

차세대 에너지 기술혁신을 위한 기술평가 및 선정 연구

Technology Assessment & Selection for Future Energy Technology Innovation

이덕기*, 박수익**, 김경희***

- I. 서론
- II. 기술평가 및 선정을 위한 방법론의 고찰
- III. MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 혁신분야 선정
- IV. 결론

Abstract

In this paper, we suggest energy technologies for a plan of future energy technology innovation. In order to evaluate and analyze of the technologies, we consider various methods such as AHP(Analytic Hierarchy Process), CVM (Contingent Valuation Method) and MAUT(Multi-Attribute Utility Theory). According to MAUT, we present between many attributes and priorities of innovation technologies.

* 한국에너지기술연구소

** 한국에너지기술연구소

*** 한국에너지기술연구소

1. 서 론

에너지기술은 다가올 환경 변화의 대응과 경제분야를 동시에 만족시켜줄 수 있으며 기술 확보 및 개발 여하에 따라 기대할 수 있는 효과는 실로 막대한 국가적 공공 이익성 재화라고 할 수 있다. 이러한 에너지기술은 그 적용범위 뿐만 아니라 개발 분야에 있어서도 공학의 전 분야를 망라하고 있으며 본 연구는 많은 에너지기술중 2010년을 대비하여 차세대에 혁신되어야 할 기술분야를 선정코자 하였다.

에너지분야는 국가 경제 활동의 근간이 되는 기반산업으로서 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 우리나라의 에너지 소비는 1999년 들어 IMF이전 수준으로 다시 되돌아가 총 181,363천TOE를 소비한 것으로 나타났는데 이는 '97년 총 에너지소비인 180,638 천TOE를 넘어서는 수준을 보이고 있다. 특히, 수입의존도에 있어서는 연도를 더해가며 지속적인 증가를 보여왔으며 '99년 들어서는 97.2%를 차지하고 있다.

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. 그리고, 경제규모가 작은 OECD 선진국들은 각국의 실정에 따라 실현가능성이 높고 파급효과가 큰 분야에 한정된 재원을 집중투자하고 있으며 장기간 대규모 투자가 요구되는 첨단미래 기술에 대해서는 공동연구방식을 취하고 있다. 국제 에너지기구(IEA)의 경우, 각 회원국들이 공유할 수 있는 전략적 기술 중심으로 회원국간 에너지기술정보의 공유 및 공동연구를 통한 예산절감 및 전문인력 활용을 위하여 에너지기술 공동연구개발사업을 활발히 추진 중에 있다. 우리 나라 역시 모든 에너지기술분야에 광범위하게 투자하는 것보다는 국제적 에너지사용 규제에 대비, 자원확보, 기술파급효과 등과 같은 여러 요인들을 고려한 집중적인 투자를 위한 시도가 점차 이루어지고 있다.

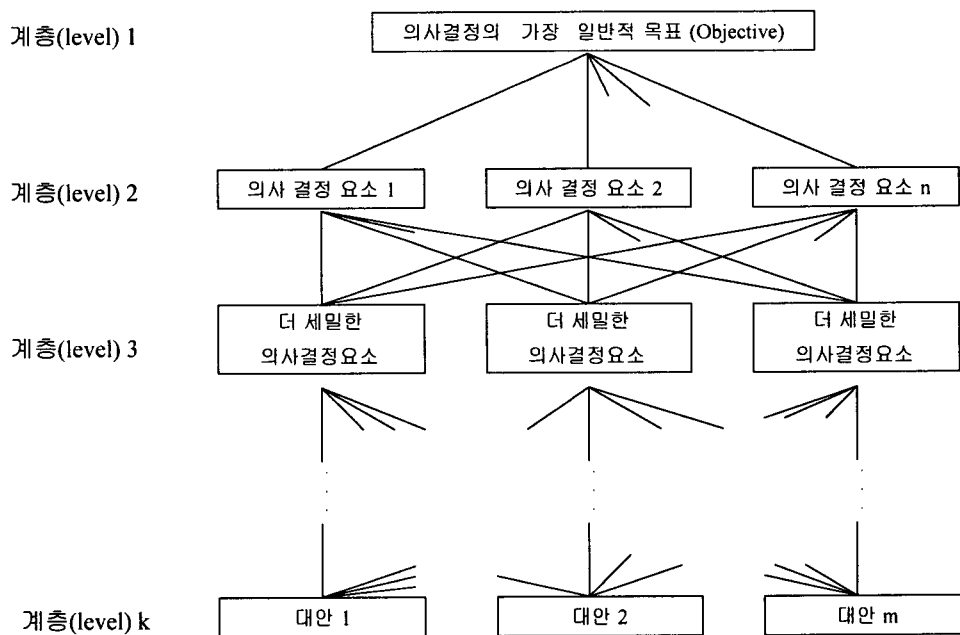
따라서 본 연구에서는 차세대 에너지 기술혁신에 크게 기여를 할 수 있는 기술혁신분야를 선정하기 위해 여러 요인의 고려와 함께 다속성 효용이론(Multi-Attribute Utility Theory)을 이용하여 기술들을 선정하였다.

II. 기술평가 및 선정을 위한 방법론의 고찰

본 장에서는 기술평가 및 선정을 위한 방법론을 도출하기 위해 동 분야에서 많이 사용되고 있는 세 가지 방법인 AHP(Analytic Hierarchy Process), CVM(Contingent Valuation Method), MAUT(Multi-Attribute Utility Theory)기법에 대한 고찰을 하였으며 그에 따라(고찰결과에 따라)가장 적합한 방법을 색출하여 적용하였다.

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(8)에 의해서 제안된 방법으로 다요소 의사 결정 문제의 속성(attribute)들 사이에 [그림 1]과 같이 최상위 계층에 의사 결정의 최종목표, 중간 계층에는 의사 결정의 요소들, 최하위 계층에 대안을 배치한 계층구조를 형성한다.



[그림 1] 계층구조의 일반적 모형

AHP의 적용절차는 다음과 같다.

- ① 의사결정과제의 관련요소를 분해하는 단계로써, 계층구조를 형성한다.
- ② 요소들을 쌍대비교 하는 단계로써, 각 계층내의 의사결정요소들 사이의 쌍대비교에 의하여 계층별로 쌍대비교 행렬을 구한다.

- ③ 중요도를 계산하는 단계로써, 각 계층내의 의사결정 요소들 사이에 상대적 중요도를 계산한다.
- ④ 복합가중치를 구하는 단계로써, 각 계층별로 얻어진 요소들의 중요도를 결합하여 대안들 사이의 중요도를 계산한다.

위와 같은 절차를 갖는 AHP는 정량적인 정보와 정성적인 정보를 동시에 평가할 수 있는 방법으로써, 구어적인 응답에 적절한 척도를 부여할 수 있어서 응답자들이 이해하기 쉽다. 또한 전체 계층에서의 선호를 비교하는 것이 아니라, 같은 계층구조의 요소들 중에 두 요소씩만 비교하는 쌍대비교를 하기 때문에 응답이 용이하다. 그리고, 일관성 지수를 이용하여 각 응답자의 일관성을 검증할 수 있다.

반면, AHP의 단점은 다음과 같다. 먼저, AHP의 계층구조를 개발하는데 이론적 틀이 존재하지 않기 때문에 의사결정 문제를 계층화할 때 평가자의 경험과 능력에 많이 종속되고, 전 계층에 대한 기준의 세분화와 많은 대안을 평가함으로써 과도한 쌍대비교를 요구할 수 있다. 또한 대안의 추가 혹은 삭제에 의해 기존 대안의 평가가 달라지며 심한 경우에는 대안간의 우선순위가 변할 수도 있다. 또한, AHP는 요소들간의 독립성(independence)을 전제로 하고 있으나 실제 의사결정 문제에 있어서 관련 요인들끼리 상호작용 하는 경우가 전무할 수도 없을 뿐만 아니라 또한 요인들의 경계를 명확히 하여 모형화 하는 것도 용이하지 않다. 이러한 실용적 한계를 극복하기 위한 대안이 네트워크 분석과정(Analytic Network Process)이다. ANP는 요인들 상호간의 종속성을 수용하므로 AHP 모형처럼 요소들이 상하로만 연결되는 형태가 아니라 횡적으로도 연결되므로 네트워크 형태를 갖게된다. 그러나 AHP 모형에 비하여 복잡한 형태이므로 쌍대비교 문항이 훨씬 많아지는 단점이 있다.

2. 조건부 가치측정법(Contingent Valuation Methods : CVM)

CVM은 경제학자와 정책평가자들 사이에서 가장 널리 사용되고 있는 공공재의 가치 측정방법으로 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.

- ① 분석대상 비 시장재화를 설정한다.
- ② 시나리오를 작성하는 단계로써, 전달하고자 하는 내용을 정확히 전달하면서 응답자들이 이해하기 쉽도록 시나리오를 작성한다.
- ③ 설문지를 보완하는 단계로써, 운용에서 예상될 수 있는 여러 가지 편익(bias)를 방

지할 수 있도록 설문지를 보완한다.

- ④ 설문을 시행하는 단계로써, 충분히 교육받은 설문조사원의 역할이 강조된다.
- ⑤ 자료를 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 차례대로 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 편익(bias)으로는, 반응을 속이려는 유인으로부터 발생하는 편익, 암시된 가치에 의한 단서 편익, 시나리오의 잘못된 묘사에 의해 발생하는 편익 등이 있다.

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 이론으로서 적용절차는 다음과 같다.

- ① 속성을 결정하는 단계로써, 대상과 관련된 문제를 수집, 분석, 식별하여 속성을 도출하는 과정이다.
- ② 속성수준을 정량화하는 단계로써, 속성의 평가 단위, 평가 범위 등을 결정한다.
- ③ 단일속성 효용함수를 도출하는 단계로써, 다속성 효용함수의 구성요소로서의 속성의 효용을 결정한다.
- ④ 속성의 중요도를 평가하는 단계로써, 속성의 주어진 범위에서 속성간의 우선순위를 결정한다.
- ⑤ 다속성 효용함수를 도출하는 단계로써, 단일속성 효용함수를 결합하여 다속성 효용함수를 도출한다.

MAUT 역시 시장가치와 비 시장가치를 통합할 수 있으며, 위의 두 방법에 비해 가장 두드러진 장점은 각 속성에 대해 넓은 범위의 가치를 유도하므로 조건이 변함에 따른 추가 계산에 필요한 정보를 얻을 수 있어서 가변하는 조건에 유연성이 있다는 장점이 있다.

4. 기술평가를 위한 방법론 선정

지금까지 고찰해 본 세 가지 기법들은 상호 유사한 점도 있으나 기법별로 지니고 있는 고유한 특성이 있었다. 세 기법의 공통적인 특징으로 부각되는 것으로는 속성의 비교에 있어서 다속성을 대상으로 한다는 것과, 시장제 및 비시장제를 평가할 수 있다는 것, 그리고 평가 수단으로서 설문조사를 실시한 다는 것이었다.

한편, 이들 기법들이 지니고 있는 차이점으로는 분석자의 조사 유연성의 경우 AHP는 낮은 반면 MAUT는 높은 것으로 분석되었으며 응답자의 사용 용이성은 AHP가 높은 반면 CVM이 낮은 것으로 분석되었다. 조사 분석 시간은 CVM이 가장 장기를 요하는 것으로, MAUT가 가장 단기인 것으로 나타났으며 조사 분석 비용의 경우 MAUT가 가장 저렴한 것으로 분석되었다.

본 연구는 문제의 특성상 도중에 속성이 바뀔 수 있고, 기술대안이 추가되거나 삭제가 빈번히 발생할 수 있다. 따라서 이러한 것들이 바뀌면 기존 대안의 평가가 달라지고 심한 경우 우선순위가 변할 수 있는 AHP를 이용하는 것이 적당하지 않은 것으로 판단된다. 또한, 2010년 기준의 차세대 에너지 기술평가를 하는데 있어서 모두 화폐가치를 평가해야 하는 CVM을 적용하는 것 역시 적당하지 않다고 판단된다.

따라서 문제를 해결할 때 변하는 조건에 유용성이 보장되고, 화폐가치가 아닌 각 기술의 효용으로 대안의 우위를 평가할 수 있는 MAUT를 본 연구수행에 따른 기술평가 및 선정을 위한 방법으로 결정하였다.

<표 1> AHP, CVM, MAUT의 비교

구분	비교요인	AHP	CVM	MAUT
공 통 점	다속성 비교	가능		
	시장제·비시장제 평가	가능		
	평가수단	설문조사		
차 이 점	분석자의 조사 유연성	低	中	高
	응답자의 사용 용이성	高	低	中
	조사분석 시간	中期	長期	短期
	조사분석 비용	中	多	小

III. MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 혁신분야 선정

앞장에서 설명한 MAUT의 적용절차를 기초로 하여 본 연구의 핵심인 에너지기술 분야의 차세대 혁신기술을 선정하기 위한 적용절차를 다음과 같이 설정하고 이에 따른 분석 및 평가를 수행하였다.

- ① 속성 결정 및 속성수준의 정량화
- ② 기술대안 결정
- ③ 단일속성 효용함수 도출
- ④ 속성의 중요도 결정
- ⑤ 다속성 효용함수 도출
- ⑥ 속성치 및 기술대안의 우선순위 결정

본 연구에서는 MAUT 적용을 위한 전문가 서면평가를 2회 실시하였는데 첫 번째는 속성과 기술대안을 결정하기 위하여, 두 번째는 단일속성 효용함수 도출 및 속성의 중요도 결정과 다속성 효용함수 도출 및 속성치를 결정하기 위하여 실시하였다. 이를 위한 대상으로는 국내 유일의 전문연구기관에 소속된 박사급 인력을 중심으로 실시하였으며 첫 번째 서면평가에서는 13인을 대상으로, 두 번째에서는 첫 번째 대상과는 다른 대상으로 7인을 선별하여 시행하였다. 한편, 각 기술대안에 따라 전문가의 편의를 평준화하기 위해 각 전공별로 전문가를 고루 안배하여 시행하였다.

1. 속성 결정 및 속성수준의 정량화

속성이란 사물의 주요성질로서 본 연구에서는 에너지 기술이 혁신되어야 하는 이유를 의미한다. 본 연구의 속성을 결정하기 위한 사전 조치로서 국내에서 발행된 여러 기획보고서 등을 고려하여 선정/구성하였다. 한편, 1차 설문을 실시하기 전에 내부적으로, 몇 개의 속성과 이러한 속성에 대표되는 기술을 열거하여 각각에 대한 우선순위를 명시하도록 하였으며 보다 객관적이고 본 연구의 취지에 맞는 속성과 기술을 추천하도록 하였다. 이러한 결과에 따라 차세대 에너지 기술혁신을 위하여 고려하여야 할 6개의 속성이 결정되었으며 이에 해당되는 각 속성의 정량적인 평가를 위한 기준은 <표 2>와 같다. 각 전문가의 대속성에 대한 우선순위 평가에 의한 가중치는 환경성 0.487, 경제성 0.231, 자원성 0.282로 나타났다. 그리고 대속성에 의한 세부속성도 같은 방법으로 평가한 결과 세부속성의 순위는 에너지 이용효율 향상, 자원 공급가능량, CO₂ 저감의 순서로 평가되었다. 그리고 VOC(휘발성유기화합물) 저감은 1차 설문지에는 없는 속성이었지만, 몇몇 전문가의 강한 추천에 따라 속성으로 정하였다.

한편, 응답에 따라 제안된 여러 속성들로는 사회성, TSP 저감, 로얄티 지급액, 에너지 저소비 생활 등이 있었으나 우선 순위에서 뒤지거나 평가기준이 명확하지 않기 때문에 제외시켰다.

<표 2> 속성과 속성수준의 정량화

대속성	세부속성	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

2. 기술대안의 결정

본 연구의 특징은 하나의 기술에 대한 효용을 평가하는 것이 아니라, 여러 기술들의 효용을 한꺼번에 평가하여 이들의 중요도를 결정하는 것이다. 그런데, 대상인 에너지 기술 자체의 종류가 너무나 광범위하고, 게다가 차세대 에너지 기술혁신을 목표로 하기 때문에 가능한 모든 기술을 비교한다는 것은 어렵다. 따라서 각각의 기술이 지닌 특성과 중요성 등을 고려하여 각각의 대속성별로 적정한 기술대안들을 선정하였다.

이러한 기술대안의 선정은 1차 설문을 기준으로 이루어 졌는데 1차 설문에서는 각 기술에 대한 중요성을 부여토록 하는 서열평가를 실시토록 하였으며 결과에 따른 각각의 속성별 기술들을 우선순위에 따라 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.<표 3> 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 평가한 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 4>과 같이 환경성 관련기술로 6개 기술을, 경제성 관련기술은 3개기술을, 자원성 관련기술은 4개기술로서 기술대안 13개를 선정하였

으며 이들 기술을 대한 분석과 평가를 실시하였다. <표 4>에서 표기된 기술 번호는 설문에서의 질문순서이다.

<표 3> 차세대 에너지혁신기술 선정 대상기술

대속성	대상기술
환경성 대표기술 (18분야)	저연비·저공해 자동차기술/환경친화적 건물부하저감기술/환경친화적 건축설비기술/탈황된 석유 및 석탄 이용기술/하폐수 슬러지의 처리 및 에너지 이용기술/온실가스 처리기술(CO ₂ 를 제외한 온실가스)/집진기술/자연에너지 고효율 이용기술/폐기물 분리기술 및 에너지화 기술/SO _x , NO _x 제거 기술/청정발전기술/대체연료이용기술/대체환경 개선기술/에너지절약 및 친환경적 생활철학/산업분야별 에너지 절약기술/CO ₂ 분리기술/산업에너지 절약기술
경제성 대표기술 (15분야)	고효율 열펌프 냉난방 시스템기술/에너지 절약형 증류공정기술/고효율 집단에너지 공급기술/산업용 연소설비의 고효율화 기술/분리막을 이용한 에너지 절약기술/효율적인 에너지 절약형 축열시스템기술/분리에너지 절약 흡착제 개발 및 흡착분리기술/누설에너지 저감기술/폐기물 에너지화기술/LFG 이용 열생산/고효율 열동력기관기술/저가, 제에너지 주택기술/초저연비 자동차 기술/산업분야별 에너지 기술/산업용 에너지 절약기술
자원성 대표기술 (17분야)	소수력 발전요소 실용화기술/수소에너지 이용기술/풍력단지 조성을 위한 기술/산업용 태양열 시스템 개발기술/저생성 CO ₂ 가스 바이오 에너지기술/석탄가스화 복합발전(IGCC) 이용기술/해양에너지 이용기술/폐열 이용기술/건축용 태양광발전시스템 기술/LFG 복합발전 기술/폐기물 에너지화 기술/태양광 발전기술/지열에너지 이용기술/신에너지원 개발/연료전지 발전기술/바이오 매스 에너지화 기술/저공해 고효율 연소 및 에너지 전환기술

<표 4> 속성별 평가 기술대안의 결정

대속성	기 술 명
환경성 (0.487)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술 6 : 폐기물에너지 이용기술(추천) • 기술 7 : VOC 제거기술(추천) • 기술 8 : 고효율 열펌프 냉난방기술(0.361) • 기술 9 : 환경친화적 건물 부하 저감기술(0.283) • 기술 10 : 저연비·저공해 자동차 기술(0.651) • 기술 11 : 석탄가스화 복합발전(IGCC)기술(0.472)
경제성 (0.231)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술 4 : 산업용 연소설비의 고효율화기술(0.607) • 기술 2 : 고효율 집단에너지 공급기술(0.513) • 기술 13 : 에너지절약형 축열시스템기술(0.351)
자원성 (0.282)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술 1 : 수소에너지 이용기술(0.495) • 기술 3 : 연료전지 발전기술(추천) • 기술 5 : 바이오매스 이용기술(추천) • 기술 12 : 산업용 태양열 시스템 개발(0.373)

3. 단일속성 효용함수 결정

효용함수는 크게 위험중립형과 위험선호형, 위험기피형이 있다. 각각의 형태는 다음과 같다.

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

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.

$U(a) = 1$, a 는 속성의 범주에서 가능한 최고점

$U(b) = 0$, b 는 속성의 범주에서 가능한 최저점

그리고, 효용의 중간치(0.5)가 되는 속성값을 설문을 통해 파악하였다. 이때의 속성값을 c 라 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$U(c) = 0.5U(a) + 0.5U(b)$$

이때, 응답자가 c 를 a 와 b 의 중앙값을 선택한다면 이는 위험중립 성향이고, 중앙값보다 큰 값을 선택한다면 위험선호, 작은 값을 선택한다면 위험기피 성향이다. 본 연구에서 a , b 는 응답자가 이해하기 쉽도록 기준치를 부여한 수치로 정했다.

위 식 3개가 결정된다면, 모수가 3개이므로 값을 구할 수 있다. 그런데 이와 같은 초월 함수에 대한 방정식을 풀고자 할 때는 직접 계산하는 것보다, MAPLE, Mathematica, MACSYMA와 같은 CAS(Computer Algebra System)을 이용하는 것이 간편하며 본 연구에서는 MAPLE과 MS Excell을 사용하였다.

4. 속성의 중요도 결정

속성의 중요도를 결정함에 있어서 전문가들의 응답에 따른 편의를 줄이기 위하여 앞선 순서에 따르지 않고 다음과 같이 임의의 순서로 질문하였으며 그에 따른 결과를 도출하였다.

- 속성 1 : CO₂ 저감
- 속성 2 : 자원공급가능량
- 속성 3 : 에너지 이용효율 향상
- 속성 4 : SO_x, NO_x 저감

- 속성 5 : VOC(휘발성유기화합물) 저감
- 속성 6 : 기술과급효과

또한, 다속성 효용함수의 계수로서 사용될 6개 속성의 중요도를 우선순위 평가를 통하여 결정하였는데, 다속성 효용함수의 계수는 중요도가 큰 속성의 계수가 큰 수로 들어야 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 속성값 x_i 에 대한 표준화 값을 r_i 라 한다면 이를 구하기 위한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이에 따라 산출된 결과를 살펴보면 속성3인 에너지 이용효율 향상이 가장 중요한 속성으로 나타났으며 다음으로 CO₂ 저감, 자원공급가능량, 기술과급효과, SO_x, NO_x 저감, VOC(휘발성유기화합물) 저감의 순서로 나타났다<표 5>.

<표 5> 속성의 중요도 산출결과

구 분	속성 1	속성 2	속성 3	속성 4	속성 5	속성 6	합계
전문가 1	0.24	0.29	0.19	0.14	0.05	0.10	1.00
전문가 2	0.24	0.14	0.29	0.10	0.05	0.19	1.00
전문가 3	0.14	0.29	0.24	0.19	0.10	0.05	1.00
전문가 4	0.14	0.29	0.24	0.10	0.05	0.19	1.00
전문가 5	0.19	0.24	0.29	0.10	0.14	0.05	1.00
전문가 6	0.29	0.14	0.24	0.10	0.05	0.09	1.00
전문가 7	0.29	0.10	0.24	0.14	0.05	0.19	1.00
평균	0.22	0.21	0.25	0.12	0.07	0.14	1.00
순위	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.

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

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

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

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

i : 속성 인덱스, j : 응답자 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 속성들 간의 독립성이 보장되도록 정했기 때문에 가법형을 사용하였다.

예로서, 가법형을 적용한 전문가 1에 대한 다속성 효용함수는 다음과 같이 계산된다. 여기서 계수 k 는 II.5절에서 결정된 각 속성의 중요도 계수이고, $U_i(x_i)$ 는 II.4절에서 결정된 속성 i 에 대한 단일속성 효용함수이다.

$$\begin{aligned} U(x) &= \sum_{i=1}^6 k_i u_i(x_i) \\ &= k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_3(x_3) + k_4 u_4(x_4) + k_5 u_5(x_5) + k_6 u_6(x_6) \\ &= 0.29(-0.30902 + 0.26322 e^{0.00106 x_1}) + 0.14(-0.30902 + 0.26322 e^{0.00106 x_2}) \\ &\quad + 0.24(1.00000 - 512.00000 e^{-6.93147 x_3}) + 0.10(1.00000 - 511.99805 e^{-0.69315 x_4}) \\ &\quad + 0.05(-0.00514 + 0.00052 e^{0.22935 x_5}) + 0.19(1.00000 - 512.00000 e^{-0.69315 x_6}) \end{aligned}$$

6. 속성치 및 기술대안의 우선순위 결정

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

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

이 식은 수정우선순위 13에 해당하는 속성치가 1000, 수정우선순위 1에 해당하는 속성치가 100임을 뜻한다. 이러한 방법에 따라 속성치를 산출하고 이후 각 전문가의 각 기술에 대한 효용치를 구하기 위해서 이들 속성치를 대입하여 산출하였다.

이에 따른(각 효용치에 대한 산출치에 따른)합계는 전문가에 따라 서로 다르게 나타날 수 있는데 이는 각 전문가의 위험성향이 다른 결과에 기인된 것이다<표 6>. 따라서 모두에 대하여 같은 비중으로 표준화하기 위해 각 기술 효용치의 합이 같도록 한 후, 이를 선형 변환하여 지표로 나타낸 결과는 <표 7>과 같다.

<표 6> 전문가의 각 기술에 대한 효용치

구 분	전문가 1	전문가 2	전문가 3	전문가 4	전문가 5	전문가 6	전문가 7
기술 1	0.603	0.439	0.495	0.591	0.548	0.844	0.362
기술 2	0.635	0.874	0.275	0.644	0.465	0.713	0.593
기술 3	0.613	0.591	0.703	0.625	0.465	0.888	0.420
기술 4	0.605	0.879	0.484	0.585	0.442	0.813	0.745
기술 5	0.665	0.652	0.269	0.499	0.671	0.873	0.265
기술 6	0.887	0.662	0.311	0.688	0.761	0.924	0.423
기술 7	0.216	0.442	0.005	0.135	0.324	0.725	0.061
기술 8	0.439	0.737	0.189	0.455	0.428	0.635	0.626
기술 9	0.449	0.400	0.113	0.454	0.197	0.803	0.563
기술 10	0.667	0.842	0.480	0.621	0.488	0.641	0.681
기술 11	0.790	0.649	0.486	0.800	0.470	0.570	0.561
기술 12	0.596	0.254	0.577	0.415	0.466	0.872	0.310
기술 13	0.535	0.717	0.350	0.360	0.406	0.344	0.389
합계	7.698	8.138	4.737	6.872	6.131	9.645	5.999

<표 7> 각 기술에 대한 효용치의 선형변환에 따른 결과

구 분	전문가 1	전문가 2	전문가 3	전문가 4	전문가 5	전문가 6	전문가 7	합계	순위
기술 1	0.0783	0.0539	0.1045	0.0860	0.0894	0.0875	0.0603	0.5600	7
기술 2	0.0825	0.1074	0.0581	0.0937	0.0758	0.0739	0.0988	0.5903	6
기술 3	0.0796	0.0726	0.1484	0.0909	0.0758	0.0921	0.0700	0.6295	5
기술 4	0.0786	0.1080	0.1022	0.0851	0.0721	0.0843	0.1242	0.6545	1
기술 5	0.0864	0.0801	0.0568	0.0726	0.1094	0.0905	0.0442	0.5400	8
기술 6	0.1152	0.0813	0.0657	0.1001	0.1241	0.0958	0.0705	0.6527	2
기술 7	0.0281	0.0543	0.0011	0.0196	0.0528	0.0752	0.0102	0.2412	13
기술 8	0.0570	0.0906	0.0399	0.0662	0.0698	0.0658	0.1044	0.4937	10
기술 9	0.0583	0.0492	0.0239	0.0661	0.0321	0.0833	0.0938	0.4066	12
기술 10	0.0866	0.1035	0.1013	0.0904	0.0796	0.0665	0.1135	0.6414	3
기술 11	0.1026	0.0797	0.1026	0.1164	0.0767	0.0591	0.0935	0.6306	4
기술 12	0.0774	0.0312	0.1218	0.0604	0.0760	0.0904	0.0517	0.5089	9
기술 13	0.0695	0.0881	0.0739	0.0524	0.0662	0.0357	0.0648	0.4506	11
합 계	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	7.0000	

일반적으로 전문가들의 평가성향은 자기의 전공 및 하는 업무에 따라 우선 순위를 먼저 부여하는 경향이 있다. 이를 통상 일관성이라는 말로서 표현하고 있는데 AHP의 경우 CR이라는 값으로서 이를 측정한다. MAUT의 경우 각 전문가에 대한 일관성을 측정할 수 있는 방법으로 분석자가 응답자의 여러 요인(전공, 주요업무 등)을 고려하여 나타난 결과로서 측정할 수 있는데 본 연구에서의 전문가 응답의 경우 편중된 평가가 나타나지 않았으며 객관적인 입장에서 평가가 이루어진 것으로 분석되었다.

한편, 각 전문가들 평가에 대한 효용치의 차이는 각 전문가들의 평가 성향으로 나타날 수 있는데 효용치의 합계가 많은 경우는 위험선호형 전문가이고 합계가 낮은 경우는 위험 기피형 전문가로 볼 수 있다. 즉, 본 연구에서의 7인의 성향을 살펴보면 전문가 6이 가장 위험기피형이 높은 것으로 분석되었으며 위험선호형 전문가로는 전문가 3이 4.737의 효용치를 보이고 있는 것으로 분석되었고 이에 따른 차이는(위험 기피와 위험선호간 양극단간 차이는) 4.908로 나타났다.

이러한 결과들을 종합한 각 기술들의 효용치를 계산한 결과 제 1순위는 기술4로 나타났으며 그에 따른 결과를 종합하여 정리하면 <표 8>과 같다. 본 결과에 따르면 속성과 연계하여 분석하여 보면 상위 5개 기술중 환경성에 해당하는 기술이 3개를 차지하고 있으며 1순위 기술과 2순위 기술은 효용치에 있어서 거의 유사한 것으로 나타났다.

<표 8> 차세대 에너지기술혁신을 위한 기술개발 우선 순위

순 위	기 술 명	환산 효용치	대속성 위치
1순위	산업용 연소설비 고효율화 기술	0.6545	경제성
2순위	폐기물에너지 이용기술	0.6527	환경성
3순위	저연비·저공해 자동차 발전 기술	0.6414	환경성
4순위	석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술	0.6306	환경성
5순위	연료전지 발전 기술	0.6295	자원성
6순위	고효율 집단에너지 공급 기술	0.5903	경제성
7순위	수소에너지 이용 기술	0.5600	자원성
8순위	바이오매스 이용 기술	0.5400	자원성
9순위	산업용 태양열시스템 개발 기술	0.5089	자원성
10순위	고효율 열펌프 냉난방 기술	0.4937	환경성
11순위	에너지 절약형 축열시스템 기술	0.4506	경제성
12순위	환경친화적 건물 부하 저감기술	0.4066	환경성
13순위	VOC 제거기술	0.2412	환경성
합 계		7.0000	

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 기술가치평가를 위해 사용되고 있는 CVM, MAUT를 비교하였다. 그 결과, 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 과정을 거친 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)에서 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 결과를 규준화하고, 이를 평균한 값은 ①에너지 이용효율 향상(0.54), ②CO₂ 저감(0.48), ③자원공급가능량(0.46), 기술과급효과(0.30), ⑤SO_x, NO_x 저감(0.27), ⑥VOC 저감(0.15)로 나타났다. 위의 6가지 속성에 대하여 차세대 에너지 기술혁신분야의 효용치를 MAUT의 다속성효용함수를 이용하여 평가하였는데, 분석결과에 따른 우선순위와 환산 효용치는 다음과 같다. ①산업용 연소설비 고효율화 기술(0.6545), ②폐기물에너지 이용 기술(0.6527), ③저연비·저공해 자동차 발전 기술(0.6414), ④석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술(0.6306), ⑤연료전지 발전 기술(0.6295), ⑥고효율 집단에너지 공급 기술(0.5903), ⑦수소에너지 이용 기술(0.5600), ⑧바이오메스이용기술(0.5400), ⑨산업용 태양열시스템 개발 기술(0.5089), ⑩고효율 열펌프 냉난방 기술(0.4937), ⑪에너지 절약형 축열시스템 기술(0.4506), ⑫환경친화적 건물부하 저감기술(0.4066) ⑬VOC 제거기술(0.2412)로 나타났다.

본 연구에서는 설문응답자의 주관을 고르게 반영하기 위하여 각 분야의 전문가로 안배하였으나 각 전문가 주관의 크기 자체를 고르게 반영하기는 어려웠다. 따라서, 설문을 실시하기 전에 응답자간의 의견조율이나, 속성, 기술대안의 변화에 민감하지 않아 제외시켰던 AHP 방법에 의해 정해진 속성과 기술대안에 적용하여 MAUT의 결과와 비교해 보는

것도 가치 있는 일이라 하겠다.

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

참고문헌

- (1) 김성희, 정병호, 김재경(1994), *의사결정분석 및 응용*, 영지문화사
- (2) 민완기, 오완근, 이찬구(2000), "CDMA의 비경제적 가치평가", *기술혁신학회* 제 3권 제 1호, 2000. 3. pp. 127-138.
- (3) 유승훈, 원중호, 채경석(2000), "케이블TV 방송 신제품의 잠재적 가치평가 - 조건부 가치측정법의 적용을 중심으로 -", *기술혁신학회* 제 3권 제 1호, pp. 113-126.
- (4) 한국에너지기술연구소(1997), *기후변화협약과 연계된 에너지 원천기술 기획*.
- (5) 황규승(2000), "기술가치 평가의 개요", *기술의 가치평가기법 및 사례에 관한 국제세미나*, pp. 1-23.
- (6) 허은녕(2000), "가치평가기법의 최근동향 - CVM, MAUA 그리고 Real Option Pricing -", *기술혁신학회* 제 3권 제 1호, pp. 37-54.
- (7) Thomas L. Saaty(1977), "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures," *J. of Mathematical Psychology*, Vol. 15, No. 3, 234-281.
- (8) Thomas L. Saaty(1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, pp. 1-34.