R.C 구조물의 퍼지신뢰성 이론을 이용한 생애주기비용분석

An Analysis of Life Cycle Cost Using the Fuzzy Reliability Theory of a R.C Structure

김종길*

Kim, Jong Gil

Abstract

When the fact is taken into consideration that recent collapses, bridge replacement and other many maintenance problems in Korea have caused bridges to be re-constructed or replaced before they reach their expected life for public use, the substantial loss during the life for public use of bridges is estimated. Accordingly, the data obtained from the analysis of the LCC economic feasibility is expected to be used for finding the construction methods and ways for repair and reinforcement necessary in the stage of maintenance and administration, determining the optimum level of performance improvement of existing structures and helping the government decide the priority for investment, and ultimately to help seek the efficient use of cost.

Key words : Artificial neural network, Back-perceptron, Damage Facto, Life Cycle Cost, Multi-layered perceptron

요 지

최근 국내에서 발생한 붕괴사고 및 교량의 교체, 기타 많은 유지관리상의 문제점 등으로 인하여 교량이 재건설되거나 공용수명을 다하지 못하고 교체되는 점을 감안하면 교량의 공용수명동안 소요되는 실질적인 손실은 막대하다 할 수 있다. 따라서 LCC경제성 분석을 통해 획득된 자료 및 데이터는 유지관리단계에서 필요한 보수·보강 공법 및 방안, 기존구조물의 성능향상의 최적수준 결정, 정부투자 우선순위 의사결정 등의 문제에 활용하여, 궁극적으로 비용의 효율적인 활용을 도모할 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 인공신경망, 역전파, 다층퍼셉트론, 손상계수, 생애주기비용

1. 서 론

최근의 교량은 계속적으로 변하는 하중환경에 의해서 다른 구조물에 비해 비교적 빨리 노후화 되기 때문에 신설교량의 설계 뿐 만 아니라 유지관리단계에서의 개·보수 또는 교체 등에 대한 최적의사결정이 매우 중요하다. 최근 국내에서 발생한 붕괴사고 및 교량의 교체, 기타 많은 유지관리상의 문제점 등으로 인하여 소요되는 실질적인 손실은 막대하다 할 수 있다. 이러한 붕괴사고로 인한 손실외에도 현재 시설물의 신설 및 개·보수나 교체를 하기에는 충분한 예산을 확보하고 있지 못하므로 투자비용의 효율성을 극대화하는 노력이 필요하다. 이러한 노력에는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 우선 기설 교량의 안전을 충분히 확보하면서 수명을 최대한 연장하기 위한 비용은 최소한으로 하고 투자의 효과는 최대화할 수 있도록 하는 기술개발과 관련 정책이 필요하다. 이러한 기술 및 정책에 있어서 선진국에서는 미래의 유지보수비의 급상승을 미연에 방지하기 위한 생애주기비용(Life-Cycle

Cost: 이하 LCC)기법을 이용한 유지관리 의사결정체계를 연구개발 실무에 적용하기는 여러 가지 해결해야 할 문제점들이 산재해 있는 실정이다. Brito와 Branco(1995)는 교량의 관리해석 시스템 내에서 발생할 수 있는 이익 및 교량의 기능상의 비용을 포함한 총 기대 LCC를 제시하였으며, Frangopol(1997)이 시간경과에 따라 열화손상을 입은 교량의 보수·보강계획을 고려한 LCC최적화에 대한 연구를 수행하였다. Ellingwood(1997)는 신뢰성에 기초한 프리캐스트 콘크리트 구조의 LCC 최소화하는 설계를 연구 수행 하였으며 국내에서 조효남(1998, 2000)에 의해 강상형교, 도로판형교 및 고속철도교량의 LCC 최적설계 및 장대 PC교량의 최적내진성능을 위한 최소기대 LCC모델에 관하여 연구 하였으며, 이증빈(2005) 콘크리트구조물의 시간의존적 설계 VE 및 LCC분석 모델을 제시하였다. 또한 건설기술관리법 시행령 제 38조의 13(2005. 6. 30개정)에 의거 총 공사비 100억원 이상인 공공발주공사에 대하여 생애주기비용(Life Cycle Cost: 이하 LCC)으로 “설계의 경제성능 검토”(설계 VE: Value Engineering)

*교신저자. 정회원. 호원대학교 토목환경공학과 겸임교수(Tel: +82-63-453-9455, Fax: +82-63-453-9456, E-mail: kman1@kunsan.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Adjunct Professor, Department of Civil&Environmental Engineering, Howon University

를 시행하도록 의무화하였다. 이러한 건설기술관리법에 의거하여 LCC분석기법이 공공사업의 설계단계에서부터 적용하도록 하는 건교부의 세부지침(시행일자: 2000. 9. 1) 「2002년 고속도로 교량 구성요소별 생애주기비용(LCC) 분석 연구」(한국도로공사, 2002), 「교량의 성능 및 사용효율 증대를 위한 자산관리 기법 개발」(건기연, 2009), 「자산관리 통합프레임워크 및 정책개발」(건기연, 2009)을 마련되었기는 하였지만 아직 LCC분석 기법을 실무에서 적용할 수 있는 충분한 준비가 되어 있지 않은 상태라 앞으로 연구해야 할 과제가 많이 남아 있다. 따라서 이러한 LCC경제성 분석을 통해 획득된 자료 및 데이터는 유지관리단계에서 필요한 보수·보강 공법 및 방안, 기존구조물의 성능향상의 최적수준 결정, 정부투자 우선순위 의사결정 등의 문제에 활용하여, 궁극적으로 비용의 효율적인 활용을 도모할 수 있으리라 사료되며, 특히 교량의 경우 예방유지관리(Preventive Maintenance)체계의 경제적인 효율성을 강조하였는데, 이는 곧 교량 구조물에 문제가 생겼을 경우 소규모의 손상은 예산의 부족으로 방치하다 문제가 커지면 보수·보강하는 기존의 사후유지관리(Essential Maintenance) 체계보다 보수·보강시 발생하는 사용자비용 및 사회·경제적 손실비용 등이 고려되는 예방유지관리체계가 훨씬 경제적인 유지관리체계에 적합한 방법임을 검증하는데 그 목적이 있다. 본 연구는 이러한 목적을 위해 국가기반산업의 근간을 이루는 구조물의 유지관리조치수준, 즉 보수·보강 및 교체 결정을 위한 LCC분석에 따른 상태 및 안전성 평가방법의 문제점을 고찰하고, 노후 RC구조물의 잔존가치년수를 80년으로 설정하여 개축(교체)가능시한인 20년차에 교체와 보수·보강을 하는 것으로 가정하여 총 LCC를 산정하고, 예방유지관리와 사후유지관리의 경제성지수 및 가치지수를 비교분석해 봄으로써 개축(교체)과 보수·보강의 총 소요비용을 정량적으로 검토할 수 있는 프로세스검증과 동시에 퍼지신뢰성에 의한 정량적이고 객관성이 확보되는 새로운 예방적유지관리체계 대한 모델을 제시하여 유지관리의사결정 지원시스템 구축에 기초자료로 사용하고자 한다.

2. 퍼지신뢰성 및 LCC분석이론

2.1 퍼지이론에 의한 상태평가기준

현재까지 구조물의 안전도평가에 수행된 외관조사의 상태평가기준은 주로 경험적인 방법만을 사용하였고, 전반적인 외관손상상태에 대한 상태평가등급기준이 너무 포괄적이었으며, 등급선정의 편차가 조사자에 따라 클 수 밖에 없었다. 또한 이러한 손상조사결과는 형식적인 노후등급정도로만 파악되고 실제 내하력 산정시에 반영하지 못하고 있다. 퍼지 이론에서는 위와 같은 문제점을 극복하기 위해서 손상도 분석 시에 세 가지 손상인자, 즉 손상심각도(L), 손상범위(C), 손상노출정도(E) 및 손상도 판정(S)에 대한 소속도함수(Membership function)와 퍼지부분집합의 퍼지 언어변수를 사용하여 구조물의 손상판정항목에 따른 정량적인 상태평가를 분석한다. 이때, 각 손상인자 L, C 및 E는 다음의 식과 같이 삼각형 퍼지집합을 사용하고, 손상도 판정 S는 다음의 식과 같이 π 형

Table 1. Fuzzy language variable and numerical value

손상 인자	퍼지부분 집합	퍼지언어 변수	대응 수치값	국토해양부
손상 심각도 (L)	L1	very mild	5.0	
	L2	mild	4.0	
	L3	moderate	3.0	
	L4	severe	2.0	
	L5	very severe	1.0	
손상 범위 (C)	C1	very low	1.0	
	C2	low	0.9	
	C3	medium	0.8	
	C4	abundant	0.7	
	C5	very abundant	0.6	
손상 노출 정도 (E)	E1	mild	1.2	
	E2	moderate	1.1	
	E3	severe	1.0	
	E4	very severe	0.9	
	E5	extreme	0.8	
손상도 판정 (S)	S1	very good	>4.8	<80
	S2	good	4.8~3.6	80~160
	S3	average	3.6~2.4	160~240
	S4	poor	2.4~1.2	240~320
	S5	very poor	<1.2	>320

퍼지집합을 사용하여 손상도 분석을 수행하였다. 또한 구조물의 손상도 분석 시에 사용되는 각 손상인자에 대한 퍼지 언어변수의 값과 이에 대응하는 수치 값은 Table 1과 같다.

이와 같은 각 손상인자의 언어변수를 각 손상판정항목등급 X_i 에 따라 두 종류 퍼지집합의 소속도함수로 특성화하면 각 손상인자에 대한 퍼지부분집합의 값을 구할 수 있다.

위 Table 1에서와 같이 각 손상인자에 대한 퍼지 언어변수에 대응하는 수치 값은 퍼지-배이지언기법 이론으로 산정한 사후(예측)신뢰성지수 값이고, 1996년도 국토해양부안의 수치 값은 구조시스템 전체에 대한 외관점수의 합계이다. 따라서 국토해양부에서 제정한 외관 상태에 대한 상태평가기준을 근거로 하여 본 논문에서 채택한 퍼지이론에 의한 상태평가 기준을 적용하였다.

Fig. 1. Membership function for external state degree

2.2 퍼지로지 시스템 이론

일반적으로 시스템의 특성이 복잡하여 정량적으로 해석하기 어렵거나 정보가 정성적이고 부정확한 경우에는 퍼지로지 이론을 이용한다. 예를 들어 콘크리트구조물의 대안별 성능평가 시스템에 대한 전문가의 지식을 가지고 있어 수학적 분석이 어려운 경우에는 퍼지이론을 이용한다. 퍼지로지는 입력자료를 퍼지화한 다음 퍼지추론을 통해 결과를 도출한 후 결과를 비 퍼지화하여 크리스프(crisp)값으로 나타내게 된다. 퍼지규칙은 일반적으로 If-Then형식으로 나타낼 수 있으며 퍼지추론(Fuzzy Inference)이란 어떤 주어진 규칙으로부터 새로운 관계나 사실을 유추해 나가는 일련의 과정이다. Max-Min 추론을 사용하여 입력변수 8, 출력변수 1인 시스템을 구성하면 Mamdani의 Min 연산은 다음식과 같다.

Input: x_1 is A' and x_2 is B' and x_3 is C' , ... and x_8 is H'

R^1 : IF x_1 is A_1 and x_2 is B_1 , ... and x_8 is H_1 , THEN y is P_1

or R_2 : IF x_1 is A_2 and x_2 is B_2 , ... and x_8 is H_2 , THEN y is P_2

... ..

or R_8 : IF x_1 is A_8 and x_2 is B_8 , ... and x_8 is H_8 , THEN y is P_8

or R^n : IF x_1 is A_n and x_2 is B_n , ... and x_8 is H_n , THEN y is P_n

Conclusion: y is P'

$$\begin{aligned} R_p: \mu P(y) &= \text{Max}(\alpha_i \text{Min} \mu_{P_i}(y)) \\ &\equiv \text{Max}[\mu_{A_i}(x_{o1}) \text{Min} \mu_{B_i}(x_{o2}) \cdots \text{Min} \mu_{H_i}(x_{o8})] \text{Min} \mu_{P_i}(y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$A', B', \dots H'$ =입력에 대한 퍼지집합,

A_i, B_i, H_i, P_i =퍼지규칙의 x_1, x_2, x_8, y 에 대한 퍼지집합,

P' =결론에 대한 퍼지집합,

R_p =Mamdani의 Min 연산규칙,

α_i = i 번째 규칙에 대한 점화강도(firing strength),

$\mu_{A_i}, \mu_{B_i}, \mu_{H_i}, \mu_{P_i}$ =퍼지집합 A_i, B_i, H_i, P_i 에 대한 소속도 함수 값,

x_{o1}, x_{o2}, x_{o8} =시스템의 실제 입력값,

Max=논리합(or 연산),

Min=논리곱(and 연산),

R^i =퍼지규칙 번호

비퍼지화는 소속도함수로 표현되는 퍼지량을 크리스프 값으로 변환하는 것으로 여러 가지 방법이 있으나 무게중심법이 가장 일반적으로 사용된다.

$$y = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_P(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^n \mu_P(y_j)} \quad (2)$$

여기서, n =전체출력의 분할정도,

y_j =분할정도 j 에 따른 출력,

$\mu_P(y_j)$ =결론부 퍼지집합 P 에 대한 y_j 의 소속도함수

2.3 LCC 비용항목과 할인율

LCC 분석에 포함되는 비용항목은 분석대상 구조물에 따라

Table 2. Construction industry cost list for LCC analysis

구 성	세 부 항 목
초기투자 비용	· 설계비용
	· 직접공사비용(자재비, 노무비, 경비)
	· 간접공사비용(보험료, 안전관리비, 기타)
	· 일반관리비용 및 이윤
	· 신기술도입비용
유지관리 비용	· 일반관리비용
	· 점검비용
	· 보수 · 보강비용
	· 사용자 비용(사회적 기대비용, 환경비용)
해체/폐기 비용	· 해체비용
	· 폐기비용
	· 잔존가치비용

적절하게 선택하여 구성하는 것이 중요하며, 건설사업에서 LCC 분석을 위한 일반적인 비용항목은 Table 2와 같이 구조물의 생애주기에 필요한 모든 비용으로 구성된다.

LCC분석에서 할인율은 미래의 화폐가치를 현재의 통화 가치로 변환시키기 위한 방법으로서 분석과정에 많은 영향을 미치며 일반적으로 할인율은 명목 이자율과 소비자 물가지수를 이용하여 산출하는 실질할인율을 의미한다. LCC분석을 위해서는 미래비용을 현재비용으로 환산해야 하며, 미래비용을 추정하기 위해 사용되는 개념은 공칭할인율과 실질할인율이 있다. 공칭할인율은 인플레이션 효과를 고려한 할인율이기 때문에 반드시 미래투자에 대한 인플레이션 효과를 고려한 미래비용평가와 연관해서만 사용해야 하며, 일반적으로 은행이자율을 공칭할인율로 사용하는 경우가 일반적이다.

2.4 LCC 분석 기법

건설 사업에서 LCC의 분석절차는 적용대상에 따라 조금씩 차이는 있으나 일반적으로 분석목표의 확인과 구성항목의 조사 및 각각의 비용 산정 단계를 걸쳐 최종적인 비용에 대한 평가와 피드백의 순서로 진행되어지며, LCC분석기법의 3가

Table 3. LCC analysis approach method

구 분	내 용
분 석 기 법	<p>확정론적 LCC분석</p> <ul style="list-style-type: none"> · Deterministic Life Cycle Cost Analysis Approach, DLCCA · 통계적 데이터나 전문가의 주관적 의견에 의한 확정적인 데이터를 활용하여 분석하는 분석방법
	<p>확률론적 LCC분석</p> <ul style="list-style-type: none"> · Probabilistic Life Cycle Cost Analysis Approach, PLCCA · 통계적 데이터나 전문가의 주관적 의견을 확률적 데이터로 구축하여 시뮬레이션 기법을 적용하여 분석
	<p>신뢰성 LCC분석</p> <ul style="list-style-type: none"> · Reliability-Based Life Cycle Analysis Approach, RLCCA · DLCCA 및 PLCCA 방법에서 고려하지 못하는 구조물의 위험도가 정식화에 포함되어 있는 방법으로 구조물의 위험도는 시간불변 신뢰성해석방법과 시간이력 신뢰성해석 방법을 통하여 고려

지 유형은 Table 3과 같다.

콘크리트 교량구조물에 대한 유지관리 개념의 경제성평가를 위한 생애주기비용(LCC)분석 및 절차는 여러 가지 방법이 있는데, 본 논문에서는 초기투자비용, 직접손실비용(유지관리비용, 해체폐기비용, 구조부재 보수보강비용 및 교체비용의 총화), 간접손실비용(인적·물적 손실비용, 사회·경제적 손실비용의 총화)으로 구성하여 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하고, 시간가치를 고려한 외관상태 평가등급에 따른 LCC분석 모델로 사후유지관리인 경우와 예방유지관리인 경우로 나누어 평가하였다.

2.5 시간의존적 LCC분석 방법

콘크리트 교량구조물에 대한 유지관리 개념의 경제성평가를 위한 생애주기비용(LCC)분석 및 절차는 여러 가지 방법이 있는데, 본 논문에서는 초기투자비용, 직접손실비용(유지관리비용, 해체폐기비용, 구조부재 보수보강비용 및 교체비용의 총화), 간접손실비용(인적·물적 손실비용, 사회·경제적 손실비용의 총화)으로 구성하여 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하고, 시간가치를 고려한 외관상태 평가등급에 따른 LCC분석 모델로 사후유지관리인 경우와 예방유지관리인 경우로 나누어 평가하였다.

2.5.1 사후유지관리인 경우

식 (3)의 퍼지신뢰성 해석에 의한 열화성능평가와 유지관리 조치 수준별 상대 LCC 지수를 이용한 시간의존적 LCC 분석모델은 다음과 같이 된다.

$$C(t) = C_o - a_c t^2 \quad 0 \leq t < t_o \quad (3a)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - t_o)^2 \quad t_o \leq t < t_i \quad (3b)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t)^2 \quad t_i \leq t < t_f \quad (3c)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t_f)^2 \quad t_f \leq t < t_s \quad (3d)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t_s)^2 \quad t_s \leq t < t_d \quad (3e)$$

여기서, t 는 공용년수이고, t_o 는 점검시점이며, t_i 는 열화발생 시점이다. 그리고 t_f 는 1차 유지관리 시점이며, t_s 는 2차 유지관리 시점, t_d 는 3차 유지관리 시점을 나타내며, Δt 는 1차 유지관리시기, Δt_f 는 2차 유지관리 시기, Δt_s 는 3차 유지관리 시기이다.

2.5.2 예방유지관리인 경우

식 (4)의 퍼지신뢰성 해석에 의한 열화성능평가와 유지관리 조치 수준별 상대 LCC 지수를 이용한 시간의존적 LCC 분석모델은 다음과 같이 된다.

$$C(t) = C(t_o) - \alpha_c (t - t_o)^2 \quad 0 \leq t < t_o \quad (4a)$$

$$C(t) = C(t_o) - \alpha_c (t - t_o)^2 \quad 0 \leq t < t_i \quad (4b)$$

$$C(t) = C(t_i) + C_y - \alpha_c (t - \Delta t)^2 \quad t_i \leq t < t_f \quad (4c)$$

Table 4. Value analysis evaluation index

구 분	산 출 식
성능점수	$QPI = \sum(DR \times PI)$
상대성능지수	$SPI = SPI_{alt} / SPI_{min}$
상대LCC지수	$CI = CI_{alt} / CI_{min}$
자산가치지수	$VA = FI / CI$
상대가치지수	$VI = SPI / CI$
성능향상지수	$SPII = (SPI_{alt} - SPI_{min}) / SPI_{min}$
가치향상지수	$VII = (VI_{alt} - VI_{min}) / VI_{min}$
비용절감지수	$CII = (LCC_{max} - LCC_{alt}) / LCC_{max}$

$$C(t) = C(t_p) + C_y - \alpha_c (t - \Delta t_p)^2 \quad t_f \leq t < t_s \quad (4d)$$

$$C(t) = C(t_s) + C_y - \alpha_c (t - \Delta t_s)^2 \quad t_s \leq t < t_d \quad (4e)$$

2.6 가치분석을 위한 평가지표

기존의 일반적인 VE/LCC 분석 프로세스는 가치평가를 위한 평가지표가 일원화 되지 못하여 분석 수행자에 따라 분석 결과 지표의 상이성을 나타내고 있다. 따라서 가치 평가 절차에서의 일관성 및 효율성을 확보하기 위해서는 합리적인 평가지표가 필요하며, 이에 따른 퍼지신뢰성 해석에 의한 설계시점의 가치분석 평가지표는 다음 Table 4와 같다.

Table 4에서 성능점수(QPI)를 산정하기 위한 DR과RI는 각각 품질모델가중치와 성능등급을 나타내고, 상대성능지수(SPI)를 산정하기 위한 대안값과 최소값의 가치지수를 나타내며, 가치지수와 성능지수와 상대LCC지수의 비에 의해 결정된다.

3. 유지관리 우선순위 평가 방법

3.1 인공신경망이론에 의한 방법

인공신경망은 고도로 복잡한 인간의 두뇌를 구성하고 있는 기본단위인 뉴런(Neuron)의 개념을 도입하여 인식과정과 신경생태를 수학적 모형으로 일반화시키기 위해서 개발된 병렬 정보처리 시스템이다. 지금까지 알려진 바로는 인간의 두뇌는 많은 수의 뉴런으로 구성되어 있으며, Fig. 2에서와 같이 하나의 뉴런은 세포체(cell body)와 축색돌기(axon) 및 수상돌기(dendrite) 등으로 구성되어 있다. 이러한 뉴런의 구조로부터 유래된 인공신경망의 구조는 Fig. 3과 같다. 인공 신경망은 정보가 들어오는 입력층(input layer), 뉴런에 미치는 영향을 조절해주는 가중치(weight)와 이들 입력과 가중치로 들어

Fig. 2. A configuration of neuron

Fig. 3. Model of artificial neural network

은 정보를 결합하여 주는 결합함수(combining function), 이 결합함수로부터 나온 결과를 변환하여 출력 값을 결정하는 전이함수(transfer function)등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용한 역전파(back propagation) 학습 알고리즘은 델타규칙과 거의 유사하고 다수의 층으로 이루어진 다층 퍼셉트론을 학습시킬 수 있는 일반화된 델타규칙을 이용하고 있다. 일반적으로 역전파 신경망은 입력 값과 목표출력으로 이루어진 학습 샘플들을 사용하여 샘플입력에 대한 신경망의 출력 값과 목표 출력사이의 오차가 최소로 되도록 규칙에 따라 연결강도를 조정하는 지도학습(supervised learning)이며, 주어진 학습 샘플들을 사용하여 신경망의 성능이 원하는 수준이 될 때까지 연결강도를 조정하여 새로운 샘플이 인가되는 경우 그 연결강도를 이용하여 예측하는 Off-line 학습을 수행하게 된다.

3.2 철근콘크리트의 손상과정

철근 콘크리트 바닥판의 손상은 손상장소 및 손상원인에 따라 여러 가지 형태로 나타난다. 콘크리트에 발생하는 균열이 철근콘크리트 바닥판의 손상에 큰 역할을 하는 것이 분명하므로 균열상황을 관찰하는 것에 의해서 바닥판의 열화과정을 파악하는 것이 가능하다. 또한 균열의 위치, 방향, 크기 등을 상세히 조사하는 것에 의해서 어느 정도 그 원인을 추정하는 것도 가능하다고 생각된다. 바닥판의 손상과정에는 인공신경망학습에서 알 수 있듯이 여러 가지 복잡한 영향인자가 연관되며, 일반적으로 이러한 요인들 중에 몇 가지가 서로 합해져서 손상이 일어나며, 그것에 대응하는 균열의 형태도 변하는 것으로 생각된다. 철근콘크리트 바닥판으로서 가장 일반적으로 사용되는 주철근이 차량진행방향에 직각인 1방향 판의 경우에, 바닥판 콘크리트의 함몰에 이를 때까지 가장 많이 보여지는 균열손상은 (1)일방향 균열의 발생, (2)균열의 2방향화, (3)균열의 귀갑상화, (4)균열의 관통 및 유리서리의 발생, (5)균열 모서리 탈락 및 균열 틈새의 진전, (6)콘크리트의 함몰의 순서로 발생한다.

3.3 손상원인과 손상형태

철근콘크리트 바닥판의 손상형태는 김종길 외(2004)에서 크게 균열, 박리 및 파손, 철근노출 및 부식, 누수 및 백태, 콘크리트의 품질저하 등으로 분리될 수 있으며, 손상원인은 Table 5에서와 같이 14가지 항목으로 분류하였고, 정밀 외관조사에 의한 철근콘크리트 바닥판에 나타나는 손상형태를 균열의 패턴, 백태, 박리, 팝 아웃, 스케일링 등의 18가지로 분

Table 5. Damage shape and damage cause

손상형태	손상원인
1. 시공초기에 발생한 불규칙한 형태의 균열	1. 시공상의 결함
2. 동간격의 수직균열	2. 건조수축
3. 요각부의 경사균열	3. 누수
4. 백태	4. 알칼리 골재 반응
5. 슬래브에서 방향없이 마구 갈 라지는 균열	5. 동결융해의 반복
6. 거더에 평행한 긴 균열	6. 콘크리트의 중성화
7. 팝 아웃	7. 염해
8. 표면 스케일링	8. 피복두께 부족
9. 모서리 부분을 중심으로 발생한 망상형 균열	9. 배력철근량 부족
10. 녹 흔적	10. 구조상 약점(단부)
11. 모서리 부분을 중심으로 발생한 박리	11. 바닥판 두께 부족
12. 배근을 따라 발생한 박리	12. 주철근의 강성 부족
13. 배근을 따라 발생한 균열	13. 내하력 부족
14. 주철근 방향으로 거의 규칙 적인 일 방향 균열	14. 충격
15. 슬래브 중앙을 중심으로 발 생한 망상형 균열	
16. 단부에 발생한 균열	
17. 단부에 발생한 박리	
18. 일부분에 집중된 균열	

류하였다.

3.4 보수 · 보강판정 기준

철근콘크리트 교량 바닥판의 보수 및 보강 공법은 손상형태, 손상원인, 내구성 등급, 내하율에 따라 철근콘크리트 바닥판의 보수 · 보강 방법 산정을 위한 도식화하면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Retrofit-rehabilitation method used artificial vneural network

4. 적용 예 및 고찰

4.1 대상교량의 개요

본 논문에서 적용한 대상교량의 개요는 Table 6에 제시된 바와 같이 3경간 슬래브교로 이루어져 있으며, 설계하중은 DB-18인 2등급교이다.

낙포교는 30년을 상회하는 사용기간 동안에 공단과 도심을 연결하는 중요한 교량으로 급속한 경제발전과 물동량증가로 인한 교량의 노후화가 심화되어 교량의 안전진단 및 보수·보강을 실시하여 2등급의 교량을 1등급교로의 상향시키기 위한 조치로써 과업을 실시 하였다. 따라서 교량의 외관상태 및 등급은 Table 7과 같으며 사용된 변수들은 제3경간 외관상태의 입력변수를 사용하고, 14가지의 손상원인과 18가지의 손상형태 그리고 내구성지수, 내하성지수 및 손상도지수 등 36가지의 입력변수를 사용하여 본 논문에서 제안한 인공신경망을 학습시키면, 보수·보강에 대한 판정 등급의 출력은 $output=0.5024$ 로 목표출력 $t=0.50$ 에 대응되므로 보수 및 보

강판정에서 보수 판정에 해당되고 보수공법은 합성수지 주입 공법에 해당된다. 제1경간과 제2경간의 보수·보강판정과 공법은 인공신경망을 학습시킨 결과 보강판정으로 FRP접착공법에 해당 된다. 이 때 목표출력 값과 학습출력 값의 오차는 0.048%이다.

본 연구에서 적용한 노후화된 교량의 경우 현재의 상태가 초기에 설계된 활하중을 견딜 능력이 안전진단결과 구하여진 내하율(RF)만큼 상실되었다고 판단하여 손상된 슬래브의 소요보강 모멘트를 Table 8과 같이 구하여 적용하였다.

4.2 LCC분석 유지관리 조치수준별 경제성 지수

기존 RC구조물에 대한 보수·보강 및 교체공사의 경제성 분석 연구에서 도출된 국토해양부와 시설안전공단에서 제시하고 있는 개보수비 비율에 따른 25%, 50%, 75%, 100%의 경제성지수는 각각 0.67, 0.82, 0.92, 1.06으로 보수·보강 비용이 개축비용의 45%이하에서는 보수·보강의 경제성이 양호하고, 65%이상에서는 개축의 경제성이 양호한 것으로 분석하고 있다.

본 연구에서는 RC-LCC 분석을 수행하기 위하여 퍼지신뢰성에 의한 LCC 분석모델을 MATLAB(Matrix Laboratory)프로그램에서 구현되도록 RC-LCC를 개발하였다. MATLAB용 LCC분석 프로그램은 각종 성능평가항목에 대한 비교 대안의 LCC 분석을 수행함으로써 열화성능에 대한 가치분석을 비교할 수 있으며 미래의 유지관리수준까지의 열화성능곡선을 퍼지신뢰성 해석에 기초하여 제시할 수 있다.

퍼지논리에 의한 RC-LCC 프로그램을 이용하면 Table 9와

Table 6. Essential particular of nack-pou bridge

교량위치	전라남도 여수시 낙포동		형식	슬래브교
설계하중	DB-18	교량등급	2 등급	
상부구조	교폭 도로교(17m)+관로교(10 m)=총폭(27 m) 연장 3@13.3 m=40.0 m, SKEW 35°			
하부구조	교대: 본체 Box벽체		기초: Box 하부슬래브	
	교각: 본체 Box벽체		기초: Box 하부슬래브	
시공년도	1969년	시행청	한국수자원공사	

Table 7. External damage state and degree for Nack-Pou bridge

손상부위	손상위치	손상원인	기존 국토해양부안			본 연구의 인공신경망		
			손상등급			입력변수값		
			제1경간	제2경간	제3경간	제1경간	제2경간	제3경간
휨균열	중앙부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	중앙부	박리	C	C	C	0.5	0.5	0.5
받침부 손상	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
	지점부	철근노출	D	D	C	-0.8	-0.8	-0.6
지점부 손상	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
둔각부 균열	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
	지점부	철근노출	D	D	C	-0.8	-0.8	-0.6
종합판정			D	D	C	0.733(D)	0.733(D)	0.5024(C)

Table 8. Rehabilitation effect used FRP method

구 분	FREP 보강전				FREP 보강후			
	내하율	M_u	M_d	M_d/M_u	M_{req}	M_d	M_d/M_u	t_{req}
제 1경간	0.7798	40.66	37.20	0.9150	14.96	51.40	1.264	0.6209
제 2경간	0.8357	40.66	39.86	0.9803	10.42	49.47	1.217	0.4325
제 3경간	0.6467	40.66	39.86	0.9803	28.52	67.67	1.66	1.18

M_u =극한휨모멘트, M_d =설계휨모멘트, M_{req} =소요보강휨모멘트, t_{req} =소요보강두께

Table 9. Economic index assessment for maintenance level

구 분		LCC 개념 의 상태 등급 평가			
		유지관리조치수준			
		유지보수: B	보수: C	보강: D	교체: E
예방 유지 관리	1차 조치	0.2439	0.2547	0.2684	0.3468
	2차 조치	0.2669	0.2885	0.3159	0.4726
	3차 조치	0.2899	0.3224	0.3634	0.5985
	4차 조치	0.3129	0.3562	0.4109	0.7243
사후 유지 관리	1차 조치	0.2684	0.2907	0.3189	0.4806
	2차 조치	0.3158	0.3605	0.4169	0.7403
	3차 조치	0.3633	0.4303	0.5149	1.0000
	4차 조치	0.4107	0.5000	0.6130	1.2597

같이 외관상태평가등급의 추정치 0.25, 0.50, 0.75, 1.0로 산정한 경제성지수는 예방유지관리인 경우, 각각 0.31, 0.36, 0.41, 0.72이고, 사후유지관리인 경우, 각각 0.41, 0.50, 0.61, 1.26으로 분석되었다. 이는 본 논문에서 제시한 퍼지 신뢰성 개념을 도입한 안전진단의 상태평가등급에 따른 경제성지수와 기존의 국토해양부에서 제시한 개보수 비율에 따른 경제성지수와 거의 일치함을 보여 주고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 RC-LCC 프로그램의 경제성 평가 등급 판정 기준을 이용하면, 퍼지조직에 의하여 진단기술자의 공학지식과 경험을 반영하여 기존의 판정방법 보다 유지관리 전략판정을 위한 객관적이고 실용적인 점검 및 진단평가 기법을 확립할 수 있으리라 사료된다.

4.3 LCC분석 유지관리 조치수준별 결과분석

현행 국토해양부 및 기타기관에서 시행하고 있는 안전점검·진단에서는 콘크리트 구조물에 대한 유지관리 조치 시기에 대한 평가기준이 너무 포괄적으로 합리적인 유지관리에 의한 구조물의 장수명화 연장방안에는 보완 해야 할 사항이 있다. 따라서 본 논문의 LCC개념을 도입한 신뢰성프로파일을 이용하면 생애주기 동안의 유지관리 전략 및 조치시기를 정확히 파악할 수 있기 때문에 유지관리를 수행하는 결정권자가 합리적으로 소요예산을 책정할 수 있고, 또한 사전에 예방유지관리를 할 시기를 미연에 알 수 있으므로 RC구조물의 재해를 방지할 수 있으며 유지관리에 필요한 예산을 절감

Table 10. Degree of external state for maintenance period analysis

구 분	외관상태 등급에 따른 유지관리조치시기(년)			
	유지보수: B	보수: C	보강: D	교체: E
1차유지 관리조치	16.75	22.16	26.60	25.09
2차유지 관리조치	26.00	42.78	47.66	47.38
3차유지 관리조치	55.25	63.39	68.72	69.67

최초신뢰성지수=3.3342(총 기대비용 최소화 신뢰성 해석 방법 중에서 Kanda의 신뢰성해석에 의한 추정치 임)

R.C 구조물의 퍼지신뢰성 이론을 이용한 생애주기비용분석

Fig. 5. Post-maintenance basis of reliability pro-file index

할 수 있다. 유지관리조치의 초기신뢰성지수는 저항 및 하중에 대한 불확실량을 사용하여 Table 10과 같이 $\beta(t)=3.3342$ 로 산정되었다.

Fig. 5는 4회 유지관리인 보수조치를 취했을 때 사후유지관리 신뢰성 평가 곡선을 표현한 것이다. 이 때 퍼지신뢰성지수는 주요구조부재에 대한 휨강도의 불확실량으로 산정 하였고, 유지관리 조치전과 1차, 2차 및 3차 유지관리 조치후의 신뢰성지수와 공용년수의 함수 관계를 분석함으로써 생애주기 동안에 발생하는 미래의 유지관리 전략 수립을 보다 합리적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 4회 유지관리인 보수조치를 취했을 때 예방유지관리 신뢰성 평가 곡선을 표현한 것이다. 이 때 퍼지신뢰성지수는 주요구조부재에 대한 휨강도의 불확실량으로 산정 하였고, 유지관리 조치전과 1차, 2차 및 3차 유지관리 조치후의 신뢰성지수와 공용년수의 함수 관계를 분석함으로써 생애주기 동안에 발생하는 미래의 유지관리 전략 수립을 보다 합리적으로 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 11은 사후 및 예방유지관리의 경우 LCC분석을 이용하여 유지관리조치수준에 따른 교체 대비 LCC분석을 비교 평가하여 나타냈다. 평가지수의 입력값은 Table 4로 산출하여 적용하면 사후 및 예방유지관리인 경우, 교체 대비 상대성능

Fig. 6. Prevent-maintenance basis of reliability pro-file index

Table 11. Degree of external state for maintenance period analysis

구 분		유지관리 조치수준에 따른 자산가치 분석 평가			
		유 지 관 리 조 치 수 준			
		유지보수(B등급)	보 수(C등급)	보 강(D등급)	교 체(E등급)
사후유지관리	상대성능지수	1.3076	1.2221	1.1810	1.0000
	상대LCC지수	1.0000	1.4237	1.9925	6.1399
	자산가치지수	1.3076	0.8584	0.5927	0.1628
	상대가치지수	8.0280	5.2705	3.6394	1.0000
	성능향상지수	0.3076	0.2221	0.1810	0.0000
	가치향상지수	7.0286	4.2705	2.6394	0.0000
	비용절감지수	0.8371	0.7681	0.6755	0.0000
예방유지관리	상대성능지수	1.3076	1.2221	1.1810	1.0000
	상대LCC지수	1.0000	1.2889	1.6768	4.5054
	자산가치지수	1.3076	0.9481	0.7403	0.2219
	상대가치지수	5.8912	4.2717	3.1731	1.0000
	성능향상지수	0.3076	0.2221	0.1810	0.0000
	가치향상지수	4.8912	3.2717	2.1731	0.0000
	비용절감지수	0.7780	0.7139	0.6278	0.0000

지수, 자산가치지수, 상대가치지수, 성능향상지수, 가치향상지수 및 비용절감지수는 유지보수>보수>보강>교체의 순위이고, 반대로 상대LCC는 교체>보강>보수>유지보수의 순임을 알 수 있었다. 그리고 유지보수비 대비 교체시의 상대LCC지수는 6.14배(사후유지관리), 4.50배(예방유지관리)로 미국을 비롯한 외국에서는 자산평가 방법을 정부회계 기준에 포함시키고 있는 반면, 우리나라에서는 아직 콘크리트 구조물과 같은 사회 기반시설물에 대한 정부회계 기준이 없어서 객관적인 LCC평가방법을 수행하는데 어려움이 있다. 따라서 국내의 지방자치단체나 정부산하기관에서 재무제표 작성 시 사회기반시설물을 자산으로 포함시키는 정부회계 기준이 마련되어야 하며, 이러한 제도적인 발전과 더불어 경제적인 사회기반시설물의 유지관리를 위해서는 기존의 관리 시스템이 가지고 있는 한계점을 개선한 자산관리 시스템이 개발 및 적용 되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서 퍼지신뢰성에 의한 확률론적 개념을 통해 철근콘크리트구조물의 유지관리 전략과 경제성(LCC)분석 모델을 연구함에 있어 도출된 결론을 정리해보면 다음과 같다.

- 1) 생애주기기간동안에 외관상태등급에 따라 합리적인사 결정은 장래의 콘크리트구조물상태와 소용비용에 대해서도 LCC분석 방법이 도입 되어야하며 LCC분석을 통해 유지보수등급수준 (B)등급에서 예산을 정하고 예산관리를 행함이 타당하다고 사료된다.
- 2) 본 논문에서 제안된 분석이론이 국토해양부에서 실행하고 있는 구조물장수명화방안의 일환으로 구조물수명예측과 적절한 예방적 유지관리차원의 조치방안으로 활용될 수 있다.
- 3) R.C 구조물 유지관리 조치수준에 따른 가치분석 결과

사후 및 예방유지관리인 경우, 교체 대비 유지보수>보수>보강>교체의 순위이고, 반대로 상대LCC는 교체>보강>보수>유지보수의 순임을 알 수 있었다.

- 4) 예방적 유지관리가 사용주기 연한의 연장을 보장하는 반면에 소규모의 비용이 자주 발생되며 이에 대한 대한 타당성을 입증 할 수 있는 객관적 근거의 확보가 필요하다.
- 5) 구조물의 상태 및 성능을 평가하고 예측할 수 있는 분석시스템을 객관적으로 평가 하고 유지관리 계획수립과 연계를 위해서는 충분한 DATA 및 자료 분석의 지속적인 연구 및 개발이 필요하다.

References

- Park, J.W., Choi, M.R., Lee, C.B., Kang, H.G. and Sohn, Y.W. (2005) "Models of Time Dependent Design Value Engineering and Life Cycle cost Analysis Evaluation for Concrete Structures", *Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 9, No. 1, pp. 129-138.
- Park, J.W., Choi, M.R., Lee, C.B., Kang, H.G. and Sohn, Y.W. (2005) "Models of Reliability-Based Life Cycle Cost Analysis for Bridge Structures in Design and Maintenance Stage", *Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 9, No. 2, pp. 259-267.
- Cho, H.N., Cho, T.S. and Chun, C.M. (1983) "Reliability Based Stability Analysis and Design Criteria for Reinforced Concrete Retaining Wall", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 3, No. 35, pp. 77-86.
- Kim, J.G., Sohn, Y.W. and Jung, Y.C. (2004) "Optimal Selection of the Maintenance Method for Existing Bridge Decks Using Artificial Neural Network", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 3A, pp. 463-471.
- Lee, C.B. and Shin, H.W. (1992) "Development of Load Factors-Based Analysis Model of Optimum Reliability", *Computa-*

- tional Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 5, No. 1, pp. 134-139.
- Lee, C.B. (1990). "Reliability Based Stability Analysis for Pile Foundation", *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 3, No. 2, pp. 85-90.
- Cho, H.N., Lim, J.K., Sim, S.T. (2001). "Optimal Seismic Reliability for Bridges Based on Minimum Expected Life-Cycle Cost", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, No. 2-A, pp. 295-306.
- Korea institute of construction technology (2009) Development of Asset Management Framework for Increasing Performance and Service Efficiency of Bridges.
- Korea institute of construction technology (2009) Development of Framework and Policy for KTAM-40.
- Frangopol, D.M. and Liu, M. (2005) Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition Safety, and Life Cycle Costs, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 181, No.5, pp. 833-842.
- ◎ 논문접수일 : 2012년 04월 17일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 04월 24일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 10월 30일