

Fuzzy-AHP와 Fuzzy-Delphi기법을 이용한 건설프로젝트의 의사결정 모델에 관한 연구

A Study on the Decision Making Model for Construction Projects using Fuzzy-AHP and Fuzzy-Delph

이동운* · 김영수**

Lee, Dong-Un · Kim, Yeong-Su

Abstract

This research suggests the FD-AHP decision making model for Construction Projects which is composed of two main method to prevent a ranking invert situation ; First, to make the consensus of the experts consistent, we utilize Fuzzy-Delphi method to adjust the fuzzy rating of every expert to achive the consensus condition with the fuzzy linguistic presentation. Second, to handle vague linguistic presentation caused by expert' s experiences and subjective judgement, we propose Fuzzy-AHP which is able to enhance precision of construction projects decision making situation. Moreover, with the correlation analysis, we show that the validity of the FD-AHP model under a decision making task specially on where highly demanded expert' s experiences and intuition.

키워드 : 순위역전현상, 퍼지계층분석기법, 퍼지델파이기법, 퍼지언어표현, 상관성분석, 의사결정.

KeyWord : Ranking Invert Situation, Fuzzy-AHP, Fuzzy-Delphi, Fuzzy Linguistic Presentation, Correlation Analysis, Decision Making.

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 건설프로젝트가 날로 대형화, 전문화, 고도화되어 가는 추세와 더불어 건설프로젝트 기획단계에서 발생하는 문제의 성격도 복잡화, 불확실화되어 가고 있다. 이러한 문제의 합리적인 해결을 위해서는 주어진 여건과 상황에 따라 체계적인 의사결정분석이 선행되어야 한다.²⁾

일반적으로 건설프로젝트에 있어서 주관적 판단과 경험에 근거한 의사결정은 간편하게 적용할 수 있는 장점은 있지만 정형화 및 수치화 될 수 없는 이유로 많은 편견과 오류를 내포하고 있다. 이러한 점 때문에 전문가의 경험과 직관적 판단을 보다 객관적으로 의사결정에 반영하기 위한 수단으로서 Saaty의 AHP(Analysis Hierarchy Process ; 계층적 의사결정 분석)기법이 널리 사용되어왔다. 하지만 기존의 AHP기법은 요소들간의 상관성이 높은 건설프로젝트에서는 부적합하고, 전문가들의 모호한 언어표현을 하나의 정확한 수치로 표현할 수 없는 한계

점을 가지고 있다. 이와 같은 문제는 건설프로젝트의 대안평가, 성능평가, 리스크평가 등과 같은 의사결정상황에서 가중치산정시 우선순위 역전현상을 유발함으로써^{4),5)} 프로젝트에 전반적인 타당성을 저해할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 의사결정에 있어서 정량적 인자와 정성적 인자를 종합적으로 고려하고, 대안평가에 따른 언어적 판단정도를 퍼지집합으로 대응시켜 해석하고자 한다. 이를 위해 Fuzzy-AHP기법과 Fuzzy-Delphi기법을 통합한 새로운 의사결정모델인 FD-AHP(Fuzzy Delphi-AHP)기법을 제시하고, 사례적용을 통한 객관적인 검증을 연구의 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위와 방법

본 연구는 건설프로젝트 수행시 직면하는 다양한 의사결정상황에서 필수적인 관련분야 전문가들의 경험적 · 직관적 능력과 주관적 가치판단 등의 평가인자들을 의사결정에 보다 유연한 방식으로 반영하기 위한 모델의 개발을 중심으로 연구를 수행하였다. 이를 위해 Fuzzy-AHP기법과 Fuzzy-Delphi기법을 통합하여 기존 의사결정방법들의 개선방안을 제시하고, 건물벽체 선정시스템에 적용하여 모델의 타당성을 검토하는 것으로 연구의 범위를 한정하였다. 본 연구의 수행절차는 다음과 같다.

* 종신회원, 부산대 대학원 박사과정 수료

** 일반회원, 부산대 건축공학과 교수, 공학박사

1) 의사결정을 위한 AHP기법의 문제점을 파악하고, 신뢰성 있는 의사결정을 위한 Fuzzy-AHP기법과 Fuzzy-Delphi기법의 필요성과 이론적 배경을 고찰한다.

2) 퍼지집합론의 이론적 특성을 이용하여 의사결정의 신뢰성을 개선시킬 수 있는 새로운 의사결정 모델인 FD-AHP기법을 구축한다.

3) 모델의 유효성을 확인하기 위하여 가중치에 따른 우선순위의 변화를 기존의 AHP기법과 비교분석 및 평가한다.

4) AHP기법과 FD-AHP기법의 각각의 상관계수를 이용하여 상관성 분석에 따른 우선순위의 변화를 검토한다.

2. 예비적 고찰

2.1 AHP기법

Saaty에 의해 제안된 AHP기법은 각 대안의 중요도를 산출하는 방법으로서 다수의 목표, 평가기준, 의사결정 주체가 포함되어 있는 의사결정문제를 계층화하여 해결하는데 적합하다. 즉 주어진 의사결정문제를 계층화한 후, 상위 계층에 있는 한 요소(또는 기준)의 관점에서 하위계층에 있는 요소들의 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 상대적 중요도 또는 가중치를 구함으로써 최하위 계층에 있는 대안의 우선순위(Priority)를 구하는 것이다. 특히 AHP는 정량적인 요소뿐만 아니라 정성적인 요소까지 고려할 수 있고, 평가의 일관성을 추론할 수 있는 것이 장점이다.¹⁰⁾ AHP의 일반적인 수행절차는 다음과 같은 4단계 과정을 거쳐 수행된다.

1) 의사 결정 문제의 의사결정 요소들간의 관계를 분석하여 그림 1과 같이 계층구조(Hierarchy Structure)화한다. 이는 주어진 문제를 상호 관련된 의사결정속성별로 계층화하여 문제를 분해하는 과정으로 문제의 복잡성을 체계화하여 문제해결에 유연성을 주게 된다. 그러나 이러한 계층 구조를 형성하기 위해서는 요소들간의 종속관계를 규명해야 하는 문제점이 있다.¹⁾

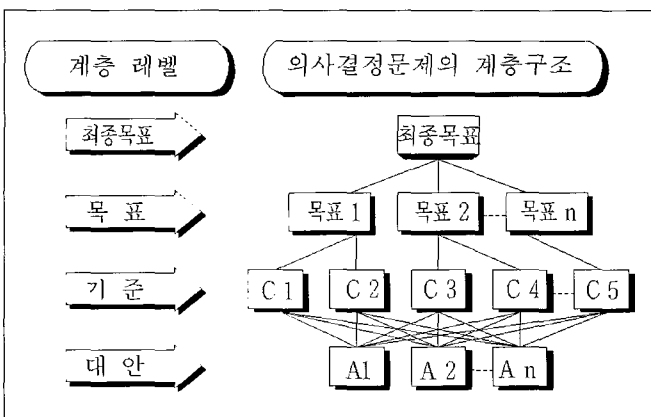


그림 1. 의사결정문제의 계층구조화 모델

2) 계층구조가 설정되면 의사결정자는 동일계층(Level) 요소들의 쌍대비교를 실시한 후 표 1과 같은 매트릭스를 구한다. 이 단계는 특정 계층내에 있는 요소들의 중요도에 대한 의사결정자의 선호도를 평가하는 단계이다. 상대적 중요도의 평가를 위해서는 표 2와 같은 의미척도(Semantic Scale)를 사용한다.

	a1	a2	a3	...	an
a1	1	a1/a2	a1/a3	...	a1/an
a2	a2/a1	1	a2/a3	...	a2/an
a3	a3/a1	a3/a2	1	...	a3/an
.
.
.
an	an/a1	an/a2	an/a3	...	1

표 1. 쌍대비교 매트릭스

쌍대비교 행렬은 임의의 두 요소간의 우월성을 나타내는 정방행렬로서 대각선의 원소값은 모두 1이고 나머지는 상호대칭으로 역수관계에 있다. 작성된 쌍대비교 행렬로부터 요소들의 상대적 가중치와 최대 아이젠값(λ_{max})을 구한다.

표 2. Saaty의 9점 평가스케일

척도	정의	설명
1	동일하다. (equal importance)	두 가지 요소가 상위목표의 기준에서 볼 때 똑같이 중요
3	약간 중요 (slight importance)	한 요소가 다른 요소에 비해 약간 중요
5	중요 (strong importance)	한 요소가 다른 요소에 비해 훨씬 중요
7	매우 중요 (demonstrated importance)	한 요소의 우위성이 실증되고 있음
9	절대적 중요 (absolute importance)	한 요소의 우위성이 절대적으로 있음
2, 4, 6, 8	각 척도들의 사이값	위에서 정의된 척도들 사이의 값이 요구될 때

3) 각 계층별로 얻어진 요소들의 중요도를 조합하여 각 대안의 우선순위를 파악하여 최적의 대안을 결정한다.

4) Saaty는 의사결정자의 논리적 일관성을 검증하기 위해 쌍대비교의 신뢰도에 대한 지수를 제시하였는데 이것을 일관성비율(Consistency Ratio:CR)이라고 하며 계산방법은 식(1)과 같다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} \cdot \frac{1}{RI} \quad (1)$$

(단, CR : 일관성 비율
 RI : 확률 지수
 CI : 일관성 지수
 N : 행렬의 크기
 λ_{max} : 최대 Eigen Value)

일관성비율은 일관성지수(Consistency Index : CI)를 행렬의 크기 N에 해당하는 확률지수(Random Index : RI)로 나눈 값이며 여기에서 일관성지수는 $(\lambda_{max}-N)/(N-1)$ 로 계산되어진다. 일관성이 완벽할 경우 일관성비율은 0에 가까워지지만 일관성비율이 0.1이상인 경우에는 그 판단을 다시 하거나 수정해야 한다.

표 3. 행렬의 크기에 따른 확률지수

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.9	0.1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.2 Delphi기법

Delphi기법은 전문가간의 각각의 의견을 취합하여 해당 프로젝트와 유사한 프로젝트에 관한 경험이 있는 전문가들에게서 필요한 데이터를 얻는 기법이다. Delphi기법은 정보의 반복적 Feedback을 통해 전문가들로부터 얻어질 수 있는 잘못된 정보의 영향을 줄일 수 있으며, 전문가의 독립적인 사고를 가능하게 하여 객관적인 의견분포 형성이 가능하도록 해준다.^{2),7)}

그러나 Delphi기법은 전문가의 경험적인 요소들이 가지는 애매모호함을 수치적으로 수용할 수 있는 언어적변수(Linguistic Variables)의 적용이 용이하지 못하다. 특히 건설프로젝트와 같이 장기적인 평가문제에 있어 관련된 정보를 전문가들의 개인적인 능력에 기초하여 도출하므로 주관적이고 신뢰성이 떨어지게 된다.⁷⁾ 따라서 전문가별 언어적 표현을 수학적으로 타당성 있게 적용할 수 있는 Fuzzy -Delphi기법이 사용되어야 할 것이다.

2.3 Fuzzy AHP기법

기존의 AHP기법은 불분명한 선택의 문제에 있어서 문제를 계층적으로 분석하여 정성적인 특성들을 정량적인 판단기준에 따라서 객관적으로 평가할 수 있다. 이를 위해 AHP기법에서는 앞의 표 2와 같은 9점 평가스케일을 사용하는 것이 일반화되어 있다. 만약 9점보다 더 낮은 스케일을 사용하면 일관성비율이 좋아져 보다 정확한 논리적 평가가 가능하지만, 일반적인 9점 평가스케일만으로 다양한 상황의 의사결정에서 많은 대안들을 평가할 때 그 정확성이 떨어진다. 그리고 대안평가에 사용되는 데이터들은 주로 퍼지한 언어표현이 많아 기존의 AHP기법을 사용하는 데는 한계가 있다.^{3),6)} 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 삼각퍼지함수를 이용한 퍼지한 스케일을 제시하고, 대안평가에 따른 언어적 판단정도를 퍼지집합으로 대응시켜 해석하였다. 이를 위해 기존의 AHP기법에 퍼지집합론의 이론적 특성을 결합시킨 Fuzzy-AHP기법을 적용하였으며,

Fuzzy-AHP기법의 수행절차는 다음과 같다.

1) 동일계층 요소들의 쌍대비교를 실시하여 식(2)와 같은 퍼지쌍대비교 매트릭스 $A=(a_{ij}) n \times m$ 을 구한다. 쌍대비교는 퍼지한 사고를 반영하기 위하여 삼각퍼지함수를 이용하고, 퍼지평균법 식(3)에 의하여 객관화시킨다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} 1, 3, 5, 7, 9 & i < j \\ 1 & i = j \\ 1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9, \dots & i > j \end{cases}$$

$$Exp(T.F.N) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i, b_i, c_i) \quad (3)$$

(단, T.F.N : Triangular Fuzzy Number, 삼각퍼지함수)

2) 식(3)에 의해 구해진 퍼지 멤버십 함수의 평균값은 퍼지 확장원리(Extent Principle)를 사용하여 퍼지합성 확장값(Fuzzy Synthetic Extent Value)으로 계산된다. 퍼지합성 확장값은 주어진 정보에 대한 가능성 정도(Degree of Possibility)를 구하는데 적용되며, 퍼지삼각함수 $M1(a_1, b_1, c_1)$, $M2(a_2, b_2, c_2)$ 가 볼록 퍼지함수(Convex Fuzzy Number)일 때 가능성 정도는 다음 식(4)에 의해서 계산되어진다. 여기에서 $\mu M1(d)$ 는 그림 2와 같이 $\mu M1(x)$ 와 $\mu M2(x)$ 의 퍼지교집합의 최대값을 나타낸다.

$$V(M_2 \geq M_1) = 1 \quad \text{iff } b_1 \geq b_2$$

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_1}(d)$$

$$= \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)} \quad (4)$$

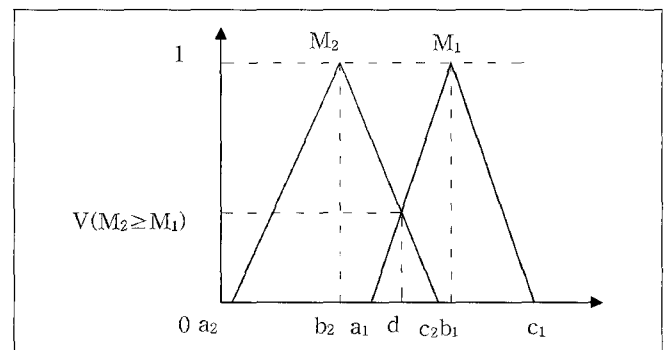


그림 2. 퍼지교집합의 최대값

3) 퍼지 확장원리에 의한 가능성정도는 식(5)에 의해서 쌍대 비교의 가중치 벡터로 주어지고 가중치의 합이 1이 되도록 정규화 시키면 최종 가중치를 구할 수 있다.

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_j) \quad \text{단 } j=1,2,3,\dots,n, j \neq i \quad (5)$$

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (6)$$

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (7)$$

4) 퍼지 AHP기법에서의 일관성 평가에 대해 Robert Csutora⁶)는 $\lambda_{max}-1 \leq 1$ 이면 합리적(Reasonable)인 평가라고 하였으며, AHP기법의 일관성 비율도 일관성 측정방법으로 많이 사용되어 지고 있다. 여기에서 일관성 비율을 결정하기 위해서는 비퍼지화(Defuzzification)하는 작업이 필요한 데 본 연구에서는 다양한 퍼지공간으로부터 하나의 명확한 기대치로 바꾸어 주는 도심 비퍼지화 방법을 사용하였다.

2.4 Fuzzy-Delphi기법

Kaufman과 Grupta⁷)에 의해 소개된 Fuzzy-Delphi기법은 퍼지이론의 사고방식을 기초로한 새로운 주관적 정보의 활용기법으로, 객관적 정보가 결여되어 있을 때 유사한 프로젝트의 경험을 가진 전문가 집단의 합의된 의견을 도출하는 방법이다.

Fuzzy-Delphi기법은 기존의 Delphi기법이 가진 전문가의 언어적표현의 난재를 보완하여 퍼지언어표현(Fuzzy Linguistic Presentation)을 사용한다. 또한 각 전문가별 표현값의 차이가 클 경우 기존의 Delphi기법은 오차를 줄일 수 있는 특별한 방법을 제시하고 있지 않으나 Fuzzy-Delphi기법의 경우 확장원리에 의해 근사적인 평균값을 구할 수 있다. Fuzzy-Delphi기법의 적용절차는 그림 3과 같다.

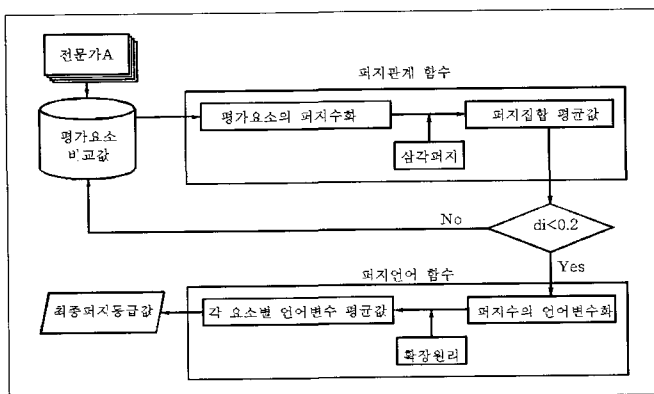


그림 3. Fuzzy-Delphi 적용절차

1) 전문가들로부터 해당 프로젝트의 평가요소에 대한 값들을 도출하여 퍼지 수로 표현한다. 퍼지함수는 다음 그림 4와 같이 다양한 형태의 퍼지수로 나타낼 수 있으며 일반적으로 사다리꼴 퍼지수와 삼각 퍼지수가 적용되어진다. 본 연구에서는 변수들의 수가 많아도 계산과정이 쉽고 결과 값이 명확한 삼각 퍼지함수를 사용하기로 한다.

$$\bar{X}^{(i)} = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}) \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

(단, $\bar{X}^{(i)}$: 삼각 퍼지수 $a_1^{(i)}$: 최소 값

$a_2^{(i)}$: 최빈 값 $a_3^{(i)}$: 최대 값)

사용된 삼각 퍼지수의 각 값($a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}$)은 각각 최소, 최빈, 최대 값을 의미한다고 볼 수 있다.

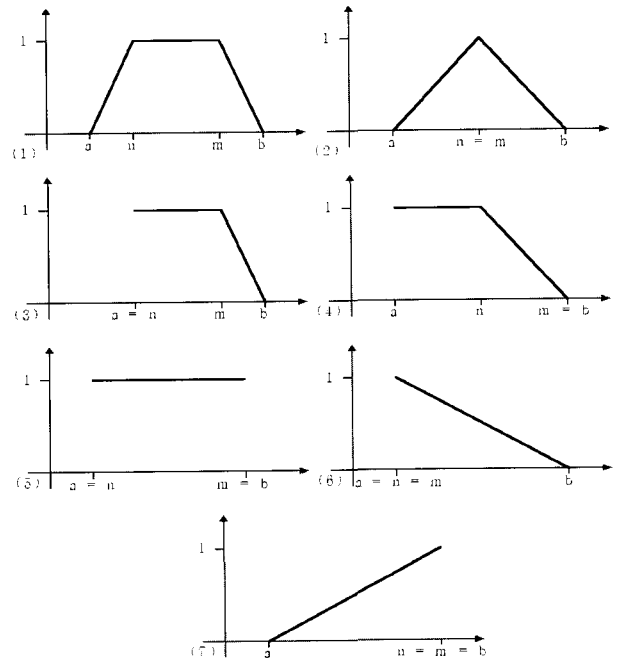


그림 4. 다양한 퍼지함수의 형태

(1) trapezoidal, (2) triangle, (3) more than a to 1, (4) less than a to 1, (5) between a/1 and m/1, (6) at least a/1

2) 모든 $\bar{X}^{(i)}$ 의 평균 \bar{X}_m 을 계산한다.

$$\bar{X}_m = (a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}) \quad (9)$$

$$= \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_2^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_3^{(i)} \right)$$

(단, \bar{X}_m : $\bar{X}^{(i)}$ 의 평균
n : 전문가 수)

구해진 평균 값을 이용하여 각 전문가별 차이를 다음과 같이 구하고, 이 값은 의견의 차이를 조정하기 위해 각각의 전문가들에게 다시 Feedback되어진다.

$$(d_1, d_2, d_3)$$

$$= (a_{m1} - a_1^{(i)}, a_{m2} - a_2^{(i)}, a_{m3} - a_3^{(i)}) \quad (10)$$

$$= \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_1^{(i)} - a_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_2^{(i)} - a_2^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_3^{(i)} - a_3^{(i)} \right)$$

(단, d_i : 각 삼각 퍼지수와 평균 삼각 퍼지수 사이의 차
 a_{m1} : 최소 값 평균
 a_{m2} : 최빈 값 평균)

3) Feedback을 통해 산정된 값은 다시 각 전문가들로부터 수정되어 객관적인 의견을 수렴하기 위한 삼각 퍼지함수로 추출되어진다.

$$\mathcal{T}^{(i)} = (v_1^{(i)}, v_2^{(i)}, v_3^{(i)}) \quad i=1, \dots, n \quad (11)$$

(단, $\mathcal{T}^{(i)}$: 교정된 삼각 퍼지수
 $v_1^{(i)}$: 교정된 최소 값
 $v_2^{(i)}$: 교정된 최빈 값
 $v_3^{(i)}$: 교정된 최대 값)

이 과정은 2단계와 더불어 두 퍼지수의 차이(d)가 0.2이하일 때까지 계속된다. 이는 각 전문가들간의 의견 오차를 줄이고 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위한 것이다.

4) 의사결정자들의 의견일치 조정을 위해 언어가중치변수(Linguistic Weighting Variables)와 언어등급변수(Linguistic Rating Variables)를 사용하여 표 6의 각 항목에 기입한다. 언어변수의 소속도는 표 4와 같이 가정되고, 사용되는 언어변수는 그림 5와 같이 표현된다.^{8),9)}

표 4. 언어변수 및 언어변수의 퍼지소속값

언어 변수	기 호	삼각퍼지 함수 값
Very High	VH	(0.83, 1.0, 1.0)
High	H	(0.67, 0.83, 1.0)
Medium High	MH	(0.5, 0.67, 0.83)
Medium	M	(0.33, 0.5, 0.67)
Medium Low	ML	(0.17, 0.33, 0.5)
Low	L	(0, 0.17, 0.33)
Very Low	VL	(0, 0, 0.17)

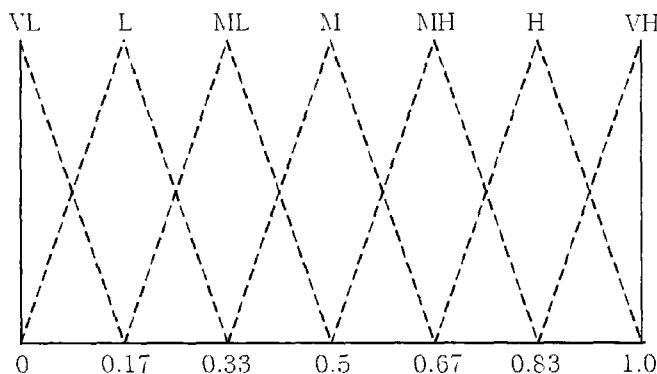


그림 5. 언어변수 값의 퍼지 소속도

표 4는 전문가 판단의 언어적 표현을 삼각퍼지 함수 값으로 적용하는 것을 보여준다. 이 삼각퍼지 함수 값들은 기존의 기법들이 언어적 표현을 수치화함에 있어 크리스프(Crisp)한 값들을

채택함으로써 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

5) 여러 전문가들의 의견을 조합하여 평균값을 계산한다. 평균값의 산출 과정에서 표 4의 언어변수 값의 7가지 등급에 해당되지 않을 경우 확장원리를 사용하여 근사값을 적용하게 된다.⁷⁾ 확장 원리는 다음과 같이 적용된다.

$$S^n \xrightarrow{F} F(R) \xrightarrow{app_1} S \quad (12)$$

위 식(12)는 언어적 변수의 확장원리인 다음 식(13)에 의해 다시 확장되어진다.

$$S^n \xrightarrow{C} [0, g] \xrightarrow{app_2} (0, \dots, g) \longrightarrow S \quad (13)$$

- (단, S : 언어용어 집합 S={S0, ..., Sg}
- Sⁿ : S의 n Cartesian 생성
- C : 언어 조합 연산자
- F : 확장원리에 기초한 조합 연산
- F(R) : 실수 R의 퍼지수 집합
- app : 언어적 근사 함수 F(R) → S)

6) 할당된 언어변수에 대해 구해진 평균값을 삼각퍼지수로 전환하여 표 6과 같이 도출하여 다음 식(14)에 적용하여 Fuzzy-AHP 기법으로 산출된 가중치 벡터와 곱하여 최종 퍼지등급 값을 구한다.

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \vdots \\ \bar{A}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \vdots \\ \bar{w}_n \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{x}_{11}\bar{w}_1 + \bar{x}_{12}\bar{w}_2 + \dots + \bar{x}_{1n}\bar{w}_n \\ \bar{x}_{21}\bar{w}_1 + \bar{x}_{22}\bar{w}_2 + \dots + \bar{x}_{2n}\bar{w}_n \\ \vdots \\ \bar{x}_{m1}\bar{w}_1 + \bar{x}_{m2}\bar{w}_2 + \dots + \bar{x}_{mn}\bar{w}_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

(단, \bar{A}_i : 최종 퍼지등급값
 \bar{x}_{in} : 교정된 삼각퍼지수
 \bar{w}_i : 가중치 벡터)

3. 의사결정 모델

건설프로젝트의 의사결정 상황에서 평가요소들간의 상관관계를 고려하지 않고 각 대안의 우선 순위를 결정하는 것은 많은 불확실성과 오차를 내포하고 있다. 또한 의사결정시 의사결정자의 퍼지한 사고를 고려하지 않고 크리스프(Crisp)한 수치만을 사용할 때는 순위역전 현상 등의 오류를 발생시킬 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 장에서는 Fuzzy-AHP기법과 Fuzzy-Delphi기법을 통합한 새로운 의사결정모

델인 FD-AHP기법을 개발하도록 한다.

1) 본 연구에서는 모델의 구성을 위해 건축공사에 있어서 최적의 외부벽체 시스템을 선정해야 하는 의사결정상황을 도입하였다. 또한 관련분야 전문가 3명의 협의를 통하여 최적의 외부벽체 선정과 관련된 의사결정문제를 그림 6과 같이 계층구조화하였다.

표 5. 상대비교 매트릭스의 퍼지평균값

평가기준	비용절감	내구성	안전성	운용성
비용절감	(1, 1, 1)	(0.47, 0.77, 1.08)	(0.37, 0.5, 0.67)	(0.5, 1.0, 1.5)
내구성	(0.93, 1.31, 2.17)	(1, 1, 1)	(0.47, 0.64, 0.83)	(1.0, 1.33, 1.5)
안전성	(1.5, 2.0, 2.75)	(1.22, 1.56, 2.17)	(1, 1, 1)	(1.33, 2.0, 2.75)
운용성	(0.67, 1.08, 2.06)	(0.67, 0.75, 1.0)	(0.37, 0.5, 0.75)	(1, 1, 1)

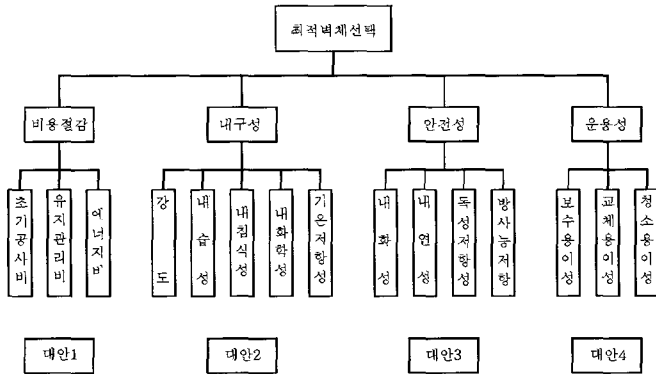


그림 6. 최적대안 선택을 위한 계층구조

위 표 5의 퍼지평균값을 퍼지합성 확장값으로 변환시키면 다음과 같다.

$$S_1 = (2.34, 3.27, 4.25) \odot \left(\frac{1}{23.23}, \frac{1}{17.44}, \frac{1}{13.5} \right) = (0.10, 0.19, 0.31)$$

$$S_2 = (3.4, 4.28, 5.5) \odot \left(\frac{1}{23.23}, \frac{1}{17.44}, \frac{1}{13.5} \right) = (0.15, 0.25, 0.41)$$

$$S_3 = (5.05, 6.56, 8.67) \odot \left(\frac{1}{23.23}, \frac{1}{17.44}, \frac{1}{13.5} \right) = (0.22, 0.38, 0.64)$$

$$S_4 = (2.71, 3.33, 4.81) \odot \left(\frac{1}{23.23}, \frac{1}{17.44}, \frac{1}{13.5} \right) = (0.12, 0.19, 0.36)$$

2) 각각의 평가기준간에 각 전문가별 쌍대비교를 실시하고, 이 값을 객관화시키고 개인의 주관적 차이를 해소하기 위해서 식(3)을 적용하여 표 5와 같은 퍼지평균값을 도출한다.

퍼지확장원리에 의한 가능성 정도는 식(5)에 의해서 다음과 같은 가중치 벡터(W)로 변환되어진다.

표 6. Fuzzy-Delphi기법을 이용한 퍼지평균값

평가 기준 (가중치)	평가요소	대안의 종류			
		대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
비용절감 (0.14)	초기공사비	H(0.67, 0.83, 1.0)	MH(0.5, 0.67, 0.83)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	L(0, 0.17, 0.33)
	유지관리비	MH(0.5, 0.67, 0.83)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	MH(0.5, 0.67, 0.83)	VH(0.83, 1.0, 1.0)
	에너지비	MH(0.5, 0.67, 0.83)	L(0, 0.17, 0.33)	L(0, 0.17, 0.33)	M(0.33, 0.5, 0.67)
	평균	(0.56, 0.72, 0.89)	(0.22, 0.39, 0.55)	(0.22, 0.39, 0.55)	(0.39, 0.56, 0.67)
내구성 (0.25)	강도	H(0.67, 0.83, 1.0)	H(0.67, 0.83, 1.0)	M(0.33, 0.5, 0.67)	L(0, 0.17, 0.33)
	내 습 성	H(0.67, 0.83, 1.0)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	M(0.33, 0.5, 0.67)	ML(0.17, 0.33, 0.5)
	내 침 식 성	M(0.33, 0.5, 0.67)	M(0.33, 0.5, 0.67)	VH(0.83, 1.0, 1.0)	H(0.67, 0.83, 1.0)
	내 화 확 성	MH(0.5, 0.67, 0.83)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	H(0.67, 0.83, 1.0)	VH(0.83, 1.0, 1.0)
	기온저항성	MH(0.5, 0.67, 0.83)	H(0.67, 0.83, 1.0)	M(0.33, 0.5, 0.67)	L(0, 0.17, 0.33)
평균	(0.53, 0.7, 0.87)	(0.40, 0.56, 0.73)	(0.50, 0.67, 0.80)	(0.33, 0.5, 0.63)	
안전성 (0.43)	내 화 성	H(0.67, 0.83, 1.0)	M(0.33, 0.5, 0.67)	VH(0.83, 1.0, 1.0)	H(0.67, 0.83, 1.0)
	내 연 성	MH(0.5, 0.67, 0.83)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	M(0.33, 0.5, 0.67)	H(0.67, 0.83, 1.0)
	독성저항성	ML(0.17, 0.33, 0.5)	M(0.33, 0.5, 0.67)	M(0.33, 0.5, 0.67)	VH(0.83, 1.0, 1.0)
	방사능저항	L(0, 0.17, 0.33)	H(0.67, 0.83, 1.0)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	L(0, 0.17, 0.33)
평균	(0.34, 0.5, 0.67)	(0.38, 0.54, 0.71)	(0.42, 0.58, 0.71)	(0.54, 0.71, 0.83)	
운용성 (0.18)	보수용이성	H(0.67, 0.83, 1.0)	MH(0.5, 0.67, 0.83)	M(0.33, 0.5, 0.67)	H(0.67, 0.83, 1.0)
	교체용이성	M(0.33, 0.5, 0.67)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	ML(0.17, 0.33, 0.5)	H(0.67, 0.83, 1.0)
	청소용이성	M(0.33, 0.5, 0.67)	H(0.67, 0.83, 1.0)	H(0.67, 0.83, 1.0)	MH(0.5, 0.67, 0.83)
	평균	(0.44, 0.61, 0.78)	(0.45, 0.61, 0.78)	(0.39, 0.5, 0.72)	(0.61, 0.78, 0.94)

(단, VH : Very High, H : High, MH : Medium High, M : Medium, ML : Medium Low, L : Low, VL : Very Low)

d'(비용절감)
 $= V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4) = \min(0.73, 0.32, 1.0) = 0.32$
 d'(내구성)
 $= V(S_2 \geq S_1, S_3, S_4) = \min(1.0, 0.59, 1.0) = 0.59$
 d'(안전성)
 $= V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4) = \min(1.0, 1.0, 1.0) = 1.0$
 d'(운용성)
 $= V(S_4 \geq S_1, S_2, S_3) = \min(1.0, 0.78, 0.42) = 0.42$
 $\therefore W' = (0.32, 0.59, 0.43, 0.18)^T$

따라서 가중치의 합이 1이 되도록 정규화시키면 평가기준간의 상대적 가중치를 의미하는 최종가중치 벡터(W)가 구해진다.
 $W = (0.14, 0.25, 0.43, 0.18)^T$

3) 각 대안마다 표 4에서 제시한 언어적표현에 대응하는 퍼지 삼각함수로서 평가요소별 수준을 평가한다. 이 수치는 Fuzzy-Delphi기법을 이용하여 반복적인 Feedback이 이루어지면서 각 전문가들의 의견조율과 확장원리에 의해서 표 6와 같이 도출되어진다. 평가요소의 언어변수에 대한 교정된 삼각퍼지수와 Fuzzy-AHP기법에서 구해진 평가기준에 대한 가중치를 곱하여 최종 퍼지등급값(Wc)을 구한다.

$W_c = (0.46, 0.61, 0.57, 0.61)$

4) Fuzzy-AHP기법을 적용하여 평가기준에 대한 각 대안의 상대 가중치를 구한다. 식(3)~(7)을 통해 평가기준과 평가요소의 가중치를 고려하여 각 대안에 대한 비교 값들을 최종적으로 도출하면 표 7과 같다.

표 7. 평가기준에 대한 각 대안 가중치

	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
평가 1 (0.46)	0.11	0.02	0.38	0.49
평가 2 (0.61)	0.55	0.13	0.15	0.18
평가 3 (0.57)	0.28	0.27	0.26	0.20
평가 4 (0.61)	0.18	0.34	0.29	0.19

5) 각 요소별 평가 가중치와 각 대안의 가중치를 행렬식으로 계산하면 표 8과 같은 최종 가중치값이 얻어진다. 따라서 최종 가중치 값이 가장 큰 대안 1이 최적으로 선택이 된다.

표 8. 각 대안별 최종 가중치

대안의 종류	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
최종 가중치	0.66	0.45	0.59	0.56

6) 일관성 검증

본 연구에서는 일관성 측정을 위해 삼각퍼지함수를 비퍼지화하여 계산한 결과 표 9과 같이 Saaty의 일관성비율과 Robert Csutora6)의 일관성 평가지수 모두 만족하는 것으로 나타나 일관성이 있는 판단으로 검증되었다.

표 9. 일관성 검증

측정방법	계산	결과
Saaty의 일관성 비율	$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \cdot \frac{1}{RI}$ $= \frac{4.12 - 4}{4 - 1} \cdot \frac{1}{0.9} = 0.044 < 0.1$	OK
Robert Csutora의 일관성 평가지수	$\lambda_{max} - n = 4.12 - 4 = 0.12 < 1.0$	OK

4. 모델 타당성 검토

본 장에서는 기존의 의사결정에 사용되었던 AHP 기법의 가중치 산정시 발생하는 순위역전 현상을 지적하고 본 연구에서 제시한 모델의 타당성을 검증하고자 한다.

4.1 가중치 비교

AHP기법과 본 연구에서 제시한 FD-AHP기법간의 가중치 결과값을 비교·평가하였다.

1) AHP기법에 의한 가중치 산정을 위해서는 보다 정확하고 객관적인 평가를 위해서 Expert Choice® 2000을 사용하였다. 여기에서 평가기준과 대안들은 독립적이라 보고 상호 의존성은 고려하지 않는다.

표 11. 평가기준간 쌍대비교 매트릭스

	C1	C2	C3	C4
C1	1	3	7	5
C2	1/3	1	9	3
C3	1/7	1/9	1	1/3
C4	1/5	1/3	3	1

표 11. 평가기준에 대한 각 대안별 쌍대비교 매트릭스

C1	A1	A2	A3	C2	A1	A2	A3
A1	1	3	9	A1	1	3	1/5
A2	1/3	1	5	A2	1/3	1	9
A3	1/9	1/5	1	A3	5	1/9	1
C3	A1	A2	A3	C4	A1	A2	A3
A1	1	1/9	7	A1	1	1/7	3
A2	19	1	1/3	A2	7	1	9
A3	1/7	39	1	A3	1/3	1/9	1

표 12. 각 대안별 최종 가중치

최종 가중치	대안 1	대안 2	대안 3
기준 AHP	0.51	0.37	0.12
FD-AHP	0.77	0.67	0.28
	(0.45)	(0.39)	(0.16)

주) 1. ()안의 값은 가중치 합을 1로 하였을 경우의 값
 2. FD-AHP기법의 경우 가중치 산정은 단지 우선순위 선택의 문제이므로 반드시 계산된 값을 정규화할 필요는 없다.⁷⁾

표 12는 AHP기법과 FD-AHP기법으로 계산되어진 최종 가중치 결과값으로 가중치의 값은 다르게 나타났지만 우선순위의 변함이 없어 두 기법 모두 실제 건설프로젝트의 대안평가에 유용한 것으로 사료된다.

2) 두 기법에서 각각 평가기준을 증가시켜 그에 따른 우선 순위의 변화를 검토하였다. 또한 상관성 분석을 통해 상관성이 높은 평가기준이 추가될 경우와 상관성이 상대적으로 낮은 평가기준이 추가될 경우에 어떠한 영향을 미치는지를 비교 분석하였다. AHP기법에 적용된 상관계수는 다음 식(15)에 의해 계산되었다.

$$r = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_1} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_2} \right) \quad (15)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

(단, \bar{x}, \bar{y} : x, y의 표본 평균
 s_1, s_2 : x, y의 표본 표준편차)

FD-AHP기법에 적용된 상관계수는 퍼지상관계수 식(16)을 적용하였다.

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i(j)} - \bar{X})(Y_{i(j)} - \bar{Y}) \mu_{Br(w)}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{i(j)} - \bar{X})^2 \mu_{Br(w)}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Y_{i(j)} - \bar{Y})^2 \mu_{Br(w)}}} \quad (16)$$

(단, \bar{X}, \bar{Y} : X, Y의 표본 평균
 $X_{i(j)} = a_i \mu_{i(j)}$ a: 집단 가중치
 $\mu_{i(j)}$: i에 대한 반응 정도 [0,1]사이의 값)

AHP의 평가에는 Expert Choice[®] 2000 프로그램을 적용하였으며, FD-AHP의 계산에는 VBA를 사용하였다.

표 13. 상관성이 낮은 평가기준 증가시에 따른 가중치 변화

적용기법	상관계수	최종 가중치		
		대안 1	대안 2	대안 3
AHP	0.20	0.35	0.33	0.32
FD-AHP	0.18	0.61	0.57	0.46

표 14. 상관성이 높은 평가기준 증가시에 따른 가중치 변화

적용기법	상관계수	최종 가중치		
		대안 1	대안 2	대안 3
AHP	0.589	0.279	0.493	0.228
FD-AHP	0.621	0.445	0.367	0.156

위 결과에서 상관성이 낮은(AHP : 0.20, FD-AHP : 0.18) 평가기준 추가시 가중치 변화가 적고, 두 방법 모두 우선순위의 변화가 없었다. 반면에 상대적으로 상관성이 높은(AHP : 0.589, FD-AHP : 0.621) 평가기준 추가시 가중치의 변화도 크고, AHP기법에 의한 경우 대안 2가, FD-AHP의 경우 대안 1이 선택되어 우선순위의 변화가 발생하였다. 즉, 상관성이 높은 평가기준 추가시 기준 AHP기법의 경우 순위역전현상이 발생하였고 본 연구에서 제시한 FD-AHP기법에 의한 경우 비록 가중치의 값은 달라지더라도 순위역전현상은 발생하지 않았다.

5. 결 론

다양한 의사결정상황에 적용되어지는 AHP기법은 평가요소들간의 높은 상관관계를 가지고 있는 건설 프로젝트에서는 부적합하고 의사결정시 크리스프한 수치만으로 표현되어지는 단점이 있어 의사결정의 신뢰성을 저하시키는 단점이 있었다. 이에 본 연구에서는 가중치 산정에 따른 순위역전 현상을 방지하고 주관적 판단에 따른 언어적 표현을 보다 합리적으로 수치화하기 위하여 Fuzzy-AHP 기법과 Fuzzy-Delphi기법을 통합한 새로운 의사결정모델인 FD-AHP기법을 제시하였으며, 사례적용을 통해 모델의 타당성을 검증하였다.

본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 건설계획 수립시 전문가들의 경험과 주관적 가치판단을 바탕으로 의사결정의 신뢰성을 개선시킬 수 있는 체계적인 의사결정모델을 제시하였으며, 건물벽체 선정시스템의 사례적용을 통하여 논리적 검증을 실시하였다.

2) 본 연구에서 제시된 모델에 따라 가중치를 산정할 경우 상관성 변화에 따른 가중치 값의 순위역전현상을 방지할 수 있어 가중치 산출시 객관적 타당성이 있는 것으로 사료된다.

3) 의사결정모델의 가중치 산정시 AHP기법의 크리스프한 단점을 보완하고 논리적 일관성을 향상시키기 위하여 퍼지한 스케일을 적용하였으며, 이는 견해가 다른 전문가들의 의견을 반영한 합리적인 가중치를 도출할 수 있다.

참고문헌

1. 김성희외 2인, “의사결정분석 및 응용”, 영지문화사,

- 2002.
2. 김인호, "건설계획과 의사결정", 기문당, 1998.
 3. 이승찬외 2인, "Balanced Scorecard 와 Fuzzy AHP를 이용한 정보시스템 가치평가 모델", 한국경영과학회지, 1999.
 4. 정규련외 1인, 퍼지교차종속관계를 이용한 다기준평가문제의 가중치 책정방법, 한국경영과학회지, 제 19권 제 3수준 평가모형, 대한토목학회 학술발표 논문집, 2001년 10월.
 5. 정병호외 1인, 부정확한 쌍대비교정보를 갖는 다요소 의사결정 문제에서의 가중치 산출, 한국경영과학회지, 제 19권, 제 2호, 1994.
 6. Ching-Hsue Cheng, "Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function", European Journal of Operational Research 96, pp 343-350, 1996.
 7. Ching-Hsue Cheng and Yin Lin, "Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation", European Journal of Operational Research 142, pp 174-186, 2002.
 8. Francisco Herrera and Luis Martinez, "A 2-Tuple Fuzzy Linguistic Representation Model for Computing with Words", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol 8, No 6, 2000.
 9. Gholamreza Langari, "Stability of Fuzzy Linguistic Control Systems", Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control, hawaii, 1990.
 10. Thomas L. Saaty, "Decision-making with the AHP : Why is the principal eigenvector necessary", European Journal of Operational Research 145, pp 85-91, 2003.