

인공지능기술을 이용한 교량구조물의 생애주기비용분석 모델

Life Cycle Cost Analysis Models for Bridge Structures
using Artificial Intelligence Technologies

안 영 기*

임 정 순**

이 증 빈***

Ahn, Young-Ki

Im, Jung-Soon

Lee, Cheung-Bin

Abstract

This study is intended to propose a systematic procedure for the development of the conditional assessment based on the safety of structures and the cost effective performance criteria for designing and upgrading of bridge structures. As a result, a set of cost function models for a life cycle cost analysis of bridge structures is proposed and thus the expected total life cycle costs (ETLCC) including initial (design, testing and construction) costs and direct/indirect damage costs considering repair and replacement costs, human losses and property damage costs, road user costs, and indirect regional economic losses costs. Also, the optimum safety indices are presented based on the expected total cost minimization function using only three parameters of the failure cost to the initial cost (τ), the extent of increased initial cost by improvement of safety (ω) and the order of an initial cost function (n). Through the enough numerical investigations, we can positively conclude that the proposed optimum design procedure for bridge structures based on the ETLCC will lead to more rational, economical and safer design.

key words : Artificial Intelligence, ETLCC, Reliability Index, Damage Costs

1. 서 론

종래에는 교량구조물을 건설계획하고 선정할 때 일반적으로 설계 및 시공 등의 초기비용에 국한해서 교량계획을 세우는 경우가 많았으나, 최근에는 초기비용

이외에도 교량구조물의 유지관리비, 교통의 원활한 소통 또는 정체 등에 따른 손실비용, 교량구조물의 손상에 따른 보수·보강 및 개축, 철거 등의 추가적인 비용을 고려한 확정적 접근방법으로 교량계획과 생애주기비용을 분석하고 있는 추세이다.

* 쌍용엔지니어링주식회사, 대표이사

** 경기대학교 토목·환경공학부 교수, 공학박사

*** 한국건설품질연구원 LCC연구소장

E-mail : kmj1001@ssyeng.co.kr 011-724-4981

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이러한 추세를 볼 때 설계단계에서부터 예방유지관리 단계까지의 성능개선을 위한 일련의 공용기간 총기대 생애주기비용(Expected Total Life Cycle Cost: ETLCC)⁽¹⁾⁽⁹⁾을 단지 확정치 또는 평균치 하나만 가지고 수행하는 확정적 방법보다는 불확실성을 갖고 있는 제반 변수를 확률적으로 모델링하는 과학적이고 합리적인 확률적 의사결정방법의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

이러한 교량구조물의 생애주기관리 시스템을 구현하기 위해서는 비용 추정 시에 발생하는 불확실성을 반영하는 많은 현장계측 센서 데이터 뿐만 아니라 손상 원인 및 형태의 육안조사 데이터등 인간의 감각과 판단에 대한 노우하우도 함께 포함되어야 한다. 즉 교량구조물 진단시스템은 온-라인상의 데이터에 의한 진단뿐만 아니라 인간 전문가의 판단에 대한 언어적 추론도 가능하게 해야 할 것이다. 이 때문에 교량구조물의 생애주기비용 분석에 있어서 인공지능의 전문가시스템, 신경회로망 기술, 퍼지이론 등의 적용이 매우 시급하다 하겠다.

신경회로망은 불명확한 시스템을 동정하는 좋은 알고리즘으로 다수의 실데이터에 의하여 시스템을 파악하고 신속하게 결과를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다.⁽⁸⁾ 그러나 많은 학습데이터가 있어야 하며 신경회로망이 사용되는 범위안에서 충분한 검토후에 사용되어야 하는 어려움이 있다.

퍼지알고리즘은 인간의 애매모호한 주관적이고 정성적인 판단을 수학적으로 표현하는 방법으로 간단한 정성적 판단 알고리즘에 사용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 전문가시스템은 다양한 언어적 추론을 가능하게 하는 전산화 방법으로 추론방식에 따라 언어표현 및 추론의 계층이 다르게 구성될 수 있다.⁽⁸⁾

이 방법은 인간의 논리적 추론을 컴퓨터가 할 수 있게 하는 방법으로 인간전문가의 노우하우가 있는 경우 전산화를 위하여 행해지거나 노우하우의 축적이 필요한 분야에 사용이 된다. 교량구조물의 생애주기비용분석과 진단을 위한 내구성평가 시스템은 온라인 데이터와 인간의 데이터 해석기술이 함께 추가되어야 할 것이며 이러한 과정에서 위에 열거한 각 인공지능기술이 함께 사용되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 시간경과에 따라 열화손상을 입은 교량구조물의 보수·보강 및 개축계획에 필요한 최적신뢰도를 추정하고, 총기대비용 최소화 이론을 도입하여 불확실성을 갖는 직접 및 간접손실비용 함수를 포함한 최적 생애비용 예측모델을 확률론적 접근방법으로 개발하고, 철근콘크리트교량을 대상으로 총기대비용의 최소화 개념과 인공지능기술을 이용한 내구성평가를 동시에 고려한 총생애주기비용의 의사결정 분석기법을 제안하고 이에 대한 타당성 및 실용성을 검증하고자 한다.

2. 인공지능기술의 의사결정모델

2.1 인공신경망 이론

신경회로망은 사람의 인지 또는 지식습득 과정을 모방하여 인공적으로 구현하는 인간의 두뇌작용에 대한 하나의 모델이라고 할 수 있다. 신경회로망의 원리를 이해하는 데는 인간의 생물학적 신경과 신경계의 이해가 먼저 필요할 것이다. 하나의 신경세포를 인공뉴런으로 모델링⁽⁸⁾ 할 수 있다. Fig. 1에서 보듯이 인공뉴런은 시냅스에 해당하는 입력부와 세포체에 해당하는 계산요소(processing element)와 전달체축에 해당하는 전달 연결부(transmitting connections)를 가진다. 뉴런은 어떤 정해진 매개변수를 갖는다. 이는 바이어스와 전달함수 및 연결강도이다.

각각의 뉴런은 간단한 수치적 연산을 수행한다. Fig. 2에서와 같이 연결강도가 곱해진 입력 값들을 전부 더해서 바이어스값을 빼고 각각 뉴런의 전달함수를 거쳐서 출력을 하게 된다. 이렇게 만들어진 인공뉴런은 신경회로망의 기본 구성 요소가 된다. 여러 뉴런과 뉴런들을 연결하여 신경회로망을 이룰 수 있다. 이렇게 만들어진 신경회로망은 비선형의 아날로그 방식 반응성과 인간의 지식과 비슷한 학습능력을 가진다.

또한 대규모의 병렬 처리를 순식간에 수행하는 빠른 처리능력을 가지며 기존의 순차적인 수치 계산법에 비해 큰 오차 보정 능력을 갖는다. 이런 장점들은 신경회로망의 무궁무진한 응용을 예상하게 한다.

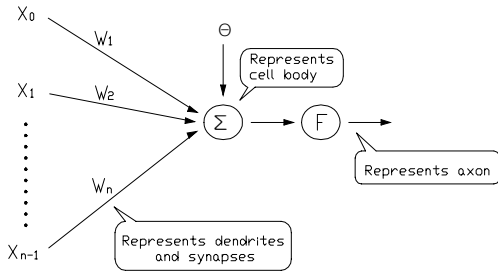


Fig. 1 인공 뉴런

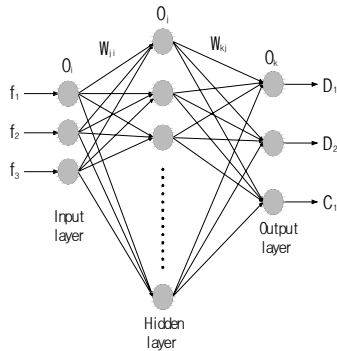


Fig. 2 다층인식자 신경회로망

2.2 퍼지 추론이론

서로 다른 변수들이 상호 작용하고 관측되는 신호를 발생시키는 물리적인 시스템에서 이러한 변수들이 서로 어떻게 관계하는가를 이해하는 것은 매우 중요하다. 이러한 관계를 나타내는 시스템의 모델에서 시스템의 복잡성이 증가할수록 이를 나타내는 수학적 모델은 여러 가지 단점을 가지게 되고 이를 통한 시스템 표현은 의미있고 정확하게 나타내는 것이 점점 어려워진다. 퍼지 추론 시스템⁽⁸⁾은 기존의 수학적 시스템 모델링에 의해서는 잘 나타낼 수 없는 복잡하고 잘 정의되지 않는 그리고 불확실한 시스템을 if-then 형태의 규칙에 의해 잘 나타낼 수 있다고 알려져 있다. 일반적인 퍼지 추론 시스템이 Fig. 3, 4와 같이 규칙 베이스, 데이터 베이스, 퍼지 추론에 나타난다. 유닛, 퍼지화기, 비퍼지화기 다섯 개의 기능적인 블록으로 이루어져 있다.

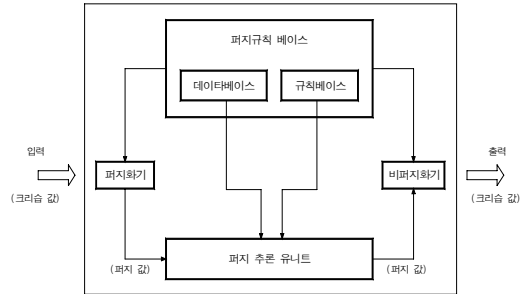


Fig. 3 퍼지 추론 시스템



Fig. 4 퍼지모델링의 구성도

2.3 내구성평가의 의사결정모델

교량구조물의 내구성평가는 교량의 현재상태를 정량적으로 파악하기 위하여 실시하며, 의사결정 방법은 크게 교량의 외관상태에 의한 방법, 중성화 및 염해에 의한 철근부식에 따른 방법, 그리고 콘크리트의 노후화에 의한 방법으로 구분된다.

본 연구에서 사용한 내구성평가의 의사결정 모델은 건설교통부(1998)에서 제정한 교량의 외관상태 판정 기준을 적용하였고, 내구성에 대한 의사결정 방법은 이증빈 등(2001)의 논문에 사술되어 있으므로 본 연구에서는 생략하며 퍼지추론을 이용한 외관상태평가의 전개과정은 Fig. 3과 같고 인공지능망을 이용한 외관상태평가 기법의 이론적 전개과정⁽⁸⁾은 Fig. 2과 같다.

3. 생애주기비용의 의사결정 분석모델

3.1 총기대비용 최소화 이론

총기대비용 최소화는 불확실한 상황에서의 시공, 파괴시의 복구와 유지관리 등의 기대비용 및 이익에 관한 경제성분석 또는 사회경제성원리를 이용한 최적화 기법으로서 교량구조물의 내구성평가와 총기대 생애주기비용 분석을 동시에 고려한 최적설계 모델을 신뢰성 지수 함수로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$C_T(\beta) = C_{IO}(1 + k\beta^n)\{1 + \Phi(-\beta)\tau\} \Rightarrow \min \quad (1a)$$

$$\tau = C_F / (C_{IO}(1 + k\beta^n)) \quad (1b)$$

여기서,

$C_T(\beta)$ = 총기대 생애주기비용,

C_{IO} = 초기비용,

C_F = 파괴손실비용,

P_f = 구조성능의 파괴 확률

τ = 파괴손실비용의 정도

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2a)$$

$$k = (\nu-1)/5^n \quad (2b)$$

$$\nu = 1 + q(aS_{no} - 1) \quad (2c)$$

$$q = 1/[1 + aS_{no}\{(1/b) - 1\}] \quad (2d)$$

$$a = C_{ra}/C_{rb} \quad (2e)$$

단, C_{ra} = 보강후의 잔류저항계수,

C_{rb} = 보강전의 잔류저항계수,

S_{no} = 현행 설계의 공칭안전율,

b = 상수(0.2~0.6)

이 때 식(2e)은 본 연구에서 제안한 2.3의 내구성 평가 모델로 구한 값이고, 식(1)을 파괴손실비용의 정

도(τ), 안전도 증가에 따른 초기비용의 증가율(ν) 및 증가곡선형(n)의 3가지 함수로 나타내면 무차원화 시킨 총기대 생애주기비용은 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\eta = C_T(\beta)/C_{IO} = (1 + k\beta^n)\{1 + \Phi(-\beta)\tau\} \quad (3)$$

식(3)을 반복시행에 의해 최적화함으로서 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 구할 수 있다. 따라서 최적신뢰성지수 β_{opt} 로 무차원화의 초기비용(λ), 파괴기대 손실비용(μ), 총기대 생애주기비용(η)은 다음과 같이 정식화하였다.

$$\lambda = C_I/C_{IO} = 1 + k\beta_{opt}^n \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \Phi(-\beta)C_F/C_{IO} \\ &= \Phi(-\beta_{opt})(1 + k\beta_{opt}^n)\tau \end{aligned} \quad (4b)$$

$$\eta = \lambda + \mu \quad (4c)$$

3.2 최적 생애주기비용 분석의 예측모델

본 연구에서 제안한 최적 생애주기비용 분석의 예측 모델⁽¹⁾⁽⁹⁾은 식(4)를 이용하여 초기비용(C_I), 파괴기대 손실비용(C_F) 및 총기대 생애주기비용(C_T)의 3 가지 함수로 각각 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$C_I = C_{IO} \times \lambda \quad (5a)$$

$$C_F = C_{IO} \times \mu \quad (5b)$$

$$C_T = C_I + C_F \quad (5c)$$

식(5)의 C_{IO} 는 시공비이외에도 설계비용과 개통 전 검증제하시험비용을 포함한 함수이고, 본 연구에서 사용한 개축비용은 실제로 예산이 배정된 개축비용(건설교통부, 1998)을 근거로 하여 산정한 값으로 라멘 교, 슬래브교 및 PSC형교의 개축비용 C_{IO} 는 각각 다음과 같다.

라 멘 교 :

$$C_{IO} = 10,656,901 \times L^{0.58198} \times W^{0.54829} \quad (6a)$$

슬래브교 :

$$C_{IO} = 3,477,219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25905} \quad (6b)$$

PSC형교 :

$$C_{IO} = 7,679,466 \times L^{0.70037} \times W^{0.20233} \times H^{0.59763} \quad (6c)$$

여기서,

L, W 및 $H = m$ 단위의 교장, 교폭 및 교고

식(5b)에서와 같이 파괴기대 손실비용은 보수·보강과 같은 직접손실비용 함수와 도로이용자비용 및 간접적 지역경제손실비용과 같은 간접손실비용 함수으로 구분할 수 있다. 따라서 간접손실비용 함수(조효남 등, 2001)은 인적·물적손실비용(C_H), 도로사용자비용(C_U), 간접적 지역경제손실비용(C_E)으로 표현하면 다음 식과 같이된다.

$$C_F = C_H + C_U + C_E \quad (7)$$

그리고 직접손실비용 함수 (C_R)(한국도로공사, 1999)을 근거로 하여 다음과 같이 정식화 하였다.

$$C_R = \sum C_{ZZ} + C_{ZO} + C_{ZD} \quad (8)$$

여기서,

C_{ZZ} = 각 공종별 보수·보강비용,

C_{ZO} = 정기점검 및 진단비용

C_{ZD} = 해체 및 폐기처분비용

3.3 의사결정 분석모델의 정식화

3.2의 파괴기대 손실비용을 직접손실비용 함수만 고려한 경우와 직접손실비용 함수와 간접손실비용 함

수를 동시에 고려한 경우로 정식화하면 식(5)에 의해 최적 생애주기비용의 의사결정 분석모델은 다음과 같이 된다.

직접손실비용 함수인 경우,

$$C_{Tlcc} = C_{llcc} + C_{Frep} \quad (9a)$$

직·간접손실비용 함수인 경우,

$$C_{Tlcc} = C_{llcc} + C_{Frep} + C_{Fcon} \quad (9b)$$

여기서, $C_{llcc} = C_{lcon} + C_{lrep}$

단, C_{llcc} = 본래의 최적초기비용 + 직접손실비용 함수에 의한 최적초기비용

C_{lrep} = 직접손실비용 함수에 의한 최적초기비용

C_{lcon} = 간접손실비용 함수에 의한 최적초기비용 (본래의 최적초기비용과 같음)

C_{Frep} = 직접손실비용 함수에 의한 최적파괴 손실비용

C_{Fcon} = 간접손실비용 함수에 의한 최적파괴 손실비용

C_{Tlcc} = 교량구조물의 최적 총기대 생애주기비용

4. 손실비용에 대한 의사결정의 정식화

4.1 직접손실 비용함수

일반적으로 교량에 대한 유지관리예산은 수선유지비 및 성능개선과 개축사업비만을 포함하는 것은 아니고, 교량의 사용성과 안전성을 유지하기위해서 소요되는 모든 비용을 실질적인 유지관리예산으로 정의할 수 있다. 즉 유지관리예산에는 직접손실 비용함수인 교량점검을 위한 점검 및 진단비용, 일상유지관리비용, 교량의 보수·보강비용, 교체비용, 개축비용등이 포함되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 한국도로공사(1999)에서 사용한 교량의 점검 및 진단에 대하여 개축비에 대비한 예산비율과 교량의 공종별 보수·보강비용을

직접손실 비용함수로 사용하였다.

4.2 간접손실 비용함수

교량구조물의 손상재해에 의한 인적·물적손실비용은 사고발생 당시 교량 상의 차량 및 보행자의 수와 관계가 있다. 인적·물적손실비용은 사망비용 및 상해비용의 함수로 일반적으로 사고를 당한 사람이 남은 수명기간 동안 벌어들일 수 있을 것으로 추정되는 금액과 치료비용등을 고려한 인적자본법을 통해 추정된 자료(조효남 등, 2001)에 근거하여 추정하는 것으로 하였다. 따라서 사망비용에 대하여 서울에 대한 인적·물적손실비용은 전절 2.3에서 구한 교량구조물의 손상도지수로 다음 식(10)과 같이 정식화된다.

$$C_H = 5.075 \times 10^{12} \times [P(D) > 0.5]^{1.6} \quad (10a)$$

$$0 \leq d_m < 0.5$$

$$C_H = 1.315 \times 10^{12} \times [P(D) > 0.5]^{1.6} \quad (10b)$$

$$d_m > 0.5$$

도로사용자비용은 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용, 환경비용, 불편함의 비용 등으로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서 시간지연비용과 차량운행비용이 가장 주요한 두 가지 비용항목으로 고려되어 왔다. 그리고 간접적 지역경제손실비용은 여가, 소평의욕 저하, 지가하락 등에 의한 지역경제손실을 말한다. 본

연구에서는 간접적 지역경제비용을 도로사용자비용과 같은 것으로 가정함으로써 근사적으로 추정하였다. 따라서 2.3의 인공지능에 의한 내구성평가로 구한 손상도지수의 향으로 정식화하면 식(11)과 같이 된다.

$$C_E = 4.45 \times 10^{10} d_m < 0.2 \quad (11a)$$

$$C_E = (7.52 \times 10^{10}) \times d_m - 2.13 \times 10^9 \quad (11b)$$

$$0.2 \leq d_m < 0.4$$

$$C_E = (1.84 \times 10^{12}) \times d_m - 3.54 \times 10^{11} \quad (11c)$$

$$0.4 \leq d_m < 0.8$$

$$C_E = 4.21 \times 10^{12} d_m > 0.8 \quad (11d)$$

5. 적용 예 및 고찰

5.1 대상교량의 일반사항

대상교량의 개요는 Table 1에 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교이며 설계하중은 DB-13.5이다. 본 연구에서 제안한 인공지능을 이용한 외관상태평가를 수행한 결과 대상교량의 상태평가등급은 output a = 0.6044로 건설교통부안의 C등급에 해당되는 값으로 추정되었고, 보수·보강은 섬유보강 NEFMAC(NEw Fiber Material Composite) 공법과 리프리트공법(신기술 제209호)을 적용하였다.

Table 1 증암교의 제원과 일반사항

교량위치	전라남도 담양군 고서면 문향리 (지방도 887호선상)		
시공년도	1974년	설계하중	DB-13.5
교량제원 및 물성치 (외측주형)	b = 210cm, h = 125cm, b ₀ = 50cm, d = 115cm, A _s = 79.42cm ² A _v = 2.53cm ² , f _{ck} = 240kg/cm ² , f _y = 3000kg/cm ² , M _D = 6,909,606kgf·cm, M _L = 2,867,239kgf·cm V _d = 1,967,000kgf, V _L = 347,000kgf		
구조해석 및 재하시험 결과치	i _{cal} = 0.27, i _{test} = 0.3, f _{ck} ' = 171.4kg/cm ² , δ _{sap-외측} = 2.11mm, δ _{test-외측} = 2.04mm K _r = 0.85, K _t = 1.0, K _o = 0.85, K _s = 1.01		

5.2 건전도 및 잔여수명에측 평가

본 연구에서는 최적 생애주기비용 분석에 필요한 교량구조물의 내구성평가 모델의 해석 결과를 검증하기 위하여 Table 2에서와 같이 철근콘크리트 교량에 있어 기존의 외관 육안검사와 현장재하시험의 측정결과로 건전도 및 잔여수명에측 결과를 분석하였다.

Table 2의 건전도는 3가지 방법 즉 잔류저항계수,

내하율 및 손상지수에 의한 건전도를 NEFMAC 보강재를 사용하여 보강전과 보강후로 분석한 결과 보강전에는 모든 결과 값이 1.0이하로 내구성과 내하성을 상실하였으나, 보강후의 모든 결과값이 1.0이상으로 내구성과 내하성이 회복되었다. 이와 같이 본 연구에서 제안한 내구성평가는 생애주기비용 분석뿐만 아니라 교량구조물의 개측과 성능개선을 판정할 수 있는 주요 결정요소라 할 수 있다.

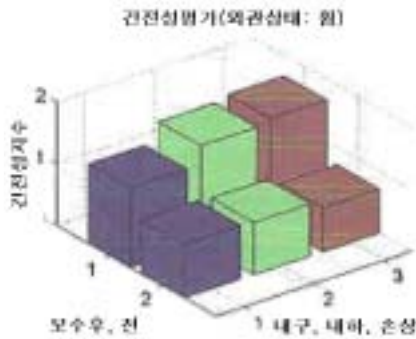


Fig. 5 외관상태에 의한 건전성

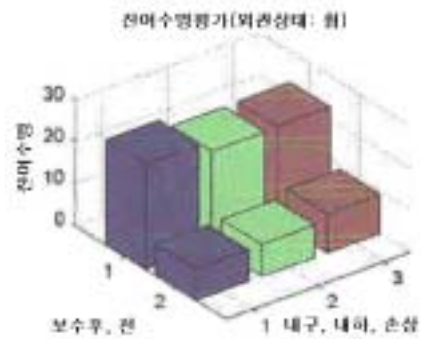


Fig. 7 외관상태에 의한 잔여수명

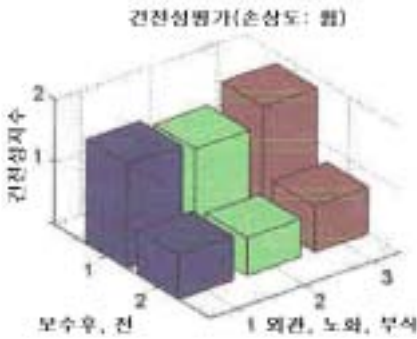


Fig. 6 손상도에 의한 건전성

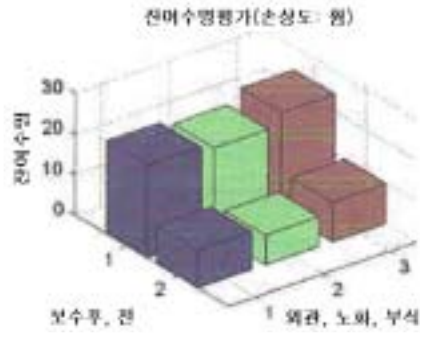


Fig. 8 손상도에 의한 잔여수명

Table 2 증암교의 건전도 및 잔여수명 예측 결과

구 분		보강 전 평가모델			보강 후 평가모델		
		외관상태	콘크리트 노후화	철근부식	외관상태	콘크리트 노후화	철근부식
건전도	내구성(잔류저항계수)	0.8736	0.8920	0.8853	1.2901	1.3232	1.3165
	내하성(내하율)	0.8442	0.8775	0.8654	1.5998	1.6587	1.6465
	손상도(손상지수)	0.7073	0.7651	0.7437	1.6610	1.8738	1.8300
	내하력	11.3962	11.8462	11.6825	21.5841	22.3920	22.2283
잔여수명	내구성(잔류저항계수)	7.4293	7.6693	7.5824	25.0031	25.4431	25.3546
	내하성(내하율)	7.6373	7.9743	7.8529	22.4872	22.9438	22.8524
	손상도(손상지수)	9.2317	10.1923	9.8437	22.7138	24.7518	24.3455

현재 건설교통부의 상태 및 안전성평가시스템은 교량부재의 현재의 손상도는 파악할 수 있지만 장래의 노화진행정도는 예측할 수 없다. 이에 본 연구에서는 교량구조물에 대한 내구성평가를 하는 지표로서 내하성지수(내하율)과 내구성지수(잔류저항계수) 및 손상도지수(손상도)의 3가지로 분류하여 각각의 공용년수에 따른 보수, 보강전 후의 건전성지수와 잔여수명 값을 나타내면 Fig. 5~8과 같이 된다.

5.3 생애주기비용의 계산

5.3.1 초기비용과 유지관리비용 검토

총기대비용의 최소화 개념을 도입한 본 연구의 단위 시공비는 식(6)을 사용하였고 이에 따른 유지관리비용, 즉 운영비, 유지보수비용과 해체 및 폐기처분비의 합은 식(4a)로 산정하였다. 식(4a)로 산정한 결과는

초기비용의 10.8%로 시설물안전관리에 관한 특별법시행령(1995)에 근거한 초기비용의 11%와 거의 일치하고, 조효남 등(2001)에서와 같이 교량구조물의 최적예측설계시에 일반적으로 많이 적용되고 있는 대안(Alternative) 공법의 생애주기비용 의사결정분석 결과와도 일치하였다.

5.3.2 파괴 손실비용 추정

4.2절에서 언급한 바와같이 간접손실비용을 추정하기 위해 식(10),(11)을 사용하였다. 간접손실비용 함수 중에 간접적 지역 경제손실비용은 도로이용자비용의 50~150% 정도로 적용하였다. 이에 본 연구에서는 이러한 간접적인 지역경제손실비용을 도로이용자비용과 같은 것으로 가정하여 외관상태 등급에 따라 최적 생애주기비용을 산정하면 Table 4와 Fig. 9와 같이 된다.

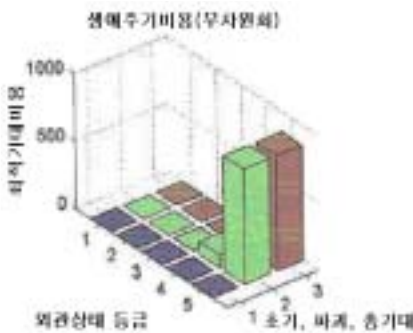


Fig. 9(a) 생애주기비용(무차원화)

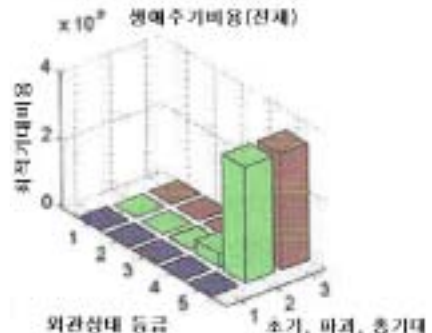


Fig. 9(b) 생애주기비용(전체)

Table 4 외관상태 등급에 따른 최적 생애주기비용(무차원화한 경우) (원/단위면적)

구 분	외관상태 등급					
	A	B	C	D	E	
보수·보강효과	0.4146	0.4156	0.4312	0.4321	0.4346	
최적신뢰성지수	3.2517	3.3358	3.3369	3.3373	3.3374	
직접손실비용함수	초기비용	1.1081	1.1095	1.1110	1.1127	1.1167
	파괴기대비용	5.5340×	5.5340× 10 ⁻⁵	5.5340× 10 ⁻⁵	5.5340× 10 ⁻⁵	5.5340× 10 ⁻⁵
	총기대비용	1.1081	1.1096	1.1110	1.1127	1.1167
	₩	4.9941× 10 ⁻⁵	4.9941× 10 ⁻⁵	4.9941× 10 ⁻⁵	4.9941× 10 ⁻⁵	4.9941× 10 ⁻⁵
간접손실비용함수	초기비용	1.1081	1.1095	1.1110	1.1127	1.1167
	파괴기대비용	-	0.9067	4.0458	98.7740	850.3541
	총기대비용	1.1081	2.0162	5.1568	99.8866	851.4708
	₩	-	0.8172	3.6415	88.7696	761.4884

단, ₩=파괴기대비용의 정도

Table 4와 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 직접손실함수의 파괴기대비용은 거의 무시할 정도로 적고 간접손실함수의 파괴기대비용은 외관상태의 등급이 E등급에 가까울수록 850.35배까지 급격히 증가하였다. 이 간접손실함수는 총기대 생애주기비용의 산정에서 가장 지배적인 인자이며, 외관상태가 D, E등급에 도달하여 교량의 구조적 문제가 발생한 후 긴급보수·보강을 하는 현행유지관리체제인 사후유지관리체제에서 보강 개축비용을 최소화할 수 있도록 계획, 설계, 시공단계에서의 생애주기비용(LCC)의 도입뿐만 아니라 유지관리단계에서도 외관상태가 C등급에 도달하기 이전에 예방유지관리체제로의 전환이 더욱 적절하다고 사료된다.

5.3.3 최적 생애주기비용의 추정

교량구조물의 최적 생애주기비용(LCC)을 분석하기 위하여 3.1의 총기대비용 최소화 이론을 도입하여 외관상태 등급에 따라 직접손실비용함수, 간접손실비용함수, 그리고 직접+간접손실비용함수의 3가지 경우로 최적 기비용, 최적 파괴손실비용, 최적 총기대비용을 분석하여 나타낸 것이 Table 5와 Fig. 10, 11, 12, 13이다.

Table 5와 Fig. 10, 11, 12, 13에서 알 수 있듯이, 생애주기비용의 의사결정기법을 외관상태 등급에 따라 유지관리수준별로 경제성을 비교한 결과 일부 선진국에서 채택되고 있는 예방유지관리체제가 가장 적절한 유지관리 수준임을 정량적으로 입증하였다.

Table 5 외관상태 등급에 따른 최적 생애주기비용 (원/단위면적)

구 분		외관상태 등급				
		A	B	C	D	E
초기시공비용		4,072,246	4,072,246	4,072,246	4,072,246	4,072,246
보수보강비용		5.4796×10^5	5.4796×10^5	5.4796×10^5	5.4796×10^5	5.4796×10^5
직접손실비용함수	초기비용	6.0721×10^5	6.0797×10^5	6.0879×10^5	6.0970×10^5	6.1193×10^5
	손실비용	30.3242	30.3242	30.3242	30.3242	30.3242
	총기대비용	6.0724×10^5	6.0800×10^5	6.0882×10^5	6.0973×10^5	6.1196×10^5
간접손실비용함수	초기비용	-	4.4682×10^6	4.4742×10^6	4.4810×10^6	4.4973×10^6
	손실비용	-	3.6515×10^6	1.6293×10^7	3.9779×10^8	3.4246×10^9
	총기대비용	-	8.1197×10^6	2.0768×10^7	4.0227×10^8	3.4291×10^9
직접+간접손실비용함수	초기비용	5.0699×10^6	5.0762×10^6	5.0831×10^6	5.0907×10^6	5.1093×10^6
	손실비용	30.3242	3.6515×10^6	1.6293×10^7	3.9779×10^8	3.4246×10^9
	총기대비용	5.0699×10^6	8.7277×10^6	2.1376×10^7	4.0288×10^8	3.4297×10^9

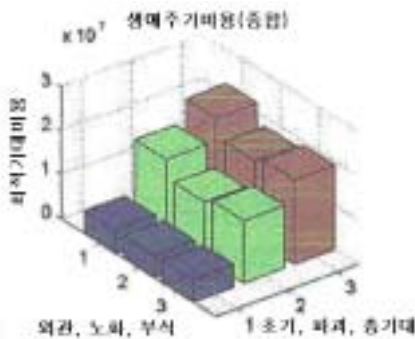


Fig. 10 생애주기비용(종합)

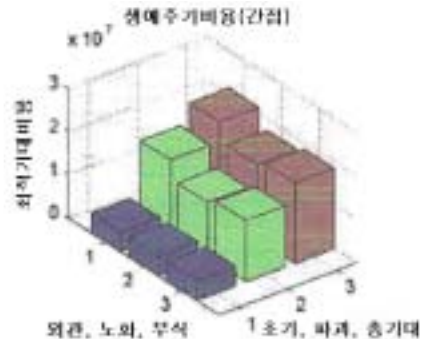


Fig. 11 생애주기비용(간접)

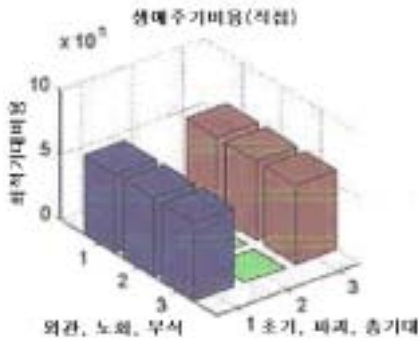


Fig. 12 생애주기비용(직접)

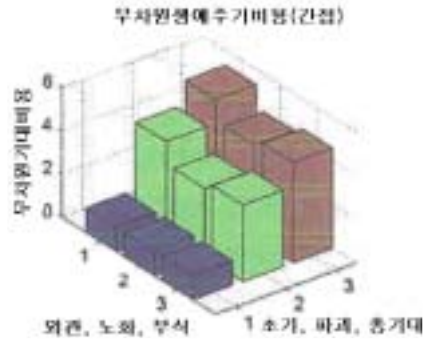


Fig. 13 생애주기비용(무차원화)

이러한 예방유지관리체제로 교량구조물을 유지관리하는 것이 현행 유지관리수준인 E등급에 대한 최적 총기대비용 3.4297×10^9 의 막대한 간접손실비용을 미연에 방지할 수 있다고 판단된다. 따라서 교량구조물을 유지관리함에 있어서 외관상태 등급이 B등급수준에서 항상 예방유지관리체제를 강구하고 정기적인 점검 및 정밀안전을 지속적으로 수행함으로써 보수·보강대책에 대한 생애주기비용의 궁극적인 절감효과를 기대할 수 있다고 하겠다.

6. 결 론

본 연구에서는 교량구조물의 생애주기비용 분석에 외관상태에 따른 내구성함수를 사용하고 구조수명간 총기대비최소화 이론을 도입하여 최적 생애주기비용분석의 의사결정기법을 제안하였다. 그리고 제안한 각각의 비용함수들을 토대로 개선된 새로운 최적설계 알고리즘을 확률적 접근방법으로 개발하였다. 본 연구에서 제안한 최적 생애주기비용 분석의 알고리즘을 수치예제에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 총기대비용의 최소화원칙에 의한 생애주기비용은 파괴손실비용과 초기비용과의 비(τ), 초기비용의 증가율(μ) 및 초기비용의 증가곡선형(n)의 함수로 결정되며, 이 중에서 파괴손실비용 정도(τ)의 함수가 생애주기비용의 분석에 가장 지배적인 인자임을 알 수 있었다.

- 2) 본 연구에서 제안한 안전성과 경제성을 동시에 고려한 실용적인 내구성평가와 최적생애주기비용 분석의 알고리즘을 이용하면 적은 시간에 생애주기비용함수의 최적해를 구할 수 있고 유효 적절한 시기의 보수·보강 대책을 강구할 수 있으므로 현행 교량구조물의 안전관리체제에서 예방안전관리체제로의 전환에 활용될 수 있다.
- 3) 교량구조물의 투자우선 순위를 선정하는데 있어 현행 유지관리체제와 같이 경험적이고 정치적인 진단 책임자의 주관적 결정 방법보다는 본 연구에서 제안한 최적 생애주기비용 분석에 바탕을 둔 외관상태의 내구성함수, 직접손실비용 함수와 간접손실비용 함수등을 종합적으로 분석 판단하여 결정되어야 한다.
- 4) 지금까지 개발된 교량유지관리시스템은 교량구조물에 대한 내구성평가, 보수비용예측, 잔여수명예측 등을 적용하지 못한 단점이 있는데, 본 연구에서 개발한 보수·보강전과 후의 내구성평가에 의한 보수비용예측 및 잔여수명예측모델을 이용하므로써 단점을 보완할 수 있기 때문에 교량유지관리에 필요한 개축 및 보수·보강을 위한 우선순위 결정에 실용적으로 활용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. 이증빈·신형우·장석모, "총기대비용 최소화원칙에 의한 최적신뢰성지수," 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제6권 제2집, 1993, pp.216-223.

2. 이증빈 · 나기현 · 손용우 · 박주원., "손상교량구조물의 총기대비용에 기초한 최적설계", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제5권 2호, 2001, pp.83-90.
3. 이증빈 · 손용우., "교량구조물의 건전도감시시스템 모델 개발," 대한토목학회 학술발표회, 2001.10.
4. 이증빈 · 나기현., "인공지능기술을 이용한 교량구조물의 손상검출," 대한토목학회 학술발표회, 2001.10.
5. 건설교통부., "97 교량관리체제(B.M.S)개선에 관한 연구," 1998.10.
6. 한국도로공사., "교량유지관리 시스템의 개발 및 운용," 1999.
7. 조효남 · 임종권 · 심성택., "기대생애주기비용의 최소화 에 의한 교량의 최적내진신뢰성," 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 2-A호, 2001.3, pp.295-306.
8. Hines, J., "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering," WILEY INTER · SCIENCE, 1997.
9. Chou, T., "Optimum Safety Indices Based on Expected Total Cost Minimization," Journal of Structural Engineering (in Japanese), VOL, 37A, 1991, pp.543-555.
10. Frangopol, D.M., Lin, K-Y., and Estes, A.C., "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures," Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No.10, October, 1997, pp. 1390~1401.
11. Miyamoto, A., Kushida, M., Adachi, Y., and Matsumoto, M., "Development of Bridge Management System(BMS)," Journal of Structural Engineering (in Japanese), VI-34, No. 560, 1997.3, pp.91-106.
12. 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), VI-38, No.588, 1998.3, pp.191-208.

(접수일자 : 2002년 8월 22일)