

응답면기법을 활용한 피로균열진전 신뢰성 평가

Reliability Assessment of Fatigue Crack Propagation using Response Surface Method

조 태 준¹⁾ · 김 이 현²⁾ · 경 갑 수³⁾ · 최 은 수⁴⁾
Cho, Tae Jun Kim, Lee Hyeon Kyung, Kab Soo Choi, Eunsoo

요 약 : 철도교량은 무거운 축하중이 작용하여 구조부재의 전체 강도에서 활하중이 차지하는 비율이 높기 때문에 피로에 의한 손상이 클 뿐만 아니라 계속적으로 변화하는 하중환경에 의해 피로손상이 빠르게 진행될 가능성이 있으므로 이에 대한 안전성을 체계적이고 분석적으로 평가할 수 있는 방법이 요구된다. 철도교량에서 구조부재별 피로균열의 생성위치 및 성장속도는 발생응력의 범위와 횟수, 구조시스템의 강성에 관련되어 있다. 구조시스템의 강성은 계획주체, 설계자, 시공자, 유지관리주체 각각의 특성과 불확실성을 포함하고 있으며, 시간의존적 하중과 저항의 특성에 의해서 추계학적으로 변화하게 된다. 그러므로 이러한 하중 및 저항에서의 각각의 불확실성을 정량적이고 객관적으로 표현할 수 있는 신뢰성에 기초한 평가기법을 개발하였다. 철도 및 지하철교량 등의 피로파괴에 대한 확률론적 평가를 위하여 응답면 기법(Response Surface Method, RSM)과 일계이차 모멘트 기법(First Order Second Moment method, FOSM)을 사용하여 피로균열진전과 잔존수명을 평가하였다. 응력변동 범위를 설계변수로 변화시키면서, 중요한 설계입력 변수로 한계상태 방정식을 구성하고 다양한 피로 수명(100년, 75년 등)후의 파괴확률을 예측하여 설계피로수명에 대한 신뢰성 지수계산 및 발생확률을 분석사례로 제시하였다.

ABSTRACT : Due to the higher ratio of live load to total loads of railway bridges, the accumulated damage by cyclic fatigue is significant. Moreover, it is highly possible that the initiated crack grows faster than that of highway bridges. Therefore, it is strongly needed to assess the safety for the accumulated damage analytically. The initiation and growth of fatigue-crack are related with the stress range, number of cycles, and the stiffness of the structural system. The stiffness of the structural system includes uncertainties of the planning, design, construction and maintenance, which varies as time goes. In this study, the authors developed the design and risk assessment techniques based on the reliability theories considering the uncertainties in load and resistance. For the probabilistic risk assessment of crack growth and the remaining life of the structures by the cyclic load of railway and subway bridges, response surface method (RSM) combined with first order second moment method were used. For composing limit state function, the stress range, stress intensity factor and the remaining life were selected as input important random variables to the RSM program. The probabilities of failure and the reliability indices of fatigue life for the considered specimen under cyclic loads were evaluated and discussed.

핵심용어 : 철도교량, 피로수명, 균열진전, 신뢰성, 응답면기법

KEYWORD : railway bridge, fatigue life, crack growth, reliability, RSM

1. 서론

최근 발간된 통계연보(2005년)에 의하면 약 2,700여개의 철도교량이 있는 것으로 파악되고 있다. 최근 들어 고속철도 교량의 건설과 중지간의 교량이 늘어나면서 프리스트레스형식의 교량의 건설이 증가하고 있으나 개소측면에서는 약

1,000개의 강교가 33%이 비율을 차지하고 있으며, 연장면에서는 교량전체연장 약 304km중에서 64km로 약 21%를 차지하고 있다.

강철도교를 준공년도별로 나타내면 그림 2와 같으며 해장전인 1940년도 이전에 건설된 교량이 약 절반을 차지하고 있는 것으로 파악되고 있다. 이러한 강교들의 대표적인 특징

1) 대전대학교 건설시스템공학과 전임강사(cho_taejun@hanmail.net)

2) 한국철도기술연구원 선임연구원(ihkim@krri.re.kr)

3) 한국해양대학교 토목환경공학과 교수(kyungks@hhu.ac.kr)

4) 교신저자, 홍익대학교 토목공학과, 조교수

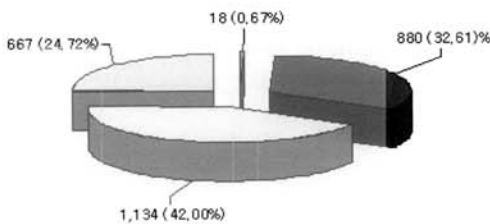
(Tel. 02-320-3060, Fax. 02-322-1244, E-mail: eunsoochoi@hongik.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

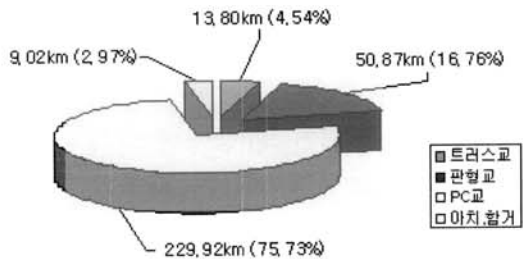
은 시간이 경과함에 따라 피로손상이 축적되고 있어 교량의 수명을 지배하는 중요한 열화요인이 되고 있다. 이와 같은 강교의 열화손상정도를 정량적으로 평가하고 수명을 연장하기 위한 합리적인 유지관리 기법을 개발하기 위하여 본 연구에서는, 강구조물에 가장 큰 영향을 미치는 반복하중에 의한 피로균열을 결정론적인 파괴역학적인 방법으로 추정하고, 시물레이션 하중을 이용한 응력변동해석을 실시하여 일정진폭 및 변동진폭하중에 대한 피로균열진전수명을 분석하였다. 또한 하중 및 저항에 관련된 기하적, 재료적 설계변수가 가지는 불확실성의 모델링을 위하여 확률론적인 균열지전 및 피로수명 평가를 실시하고자 한다.

표 1. 철도교량 통계표

구분		개소	연장 (km)
트러스교	트러스교	18	13,799
	일반교	631	38,983
판형교	과선철도교	7	270
	가도교	242	11,620
	계	880	50,873
	일반교	821	199,001
PC교	과선철도교	15	8,689
	가도교	298	22,234
	계	1,134	229,924
아치, 압거	일반교	390	5,366
	가도교	277	3,649
	계	667	9,015
교량총계		2,699	303,611



(a) 개소별 분포현황



(b) 연장별 분포현황

그림 1. 철도교량 분포현황

2. 피로균열진전해석

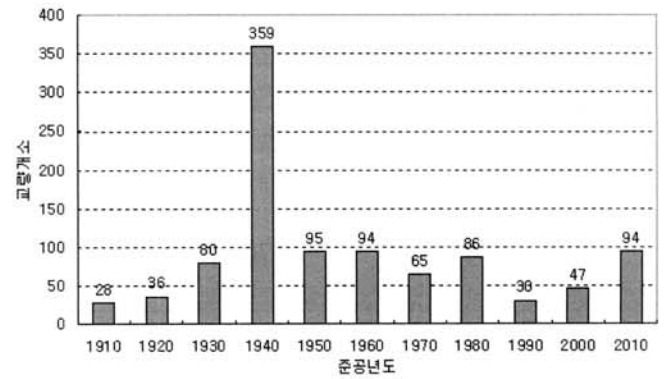


그림 2. 강철도교 준공년도별 분포현황

2.1 개요

피로균열진전해석은 용접구조물의 용접결함 또는 표면형상 변화부에서 발생한 피로균열의 진전수명을 예측하는 방법이다. 이 해석에서는 피로균열에 대한 응력확대계수 ΔK 를 계산하고, 이것을 피로균열진전속도 da/dN 와의 관계에 대입하여 초기균열부터 한계균열까지 반복하여 수명을 계산한다. 피로균열진전속도 da/dN 는 응력확대계수범위의 함수로 식 (1) ~ 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2)$$

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C(\Delta K)^m & ; \Delta K \geq \Delta K_{th} \\ 0 & ; \Delta K < \Delta K_{th} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, da/dN (mm/cycle)
 ΔK (MPa \sqrt{m})
 ΔK_{th} 하한계응력 확대계수

잔존수명 N 은 초기균열 a_i 로부터 한계균열 a_c 까지 적분하여 구할 수 있으며 식 (1)의 경우는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (4)$$

그러나 ΔK 는 복잡한 함수형으로 주어지므로 식 (4)를 직접 적분할 수 없는 경우가 많아서 대부분 수치적분에 의해서

만 계산할 수 있다. 예를 들어 그림 3과 같이 반타원형 또는 타원형의 균열길이방향의 위치점(A) 및 폭 방향의 위치점(B)에서의 응력확대계수 ΔK_A 및 ΔK_B 를 구하면 식 (1)에 이 값을 대입하여 응력 1 주기마다 양방향의 피로균열진전량을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 비파괴검사 등에 의해 검출된 초기균열길이로부터 한계균열길이까지 반복하여 피로수명을 계산한다.

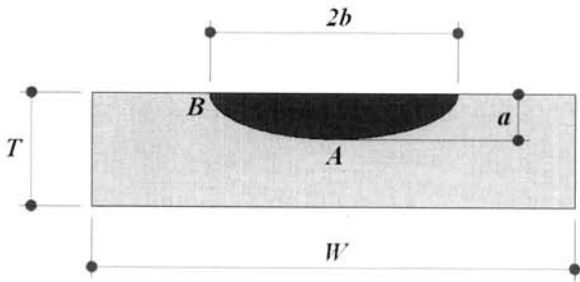


그림 3. 반타원형 표면균열

식 (2)와 식 (3)은 응력확대계수범위가 어떤 한계값 이하가 되면 피로균열이 진전하지 않는 것으로 고려한다. 식 (1) 및 식 (3)을 사용하여 피로수명평가를 하는 경우는 식 (2)에 비해 피로잔존수명이 짧게 산정되어 안전측의 평가를 할 수 있다. 재료정수 C , m 및 하한계 응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 JSSC 피로설계지침에서 표 2 및 그림 4와같이 주어져 있다. 최안전설계곡선의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 피로조사와 같은 정도의 안전성을 고려하여 계산한 경우에 사용되며, 평균설계곡선의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 평균적인 피로수명 또는 피로강도를 계산하는데 사용 된다 (그림 3).

표 2. 피로균열 진전해석 시 사용하는 상수값

구분	C	m	ΔK_{th}
최안전 설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

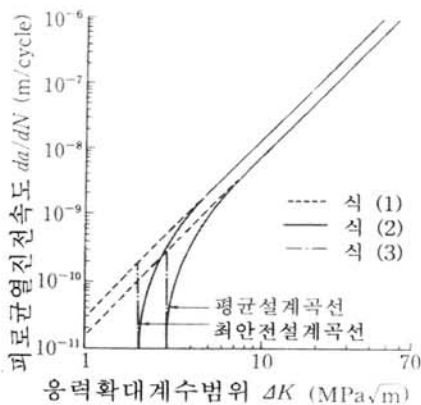


그림 4. $da/dN - \Delta K$ 관계

2.2 일정진폭응력의 피로균열진전해석

일정진폭응력에서의 피로균열진전해석의 흐름도는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 주어진 균열에 대한 응력확대계수범위 ΔK 를 계산하고, 이것을 식 (2)에 대입하여 잔존수명을 산출한다. 여기에서 W, T, NUM은 각각, 시험체의 폭, 두께, 반복회수를 의미하며, A[i,j], B[i,j], X[i,j]는 각각 균열의 길이, 균열의 폭, 균열위치를 나타낸다.

1 주기 마다 균열진전수명을 계산할 경우 피로잔존수명과 동일한 횟수의 반복계산이 필요하게 되므로 일정한 반복구간을 선정하여 아래와 같이 계산절차를 단순화시켜서 구한다.

- ① 균열(a,b)에 대한 응력확대계수범위 ΔK_{A1} , ΔK_{B1} 를 구한다.
- ② Δn 의 응력반복에 의해 발생하는 균열증분 $\Delta a'$, $\Delta b'$ 를 산출한다.

$$\Delta a' = C (\Delta K_{A1})^m, \Delta b' = C (\Delta K_{B1})^m \quad (5)$$

- ③ 균열(a+ $\Delta a'$, b+ $\Delta b'$)에 대한 응력확대계수 ΔK_{A2} , ΔK_{B2} 를 구한다.

- ④ 균열이 (a,b)로부터 (a+ $\Delta a'$, b+ $\Delta b'$)까지 진전할 때의 평균적인 응력확대계수범위 ΔK_A , ΔK_B 를 계산한다.

$$\Delta K_A = \sqrt[m]{\frac{(\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m)}{2}} \quad (6)$$

$$\Delta K_B = \sqrt[m]{\frac{(\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m)}{2}} \quad (7)$$

- ⑤ 이 단계에서의 균열증분 $\Delta a'$, $\Delta b'$ 를 구한다. (① ~ ④ 단계 반복)

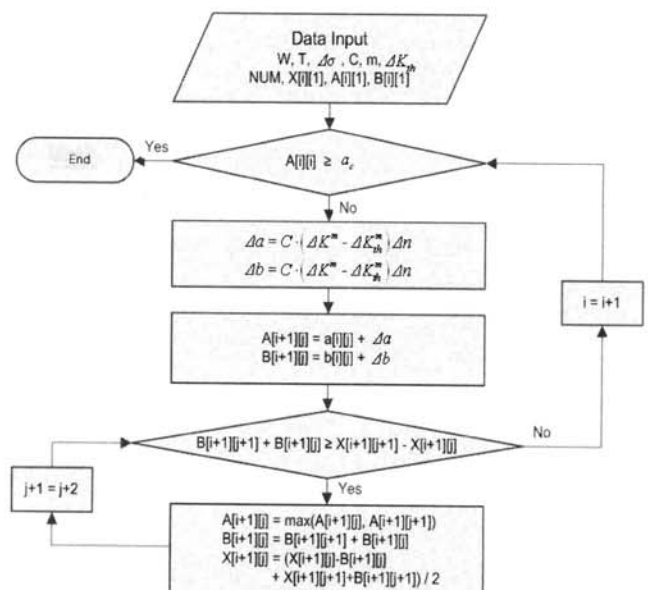


그림 5. 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도

단순화시킨 계산과정에서는 사용된 Δn 은 검출된 균열의 길이, 용접이음부의 각종 조건에 따라 개략적인 수명을 산정하여 전체수명의 1/100 이하가 되도록 하여야한다.

2.3 변동진폭응력의 피로균열진전해석

변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석은 기본적으로 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석과 동일하나 응력범위빈도분포를 구성하는 각각의 응력범위에 대한 응력확대계수범위 ΔK 를 계산하고 각각의 응력범위성분에 대한 균열진전량을 계산한다. 그러나 일반적으로 계산의 효율화를 위해서 식 (8)과 같이 ΔK_{th} 에 대한 응력범위 $\Delta\sigma_d$ 를 구하여 $\Delta\sigma_d$ 이상의 응력범위빈도 분포를 대표하는 등가응력범위를 식 (9)와 같이 계산하여 일정진폭응력과 같은 과정으로 피로균열진전해석을 한다.

$$\Delta\sigma_d = \frac{K_{th}}{\sqrt{\pi a} \cdot F} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma^m n_i}{\sum n_i}} \quad (9)$$

식 (9)에서 구한 등가응력범위 값을 사용하여 식(10)과 같이 등가응력확대계수범위 ΔK_{eq} 을 구하고 이 값을 사용하여 1회의 응력반복에 대한 평균적인 피로균열진전량을 표현하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K_{eq} = \Delta\sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (10)$$

$$\Delta a = C (\Delta K_{eq})^m \cdot \Delta n \cdot \left(\frac{n_d}{n}\right) \quad (11)$$

여기에서 n_d 와 n 은 각각, $\Delta\sigma_d$ 이상의 응력범위성분에 대한 응력반복횟수, 모든 응력범위성분에 대한 응력반복횟수를 나타낸다. 즉, n_d/n 은 응력범위빈도성분을 구성하는 모든 응력범위성분에 대한 응력반복횟수가 피로균열진전에 얼마만큼의 비율로 기여하고 있는가를 나타낸다. 등가응력범위를 계산한 후에는 일정진폭응력범위와 동일한 계산과정을 거치게 된다.

3. 응답면기법에 의한 피로균열진전과 파괴확률예측

균열진전과 같은 시스템의 응답을 직접 표현하기 힘든 음함수형태의 한계상태에 대한 해석은 간단한 경우에는 Crude

Monte-Carlo Simulation (MCS)으로 가능하지만, 복잡한 경우 해석시간의 기하급수적인 증가와 정확도의 감소로 매우 힘들어 진다. 그러므로 본 해석에서는 음함수를 갖는 한계상태 방정식의 구성을 위하여 보다 경제적인 응답면 기법 (Response Surface Method, RSM)을 적용하였다.

3.1 응답면기법의 적용

응답면 기법의 적용은 근사화의 정확도, 근사화를 위해 필요한 구조해석의 횟수, 그리고 구조해석을 수행하여야 할 표본점의 선정이 중요하며, 표본점의 선정은 각 확률변수의 중심점을 정하여 그 주변으로 일정거리만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법 등이 제안되었다. 응답면 기법 중 중심합성계획법(Central Composite Design)은 응답면을 연성항 (Cross-coupled Term)이 포함된 2차 다항식으로 표현함으로써 회귀방정식이 직교성, 회전성, 정도의 균일성이라는 통계적 성질을 갖도록 하는 방법이며, Bucher-Bourgund법은 연성항이 없는 이차 다항식으로 근사식을 표현하여 표본점의 수를 줄일 수 있도록 하였다(Bucher, 1987). 본 논문에서는 Bucher-Bourgund법을 이용하여 중심점(무작위 변량의 평균)과 중심점에서 $\pm\alpha$ (표준편차) 만큼 떨어진 3개의 축점을 선정하여 응답함수를 구성하려고 한다. 균열진전과 같은 음함수 형태의 한계상태 방정식은 균열의 크기가 매우 작은 경우 또는 복잡한 시스템의 평가에 MCS의 적용이 극히 제한적이다.

응답면기법을 사용할 경우 한계 상태 함수에서 시간 또는 공간 종속 입력 변수를 선택함으로써 발생 추정 확률이 분석된다. 입출력변수의 선정이 자유스럽고 응력변동해석 및 균열진전에 따른 음함수 형태의 한계상태방정식의 파괴확률평가에 유리하다.

입력변수로 변동응력, 초기균열길이, 응력확대계수, 보정계수 등을 사용할 수 있으며, 출력변수로 잔존수명, 응력반복횟수 등 모든 시스템 응답이 가능하다.

3.2 응력변동범위의 증가와 피로파괴확률

응답면 기법과 FORM을 이용한 개발된 프로그램을 사용하여 일정-표면타원균열의 균열진전에 따른 피로신뢰성을 평가하였다.

일정진폭응력을 이용하여 구조물 시스템의 극한 한계상태 방정식을 구성하고, 응답면계수는 최소자승법을 통해서 구하며, 한계상태식의 위반확률은 Taylor급수전개식에서 두가지 모멘트 값(평균값과 표준편차)를 사용하여 선형다항식에 대하여 정확히 계산할 수 있는 FOSM (First Order Second

Moment) 방법 (Nowak, 2000)으로 신뢰성지수 및 파괴확률을 구한다. Taylor급수전개식에서 2차식 전개를 통하여 곡률 수정을 하면 Second Order Reliability Method (SORM)가 되어 약간의 신뢰성지수평가의 개선이 가능하다. (Breitung, 1989)

응답면기법과 FOSM을 이용한 해석을 위하여 그림 6과 같은 시험체를 대상으로 해석을 실시하였다. 균열진전시 사용되는 응력확대계수 보정계수(F_g)는 표 5와 같이 계산하여 적용하였다.

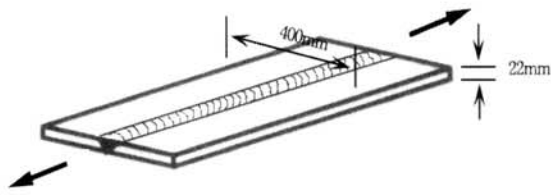


그림 6. 시험체 형상

본 연구에서 개발된 피로신뢰성 평가방법을 적용하기 위해서 아래 표와 같은 조건의 초기조건을 가정하였다.

표 4. 시험체의 초기조건

강 종	항복응력	이음종류	이음강도
SM490	315 MPa	수직응력을 받는 종방향용접이음	D
초기균열 폭×길이(mm)	균열형상	한계균열크기	적용된 균열진전식
0.1 × 0.21	반타원 표면균열	판두께, 폭의 95%	최안전 설계곡선

표 5. 균열진전에 따른 F_g 값

균열크기 (mm)	F_g	균열크기 (mm)	F_g
0	2.5	14	2.4
7	2.4	22	2.3

3.3 피로수명에 대한 한계상태함수와 파괴확률

피로수명이 800년에서 1000년까지로 가정될 때, 균열진전에 의해서 한계균열길이에 도달하는 한계상태함수는 다음 식 (12)와 같다.

$$g(\cdot) = \text{fatiguelife}(1000\text{년}) - [a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_i (x_i)^2] \quad (12)$$

여기서, $g(\cdot)$ 은 한계상태함수로서 0보다 작은값을 보이면 한계균열길이까지의 균열진전에 의한 피로파괴를 의미한다.

다. a_i 는 무작위 변량 x_i 에 대한 응답면계수이다.

입력변수로 사용된 무작위 변량에 대한 통계적 특성값은 표 6과 같이 가정하였다. 여기서 한계상태 방정식의 저항항인 잔존수명은 최소 한계값에 많은 분포를 가지는 비스듬한 모양의 Log normal분포로 가정하였고 (Rosenblueth and Estra, 1972)., 기타 재료변수들은 표본의 크기가 커짐에 따라 정규분포에 접근하게 되는, 중심극한정리(central limit theorem)에 근거하여 표준정규분포로 가정하였다.

표 6. 무작위 변량의 통계적 특성값

무작위 변량	변수명	평균	분산	확률분포
$\Delta\sigma$	X_1	29.43 MPa	0.05	Normal
c	X_2	2.70×10^{-11}	0.05	Normal
ΔK	X_3	2	0.05	Normal
잔존수명	X_4	1000	0.1	Log normal

선택된 무작위 변량은 표 7과 같이 일정변동응력범위 $\Delta\sigma$, 계수 c, 그리고 응력확대계수범위 ΔK 에 대하여 Bucher-Bourgund법을 이용하여 중심점과 중심점(무작위 변량의 평균값)에서 $\pm \sigma$ (표준편차) 만큼 떨어진 3개의 축점을 선정하여 응답함수를 구성하였다.

표 7. 일정반복응력이 29.43 MPa 일때 응답면 구성을 위한 입력변수

해석경우	$\Delta\sigma$	c	ΔK	잔존수명(year)
CASE1	29.43	2.70E-11	2.00	973.97
CASE2	27.96	2.70E-11	2.00	1385.96
CASE3	30.9	2.70E-11	2.00	752.92
CASE4	29.43	2.565E-11	2.00	1024.11
CASE5	29.43	2.84E-11	2.00	924.88
CASE6	29.43	2.70E-11	1.95	924.66
CASE7	29.43	2.70E-11	2.05	1123.48

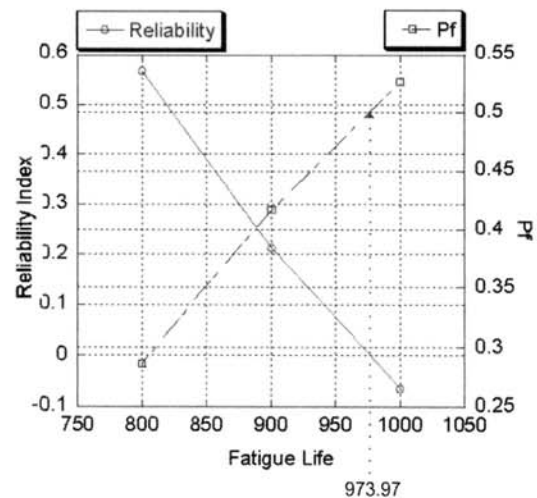


그림 7. 일정반복응력 29.43 MPa에 대한 피로파괴확률

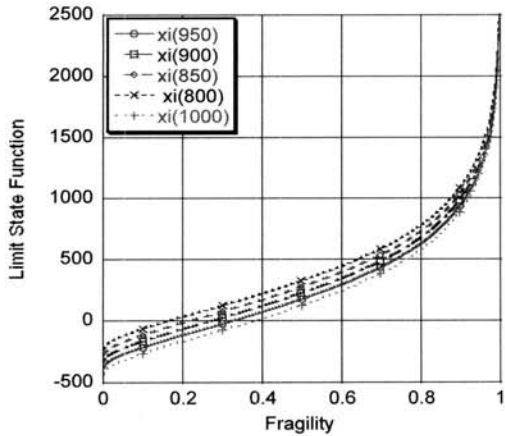


그림 8. 일정반복응력 29.43 MPa에 피로수명강도에 대한 취약도(Fragility, 파괴확률)

결정된 응답면 계수는 다음과 같으며, 잔존수명을 변화시켜서 얻어진 잔존수명에 대한 피로파괴확률은 그림 7과 표 8과 같다. 그림 8에서는 요구되는 피로수명의 증가에 따른 파괴확률의 증가에 대한 취약도(Fragility, 파괴확률: Choi 등, 2004; Yi 등, 2007)을 나타내어 시편의 피로수명 설계에 참조가 되도록 하였다.

$$g(\cdot) = \text{fatiguelife}(\text{Year}) - (12086.1 - 27.04x_1 - 7.54 \times 10^{12}x_2 - 7668.7x_3 + 0.0416x_1^2 + 7.41 \times 10^{22}x_2^2 + 1965.9x_3^2) \quad (13)$$

표 8. 일정반복응력 29.43 MPa일 경우 파괴확률 및 신뢰성지수 결과

Year	Reliability	P _f
1000	-6.43E-02	5.26E-01
900	2.13E-01	4.16E-01
800	5.65E-01	2.86E-01

일정반복응력 49.05 MPa과 69.67 MPa에 대한 피로파괴에 대한 한계상태 방정식의 결정된 응답면 계수는 각각 식 (15), (16)과 같으며, 잔존수명을 변화시켜서 얻어진 잔존수명에 대한 피로파괴확률과 신뢰성지수를 각각 그림 9, 표 10과 그림 11, 표 12에 나타내었다. 그림 10과 그림 12에서는 요구되는 피로수명의 증가에 따른 파괴확률의 증가에 대한 취약도(Fragility, 파괴확률)를 각각 나타내어 시편의 피로수명 설계에 참조가 되도록 하였다. 취약도 분석그림에서는 응력범위가 증가함에 따라서 피로수명증가에 따른 취약도(Fragility, 파괴확률)가 예민해져서 간격이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 7, 그림9, 및 그림 11에서 파괴확률 P_f는 식(14)와 같은 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)이며

$$F_x(x) = \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}\right) = \Phi(-\beta) \quad (14)$$

여기서, x 는 확률변수, \bar{x} 는 확률변수의 평균, $F_x(x)$ 는 누적분포함수, σ_x 는 확률변수의 표준편차, $\Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}\right)$ 는 표준정규분포함수, β 는 신뢰성 지수를 나타낸다.

식 (14)에서 확률변수가 결정론적 해석 값(계산된 피로수명 평균값 x)일 경우 신뢰성지수는 0이 되고, 파괴확률 P_f는 0.5가 된다. 그러므로 그림 5, 그림 6, 그림 7에서는 결정론적인 해석에서 정해진 피로수명은 그림의 점선과 같이 파괴확률 50%에 해당이 되며, 피로수명의 변화에 따른 파괴확률의 변화에 대하여 신뢰성의 저하와 같이 누적분포함수 및 표준정규분포함수로 나타나게 된다.

표 9. 일정반복응력이 49.05 MPa일때 응답면 구성을 위한 입력변수

해석경우	$\Delta\sigma$	c	ΔK	잔존수명(year)
CASE1	500	2.70E-11	2.00	192.81
CASE2	475	2.70E-11	2.00	194.86
CASE3	525	2.70E-11	2.00	191.1
CASE4	500	2.565E-11	2.00	196.26
CASE5	500	2.84E-11	2.00	183.56
CASE6	500	2.70E-11	1.95	192.12
CASE7	500	2.70E-11	2.05	193.63

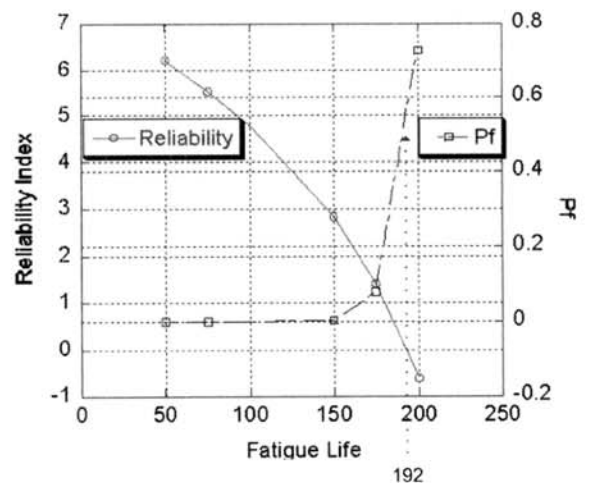


그림 9. 일정반복응력 49.05 MPa에 대한 피로파괴확률

$$g(\cdot) = \text{fatiguelife}(\text{Year}) - (84.744 - 0.208x_1 - 4.919 \times 10^{11}x_2 + 1.948 \times 10^{-05}x_3 + 2.009 \times 10^{-04}x_1^2 + 6.787 \times 10^{20}x_2^2 + 0.192x_3^2) \quad (15)$$

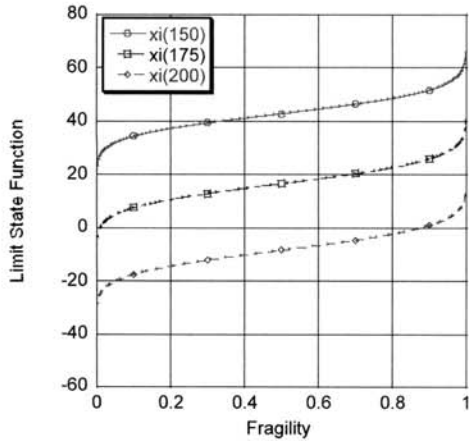


그림 10. 일정반복응력 49.05 MPa에 피로수명강도에 대한 취약도(Fragility, 파괴확률)

표 10. 일정반복응력 49.05 MPa일 경우 파괴확률 및 신뢰성지수 결과

Year	Reliability	P _f
200	-6.05E-01	7.28E-01
175	1.4036306	8.02E-02
150	2.8260668	2.36E-03
100	4.78E+00	8.88E-07
75	5.5428439	1.49E-08
50	6.2176188	2.52E-10

표 11. 일정반복응력이 69.67MPa일때 응답면 구성을 위한 입력변수

해석경우	$\Delta\sigma$	c	ΔK	잔존수명(year)
CASE1	700	2.70E-11	2.00	75.34
CASE2	665	2.70E-11	2.00	87.58
CASE3	735	2.70E-11	2.00	65.41
CASE4	500	2.565E-11	2.00	79.45
CASE5	500	2.84E-11	2.00	71.91
CASE6	500	2.70E-11	1.95	75.34
CASE7	500	2.70E-11	2.05	75.34

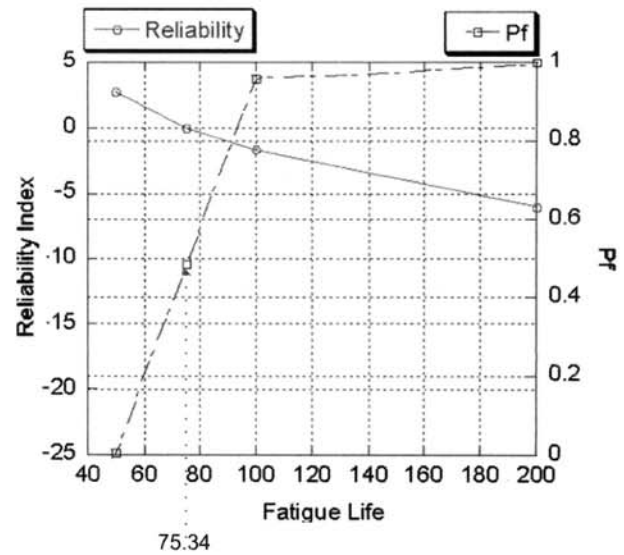


그림 11. 최대일정반복응력 69.67MPa에 대한 피로파괴확률

$$g(\cdot) = \text{fatiguelife}(\text{Year}) - (97.388 - 0.161x_1 - 1.43 \times 10^{12}x_2 - 6.390 \times 10^{-8}x_3 + 9.249 \times 10^{-5}x_1^2 + 2.146 \times 10^{22}x_2^2 + 1.597 \times 10^{-8}x_3^2) \quad (16)$$

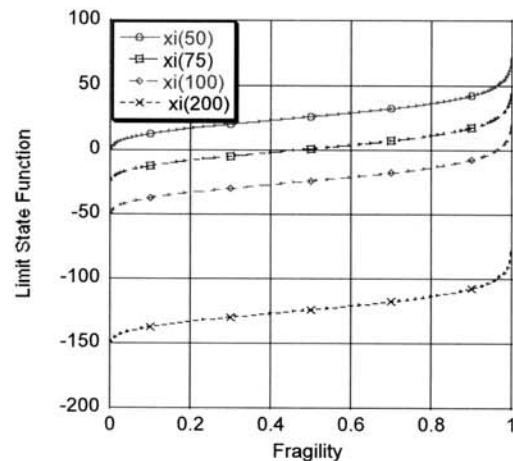


그림 12. 일정반복응력 69.67 MPa에 피로수명강도에 대한 취약도(Fragility, 파괴확률)

표 12. 일정반복응력 69.67MPa일 경우 파괴확률 및 신뢰성지수 결과

Year	Reliability	P _f
1000	-20.00120	1
500	-13.24079	1
200	-6.144184	1.00E+00
100	-1.711983	9.57E-01
75	3.54E-02	4.86E-01
50	2.7198999	3.27E-03

4. 결론

피로파괴에 대한 확률론적 평가를 위하여 응답면 기법(Response Surface Method)과 일계이차 모멘트 기법(First Order Second Moment Method)을 사용하여 피로 균열진전과 잔존수명 평가를 위하여 응답면기법을 적용하였다.

응력변동범위를 설계변수로 변화시키면서, 중요한 설계입력 변수들로 한계상태 방정식을 구성하고 다양한 피로 수명(100년, 75년 등)후의 파괴확률을 예측하는 피로수명에 대한 신뢰성 지수계산 및 발생확률의 평가 결과를 분석사례로 제시하였다. 입력변수가 결정론적 해석 값(계산된 피로수명 평균 값)일 경우 신뢰성지수는 0이 되고, 파괴확률 Pf는 0.5가 된다. 그러므로 그림 7, 그림 9, 그림 11에서는 결정론적인 해석에서 정해진 피로수명은 그림의 점선과 같이 파괴확률 50%에 해당이 되며, 피로수명의 변화에 따른 파괴확률의 변화에 대하여 신뢰성의 저하와 같이 누적분포함수 및 표준정규분포함수로 나타나게 된다.

해석예제의 결과와 같이 응력범위가 29.43 MPa인 경우, 피로수명은 974년 정도이고, 응력범위가 49.05 MPa인 경우 피로수명은 192년, 69.67 MPa인 경우 75년 정도로 급격한 감소를 보인다. 그러나 실제 실험결과와 같이 재료 및 하중, 실험시의 불확실성을 반영한 피로신뢰성 해석결과는 각각의 피로수명에 대해서 한계균열길이에 도달할 확률을 평가하여 파괴확률과 신뢰성지수로 나타나게 된다.

예제해석과 같이 응답면기법은 해석도구나 방법에 무관하게 선택한 입력변수만으로 최소의 오차를 갖도록 회귀분석과 파괴확률의 평가가 가능하며, 열화 예측식, 최적화나 신뢰성 해석에 쉽게 응용이 가능하다.

계산된 파괴확률은 알려진 위험성에 대한 피해를 평가하도록 되어있는 취약도모델과 비교하여, 결정되어있는 위험도에 대한 피해의 수준을 비교·평가하였다. 요구되는 피로수명 별 조건부 파괴확률을 취약도로 표시하여 설계 시 확률론적 피로수명 평가에 도움을 주도록 하였다.

제시된 해석기법은 임의의 입력 설계변수(초기 균열폭, 균열깊이, 판두께, 판폭의 변화)에 대하여 적용이 가능하며, 설계단계에서 시방서 기준에 대한 검토 및 유지관리단계에서의 확률론적 잔존수명 예측과 안전성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 철도청(2003), 강철도교 잔존수명 평가 및 유지관리기법 개발, pp.143-153
- 한국철도기술연구원(2006), 유지보수성능향상 기술연구.
- 경갑수 등(2002), 국내 강철도교의 열화손상 사례분석, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, pp.32-40
- 박연수 등(2004), 확률적인 응력-수명 방법에 의한 강교 부재의 피로신뢰성 평가, 대한토목학회논문집, 제24권 제3A호,
- 박영석(1994), 강교의 피로와 손상, 구미서관, pp.4-13.
- (社)日本鋼構造協會編(1993), 鋼構造物の 疲勞設計指針·同解説, 技報堂出版, pp.51-56
- 대한토목학회(2004), 철도설계기준(철도교편)
- (財)鐵道總合技術研究所(2000), 鐵道構造物 等 設計標準·同解説 - 鋼·合成構造物
- Breitung K, Hohenbichler M. Asymptotic approximations for multivariate integrals with an application to multinormal probabilities. *J Multivariate Analysis* 1989;30(1):80 - 97.
- Bucher, C.G., Bourgund, U.(1987), Efficient Use of Response Surface Methods, Report No.9-87, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria.
- Box, G.E.P., and Wilson, K.B.(1951), On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Journal of Royal Statistical Society*, Series B13, pp.1-45.
- Eunsoo Choi, Reginald DesRoches(2004), Bryant Nielson, Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones, *Engineering Structures* 26 pp.187-199.
- Maddox, S.J.(1994), *Fatigue Strength of Welded Structures* 2nd Edition, Abington Publishing, pp.181-192.
- Nowak, A. S.(2000), *Reliability of Structures*, McGraw-Hill Higher Education, pp.101-108.
- Rosenblueth E, Estra L. Probabilistic design of reinforced concrete buildings. *ACI Special Publication*1972; 31: p.260.
- Jin-Hak Yi, Sang-Hoon Kim, Shigeru Kushiya, interpolation technique for seismic fragility analysis of bridges, *Engineering Structures*, Volume 29, Issue 7, July 2007, pp.1312-1322.
- (접수일자 : 2008. 9. 9 / 심사일 2008. 9. 19 / 게재확정일 2008. 10. 20)