

성능평가를 고려한 철근콘크리트교의 경제성 분석

Economic Analysis of Reinforced Concrete Bridges Considering Performance Evaluation

김 종 길† 손 용 우* 정 영 채 **
Kim, Jong-Gil Sohn, Yong-Woo Jung, Young-Chae
(논문접수일 : 2003년 8월 19일 ; 심사종료일 : 2004년 4월 26일)

요 지

최근의 철근콘크리트 교량의 부식과 노후화에 대한 관심이 많다. 콘크리트 안의 부식 되어진 철근은 교량구조의 안전 뿐만 아니라 철근콘크리트 부재의 휨강도에도 영향을 준다. 기존의 성능평가를 고려한 철근콘크리트속의 부식율 및 휨강도 특성 경제성 분석은 명확하지 않았다. 본 연구의 목적은 철근의 부식감소에 따라서 철근콘크리트 교량의 저항강도기능과 생애주기비용을 연구하고자 한다. 따라서 현재의 부식 및 휨강도 산출공식을 제시하고 부식된 철근 콘크리트 교량의 잔여수명을 정확히 평가하고자 한다.

핵심용어 : 생애주기비용, 총 기대비용, 보유성능함수, Frangopol 모델, Mori 식

Abstract

Recently, it is really concerned about corrosion and aging of reinforced concrete bridges. Corrosional steel reinforcing in concrete affects not only safety of bridges structure but also bending strength of reinforced concrete's member. Rate of corrosion, characteristic of bending strength, and economical evaluation aren't clear in reinforced concrete, considering performance evaluation. The purpose of study is as follows. It studies about ability of resistance's strength and cost of life cycle according to reduction of steel reinforcing's corrosion. Moreover, it shows calculating formula of bending strength with corrosion of current rate and exactly evaluates about the rest life at corrosional reinforced concrete bridges.

keywords : life cycle cost, expected total cost, function of a holding performance, frangopol model, mori 식

1. 서 론

일반적으로 교량 구조물은 다양한 열화요인에 노출됨에 따라, 콘크리트의 균열, 박리, 파손, 철근부식과 같은 열화현상이 발생하고 있으며, 이로 인해 장기적으로 교량구조물의 내구성 및 내하력 저하 등과 같은 전반적인 성능저하 현상이 유발되고 있다.

최근에는 차량하중 및 교통량의 증가, 재설계 등의 사용으로 인한 구조적 성능의 저하 등 많은 손상이 발생되고 있으며, 이로 인한 교량의 열화현상은 사용 환경 특성

과 사용재료 자체의 특성에 따른 다양한 요인이 발생하여 보수비용이 지속적으로 증가함에 따라 많은 사회·경제적 손실을 초래하고, 장기적인 측면에서는 교량 구조물 전반의 성능을 저하시켜 교량의 안전성과 사용성에 심각한 문제가 발생하게 된다. 따라서, 보다 효과적인 유지관리를 위해서는 외관상태에 기초한 유지관리 및 신뢰도에 기초한 유지관리가 중요하지만 먼저, 해당교량 구조물의 성능저하를 유발시키는 열화요인을 규명하고, 교량에 대한 저항 및 환경적 요인까지 고려한 보유성능의 영향을 근본적으로 최소화 할 수 있는 유지관리조치와 적정 경제성 분

† 책임저자, 정회원 · 군산대학교 토목공학과 박사수료
전화: 063-469-4751 ; Fax: 063-469-4791
E-mail: kman1@kunsan.ac.kr

* 정회원 · 원광대학교 토목환경공학부 공학박사 강사

** 정회원 · 군산대학교 토목공학과 공학박사 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2004년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

석이 강구되어야 한다.

이를 위해서는 생애주기(Life Cycle) 동안에 성능조사·설계에서부터 교량 구조물이 과거에 받은 각종의 손상과 그에 대한 보수이력 등을 고려한 기존 교량 구조물의 물리적 또는 구조적 성능의 변화를 정량적으로 정확하게 평가하는 것이 필수적이라 하겠다. 기존 교량 구조물의 역학적 성능을 평가하는 직접적인 방법은 현장계측이나 재하실험 등이 있지만 현재 상황에서는 이와 같은 계측이나 재하실험으로 역학적 성능을 객관적으로 평가하는 것은 곤란하다.

더구나 철근콘크리트 교량을 장기간에 걸쳐 역학적 성능의 변화를 정량적으로 예측하기 위해서는 해석적 방법의 개발이 보다 중요하다. 종래는 부식된 교량 구조물의 내력(공용강도)을 평가할 경우, 단순히 부식에 의한 단면감소만을 고려한 초기형상이 주어지면 통상의 내하력 해석으로 평가하고 있을 뿐, 콘크리트의 열화·손상과 시간적 콘크리트의 강도 변화에 의한 내구성능 저하나 철근의 체적 감소에 따른 철근항복응력의 내하성능 저하를 동시에 고려한 보유성능평가를 수행한 사례는 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 외관상태 등급에 따른 열화 및 손상에 의한 내구성능과 중성화 및 염해에 따른 철근부식에 의한 내하성능을 동시에 고려하는 시간이력에 대한 보유성능함수 곡선식을 개발하고 부식철근의 단면적 감소와 체적 감소에 의해 산정한 곡선식을 이용하여 철근콘크리트교에 대한 공용수명 평가와 경제성 분석을 수행하는데 그 목적이 있다.

2. 부식철근의 역학적 특성과 보유성능 모델

2.1 부식철근의 역학적 특성

철근콘크리트 교량구조물은 내구적으로 반영구적이라는 가정하에 극한 강도설계법에서 철근 단면적의 감소, 철근 체적의 감소, 손상 및 열화에 의한 저항계수의 감소 등에 따른 철근부식의 성능저하를 고려한 설계가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 부식철근의 감소원인을 철근의 단면적의 감소율, 체적의 감소율, 그리고 철근부식에 의한 저항계수의 감소율인 3가지 경우로 분류하여 부식철근의 역학적 특성을 분석하고자 한다.

1) 철근의 단면적 감소인 경우

기존의 Mori¹⁾와 Ellingwood²⁾의 연구자료에 의하면 콘크리트 속에 매입된 철근의 평균부식율(average corrosion rate) V 는 약 $50\mu\text{m}/\text{yr}$ 정도이다. 따라서 철근의 단면적

감소에 대한 점검시점의 공칭저항 휨 강도와 부식철근의 단면적 및 등가응력깊이를 계산하는 식은 각각 다음과 같이 된다.

$$R(t_0) = \psi A_{sd}(t_0) f_y (d - a_d/2) \quad (1a)$$

$$A_{sd}(t_0) = n\pi D_b^2/4 ; t < T_I \quad (1b)$$

$$n\pi [D_b - 2V(t - T_I)]^2/4 ; t > T_I \quad (1c)$$

$$a_d = A_{sd}(t_0) f_y / 0.85 f_{ckd} b \quad (1d)$$

여기서, $R(t_0)$ = 점검시점의 손상 휨 저항 강도, $A_{sd}(t_0)$ = 부식철근의 단면적, f_{ckd} = 손상된 콘크리트의 강도, D_b = 철근의 직경, T_I = 부식개시 시점 이때, 철근의 평균 부식율 V 는 상태평가등급의 지수 C_v 에 따라 달라지며 $V = 0.0225 C_v$ 이다.

2) 철근의 체적 감소인 경우

철근부식이 주로 전면 균일부식을 발생시키는 중성화에 의한 철근부식과 공식(pitting)으로 국부부식을 발생시키는 염해에 의한 철근부식에 따른 철근의 체적감소율 Δw 와 외관상태 등급에 따른 상태평가등급의 지수 C_v 와의 관계를 설정하고, 이 Δw 와 C_v 를 동시에 고려하는 점검시점에 대한 부식철근의 항복응력을 계산하는 식은 다음과 같이 된다.

전면부식:

$$f_{yd}(t_0) = [1 - 1.24(C_v \cdot \Delta w/100)] \cdot f_y \quad (2a)$$

국부부식:

$$f_{yd}(t_0) = [1 - 1.98(C_v \cdot \Delta w/100)] \cdot f_y \quad (2b)$$

여기서, $f_{yd}(t_0)$ = 부식철근의 항복응력

f_y = 최초철근의 항복응력

이때, Δw 은 최대의 체적감소율인 20%로 계산한다. 따라서, 철근의 체적 감소에 대한 교량 점검시점의 부식철근에 대한 공칭저항 휨강도와 등가응력깊이는 각각 다음과 같이 된다.

$$R(t_0) = \psi A_s f_{yd}(t_0) (d - a_d/2) \quad (3a)$$

$$a_d = A_s f_{yd}(t_0) / 0.85 f_{ckd} b \quad (3b)$$

3) 저항계수의 감소인 경우

염화물과 중성화를 포함한 외관상태에 대한 상태평가등급의 지수 C_v 만을 고려하면 저항계수의 감소에 대한 점검시점의 공칭저항 휨 강도와 부식철근의 단면적 및 등가응력깊이를 계산하는 식은 각각 다음과 같이 된다.

$$R(t_0) = (0.85 - 0.25 \cdot C_v) A_s f_y (d - a_d / 2) \quad (4a)$$

$$a_d = A_s f_y / (0.85 - 0.25 \cdot C_v) f_{ckd} b \quad (4b)$$

2.2 시간이력의 보유성능 모델

현행 교량의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 의하면 상태 및 안전성평가등급의 산정은 내하력과 교량의 설계하중 값 중에서 작은 값을 안전성평가 등급으로 산정하고 있을 뿐 공용수명기간 중에 발생하는 손상과 열화조건에 따른 구조적 그리고 물리적 성능은 전혀 고려하지 않고 주관적 판단에 의해 산정하고 있다. Frangopol^{3,4)} 등은 공용수명 기간 중 노화중인 교량 구조물의 유지보수에 있어서 대부분의 의사결정이 불확실한 상황 하에서 내려진다고 입증하고 있다. 물리적 하중, 환경적 요인 및 열화중인 교량의 실제 내하력 및 사용성 등에 대한 불확실성으로 인해 외관상태에 기초한 교량의 정확한 수명을 예측하는 것은 불가능하다. 따라서, 실질적으로 구조적 성능은 확률적 도구를 이용하여, 즉 안전과 신뢰성에 기초한 측면에서 수명을 예측할 수밖에 없다. 이러한 측면을 극복하기 위하여 본 연구에서는 부식철근의 역학적 특성과 상태등급의 지수를 동시에 고려한 공용수명에 따른 시간이력 구조저항에 대한 보유성능 모델을 나타내면 다음과 같이 된다.

$$R(t) = R_0 \cdot g(t) \quad (5)$$

여기서, $R(t)$ = 시간이력 저항 휨강도

R_0 = 원래의 공칭저항 휨강도

$g(t)$ = 저항감소함수(보유성능함수)

2.2.1 Frangopol 모델

Frangopol 등은 식(5)에서 시간이력 저항 휨강도와 원래의 공칭저항 휨강도의 비인 저항 감소함수, 즉 보유성능함수식 $g(t)$ 를 저항손실함수의 기울기와 부식율에 의

한 곡선식의 매개변수로 나타내면 다음과 같다.

$$g(t) = 1 - kt^\alpha \quad (6)$$

여기서, k = 저항손실함수의 기울기

α = 곡선식의 매개변수

이 때, 식(6)의 k 에 필요한 저항손실함수 R_d 를 산정하는 식은 다음과 같이 된다.

$$R_d = [R_0 - R(t)] / R_0 \quad (7)$$

따라서 Frangopol 등은 회귀분석에 의해서 저항손실함수의 기울기와 곡선식의 매개변수를 각각 $k=0.005$, $\alpha=1$ 로 산정하였다.

한편, Mori 등이 산정한 유지관리조치(보수, 보강, 교체)전·후의 저항감소함수식 $g(t)$ 는 $k=0.03$, $\alpha=1/2$ 로 다음과 같이 된다.

$$\text{유지관리조치전: } g(t) = 1 - 0.03\sqrt{t} \quad (8a)$$

$$\text{유지관리조치후: } g(t) = c - 0.03\sqrt{t - t_R} \quad (8b)$$

여기서, c = 유지관리 조치시의 보유성능 등급 향상(최대 등급)

t_R = 유지관리시점의 공용연수

2.2.2 본 연구 모델

전 절의 식(1)~식(4)를 사용한 점검시점의 공칭저항 휨강도와 부식철근의 단면적 및 등가응력깊이를 이용하면 저항감소함수(보유성능함수)에 대한 본 연구의 모델은 다음과 같이 된다.

$$g(t) = R(t) / R_0 = 1 - [(1 - f_{CR}) / t_0^\alpha] \cdot t^\alpha \quad (9a)$$

$$k = (1 - f_{CR}) / t_0^\alpha \quad (9b)$$

여기서, $f_{CR} = R(t_0) / R_0$ = 점검시점의 보유 성능계수, t_0 = 점검시점.

이 때, $R(t_0)$ 는 부식철근의 단면적감소율인 경우는 식(1a), 부식철근의 체적감소율인 경우는 식(3a), 그리고 저항계수의 감소인 경우는 식(4a)으로 산정된다. 식(9b)의 저항손실함수의 기울기(k) $\alpha=1$ 인 경우, 즉 저항감소함수 $g(t)$ 가 1차식으로 외관상태등급, 부식철근의 단면적 감소 및 체적감소, 휨 강도에 대한 저항계수의

감소 등을 고려하여 산정한 값이다. 따라서, 본 연구에서는 $\alpha=1, 2, 3$ 차식, 그리고 평방근식으로 보유성능함수(저항 감소함수)를 분석하고 Mori 등이 제안한식(8a)와 같이 부식철근의 단면적감소율, 체적감소율, 그리고 저항계수의 감소율에 대한 저항감소함수식을 제안한다. 이 때 f_{CR} 은 공용개시 시의 교량 구조물의 내하력을 1로 할 때의 휨강도 비, 즉 점검시점의 시간이력 손실 휨강도와 본래(최초)의 휨강도의 비로 나타낸 것이다.

2.3 상태 및 보유성능 판정 알고리즘

철근콘크리트교에 대한 유지관리의 기본원칙은 기존교량을 안전하게 이용할 수 있도록 그 기능을 만족시키며 정기점검, 정밀안전진단을 정기적으로 실시하여 철근콘크리트교의 손상을 정확히 분석하는 것이 중요하다 하겠다. 이러한 철근콘크리트교에 대한 유지관리의 흐름은 점검, 외관상태평가, 보수·보강의 3가지를 순차적으로 행하는 것이다. 즉, 점검은 철근콘크리트교의 손상을 발견하여 어느 정도까지 손상이 진행되고 있는가를 잘 조사하는 것이다. 따라서, 철근콘크리트교의 상태 및 보유성능 판정 알고리즘은 건설교통부(2002. 12)에서 제정한 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침⁵⁾을 사용하여 퍼지이론을 이용하여 추론하였고, 세부지침에서와 같이 균열, 박리 파손, 철근 노출, 누수 및 백태 등에 의해서 철근콘크리트교의 외관상태를 판정한 기준 및 부식철근의 단면적 감소 및 체적감소, 휨강도에 대한 저항계수의 감소 등을 고려한 판정기준으로 표 1과 같다.

3. 철근콘크리트교의 경제성 분석 모델

철근콘크리트교량 구조물의 설계에 있어 생애주기 비용(LCC)해석에 관계된 결과 값들이 비용의 가치항으로 표현될 때 기대비용이라고 할 수 있으며, 이러한 LCC를

최소화하는 것이 바람직하다. 생애주기(LC) 최적설계를 위해 공용간 총기대비용(Expected Total Cost)을 최소화하기 위한 비용함수는 이러한 모든 사항을 고려하여 본 연구에서는 확정적 방법과 신뢰성 해석 기법을 도입한 확률적 방법으로 강도파손에 대한 직접손실비용(보강기대비용), 간접손실비용(도로사용자 기대비용), 초기비용함수로 국한하여 철근콘크리트교에 다음과 같이 정식화하였다.

3.1 확정적 경제성분석 모델의 정식화

$$C_T(t) = C_I + \sum_{t=t_0}^t N(t_0)[C_R + C_U] \quad (10a)$$

$$N(t_0) = \alpha_0(t - t_0) \quad (10b)$$

$$\alpha_0 = 1/\Delta T = 1/(t_{ra} - t_{rb}) \quad (10c)$$

여기서, $N(t_0)$ =유지관리조치 횟수, α_0 =매년 소요 보수·보강율, t_{ra} =유지관리조치 후의 공용수명, t_{rb} =유지관리조치 전의 공용수명, t =공용년수, t_0 =점검시점 공용년수, C_I =초기비용(천원/ M^2), C_R =직접손실비용(보수·보강·교체)(천원/ M^2), C_U =간접손실비용(도로사용자)(천원/ M^2), $C_T(t)$ =공용년수의 총 생애주기비용(천원/ M^2)

3.2 확률적 경제성분석 모델의 정식화

$$\text{Min}[C_T(t)] = \text{Min}[C_I + E(C_F)] \quad (11a)$$

$$E(C_F) = \sum_{t=t_0}^t N(t_0)(C_R + C_U)[1 + P_f] \quad (11b)$$

$$N(t_0) = \xi_0(t - t_0) \quad (11c)$$

$$\xi_0 = 1/\Delta P_f = 1/(P_{fa} - P_{fb}) \quad (11d)$$

표 1 상태와 보유성능 판정기준 및 유지관리 대책

외관상태등급	판정 구분	상태와 보유성능 평가기준 및 대책		
		상태 평가	보유성능 평가	유지관리대책
A	매우 양호	$0.0 < C_v \leq 0.125$	$1.0 < g(t)$	보수 불필요
B	양호	$0.125 < C_v \leq 0.375$	$1.0 < g(t) \leq 0.9$	일상적 유지관리
C	보통	$0.375 < C_v \leq 0.625$	$0.9 < g(t) \leq 0.8$	예방보수 또는 적정보수
D	불량	$0.625 < C_v \leq 0.875$	$0.8 < g(t) \leq 0.7$	보강 필요
E	매우 불량	$0.875 < C_v \leq 1.0$	$0.7 > g(t)$	교체

표 2 대상 교량의 제원과 일반사항

교량 위치	전라남도 담양군 고서면 문향리	
시공년도	1974년	
설계하중	DB-13.5	
교량제원 및 물성치 (외측주형)	$b = 210\text{cm}, h = 125\text{cm}, b_0 = 50\text{cm},$ $d = 115\text{cm}, A_s = 79.42\text{cm}^2, A_v = 2.53\text{cm}^2, f_{ck} =$ $240\text{kgf/cm}^2, f_y = 3000\text{kgf/cm}^2$ $M_D = 6,909,606\text{kgf} \cdot \text{cm}$ $M_L = 2,867,239\text{kgf} \cdot \text{cm}$ $V_d = 1,967,000\text{kgf}, V_L = 347,000\text{kgf}$	
구조해석 및 재하시험 결과치	$i_{cal} = 0.27, i_{test} = 0.3, f'_{ck} = 171.4\text{kgf/cm}^2, \delta_{sap-외측} = 2.11\text{mm},$ $\delta_{test-외측} = 2.04\text{mm}, K_r = 0.85, K_t = 1.0, K_o = 0.85, K_s = 1.01$	

여기서, $N(t_0) =$ 유지관리조치 횟수, $\xi_0 =$ 매년 소요 보수·보강율, $P_f =$ 파괴확률 $(= \Phi(-\beta))$, $\beta =$ 신뢰성지수, $P_{fa} =$ 유지관리조치 후 파괴확률, $P_{fb} =$ 유지관리조치 전의 파괴확률, $C_F =$ 파괴 손실 기대비용(천원 / M^2) = (직접손실기대비용+간접 손실기대비용)(천원 / M^2)

4. 적용 예 및 고찰

4.1 외관조사 결과에 대한 평가 결과

대상교량⁶⁾의 개요는 표 2에 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교이며 설계하중은 DB-13.5인 3등급교이다. 보강공법은 NEFAC공법(신기술 제209호)를 사용하였다. 대상교량에 대해 상부구조에 대한 외관조사 결과 만에 대한 평가는 전문가의 주관적인 판단에 의하여 "C급"으로 판단되었으며, 퍼지 논리 틀박스에 의한 추론결과, 추론 값이 $x = 0.604$ 로서 "C급"으로 나타났다.

4.2 유지관리조치전의 보유성능 예측 결과

표 3은 부식철근의 감소원인 3가지의 경우에 대하여 외관상태 등급에 따라 압축블록 깊이 및 부식철근의 휨강도 산정 결과를 산정한 값이다. 단면감소, 체적감소에 대한 압축블록 깊이는 외관상태 등급이 낮아짐에 따라 작아지는데, 저항계수의 감소에 의한 압축블록 깊이는 높아지고 있다. 이는 저항계수가 압축블록 깊이 식의 반비례하기 때문이다. 그리고 3가지 부식철근의 감소원인에 따른 휨 저항모멘트도 외관상태 등급이 하위등급으로 갈수록 감소하고 있다. 따라서 본 연구에서는 부식철근의 감소원인에 따른 휨 저항모멘트가 구해짐으로써 철근콘크리트교에 대한 부재별 즉, 바닥판, 주형, 교대, 교각 등의 보유성능에 따른 경제성 분석을 위한 가능한 모든 유지관리 조치(무조치, 보수, 보강, 교체)를 정량적으로 예측할 수 있다.

표 4는 부식철근의 감소원인에 따라 외관상태 등급에 대한 보유성능함수 $g(t)$ 와 저항손실함수의 기울기 k 을 산정하여 나타내면 표 4와 같다. 표 4에서와 같이 증성화의

표 3 압축블록 깊이 및 부식철근의 휨강도 산정 결과

구분	부식철근의 감소 원인	외관상태 등급			
		B	C	D	E
압축블록 깊이 (cm)	단면적감소	7.02292	6.42398	5.15820	4.24547
	체적감소(염해)	7.01660	6.24563	5.47466	4.85789
	체적감소(중성화)	7.30474	6.82191	6.33908	5.95282
	저항계수 감소	8.40563	9.13026	9.99160	10.8072
부식철근의 휨강도(kg·cm)	단면적감소	20,361,800	18,675,300	15,080,400	12,462,400
	체적감소(염해)	20,344,000	18,171,300	15,983,100	14,221,400
	체적감소(중성화)	21,152,100	19,796,800	18,435,500	17,342,000
	저항계수 감소	20,788,800	19,076,400	17,363,900	15,993,900

최초(본래)의 등가응력 값이 = 5.56162 cm, 최초(본래)의 휨강도 = 22,726,700kg·cm

체적감소율에 의한 보유성능 함수가 외관상태 등급에 따라 다른 보유성능함수보다 상당히 높게 나타나는 결과를 알 수 있었다. 이는 식(2)에서 체적감소율의 상수가 1.24로 염해에 의한 체적감소율의 상수 1.98보다 작기 때문이다. 그리고 부식철근의 감소원인 중에 단면감소에 의한 $g(t)$ 값이 가장 낮음을 나타내었다(그림 1, 2 참조).

또한, 1차식에 대한 보유성능함수의 기울기는 외관상태 등급이 A등급에서 E등급으로 변함에 따라 $k=0.002$ 에서 $k=0.016$ 까지 증가함을 알 수 있었다. Frangopol은 1차식의 k 값을 $k=0.005$ 을 사용하였는데, 본 연구에서 산정한 외관상태 C등급 값이 거의 일치한 결과를 알 수 있었다. 평방근식의 경우 Mori식의 k 는 $k=0.03$ 인데 반하여 본 연구에서 산정한 k 는 외관상태 등급이 A등급에서 E등급으로 변함에 따라 $k=0.06$ 에서 $k=$

0.13까지 증가함을 알 수 있었다.

표 5는 외관상태 등급이 C등급인 대상교량에 대하여 부식철근의 감소원인 중에 철근의 단면적 감소율인 경우를 선정하여 보수·보강 전 후의 잔여수명을 평가한 결과이다. 표 5에서와 같이 1차식과 평방근식의 잔여수명 연장기간이 각각 37.86년, 39.35년으로 3차식의 17년보다 2배정도임을 알 수 있었다. Frangopol은 보유성능함수 $g(t)$ 를 추정할때 외관상태가 보통(C등급)인 경우는 1차식으로 불량(D등급)인 경우는 2차식을 제안하고 있다. 그러나 우리의 현재 유지관리수준이나 정기점검 및 정밀진단의 수준이 불확실한 상황임을 고려한다면 보유성능함수 $g(t)$ 의 추정 시에 외관상태가 보통(C등급)인 경우는 2차식이나 기대치법으로 불량(D등급)인 경우는 3차식으로 잔여수명을 추정하여 예방 유지관리조치를 취함이 타당하다고 사료된다.

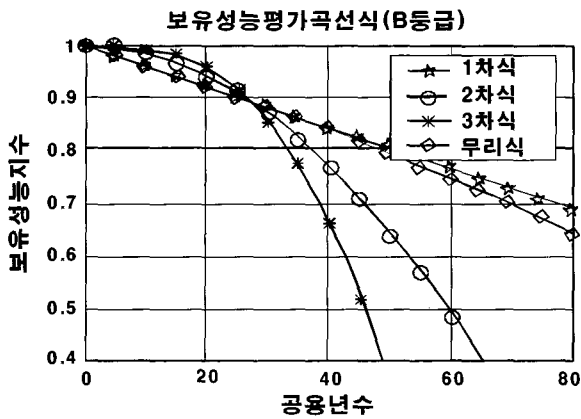


그림 1 평가식의 $g(t)$ 비교

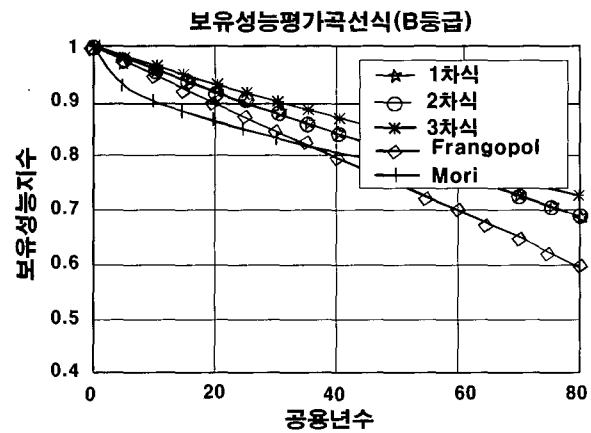


그림 2 본연구의 $g(t)$ 비교

표 4 대상교량의 외관상태 등급에 따른 보유성능 결과

구 분	부식철근의 감소 원인	외관상태 등급			
		B	C	D	E
보유성능함수 $g(t)$	단면적감소	0.89594	0.821732	0.663553	0.548357
	체적감소(염해)	0.895159	0.799556	0.703272	0.625756
	체적감소(중성화)	0.930715	0.871081	0.811180	0.763068
	저항계수 감소	0.914731	0.839379	0.764028	0.703747
1차식에 대한 k 값	단면적감소	0.003854	0.006602	0.012461	0.016727
	체적감소(염해)	0.003883	0.007424	0.010989	0.013861
	체적감소(중성화)	0.002566	0.004775	0.006993	0.008775
	저항계수 감소	0.003158	0.005949	0.008739	0.010972
평방근식에 대한 k 값	단면적감소	0.062081	0.081256	0.111629	0.129335
	체적감소(염해)	0.062313	0.086162	0.104833	0.117732
	체적감소(중성화)	0.056197	0.069099	0.083626	0.093676
	저항계수 감소	0.050656	0.077129	0.093486	0.104749

* 1차식: $g(t) = 1 - kt^a$, 평방근식: $g(t) = 1 - k\sqrt{t}$
 ** Frangopol식: $k=0.005$, Mori식: $k=0.03$ (k =저항손실함수의 기울기)

표 5 대상교량의 잔여수명 평가 결과 비교

구 분	잔여수명(년) 평가			
	보수·보강전	잔여수명 연장기간	보수·보강후	k 값
1차식	10.8643	37.8643	48.7286	0.00660253
2차식	4.97399	27.0000	31.9740	0.000244538
3차식	3.22172	17.0334	20.2551	0.00000905696
평방근식	9.41494	39.3552	48.7702	0.012028
기대치법	5.42210	27.3981	32.8202	0.00216921

표 6 대상 교량의 단위면적당 유지관리조치 비용(천원/㎡)

구 분		유지관리조치			
		유지보수(B)	보수(C)	보강(D)	교체(E)
직접손실비용	단위물량(㎡/㎡)	0.46	0.46	0.32	1.0
	평균단가(천원/㎡)	86.6	132.12	301.9	392.18
간접손실비용	단위물량(일/㎡)	0.149	0.298	0.518	0.675
	평균단가(원/일)	1759.2	1759.2	1759.2	12,112.7

1. 유지보수·보수·보강시의 도로사용자비용: 일부제한통제로 산정
 2. 교체시의 도로사용자비용: 전면통제로 산정
 3. 건설교통부/시설안전기술공단의 비용분석 참고
 4. 초기비용=1393(천원/㎡)으로 함

표 7 대상교량의 외관상태 등급에 따른 경제성 분석 결과 비교(천원/㎡)

구 분	외관상태 등급 및 유지관리 대책			
	B(유지보수)	C(보수)	D(보강)	E(교체)
보수·보강전의 잔여수명	17.0041	8.78106	4.50674	2.20708
보수·보강후의 잔여수명	31.3649	20.4583	14.789	11.7389
잔여수명의 증가분	14.3608	11.6772	10.2823	9.5318
년당 보수·보강율	0.0696338	0.0856367	0.0972545	0.104912
보수·보강 횟수	3.69059	4.53875	5.15449	5.56034
80년 동안의 직접손실비용	147.018	276.678	497.965	2180.65
80년 동안의 간접손실비용	967.381	2379.4	4697.11	45461.7
총 생애주기비용(천원/㎡)	2507.4	4049.08	6588.07	49035.4
직접손실/초기비용	0.105541	0.19862	0.35477	1.56544
간접손실/초기비용	0.694459	1.70811	3.37194	32.6358
초기+직접손실(천원/㎡)	1540.018	1669.678	1890.965	3573.65

한편, 저항손실함수의 기울기 k는 식(9b)으로 산정한 것으로 점검시점의 보유성능계수 f_{CR} 에 좌우되는 함수이고 이 값은 유지관리조치에 필요한 공용수명의 연장기간을 산정할 때 중요한 계수로 교량의 유지관리조치에 필요한 경제성 분석에 중요한 영향인자임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서의 보유성능함수는 철근콘크리트교량의 현재 보유성능상태를 고려한 적절한 유지관리 조치행렬에 따른 생애주기의 프로파일에 이용할 수 있다.

4.3 보유성능에 의한 경제성 분석 결과 비교

1) 대상교량의 단위면적당 유지관리조치 비용

본 연구에서 사용한 경제성 분석의 단위비용은 일반국도상의 교량현장조사 및 서울시 자료 등 실제 현장에서 직접 현황조사를 통한 단위면적당 유지관리조치 비용으로 정리하면 표 6과 같다. 이 때 단위면적당 유지관리조치비용(천원/㎡) = 단위물량 × 평균단가로 계산하였다.

이 단위면적당 비용분석 중에서 간접손실비용은 3가지 비용인 도로사용자비용, 간접적 지역경제손실비용, 인적·물적손실비용을 포함시켜 간접손실비용을 분석하여야 하는데, 본 연구에서는 도로사용자비용만을 사용하여 상태등급평가 지수로 분석하였다. 그리고 교체시의 도로사용자비용은 건설교통부/시설안전기술공단의 개축기간분석 자료를 사용하여 산정하였다. 표 7은 예방적 유지관리 조치와 사후적 유지관리 조치시의 경제적 측면을 비교하기 위해 확정론적 방법(그림 4참조)으로 저항감소함수 $g(t)$ 은 3차 식으로 부식철근의 감소원인은 중성화에 의한 체적감소를 인 경우로 외관상태 등급에 따른 경제성 분석을 한 결과를 나타낸 것이다. 표 7에서와 같이 외관상태 등급이 B등급에서 E등급으로 하향됨에 따라서 보수·보강전 후의 잔여수명이 급격히 감소함과 동시에 총 생애주기비용은 급격히 증가함을 나타내고 있다. 잔여수명의 증가분도 식 (8b)의 C를 최대 A등급상태(보유성능 = 1.0인 상태)까지 구조성능이 향상된다고 가정하여 산정한 값으로 예방

유지관리 조치 차원인 B등급 상태(일상 유지관리 상태)의 값이 14.36년으로 가장 높는데 반하여 생애주기비용은 2507.4(천원/㎡)로 가장 낮다(그림 3참조).

따라서 사후예방유지관리 조치 차원인 C등급상태(보수 상태), D등급 상태(보강 상태), E등급 상태(교체 상태)까지의 무조치 상태에서 교량의 성능향상을 위해 유지관리조치를 취하는 것 보다는 B등급 상태의 예방유지관리 조치를 취함이 가장 경제적인 유지관리 조치임을 입증하고 있다.

대상 교량에 대한 부식철근의 감소원인에 따른 경제성 분석 결과 비교하여 나타낸 것이 표 8 및 그림 5이다. 부식철근의 감소원인 중에서 체적감소(중성화)에 대한 보수·보강전 후의 잔여수명이 다른 감소원인의 잔여수명보다 높은 것은 체적감소(중성화)의 보유성능함수 $g(t)$ 가 다른 감소원인의 보유성능함수 $g(t)$ 보다 높기 때문이다. 따라서 이에 대한 80년 동안의 총 생애주기비용은 3839.73(천원/㎡)으로 다른 감소원인의 80년 동안의 총 생애주기비용보다 작게 산정되었음을 알 수 있었다.

표 8 대상교량의 부식철근의 감소원인에 따른 경제성 분석 결과 비교(천원/㎡)

구 분	부식철근의 감소원인			
	단면감소	체적감소(염해)	저항계수감소	체적감소(중성화)
보수·보강전의 잔여수명	5.11346	3.88157	6.24545	8.78106
보수·보강후의 잔여수명	15.5938	13.9598	17.0952	20.4583
잔여수명의 증가분	10.4803	10.0783	10.8497	11.6772
년당 보수·보강율	0.0954171	0.0992233	0.0921682	0.0856367
보수·보강 횟수	4.77085	4.96117	4.60841	4.28184
80년 동안의 직접손실비용	290.827	302.429	280.925	261.017
80년 동안의 간접손실비용	2501.08	2600.85	2415.92	2244.72
총 생애주기비용(천원/㎡)	4184.91	4296.28	4089.84	3839.73
직접손실/초기비용	0.20877	0.21711	0.20167	0.18738
간접손실/초기비용	1.79546	1.86708	1.73433	1.61143
초기+직접손실(천원/㎡)	1683.827	1695.429	1673.925	1414.017

표 9 대상교량의 보수·보강공법에 따른 경제성 분석 결과 비교(천원/㎡)

구 분	보수·보강공법			
	공법1	공법2	공법3	공법4
보수·보강전의 잔여수명	14.0602	6.25235	6.25235	6.25235
보수·보강후의 잔여수명	21.6823	12.425	14.8953	17.1043
잔여수명의 증가분	7.62205	6.17267	8.64299	10.852
년당 보수·보강율	0.131198	0.162004	0.115701	0.092149
보수·보강 횟수	6.55991	8.10022	5.78504	4.60745
80년 동안의 직접손실비용	261.321	493.783	352.651	280.867
80년 동안의 간접손실비용	1719.49	4246.47	3032.76	2415.42
총 생애주기비용(천원/㎡)	3373.81	6133.26	4778.41	4089.28
직접손실/초기비용	0.18759	0.35447	0.25316	0.20163
간접손실/초기비용	1.23438	3.04843	2.17714	1.73397
초기+직접손실(천원/㎡)	1654.321	1886.781	1745.651	1673.867

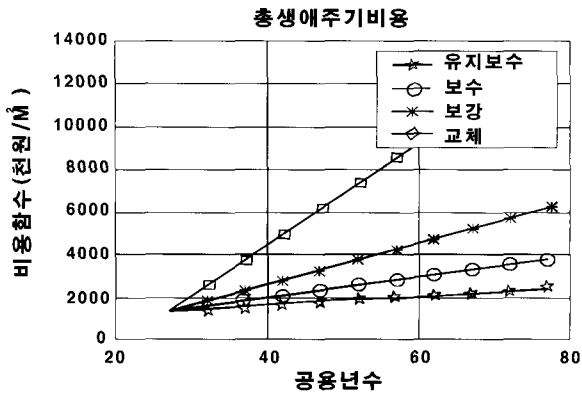


그림 3 외관상태등급의 LCC 비교

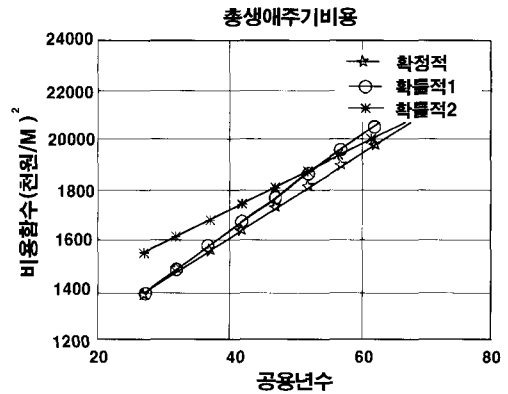


그림 4 생애주기비용의 방법 비교

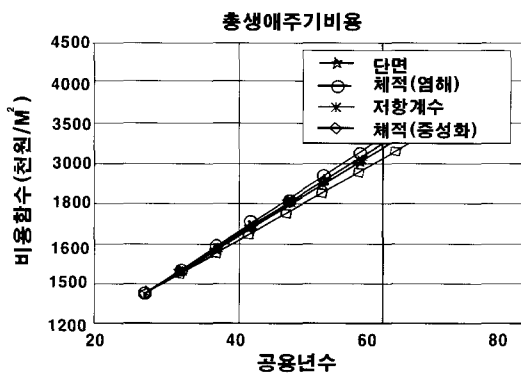


그림 5 감소원인의 LCC 비교

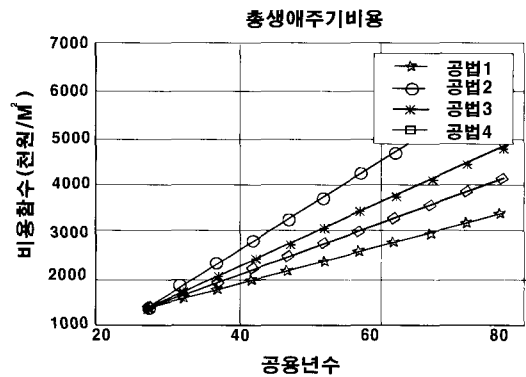


그림 6 보수공법의 LCC 비교

따라서 본 연구에서 개발한 경제성 분석기법은 표 8과 같이 부식철근에 대한 구조성능을 분석을 통하여 보수·보강전 후의 잔여수명, 잔여수명 증가분, 년당 보수·보강을, 이에 따른 보수·보강횟수, 그리고 총 생애주기비용의 제반 비용함수 관계를 효율적으로 분석할 수 있기 때문에 기존 교량에 대해 보수·보강을 실시하여 공용수명을 연장할 것인지 개축을 실시할 것인지를 판별에 이용될 수 있고, 철근콘크리트교의 공용수명 연장방안과 신설 철근콘크리트교의 장수명화 방안이 활용될 수 있다.

3차식으로 산정한 저항감소함수 $g(t)$ 을 이용하여 보수·보강공법에 따른 경제성 분석의 결과를 나타낸 것이 표 9 및 그림 6이다. 본 연구에서 사용한 공법1(교량방수공법), 공법2(합성수지공법), 공법3(액포시파넬공법), 공법4(네프맥공법)에 대한유지관리 조치시의 보유성능 향상등급 값 c 는 각각 $c=0.95$ (향상등급 B등급), $c=0.95$ (향상등급 B등급), $c=0.975$ (향상등급 B등급), $c=1.0$ (향상등급 A등급)으로 산정하였다. 공법1은 일상 유지관리인 경우이고 공법2, 3, 4 중에서 공법4(네프맥공법)의 잔여수명 증가분=10.85년, 총 생애주기비용=4089.28(천원/㎡)으로 공법2, 3보다 16.85~49.98%정도 비용절감효과가 있음을 알 수 있었다.

따라서 교량 구조물의 유지관리 조치후의 경제성 분석

은 Mori 등이 주장하고 있는 식(8b)의 형태를 사용하여도 무방하다고 판단된다. 식(8b)에서 상수 c 는 유지관리 조치, 즉 일상유지보수, 보수, 보강, 교체의 보유성능의 향상등급을 나타내는 함수로써 건설교통부/시설안전기술공단에서 연구·수행한 상태등급곡선에 의한 경제성분석시에 상태등급 향상을 최대 B등급으로 한정하고 있는 모순점을 극복할 수 있다. 또한 상수 c 를 사용함으로써 교량의 구조적·물리적 성능에 따른 구체적인 보수공법이나 보강공법 중에서 가장 경제적인 공법이 무엇인가를 선정하기 위한 분석을 할 수 있고, 신설교량의 형식이나 공법등을 선정하기 위한 도구로 사용될 수도 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 교량의 보수·보강 또는 개축 등의 적정 유지관리 조치시기의 의사 결정함에 있어 경제성을 평가할 수 있는 지원 시스템을 구축하여 철근콘크리트 교량의 현재 보유성능 상태를 고려한 적절한 보수, 보강, 개축 등의 유지관리를 효율적으로 수행할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 철근콘크리트 교량의 보유성능에 따른 공용수명을 분석하고 경제성 분석방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 경제성 분석 방법은 향후 예방유지관리 수준에 대한 경제성 분석을 수행하여 체계

적인 유지관리전략의 수립을 위한 의사결정의 지원도구로서 사용될 수 있다. 또한 선진외국에서 수행되고 있는 시간에 따른 철근콘크리트교량의 부재요소 및 부재 시스템의 시간이력 신뢰성해석을 바탕으로 철근콘크리트 교량의 잔여수명 예측과 경제성 분석에 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Mori, Y. and Nonaka, M. "LRFD for Assessment of Deteriorating Existing Structures" *Structural Safety, Elsevier*, 2001, pp. 297~313
2. Mori, Y. and Ellingwood, B. E. "Time-dependent System Reliability Analysis by Adaptive Importance Sampling" *Structural Safety*, 1993, Vol. 12. pp.59~73
3. Frangopol, D.M. and Enright, M.P. "Reliability-based Condition Assessment of Deteriorating Concrete Bridges Considering Load Redistribution" *Structural Safe Elsevier*, Vol.21, No.2 1999, pp. 159~195
4. Frangopol, D.M. and Enright, M.P. "robability Analysis of Resistance degradation of Reinforced Concrete Bridge Beams under Corrosion" *Engineering Structures, Elsevier*, Vol.20, No.11, 1998, pp.960~971
5. 건설교통부, "안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침(교량)" 2002
6. 전라남도도로안전관리사업소, "지방도 887호선 증암교 정밀안전진단보고서," 2001
7. 안영기·임정순·이증빈, "인공지능기술을 이용한 교량 구조물의 생애주기비용분석 모델", 한국구조물진단학회 논문집, 제6권. 제4호, 2002 pp.189~199.
8. 건설교통부, "도로교의 공용수명 연장방안연구" 2000
9. Miyamoto, A., K. Kawamura, K., nakamura, H., "Multiobjective Optimization of Maintenance Planning for Existing Bridges by using Bridge Management System(BMS)", *Journal of Structural Engineering(in Japanese)*, Vol.38, No. 588, 1998, pp.191~208