

Response Surface 방법에 의한 보수보강 정량화 모델

Maintenance Effect Quantification Mode by Response Surface Method

박 승 형* · 김 성 훈** · 임 중 권*** · 박 경 훈**** · 공 정 식*****

Park, Seung-Hyuc · Kim, Sung-Hoon · Lim, Jong-Kwon · Park, Kyung-Hoon · Kong, Jung-Sik

ABSTRACT

Life-cycle performance and maintaining cost predictions are required for the effective management for bridges. In Korea, the importance of management of bridges has been recognized over the past two decades, resulting in the development of databases and various bridge management support tools by both government and private sectors. However, none of these tools has truly included the expected features of the bridge management system (BMS) for the next generation such as the quantification of the effects of maintenance interventions on bridge condition and safety. In this paper, a novel quantification process to simulate the life-cycle performance of steel box bridges has been developed. The process is based on the Response Surface method. Various performance-related variables are investigated to identify a set of significant design variables to construct the response surfaces.

Keywords: response surface, maintenance quantification, steel box bridges, degradation.

1. 서 론

교량의 유지관리가 효율적으로 운영되기 위해서는 교량의 미래수명예측과 유지관리비용 예측이 중요하다. 이를 위해 다양한 설계대안 및 유지관리 전략 수립이 중요하고 특히 국내 실정에 맞는 표준화된 교량 LCC 분석시스템이 개발되어야 한다. 유지관리 시스템은 통합관리 시스템으로써 효율적인 재원의 분배, 유지관리 업무의 비용절감, 그리고 관리 주체들간의 정보공유 및 활용방안 산출을 위하여 개발되어야 한다. 그러나, 국내의 경우 교량관리시스템의 사용주체에 따라 상이한 시스템이 개발·운용되고 있고, 시스템 상호간의 정보 교환 및 자료 관리 방법이 상이하어 효율적인 유지관리 업무가 어려운 실정이다. 무엇보다도 교량의 현재 상태를 평가자의 주관적 시각 정보만으로 파악하여 상태를 지표화하는 계량적인 방법으로 유지관리 조치와 조치시기를 결정하고 있어, 객관적인 효율적인 보수보강 시기와 공법을 제안하는데 문제점이 있다. 이에 반하여 본 연구에서 개발되고 있는 시스템은 강교량의 LCC와 관련된 변수 및 설계, 시공, 유지관리와 관련된 변

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 E-mail: Piensia2@korea.ac.kr

** 아이엠 기술단 연구원 E-mail: myshinedim@banmail.net

*** 아이엠 기술단 대표이사, 한양대학교 건설교통공학부 겸임교수 E-mail: jklim54@korea.com

**** 한국건설기술 연구원, 연구원 E-mail: paul@kict.re.kr

***** 책임저자, 정희원 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 E-mail: jskong@korea.ac.kr

수들을 정량화 함으로서 LCC의 정량적·객관적 평가를 가능하게 하는데 목적이 있다. 이러한 목적을 위한 교량관리시스템의 개발을 위해서는 많은 항목들이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 열화를 포함한 강교량 상태 및 보수보강 효과의 정량화를 위해 Response Surface Method(RSM)을 이용하였고, 논문에서 제안된 시스템은 이러한 객관적 정량화 산출 모델에 근거한 수명평가, 비용평가를 통해 최적의 보수보강 안을 사용자에게 제시함으로써 보다 효율적인 의사 결정을 지원한다.

2. Response Surface Method

Response Surface Method를 이용한 모델은 몇 개의 결정된 분석 값과 이러한 결과의 회귀 분석 값을 통하여 특성묘사함수를 근사 접근하는 방법으로, 본 연구에서는 현존하는 교량 중 분석 가능한 교량을 선택하여 구조해석을 실시하고 이 외의 교량에 대해서 Response Surface Method를 이용한 접근을 시도하여 값을 추정하는 방법을 시도하였다. RSM은 입력된 변수의 불확실성이나 변수에 의해 고려되는 응답면의 가장 적합한 값 또는 값들을 추정하기 위해 고안된 통계적인 방법(Khuri and Cornell, 1996)이다. 기본적인 RSM 구성은 아래와 같은 식으로 구성되며, (1)식은 상태함수를 나타내기 위한 다항식의 차수를 보여주며, (2)식은 변수간의 일차적 상관관계를 고려해야 하는 경우를 나타낸 것이다.

$$\hat{g}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \tag{1}$$

$$\hat{g}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} X_i X_j \tag{2}$$

여기서, X_i ($i=1, 2, \dots, k$)는 i -번째 랜덤변수이며, b_0, b_i, b_{ii} , 그리고 b_{ij} 는 최소자승법이나 일련의 연립방정식을 풀어 결정하는 미지계수다. 식 (1)과 식 (2)의 각 다항식에 요구되는 미지계수의 개수는 각각 $p=2k+1$ 과 $p=(k+1)(k+2)/2$ 이다.

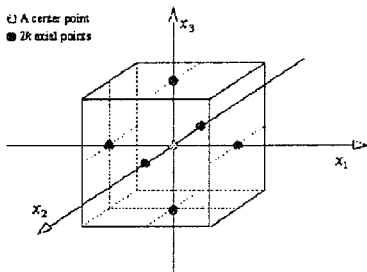


그림 1. Saturated Design and Second-Order Polynomial without Cross Terms

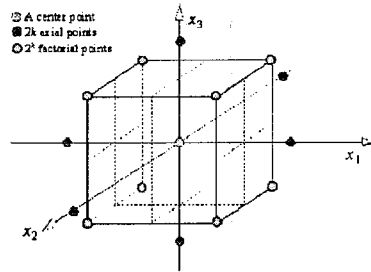


그림 2. Central Compositd Design and Full Second-Order Polynomial

3. 강상자형교의 RSM 함수 구성을 위한 변수 선정

강교의 시간에 따른 성능이력곡선 및 보수보강 이력곡선을 산정하기 위해 다음과 같은 순서로 연구가 진

행되었다. 전체 교량군은 단경간, 2경간, 3경간으로 구분되었고, RSM 함수를 결정하기 위해 주요 열화 관련 변수들을 조사 분석한 후 각 변수에 따른 구조해석을 실시하여 부식과 피로부분의 신뢰성 지수를 산출하였다.

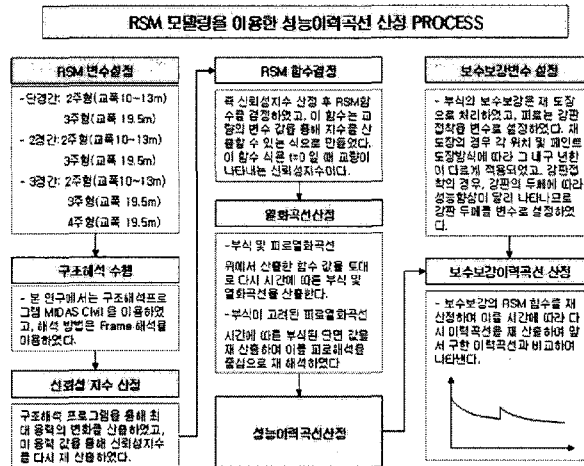


그림 3. RSM 함수를 이용한 성능이력곡선 산정 PROCESS

3.1. RSM 함수 구성을 위한 단경간의 변수 선정

단경간의 성능이력곡선 산정을 위한 RSM 함수는 크게 교량 변수와 시간변수로 구분하였다. 다양한 교량 변수 중 교량의 거동에 직접 영향을 미치는 교장, 거더 중앙부 두께, 콘크리트 상판 두께, 거더 폭 등을 주요 RSM 설계 변수로 설정하였으며, 시간변수는 최초 교량이 가설된 시간인 0년부터 70년으로 설정하여 함수를 구성하였다.

(1) 교장: 교장 변수를 고려하기 위해, 표본 값 및 표본 값 범위를 정하는데 BMS(Bridge Management System)의 자료를 활용하였으며, 표본 값은 40m, 45m, 55m를 선택하였다. 위의 교장에 해당되는 교량은 단경간 중 48.4%에 해당이 되고, 40m ~ 50m의 범위에 들어오는 교량은 단경간 전체 교량 중 82.4%에 해당되었다.

교장	교량 수	백분율(%)
40m	35	19.77
45m	27	15.25
50m	29	13.38
Etc	86	51.6

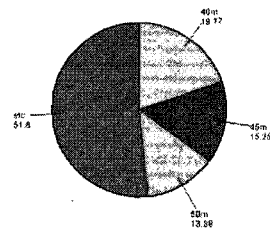


그림 4 분석대상 교량의 교장 분포도

(2) 교폭: 단경간의 교폭과 주형수량을 분석한 결과 대부분의 교량에서 다음과 같은 특징을 보였다. 교폭 10m ~ 13.5m 사이의 교량은 거더 수량이 2개, 교폭 19.5m의 경우 거더 수량이 3개였으며, 이를 기준으로 교폭에 따른 주형수량을 자동으로 결정되게 하여 해석을 수행하였다. 특히 교폭 10m ~ 13.5m의 교량의 경우, 분포값을 평균하여 정한 10.5m를 기준 값으로 하였으며, 3거더 교량의 경우 전체 교량의 약 30% ~ 35%가 19.5m의 교량이 차지하여 이를 기준 값으로 하였다.

(3) 주형중앙부두께: 강박스형 교량의 경우 각 구간에 따른 단면의 두께가 변하고 이 단면 두께에 따른 각 구간의 강성이 달라져 교량 전 구간에 응력분포에 영향을 미친다. 이를 각 구간에 걸쳐 상부 플랜지, 하부 플랜지, 웹 두께를 RSM 함수의 변수로 두어 해석을 할 경우 그 해석 case가 상당히 많아지나, 샘플 해석 결과 주요 인자만의 변수를 이용 변단면의 고려가 이루어진 경우 교량에 발생된 응력의 값이 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 연구에서는 변단면이 가지는 범위의 값을 조사하여, 단경간에서는 하부 플랜지의 두께에 따라 해석하였다.

(4) 콘크리트 바닥판 두께: 콘크리트 바닥판 두께는 도로교설계기준(건설교통부제정, 2005)에서 바닥판의 최소두께를 22cm 이상 요구하고 있으며 본 연구에 사용된 해석대상 교량의 바닥판 두께를 조사한 결과 대부분의 교량이 21.5cm ~ 31.5cm 의 바닥판 두께분포를 가지고 있음을 확인할 수 있었기에, 단경간 성능이력 곡선 산정을 위한 RSM 함수의 바닥판 두께 표본 값으로 0.215m, 0.265m, 0.315m의 값을 사용하였다.

(5) 거더폭: 거더 폭은 거더비(폭/높이)를 통해 표본점 값이 산출될 수 있으며, 지간장에 대한 거더 높이는 연속 합성형교일 경우 보통 1/20 ~ 1/25로서 교량의 함수로 나타낼 수 있으므로 강 박스 교량의 경우 강재 거더의 높이는 지간장에 의해 산출 된다. 이와 같이 거더의 높이는 지간 길이에 따른 종속 변수 형태로 구분 될 수 있으므로 함수 구성을 위한 설계 변수에서 제외되었다.

(6) 리브 수량 및 두께: 강박스 내부의 리브는 거더 전체 강성에 영향을 미칠 수 있으므로, 교량의 거동 특성파악을 위해 리브의 영향을 분석해야 한다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 본 해석에서는 해석의 경우를 줄이고 합리적인 RSM 함수 구성을 위해 리브의 수량, 두께, 높이에 대하여 평균 값을 사용하여 근사화하였다. 근사화한 해석 결과의 정확도를 판단하기 위해, 실제 리브의 값을 사용하여 해석한 결과와 비교해본 결과, 거더의 강성에 변화는 있지만 변화의 정도는 0.2% 정도로 전체 교량의 거동에는 큰 영향이 없는 것으로 판명되어, 평균값을 사용해도 무방함을 확인할 수 있었다.

(7) 이의 변수: 위의 변수에는 입력되지 않았으나 변수의 영향이 전체 강성에 극히 작게 작용하기 때문에 변수로 선정되지 못한 몇 가지는 현치, 크로스 빔 등이 있으며, 교장별로 두께가 일정한 거더의 web 두께 역시 값이 거의 일정하여 별도의 변수로 제시하지 않았다. 현치 및 크로스 빔의 경우, 통계조사를 통한 평균 값을 사용하여 해석에 반영하였으며, 거더의 web 두께는 40m 교장에 대해서는 12mm, 45m 교장에 대해서는 13mm, 그리고 50m 교장에 대해서는 14mm 를 적용하여 해석을 실시하였다.

표 1 교폭 19.5m인 경우의 RSM 변수 값(단위: m, years)

CASE No.	전체교장 (x_1 , m)	중앙부 거더두께 (x_3 , m)	콘크리트 상판두께 (x_4 , m)	거더폭 (x_5 , m)	시간 (x_6 , 년)
1	45	0.0256	0.265	2.046	55
2	50	0.0256	0.265	2.046	55
3	40	0.0256	0.265	2.046	55
4	45	0.0215	0.265	2.046	55
5	45	0.0315	0.265	2.046	55
6	45	0.0256	0.215	2.046	55
7	45	0.0256	0.315	2.046	55
8	45	0.0256	0.265	1.839	55
9	45	0.0256	0.265	2.253	55
10	45	0.0256	0.265	2.046	0
11	45	0.0256	0.265	2.046	70

표 1은 도심지역 교폭 19.5m의 단경간의 RSM 함수 구성을 위한 변수의 표본값이다. 함수 구성에 사용된 변수는 시간 변수를 포함한 총 5개의 변수로 구성이 되어 있으며, 해석 경우의 수는 Saturated Design의 경우의 수인 $2n+1$, 즉 11가지로 구성됨을 알 수 있다.

3.2 RSM 함수 구성을 위한 2경간의 변수 선정

2경간의 RSM 변수는 전체 교장길이, 경간장비, 주형중앙부 플랜지 평균 두께, 콘크리트 상판두께, 거더폭, 등 총 5개의 변수로 구성되어 있으며, 이외에 시간변수가 추가되어 총 6개의 변수로 구성되었다. 본각각의 변수 선정 방법은 단경간에서 언급한 바와 같이 생략하며 추가된 변수 경간장비만 설명하였다. 2경간 연속교에 사용된 경간장비 변수는 사용자가 입력한 제1경간장과 제2경간장의 길이를 L_{max} 와 L_{min} 으로 분류하여 이를 나눔으로써 비의 값의 범위를 선정하였다. 경간장비의 범위는 $1 \leq L_{max}/L_{min} \leq 1.4$ 의 범위로 한정되었으며, 대상 교량 분석결과 위의 범위에 들어오는 교량은 약 90%에 해당된다. RSM 함수 구성을 위한 표본값으로는 1, 1.2, 1.4를 선택하였다.

3.3 RSM 함수 구성을 위한 3경간의 변수 선정

3경간의 성능이력곡선 산정을 위한 RSM 함수의 변수는 2경간의 변수구성과 유사하지만 경간장비는 다르게 산출하였다. 3경간에 사용된 경간장비는 제1경간과 제2경간의 비로 산출되었는데, 구조해석을 통해 분석한 결과 제1경간장과 제2경간장의 비가 0.7일 때 최소용력이 발생하며 이를 기준으로 비가 커지거나 작아지는 경우 용력이 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 3경간의 RSM 함수에서 사용된 경간장비는 해석 대상교량을 근거로하여 $0.4 \leq L_1/L_2 \leq 1.4$ 로 한정되었으며 해석 Case는 표 3과 같다.

4. 강상자형 교의 부식 및 피로 열화곡선

4.1 강상자형 교의 부식 열화곡선 산정

본 연구에서 사용된 부식률 제안식은 1987년 Komp가 제안한 식 (3)를 사용하였으며, Parameter 값들은 1984년 Albert와 Naemi가 제안한 값을 사용하였다.

$$C = At^B \tag{3}$$

C : 부식량(μm), t : 년도, A, B : 실험 데이터의 회귀분석을 통해 결정된 변수

4.2 강상자형 교의 피로 열화곡선 산정

강상자형 교는 부식에 의한 손상보다 피로에 의한 손상이 지배적으로 작용하는데, 특히 최근 차량의 증량화 추세 및 교통량의 증대로 인하여 대부분 강교의 손상은 구조물의 극한하중에 의한 파괴보다는 허용용력 이하의 반복하중에 의한 피로손상이 더 큰 문제가 된다. 피로손상에 의한 신뢰도지수 산정은 1975년 Ang이 제안한 피로신뢰도 식(4)을 이용하여 계산하였다.

$$R_N(n) = \exp \left[- \left(\frac{365 * ADTT * Y_r}{n} \right) \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) \Omega_N^{-1.08} \right] \tag{4}$$

$$n = 365 * ADTT * Y_r, Y_r = \text{기대피로년한}, \bar{n} = \text{피로반복횟수}, \Gamma = \text{Gamma Function}, \Omega_N = 0.74 \text{ (Ang-Munse 제안값)}$$

위의 과정을 통해 피로신뢰도를 산출한 후 파괴확률 및 신뢰도지수를 계산하였으며 이와 같은 과정을 도표로 나타내면 그림 5과 같다.

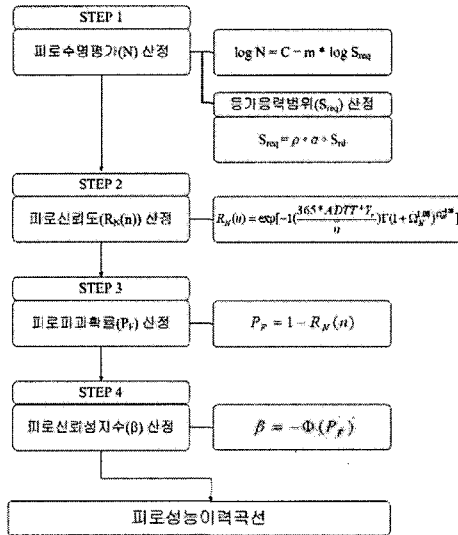


그림 5 피로손상 성능평가모델 정량화 알고리즘

4.3 강상자형 교의 부식을 고려한 피로열화곡선 산정

실제 교량은 부식과 피로가 서로 독립적으로 영향을 미치는 것이 아니라 동시에 교량의 성능을 저하시킨다. 이를 위해 본 연구에서는 부식에 의해 감소된 단면값을 고려한 피로해석을 통해 RSM 함수를 구성하여 부식이 고려된 피로에 의한 열화곡선을 산정하였다. 표 2는 단경간 3거더교의 경우에 있어 부식을 고려한 피로 열화에 대한 RSM 모델 계수의 결과값을 나타내고 있다.

표 2 단경간 3거더교 부식을 고려한 피로열화 RSM 모델 계수

변수	변수의 계수	변수	변수의 계수
α_0	6.9316	α_{41}	0.6275
α_{11}	-0.1547	α_{42}	-0.07225
α_{12}	1.30×10^{-8}	α_{51}	-4.41×10^{-4}
α_{21}	164.12	α_{52}	1.70×10^{-8}
α_{22}	-2633.8	α_{61}	-0.0878
α_{31}	0.4557	α_{62}	6.5×10^{-4}
α_{32}	-9.82×10^{-2}		

5. 강상자형 교의 보수보강 정량화 곡선 예시

보수보강 효과를 고려하기 위한 RSM 모델에서는 열화모델 산정 시 적용된 변수 값에서 강관접착용 보강에 따른 재원을 나타낸 강판두께를 보수보강 변수로 추가하였다. 한편 강관의 길이를 0.11L ~ 0.33L로 변화시켜가며 해석해 본 결과 피로설계하중에 의해 발생하는 응력의 차이는 보강관 접착이별 1% 이내로 산정되어 추가 변수로 고려하지 않았다. 보수보강 곡선을 산출하기 위해 함수 부분을 2개의 부분으로 나눠 구분하였으며, 강판 접착시 상승하는 신뢰도 지수 부분을 Function 1 으로 설정하고, 강판 접착 후 다시 부식 및 피로 열화되는 부분을 Function 2로 설정하였다.

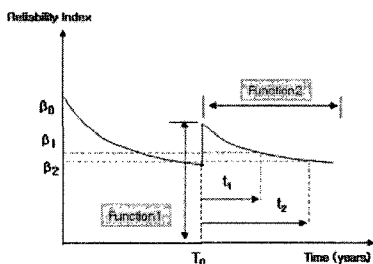


그림 6 보수보강 정량화 곡선 함수 구분

Function 2의 함수를 산출하는 부분은 다음과 같이 고려되었다. 시간이 T_0 일 때 Function 1의 β_0 의 값과 Function2 의 시간이 0일 때의 값이 같음을 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이 식을 구성할 수 있다.

$$f_2(t_i) = \beta_0 + \alpha_{11}^* t_i + \alpha_{12}^* t_i^2 \tag{5}$$

$$f_2(t_1) = \beta_0 + \alpha_{11}^* \times t_1 + \alpha_{12}^* \times t_1^2 = \beta_1 \tag{6}$$

$$f_2(t_2) = \beta_0 + \alpha_{11}^* \times t_2 + \alpha_{12}^* \times t_2^2 = \beta_2 \tag{7}$$

수 α_{11}^* 과 α_{12}^* 을 산출하기 위해 이를 Matrix 형태로 나타내면 식(8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & t_1^2 \\ t_2 & t_2^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \beta_1 - \beta_0 \\ \beta_2 - \beta_0 \end{pmatrix} \tag{8}$$

이를 계산하여 계수값을 (5)식에 대입하면 Function 2 가 생성된다. 예시에 사용되는 교량의 변수 조건은 도심지역 교폭 19.5m, 교장 45m, 주형 중앙부두께 0.022m, 바닥판두께 0.235m, 플랜지 폭 2.21m, ADTT 2500대, 보강판두께 0.016m, 보수보강시점 30년 이라할 때 보수보강 정량화 곡선을 다음과 같이 산출할 수 있다.

표 3 단경간 3거더교 부식을 고려한 피로보수보강 RSM모델 계수값(function1의 계수)

변수	변수의 계수	변수	변수의 계수
α_0	8.0786	α_{41}	0.7250
α_{11}	-0.0276	α_{42}	-0.0889
α_{12}	5.36×10^{-5}	α_{51}	0.0246
α_{21}	29.824	α_{52}	-2.08×10^{-4}
α_{22}	-238.38	α_{61}	-1.71×10^{-3}
α_{31}	0.3025	α_{62}	1.37×10^{-7}
α_{32}	-0.0296	α_{71}	-0.0820
		α_{72}	6.10×10^{-4}

$T_0=35$ years 일 때 신뢰성지수는 $\beta_0 = 3.53$ 으로 Function 1로부터 계산되므로, Function 2의 함수식은 $f_2(t_i) = 3.14 + \alpha_{11}^*t_i + \alpha_{12}^*t_i^2$ 이 됨을 알 수 있다. $T_1=55$ 일 때 Function 1에서 산출한 $\beta_1 = 2.99$ 이고 $T_2=70$ 일 때 $\beta_2 = 2.90$ 이므로, Function 2는 다음과 같다.

$$\therefore \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & t_1^2 \\ t_2 & t_2^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \beta_1 - \beta_0 \\ \beta_2 - \beta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 & 20^2 \\ 35 & 35^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -0.54 \\ -0.63 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.039 \\ 0.0006 \end{pmatrix}$$

따라서 Function 2의 함수식은 다음과 같이 구해짐을 알 수 있다.

$$f_2(\beta) = 3.53 - 0.039 \times t + 0.0006 \times t^2$$

이를 그래프를 통해 나타내면 그림 7과 같은 보수보강 정량화 곡선이 얻어질 수 있다.

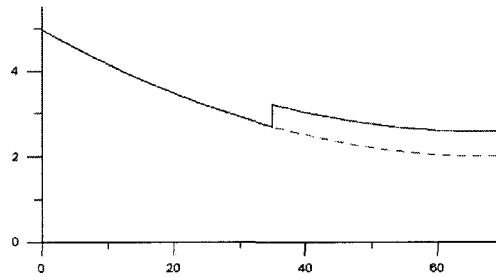


그림 8 부식을 고려한 피로 정량화 보수보강곡선

6. 결론

현재의 대부분의 교량관리시스템에서 교량상태 평가 지수를 이용하여 보수보강 안을 선택하는 것은 과거 보수보강 요인 발생 후 보수보강 안을 선택하는 것보다 정량화 되었다는 점에서 의미가 있으나, 교량의 현재 상태 등급 지수로 미래 성능 평가를 수행한다는 점에서 해결해야 할 많은 문제점을 갖고 있다. 이를 보완한 본 연구는 강교량의 부재별 열화 및 보수보강 영향을 정량화하고, 이를 통해 교량의 잔존수명 예측 및 최적의 보수보강 안을 예측하는데 기여한다는 점에서 의의가 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 02' 건설교통기술혁신사업 연구비로 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Jungwon Huh, Achintya Haldar (2001) Stochastic Finite-Element Seismic Risk of Nonlinear Structures, Journal of Structural Engineering, March, pp.323~329.
- M.S. Cheung, W.C. Li (2001) Servicesability reliability of corroded steel bridges, Journal of Civil Engineering, Vol 28, pp.419~424.
- Jack R.Kayser, Andrzej S.Nowak (1989) Capacity loss due to corrosion in steel girder bridges, Journal of structure engineering, Vlo.115, pp.1525~1537.