

MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 평가 및 선정 연구

A Study on Technology Assessment & Selection for the Next Generation Energy Technology Using MAUT

이 덕 기* · 박 수 역** · 김 경 희*** · 양 종 택****

〈目 次〉

- I. 서 론
- II. 기술평가 및 선정을 위한 방법론의 고찰
- III. MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 평가 및 선정
- IV. 결 론

<Abstract>

Technology evaluation is one of the key issues in discussions on the development of evaluation methods. This paper deals with some methods for the evaluation of new energy technologies, which were appraised by MAUT from various outlooks: economics, environment, and resource saving. MAUT is considered to be the proper method for evaluating the next generation energy technology, since it can evaluate alternatives that comprise basic criteria.

This paper analyzes a priority order of 13 new energy technologies selected by groups of energy technology experts through two steps. Converted utility technology shows the highest value in economics.

Key words : 에너지기술, 기술평가, MAUT

본 논문은 공공기술이사회에서 "에너지기술 조사분석사업"으로 지원된 사업임을 밝힌다.

* 한국에너지기술연구원 기술이전연구팀장, deokki@kier.re.kr

** 한국에너지기술연구원 기술확산연구부장, supark@kier.re.kr

*** 한국에너지기술연구원 연구원, softee@kier.re.kr

**** 충북대학교 경영학과 교수, yang2331@trut.chungbuk.ac.kr

I. 서론

1. 개요

에너지분야는 국가 경제 활동의 근간이 되는 기반 산업으로서 경제의 안정적 성장에 영향을 미치는 공공성이 강한 산업이다. 그렇기 때문에 에너지 기술혁신 연구를 통한 장기적 비전의 설정과 함께 신기술투자의 전략과 효율성, 기술혁신 파급효과를 극대화하는 방안 마련이 무엇보다 필요하다. 에너지 기술혁신의 중요성을 부각시키고 있는 것으로서 가장 큰 이유는 기존의 화석에너지사용에 따른 환경문제로서 지구환경문제와 밀접한 관계성을 지니고 있다.

실제 우리 나라의 에너지 소비는 2000년 들어 IMF 이전 수준으로 다시 되돌아가 총 192,440천TOE를 소비한 것으로 나타났는데 이는 1997년 총 에너지 소비인 180,638천TOE를 넘어서는 수준을 보이고 있다. 수입의존도에 있어서도 연도를 더해가며 지속적인 증가를 보여 왔으며 2000년 들어서는 97.3%를 차지하고 있다.¹⁾

환경문제와 관련하여 주요 선진국은 기후변화협약(FCCC) 관련, 탄산가스(CO₂) 감축의무를 준수하고 환경과의 조화로운 경제발전을 위한 에너지기술개발이 필수적이라는 인식하에 에너지 절약 및 대체에너지 기술개발에 중점 투자하고 있다. 특히, 미국과 일본은 제반 에너지기술분야에서 선도적 역할을 꾸준히 추구하여 왔으며 핵융합, 우주발전, 수소에너지, 석탄액화 등 첨단 미래기술을 포함하는 모든 기술분야에 광범위하게 투자하고 있다. 경제규모가 작은

OECD 선진국들은 각국의 실정에 따라 실현가능성이 높고 파급효과가 큰 분야에 한정된 재원을 집중 투자하고 있으며 장기간 대규모 투자가 요구되는 첨단미래 기술에 대해서는 공동 연구방식을 취하고 있다. 국제 에너지기구(IEA)의 경우, 각 회원국들이 공유할 수 있는 전략적 기술 중심으로 회원국간 에너지기술 정보의 공유 및 공동연구를 통한 예산절감 및 전문인력 활용을 위하여 에너지기술 공동 연구개발 사업을 활발히 추진 중에 있다. 우리 나라 역시 모든 에너지 기술분야에 광범위하게 투자하기 보다는 국제적 에너지사용 규제에 대비, 자원확보, 기술파급효과 등과 같은 여러 요인들을 고려한 집중적인 투자를 위한 시도가 점차 이루어지고 있다. 에너지기술은 기술 확보 및 개발 여하에 따라 기대할 수 있는 효과는 실로 막대한 국가적 공공 이익성 재화라고 할 수 있으며 이러한 에너지기술은 그 적용범위 뿐만 아니라 개발 분야에 있어서도 공학의 전 분야를 망라하고 있는데 본 연구는 많은 에너지기술 중 2010년을 대비하여 차세대 에 혁신되어야 할 기술분야를 선정하여 제시하였다.

2. 연구동향

최근 에너지기술과 같이 경제적 가치뿐만 아니라 비경제적 가치 또한 중요한 평가기준이 되는 기술의 가치평가를 위하여 많은 연구들이 수행되고 있다. 허은영(2000)은 이러한 가치평가의 최근동향으로 조건부가치평가법(CVM : Contingent Valuation Method), 다속성효용평가법(MAUA : Multi-Attribute Utility Assessment), 조건부청구권가치평가법(Real Option

1) KEEI (2001), *Monthly Energy Statistics*, 6, p. 10.

Pricing Method)을 중심으로 소개하였고²⁾, 민완기 외(2000)와 유승훈 외(2000)는 각각 多屬性效用理論(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)과 조건부 가치평가법을 이용하여 개발중인 기술의 가치를 평가하였다³⁾. 또한 Robert(1999)는 Option pricing과 의사결정분석모형(Decision Analysis Model)을 이용하여 연구분야를 선정하고 그것의 최적 포트폴리오를 구성하였다. 그리고, Gordon(2000)은 현재 미국에서 행해지고 있는 가치평가방법을 여러 기술에 따라 비용접근법, 수익접근법, 시장접근법 중심으로 설명하였다. 본 연구에서 채택한 방법인 MAUT를 이용한 연구로는 Behnam(1999)이 있으며 이는 비선형 다항함수로 표현되는 의사결정대안의 순위결정과 대안평가를 하였다. 한편, Clifford(2001)는 다속성을 갖는 가치평가 문제를 위해서 조건부가치측정법의 특징인 지불의사액(WTP: willingness-to-pay)을 유도하는 데에 MAUT를 이용한 바 있으며 Komaragiri(1999), Chapman(1999) 역시 대안결정에 MAUT를 이용하였으나, 각각 2명의 평가자가 의사결정에 참여하거나, 속성이 표현될 수 있는 경우의 수를 3가지로 정함으로 인해 다른 문제에 적용하기에는 제한이 있었다. 또한 AHP와 MAUT를 의사결정에 이용한 연구로는 Ho(1999) 등과 Bard(1992)가 있다. 이처럼 대안결정과 평가를 위한 많은 연구가 있어 왔지만 가치평가기법을 이용하여 다속성을 가진 복수의 에너지기술을 평가한 연구는 없었으며 본 연구에서는 차세대 기술혁신분야를 선정하기 위해 다속성효용이론(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)을 이용하여 기술들을 평가하고

이에 따른 우선순위를 결정하여 제시하였다.

II. 기술평가 및 선정을 위한 방법론의 고찰

1. 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process: AHP)

AHP는 여러 대안들을 다수의 목표 또는 요인에 의하여 평가하는 방법으로 기술성 및 파급효과 등의 정성적인 평가와 경제성 및 환경성 등의 정량적인 평가를 동시에 수행할 수 있는 방법이다. 이 기법은 Saaty(1980)에 의해서 제안된 방법으로 다요소 의사결정 문제의 속성(attribute)들 사이에 최상위 계층에 의사결정의 최종목표, 중간 계층에는 의사결정의 요소들, 최하위 계층에 대안을 배치한 계층구조를 형성한다. 이러한 AHP의 적용절차는 다음과 같다. ①의사결정 과제의 관련요소를 분해하는 단계로서, 계층구조를 형성한다. ②요소들을 쌍대비교 하는 단계로서, 각 계층내의 의사결정요소들 사이의 쌍대비교에 의하여 계층별로 쌍대비교 행렬을 구한다. ③중요도를 계산하는 단계로서, 각 계층내의 의사결정 요소들 사이에 상대적 중요도를 계산한다. ④복합가중치를 구하는 단계로서, 각 계층별로 얻어진 요소들의 중요도를 결합하여 대안들 사이의 중요도를 계산한다⁵⁾. 이와 같은 절차를 갖는 AHP는 정량적인 정보와 정성적인 정보를 동시에 평가할 수 있는 방법으로서, 구어적인 응답에 적절한 척도를 부여할 수 있어서 응답자들이

2) 허은영 (2000), "가치평가기법의 최근동향", 「기술혁신학회지」, 제3권 제1호, 3, p. 37.

3) 설성수, 민완기, 오완근 외 (2000), 「ETRI 주요연구개발 사업의 파급효과 분석」, ETRI.

4) 민완기 외 (2000), "CDMA의 비경제적 가치 평가", 「기술혁신학회지」, 제3권 제1호, 3, p. 127.

5) Saaty, T. L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill.

이해하기 쉽다. 또한 전체 계층에서의 선호를 비교하는 것이 아니라, 같은 계층구조의 요소들 중에 두 요소씩만 비교하는 쌍대비교를 하기 때문에 응답이 용이하며 일관성 지수를 이용하여 각 응답자의 일관성을 검증할 수 있다. 반면, AHP는 계층구조를 개발하는데 이론적 틀이 존재하지 않기 때문에 의사결정 문제를 계층화할 때 평가자의 경험과 능력에 종속되고, 전 계층에 대한 기준의 세분화와 많은 대안을 평가함으로써 과도한 쌍대비교를 요구할 수 있다. 또한 대안의 추가나 삭제에 의해 기존 대안의 평가가 달라지며 심한 경우에는 대안간의 우선순위가 변할 수도 있다.

2. 조건부가치추정법(Contingent Valuation Methods : CVM)⁶⁾

CVM은 경제학자와 정책평가자들 사이에서 가장 널리 사용되고 있는 공공재의 가치추정방법으로 관련된 재화의 최대 지불의사액(Willingness - To - Pay : WTP) 즉, 사람들이 특정 재화나 서비스를 공급받기 위해 지불할 의사가 있는 최대 금액인 WTP를 직접 이끌어 내는 특징을 가지고 있는 방법으로서 이 방법은 아직 시장화되지 않은 신기술 또는 기술혁신 신제품에 대한 평가방법으로 이용이 확대되고 있는 추세이다. CVM의 적용절차는 다음과 같다. ①분석대상비 시장재화를 설정한다. ②시나리오를 작성하는 단계로서, 전달하고자 하는 내용을 정확히 전달하면서 응답자들이 이해하기 쉽도록 시나리오를 작성한다. ③설문지를 보완하는 단계로서, 운용에서 예상될 수

있는 여러 가지 편의(bias)를 방지할 수 있도록 설문지를 보완한다. ④설문을 시행하는 단계로서, 충분히 교육받은 설문조사원의 역할이 강조된다. ⑤자료를 취합 분석하는 단계로서, 설문으로부터 얻어진 자료로부터 필요한 정보를 이끌어 낸다. CVM의 특징은 지불의사를 유도하도록 시나리오를 작성하는 것이다. 지불의사를 유도하는 방법은 일관성과 저항적 지불의사(protest bids)를 사전에 방지하기 위해서, 주로 이중경계 양분선택형 질문법(DBDC : double - bounded dichotomous choice question)을 이용한다. 이 방법은 먼저 각 응답자에게 두 개의 금액을 차례로 제시하여 자신의 WTP가 제시된 금액보다 크거나 같은지에 대해 “예” 또는 “아니오”의 응답을 요구한다. 그 다음의 질문은 첫 번째의 응답 금액에 따라 달라지는데, 첫 번째 제시금액에 대한 응답이 “예”이면 이보다 큰 금액을 제시하고, “아니오”이면 이보다 작은 금액을 제시한다. 이때 제시되는 금액은 예상되는 지불의사액에 근거하여 여러 개가 결정되며, 이것 중 한가지 금액을 임의로 각 응답자에게 제시하고, 각 제시금액은 비슷한 수의 응답자들에게 배당되도록 한다. 끝으로 제시된 금액과 “예”라고 대답한 응답자의 비율을 분석함으로써 평균 지불의사액을 결정한다. 이러한 특징을 갖는 CVM은 유효성 및 신뢰성을 검사할 수 있도록 설계가 가능하나, 지불의도에 의해 좌우될 수 있는 단점을 갖는다. 이러한 편의(bias)로는, 반응을 속이려는 유인으로부터 발생하는 편의, 암시된 가치에 의한 단서 편의, 시나리오의 잘못된 묘사에 의해 발생하는 편의 등이 있다.

6) CVM에 대한 용어 및 관련 자료는 “케이블 TV 방송 신제품의 잠재적 가치평가(유승훈외, 기술혁신학회지, 2000. 3)”에서 제기한 내용과 “Mitchell, R. C and R. T. Carson, Using Surveys to Public Goods : The Contingent Valuation Method, Resources for the Future, Washington DC. 1989”을 참고하였다.

3. 다속성 효용이론(Multi - Attribute Utility Theory : MAUT)

MAUT는 평가대상에 관해 여러 속성으로 세분화하고 그 속성에 가치판단을 할 수 있도록 숫자를 부여하여 속성의 가치로부터 문제해결이 가능하도록 해 주는 이론이다(Goicoechea et al., 1982). 이러한 MAUT의 적용절차는 다음과 같다. ①속성 및 속성 수준의 정량화 결정 단계 : 대상과 관련된 문제를 수집, 분석, 식별하여 속성을 도출하며 속성의 평가 단위, 평가 범위 등을 결정한다. ②대안 도출 단계 : 최종 우선순위를 결정할 수 있는 대안의 도출 ③단일속성 효용함수를 도출하는 단계 : 多屬性 效用函數의 구성요소로서 속성의 효용을 결정한다. ④속성의 중요도를 평가하는 단계 : 속성의 주어진 범위에서 속성간의 우선순위를 결정한다. ⑤多屬性 效用函數를 도출하는 단계 : 단일속성 效用函數를 결합하여 多屬性 效用函數를 도출한다. ⑥屬性值 및 技術代案의 效用值 算出 단계 : 속성치를 산출하고 도출된 다속성 효용함수에 대입하여 각 기술대안들의 효용치를 산출한다. ⑦代案의 評價 및 分析 : 평가값을 바탕으로 대안의 우선 순위를 결정하고 최적 대안을 결정한다⁷⁾. MAUT 역시 시장가치와 비 시장가치를 통합할 수 있으며, 위의 두 방법에 비해 가장 두드러진 장점은 각 속성에 대해 넓은 범위의 가치를 유도하므로 조건의 변화에 따른 추가 계산에 필요한 정보를 얻을 수 있어서 가변하는 조건에 유연성이 크다는 장점이 있다.

Ⅲ. MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 평가 및 선정

앞장에서 설명한 MAUT의 적용절차를 기초로 하여 본 연구의 핵심인 에너지기술 분야의 차세대 혁신 기술을 선정하기 위한 적용절차를 ①속성 결정 및 속성수준의 정량화, ②기술대안 결정, ③단일속성 효용함수 도출, ④속성의 중요도 결정, ⑤다속성 효용함수 도출, ⑥속성치 및 기술대안의 우선순위 결정으로 설정하고 이에 따른 분석 및 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 MAUT 적용을 위한 전문가 서면평가를 3차에 걸쳐서 실시하였는데 1차는 속성과 기술대안을 결정하기 위해, 2차와 3차는 동일한 내용을 평가한 것으로, 단일속성 효용함수 도출 및 속성의 중요도 결정과 다속성 효용함수 도출 및 속성치를 결정하기 위하여 실시하였다. 또한, 평가의 객관성을 위하여 1차, 2차, 3차에 참여한 전문가는 서로 다르게 구성하였다. 이를 위한 대상으로는 국내 유일의 전문연구기관에 소속된 인력을 중심으로 실시하였으며 1차의 서면평가에서는 13인을 대상으로, 2차는 경력 20년 이상의 연구인력 7인을 대상으로, 3차는 경력 15-20년의 연구인력 7인을 대상으로 하였다. 한편, 각 기술대안에 따라 전문가의 편의를 평준화하기 위해 각 전공별, 각 분야별로 전문가를 고루 안배하여 시행하였다.

1. 속성 결정 및 속성수준의 정량화

7) Goicoechea, A., D. Hansen, L. Duckstein (1982), *Multiojective decision analysis with engineering and business application*, Wiley.

속성이란 사물의 주요성질로서 본 연구에서는 에너지 기술이 혁신되어야 하는 이유를 의미한다. 1차 설문을 실시하기 전에 내부적으로 국내에서 발행된 여러 기획보고서 등을 고려하여 속성과 기술을 선정한 후, 1차 설문에서 이들에 대하여 각각 우선순위를 명시토록 하였으며 본 연구의 취지에 맞는 속성과 기술을 추천하도록 하였다. 이러한 결과에 따라 차세대 에너지 기술혁신을 위하여 고려하여야 할 6개의 속성이 결정되었다. 각 전문가의 대속성에 대한 우선순위를 평가한 가중치는 환경성 0.487, 경제성 0.231, 자원성 0.282로 나타났다. 그리고 대속성에 의한 세부 속성도 같은 방법으로 평가한 결과 세부속성의 순위는 에너지 이용효율 향상, 자원 공급가능량, CO₂ 저감의 순서로 평가되었다. 그리고 VOC(휘발성유기화합물) 저감은 1차 설문지에는 없는 속성이었지만 많은 전문가의 강한 추천이 있었으며 이의 중요도를 또 다른 여러 관련분야 전문가에 문의한 결과 그 중요성이 인정되어 속성으로 정하였다. 한편, 응답에 따라 제안된 여러 속성들로는 사회적, TSP 저감, 로알티 지급액, 에너지 저소비 생활 등이 있었으나 우선 순위에서 뒤지거나 평가기준이 명확하지 않기 때문에 제외시켰다.

2. 기술대안의 결정

본 연구의 특징은 하나의 기술에 대한 효용을 평가하는 것이 아니라, 여러 기술들의 효용을 한꺼번에 평가하여 이들의 중요도를 결정하는 것이다. 그런데, 대상기술인 에너지 기술자체의 종류가 너무나 광범위하고 차세대 에너지 기술혁신을 목표로 하기 때문에 가능한 모든 기술을 비교한다는 것은 어렵다. 따라서 각각 기술이 지닌 특성과 중요도 등을 고려하여 대속성 별로 적정한 기술대안들을 선정하였다.

이러한 기술대안의 선정은 1차 설문을 기준으로 이루어 졌으며 1차 설문에서는 각 기술에 대한 중요성을 부여토록 하는 서열평가를 실시하여 그에 따라 각각의 속성별 기술들을 결정하였다. 우선, 대속성별로 기술을 선정하였으며 각각의 기술들은 환경성의 대표기술 18, 경제성의 대표기술 15, 자원성의 대표기술 17기술의 총 50개 기술을 가지고 분야별 전문가들의 서열평가 및 추천에 의한 순위를 결정하였다. 다음으로 각 기술에서 몇 개의 기술을 선택할 것인가를 결정하는 기준으로는 각 대속성이 지니고 있는 중요성의 비율을 가지고 각 분야별 평가 및 분석 대상 기술의 수를 결정하였다. 예로서 환경성의 중요도를 평

〈표 1〉 속성과 속성수준의 정량화

대 속 성	세 부 속 성	속성수준의 정량화
환경성(0.487)	1. CO ₂ 저감(0.395)	CO ₂ 저감량(TC)
	2. SO _x , NO _x 저감(0.355)	SO _x , NO _x 저감율(%)
	3. VOC(휘발성유기화합물) 저감	VOC 저감률(%)
경제성(0.231)	4. 에너지 이용효율 향상(1.000)	에너지 이용 효율 향상율(%)
자원성(0.282)	5. 자원 공급가능량(0.447)	자원 공급 증가 정도(TOE)
	6. 기술파급효과(0.368)	기술개발에 따른 경제가치 증가(억원)

〈표 2〉 속성별 평가 기술대안의 결정

대 속 성	기 술 명
환경성 (0.487)	* tech. 6 : 폐기물에너지 이용기술(추천) * tech. 7 : VOC 제거기술(추천) * tech. 8 : 고효율 열펌프 냉난방기술(0.361) * tech. 9 : 환경친화적 건물 부하 저감기술(0.283) * tech. 10 : 저연비 저공해 자동차 기술(0.651) * tech. 11 : 석탄가스화 복합발전(IGCC)기술(0.472)
경제성 (0.231)	* tech. 4 : 산업용 연소설비의 고효율화기술(0.607) * tech. 2 : 고효율 집단에너지 공급기술(0.513) * tech. 13 : 에너지절약형 축열시스템기술(0.351)
자원성 (0.282)	* tech. 1 : 수소에너지 이용기술(0.495) * tech. 3 : 연료전지 발전기술(추천) * tech. 5 : 바이오매스 이용기술(추천) * tech. 12 : 산업용 태양열 시스템 개발(0.373)

가한 결과, 1을 기준으로 0.487의 비중을 갖는 것으로 분석됨에 따라 환경성 관련기술을 18개 기술중 48.7%에 근접한 기술의 수를 대안에 포함시켰다. 그 결과 최종적으로 <표 2>와 같이 환경성 관련기술로 6개 기술을, 경제성 관련기술은 3개 기술을, 자원성 관련 기술은 4개 기술로서 기술대안 13개를 선정하였으며 이들 기술을 대한 분석과 평가를 실시하였다. <표 2>에서 표기된 기술 번호는 설문에서의 질문순서이다.

$U(a) = 1$, a 는 속성의 범주에서 가능한 최고점

$U(b) = 0$, b 는 속성의 범주에서 가능한 최저점

그리고, 효용의 중간값(0.5)이 되는 속성치를 설문 을 통해 파악하였다. 이때의 속성치를 c 라 하면 식(3) 과 같이 표시할 수 있다.

$$U(c) = 0.5U(a) + 0.5U(b) \tag{3}$$

3. 단일속성 효용함수 결정

효용함수는 크게 위험중립형과 위험선호형, 위험 기피형이 있다. 각각의 형태는 다음과 같다.

- 위험중립 : $u(x) = \alpha + \beta x$ (1)

- 위험기피 및 선호 : $u(x) = \alpha + \beta e^{\gamma x}$ (2)

x : 속성의 특정수준

$U(x)$: 속성의 특정수준에서 평가되는 효용

모수 α, β, γ 를 결정하기 위해서 각 속성 범주의 각 끝 값을 결정하여 다음과 같이 표시한다.

이때, 응답자가 c 를 a 와 b 의 중앙값을 선택한다면 이는 위험중립 성향이고, 중앙값보다 큰 값을 선택한 다면 위험선호, 작은 값을 선택한다면 위험기피 성향 이다. 본 연구에서 a, b 는 응답자가 이해하기 쉽도록 기준치를 부여한 수치로 정했다. 위 식 3개가 결정된 다면, 모수가 3개이므로 값을 구할 수 있다. 그런데 이와 같은 초월함수에 대한 방정식을 풀고자 할 때는 직접 계산하는 것보다, MAPLE, Mathematica, MACSYMA와 같은 CAS(Computer Algebra System) 을 이용하는 것이 간편하며 본 연구에서는 MAPLE 과 MS Excel을 사용하였다.

4. 속성의 중요도 결정

속성의 중요도를 결정함에 있어서 전문가들의 응답에 따른 편의를 줄이기 위하여 앞에서의 다속성별로 분류한 순서를 따르지 않고 다음과 같이 임의의 순서로 질문하였으며 이후의 계산결과는 이 순서에 따라 제시하였다.

- attribute 1 : CO₂ 저감
- attribute 2 : 자원공급가능량
- attribute 3 : 에너지 이용효율 향상
- attribute 4 : SO_x, NO_x 저감
- attribute 5 : VOC(휘발성유기화합물) 저감
- attribute 6 : 기술파급효과

또한, 다속성 효용함수의 계수로서 사용될 6개 속성의 중요도를 우선순위 평가를 통하여 결정하였는

데, 다속성 효용함수의 계수는 중요도가 큰 속성의 계수가 큰 수로 들어가야 하므로 평가된 우선순위를 역으로 한 후 각 수치를 속성별로 표준화 하였다. 각 요소를 표준화하는 방법으로 벡터 표준화(vector normalization)를 들 수 있으며 이 방법은 각 열벡터를 자신의 norm으로 나눔으로써 얻어진다. 본 연구에서 수행된 6개의 속성치 x_i 에 대한 표준화 값을 r_i 라 한다면 이를 구하기 위한 식은 식(4) 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_6^2}} \quad (i = 1 \dots 6) \quad (4)$$

이에 따라 산출된 결과를 살펴보면 속성3인 에너지 이용효율 향상이 가장 중요한 속성으로 나타났으며 다음으로 CO₂ 저감, 자원공급가능량, 기술파급효과, SO_x, NO_x 저감, VOC(휘발성유기화합물) 저감의 순서로 나타났다 (<표 3> 참고).

〈표 3〉 속성의 중요도 산출결과

Attribute Specialist	attribute1	attribute2	attribute3	attribute4	attribute5	attribute6	total
S1	0.24	0.29	0.19	0.14	0.05	0.10	1.00
S2	0.24	0.14	0.29	0.10	0.05	0.19	1.00
S3	0.14	0.29	0.24	0.19	0.10	0.05	1.00
S4	0.14	0.29	0.24	0.10	0.05	0.19	1.00
S5	0.19	0.24	0.29	0.10	0.14	0.05	1.00
S6	0.29	0.14	0.24	0.10	0.05	0.09	1.00
S7	0.29	0.10	0.24	0.14	0.05	0.19	1.00
S8	0.24	0.29	0.14	0.19	0.10	0.05	1.00
S9	0.24	0.05	0.29	0.19	0.14	0.10	1.00
S10	0.14	0.19	0.24	0.05	0.10	0.29	1.00
S11	0.24	0.05	0.29	0.14	0.10	0.19	1.00
S12	0.24	0.05	0.29	0.10	0.19	0.14	1.00
S13	0.19	0.10	0.29	0.24	0.14	0.05	1.00
S14	0.19	0.14	0.29	0.10	0.05	0.24	1.00
Av.	0.21	0.17	0.25	0.13	0.09	0.14	1.00
rank	2	3	1	5	6	4	

5. 다속성 효용함수 도출

이 단계는 단일속성 효용함수를 결합하여 다속성 효용함수를 도출하는 과정이다. 다속성 효용함수의 대표적 형태는 다음과 같다.⁸⁾⁹⁾

n 개의 속성 $x = (x_1, \dots, x_n)$ 에 대한 다속성 효용함수

$$U(x) = U(x_1, \dots, x_n)$$

x_i : 각 속성

가법형 : $U(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i)$ (5)

승법형 : $U(x) = \frac{1}{k} \left[\prod_{i=1}^n k_i u_i(x_i) - 1 \right]$ (6)

$$\begin{aligned}
 U(6) &= \sum_{i=1}^6 k_i u_i(x_i) \\
 &= k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_3(x_3) + k_4 u_4(x_4) + k_5 u_5(x_5) + k_6 u_6(x_6) \\
 &= 0.29(-1.06002 - 1.45838 e^{-0.00319x_1}) + 0.14(-1.06002 - 1.45838 e^{-0.00319x_2}) \\
 &\quad + 0.24(1.06002 - 1.45838 e^{-0.31903x_3}) + 0.10(1.00000 - 511.99805 e^{-0.69315x_4}) \\
 &\quad + 0.05(1.00000 - 511.99805 e^{-0.69315x_5}) + 0.09(1.00000 - 3.99998 e^{-0.13863x_6})
 \end{aligned}$$

6. 속성치 및 기술대안의 효용치 산출

전문가는 속성치로 직접 응답한 것이 아니라 각 기술별 우선순위로 응답하였으므로, 그 우선순위를 속성치로 변환해야 한다. 변환방법은 속성범주에 우선순위를 등간격으로 맵핑하였다. 예로서, CO₂ 저감에 해당하는 범위는 1000 - 100(TC)이므로, 전체 기술(13개)에 대한 우선순위가 8이라면, 우선순위가 높은

$$U(x), u_i(x_i), k_i \in [0, 1], \quad 1 + k = \prod_{i=1}^n (1 + k_i)$$

i : 속성 인덱스

k_i : 비례상수로서 속성 i 의 가중치

$u_i(x_i)$: 개별속성에 대한 단일 속성 효용함수

승법형은 속성의 독립성이 보장되지 않는 경우에 쓰인다. 본 연구의 설문에서는 속성들간의 독립성이 보장되도록 정했기 때문에 가법형을 사용하였다. 예로서, 가법형을 적용한 전문가 6에 대한 다속성 효용함수는 다음과 같이 계산된다. 여기서 계수 k 는 각 속성의 중요도 계수이고, $U_i(x_i)$ 는 속성 i 에 대한 단일속성 효용함수이다.

수치가 속성치도 높게 하기 위해 역을 취한다. 따라서 수정 우선순위는 5(=13 - 8)가된다. 이때의 속성치는 다음과 같이 구한다.

$$1000 - 100 : 13 - 1 = 1000 - x : 13 - 5$$

이 식은 수정 우선순위 13에 해당하는 속성치가 1000, 수정 우선순위 1에 해당하는 속성치가 100임을

8) Keeney, R., and H. Raiffa (1976), *Decision with Multiple Objectives*, Wiley, New York.
 9) 김성희 (1991), 「의사결정론」, 영지문화사, pp. 280 - 285.

〈표 4〉 전문가의 각 기술에 대한 효용치

spe. tech.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
tech. 1	0.624	0.500	0.558	0.629	0.646	0.852	0.382	0.626	0.771	0.862	0.718	0.667	0.647	0.524
tech. 2	0.671	0.874	0.427	0.785	0.676	0.794	0.612	0.415	0.727	0.838	0.730	0.821	0.763	0.450
tech. 3	0.632	0.653	0.756	0.666	0.512	0.889	0.441	0.514	0.741	0.830	0.716	0.656	0.643	0.733
tech. 4	0.640	0.882	0.629	0.731	0.626	0.880	0.763	0.524	0.795	0.842	0.730	0.943	0.946	0.735
tech. 5	0.674	0.705	0.319	0.467	0.770	0.876	0.278	0.288	0.556	0.858	0.730	0.536	0.485	0.171
tech. 6	0.860	0.713	0.316	0.577	0.751	0.912	0.446	0.683	0.710	0.834	0.729	0.366	0.913	0.294
tech. 7	0.276	0.428	0.217	0.262	0.588	0.798	0.084	0.230	0.555	0.481	0.728	0.641	0.508	0.067
tech. 8	0.478	0.755	0.328	0.610	0.627	0.721	0.623	0.503	0.645	0.826	0.730	0.356	0.714	0.283
tech. 9	0.488	0.381	0.230	0.542	0.350	0.872	0.556	0.349	0.849	0.818	0.598	0.430	0.514	0.434
tech. 10	0.707	0.823	0.685	0.800	0.648	0.727	0.702	0.538	0.725	0.854	0.730	0.839	0.685	0.689
tech. 11	0.793	0.703	0.518	0.754	0.619	0.589	0.568	0.280	0.910	0.822	0.730	0.450	0.580	0.772
tech. 12	0.612	0.335	0.651	0.394	0.426	0.873	0.325	0.798	0.832	0.850	0.574	0.538	0.661	0.292
tech. 13	0.566	0.693	0.480	0.484	0.590	0.425	0.400	0.267	0.650	0.846	0.730	0.552	0.644	0.185
total	8.021	8.445	6.114	7.700	7.830	10.208	6.180	6.016	9.468	10.561	9.175	7.796	8.703	5.629

뜻한다. 이러한 방법에 따라 속성치를 계산하고 이후 각 전문가의 각 기술에 대한 효용치(각 속성에 대한 속성치를 다속성 효용함수에 대입한 값)를 산출하였다. 각 전문가의 기술에 대한 효용치의 합계는 서로 다르게 나타날 수 있는데 이는 각 전문가의 위험성향이 다른 결과에 기인된 것이다 (<표 4> 참조). 따라서 모두에 대하여 같은 비중으로 표준화하기 위해 각 기술 효용치의 합이 같도록 한 후, 이를 선형 변환하여 지표로 나타낸 결과는 <표 5>와 같다.

각 전문가들 평가에 대한 효용치의 차이는 각 전문가들의 평가 성향으로 나타날 수 있는데 효용치의 합계가 많은 경우는 위험기피형 전문가이고 합계가 낮은 경우는 위험선호형 전문가로 볼 수 있다. 즉, 본 연구에서의 14인의 성향을 살펴보면 전문가 10이 10.561로 가장 위험기피 정도가 큰 것으로 분석되었으며 위험선호형 전문가로는 전문가 14가 5.629의 효

용치를 보이고 있는 것으로 분석되었고 이에 따른 차이는 4.932로 나타났다.

7. 대안의 평가 및 분석

앞선 절차에 따라 최종적으로 산정된 효용치를 종합한 결과 제 1순위는 기술4인 “산업용 연소설비 고 효율화 기술”로 나타났으며 다음으로 “저연비 저공해 자동차 기술”로 나타났는데 이는 우리나라의 산업 및 수송 분야의 에너지 소비 점유율이 높은 증가율이 예견되고 있음을 고려할 때 타당성이 있는 결과라고 해석된다. 1순위 기술과 2순위 기술은 효용치에 있어서 거의 유사한 것으로 나타났다.

한편, 속성과 연계한 기술의 관련성을 분석하여 보면 상위 5개 기술중 경제성 및 환경성에 해당하는 기술이 각각 2개를, 자원성에 해당하는 기술이 1개 기

〈표 5〉 각 기술에 대한 효용치의 선형변환에 따른 결과

spe. tech.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S14	S14	total	rank
tech. 1	0.0778	0.0592	0.0912	0.0817	0.0825	0.0835	0.0618	0.1041	0.0814	0.0816	0.0782	0.0855	0.0744	0.0931	1.1361	6
tech. 2	0.0837	0.1035	0.0698	0.1020	0.0863	0.0778	0.0990	0.0690	0.0768	0.0794	0.0796	0.1053	0.0877	0.0799	1.1998	3
tech. 3	0.0787	0.0773	0.1236	0.0865	0.0654	0.0871	0.0714	0.0854	0.0783	0.0786	0.0780	0.0842	0.0738	0.1302	1.1987	4
tech. 4	0.0798	0.1045	0.1029	0.0949	0.0799	0.0862	0.1235	0.0871	0.0840	0.0797	0.0796	0.1210	0.1087	0.1306	1.3624	1
tech. 5	0.0841	0.0835	0.0522	0.0606	0.0983	0.0859	0.0450	0.0479	0.0587	0.0812	0.0796	0.0688	0.0558	0.0305	0.9320	10
tech. 6	0.1072	0.0845	0.0517	0.0749	0.0959	0.0894	0.0722	0.1136	0.0750	0.0790	0.0794	0.0469	0.1049	0.0522	1.1268	7
tech. 7	0.0345	0.0506	0.0354	0.0341	0.0751	0.0782	0.0136	0.0383	0.0587	0.0455	0.0794	0.0822	0.0584	0.0119	0.6959	13
tech. 8	0.0596	0.0894	0.0536	0.0792	0.0801	0.0706	0.1007	0.0836	0.0681	0.0782	0.0796	0.0456	0.0821	0.0503	1.0207	9
tech. 9	0.0609	0.0451	0.0377	0.0704	0.0447	0.0855	0.0900	0.0580	0.0897	0.0774	0.0651	0.0552	0.0590	0.0771	0.9158	12
tech. 10	0.0881	0.0974	0.1121	0.1039	0.0828	0.0712	0.1135	0.0894	0.0766	0.0809	0.0798	0.1076	0.0787	0.1225	1.3043	2
tech. 11	0.0988	0.0832	0.0847	0.0979	0.0791	0.0577	0.0919	0.0465	0.0962	0.0778	0.0796	0.0578	0.0667	0.1371	1.1550	5
tech. 12	0.0763	0.0397	0.1065	0.0511	0.0544	0.0856	0.0525	0.1327	0.0879	0.0805	0.0625	0.0690	0.0759	0.0518	1.0265	8
tech. 13	0.0705	0.0820	0.0784	0.0628	0.0753	0.0416	0.0648	0.0443	0.0687	0.0801	0.0796	0.0709	0.0740	0.0328	0.9260	11
total	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	14.000	

〈표 6〉 차세대 에너지기술혁신을 위한 기술개발 우선 순위

순 위	기 술 명	환산 효용치	대속성 위치
1순위	산업용 연소설비 고효율화 기술	1.362	경제성
2순위	저연비 저공해 자동차 기술	1.304	환경성
3순위	고효율 집단에너지 공급 기술	1.200	경제성
4순위	연료전지 발전 기술	1.199	자원성
5순위	석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술	1.155	환경성
6순위	수소에너지 이용 기술	1.136	자원성
7순위	폐기물에너지 이용기술	1.127	환경성
8순위	산업용 태양열시스템 개발 기술	1.027	자원성
9순위	고효율 열펌프 냉난방 기술	1.021	환경성
10순위	바이오매스 이용 기술	0.932	자원성
11순위	에너지 절약형 축열시스템 기술	0.926	경제성
12순위	환경친화적 건물 부하 저감기술	0.916	환경성
13순위	VOC 제거기술	0.696	환경성
합 계		14.000	

술을 점유하고 있는 것으로 나타났으며 경제성과 환경성이 높은 순위를 차지하고 있었다. 그러나 위와 같이 분류한 속성이 그 특성에 따라 반드시 부합된다고 할 수 없으며 따라서 이것이 반드시 이러한 현상에 따를 것이라는 것에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다. 즉, 각각의 기술들이 대속성에서 제기하고 있는 환경성, 자원성, 경제성의 부분을 각각 포함하고 있으며 그 기술들이 각각의 속성에 반드시 해당한다는 절대적인 경우보다는 단지 분석을 위한 사전 정의에 의한 결과로서 제시할 수 있다는 것이라고 해석할 수 있다. 중요한 것은 향후 각각의 기술들이 이 분야의 대속성별로 대표될 수 있는 기술로도 제시되기 위해 향후 기술개발과 혁신이 이루어져야 한다는 것이다.

VI. 결 론

본 연구는 아직까지 국내에서 에너지 기술에 대한 기획연구로서 수행된 바 없는 MAUT를 이용하여 차세대 에너지 기술혁신 분야를 평가하고 선정하였다.

본 연구에서는 기술 선정방법 도출을 위해 의사결정문제에 많이 사용되어져 온 AHP와 함께 기술가치 평가를 위해 사용되고 있는 CVM, MAUT를 고찰하였으며 본 연구의 기술대안이나 속성의 변화에 대한 유연성, 화폐가치가 아닌 기술대안의 우위를 결정할 수 있는 MAUT를 활용하여 기술을 평가하고 선정하였다.

에너지기술은 많은 종류의 요소기술과 시스템 기술을 가지고 있다. 본 연구에서 대상으로 한 기술은 50개의 기술들 중에서 여러 차례의 선택과정을 거쳐 13개 기술을 선정한 것으로서 13개 기술 모두 차세대

에너지기술 혁신 분야에서 가장 중요한 기술이라고 말할 수 있다. 그러나 지극히 제한된 투자조건(예컨대, 인력, 예산 등)으로 인해 개발에 우선순위를 두고자 할 때 본 연구에서 제시한 순위를 고려하는 것도 바람직할 것으로 보여진다.

본 연구의 특징은 MAUT를 적용할 때, 다속성을 고려하는 것뿐만 아니라, 다기술을 비교한다는 것이다. 그래서 각각 이들의 조합을 모두 고려하여 차세대 에너지 기술혁신 분야의 우선순위를 정하였다. 이에 따른 속성에 대한 각 전문가의 우선순위 결과에 따른 중요도는 ①에너지 이용효율 향상(0.25), ②CO₂ 저감(0.21), ③자원공급가능량(0.17), ④기술과급효과(0.14), ⑤SO_x, NO_x 저감(0.13), ⑥VOC 저감(0.09)의 순으로 나타났다. 위의 6가지 속성에 대하여 차세대 에너지 기술혁신분야의 효용치를 MAUT의 다속성효용함수를 이용하여 평가하였는데, 분석결과에 따른 우선순위와 환산 효용치는 다음과 같다. ①산업용 연소설비 고효율화 기술(1.3620), ②저연비 저공해 자동차 기술(1.3040), ③고효율 집단에너지 공급 기술(1.2000), ④연료전지 발전 기술(1.1990), ⑤석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술(1.1550), ⑥수소에너지 이용 기술(1.1360), ⑦폐기물에너지 이용기술(1.1270), ⑧산업용 태양열시스템 개발 기술(1.0270), ⑨고효율 열펌프 냉난방 기술(1.0210), ⑩바이오매스 이용 기술(0.9320), ⑪에너지 절약형 축열시스템 기술(0.9260), ⑫환경친화적 건물 부하 저감기술(0.9160), ⑬VOC 제거기술(0.6960)로 나타났다.

본 연구에서는 설문응답자의 주관을 고르게 반영하기 위하여 각 분야의 전문가를 고루 안배하였으나 각 전문가 주관의 크기 자체를 고르게 반영하기는 어려웠다. 따라서 설문을 실시하기 전에 응답자간의 의견조율이나, 속성, 기술대안의 변화에 민감하지 않아

제외시켰던 AHP 방법에 정해진 속성과 기술대안에 적용하여 MAUT의 결과와 비교해 보는 것도 가치 있는 일이라 하겠다.

한편, 본 연구결과를 효과적인 활용을 위해서 기술개발을 추진하는 주체인 연구기관의 경우 기술개발 선정 및 자원 배분을 위한 방법론으로 적용할 수 있을 것이며 에너지기술 관련 과학기술 분야의 기술혁신 분야 선정모델로의 활용과 함께 차세대 에너지기술 혁신에 따른 미래에너지 기술개발 조성자료 및 국가 차세대 에너지기술 혁신 대상기술 선정과 에너지 기술개발 구도 설정에 따른 차세대 연구개발 비전 제시에 적절하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 본 연구는 이와 같이 방법으로 결정된 차세대 에너지 기술혁신 분야를 위하여 각 기술의 선행기술과 요소기술에 대한 계획을 수립하고, 타 기술과의 상호 적용성을 고려한 연차적 계획을 수립하여야 할 것이다. 그리고 본 연구에서는 기술대안의 우선순위를 제시하는 것으로 연구를 마무리 하였으나 추후 실제적인 투자 자본이 주어질 경우 각 조합의 효용치를 극대화시킬 수 있는 방안마련 또한 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- 이덕기, "차세대 에너지기술혁신을 위한 기술평가 및 선정연구", 「2000년 기술혁신학회 추계학술대회 논문집」, 2000.11.24, pp. 125 - 140.
- 한국에너지기술연구소, 「에너지기술조사 분석사업」, 2000.12.31, pp. 605 - 651.
- 민완기, 오완근, 이찬구, "CDMA의 비경제적 가치 평가", 「기술혁신학회지」 제3권 제1호, 2000, pp. 127 - 138.
- 유승훈, 원중호, 채경석, "케이블TV 방송 신제품의 잠재적 가치평가", 「기술혁신학회지」, 제3권 제1호, 2000, pp. 113 - 126,
- 한국에너지기술연구소, 「기후변화협약과 연계된 에너지 원천기술 기획」, 1997.
- 허은녕, "가치평가기법의 최근 동향", 「기술혁신학회지」, 제3권 제1호, 2000, pp. 37 - 54.
- Malakooti, Behnam, Sriram Subramanian, "Generalized Polynomial Decomposable Multiple Attribute Utility Functions for Ranking and Rating Multiple Criteria Discrete Alternatives", *Applies Mathematics and Computation*, Vol. 106 Issue 1, 1999, pp. 69 - 102.
- Chapman, G.B., A.S. Elstein, T.M. Kuzel, R.B. Nadler, R. Sharifi, C.L. Bennett, "A Multi - Attribute Model of Prostate Cancer Patients' Preferences for Health States", *Quality of Life Research*, Vol. 8 Issue 3, 1999, pp. 171 - 180.
- Russel, Clifford, Virginia Dale, Junsoo Lee, Molly Hadley Jensen, Michael Kane and Robin Gregory, "Experimenting with Multi - Attribute Utility Survey Methods in a Multi - Dimensional Valuation Problem", *Ecological Economics*, Vol. 36 Issue 1, 2001, pp. 87 - 108.
- Goicoechea, A., D. Hansen, L. Duckstein, *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Application*, Wiley, 1982.
- Smith, Gordon V., "Technology Valuation Method and Successful Valuation Cases in the United States", 「기술의 가치평가기법 및 사례에 관한 국제세미나」, 2000, pp. 4 - 1 - 4 - 24.
- Ho, Eng Shwe Sein Aye, Young - Jou Lai, Shing I Chang, "Integrated Group Decision - Making Ap-

- proach to Quality Function Deployment”, *IIE Transactions*, Vol. 31 Issue 6, 1999, pp. 553 – 567.
- Bard, Jonathan F., “A Comparison of the Analytic Hierarchy Process with Multiattribute Utility Theory: A Case Study”, *IIE Transactions*, Vol. 24, Issue 5, 1992, pp. 111 – 121.
- Raju, Komaragiri Srinivasa, C.R.S. Pillai, “Multicriterion Decision Making in Performance Evaluation of an Irrigation System”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 112 Issue 3, 1999, pp. 479 – 488.
- Perdue, Robert K., William J. Mcallister, Peter V. King, and Bruce G. Berkey, “Valuation of R & D Project Using Options Pricing and Decision Analysis models”, *Interfaces*, Vol. 29, Issue 6.
- Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw – Hill, 1980.