

Fuzzy AHP기법을 적용한 에너지기술개발전략 우선순위 연구

이성곤*, Gento Mogi, 김종욱

A Fuzzy AHP Approach to Prioritize the Energy Technology Development Strategy and Policy

Seongkon Lee*, Gento Mogi and Jongwook Kim

Abstract

Energy environment has been changing rapidly such as high oil prices and the effectuation of UNFCCC. Oil prices have continued to rise and Dubai crude prices recorded about 90 dollars per barrel in 2007. In addition, the effectuation of UNFCCC will affect Korean economy and national energy security. Korea is the 9th CO₂ emissions country and takes the 1st place related to the increase rate of CO₂ emissions globally. Energy technology development is a key breakthrough and one of the optimal alternatives to cope with national energy security. In this study, we prioritize energy technologies in the sectors of high oil prices and UNFCCC related to ETRM for well focus R&D and efficiency of finite resources allocations. We applied to the extended method of AHP, fuzzy AHP reflecting the fuzziness of human thoughts and perception, for prioritizing the relative importance among energy technologies in ETRM for the first time as we make an energy policy in Korea.

Key words

Energy technology roadmap(에너지기술로드맵), Energy technology strategy(에너지기술 정책), Fuzzy AHP(퍼지 AHP), MCDM(다기준의사결정)

* 한국에너지기술연구원 정책연구실

☒ E-mail : sklee@kier.re.kr ☒ Tel : (042)860-3036 ☒ Fax : (042)860-3097

Subscrip

ETRM : energy technology roadmap
Fuzzy AHP : fuzzy analytic hierarchy process
MCDM : multi criteria decision making
TFN : triangular fuzzy number
UNFCCC : united nations framework convention on climate change

1. 서론

한국의 에너지 현황의 경우 에너지소비의 약 98%를 수입에 의존하는 세계 10위의 에너지다소비 국가이다. 2004년 CO₂ 배출량은 약 590.6백만 TC로 세계 9위이며, CO₂ 배출증가율은 세계 1위를 차지하고 있다. 최근 배럴당 80~90\$ 이상의 고유가 현상의 고착화로 우리의 경제는 직간접적 영향을 많이 받고 있다. 이러한 우리의 에너지환경 현황을 극복하고,

국가에너지 수급 안정화를 위해 에너지 기술개발을 통해서 돌파구를 마련해야한다. UNFCCC의 발효로 인하여 향후 2013년 기후변화협약 온실가스감축 의무대상국이 될 경우 우리경제는 많은 영향을 받을 것으로 예상되며, 사전에 전략적 에너지기술개발 및 준비가 필요하다.

에너지자원빈국으로써 능동적·적극적으로 대응하기 위한 최적 대안 중 하나는 에너지기술개발이다. 에너지기술개발은 고유가와 UNFCCC발효, 수소경제사회구현의 3대 에너지 환경변화를 해결할 수 있는 궁극적인 해결책이다.

최근 국가적 차원에서 에너지기술개발을 위하여 1997년 수립한 에너지자원기술개발계획이 종료되고, 2005년 에너지 효율향상, 온실가스처리기술, 신재생에너지기술, 전력기술, 자원기술 등의 5대 기술군(Technology sector)에 대하여 기술 중심의 기술트리를 구성하여 장기적 관점에서 국가에너지 자원기술개발 10개년 계획('06~'15)을 수립하였다.⁽¹⁾

전략적 에너지기술개발을 위해 KIER는 2005년 에너지자원수급 동향을 분석⁽²⁾하고 중장기적 관점에서 전략적 에너지기술개발을 위해 에너지기술개발 로드맵을 수립하였다.⁽³⁾ 2005년에 수립된 에너지기술로드맵은 2006년부터 2015년까지 향후 10년을 대비하여 선택과 집중이 필요한 에너지기술개발 분야에 대하여 기술개발 방향을 제시하고 있다.

본 연구는 수립된 에너지기술 로드맵상의 에너지기술의 기술개발 우선순위를 산출하여 에너지기술개발의 극대화 및 자원할당을 최적화하고자 한다. 에너지기술개발 우선순위를 정하기 위해 다기준의사결정기법(MCDM)중 하나인 Fuzzy AHP 기법을 적용하여 기술개발 우선순위를 산출하였다.

의사결정자의 기술개발 선호도를 평가하기위해 Fuzzy AHP 기법을 적용함으로써 현실상황의 불확실성이 내재되어 있는 상황을 고려하여 인간이 인지하고 의사결정을 내리는 사고의 애매 모호함(Ambiguous)을 보다 효과적으로 반영하였다. 에너지기술개발 우선순위 도출을 위해 에너지기술개발 우선순위 도출이라는 목표에 대하여 평가 기준이 되는 Criteria를 선정하고, 계층적 구조(Hierarchical structure)로 문제를 구조화 하였다.

AHP기법의 계층구조화의 장점과 의사결정자의 대안에 대한 상대적 가중치에 대한 범위값을 산출함으로써 기존의 AHP 기법을 확장한 Fuzzy AHP방법론을 적용하였다. 그 결과 평가자가 인지하고 선호하는 언어적 표현에 대하여 보다 현실적으로 정량적 수치를 반영하여 에너지기술개발 우선순위를 도출하였다.

의사결정자들의 선호를 명확한 수치(Crisp number)로 표현하는 AHP의 문제점을 인식하고 명확한 수치 대신 하한값(Lower value), 중앙값(Median), 상한값(Upper value)과 같은 범위값으로 표현함으로써 언어적 선호에 대한 모호성을 잘 반영할 수 있다.

본 연구의 결과로 산출된 기술개발 우선순위는 추후 에너지기술 정책 개발 및 에너지기술 정책 입안자의 의사결정시 기초 자료로 활용 가능하며 객관적 기술개발 방향을 제시하고자 한다.

2. Fuzzy 집합(sets)과 넘버(number)

현실세계에서 대안을 평가하는 의사결정과 같은 문제에서 정확한 데이터를 도출하는 것은 매우 어렵고, 의사결정자는 선호도에 대한 의사결정자가 느끼는 직감을 특정 수치보다는 언어적 표현을 더 선호한다. Fuzzy 이론은 애매모호함이 내재되어 있는 현실문제에서 의사결정자의 언어적 선호도를 효과적으로 반영하는 장점을 가지고 있다. 개략적 정보와 불확실성을 고려하여 사람의 생각과 지각을 정량적으로 반영함으로써 합리적인 의사결정 대안을 도출 할 수 있다.

AHP기법의 계층화 장점을 활용하고, AHP의 9점 척도의 한계를 극복하고, 언어적 표현 방식의 한계로 발생하는 모호성과 불확실성을 Fuzzy 이론을 활용하여 문제를 해결하는 방법이 많이 연구되고 있다. Fuzzy 이론은 1965년 미국 UC Berkeley의 Zadeh교수가 최초로 개념 정립을 하였다.⁽⁴⁾ Fuzzy 이론은 Fuzzy 집합(Fuzzy sets), 멤버십 함수(Membership function), Fuzzy 넘버(Fuzzy number)의 3가지 요소로 구성되어 있다. Van Laarhoven(1983)⁽⁵⁾은 삼각 Fuzzy 넘버를 활용한 Fuzzy 의사결정방법론은 최초로 제시하였다. Chang(1995)⁽⁶⁾은 Fuzzy 넘버의 요소를 비교하는 방법론을 제시하였다.

삼각 Fuzzy 넘버(TFN)는 대안 선정시 명확한 숫자 대신 하한, 중앙값, 상한의 범위값을 가진다. 즉 TFN $M_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 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.

$$(l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1+l_2, m_1+m_2, u_1+u_2) \quad (1)$$

$$(l_1, m_1, u_1) \odot (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (2)$$

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (3)$$

3. Fuzzy AHP의 개념

AHP기법은 1977년 Saaty가 최초로 개발하여 제시한 의사결정방법론⁽⁷⁾이며, Goal을 설정하고, 대안간의 가중치 산정을 위해 Criteria를 설정하고 문제를 계층화한후 대안간 쌍대비교를 통하여 가중치를 도출한다. AHP는 기획, 정책대안 선정, 자원할당, 입지선정, 무기체계 기종선정, 성과측정, 경제성 분석 등 다양한 분야에서 범용적으로 적용되고 있다. 본 연구는 AHP의 개념을 활용한 Fuzzy AHP기법을 적용하여 의사결정자의 언어적 애매모호함을 정량적으로 반영하여 에너지기술개발의 우선순위를 선정하고자 한다. Table 1은 Kahraman et al에서 적용한 Fuzzy scale⁽⁸⁾을 활용하였다. Fuzzy scale값을 1~9까지의 범위값을 활용하여 산정한 경우도 있으나, 본 연구에서는 언어적 척도에 대한 범위값을 1~4.5까지 반영하여 언어적 인지에 대한 범위값을 줄여 신뢰성을 높인 방법을 적용하였다.

Fuzzy AHP의 절차는 다음과 같다.

Step1: Fuzzy scale을 활용하여 Criteria간 및 대안간 쌍대비교를 실시하여 가중치의 평균값을 산정

Step2: 식 (4), (5), (6), (7)을 이용하여 속성 i번째의 TFN $S_i = (l_i, m_i, u_i)$ 값 산출

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$s.t \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{i=1}^n l_{ij}, \sum_{i=1}^n m_{ij}, \sum_{i=1}^n u_{ij} \right) \quad (6)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_{ij}} \right) \quad (7)$$

Step3: TFN 값 S_i 를 식 (8)을 이용하여 각각 비교하여 $S_i \geq S_j$ 인 degree of possibility를 산출

$$V(S_j \geq S_i) = height(S_i \cap S_j) = \mu_{S_j}(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } m_j \geq m_i \\ 0, & \text{if } l_i \geq u_j \\ \frac{l_i - u_j}{(m_j - u_j) - (m_i - l_i)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

d 는 u_{M_i} 와 u_{M_j} 의 가장 높은 교차점을 의미한다.

Step4: $V(S_i \geq S_j)$ 인 최소 degree of possibility를 식 (9)에 의해 산출

$$V(S \geq S_1, S_2, S_3, \dots, S_k), \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, k. = V[(S \geq S_1) \text{ and } (S \geq S_2) \text{ and } \dots \text{ and } (S \geq S_k)] = \min V(S \geq S_k) \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (9)$$

degree of possibility의 최소값은 식 (9)와 같음

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

가중치벡터 W 는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (10)$$

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

Step5: 가중치 벡터를 정규화하여 최종 가중 도출

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (11)$$

식 (11)에서 W 는 비퍼지 넘버이다.

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)

4. Criteria 및 Hierarchy

ETRM내의 에너지기술개발의 기술개발 우선순위도출을 위해 Criteria로 경제적 파급효과, 상용화가능성, 내부역량, 기술적 파급효과 4개를 선정하였다. AHP기법의 평가 기준간의 독립성을 보장하기 위해서 평가기준 선정시 평가

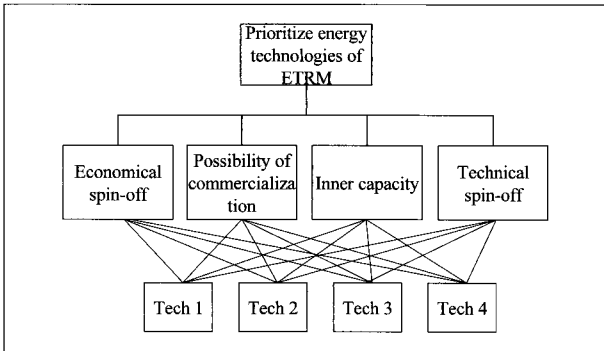


Fig. 1 Hierarchy of criteria.

기준간 상화 의존거나 종속되지 않는 독립된 속성을 고려하여 평가기준을 선정하였다. Fig. 1은 계층구조를 도식한 것이다.

평가 기준 및 대안간의 상대적 가중치 산정을 위한 에너지기술분야 및 정책분야 5년~20년 이상 종사한 전문가 8명을 대상으로 수행하였다. 그중 일관성이 있는 값만을 선정하여 가중치를 산출하였다. 본 설문결과 8명중 5명이 일관성 지수 (C.R) 0.1이하로 나와서 최종 5명의 가중치만을 활용하였다.

5. ETRM의 기술 분류 현황

Table 2는 ETRM의 기술 분류 현황중 고유가 및 기후변화협약대응 기술만을 나타낸 것이다.

고유가대비 기술은 건물기술, 산업기술, 수송기술, 석탄기

Table 2. Energy technologies of ETRM

Sector	Technologies
High oil prices	Building tech
	Industry tech
	Transportation tech
	Coal tech
	Non-conventional tech
	Biomass tech
UNFCCC	Solar tech
	Wind power tech
	Geothermal & small hydrogen tech
	CO ₂ capture tech

술, 비재래형 기술, 바이오매스기술 등의 6개의 에너지기술로 구성되었다. 기후변화협약대응 기술은 태양열(광)기술, 풍력기술, 지열 및 소수력 기술, CO₂ 처리기술 등의 4개의 기술로 구성되었다.

6. 수리 예제

6.1 Criteria 가중치

경제적 파급효과(EP), 상용화가능성(PC), 내부역량(IC), 기술적 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 (4), (5), (6), (7)에 의해 Criteria의 TFN값을 산출하였다. S₁(ES)는 (0.20,0.28,0.39), S₂(PC)는 (0.20,0.28,0.39), S₃(IC)는 (0.16, 0.23,0.33), S₄(TS)는 (0.14,0.22,0.34)로 각

Table 3. Fuzzy evaluation of criteria

	ES	PC	IC	TS
ES	(1,1,1)	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (1,1,1)	(1,1,1) (1,1,1) (2/3,1,3/2)	(2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2) (3/2,2,5/2)
		.	.	.
		.	.	.
		.	.	.
		.	.	.
PC	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2)	(2/3,1,3/2) (1,1,1) (3/2,2,5/2)
	.		.	.
	.		.	.
	.		.	.
IC	(1,1,1) (1,1,1) (2/3,1,3/2)	(1,1,1) (2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2)	(1,1,1)	(2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2)
	.	.		.
	.	.		.
	.	.		.
	.	.		.
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)	(2/3,1,3/2) (1,1,1) (2/3,1,3/2)	(1,1,1)
	.	.	.	
	.	.	.	
	.	.	.	
	.	.	.	

Table 4. Fuzzy mean value of criteria

	ES	PC	IC	TS
ES	(1.00,1.00,1.00)	(0.93,1.00,1.10)	(1.03,1.20,1.40)	(1.00,1.40,1.90)
PC	(0.93,1.00,1.10)	(1.00,1.00,1.00)	(0.97,1.20,1.50)	(1.07,1.40,1.80)
IC	(0.81,0.90,1.03)	(0.75,0.90,1.13)	(1.00,1.00,1.00)	(0.67,1.00,1.50)
TS	(0.56,0.80,1.17)	(0.63,0.80,1.07)	(0.67,1.00,1.50)	(1.00,1.00,1.00)

각 산출되었다.

식 (8)과 (9)에 의해 $V(S_i \geq S_j)$ 인 degree of possibility를 산출하면, $D'(1)$ 은 $\min V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4) = \min(1.00, 1.00, 1.00) = 1.00$, $D'(2)$ 는 $\min V(S_2 \geq S_1, S_3, S_4) = \min(1.00, 1.00, 1.00) = 1.00$, $D'(3)$ 는 $\min V(S_3 \geq S_1, S_2, S_4) = \min(0.72, 0.74, 0.94) = 0.72$, $D'(4)$ 는 $\min V(S_4 \geq S_1, S_2, S_3) = \min(0.70, 0.70, 0.94) = 0.70$ 로 산출되었다.

식 (10)과 (11)에 의해 도출된 ES, PC, IC, TS간의 가중치 W 는 $W = (0.29, 0.29, 0.21, 0.20)^T$ 이다.

6.2 에너지기술의 가중치

Table 5는 ETRM중 고유가 및 기후변화협약의 기술간 기술개발 우선순위를 도출한 것이다.

인간의 언어적 인지를 구간값으로 반영하여 애매모호한 언어적 인지를 fuzzy 삼각함수를 활용하여 효과적으로 산출하였다. 고유가대비기술의 경우 건물기술(0.27), 석탄기술(0.24) 순서로 선호되었으며, 기후변화협약대응기술의 경우 CO₂ 처리기술(0.32), 태양광(열)기술(0.25) 순서로 선호되었다.

Table 5. Energy technologies of ETRM

sector	Technologies	Weight	Rank
High oil prices	Building tech	0.27	1
	Industry tech	0.12	4
	Transportation tech	0.23	3
	Coal tech	0.24	2
	Non-conventional tech	0.07	6
UNFCCC	Biomass tech	0.08	5
	Solar tech	0.25	2
	Wind power tech	0.23	3
	Geothermal & small hydrogen tech	0.20	4
	CO ₂ capture tech	0.32	1

7. 결론

ETRM의 고유가와 기후변화협약대응기술의 기술개발 우선순위를 Fuzzy AHP기법을 최초로 적용하여 의사결정자들이 인지하는 언어적 선호도를 효과적으로 반영할 수 있었다. 현실세계의 의사결정문제는 불확실성을 내재하고 있으며, 이러한 해결책으로 Fuzzy AHP기법을 에너지 정책수립부문에 최초로 적용함으로써 애매모호한 인간의 인지적 척도와 언어적 선호도를 효과적으로 정량화가 가능하다.

본 연구의 결과는 추후 에너지기술개발정책 수립시 정책입안자의 의사결정 근간자료로 활용 가능할 것이다. 또한 추후 연구로 경제성측면에서 개발비용을 고려한 Fuzzy AHP/DEA 혼합형 모형을 적용함으로써 경제성 및 생산성관점에서 기술별 대안 및 우선순위를 선정함으로써 의사결정자로 하여금 보다 진보된 가중치 및 기술개발우선순위를 도출할 예정이다.

또한 설문자의 정량적 수가 연구분야 전문가 8명을 대상으로 하였기에 추후 연구에서는 에너지분야의 전문가 설문수를 확대하여 추진함으로써 가중치값의 신뢰도를 보다 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

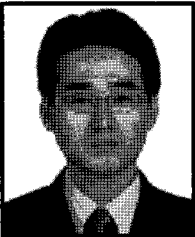
본 연구의 설문에 응해주신 에너지기술개발분야 및 정책분야 전문가분들께 감사합니다. 본연구는 과기부 HERC의 연구비 지원으로 진행되었습니다.

References

- [1] Lee, S. K., Yoon, Y. J., Kim, J. W., 2007, "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, pp. 2862-2868.
- [2] Kim, J. W., Lee, S. K, 2005, "World energy outlook and measures", KIER-A52417, pp. 299-354.
- [3] Lee, S. K., Kim, J. W., Yoon, Y. J., Kang, S. P. 2006, "A study on formulating KIER long-term strategic energy technology roadmap coping with upcoming 10-year",

- 6th Korea-China Workshop on Clean Energy Technology, pp. 1257-1263.
- [4] Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy sets", Information and control, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353.
- [5] Laarhoven, P.J.M., Pedrycz, W., 1983, "A fuzzy extension of Saaty's priority theory", Fuzzy sets and systems, Vol. 11, No. 3, pp. 229-241.
- [6] Chang. D. Y., 1996, "Application of the extent analysis method on fuzzy AHP", European Journal of Operations Research, Vol. 95, No. 3, pp. 649-655.
- [7] Saaty, T. L., 1980, "The analytic hierarchy process", 1st edition, McGraw-Hill, NewYork.
- [8] Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., 2004, "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey", Int. J. Production Economics, Vol. 87, pp. 171-184.

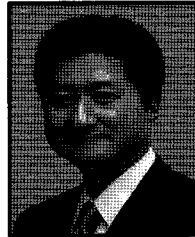
이성곤



2000년 한국외국어대학교 산업공학과 공학사
 2000-2001년 산업공학연구정보센터(CIMERR)
 O.R분야 정보자문 및 연구원
 2002년 고려대학교 산업공학과 공학석사
 2003-2005년 한국국방연구원 무기체계연구센터
 연구원

현재 한국에너지기술연구원 정책연구실 연구원
 (E-mail : sklee@kier.re.kr)

겐토 모기(Gento Mogi)



1982년 日本 동경대학교 자원개발공학과 공학사
 1982-1985년 일본광업사(Nippon Mining
 Co.Ltd.) 근무
 1991년 日本 동경대학교 공학박사

현재 日本 동경대학교 기술경영학과 부교수
 (E-mail : mogi@tmi.t.u-tokyo.ac.jp)

김종욱



1980년 고려대학교 산업공학과 공학사
 1991년 아주대학교 에너지공학과 공학석사
 1999년 아주대학교 에너지공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 정책연구실 책임연구원
 (E-mail : jongwkim@kier.re.kr)