

Fuzzy AHP기법을 적용한 전략적 에너지기술정책 연구

이 성곤¹⁾, Gento Mogi²⁾, 윤 용진¹⁾, 김 종욱¹⁾

A study on the strategic energy technology policy: Fuzzy AHP approach

Seongkon Lee, Gento Mogi, Yongjin Yoon, Jongwook Kim

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

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 60 or 70 dollars per barrel in 2006. 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.

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. 서 론

한국은 에너지소비의 약 98%를 수입에 의존하는 세계 10위, 에너지소비 증가율 세계 1위의 에너지소비대국이다. 2004년 CO₂ 배출량은 약 590.6백만 TC로 세계 9위이며, CO₂ 배출증가율은 세계 1위를 차지하고 있다.

최근 배럴당 60~70\$의 고유가 현상의 고착화로 인해 우리의 경제는 직간접적 영향을 많이 받고 있다. 국가에너지 수급 안정화 차원에서 에너지 기술개발 및 자원 확보에 대한 관심이 증대하

고 있고, UNFCCC의 발효로 인하여 향후 2013년 기후변화협약 온실가스감축 의무대상국이 될 경우 우리경제는 많은 영향을 받을 것으로 예상되며, 사전에 전략적 준비가 필요하다.

우리의 에너지환경 변화를 고려하고, 에너지 자원빈국으로써 능동적·적극적으로 대응하기 위한 최적 대안 중 하나는 에너지기술개발이다. 에너지기술개발은 고유가와 UNFCCC발효, 수소경제사회구현의 3대 에너지 환경변화를 해결할 수 있는 돌파구라 할 수 있다.

최근 국가적 차원에서 에너지기술개발을 위하

-
- 1) 한국에너지기술연구원 정책연구센터
E-mail : sklee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3036 Fax : (042)860-3097
 - 2) University of Tokyo, 혁신기술경영학과 부교수
E-mail : mogi@tmi.t.u
Tel : +81-3-5841-7046 Fax : +81-3-3818-7492
 - 3) 한국에너지기술연구원 정책연구센터
E-mail : yjyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3090 Fax : (042)860-3097
 - 4) 한국에너지기술연구원 에너지정책연구부
E-mail : jongwkim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3200 Fax : (042)860-3302

여 1997년 수립한 에너지자원기술개발계획이 종료되고, 2005년 에너지효율향상, 온실가스처리기술, 신재생에너지기술, 전력기술, 자원기술 등의 5대 기술군(Technology sector)에 대하여 기술 중심의 기술트리를 구성하여 장기적 관점에서 국가에너지자원기술개발 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 AHP기법을 적용하여 기술개발 우선순위를 산출하였다.

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

AHP기법의 계층구조화의 장점과 의사결정자의 대안에 대한 상대적 가중치에 대한 범위값을 산출함으로써 기존의 AHP기법을 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), 멤버쉽 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 방법론은 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.

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

$$=(l_1+l_2, m_1+m_2, u_1+u_2)$$

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

$$=(l_1l_2, m_1m_2, u_1u_2)$$

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

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 가중선정, 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 Fuzzy scale^[8]에 대하여 기술하였다.

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)

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 $S_j \geq S_i$ 인 degree of possibility를 산출

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

d 는 u_{m_i} 와 u_{m_j} 의 가장 높은 교차점을 의미한다.

Step4: $V(S_j \geq S_i)$ 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 가중도출

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

식(11)에서 W 는 비퍼지 넘버이다.

4. Criteria 및 Hierarchy

ETRM내의 에너지기술개발의 기술개발 우선 순위도출을 위해 Criteria로 경제적 파급효과, 상용화가능성, 내부역량, 기술적 파급효과 4개를 선정하였다. Fig. 1은 계층구조를 도식한 것이며 요소가 가중치 산정을 위한 설문조사를 실시했다.

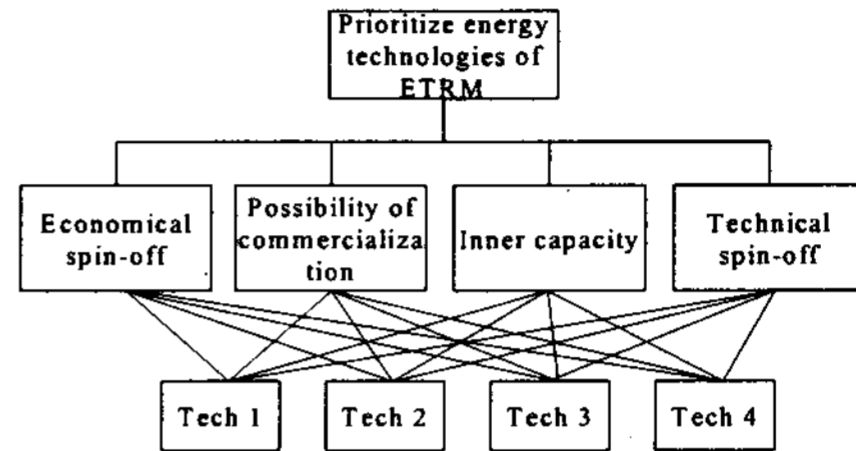


Fig. 1 Hierarchy of criteria

5. ETRM의 기술 분류 현황

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

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

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 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) (2/3,1,3/2) (2/3,1,3/2)	(1,1,1)

Table 4는 Criteria간의 fuzzy 선호도의 평균값을 나타낸 것이다. Criteria간의 fuzzy 평균값을 도출하고 식(4), (5), (6), (7)에 의해 Criteria의 TFN값을 산출하였다. $S_1(ES)$ 는 (0.20,0.28,0.39), $S_2(PC)$ 는 (0.20,0.28,0.39), $S_3(IC)$ 는 (0.16,0.23,0.33), $S_4(TS)$ 는 (0.14,0.22,0.34)로 각각 산출되었다.

Table 4. Fuzzy mean value of criteria

	ES	PC	IC	TS
ES	(1.00,1.0 0,1.00)	(0.93,1.0 0,1.10)	(1.03,1.2 0,1.40)	(1.00,1.40, 1.90)
PC	(0.93,1.0 0,1.10)	(1.00,1.0 0,1.00)	(0.97,1.2 0,1.50)	(1.07,1.40, 1.80)
IC	(0.81,0.9 0,1.03)	(0.75,0.9 0,1.13)	(1.00,1.0 0,1.00)	(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)	(1.00,1.0 0,1.00)

식(8)과 (9)에 의해 $V(S_j \succ S_i)$ 인 degree of possibility를 산출하면, $D(1)$ 은 $\min V(S_1 \succ S_2, S_3, S_4) = \min(1.00, 1.00, 1.00) = 1.00$, $D(2)$ 는 $\min V(S_2 \succ S_1, S_3, S_4) = \min(1.00, 1.00, 1.00) = 1.00$, $D(3)$ 는 $\min V(S_3 \succ S_1, S_2, S_4) = \min(0.72, 0.74, 0.94) = 0.72$, $D(4)$ 는 $\min V(S_4 \succ S_1, S_2, S_3) = \min(0.70, 0.70, 0.94) = 0.70$ 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 것이며, 고유가 대비기술의 경우 건물기술, 석탄기술 순서로 선호되었으며, 기후변화협약대응기술의 경우 CO₂ 처리기술, 태양광(열) 기술 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 정책 수립부문에 최초로 적용함으로써 애매모호한 인간의 인지적 척도와 언어적 선호도를 효과적으로 정량화가 가능하다.

본 연구의 결과는 추후 에너지기술개발정책 수립시 의사결정의 근간 자료로 활용 가능할 것이다.

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.