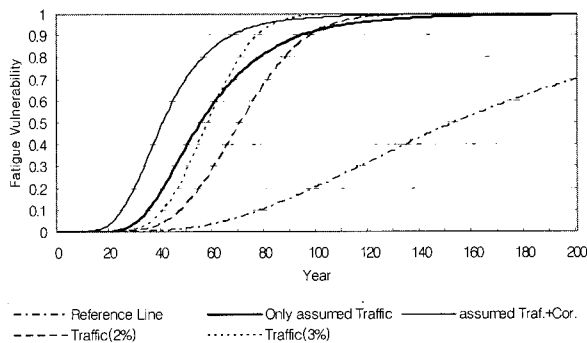
ADTT의 변화영향은 배제한 채 부식 환경만을 달리한 결과인 그림 6(a)는 심한 부식 환경일수록 초기에 그 영향이 커지지만 시간이 갈수록 부식 환경 간에 일정 수준의 취약도에 도달하는 시간의 격차가 줄어들음을 확인할 수 있다. 한계 취약도 부근의 해석결과인 그림 6(b)는 시간에 따른 취약도가 공용기간 초기에는 일단 부식이 발생한 이후에는 부식 환경에 따른 영향을 크게 받는다는 것을 보여준다. 특히 해양환경 하에서는 부식이 발생한 이후에 극히 짧은 시간 내에 한계 취약도에 도달하므로, 사전에 방식에 대한 대책 수립이 필수적임을 시사해주고 있다.

인할 수 있다. 다양한 양상의 교통량 변화의 경우, 초기에는 매년 5%의 일정 증가율로 증가하기 때문에 2%나 3%의 경우에 비해 취약도가 급격히 증가하다가, 중간에는 일정량씩 증가하고, 40년 이후에는 일정한 교통량으로 인해 일정 증가율의 경우에 비해 취약도의 증가 기울기가 작아짐을 확인할 수 있다. 이처럼 교통량의 변화 양상을 실제의 양상에 맞게 기간 별로 달리하여 적용하는 것이 가능하다.

실제 ADTT의 통계수치의 변화양상을 기반으로 초기 20년 동안은 매년 5%의 일정비율 증가하고, 이후 20년 동안은 공용 20년 시점의 2% 만큼 일정량씩 증가하다가 40년 이후에는 일정 수준을 유지하는 것으로 모델링(assumed traffic)하였다. 그림 7은 이와 같이 가정된 교통량 변화의 영향만을 고려한 결과와의 비교를 위해 2%, 3%의 일정한 교통량 증가율만을 고려한 결과를 함께 나타냈으며, 구간 별로 교통량의 변화 양상을 모델링한 경우와의 취약도의 차이를 확

4.3 적용예제 2

본 예제교량 2는 고속국도 상에 위치한 교량 중 하나로서 2등교 수준의 강교이며, 시외지역에 놓인 교량으로서 부식 환경은 시골환경(rural environment)에 속한다. 따라서 표 2에 제시된 시골환경에 대응하는 환경변수로부터 평균부식깊이를 구할 수 있다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 본 교량 2의 피로능력 측정부위는 거더의 경간 중앙부로서 필렛 용접되어 있는 I형보는 도로교설계기준 상의 피로상세 C에 해당한다. 표 9는 적용세부의 해석관련 변수들의 통계적인 특성을 나타낸다.



(a) 전체 기간 동안 시간이력 피로 취약도의 변화

(b) 한계 피로 취약도 부근 해석결과의 확대

그림 7. 적용예제 교량 1에서 실제 트럭통행량 변화양상과 부식 환경을 반영한 시간이력 피로 취약도의 해석 결과

표 9. 적용예제 교량 2 관련 변수들의 통계적인 특성 값

변수	분포 형태	평균	변동계수	참고문헌
Fatigue category	C	.	.	건설교통부(2000)
S_{re}	Constant	0.7512 kgf/mm ²	.	시설안전기술공단(1999)
A	Lognormal	15.3×10 ⁸ kgf/mm ²	0.450	건설교통부(2000) Wirsching 등(1987)
Δ	Lognormal	1.0	0.300	Wirsching 등(1987)
m	Constant	3.0	.	건설교통부(2000)
a	Lognormal	34.0×10 ⁻³ mm	0.090	Kayser(1988)
b	Lognormal	0.650	0.100	
C_s	Constant	1.5	.	AASHTO(2004)
$ADTT_0$	Constant	3,500	.	건설교통부(2006)
r	Constant	assumption	.	.

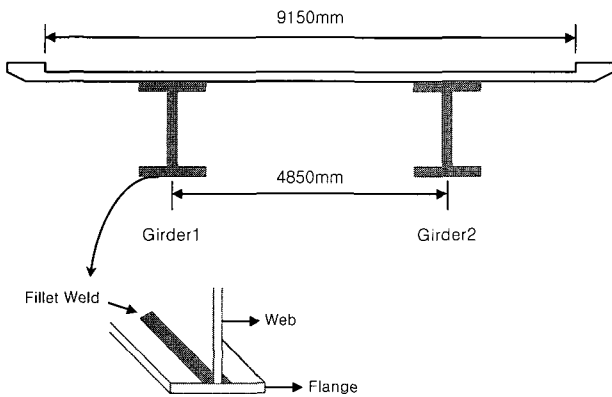
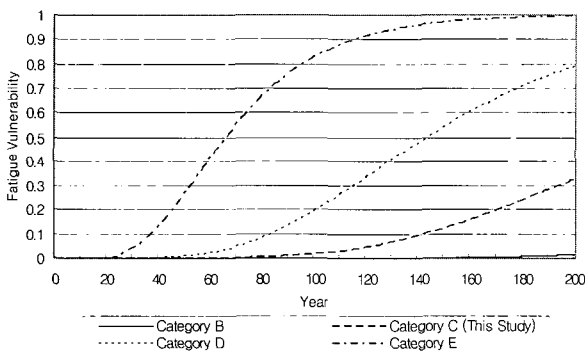


그림 8. 적용예제 교량 2의 대상부위 구조상세

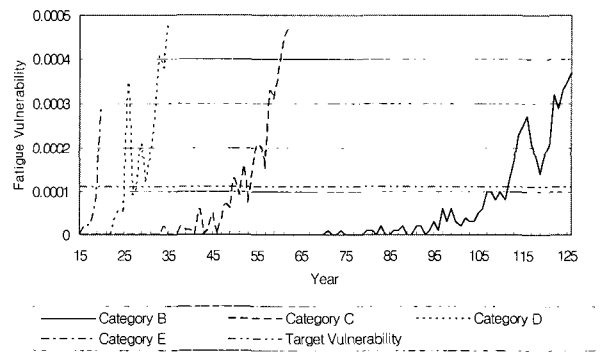
교량 2는 1970년에 고속국도 상에 건설된 교량으로서 비교적 오래된 강교에 속하기 때문에 공용기간 초기부터 체계적인 유지관리가 이루어지지 않았다고 볼 수 있다. 또한 비슷한 시기에 유사한 형식의 교량이 고속국도나 일반국도 상에 다수 건설되었다는 점

을 고려하여 교량 2에 대한 해석은 대상교량의 실제 피로분류항목인 C뿐 만 아니라, 다른 피로상세항목에 대해 여타의 조건은 동일하게 유지하여 해석을 수행하였다. 즉, 다른 모든 조건이 동일할 때, 피로분류항목이 달라짐에 따른 피로 취약도 곡선의 차이를 파악하고자 하였다.

그림 9는 대상교량 B2의 다른 조건은 그대로 유지한 채 피로분류항목만을 B, D, E로 변화시키면서 피로 취약도 해석을 수행한 결과이다. 교량량의 변화양상은 실제의 교량량 통계를 가지고 모델링하였으며, ADTT가 초기 10년은 3,500으로 일정하고, 11년부터 16년까지는 10%의 일정한 비율로 증가하다가 16년 이후로는 12,284로 다시 일정한 값을 가지는 것으로 설정하였다. 해석 결과가 피로항목 B, C, D, E에 따라 확연한 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 한계상태 함수 내에서 피로에 대한 저항을 구성하는 A값이 피로항목에 따라서 큰 차이를 보이기 때문인 것으로 판



(a) 전체 기간 동안 시간이력 피로 취약도의 변화



(b) 한계 피로 취약도 부근 해석결과의 확대

그림 9. 적용예제 교량 2에서 피로상세의 변화에 따른 시간이력 피로 취약도 해석 결과의 비교

단된다. 그림 9(b)는 그림 9(a)에서 나타난 결과가 1.1×10^{-4} 의 한계취약도에 도달하는데 걸리는 시간을 확인하기 위해 한계 취약도 부근을 확대하여 보여주고 있다. 피로상세가 달라짐에 따라 한계 취약도에 도달하는 시간의 차이가 확연한 것을 볼 수 있는데, 이는 강교 부재 상세의 피로성능이 부식을 고려하는 경우에는 매우 민감하게 나타난다는 것을 의미하며, 이로부터 강교의 부재 상세 설계시에 부재의 기능이나 설치 위치에 따라 적절한 연결 형식과 상세를 갖추도록 하는 것이 중요함을 알 수 있게 하는 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 시간에 따른 부식의 진행과 피로하중 인 트럭 통행량의 변화로 인한 강교의 열화를 반영하여 강교 부재의 시간이력 피로 취약도를 평가할 수 있는 신뢰성 해석 알고리즘을 제안하였으며, 실제 강교 부재를 대상으로 적용하여 기존의 알고리즘을 통한 결과와는 차별화된 피로 취약도 곡선을 도출하였다.

기존의 연구를 통해 제안된 평균부식깊이와 피로강도감소계수와의 관계를 이용하여 S-N곡선을 통해 피로 한계상태함수에 적용함으로써 피로 취약도에 부식의 영향을 반영할 수 있었으며, 교통량의 대표적인 변화 양상을 세 가지 형태로 모델링하여 적용함으로써 보다 실제적인 교통량의 변화를 반영할 수 있었다. 부식의 진행정도와 기간별로 변화하는 교통량의 영향을 반영한 시간이력 피로 취약도 곡선은 기존의 열화를 고려하지 않은 피로 취약도 곡선과는 뚜렷한 차이를 보였으며, 부식의 발생 이후에 부재가 한계 피로 취약도에 도달하는 시점에 대한 정보를 제공해줄 수 있었다. 이러한 정보는 부재별로 피로에 대한 안전점검시기 및 점검주기의 결정과 부재 간 점검 우선순위 결정과 같은 유지관리 정책결정을 지원할 수 있는 도구로 활용 가능하다. 이러한 실제적인 활용을 위해서는 열화로 인한 강교의 피로에 결정적인 요인으로 작용하는 교통량에 대한 통계자료의 확보 및 구축과 국내의 환경에 맞는 부식-피로강도 모델의 개발에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구(KRF-2004-042-D00189) 되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2000) 도로교설계기준. 한국도로교통협회.
 건설교통부 (2006) 교통량 정보 제공시스템. 온라인 자료(www.road.re.kr).
 김상효, 조성식, 한종석, 황학주 (1993) 차량하중에 의한 강도로교의 피로손상분석기법. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 232-235.
 박연수, 한석열, 서병철 (2003) 강교 부재의 피로손상에 대한 신뢰성 해석. 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp. 475-487.
 서울특별시 (2006) 지점별 연도별 교통량 통계. 온라인 자료(www.seoul.go.kr).
 시설안전기술공단 (1999) 변동응력측정을 통한 피로평가 및 건전성평가에 대한 연구. 보고서 BR-99-R5-47, 건설교통부.
 조효남, 임종권, 최현호 (1999) 신뢰성방법에 기초한 강교량의 잔존피로 수명 및 피로 위험도 평가. 한양대학교공학기술논문집, 한양대학교 공학기술연구소, 제8호, 제1권, pp. 309-317.
 한종석, 정연주, 김상효, 황학주 (1993) 강재의 부식을 고려한 강교의 피로안정성 분석. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 137-140.
 AASHTO (2004) *AASHTO LRFD bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
 Akgül, F. and Frangopol, D.M. (2004) Lifetime performance analysis of existing steel girder bridge structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 12, pp. 1875-1888.
 Czarnecki, A.A. and Nowak, A.S. (2006) *Time-variant reliability profiles for steel girder bridges*. Structural Safety, in press.
 Estes, A.C. and Frangopol, D.M. (1999) Repair optimization of highway bridges using system reliability approach. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 766-775.
 Fisher, J.W., Frank, K.H., Hirt, M.A. and McNamee, B.M. (1970) *Effect of weldments of the fatigue strength of steel beams*. National Cooperative Highway Research Program Report 102, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA.

- Garbatov, Y. and Soares, C.G. (1998) Fatigue reliability of maintained welded joints in the side shell of tankers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Vol. 120, pp. 2-9.
- 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.
- Kayser, J.R. (1988) *The effects of corrosion on the reliability of steel girder bridges*. Ph.D. Dissertation, University of Michigan, USA.
- Kayser, J.R. and Nowak, A.S. (1989) Capacity loss due to corrosion in steel-girder bridges. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 6. pp. 1525-1537.
- Lee, I.-H., Kim, S.Y., and Jun S. (2004) An Introductory Overview of Action-Derived Molecular Dynamics for Multiple Time-Scale Simulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, pp. 1633-1644.
- Lee, S.-H., and Yoon, Y.-C. (2004) Numerical Prediction of Crack Propagation by an Enhanced Element-Free Galerkin Method. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 227, No. 3, pp. 257-271.
- Liu, W.K., Park, H.S., Qian D., Karpov, E.G., Kadowaki, H., and Wagner, G.J. (2006) Bridging Scale Methods for Nanomechanics and Materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 1407-1421.
- Miner, M.A. (1945) Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, No. 3, pp. 159-164.
- Paris, P.C. and Erdogan, F. (1963) A critical analysis of crack Propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, ASME, Vol. 85, pp. 528-534.
- Rahgozar, R., Khalaghi, A.R. and Javanmardi, R. (2006) Fatigue notch factor in steel bridges due to corrosion. *Proceeding of the 7th International Congress on Civil Engineering*, Tehran, Iran, on-line paper.
- 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.
- Tang, J.P. and Yao, J.T.P. (1972) Fatigue damage factor in structural design. *Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 98, No. ST1, pp. 125-134.
- Wirsching, P.H. (1979) Fatigue reliability in welded joints of offshore structures. *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Vol. 1, pp. 197-202.
- Wirsching, P.H. and Chen, Y.N. (1988) Consideration of probability-based fatigue design for marine structures. *Marine Structures*, Vol. 1, pp. 23-45.
- Wirsching, P.H., Ortiz, K. and Chen, Y.N. (1987) Fracture mechanics fatigue model in a reliability format. *Proceedings of the 6th International Symposium on OMAE*, Houston, Texas, pp. 331-337.
- Yazdani, N. (1984) *Risk Analysis of Extending Bridge Service Life*. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, USA.
- Yazdani, N. and Albrecht, P. (1987) Risk analysis of fatigue failure of highway steel bridges. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 483-500.
- 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.
- Zi, G., Song, J.-H., Budyn, E., Lee, S.-H., and Belytschko, T. (2004) A Method for Growing Multiple Cracks without Remesing and its Application to Fatigue Crack Growth. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 901-915.

© 논문접수일 : 2007년 06월 12일

© 심사의뢰일 : 2007년 06월 13일

© 심사완료일 : 2007년 07월 27일