

퍼지 계층분석기법을 이용한 국내 미래 에너지기술개발 우선순위 도출

하영진*[†], 강승진**

*한국에너지기술연구원 연구정책팀, **한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원

The Fuzzy AHP Approach to Prioritize the Future Energy Technology Development

YOUNGJIN HA*[†], SEUNGJIN KANG**

**Energy Technology Research Policy Team, Korea Institute of Energy Research
71-2 Jang-dong Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea*

***Graduate school of Knowledge-Based Technology & Energy, Korea Polytechnic Univ.,
2121 Jeongwang-dong, Siheung-si, Gyeonggi-do, 429-923, Korea*

ABSTRACT

In general, reliability of AHP depends on pairwise comparison of evaluators. In addition, human judgment on the importance of alternatives or criteria is always imprecise and vague. The Fuzzy AHP technique is suggested and used widely recently. In this paper, we prioritize future energy technology development for well focused R&D. We selected 3 criteria and 10 sub-criteria. According to the result in this study, the most important sub-criterion is the precedence over other competitive technology, the second is the possibility for fundamental technology acquisition, and the third is the improvement energy efficiency. The other side, the lowest important sub-criterion is the technology level compared with advanced countries.

KEY WORDS : Energy technology development(에너지기술개발), Fuzzy AHP(퍼지 AHP), MCDM (다기준의사결정기법)

Subscripts

Fuzzy AHP : fuzzy analytic hierarchy process
MCDM : multi-criteria decision making

CR : consistency ratio
CI : consistency index
RI : random index
IPCC : intergovernmental panel on climate change
UNFCCC : UN framework convention on climate change

[†]Corresponding author : yjha@kier.re.kr

1. 서 론

우리나라는 에너지소비의 대부분인 약 97%를 해외 에너지수입에 의존하며, 에너지 소비는 세계 10위의 에너지 다소비국가이다. CO₂ 배출량은 약 591.1백만TC(2005년)로서 세계 9위(CO₂ 배출 증가율 세계 1위)를 차지하고 있다.

에너지자원 빈국으로 해외 에너지의존도가 높은 우리나라의 경우, 유가상승은 우리경제에 많은 영향을 끼친다. 지난 7월 4일 국제유가가 사상 최고치 기록으로 \$140.7(두바이유 기준)로 마감돼 사상 처음으로 140달러 선을 돌파하였다. 이러한 신고유가 행진과 함께 온실가스 배출로 인한 기후변화는 먼 미래의 문제가 아니라 현실적이고 국제적인 이슈로 대두되고 있다. 기후변화협약 발효로 향후 2013년 온실가스감축 의무대상국이 될 가능성이 높다. 이러한 우리의 에너지환경의 상황을 극복하고, 국가에너지수급 안정화를 위해서는 에너지 기술개발을 통한 대안 마련과 이에 대한 전략적인 사전준비가 필요하다.

화석연료에 지나치게 의존하고 있는 현재의 에너지시스템 구조를 개선하고, 기후변화 문제를 해결하기 위하여 세계적으로 에너지관련 전문가들의 공통적으로 제시하는 해결 방안은 혁신적인 에너지기술개발이라고 말하고 있다. 궁극적으로 현재의 탄소에너지시대에서 비화석에너지 및 청정에너지시대로의 에너지 패러다임의 변화가 그 핵심이라고 할 수 있다.

따라서 에너지·환경 문제를 해결하기 위해서는 앞으로 전략적인 에너지기술개발이 추진되어야 한다. 본 연구에서는 미래전략 에너지기술을 선정함에 있어서 직간접적으로 영향을 끼칠 수 있는 요인들을 발굴하고, 에너지기술개발 우선순위를 도출하여 에너지기술개발의 극대화 및 자원 할당을 최적화하고자 한다. 이러한 에너지기술개발 방향을 도출하기 위하여 다기준의사결정기법(MCDM)의 확장모델인 Fuzzy AHP 기법을 적용하여 에너지기술개발 우선순위를 산출하였다. 본

연구의 결과로 산출된 에너지기술개발 우선순위는 추후 한국에너지기술연구원의 미래전략 에너지기술개발사업 추진 시 기초자료로 활용 가능하며 객관적 기술개발 방향을 제시할 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 Fuzzy AHP의 개념

AHP 기법은 1977년 Saaty가 최초로 개발하여 제시한 의사결정기법¹⁾이다. 평가 목적(Goal)을 수립한 후, 평가기준(Criteria)을 계층화하고, 평가기준 가중치의 쌍대비교를 통하여 산출하며, 최종 대안의 가중치를 도출하는 기법이다. AHP는 R&D 기술 기획²⁾, 정책적 대안 분석 및 선정, 자원할당, 성과분석, 경제성 분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 AHP의 단점을 극복한 Fuzzy 이론을 적용한 Fuzzy AHP 방법론을 적용하여 의사결정자의 언어적 인식을 퍼지 범위 값을 적용하여 미래전략 에너지기술개발을 위한 평가기준의 가중치를 선정하였다.

의사결정자의 기술개발 선호도를 평가하기 위해 Fuzzy AHP 기법을 적용함으로써 현실상황의 불확실성이 내재되어 있는 상황을 고려하여 인간이 인지하고 의사결정을 내리는 사고의 애매모호함을 보다 효과적으로 반영하였다. 에너지기술개발 우선순위 도출이라는 목표에 대하여 평가기준이 되는 criteria를 선정하고, 계층적 구조(hierarchical structure)로 문제를 구조화하였다.

AHP 기법은 계층구조를 통해 문제를 간략화할 수 있다. Fuzzy AHP 기법을 적용하여 대안에 대한 상대적 가중치에 대한 범위 값을 산출하여 설문자가 인식하는 개인적 선호에 대해 보다 현실적 정량적 수치를 반영할 수 있다. Fuzzy AHP는 하한값(lower value), 중앙값(median), 상한값(upper value)과 같은 범위 값으로 표현함으로써 언어적 선호에 대한 모호성을 잘 반영한다.

Table 1은 Kahraman et al에서 적용한 Fuzzy scale³⁾을 활용하였다. Fuzzy scale 값을 1~9까지

Table 1 Fuzzy scale

Preference	Fuzzy numbers
Equal	(1, 1, 1)
Moderate	(2/3, 1, 3/2)
Fairly strong	(3/2, 2, 5/2)
Very strong	(5/2, 3, 7/2)
Absolute	(7/2, 4, 9/2)

의 범위 값을 활용하여 산정한 경우도 있으나, 본 연구에서는 언어적 척도에 대한 범위 값을 1~4.5 까지 반영하여 언어적 인지에 대한 범위 값을 줄여 신뢰성을 높이는 방법을 적용하였다.

Fuzzy AHP의 절차는 다음의 5단계로 구성된다.

Step1 : Fuzzy scale을 활용하여 평가기준 간 및 대안간 쌍대비교를 실시하여 상대적 가중치 평균값 도출

Step2 : 식(1), (2), (3), (4)을 이용하여 속성 i번째의 TFN $S_i=(l_i, m_i, u_i)$ 값 산출

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$s.t \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{i=1}^n l_{ij}, \sum_{i=1}^n m_{ij}, \sum_{i=1}^n u_{ij} \right) \quad (3)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_{ij}} \right) \quad (4)$$

Step3 : TFN 값 S_i 를 식(5)을 이용하여 각각

비교하여 $S_j \geq S_i$ 인 degree of possibility를 산출

$$V(S_j \geq S_i) = height(S_i \cap S_j) = \mu_{S_j}(d) \quad (5)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{if } m_j \geq m_i \\ 0, & \text{if } l_i \geq u_j \\ \frac{l_i - u_j}{(m_j - u_j) - (m_i - l_i)}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 d는 u_{Mi} 와 u_{Mj} 의 가장 높은 교차점을 의미한다.

Step4 : $V(S_j \geq S_i)$ 인 최소 degree of possibility를 식(6)에 의해 산출

$$V(S \geq S_1, S_2, S_3, \dots, S_k), \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, k.$$

$$= V[(S \geq S_1) \text{ and } (S \geq S_2) \text{ and } \dots \text{ and } (S \geq S_k)]$$

$$= \min V(S \geq S_k) \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (6)$$

$$d'(A_i) = \min V(S \geq S_i) \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, k$$

가중치벡터 W는 식(7)과 같이 정의된다.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (7)$$

$A_i(i=1,2,\dots,n)$ 는 n개의 요소로 구성되어 있다.

Step5 : 가중치 벡터를 정규 분포화하여 최종 가중치 도출

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (8)$$

식(8)에서 W는 비퍼지 수를 의미한다.

2.2 삼각퍼지수(Triangular Fuzzy Number)

현실적으로 대안을 평가하는 의사결정과 같은 문제에서 정확한 데이터를 도출하는 것은 매우 어렵고, 의사결정자는 선호도에 대해 느끼는 직감을 특정 수치로 나타내기 보다는 언어적 방법으로 표현하는 것을 선호한다. Fuzzy 이론은 애매모호함이 내재되어 있는 현실문제에서 의사결정자의 언어적 선호도를 효과적으로 반영할 수 있다.

AHP기법의 계층화하는 장점을 활용하고, AHP

의 9점 척도의 한계를 극복하고, 언어적 표현 방식의 한계로 발생하는 모호성과 불확실성문제를 Fuzzy 이론을 활용하여 해결하는 방법이 많이 연구되고 있다. Fuzzy 이론은 1965년 미국 UC Berkeley의 Zadeh 교수가 최초로 개념 정립을 하였다⁴⁾. Fuzzy 이론은 퍼지집합(Fuzzy sets), 소속 함수(Membership function), 퍼지수(Fuzzy number) 등의 3가지 요소로 구성되어 있다. Van Laarhoven and Oedrycz(1983)⁵⁾은 삼각 퍼지수(TFN)를 활용한 Fuzzy 의사결정방법론을 최초로 제시하였다. Chang(1995)⁶⁾은 Fuzzy 넘버의 요소를 비교하는 방법론을 제시하였다.

삼각 퍼지수(TFN)는 대안 선정 시 명확한 숫자 대신 하한값, 중앙값, 상한값의 범위 값을 가진다. 즉 TFN은 $M_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 로 표현되며, m_{ij} 는 중앙값에 해당되며, l_{ij}, u_{ij} 는 각각 하한값과 상한값에 해당된다. 2개의 TFN $M_1=(l_1, m_1, u_1)$ 과 $M_2=(l_2, m_2, u_2)$ 에 대하여 다음의 식이 성립한다.

$$(l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1+l_2, m_1+m_2, u_1+u_2) \quad (9)$$

$$(l_1, m_1, u_1) \odot (l_2, m_2, u_2) = (l_1l_2, m_1m_2, u_1u_2) \quad (10)$$

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (11)$$

3. 중요도 산출

3.1 계층구조 설계

에너지기술개발의 우선순위를 분석하기 위하여 다양한 영향요인(impact factor)을 도출하였다. 이러한 요인은 개발기술에 직접 또는 간접적으로 영향을 끼칠 수 있는 요인들로서 이는 유·무형적, 정성적, 정량적 특성을 모두 포함하고 있는 총체적 영향요인이다.

본 연구에서는 분야별 전문가들의 설문을 통하여 다양한 영향요인들을 발굴한 후, 에너지기술개발의 후보를 선정하기 위한 영향요인으로 3개의 상위요인(criteria)과 10개의 하위요인(sub-

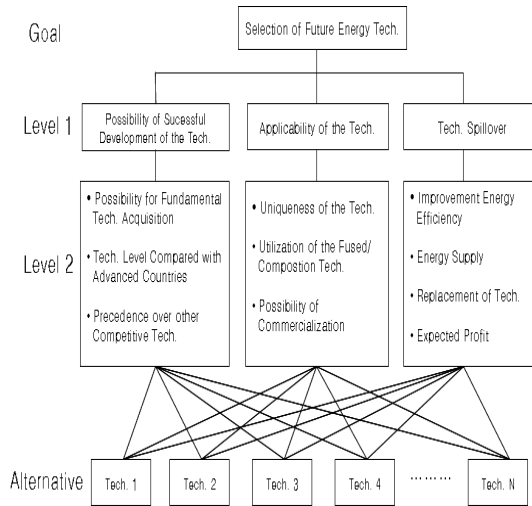


Fig. 1 Hierarchy of criteria

criteria)을 선정하여 분석하였다.

에너지기술의 기술개발 우선순위 도출을 위한 요인으로는 기술개발 성공가능성, 기술의 적용성, 기술의 파급효과 등 3개를 선정하였다. Fuzzy AHP 기법의 평가기준간의 독립성을 보장하기 위해서 평가기준 선정 시 평가기준 간 상호 의존하거나 종속되지 않는 독립된 속성을 고려하여 평가기준을 선정하였다. Fig. 1은 평가기준의 계층구조를 도식한 것이다.

3.2 요소의 쌍대비교

에너지기술의 개별기술을 선정하기 위하여 Fig. 1과 같이 계층구조를 설계한 후, 하위요인들이 직계 상위요인에 대하여 얼마나 많은 영향을 받는지 또는 중요성을 갖는지 평가해야 한다. 계층구조 상에서 평가기준들의 중요도 측정은 관련요소들 간 쌍대비교를 통해 산출할 수 있다. 쌍대비교로 구성되는 행렬(matrix)의 특성 벡터(eigen vector)와 특성 값(eigen value)을 통하여 그 중요도를 산출하게 된다. AHP 기법의 쌍대비교에 활용되는 척도의 범위는 1에서 9까지이다. Table 2는 9점 척도를 나타낸 것이며, 척도수치가 클수록 개인적 선호도가 증가함을 나타낸다.

Table 2 9-Point Scale

Scale	Definition
1	Equal importance
3	Moderate importance
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2,4,6,8	The intermediate values

본 연구에서는 에너지기술개발 우선순위를 선정하기 위해 에너지기술 분야 및 에너지정책분야에 5년~20년 이상 종사한 전문가 15명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문내용의 일관성 값 확인을 위해 일관성 지수(CI)와 일관성 비율(CR)을 산정하였다.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \tag{12}$$

$$CR = (CI / RI) \times 100 \tag{13}$$

일관성 값 중에서 0.1 이하인 값만이 설문지의 일관성이 보장되므로, 본 연구에서는 0.1 이하인 값만을 취합하여 평가기준의 가중치 산출에 활용하였다. 본 설문결과 15명중에서 12명의 일관성 지수가 0.1 이하로 나와서 최종 12명의 가중치 값을 활용하였다.

4. 수리예제

4.1 영향요인의 가중치

영향요인의 가중치를 산정하기 위하여 기술개발 성공가능성(PS), 기술의 적용성(AT), 기술의 파급효과(TS) 간 쌍대비교를 실시하였다. Table 3은 criteria의 Fuzzy 선호도를 도식한 것이다.

Table 4는 criteria간의 Fuzzy 선호도의 평균값을 나타낸 것이다. criteria간의 Fuzzy 평균값을 도출하고, 식(1), (2), (3), (4)에 의해 criteria의 TFN

Table 3 Fuzzy evaluation of criteria

	PS	AT	TS
PS	(1,1,1)	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (1,1,1) · ·	(2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2) (3/2,2,5/2) · ·
AT	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (1,1,1) · ·	(1,1,1)	(2/3,1,3/2) (1,1,1) (3/2,2,5/2) · ·
TS	(2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2) (2.5,1/2,2/3) · ·	(2/3,1,3/2) (1,1,1) (2.5,1/2,2/3) · ·	(1,1,1)

값을 산출하였다. S₁(PS)는 (0.28, 0.40, 0.54), S₂(AT)는 (0.20, 0.28, 0.38), S₃(TS)는 (0.25, 0.33, 0.45)로 각각 산출되었다.

식(5)와 (6)에 의해 V(S_j ≥ S_i)인 degree of possibility를 산출하면, D'(1)은 min V(S₁ ≥ S₂, S₃) = min(1.00, 1.00) = 1.00, D'(2)는 min V(S₂ ≥ S₁, S₃) = min(0.45, 0.72) = 0.45, D'(3)는 min V(S₃ ≥ S₁, S₂) = min(0.70, 1.00) = 0.70로 산출되었다.

식(7)과 (8)에 의해 도출된 PS, AT, TS간의 가중치 W는 W = (0.466, 0.209, 0.325)^T이다.

Table 4 Fuzzy mean value of criteria

	PS	AT	TS
PS	(1.00, 1.00, 1.00)	(1.27, 1.63, 1.83)	(0.93, 1.29, 1.71)
AT	(0.64, 0.86, 1.07)	(1.00, 1.00, 1.00)	(0.67, 0.84, 1.11)
TS	(0.81, 0.88, 1.23)	(1.07, 1.31, 1.54)	(1.00, 1.00, 1.00)

4.2 영향요인의 중요도

대안간의 선호도에 대해 범위 값을 활용하며, 이때 애매모호한 언어적 인지를 Fuzzy 삼각함수를 활용하여 효과적으로 산출하였다. Table 5는 Fuzzy AHP 기법에 의해 산출된 영향요인의 중요

Table 5 Weights of impact factors

Level 1		Level 2		Weight (C=A×B)	Rank
Criteria	Weight (A)	Sub-Criteria	Weight (B)		
Possibility of Successful Development Tech. Acquisition	0.466	Possibility for Fundamental Tech. Acquisition	0.477	0.222	2
		Tech. Level Compared with Advanced Countries	0.022	0.010	10
		Precedence over other Competitive Tech.	0.501	0.234	1
Applicability of the Tech.	0.209	Uniqueness of the Tech.	0.073	0.015	9
		Utilization of the Fused/Compostion Tech.	0.381	0.080	6
		Possibility of Commercialization	0.546	0.114	4
Tech. Spillover	0.325	Improvement Energy Efficiency	0.511	0.166	3
		Energy Supply	0.131	0.042	7
		Replacement of Tech.	0.285	0.093	5
		Expected Profit	0.073	0.024	8
Total	1.000	Total		1.000	

도를 나타낸다.

계층1(Level 1)에서는 기술개발의 성공가능성(0.466), 기술적 파급효과(0.325), 기술의 적용성(0.209) 순으로 중요도가 산출되었으며, 계층2(Level 2)에서는 경쟁기술과의 우위성(0.501), 상용화 가능성(0.546), 에너지효율 향상(0.511) 요인이 각각의 계층에서 1순위를 차지하였다.

영향요인에 대한 최종 가중치에서는 경쟁기술과의 우위성(0.234)이 가장 높게 산출되었으며, 그 다음으로는 원천기술 확보가능성(0.222), 에너지효율향상(0.166), 상용화 가능성(0.114), 기술수입 대체성(0.093) 등의 순으로 나타났다. 중요도가 가장 적은 하위 3가지 영향요인의 가중치는 기대 수익

성(0.024), 기술의 독창성(0.015), 선진국 대비 기술수준(0.010)로 나타났으며, 최상위 영향요인과 최하위 영향요인간의 가중치 편차는 0.224 이었다.

5. 결 론

신 고유가 및 기후변화협약에 대응하기 위한 에너지기술의 우선순위를 Fuzzy AHP 기법을 적용하여 표현함으로써 의사결정자들이 인지하는 언어적 선호도를 효과적으로 반영할 수 있었다. 현실적으로 의사결정문제는 불확실성을 내재하고 있으며, 이러한 해결책으로 Fuzzy AHP 기법을 에너지기술개발 정책분야에 적용함으로써 인간의 인지적 척도와 언어적 선호도를 효과적으로 정량화할 수 있었다.

본 연구는 미래전략 에너지기술개발의 우선순위를 정하기 위한 선정기준이 될 수 있는 영향요인을 발굴하고, Fuzzy AHP 기법으로 영향요인의 중요도를 산출하였다. 영향요인으로 3개의 criteria와 각 criteria별로 sub-criteria를 구성하여 총 10개의 영향요인을 발굴하였다. 각 영향요인 간의 criteria 가중치를 통해서 요인간의 중요도를 산출하였는데, 가장 중요도가 높은 세 가지 항목으로는 경쟁기술과의 우위성, 원천기술 확보 가능성, 에너지효율 향상 등이었고, 가장 낮은 항목은 선진국 대비 기술수준이었다. 과거에는 선진 기술들을 수입하여 모방하면서 기술의 자생력을 키워왔으나 이제는 경쟁기술, 원천핵심기술을 확보하는 것이 중요하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 발굴한 10가지의 영향요인과 요인별 중요도는 미래 에너지기술개발 후보를 도출하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 국가 에너지기술개발을 위한 방향성을 제시하고, 장기적 에너지기술개발 영역을 확보하는데 도움이 될 것이다.

본 연구에 적용한 Fuzzy AHP 기법은 향후의 미래전략 에너지기술개발의 세부기술 후보의 발굴과 기술별 우선순위 선정에도 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구의 설문에 응해주신 에너지기술개발분야 및 에너지기술정책분야 전문가에게 감사드립니다. 본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본연구사업의 연구비 지원으로 진행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Saaty, T. L., "The analytic hierarchy process", 1st edition, McGraw-Hill, NewYork. 1980. pp. 170-171.
- 2) Lee, S. K., Yoon, Y. J., Kim, J. W., "A study on making a long-term improvement in the national energy efficiency and GHG control plans by the AHP approach", Energy Policy, Vol. 35, No. 5, 2007, pp. 2862-2868.
- 3) Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey", Int. J. Production Economics, Vol. 87, 2004, pp. 171-184.
- 4) Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", Information and control, Vol. 8, No. 3, 1965, pp. 338-353.
- 5) Laarhoven, P.J.M., and Pedrycz, W., "A fuzzy extension of Saaty's priority theory", Fuzzy sets and systems , Vol. 11, No. 3, 1983, pp. 229-241.
- 6) Chang. D. Y., "Application of the extent analysis method on fuzzy AHP", European Journal of Operations Research, Vol. 95, No. 3, 1996, pp. 649-655.