

AHP를 이용한 CO₂ 저감 및 처리기술 분석

이덕기 · 최상진 · 박수익 · 하영진 · 이정태

한국에너지기술연구원

E-mail : deokki@kier.re.kr

An Analysis on the CO₂ Reduction and Sequestration Technology using the AHP

Deok-Ki Lee, Sang-Jin Choi, Soo-Uk Park, Young-Jin Ha and Jeong-Tae Lee

Korea Institute of Energy Research

요 약

본 연구에서는 기후변화에 따른 온실가스 감축을 위해 추진되고 있는 이산화탄소 저감 및 처리기술개발의 성과제고를 위해 개발기술들을 대상으로 기술개발 동향 및 향후 발생될 여러 가지 영향요인(impact factor)을 발굴하여 분석하였다. 이를 위해 평점법(Scoring Models Method, SMM)과 분석적계층과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 CO₂ 저감 및 처리기술에 대한 분석을 수행하였으며 평가요인별 중요도의 계량적 제시와 함께 각각의 기술들에 대한 평가요인별 우선순위를 제시하였다.

Abstract — World have been encouraged to develop technologies that contribute to CO₂ emission reduction for many years. Those technologies can be categorized into capture, storage or sequestration, utilization, etc. There have been lots of efforts, in Korea, to develop the technology as well. In this paper, the impact factors of the technologies, especially in CDRS (Carbon Dioxide Reduction & Sequestration Center), were selected and were weighed by SMM (Scoring Models Method) and AHP (Analytic Hierarchy Process) in order to evaluate the four representative areas of the technologies.

1. 서 론

1-1. 개요

2003년 7월 부시 행정부에서는 기후변화와 관련된 복잡하고도 장기적인 문제를 해결할 수 있는 전략적 계획(strategic plan)을 제시하였으며, EU나 일본 등 다른 선진국에서도 앞 다투어 매년 적극적인 기후변화 대책을 위한 다양한 정책 및 연구개발계획을 구상하고 있다.

이러한 국제적 움직임에 대한 능동적인 대처로서 국내에서도 기후변화협약 대응 2차 종합대책 발표 등 다양한 노력을 기울이고 있으며 관련 연구개발이 추진되고 있다.

2001년 9월에는 대응체제를 강화하기 위해서 국무총리훈령을 제정하여 범정부대책기구를 기후변화협약 대책위원회로 확대개편하고, 2002년 3월 국내의 환경변화를 수용하여 기후변화협약 대응 제2차 종합대책을 수립

하였다. 제1차 종합대책이 부문별 온실가스 감축시행에 중점을 두었다면 제2차 종합대책은 각 부문별 온실가스 감축시책 강화와 함께 추진사업들을 구체화하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 일련의 기후변화와 관련된 온실가스 감축을 위해 추진되고 있는 이산화탄소 저감 및 처리기술개발에 따른 성과제고를 위해 개발기술들을 대상으로 기술개발 동향 및 향후 발생될 여러 가지 영향요인(impact factor)을 설정하여 결정론적 평가법인 평점법(Scoring Models Method, SMM)과 분석적계층과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 CO₂ 저감 및 처리기술에 대한 분석 및 평가를 수행하고 중요도의 계량적 제시와 함께 그 결과로서 우선순위를 제시하였다.

1-2. 분석방법

대안 선정 및 최적 자원배분을 위한 평가의 경우 지금까지 여러 가지 기법이 개발되어 왔으나 계량적인 방

법들의 실제 활용이 미미한 상태이다.

이들 평가기법들은 여러 학자들에 의해 다양하게 분류되고 있는데 Rubenstein은 결정론적 평가법, 경제론적 평가법, 경영과학적 평가법으로 분류하고 있다. 또한 불확실성(uncertainty)아래에서 최적 대안 선정을 위한 방법론으로서 Hwang and Lin은 다목적 의사결정(multiple objective decision making)과 다속성 의사결정(multiple attribute decision making)으로 분류하고 있다.

이러한 여러 가지 분석 및 평가 방법들을 근거로 본 대상 개발기술의 성과제고를 분석하고 평가를 위해 결정론적 평가법중에서 평점법(scoring models method)과 다속성 의사결정방법중 AHP를 선정하여 수행하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. SMM(Scoring Models Method)

평점법(Scoring Models Method, SMM)은 평가결과를 점수로 표시하여 득점의 대소여부를 판단하는 방법으로 계산방식에 따라 가산방식, 연승방식 그리고 이 두 가지를 병행한 가승방식, 가중치 계수방식, 확률방식 등으로 구분할 수 있다. 그러나 평점만으로 평가가 마무리 된다고 볼 수 없으므로 평가항목에 표시되어 있지 않은 사항에 대한 분석도 추가해야 한다.

평점법은 넓은 시야의 정성적 기준과 함께 경제적 기준을 고려할 수 있는 가능성에 의하여 체크리스트나 프로파일 도표의 이점을 활용할 수 있으며 각 프로젝트에 대하여 단일한 수치에 의한 평가를 제공할 수 있고 또 여건 변화를 수용하기 위해 쉽게 조정될 수도 있다.

그러나 이 방법이 갖는 단점은 평점이 어디까지나 상대적인 것이고 대안의 방향을 제시하지 못하며 그 사용이 단순한 순위 비교에 한정된다는 점과 모형개발이 비정식화 되어 있어 경제적 또는 최적화 모형에 의한 평가결과와 비교하기가 어렵다는 점이다.

2-2. AHP(Analytic Hierarchy Process)

일반적으로 AHP 방법은 복잡한 의사결정 문제를 체계적으로 세분하여 분석할 수 있도록 하는 도구를 제공한다. 특히 다속성, 다기준에 의한 최선의 대안 선정을 위해서는 평가 요소들을 계층적으로 세분화한 후 이를 종합하는 과정이 필요하다. 따라서 이를 만족할 수 있는 방법으로 AHP 방법은 대안 우선순위 결정에 적합한 의사결정 방법으로 평가된다.

일반적으로 AHP의 실행은 다음과 같은 5단계로 수행된다.

① 제1단계 : 평가대상 관련요소 분해

의사결정 문제를 상호 관련된 평가대상들을 계층으로 분류하여 의사결정계층을 설정한다.

② 제2단계 : 관련요소들의 쌍대비교

의사결정 속성들 간의 쌍대비교로 판단자료를 수집한다. 이 단계는 상위목표를 달성하는데 관련이 있는 하위계층의 요인들을 쌍대비교하여 행렬을 작성한다. Saaty는 9단계로 나누어서 측정하였으며, 쌍대비교시 중요도의 척도를 나타내었다.

③ 제3단계 : 가중치(중요도)의 계산

고유벡터법(eigen value)을 사용하여 의사결정 속성들 간의 상대적인 가중치를 추정한다. 평가된 쌍대비교 결과들을 이용하여 각 수준 속성들의 상대적 가중치를 얻기 위해서 고유벡터법이 널리 사용되고 있는데, 속성 i 는 속성 j 와 비교하여 어느 정도 중요한지를 나타내는 상대적 중요도를 a_{ij} 라 하면 쌍대 비교행렬($A=[a_{ij}]$)은 다음과 같다.

$$A=[a_{ij}] = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Table 1. The fundamental scale.

척도	정의	설명
1	· 동등 중요 (equal)	두 개의 속성이 차상위목표 기준에서 볼 때 똑같이 중요
3	· 약간 중요 (weak)	한 속성이 다른 속성보다 약간 중요
5	· 매우 중요 (strong)	한 속성이 다른 속성보다 매우 중요하거나 가치가 있음
7	· 확실히 중요 (very strong)	한 속성이 다른 속성보다 대단히 중요하거나 가치가 있음
9	· 절대적으로 중요 (absolute)	다른 속성에 비해 비교할 수 없을 정도로 절대적 중요
2, 4, 6, 8	· 근접해 있는 가까운 척도간의 중간정도의 중요성	필요한 경우에 사용
위의 역수	한 속성이 다른 속성보다 중요한 경우, 후자의 중요도는 전자의 중요도와 비교하여 그 역수의 값을 갖는다.	

$$= \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \frac{w_2}{w_3} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \frac{w_3}{w_3} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \frac{w_n}{w_3} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, $w_i(i=1, 2, \dots, n)$: i 번째 속성의 가중치를 의미하며 이 행렬은 원소 a_{ij} 에 대하여 다음의 관계가 성립하는 역수행렬이 된다.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

이 행렬에 벡터 $w=(w_1, w_2 \dots w_n)$ 를 전치벡터로 곱하여 다음과 같은 관계식을 얻는다. 즉, 행렬 A 가 일관성을 갖는 조건을 말한다.

$$Aw = \lambda w \quad (3)$$

λ : A 의 고유치 w : A 의 고유벡터

그런데 일반적으로 속성에 대한 쌍대비교는 비일관성(inconsistency)이 나타나게 되므로 최대고유치(λ_{max})를 이용하면 다음 식을 얻는다.

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (4)$$

이를 다시 쓰면 제차 선형연립방정식인 다음과 같은 식을 얻는다.

$$(A - \lambda_{max} I) w = 0 \quad (5)$$

상기 식을 만족시키는 영벡터(zero vector)가 아닌 w 를 구하면 된다. 간단히 요약하면 평가행렬에서 고유치를 계산하고 최대고유치에 해당하는 고유벡터를 구해서 가중치의 합이 1이 되도록 표준화(normalize)한다.

식(4)에서의 λ_{max} 는 식(3)에서 λ 의 추정값이다. Saaty는 최대고유치(λ_{max})는 속성의 수(n)보다 항상 크거나 같다는 것을 입증하였다.

계산된 최대고유치가 속성의 수에 가까울수록 쌍대비교 행렬 평가는 더욱 일관성이 있다고 할 수 있다. 이 성질은 다음과 같은 일관성 비율로 측정하며 일관성비율의 값이 10% 이하이면 평가가 일관성이 있다고 하고 20% 이내이면 허용(tolerable)할 수 있는 평가라고 할 수 있다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda - n}{n - 1} \frac{1}{RI} \quad (6)$$

CR(Consistency Ratio) : 일관성 비율

CI(Consistency Index) : 일관성 지수= $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$

RI(Random Index) : 난수지수

RI는 난수지수로 Saaty가 컴퓨터 시뮬레이션으로 산출한 가중치의 평균지수이다.

④ 제4단계 : 복합 가중치 계산

평가대상이 되는 여러 대안들에 대한 종합순위를 얻기 위하여 의사결정 사항들의 상대적 가중치를 종합화한다.

⑤ 제5단계 : 대안 평가 및 분석

제4단계에서 산출된 복합가중치를 대상으로 전체적으로 동일 기준을 적용하기 위해 표준화(normalize)시키며 표준화된 복합가중치를 토대로 우선순위를 부여한다.

3. 분석대안 및 평가요인 선정

3-1. 분석대안 선정

현재 개발이 진행되고 있는 이산화탄소 저장 및 처리 기술은 4개 기술 분야, 총 41개 세부기술이 개발 진행되고 있다.

기술분석에 있어서 가능한 모든 대안을 모두 고려하는 것은 기술적으로 불가능하므로 본 연구에서는 각각의 4개 기술분야를 대상으로 실시하였으며 분석에 따른 편의상 각각의 기술분야를 Tech.₁~Tech.₄로 하였다 (Table 2 참조).

대안선정에 따른 각 기술 분야별 특성을 요약정리하면 다음과 같다.

고온순산소기술의 특성은 다음과 같다. 에너지 열원으로 이용되는 산화제(O₂)는 공기를 이용한 화석연료의 연소시 불활성가스인 N₂ 가열에 소모되므로 효율성이 낮아진다. 이러한 측면을 고려한 기술성의 확보로 에너지 효율성을 강화한 순산소연소를 핵심기술의 대상으로 제시되었다. 순산소 연소기술의 장점은 적용 후, 연소 후 가스는 복사율이 높은 고농도 CO₂ 및 H₂O로만 구성되기 때문에 화염온도의 증가와 함께 연소 후 에너지낭비를 줄이고 효율의 증가로 가열시간 단축으로 인한 에너지소비 즉 CO₂ 발생을 극도로 줄일 수 있으며 산성비의 주범인 NOx의 제거로 배기가스 중 CO₂ 농도가 높아 CO₂ Capture의 효과가 높아서 온실가스 저감의 영

Table 2. Sectors of technologies.

기술명	기술분야
Tech. ₁	고온순산소연소기술분야
Tech. ₂	반응분리공정기술분야
Tech. ₃	미활용에너지기술분야
Tech. ₄	CO ₂ 회수 및 처리기술분야

항력이 크다. 미국의 경우 40% 에너지절약 및 90% NOx 저감이 가능한 순산소 연소가열시스템 기술과 산소 제조단가를 2008년 기준 현재의 1/3수준으로 한 ITM(Ion Transport Membrane) 기술을 개발 중이며, 순산소를 이용한 CO₂ 회수형 연소시스템에 대한 연구는 초기단계이나 실시간 화염전단 기술은 기존 연소시스템에 부분적으로 상용화되고 있다.

반응분리공정기술의 특성은 다음과 같다. 산업에너지 부문 중 화학공정에서 소비하는 비율이 약 30% 정도로 산출되고 있으며 화학공정 에너지의 약 40%가 분리공정에 사용되는 에너지이용밀도가 높은 분야이다. 즉, 화학공정에서의 반응 및 분리 분야는 전형적인 에너지 다소비형 산업공정으로 이 분야에서 약 30%의 에너지만 절감해도 국내 전체 에너지 소비의 약 2% 정도를 절감하는 효과가 있다. 선진국의 경우 반응증류, 막반응, 흡착반응공정 등의 기술이 석유화학산업의 평형제한 반응(탈수소화, 수소화, 에테르화, 에스테르화, 수증기개질 등)에 일부 상용화 도입 및 연구단계에 있고, 나프타접촉 분해 및 올레핀 상온분리는 PDU급 연구 중이다.

미활용에너지 이용기술의 특성은 다음과 같다. 미활용 에너지란 생소한 개념이지만 생산 활동을 위해 사용하는 에너지 중 경제적 가치, 이용방법의 한계 등의 이유로 더 이상 사용하지 못하고 자연계로 최종 배출되는 에너지를 통칭하며, 일반적으로는 이 중에서 냉난방, 급탕열원으로 이용이 가능한 에너지를 지칭한다. 미활용에너지 이용기술의 경제성확보 및 에너지활용효과 제고를 위해서는 1) 고효율, 고성능을 위한 시스템 최적화 기술개발,

2) 열교환기, 압축기 등 핵심기기 개발, 3) 전처리기술, 축열, 열수송, 열회수 등 효율제고를 위한 핵심 공정개발, 4) 안정적 운영을 위한 최적운전 및 관리기술, 5) 특히 시스템 네트워크 기술에 대한 체계적인 연구개발이 요구된다. 일본의 경우 자연에너지 및 도시지역 미활용에너지에 관한 열공급시스템 요소기술(열교환, 열펌프, 열수송, 축열, 플랜트 계획 및 운전소프트웨어) 등의 개발과 실증시험을 통해 실용화 보급기반을 구축하여 일부 상용화가 이루어진 상태이다.

CO₂ 처리기술의 적용에 의한 경제적 효과는 단순히 에너지 효율 향상을 한 경우에 비해 CO₂ 처리기술을 병행 적용할 경우 지구 온난화 가스 농도를 안정시키는데 필요한 비용이 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 비용 절감 효과는 대기 중 CO₂ 농도를 낮게 유지하는 경우 특히 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 미국에서 CO₂ 농도를 550 ppm(전문가들이 실질적으로 도달할 수 있는 수준으로 제시한 수치임.)으로 유지하는 경우 CO₂ 처리 기술을 개발 적용함에 따라 절감할 수 있는 비용은 약 110억 달러선인 것으로 추산되었다(PNNL-13095, 2000). 이와 같이 온실가스 처리기술의 개발에 따른 경제적 효과가 막대하기 때문에 온실가스 배출 양이 많은 선진국(미국 및 일본 등)에서는 CO₂ 처리기술의 개발에 많은 연구비를 투입하여 연구를 수행중이다.

3-2. 평가 영향요인 선정

영향요인(impact factor)이란 개발기술에 직접 또는 간접적으로 영향을 끼칠 수 있는 요인들로서 이는 유/무

Table 3. Impact factor category.

적용	항목1	항목2	비고
	1. 기술성	1-1. 국외기술개발동향 1-2. 선진국대비 기술수준 1-3. 국내인프라구축 수준 1-4. 개발기술우수성 1-5. CO ₂ 저감량	개발기술이 지니고 있는 기술적 측면을 고려한 것으로기술의 진보 여부 및 기반을 바탕으로 우수성, CO ₂ 저감량의 우수성 등을 분석
SMM/AHP 공통적용	2. 상업성	2-1. 경제적 부가가치 창출 2-2. 상용화가능성 2-3. 시장진입가능성 2-4. 시장규모	기술개발에 따른 상업적 파급효과를 고려한 요인들로서 시장성 등을 분석
	3. 연계성	3-1. 목표달성기여도 3-2. 타기술과의 연계성 3-3. 특허분쟁소지	개발기술이 분과내 타기술에 끼치는 영향 등과 산업재산권 취득에 따른 영향 등을 고려
	1. 기술성	1-1. 개발기술의 범주	독자기술, 선진기술 수정 등을 파악
SMM 단독적용	2. 상업성	2-1. 상용화 시점 2-2. 시장단계	기술개발 단계추정 및 시장진입 단계 분석
	3. 연계성	3-1. 공동/협동연구 필요 정도	자체개발, 공동개발, 협동연구, 기술도입 등 분석

형적, 정성적, 정량적 특성을 모두 포함하고 있는 총체적 요인들을 말한다.

따라서 본 분석에서 영향요인은 대상의 기술적, 경제적, 환경적 요인 등과 같은 여러 가지 요인들을 고려하여야 하며 이들 요인들이 끼치는 영향에 대해 객관성을 유지하고 있어야 한다.

본 연구에서는 정량적 지표와 정성적 지표로 구분한 영향요인을 발굴하였다. 이러한 요인들은 관련 기술개발 사업에 참여하고 있는 분과 세미나를 통해서 쟁점화되고 비중있게 논의되었던 내용과 에너지기술 측면에서 고려되어야 할 내용들을 대상으로 발굴하였다.

정량적 영향요인으로 기술성, 상업성, 기술연계성의 3개 상위 요인과 함께 12개 하위요인으로 발굴하여 분석 평가하였으며 “계량적 연구성과 결과”와 같은 요인의 경우 정량적 평가 범주에 포함되기는 하나 AHP 분석보다는 결정론적 평가방법에서 단독으로 타 기술분야와 비교 분석을 실시하였다.

정성적 영향요인으로는 개발기술의 범주, 상용화 시점 및 시장단계, 공동/협동연구 필요 정도와 같은 요인들을 발굴하여 분석하였다.

기술성은 개발기술이 지니고 있는 기술적 특성 고려한 평가요인으로서 하위 평가요인은 국외 기술개발동향과 선진국대비 기술수준, 국내 인프라구축 수준, 개발기술 우수성, CO₂ 저감량으로 구분하였다.

상업성은 기술개발에 따른 상업적 파급효과를 고려한 요인들로서 시장성 등을 고려한 경제적 부가가치 창출, 개발기술의 상용화 가능성, 개발후의 시장진입가능성, 시장규모 등으로 구분하여 설정하였다.

연계성은 기술개발에 따른 타 분야 또는 연구 분과내에서의 연계성으로서 분과내 목표달성기여도, 분과내 타 기술과의 연계성, 특허분쟁소지 등으로 구분하여 설정하였다.

4. 기술분야별 분석 및 평가

4-1. 결정론적 평가방법에 의한 분석 및 평가

4-1-1. 분석방법

이산화탄소 저감 및 처리기술의 현황을 분석하기 위한 방법으로 2004년 1월중에 41명의 개발기술별 연구 책임자를 대상으로 설문평가방법으로 실시하였으며 전량 회수하여 분석하였다.

조사결과 분석은 크게 정량적 분석과 정성적 분석이 가능토록 하였으며 정성적 분석을 계량화하기 위해 순위측정에 따른 평점방법(scoring models method, SMM)을 선택한 5점 척도 방식을 적용하였고 정량적 방법은 최소치 선택이 아닌 최대치 선택이 가능토록 하기 위한 수치를 부여하여 선택토록 하였다.

조사를 위한 설문은 총 20개 문항으로 구성되어 있는데 본 문항색출은 그간 프로그램 추진에 따른 각 분과별 세미나에서 이슈화되었던 내용과 정책적 측면에서 기술개발에 반드시 필요하다고 생각되는 부분을 정리하여 구성하였다.

분석은 크게 4분야(기술적 측면, 상업적 측면, 기술연계 측면, 계량적 예상성과 결과 측면)로 구분하여 각각의 조사항목들을 적용하여 분석하였다.

전체적인 측면에서 총 20개의 설문문항 중 12개 문

Table 4. Result of analysis by SMM.

항목 1	항목 2	Tech.1	Tech.2	Tech.3	Tech.4
기술성	국외기술개발동향	0.800	0.850	0.750	0.820
	선진국대비 기술수준	0.767	0.825	0.750	0.800
	국내인프라구축 수준	0.600	0.638	0.575	0.500
	개발기술우수성	0.900	0.838	0.825	0.820
	CO ₂ 저감량	0.633	0.713	0.650	0.820
	평균	0.740	0.773	0.710	0.752
상업성	경제적 부가 가치 창출	0.733	0.863	0.800	0.800
	상용화가능성	0.867	0.838	0.825	0.720
	시장진입가능성	0.800	0.800	0.850	0.780
	시장규모	0.667	0.725	0.650	0.700
	평균	0.767	0.807	0.781	0.750
연계성	기술분야내 목표 달성기여도	0.733	0.550	0.600	0.660
	기술분야내 타 기술과의 연계성	0.900	0.663	0.825	0.720
	특허분쟁소지	0.733	0.850	0.825	0.760
	평균	0.817	0.607	0.713	0.690

항은 5점 척도 분석을 통해 각각의 척도에 가중치를 부여하여 합계점수가 "1"이 되도록 조정하였으며 이들 합산 값을 표준화(normalize)하여 상대적 비교분석을 실시하였다.

4-1-2. 분석 및 평가

본 조사에서 5점 척도로서 가중치를 부여할 수 있는 20개 조사항목 중 12개 조사대상 평가요인항목별 평균 점수는 0.762로서 전체적으로 높은 지수를 보이고 있다.

기술분야별 및 특성별 평균값의 경우 고온순산소의 경우 기술연계 측면의 지수(0.817)가 상대적으로 높게 나타나고 있으며 상업적 측면(0.767), 기술적 측면(0.740) 순으로 전체 평균은 0.775인 것으로 나타났다.

반응분리공정의 경우 상업적 측면(0.807)이 가장 높게 나타났으며 기술적 측면(0.773), 기술연계 측면(0.607) 순으로 나타났는데 기술연계 측면이 비교적 다른 요인들과 비교하여 낮은 것으로 나타났다.

미활용에너지의 경우 상업적 측면(0.781)이 가장 높게 나타났다. 다음으로 기술연계측면(0.735), 기술적 측면(0.710)순으로 나타났으며 CO₂ 회수처리의 경우 기술적 측면(0.752), 사업적 측면(0.750), 기술연계측면(0.690)순으로 나타났다.

본 결과에 대한 비교분석은 단순조사를 통한 결과 값을 보여주는 것으로서, 분과별 특성별 점수를 비교하는 것은 아니라는 것이며 또한 조사 결과 값이 기술분야별 전문가의 주관적인 판단으로 정해지는 것이기 때문에 설문항목별 점수에 대한 객관성이 결여되어 있다고 할 수 있다.

따라서 이러한 점을 보완하기 위해 AHP방법에 의해 평가요인별 중요도를 산출하고 이를 승산한 값에 따라 각각의 기술분야별 중요도에 산출에 따른 비교 분석을 실시하였다.

4-2. AHP에 의한 분석 및 평가

4-2-1. 평가기준의 계층구조 기본설계

본 연구에서는 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발을 위해 수행되고 있는 4개 기술분야에 대한 종합 평가분석을 수행하기 위해 AHP 모형을 설정하고 이에 따른 평가를 실시하였다.

이산화탄소 저감 및 처리기술에 대한 평가기준의 계층구조 기본설계를 위해 평가특성은 여러 요인으로 구분될 수 있는데 이를 AHP모형에 적용하기 위해 크게 제 1계층과 2계층으로 구분하여 기본 모형을 설계하였다.

제 1계층으로는 기술성, 상업성, 기술연계성으로 구분하였으며 이는 다시 특성별 요인에 따라 제 2계층(hierarchy 2)으로 나누었다.

제 2계층의 세부특성으로는 국외기술개발동향, 선진국

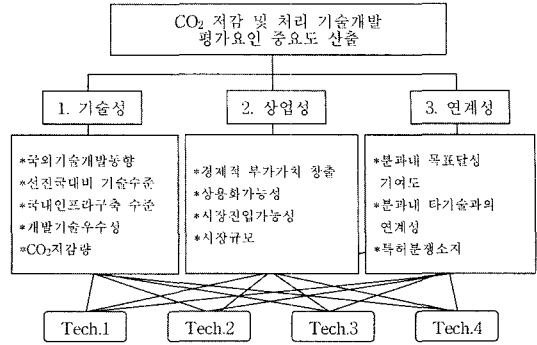


Fig. 1. Hierarchy model of AHP.

대비 기술수준, 국내인프라구축 수준, 개발기술우수성, CO₂ 저감량, 경제적 부가가치 창출, 상용화가능성, 시장진입 가능성, 시장규모, 분과내 목표달성 기여도, 분과내 타 기술과의 연계성, 특허분쟁소지의 12개 하위특성으로 구성하였다.

4-2-2. AHP 모형의 적용방법

이산화탄소 저감 및 처리기술의 각 연구분야별 기술에 중요도 평가는 각 대안에 대한 여러 특징들을 종합적으로 고려하여야 한다.

이산화탄소 저감 및 처리기술에 대한 평가는 다속성 의사결정 방법의 하나로 간주할 수 있는데 일반적으로 다속성의사결정 모형에는 어떤 한 요소의 유리한 평가가 다른 요소의 불리한 평가를 상쇄할 수 있는 선호보정이 있는(compensatory) 모형과 선호보정이 없는(non-compensatory) 모형으로 분류된다. 선호보정이 없는 모형에서는 각 요소의 평가만으로 각 대안을 비교하며 선호보정이 있는 모형에서는 각 의사결정자의 선호에 대한 정보를 얻을 수 있는 경우에 사용된다.

본 연구에서는 각 대안의 평가특성에 대한 가중치를 계층분석과정에 의하여 도출하는 선호보정이 있는 모형을 사용하였다.

각 대안이 정량적인 요소와 정성적인 요소로 혼합되어 이루어진 경우에는 이를 통합하는 문제가 생긴다. 표준화는 서로 다른 측정단위를 갖는 요소들의 값을 비교 가능한 척도로 변환하는 절차이며, 표준화에는 벡터 정규화와 선형변환 등이 있다. 본 연구에서는 수치가 높을수록 높은 선호도를 갖는 요소에 대해서는 최대치를 기준하고, 수치가 낮을수록 높은 선호도를 갖는 요소에 대해서는 최소치를 기준하여 각 요소를 변환하는 선형변환 방법을 사용하였다. 그러면 대안 *i*의 *j*번째 평가특성에 대한 평가치를 x_{ij} 로 표기할 때, 선형변환에 의하여 변환되는 대안 *i*의 *j*번째 r_{ij} 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}, \text{ 최대치 기준의 경우,}$$

$$r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}, \text{ 최소치 기준의 경우,}$$

(6)

AHP를 이용하여 이산화탄소저감 및 처리기술에 대한 각 평가특성의 중요도를 구하기 위하여 기술개발사업에 참여하고 있는 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다.

설문지는 AHP를 이용하여 개발기술에 관한 평가항목 중요도 산출과 평가요인의 중요도 산출을 위한 문항으로 구성되었다.

또한 설문조사의 회수율과 신뢰성을 높이기 위하여 설문내용에 대하여 자세한 설명을 하였는데 설문지는 총 25매를 배부하여 15매의 설문지를 회수하였으며 각각의 회수 설문평가서의 일관성(CR)을 점검한 결과 13인의 전문가로부터 응답된 설문서를 채택하여 최종 중요도 산출의 자료로 활용하였다.

이와 함께 응답자의 이해를 돕기 위해 응답방식에 대한 설명을 첨부하였다.

그리고 각 평가특성의 중요도를 산출하기 위해 사용된 척도의 범위는 1에서 9까지의 정수 또는 이의 역수로서 표현하였다. 이러한 평가특성간의 이원비교로 얻는 중요도를 행렬형태로 나타낸 행렬 A는 주 대각선의 원(main diagonal)들이 모두 1이고, 역수행렬(reciprocal matrix)의 특성을 갖는 특수한 형태의 정방행렬이 된다.

또한 설문조사의 결과가 몇 개의 극단치에 의하여 좌우되는 단점을 극소화하기 위하여 기하평균을 이용하여 중요도를 산출하였으며 개발기술에 대한 각 평가특성의 중요도는 AHP전용 S/W인 Expert Choice2000을 사용하여 산출하였다.

4-2-3. AHP적용 중요도 산출

■ Hierarchy 1의 요인별 중요도 산출

계층 1의 특성으로 분류된 3가지 요인은 기술성, 상업성, 기술연계성 등의 순서로 평가되었다.

이 중에서 기술성의 가중치는 42.3%로 가장 높게 나타났으며 다음이 상업성으로 36.7%, 기술연계성 21.0%의 순서로 가중치를 지니고 있는 것으로 산출되었다.

■ Hierarchy 2의 요인별 중요도 산출

기술성의 하위 특성에 대한 중요도는 개발기술 우수

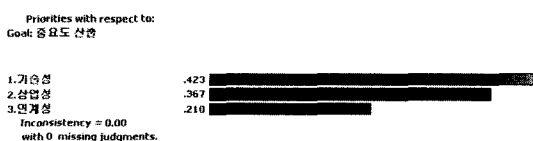


Fig. 2. Impact factor weights of hierarchy1.

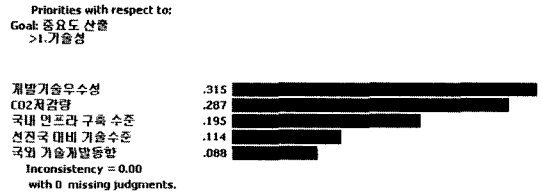


Fig. 3. Impact factor weights of hierarchy2 (technical factor).

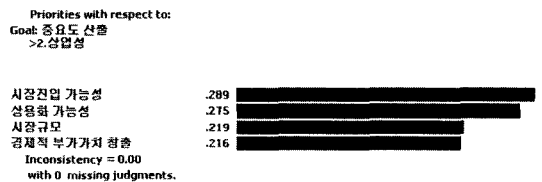


Fig. 4. Impact factor weights of hierarchy2 (commercial factor).

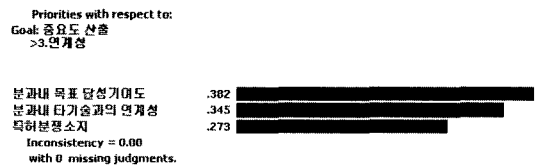


Fig. 5. Impact factor weights of hierarchy2 (relation factor).

성이 가장 높은 31.5%를, CO₂ 저감량이 28.7%, 국내인프라 구축수준(11.4%), 국외기술개발동향(8%)순으로 계산되었다.

상업성의 하위 특성에 대한 중요도는 시장진입 가능성이 28.9%로 가장 높게 평가되었으며 다음으로 상용화가능성(27.5%), 시장규모(21.9%), 경제적 부가가치창출(21.6%)순으로 나타났으며 전반적으로 20%선에서 큰 차이를 보이고 있지 않은 것으로 나타났다.

기술 연계성의 하위 특성에 대한 중요도는 분과내 목표달성기여도가 38.2%로 가장 높게 평가되었으며 다음으로 분과내 타기술과의 연계성(34.5%), 특허분쟁소지(27.3%)순으로 나타났다

4-2-4. 종합가중치 산출

전체적인 가중치 분포를 살펴보면 기술성 부문에서 상위 1, 2 순위를 차지하고 있는 가운데 개발기술우수성이 0.1333, CO₂ 저감량이 0.1215의 가중치를 지닌 것으로 평가되었다.

상업성의 경우 시장진입가능성(0.1062), 상용화가능성(0.1009)순으로 전체의 3, 4위의 중요도를 보이고 있는

Table 5. Result of evaluation.

1 계층		2 계층				순위
요인	가중치 (A)	세부요인	가중치 (B)	종합가중치 (C=A*B)		
				weights	normalize	
기술성	0.423	국외기술개발동향	0.088	0.0373	0.2798	12
		선진국대비 기술수준	0.114	0.0484	0.3631	11
		국내인프라구축 수준	0.195	0.0826	0.6197	5
		개발기술우수성	0.315	0.1333	1.0000	1
		CO ₂ 저감량	0.287	0.1215	0.9115	2
상업성	0.367	경제적 부가가치 창출	0.216	0.0794	0.5956	8
		상용화가능성	0.275	0.1009	0.7569	4
		시장진입가능성	0.289	0.1062	0.7967	3
		시장규모	0.219	0.0804	0.6032	6
연계성	0.210	분과내 목표달성기여도	0.382	0.0802	0.6017	7
		분과내 타기술과의 연계성	0.345	0.0725	0.5439	9
		특허분쟁소지	0.273	0.0573	0.4299	10
Total	1.000	Total	1.0000			

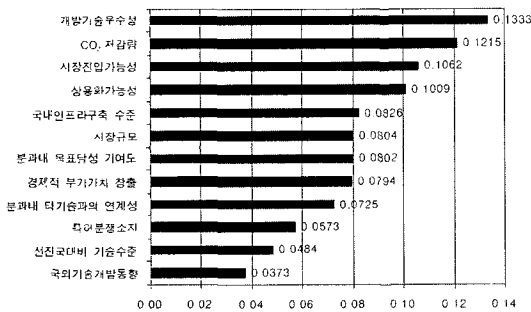


Fig. 6. Ranking of importance weight.

것으로 나타났으며 기술연계성의 경우 3개 세부 평가요인 모두 중요도에서 하위를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

4-2-5. 복합 가중치 계산

각 평가특성의 가중치를 AHP에 의해 구하고 여기에 대응되는 결정론적 평가법에 의해 구해진 평가특성의 값을 표준화하여 종합가중치를 곱하여 얻은 총 점수로서 복합가중치를 산출하였다.

5. 종합분석 및 결론

5-1. 종합분석

복합가중치에 따른 순위에 있어서 4개 분야의 기술들이 아주 미세한 차이로서 Tech₁, Tech₃, Tech₃, Tech₄ 순으로 나타났다.

기술성 측면에서 살펴보면 국외기술개발동향, 선진국

대비 기술수준, 국내 인프라 구축 수준 모두 반응분리 기술분야가 가장 우수한 것으로 나타났으며 개발기술의 우수성에서는 고온순산소분야, CO₂ 저감량분야에서는 CO₂ 회수처리분야가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이를 종합한 기술성에서 가장 높은 복합가중치는 반응분리기술 분야로서 39.75%를 차지하였다.

상업성 측면의 경우 경제적 부가가치 창출과 시장규모는 반응분리기술분야, 상용화 가능성 측면에는 고온순산소기술분야, 시장진입가능성에서는 미활용에너지기술분야가 각각 우수한 평가요인으로 나타났다. 상업성을 종합한 복합가중치는 반응분리기술분야가 35.7%로 가장 우수한 것으로 나타났다.

기술연계성 측면의 경우 분과내 목표달성기여도와 분과내 타기술과의 연계성 측면에서 고온순산소 분야, 특허분쟁소지가 가장 없을 것이라는 요인은 반응분리분야가 높았다. 기술연계성 분야의 종합은 고온순산소 분야가 20.21%로 가장 높게 나타났다.

복합가중치에 의한 각각의 기술이 지니고 있는 일련의 여러 상황을 고려할 때 전체적 순위보다는 영향요인에 따른 개발기술의 선택과 집중을 위한 노력이 필요하며 이를 토대로 성과를 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

5-2. 결론

결정론적 평가법과 AHP에 의해 이루어진 이산화탄소 저감 및 처리기술에 대한 분석과 평가는 기술개발에 따른 생산성 향상 및 성과제고라는 측면에서 시행되었다.

이에 따른 결과로서 기술개발에서 고려해야 할 중요도에 대한 영향요인(impact factor)을 분석하고 지수와 복

Table 6. Result of evaluation after scaling.

1 계층 (weight)	2 계층 (weight)	복합가중치			
		Tech. ₁	Tech. ₂	Tech. ₃	Tech. ₄
기술성 (0.423)	국외기술개발동향 (0.088)	0.03503	0.03722	0.03284	0.03591
	선진국대비 기술수준 (0.114)	0.04483	0.04822	0.04384	0.04676
	국내인프라구축 수준 (0.195)	0.07757	0.08249	0.07434	0.06464
	개발기술우수성 (0.315)	0.13325	0.12407	0.12214	0.12140
	CO ₂ 저감량 (0.287)	0.09372	0.10556	0.09623	0.12140
	total	0.38440	0.39756	0.36940	0.39012
상업성 (0.245)	경제적 부가가치 창출 (0.216)	0.06733	0.07927	0.07349	0.07349
	상용화가가능성 (0.275)	0.10093	0.09755	0.09604	0.08381
	시장진입가능성 (0.289)	0.09982	0.09982	0.10606	0.09733
	시장규모 (0.219)	0.07394	0.08037	0.07206	0.07760
	total	0.34202	0.35702	0.34764	0.33223
연계성 (0.208)	분과내 목표달성기여도 (0.382)	0.08022	0.06019	0.06566	0.07223
	분과내 타기술과의 연계성 (0.345)	0.07245	0.05337	0.06641	0.05796
	특허분쟁소지 (0.273)	0.04944	0.05733	0.05564	0.05126
	total	0.20211	0.17089	0.18772	0.18145

합가중치를 산출함으로써 향후 개발에 따른 방향성을 결정할 수 있는 방안을 제시하였다.

각 개발기술들이 지니고 있는 특성을 감안할 때 기술 개발에 따른 영향정도를 고려하여 상업화 집중 기술분야와 기반기술확보 분야로 구분하여 연구개발을 추진하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 즉, 반응분리기술의 경우 상업회에서 가장 높은 지수를 보이고 있음에 따라 상업화에 주력할 수 있는 기술개발 방향이 필요한 반면, 회수처리기술분야의 경우 기반연구에 중점을 두고 연구개발을 수행함으로써 향후 상업화에 대비한 기술개발이 필요할 것으로 판단된다. 기술연계성이 뛰어난 고온순산소기술분야의 경우 시스템 전체를 상업화 대상으로 하기에는 너무 규모가 큰 경향이 있음에 따라 기술연계성이 뛰어난 부분기술을 상업화 대상으로 선정하여 집중적인 개발이 필요할 것으로 판단되며 미활용에너지기술분야의 경우 시장진입이 가장 큰 것으로 보아 시장진입을 위한 조사와 함께 진입에 따른 장애요인들을 해결할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구결과에 따라 향후 진행되고 있는 개발기술에 대한 선택과 집중을 위한 정책적 의사결정 자료로서 활용될 수 있을 것을 기대한다.

참고문헌

1. 21세기 프론티어 연구개발 사업단, 제1회, 제2회 이산화탄소 저감 및 처리 기술 workshop 프로시딩, 2003, 2004.

2. 이덕기: 국내 CO₂ 저감 및 처리기술개발 현황 분석, 2004 한국자원경제학회 춘계학술대회 프로시딩 (2004. 2. 12).

3. 이덕기: AHP를 이용한 에너지시스템 대안선정 평가, 자원환경경제연구, 12, 611 (2003).

4. 박수익: 기후변화협약에 대응한 국내의 정책 조사 분석, 한국에너지공학회 추계학술대회, 205 (2003. 11. 27).

5. Coates: "The Role of Formal Models in Technology Assessment", Technological Forecasting and Change 9 (1976).

6. Hwang, C.L. and Lin, M.J.: Group Decision Making under Multiple Criteria-Methods and Applications, Springer-Verlag, 342 (1987).

7. Rubenstein, A.H.: "Setting Criteria for R&D", Harvard Business Review, 95 Jan.-Feb. (1975).

8. Saaty and L.G. Vargas: The Logic of Priorities : Application in Business, Energy, Health, and Transportation, RWS Publication (1991).

9. Saaty, The Analytic Network Process, RWS Publication (1996).

10. Simón, Herbert A.: From Substantive to Procedural Rationality, in Sapiro J. Latsis (Ed.) Methodology Appraisal in Economics. Cambridge : Cambridge University Press (1976).

11. Takahisa Yokoyama, Japanese R&D on CO₂ Capture, Central Research Institute of Electric Power Industry, October (2002).