

공동주택의 시간의존적 설계VE 및 LCC분석 모델

A Model of Time Dependent Design Value Engineering and Life Cycle Cost Analysis for Apartment Buildings

서 광 준* · 최 미 라** · 신 남 수***

Seo, Kwang-Jun · Choi, Mi-Ra · Shin, Nam-Soo

요 약

최근에 공동주택 건설사업을 위한 가치공학 및 생애주기비용(LCC)분석의 중요성이 대두됨에 따라, 대형 건축물의 건설사업에서 가치공학 및 생애주기분석을 위한 이론적 모델, 표준지침 및 소프트웨어 등이 개발되어지고 있다. 그러나 현재까지도 실질적인 과거 보수이력데이터의 부재로 인한 VE 및 LCC분석 결과에 대한 신뢰수준이 미흡하다. 본 연구에서는 공동주택의 건설사업에 대한 합리적인 투자의사결정과 설계대안선정을 위한 시간의존적 LCC분석에 의한 가치분석 방법론을 제시하였다. 제안된 방법론은 과거이력데이터의 불확실성과 분석대안의 가치분석을 보다 합리적으로 고려하기위한 시간의존적 생애주기비용 모델과 퍼지로직에 의한 성능평가방법과의 상관관계를 규명하였다. 또한, 제시된 시간의존적 생애주기비용 모델과 가치분석 절차의 타당성을 검토하기 위하여 실제대상사업에 적용하였다. 본 연구에서 제안된 방법론은 공동주택 건설사업에서의 설계대안 선정, 생애주기비용 평가 및 합리적인 예산의 분배 등에 크게 기여할 것으로 기대된다.

키워드: 시간의존적 VE 및 LCC, 퍼지로직이론, 성능평가, 가치공학(VE), 생애주기비용(LCC)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

공동주택의 VE 및 LCC분석은 구조물의 가치와 경제성분석 뿐만 아니라 공동주택의 물리적, 기능적 성능평가 기준항목을 파악하고 공동주택의 유지관리 작업의 개시, 공동주택상태에 대한 지속적인 기록의 제공, 보수보강 프로그램의 우선순위 결정 등의 기본항목을 포함한 안전성을 평가하기 위한 의사결정 도구로도 사용된다. 성공적인 최적 대안을 선정함에 있어서는 적절한 계획과 기법, 충분한 설문조사를 실시하는 전문가의 경험과 신뢰성에 의해 좌우된다. 그러나 공동주택의 최적대안을 정밀하게 평가분석하기위한 정보들은 일반적으로 불안정하며 많은 불확실성을 내포한다.

즉, 대안별 성능평가 기준항목이 언어데이터(Linguistic data)와 부정확한 정보, 선정상 나타나지 않은 문제점 등은 불확실성의 대표적인 예이다.

이처럼 공동주택의 VE 및 LCC를 분석 평가하는 것은 불확실성과 애매함이 내재되어 있는 복잡한 문제이며 전문가의 공학적, 경제적 판단이 중요한 역할을 하는 어려운 프로세스이다. 이러한 어려운 프로세스를 극복하기위해서는 시간경과에 따라 장래 발생할 공동주택의 교통량 증가에 대한 불확실성, 유지관리 조치에 따른 공동주택 구조체의 시간의존적 손상·열화현상의 애매성을 공동주택의 VE 및 LCC분석에 충분히 고려할 필요성이 절실히 요구되고 있다.

퍼지집합은 이와 같은 부정확한 데이터를 표현하는데 사용될 수 있으며 전문가의 지관을 표현하는데 적합하다. 그러나 퍼지 추론은 어떤 형태의 입력 자료에 대해 관련지식이 완전하지 않으므로 불합리한 결과를 초래하는 경우가 있어 퍼지 근사추론에 의한 결과를 개선하기위한 기법이 퍼지논리(Fuzzy Logic)이다.

퍼지로직에 신경망(Neural Network)이론을 도입하여 추론결과를 학습 및 수정함으로써 퍼지이론과 신경망간의 결합하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 퍼지신경망(Fuzzy Neural Network)이 애매하고 부정확한 표현에 사용된다.

따라서 본 연구에서는 계층적 분석과정을 이용하여 평가항목의 가중치를 추정함과 동시에 정성적이고 주관적으로 표현되는

* 일반회원, 전남대학교 대학원 박사과정, donglim99@hanmail.net

** 일반회원, 순천제일대학교 명예교수, 공학박사

*** 일반회원, 전남대학교 건축공학부 교수, 공학박사(교신저자), nsshin@chonnam.chonnam.ac.kr

공용기간내의 공동주택의 손상?결함상태요인들을 정량적이고 객관화 할 수 있는 수학적 방법인 퍼지 논리(Fuzzy Logic)이론에 기초하여 성능점수를 고려한 상태를 평가할 수 있는 방법을 검토하고, 시간 의존적 퍼지신뢰성 해석을 이용하여 공동주택의 가치지수 및 생애주기비용 분석 모델을 개발함에 있다.

1.2 연구 절차 및 방법

본 연구에서는 다음 그림 1과 같은 절차 및 방법에 따라 진행 한다.

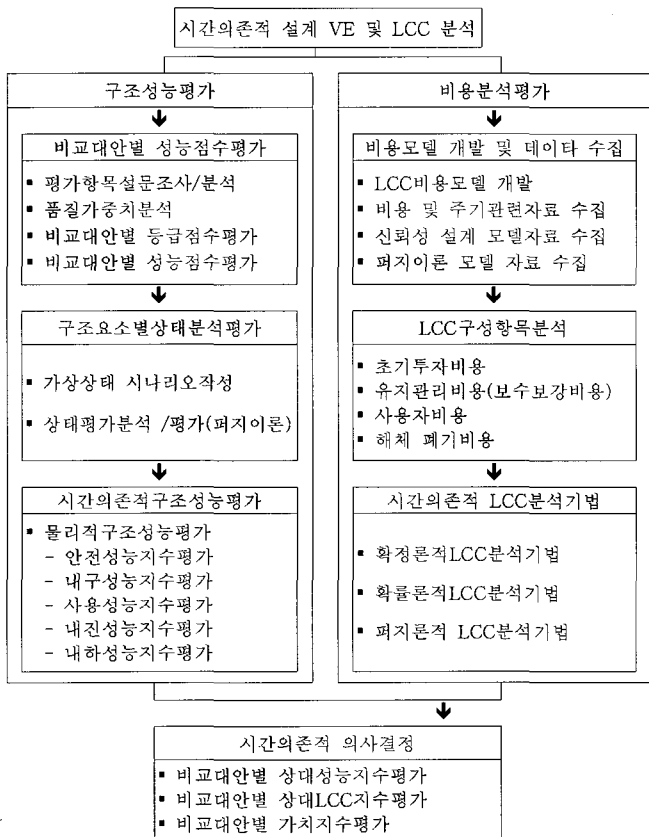


그림1 . 시간의존적 VE 및 LCC분석 의사결정방법론

2. VE 및 LCC분석을 위한 퍼지로직 시스템

2.1 퍼지로직 이론

일반적으로 시스템의 특성이 복잡하여 정량적으로 해석하기 어렵거나 정보가 정성적이고 부정확한 경우에는 퍼지로직 이론을 이용한다. 예를 들어 공동주택의 대안별 성능평가 시스템에 대한 전문가의 지식을 가지고 있으나 수학적 분석이 어려운 경우에는 퍼지이론을 이용한다. 퍼지로직은 입력자료를 퍼지화한 다음 퍼지추론을 통해 결과를 도출한 후 결과를 비퍼지화하여

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 식(1)과 같이 된다.

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'

$$R_p : \mu_p(y) = \text{Max}(\alpha_i \text{Min}\mu_{P_i}(y)) \equiv \text{Max}\{\mu_{A_i}(x_{o1})\text{Min}\mu_{B_i}(x_{o2})\dots\text{Min}\mu_{H_i}(x_{o8})\}\text{Min}\mu_{P_i}(y) \quad (2)$$

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, $\alpha_i = i$ 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 소속도함수 값, $x_{o1}, x_{o2}, x_{o8} =$ 시스템의 실제입력 값, $\text{Max} =$ 논리합(or 연산), $\text{Min} =$ 논리곱(and 연산), $R^i =$ 퍼지규칙의 번호

비퍼지화는 소속도함수로 표현되는 퍼지량을 크리스프 값으로 변환하는 것으로 여러 가지 방법 중에서 무게중심법이 가장 일반적으로 사용된다.

$$y = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_P(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^n \mu_P(y_j)} \quad (3)$$

여기서, $n =$ 전체출력의 분할정도, $y_j =$ 분할정도 j 에 따른 출력, $\mu_P(y_j) =$ 결론부 퍼지집합 P 에 대한 y_j 의 소속도함수

2.2 퍼지로직 제어시스템

전절 2.1의 퍼지논리 이론을 이용한 제어시스템의 식(1), (2), (3)는 작업자의 시스템에 대한 지식과 경험에 기초한 인간의 판단 등의 애매성을 포함하는 제어전문지식을 언어적 제어 규칙으

로 표현하고, 또 퍼지추론을 통해서 컴퓨터에 실행될 수 있도록 한 것이다. 그림 2에서와 같이 퍼지제어는 입력변수의 퍼지화(Fuzzification), 퍼지제어 규칙의 작성(Rule Base), 퍼지결정(Fuzzy Inference), 비퍼지화(Defuzzification)의 4가지 단계로 나누어진다.

첫 번째 단계는 명확한 값으로 측정된 입력변수 값을 적절한 퍼지 값으로 변환시키는 퍼지화 작업이다. 퍼지화 방법에는 싱글톤방법(Singleton method)과 이등변삼각형 방법(Isosceles tringle method)등이 많이 쓰이고 있고 있다.

두 번째와 세 번째 단계는 알고 있는 인과관계로부터 새로운 사실을 유도하여 퍼지제어 규칙의 작성과 결정하는 퍼지추론 단계이다. 퍼지추론에는 직접법, 간접법, 혼합법으로 크게 3가지의 분류가 있다.

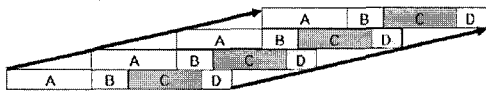


그림 2. 퍼지로지 제어 시스템

직접법은 기존의 자료를 이용하여 퍼지관계를 생성하고 이 퍼지관계와의 합성을 통해서 결과를 추론하는 방법이며, 간접법은 전문가에 의해 퍼지규칙이 생성되고 이 생성된 퍼지규칙과의 합성을 통해 결과를 추론하는 방법이다. 또한 혼합법은 직접법과 간접법을 혼합한 방법이다. 본 연구에서는 전문가의 지식을 통한 퍼지규칙의 생성이 어려워 기존의 성능평가 자료를 이용하여 퍼지관계를 계산하는 직접법을 사용하였으며, 이중 계산과정이 간단하여 추론시간이 빠른 Mamdani의 방법인 Max-Min방법을 사용하여 프로그램을 구성하였다.

네 번째 의사결정 단계는 비퍼지화 단계라고 불리는데, 이 비퍼지화는 퍼지추론의 결과로 생긴 퍼지집합을 응용시스템에 적용하기 위해 실수 값으로 전환하는 과정을 말한다. 비퍼지화 방법에는 최대치법,

최대치 평균법, 무게중심법 등이 있다. 대부분의 경우에 무게중심법을 많이 사용한다.

이와 같이 주관적이고 정성적인 정보를 객관적이고 정량화시키는 효율적인 방법으로서 퍼지집합론을 이용할 수 있다. 퍼지 이론은 인간의 모호한 표현을 처리할 수 있는 이론적 바탕을 제공하고 있으며, 이때 퍼지로지제어 시스템은 Matlab을 이용한 Fuzzy Logic Toolbox를 적용한다. 그 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 주관적 정보를 언어변수(Linguistic variable)로 표현해 객관화가 가능하다.
- 2) 복잡한 문제의 해결을 위해 어떤 사실을 단순화하는 과정

에서 가능한 한 정보의 손실을 최소화하는 방법으로 인간의 모호한 표현을 처리할 수 있다.

3) 모호한 표현의 처리는 불확실한 상태를 나타내는 표현에 내포된 의미를 미리 정의하고, 그 의미에 포함될 가능성을 갖는 원소의 집합을 퍼지집합(Fuzzy set)으로 표시할 수 있다.

따라서 기존 AHP에 의한 주관적이고 정성적인 가치평가를 위한 평가지표의 문제점을 개선하기 위하여 수학적 방법인 퍼지 이론을 이용하여 대안별 성능평가를 계량화하고 객관적으로 전개할 필요가 있다.

본 연구에서는 성능평가기준항목인 기초안정성, 시공성, 내구성, 구조안정성, 친환경성, 유지관리성, 경관조화성, 기능편의성의 8가지 항목에 대하여 각각을 10단계의 평가등급으로 구분하고 여기에 0.0~1.0의 실수 값을 평가수치로 부여하였다. 이와 같은 내용을 좀 더 상술하면, 평가등급 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J는 매우최상, 최상, 매우양호, 양호, 보통, 불량, 아주불량, 매우불량, 대단히 불량, 최대불량과 같은 언어변수를 취하고, 각 등급마다 퍼지가능성 분포(소속도함수 : membership function)를 항상(always), 자주(often), 일반적인(unspecified), 드물게(seldom), 전혀 없다(never) 등의 언어변수 값으로 각각 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0.0의 실수를 갖는 퍼지집합으로 정의하고 삼각형 퍼지숫자 형태를 사용하였다.

3. 공동주택의 생애주기비용분석 모델

3.1 생애주기비용(LCC)의 산정 방법

공동주택의 유지관리를 위한 생애주기비용(LCC)분석 및 절차는 여러 가지 방법이 있는데, 본 연구에서는 문헌·2)와 같이 초기비용(일상유지관리비용 및 폐기처분비용 포함), 구조체의 보수·보강비용 및 유지관리비용으로 구성하여 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하고, 시간가치를 고려한 확정론적 경제성분석 모델과 확률론적 경제성분석 모델은 각각 다음과 같이 된다.

1) 확정론적 방법

공동주택의 유지관리를 위한 생애주기비용(LCC)분석은 초기비용(일상유지관리비용 및 폐기처분비용포함), 구조체의 보수·보강비용 및 유지관리비용으로 구성하여 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하면 확정론적 경제성분석 모델은 다음과 같이 된다.

$$LCC = C_I + C_M + C_R \tag{4}$$

여기서, LCC = 생애주기비용, C_I = 초기건설비용, C_M = 일상

$$LCC = C_I + C_M + C_R \tag{4}$$

2) 확률론적 방법

식(4)은 확정론적 방법으로 공동주택의 설계나 유지관리계획에 위험도(파괴확률)를 고려하지 않은 경우이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성설계법의 하나인 총기대비용 최소화 원칙을 이용하면, 유지관리계획의 위험도(Risk)를 포함한 LCC계산식은 다음과 같이 정의된다.

$$LCC = C_I + C_M + C_R + C_F \tag{5a}$$

$$C_M = C_{INS} + C_{REP} + C_{OPP} \tag{5b}$$

$$C_F = C_{RISK} = C_f \cdot P_f \tag{5c}$$

$$P_f = \Phi(-\beta_o) \tag{5d}$$

여기서, C_F = 파괴손실비용, C_{INS} = 점검에 관한 비용, C_{REP} = 보수에 관한 비용, C_{OPP} = 유지관리비용, C_f = 파괴에 의해 생기는 최대손실비용, P_f = 파괴확률, C_{RISK} = 위험도에 관한 비용

한편, 식(5d)에서 파괴확률 P_f 를 구하기 위해서는 총기대비용 최소화의 원리를 이용한 신뢰성해석이 필요한데, 본 연구에서는 Kanda의 신뢰성해석 방법을 사용하였고, 이 신뢰성해석 방법은 문헌·2), 3), 4)에 상세하게 설명되어 있어 본 연구에서는 생략한다.

3.2 파괴손실기대비용의 현재가치 산정

본 논문에서 사용하는 대안별 바닥판의 열화예측에서는 파괴확률을 철근의 부식량 분포 및 항복강도의 감소량으로 부터 구한다. 계산의 간략화를 위해서 파괴확률의 경년변수는 2차함수로 가정하였다.

$$Y_f(t) = At^2 \tag{6}$$

여기서, t = 공용년수, $Y_f(t)$ = t 년의 파괴확률, A = 공용기간중의 최대파괴확률 시간적 가치를 고려한 파괴손실기대비용은 각 년도별 파괴확률의 증가분에 시간적 가치를 고려한 파괴손실비용을 곱하여 구할 수 있다. 이 때 파괴확률의 증가분은 다음과 같다.

$$\Delta y_f(t) = \frac{dY_f(t)}{dt} = 2At \tag{7}$$

여기서, $\Delta y_f(t)$ = 파괴확률의 증가분 그리고 파괴확률의 현

재가치는 시간 t 에 대한 발생비용에 순간이자율에 의한 시간 t 에 대한 현재계수를 곱하여 계산된다.

$$P_o = P(t) \cdot e^{-jt} \tag{8}$$

여기서, P_o = 현재가치, $P(t)$ = 시간 t 에 대한 발생비용, e^{-jt} = 순간이자율 j 에 의한 시간 t 에 대한 현재계수 따라서 시간 t 에 대한 발생비용 $P(t)$ 는 식(6)에 의해서 파괴손실비용 C_f 을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$P(t) = Y_f(t) \times C_f \tag{9}$$

따라서 시간 t 까지의 현재에 대한 총화, 즉 파괴손실기대비용 C_F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_F = \int_0^t y_f(t) \times (c_f \times e^{-jt}) dt \tag{10a}$$

$$= \int_0^t (2Ac_f) \times (te^{-jt}) dt \tag{10b}$$

4. 시간의존적 설계VE 및 생애주기비용 분석 모델

4.1 퍼지로지 기법을 활용한 VE평가 모델

전절 2의 퍼지로지 이론을 이용한 대상 공동주택의 성능평가 기준항목은 기초안전성, 시공성, 내구성, 구조안정성, 친환경성, 유지관리성, 경관조화성 및 기능편의성으로 분류하였고, 퍼지기법에 필요한 품질모델(가중치) 산정을 위하여 설계자가 대상사업 현황을 설명하며, 이에 의해 전문가 및 VE분석가가 설문조사를 수행한다. 수행된 설문조사 분석결과인 성능평가기준항목에 대한 중요도를 바탕으로 AHP기법을 사용하여 가중치를 산정한다. 따라서 전절 2.2의 퍼지로지 제어 시스템을 이용하면 대안별 퍼지 성능지수는 다음과 같은 식으로 산정할 수 있다.

$$QPI = \sum (DR \times RI) \tag{11}$$

여기서, =대안별 퍼지 성능지수, =품질모델가중치, =퍼지 성능등급 그리고 생애주기(Life Cycle : LC) 동안의 미래의 유지관리전략 및 조치에 필요한 대안별 퍼지 상태등급평가지수는 다음과 같이 된다.

$$COI = CO \times QPI \tag{12}$$

여기서, COI = 대안별 퍼지 상태등급평가지수, CO = 상태평가등급지수, QPI = 대안별 퍼지 성능지수

4.2 시간의존적 구조성능평가 분석 모델

AHP분석결과에 의한 대안별 품질모델 가중치, 성능점수를 대상공동주택의 구조성능분석에 반영하기 위해서 생애주기 동안의 시간에 따른 구조물의 물리적(외관손상, 결함 등)·환경적(염해, 중성화 등) 열화현상을 고려함과 동시에 신뢰성해석 개념을 도입한 대안별 VE 및 LCC 분석에 필수적으로 반영되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 대상 공동주택의 주요 부재인 바닥판(슬래브)을 선정하였고, 이에 대한 시간 의존적 구조성능평가를 수행하는 구조요소의 한계상태함수 방정식은 다음과 같이 된다.

$$g(t) = R_i - S_j \tag{13}$$

여기서, R_i = 각종 구조성능에 대한 구조저항, S_j = 각종 하중조합에 대한 하중효과

식(13)에서 각종 물리적 구조성능 평가는 내하성능, 안전성능, 내구성능, 사용성능, 내진성능 평가를 말하며, 환경적 손상열화는 품질성능점수를 고려한 외관상태평가 함수로 산정한 염해에 의한 열화현상을 사용하였다. 확정론적 구조성능평가는 건설교통부 관련 시방서의 확정변수를 사용하였고, 확률론적 구조성능평가는 문헌·2)의 총기대비용 최소화원칙을 이용한 신뢰성해석 방법으로 평가·분석하였으며, 퍼지론적 구조성능평가는 문헌·3)의 퍼지결함수분석기법을 이용하여 평가·분석하였다.

4.3 시간의존적 설계VE 및 LCC분석 모델

기존의 일반적인 설계VE 프로세스는 가치평가를 위한 평가지표가 일원화되지 못하여 분석수행자에 따라 분석결과 지표의 상이성을 나타내고 있다.

따라서 가치평가절차에서의 일관성 및 효율성을 확보하기 위해서는 시간의존적 구조성능평가를 고려한 모델이 필요하며 이에 따른 퍼지 신뢰성해석에 의한 대안별 시간의존적 상대성능지수는 다음과 같이 된다.

$$RPI(t)_i = RPI(t)_{oi} / RPI(t)_o \tag{14}$$

여기서, $RPI(t)_i$ = 공용년수에 따른 대안별 상대성능지수, $RPI(t)_{oi}$ = 대안별 성능지수, $RPI(t)_o$ = 원안의 성능지수

한편, 퍼지 신뢰성해석을 사용한 대안별 시간의존적 상대LCC지수는 다음과 같이 된다.

$$RCI(t)_i = RCI(t)_{oi} / RCI(t)_o \tag{15}$$

여기서, $RCI(t)_i$ = 공용년수에 따른 대안별 상대LCC지수, $RPI(t)_{oi}$ = 대안별 LCC지수, $RPI(t)_o$ = 원안의LCC지수,

따라서, 식(14)와 식(15)에 의해서 대안별 시간의존적 가치지수는 다음과 같이 된다.

$$VI(t)_i = RPI(t)_i / RCI(t)_i \tag{16}$$

여기서, $VI(t)_i$ = 공용년수에 따른 비교대안별 가치지수, $RPI(t)_i$ = 공용년수에 따른 대안별 상대성능지수, $RCI(t)_i$ = 공용년수에 따른 대안별 상대LCC지수

5. 적용 예 및 고찰

5.1 대안별 성능점수 및 상태평가지수 산정 결과

본 연구에서 제안된 공동주택의 VE 및 LCC분석의 타당성을 검토하기 위한 분석대상은 공동주택 구조 형식을 선정하여 유지관리조치(재건축, 리모델링)를 고려한 대안별, 즉 원안설계(재건축), 대안설계1(일반리모델링), 대안설계2(주호분할 리모델링), 대안설계3(주호통합 리모델링)으로 비교하였다.

본 대상사업의 특성을 고려하여 최적 공동주택형식을 선정하기 위한 성능평가기준항목은 시공성, 내구성, 구조안정성, 기초안정성, 친환경성, 유지관리성, 경관조화성 및 기능편의성의 8 가지 항목으로 분류하고, 각 성능평가항목에 대한 대안별 등급점수의 산정은 우선 설계자가 전문가 7인 및 VA분석자 4인 등 총 11인을 대상으로 하여 설계현황을 설명하고 이에 전문가 및 VA분석자는 각기 대안들에 대한 장·단점분석을 통하여 등급점수를 부여하였다.

표1. 각 성능평가기준항목에 대한 대안별 성능점수 및 상태평가지수 결과 비교

구분	원안설계	대안설계1	대안설계2	대안설계3
기초안정성	9	8	8	8
시공성	8	9	8	8
내구성	8	8	8	8
구조안정성	8	9	9	8
친환경성	8	8	8	8
유지관리성	9	9	10	9
경관조화성	8	10	8	10
기능편의성	8	9	8	9
성능점수	81.4	89.99	83.58	84.33
상태지수	0.625	0.500	0.593	0.582
상대성능지수	1.00	1.10549	1.02678	1.03594
상대상태지수	1.00	0.80	0.9492	0.9349

*상태지수는 미래의 외관상태 C등급, 즉 C등급상태의 보수공법을 적용함

따라서 본 연구에서 개발한 퍼지모작 AHP분석 의사결정방법의 절차에 따라 대안별 성능점수 및 상태평가지수를 수행하여 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1에서와 같이 대안설계1의 성능점수가 89.99로 가장 높게 분석되었으며, 성능향상지수가 10.5%로 분석되었다.

또한 본 연구에서는 미래의 유지관리전략을 세우기 위하여 성능점수에 의한 외관상태 C등급(보수상태)의 상태평가지수를 분석한 결과, 대안설계1의 상태평가점수가 0.50으로 가장 낮게 분석되었으며, 이는 생애주기 동안에 유지관리비용이 가장 경제적인을 의미한다.

그리고 대안별 상대성능점수 및 상대상태지수 또한 대안설계1 ⇨ 대안설계3 ⇨ 대안설계2 ⇨ 원안설계 순위로 대안설계안이 원안설계안 보다 성능과 상태 면에서 우위를 보이고 있다.

5.2 대안별 VE 및 LCC분석 결과 비교

LCC분석을 위한 기본적인 데이터인 비교 대안별 유지관리 물량은 문헌·1)의 개략 설계된 대안에 대하여 물량을 산출하여 분석하였으며, 단위초기비용, 단위유지관리비용 및 각종 유지전략 데이터는 건설교통부의 연구 자료의 데이터를 활용하였다.

이때 건축면적은 19,550로 생애주기비용을 계산하였다. 이전 절에서 언급된 공동주택의 LCC분석 모델에 따라 퍼지론적 LCC 분석을 수행하였으며, 수행된 퍼지론적 LCC분석의 결과 값을 표 2와 그림 4에 나타내었다.

표 2. 대안별 VE 및 LCC분석 결과 비교 (단위 : 억원)

구분	본 연구방법				기존 AHP의 방법			
	원안 설계	대안 설계1	대안 설계2	대안 설계3	원안 설계	대안 설계1	대안 설계2	대안 설계3
초기비용	81.0	80.4	80.7	74.7	81.0	80.4	80.7	74.7
유지관리비용	307.4	301.7	302.8	303.5	307.4	301.7	302.8	303.5
생애주기비용	388.4	382.1	383.5	378.2	388.4	382.1	383.5	378.2
상대구조성능지수	1.00	1.0639	1.0163	1.0218	-	-	-	-
상대LCC지수	1.0269	1.0103	1.0142	1.00	-	-	-	-
상대가치지수	0.9737	1.0531	1.0022	1.0218	-	-	-	-
상대VE지수(1)	0.9737	1.0945	1.0126	1.0359	0.9708	1.0943	0.9995	1.0281

그림 4에서 알 수 있듯이, 대안1의 시간 의존적 잔존가치가 가장 높은 값으로 나타났으며, 시간 의존적 LCC는 원안의 총 LCC가 가장 비경제적인 대안임을 입증하고 있다.

따라서 본 연구에서 개발한 시간 의존적 잔존가치 및 총 LCC 분석을 통하여 관리주체가 구조물의 대안선정 및 유지관리전략에 보다 과학적이고 합리적인 선택을 할 수 있다고 판단된다.

또한 표 2의 분석결과에서 생애주기비용 및 상대LCC지수가 대안설계3 ⇨ 대안설계1 ⇨ 대안설계2 ⇨ 원안설계 순위로 대안설계안이 378.2억 원으로 가장 경제적인 대안으로 분석되었다.

그리고 상대가치지수는 대안설계1 ⇨ 대안설계3 ⇨ 대안설계2 ⇨ 원안설계 순위로 대안설계안이 원안설계안 보다 가치측면에서 우위를 보이고 있다.

이때 LCC 대안별 구조체 바닥판의 상대구조성능지수를 비교 분석하기 위하여 휨 저항강도 식을 사용하였으며, 표 2의 상대가치지수는 상대구조성능지수/상대LCC지수로 산정하였다.

상대VE지수(1)=상대성능점수/상대LCC지수로 산정한 값이다. 문헌(1)의 가치향상지수는 원설계안 대비 대안설계1안=(1.0943-0.9708)/0.9708=12.7%, 대안설계3안이 5.9%, 대안설계2안이 2.9% 향상된 것으로 분석되었고, 반면에 본 연구의 가치지수는 원설계안 대비 대안설계1안=(1.0945-0.9737)/0.9737=12.4%, 대안설계3안이 6.4%, 대안설계2안이 3.99% 향상된 것으로 분석되었다.

5.3 대상 구조체 바닥판의 대안별 생애주기비용 산정 결과

대상 구조체 바닥판에 대한 생애주기프로파일(Life Cycle Profile : LCP)의 향상등급은 A등급(원상태)으로 향상된다고 가정하고, 생애주기 80년 동안의 유지관리 조치횟수는 3번의 조치를 시행한 경우로 대안별 LCC분석을 수행한 결과는 표 3과 같다.

표 3. 대상 구조체 바닥판의 대안별 생애주기비용(LCC) 분석결과 비교 (단위:천원/㎡)

구분	할인비용(원안설계인 경우)		불변비용			
	점검·진단비용 고려한 경우	점검·진단비용 고려하지 않은 경우	원안 설계	대안 설계1	대안 설계2	대안 설계3
유지관리비용	200.69	75.07	243.83	195.07	231.49	227.26
사용자비용	625.99	625.99	2,096.97	1,677.57	1,990.76	1,954.37
생애주기비용	2,219.68	2,094.06	3,733.80	3,265.64	3,615.25	3,574.63

*초기비용=1,393, 할인비용 시의 사용자비용은 총파괴손실기대비용=2,033.44로 산정함

표 3에 의하면 예방유지관리수준으로 관리되는 경우에 80년 동안의 예방 생애주기비용(LCC)은 불변비용으로는 3,733.8, 할인비용으로는 2,219.68천원원으로 예측되었다.

이러한 예방 LCC를 구성하는 비용들을 각 항목별로 살펴보면, 불변비용의 경우 사용자비용이 2,096.97/3,733.80=56.16%인 반면에 할인비용의 경우 사용자비용이 625.99 / 2,094.06 = 29.89%를 차지하고 있다.

그러나 할인비용의 경우에는 초기비용이 차지하는 비율이 전체의 1,393/2,094.06=66.52%(점검·진단비용 고려), 1,393/2,219.68=62.75%(점검·진단비용 비고려)로 가장 높은 것으로 나타났다.

이는 예방유지관리수준의 관리로 인해 구조물 가설 후 27년이 지난 시점부터 3번의 보수유지관리 조치를 취함으로써 해체·폐기 및 개축시의 사용자비용이 감소하였기 때문이다.

또한, 불변비용인 경우 대상 바닥판의 대안별 단위면적당 LCC는 대안설계1안이 3,265.64으로 가장 경제적인 대안이고, 대안설계1 → 대안설계2 → 원안설계 순위로 표 2의 생애주기비용(LCC)분석 결과의 순위와 같음을 알 수 있다. 이는 성능점수를 고려한 상태평가등급에 따른 구조성능지수를 사용하여 퍼지 로직 의사결정방법에 의해 생애주기비용을 분석하였기 때문이다.

초기투자비용의 발생 이후 생애주기 동안 3번의 유지보수비용을 누적하여 누적 예방LCC비용을 도식화하면 그림 3과 같다. 그림3을 살펴보면 불변비용 및 할인비용 모두 초기투자비용 발생 이후 유지관리비용+사용자비용(파괴비용)을 고려한 누적 LCC비용이 유지관리비용만을 고려한 누적LCC비용 보다 생애 주기 동안 큰 폭으로 되는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 2차식에 의한 누적LCC도 유지관리비용+사용자비용(파괴비용)을 고려한 매년의 누적LCC비용이 유지관리비용만 고려한 매년의 누적LCC비용 보다 급격히 증가함을 나타내고 있다.

그리고 대상 구조체 바닥판에 대한 대안별 누적생애주기비용(LCC)은 가치지수의 순위와 마찬가지로 초기투자비용 이후 대안설계1안 → 대안설계3안 → 대안설계2안 → 원안설계안 순위로 분석되었다. 이 때 할인비용 시의 총파괴손실기대비용(2,033.44)은 식(5d)의 = 파괴손실비용과 초기비용과의 비=130으로 산정한 값이다. 총파괴손실기대비용은 인적 또는 사회적 손실비용, 지역경제손실비용 등의 잠재적인 간접비용으로써 품셈으로 계산하기가 매우 곤란한 비용이기 때문에 총기대비용 최소화원칙에 의한 신뢰성해석을 현실화하기 위해서는 식(5d)의 총파괴손실기대비용을 초기투자비용의 정수배로 취급하는 연구가 선행되어야 한다.

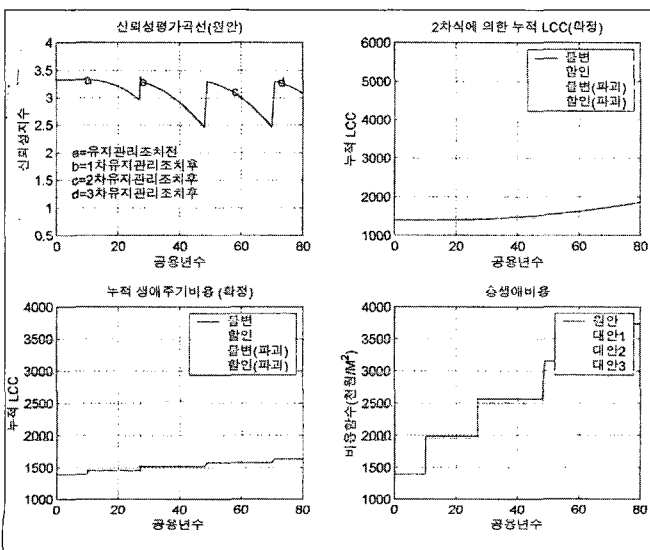


그림 3. 대안별 신뢰성프로파일 및 누적 생애주기비용(LCC)분석

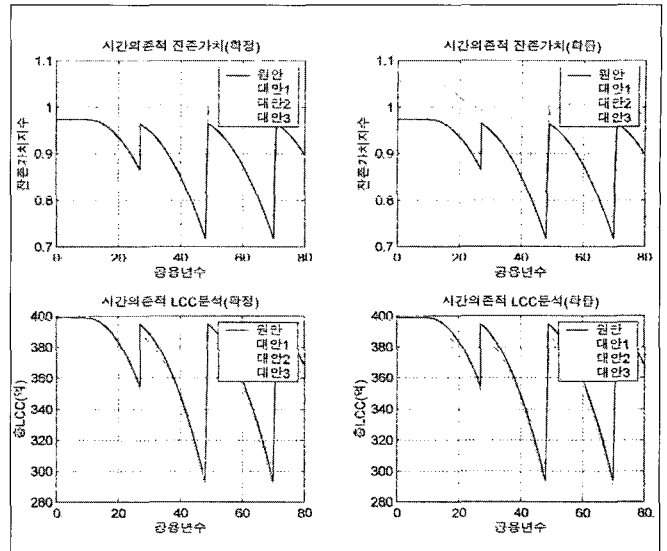


그림 4. 시간의존적 의존가치 및 생애주기비용(LCC)분석

5.4 대상 구조체 바닥판의 대안별 구조신뢰성 및 유지관리조치 선정 결과

본 연구의 전절 4.2 에서 언급되었던, 정성적 및 정량적 불확실량의 평가결과를 바탕으로 최적설계안을 선정하기 위하여 대안별 바닥판의 휨 한계상태함수에 대해 총기대비용 최소화원칙 기법을 사용하여 퍼지 신뢰성해석을 수행한 결과, 각각의 대안 설계별 구조신뢰성 및 유지관리조치의 분석결과 값이 원안설계의 값보다 높게 나타남을 표 4에 정리하였다.

표 4에서 보는 바와 같이, 대상 바닥판에 대한 대안설계1안의 각종 결과분석 값이 가장 높게 분석되었으며, 그림 3에서와 같이 퍼지 신뢰성해석에 의한 시간의존적 가치 및 LCC분석 평가를 수행한 결과에서도 대안설계1안의 가치와 LCC분석이 최적 대안임을 입증하고 있다.

표 4. 각 성능평가기준항목에 대한 대안별 성능점수 및 상태평가지수 결과 비교

구분	대상 구조체 바닥판의 대안별 결과분석			
	원안설계	대안설계1	대안설계2	대안설계3
보수·보강전의 잔여수명(년)	5.17	8.29	5.86	6.11
보수·보강후의 잔여수명(년)	27.08	29.71	27.69	27.88
잔여수명의 증가분(년)	21.91	21.42	21.80	21.76
보유성능지수	0.7515	0.7995	0.7636	0.7678
손상 신뢰성지수	2.2732	2.5035	2.3330	2.3532
손상 파괴확률	0.0115	0.0061	0.0098	0.0093
보유신뢰성함수	0.7183	0.7658	0.7300	0.73411
차보수시기(년)	27.08	29.71	27.69	27.882
차보수시기(년)	49.00	51.13	49.47	49.643
차보수시기(년)	70.91	72.55	71.27	71.41

*본래의 신뢰성지수 = 3.3343

참고문헌

따라서 문헌·1)의 방법은 단순히 전문가의 설문조사에 의한 AHP분석결과와 성능평가를 수행하여 대안별 가치점수로 가치 및 LCC을 비교 분석하고 있기 때문에 생애주기 동안에 발생하는 외관상태와 구조성능에 대한 유지관리전략 및 유지관리조치 수준을 전혀 세울 수 없어 미래에 발생할 유지보수관리비용과 사용자비용을 미리 예측할 수 없는 단점이 있다.

그러나 본 연구의 퍼지로지과 총기대비용 최소화 기법에 의한 신뢰성해석으로 분석한 VE 및 LCC은 성능점수를 고려한 상태 평가등급을 미리 예측함으로써 대안별 구조신뢰성 및 유지관리 조치를 예방유지관리수준으로 비교 분석할 수 있는 장점이 있고, 대상공동주택의 관리주체가 시간의존적 가치 및 생애주기비용을 분석할 수 있기 때문에 보다 실용적이고 합리적인 방법이라고 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 공동주택의 건설사업에 있어 합리적인 투자의 사결정과 설계대안 선정을 위한 퍼지론적 LCC분석 및 구조성능 평가에 의한 시간의존적 가치분석 방법론을 제시하였다.

특히 가치분석을 보다 합리적으로 고려하기 위한 시간의존적 VE 및 LCC모델과 구조성능평가기법과의 상관관계를 규명하기 위한 각종 비용분류구조 및 기초 데이터를 제시하였다. 본 연구에서 제안한 분석 프로세스와 순서도에 따라 진행된 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구결과를 통한 공동주택의 시간의존적 설계VE 및 LCC 분석은 가치지향적인 설계대안의 선정, 생애주기비용의 평가 및 합리적 예방유지관리를 위한 예산의 분배 등에 크게 기여할 것으로 기대된다.

2) 대상 공동주택의 관리주체가 공용수명에 따른 예방차원의 유지관리조치 및 유지관리주기를 고려한 유지관리전략을 세우는데 활용될 수 있다.

3) 본 연구에서 개발한 방법은 공항, 공연·집회시설, 관람장, 전시시설, 공용청사 및 공동주택 등의 공공건설공사 100억 이상으로 확대되는 VE검토 및 LCC분석·검토에 활용가능 할 것으로 사료된다.

1. 김의식, 표지명, 안민재, “공동주택 리모델링의 수익모델 개발과 타당성 분석 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 제4호, 2004, 10. pp 257-264.
2. 최미라, 이증빈, 박주원, 강형구, 손용우, “콘크리트구조물의 시간의존적 설계VE 및 LCC분석 모델”, 한국구조물진단학회 가을학술발표논문집, 제9권 제1호, 2005, 5. pp 129-137.
3. 김종길·손용우·이증빈·안영기, “교량구조물의 유지관리를 위한 신뢰성해석 모델??”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 제3호, 2004, 7. pp 251-261.
4. 김종길·손용우·이증빈·이채규·안영기, “교량구조시스템의 유지관리를 위한 퍼지신뢰성해석 모델”, 한국구조물진단학회 가을학술발표논문집, 제7권 제2호, 2003, 11. pp 41-52.
5. 건설교통부., “LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구,” 2001. 2.
6. Hines, J., “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering,” WILEY INTER·SCIENCE, 1997
7. Frangopol, D.M., Kong, J.S., “Prediction of Reliability and Cost Profiles of Deteriorating Bridges under Time- and Performance-Controlled Maintenance,” Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No.12, December, 2004, pp. 1865~1874.

논문제출일: 2005.10.01
 심사완료일: 2005.11.08

Abstract

In the recent years, the importance of VE (value engineering) and LCC (life cycle cost) analysis for apartment building construction projects has been fully recognized. Accordingly theoretical models, guidelines, and supporting software systems were developed for the value engineering and life cycle cost analysis for construction management including large building systems. However, the level of consensus on VE and LCC analysis results is still low due to the lack of reliable data on maintenance. This paper presents time dependent LCC model based value analysis method for rational investment decision making and design alternative selection for construction of apartment building. The proposed method incorporates a time dependent LCC model and a performance evaluation technique by fuzzy logic theory to properly handle the uncertainties associated with statistics data and to analyze the value of alternatives more rationally. The presented time dependent VE and LCC analysis procedure were applied to a real world project, and this case study is discussed in the paper. The model and the procedure presented in this study can greatly contribute to design value engineering alternative selection, the estimation of the life cycle cost, and the allocation of budget for apartment building construction projects.

Keywords : Time Dependent VE & LCC, Fuzzy Logic Theory, Performance Evaluation, Value Engineering(VE), Life Cycle Cost(LCC).
