

규모의 경제성을 고려한 전략적 온실가스저감기술 개발을 위한 다기준의사결정기법: AHP/DEA CCR-I 및 BCC-I 혼합모형 적용

이성곤[†], 겐토 모기^{**}, 김종욱^{*}

*한국에너지기술연구원 정책연구실, **The Univ. of Tokyo 기술경영학과

Multi-criteria Decision Making Method for Developing Greenhouse Gas Technologies Strategically Considering Scale Efficiency: AHP/DEA CCR-I and BCC-I Integrated model Approach

SEONGKON LEE[†], GENTO MOGI^{**}, JONGWOOK KIM^{*}

**Energy Policy Research Division, Korea Institute of Energy Research
71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea*

***Department of Technology Management for Innovation(TMI), Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan*

ABSTRACT

In 1997, Korean government established the National Energy and Resources Plan, which targeted from 1997 to 2005 with strategic energy technology development. At the end of 2005, Korean government built a New National Energy and Resources Plan preparing for upcoming 10 years from 2006 until 2015 based on energy technology trees comparing with the previous plan, which based on the energy R&D projects. In this research, we prioritize the relative preferences and efficiency by an AHP/DEA CCR-I and BCC-I integrated model approach considering scale efficiency for well focused R&D and efficiency of developing Greenhouse Gas technologies as an extended research from a view point of econometrics as an extended research.

KEY WORDS : Greenhouse gas technology(온실가스저감기술), Energy technology policy(에너지 기술정책), AHP(계층분석적 의사결정기법), DEA(자료포락분석), MCDM(다기준 의사결정), Scale efficiency(규모의 경제성)

Nomenclature

[†]Corresponding author : sklee@kier.re.kr AHP : Analytic hierarchy process

규모의 경제성을 고려한 전략적 온실가스저감기술 개발을 위한 다기준의사결정기법:
AHP/DEA CCR-I 및 BCC-I 혼합모형 적용

- BCC-I : Banker, Charnes, Cooper Input oriented model
- CCR-I : Charnes, Cooper, Rhodes Input oriented model
- CRS : Constant return to scale
- DEA : Data envelopment analysis
- DMU : Decision making unit
- DRS : Decreasing return to scale
- ETRM : Energy technology roadmap
- GHG : Greenhouse gas
- IRS : Increasing return to scale
- KIER : Korea institute of energy research
- MCDM : Multi-criteria decision making
- RTS : Return to scale
- SE : Scale efficiency
- UNFCCC : United nations framework convention on climate change
- VRS : Variable return to scale

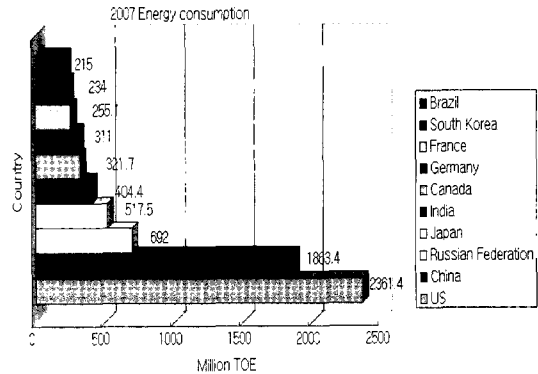


Fig. 1 2007 Energy consumption index (BP, 2008)

1. 서 론

배럴당 130달러(Dubai유, 2008년 7월 기준)의 고유가 시대에 접어들고 있으며, 이러한 고유가 현상은 일시적 현상이 아니라 장기적으로 고착화 될 것으로 예상된다. 전세계 많은 전문가들은 배럴당 200달러시대의 제 3차 오일쇼크시대에 도달할 수도 있다고 예견하고 있다. 우리나라의 에너지지수를 보면 자원빈국으로 소비되는 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 그리고 에너지총소비 TOE는 234백만 TOE로 세계 9위의 에너지소비대국이다. Fig. 1은 세계 10대 에너지소비대국의 총 에너지 소비지수를 나타낸 것이다.

또한 온실가스 배출량은 2005년 기준 449백만 TOC으로 세계 10위의 온실가스배출국가이며, 배출량 증가율은 세계 1위를 차지하고 있다(IEA, Key World Energy Statistics 2007). 최근 제13차 발리 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)을 통해 국가별 온실가스감축 공약을 수립하고 이에 합의 하였다. 우리나라의 경우 현재 온실가스감축 비의무대상국인 비부속서 가맹국(Non-Annex I)

이나 향후 2013년 온실가스감축 의무대상국가인 부속서 가맹국(Annex I)으로 될 것으로 예상된다.

국가에너지수급안정화를 위한 최적 대안중 하나는 에너지기술개발이다. 우리나라의 에너지환경을 극복하기 위해 전략적으로 한정된 예산을 고려하여 경제적 관점에서 에너지자원기술개발에 선택과 집중(Well focused R&D)을 하여야 할 시점이다. 에너지기술개발이 제2의 에너지자원개발이라고 할 수 있으며, 본 연구는 국가에너지자원기술개발 10개년 계획을 통해 에너지환경변화에 적극적·능동적·전략적으로 대응하기 위한 기술개발 우선순위를 분석하였다.

정부는 2005년 에너지자원기술개발 10개년 계획(2006-2015)을 통해 에너지기술개발에 중점을 두고에너지효율향상기술, 온실가스저감기술, 신재생에너지기술, 전력기술의 4가지 대분야 기술트리(Technology tree)를 구성하였다. 본 연구는 4가지 대분류 기술중에서 온실가스저감기술부문에 대한 에너지기술개발 우선순위를 다기준의사결정기법(MCDM: multi-criteria decision making)을 적용하여 우선순위를 선정하였다. 본 연구는 기존 연구의 확장된 연구결과로 AHP/DEA 혼합모형을 적용하기 위해 1단계에서는 AHP기법을 통하여 평가기준간의 가중치를 도출하고, 도출된 평가기준간의 가중치를 정량화된 data에 적용하였다. 2단계에서는 계량경제적 관점에서 DEA기법을 적용

해 온실가스저감기술의 효율성분석을 통해 기술개발 우선순위를 도출하였다.

2. MCDM기법

2.1 Analytic Hierarchy Process

AHP기법은 1970년대 초반에 미국 Pittsburgh 대학의 Saaty 교수에 의하여 최초로 개발된 의사결정기법이다. AHP기법은예비타당성조사, 기술가치평가, 공공부문의 정책수립 및 의사결정분야, 기업의 경영전략수립분야, 마케팅, 생산, 제조 등 다양한 분야에 폭넓게 적용되고 있는 계량경영기법이다.

AHP기법은 현실세계의 복잡하거나 애매모호한 의사결정문제를 목표(Goal), 기준(Criteria), 대안(Alternatives)의 3가지 항목으로 구분하여 계층구조화(Hierarchy structure)하고 문제를 간략하게 분해(Decomposition)할 수 있다. 각 계층 항목간의 평가기준의 쌍대비교(Pairwise comparison)시 대안들간의 일관성 검증을 통해 일관성이 있는 대안만을 선택하여가중치를 도출한다.

Table 1과 같이 AHP기법의 장점은 현실문제를 계층구조화하고 평가기준에 대한 정량적인 요소뿐만 아니라 정성적 요소도 1~9점까지의 정량적인 지수로 변환하여 상대적 가중치를 도출할 수 있다.

AHP기법은 대안간의 독립성을 인정하고 서로 중복되지 않는 독립적인 평가기준을 선정하고, 계층구조의 적정성을 고려한 후 평가기준간의 독립

성이 부재한 요소는 검토후 재 수립을 하고 평가기준간 독립성이 보장된 경우 평가기준으로 선정을 완료한다. 대안간의 가중치를 도출하기 위해서 설문조사 문항을 작성하고 전문가들로부터 설문결과를 취합하며, 가중치 도출시 대안간의 쌍대비교 후 일관성(Consistency Ratio)검증을 통해서 일관성이 있는 값(C.R≤0.1)만을 가중치 도출에 반영한다. 일관성검증 후 각 대안의 전반적인 우선순위를 계산한 결과를 이용하여 가중치가 가장 큰 대안을 선택한다.

식(1)은 행렬A(n×n)가 non-zero vector이면, Ax=λ_{max}·x가 되는 λ_{max}(행렬A의 가장 큰 고유치)가 존재한다는 것을 보여준다.

$$\begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_1 & w_2 & \dots & w_n \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \\ w_1 & w_2 & \dots & w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n \cdot w_1 \\ n \cdot w_2 \\ \vdots \\ n \cdot w_n \end{pmatrix} \Rightarrow A \cdot X = n \cdot X \quad (1)$$

(λ_{max} - n = 0)이 일치하는 정도를 지수로 나타낸 것이 일관성 지수(C.I: Consistency Index)이며, 식(2)는 일관성지수를 나타낸 것이다.

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

일관성지수를 랜덤지수(R.I: Random Index)로 나누어 일관성 비율(C.R)을 산정하여 C.R≤0.1인 경우, 일관성이 있다고 판단한다. 식(3)은 랜덤지수(R.I)를 나타낸 것이며, 식(4)는 일관성비율을 도출하는 방법을 나타낸 것이다.

$$R.I = \frac{n}{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ R.I & 0 & 0.58 & 0.9 & 1.12 & 1.24 & 1.32 & 1.41 \\ n & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ R.I & 1.45 & 1.49 & 1.51 & 1.54 & 1.56 & 1.57 & 1.58 \end{matrix}} \quad (3)$$

Table 1 Pair-wise comparison value

| Scale | definition |
|---------|----------------------------------|
| 1 | Equal importance |
| 3 | Moderate importance |
| 5 | Strong importance |
| 7 | Very strong importance |
| 9 | Extremet importance |
| 2,4,6,8 | Intermediate value of each scale |

$$C.R = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (4)$$

$$v_{ik} > 0, \text{ for } i = 1, \dots, m \quad (8)$$

2.2 Data Envelopment Analysis

DEA기법은 1978년 Charnes, Cooper 그리고 Rhodes에 의해 최초로 개발된다. 경제성관점에서 투입대비 산출의 효율성(Efficiency)을 분석하는 기법으로 대안(DMU: Decision making unit)간의 효율성을 측정할 경우 활용되는 의사결정기법이다. DEA기법은 은행, 보험회사, 병원, 대학, 식당 등 서비스 생산성 측정분야, 연구개발의 효율성 측정 등 AHP기법과 같이 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있다.

DEA기법은 특정 DMU(Decision making unit: 의사결정단위)의 관점에서 DMU 자신의 가중치를 최대화하여 효율성이 1에 도달할 경우 최적대안(Efficiency frontier group)으로 선정한다. 식(5)는 CCR모형을 나타낸 것이며, 식(6)은 투입(X_{ik})과 산출(Y_{rk})에 해당하는 변수에 각각 가중치 제한을 두어서 각 변수의 가중치 합이 1이 되도록 제한을 하여 최적 DMU를 도출한다. n개의 DMU가 있다고 가정하면, 투입변수와 산출변수는 각각 m 및 s 개의 변수를 가진다. k (k=1, ..., n)는 특정 DMU의 효율성이 최대치가 되는 값이다.

$$\text{Max } h_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik}} \quad (5)$$

$$\text{s.t } \frac{\sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik}} \leq 1, \text{ for } j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$u_{rk} > 0, \text{ for } r = 1, \dots, s \quad (7)$$

u_{rk} 는 k^{th} DMU의 r^{th} 번째 산출변수의 가중치이며, v_{ik} 는 k^{th} DMU의 i^{th} 번째 투입변수의 가중치이다. u_{rk} 와 v_{ik} 는 DMUk의 효율성을 나타내는 결정변수이다. Y_{rj} 는 j^{th} DMU의 r^{th} 산출값이다. X_{ij} 는 j^{th} DMU의 i^{th} 투입값이다. 그리고 모든 Y_{rj} 와 X_{ij} 는 양수이다. h_k 는 효율성지수를 의미하며 1보다 작거나 같다. h_k 의 효율성값이 1이면, DMUk를 최적대안(Efficient frontier)이라고 한다. 본 연구에서는 GHG 저감기술개발을 위해 한정되어 있는 R&D 비용을 효과적으로 투입하기 위해 R&D 비용을 얼마나 효과적으로 사용했는가에 중점을 두었다. 본 연구에서는 CCR-I와 BCC-I의 투입중심의 DEA 기법을 적용하여 각 모델별 효율성을 산정한 후 규모의 효율성(Scale efficiency) 측면에서 GHG 저감 기술별 투자비용의 효율성을 분석한다.

CCR모형은 1978년 Charnes, Cooper, Rhodes가 개발한 모형이다. CCR모형 중 Input-oriented 모형인 CCR-I모형은 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s.t} \quad & \theta x_o - \lambda X \geq 0 \\ & Y \lambda \geq y_o \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

θ 는 DMU의 효율성값으로 비음이며, 최대값은 1이다. x_o, y_o 는 투입물과 산출물 벡터, X, Y는 전체 DMUs의 투입물과 산출물 행렬, λ 는 가중치 벡터이다.

BCC모형은 CCR모형의 확장모형으로 Banker, Charnes, Cooper가 1984년 개발한 모형이다. 기존의 CCR모형에 규모의 수익불변을 완화하여 규모에 대한 가변효율성을 적용하고, 불특성 필요조건($\lambda = 1$)을 추가한 모형이다. 식(10)은 BCC모형중 투입물 중심의 Input-oriented 모형이다.

$$\begin{aligned}
 & \min \theta \\
 & \text{s.t. } \theta x_o - X\lambda \geq 0 \\
 & \quad y_o - Y\lambda \leq 0 \\
 & \quad e\lambda = 1 \\
 & \quad \lambda \geq 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

BCC모형은 규모의 가변효율성(RTS: Return to Scale)을 $e\lambda = 1$ 로 제약조건을 추가하여, RTS의 투입물이 증가(IRS: Increasing Return to Scale), 일정(CRS: Constant Return to Scale), 감소(DRS: Decreasing Return to Scale)되어야 하는지를 알 수 있다. e 는 열벡터이며, λ 는 행벡터이다. DMU의 규모의 효율성(SE: Scale efficiency)은 식(11)을 통하여 산출한다.

$$SE = \frac{CCR - I\text{의 } \theta\text{값}}{BCC - I\text{의 } \theta\text{값}} \tag{11}$$

CCR모형은 규모의 수익성VRS: Variable Return to scale)이 불변하기 때문에 규모의 수익성이 일정하다고 가정하므로 기술 효율성(Global Technical efficiency)이라 한다. BCC모형은 규모의 수익성 변동한다고 가정하므로 순수 기술 효율성(Pure technical efficiency)이라 한다.

3. 평가기준

GHG 저감기술의 평가기준을 계층화한후 AHP 기법을 적용하여 평가기준간 상대적 가중치를 도출한다. 계층화된 평가기준은 1단계와 2단계로 구분하였으며, 1단계의 평가기준은 기후변화대응, 경제적 파급효과, 기술적 파급효과, 기술개발 시급성, 에너지사용량 등의 5가지 평가기준을 선정하였다. 2단계의 평가기준은 기술개발 가능성, 에너지절감 가능량, 시장규모, 투자이익, 기술이전 용이성 등의 5가지 하부평가기준(Sub-criteria)을 선정하였다. AHP기법의 쌍대비교를 통해서 1단계 평가기준간의 상대적 가중치를 도출하여 도출된 2

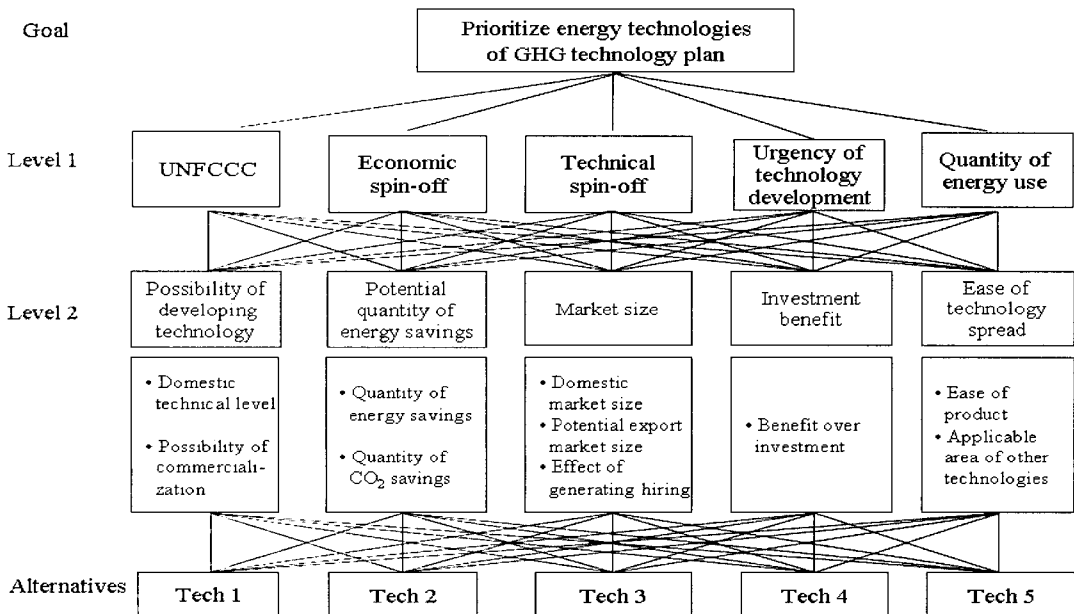


Fig. 2 Two-tier hierarchy

규모의 경제성을 고려한 전략적 온실가스저감기술 개발을 위한 다기준의사결정기법:
AHP/DEA CCR-I 및 BCC-I 혼합모형 적용

Table 2 GHG technology and relative weights of criteria

| Technology | Possibility of developing technology | Potential quantity of energy savings | Market size | Investment benefit | Ease of energy use | Investment cost |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| CO ₂ capture storage and conversion tech | 0.212 | 0.213 | 0.207 | 0.166 | 0.185 | 157 |
| Non-CO ₂ gas tech | 0.105 | 0.104 | 0.110 | 0.151 | 0.132 | 58 |
| Advanced combustion tech | 0.068 | 0.049 | 0.080 | 0.093 | 0.083 | 94 |
| Next-generation clean coal tech | 0.101 | 0.106 | 0.109 | 0.107 | 0.102 | 272 |
| Clean petroleum and conversion tech | 0.073 | 0.069 | 0.061 | 0.059 | 0.064 | 94 |
| DME ^a tech | 0.087 | 0.084 | 0.074 | 0.075 | 0.084 | 84 |
| GTL ^b tech | 0.079 | 0.092 | 0.081 | 0.077 | 0.074 | 84 |
| Gas hydrate | 0.062 | 0.071 | 0.065 | 0.060 | 0.065 | 84 |
| GHG ^c mitigation policy | 0.042 | 0.042 | 0.042 | 0.042 | 0.042 | 47 |

^a di-methyl ether

^b gas to liquid

^c greenhouse gas

단계 평가기준의 가중치에 곱하여 2단계 평가기준의 최종 가중치를 도출하였다. DEA기법을 적용하기 위해 투입변수와 산출변수로 정의할 경우, GHG 저감기술들간의 기술개발 가능성, 에너지절감가능량, 시장규모, 투자이익, 기술이전 용이성 등의 최종 가중치값을 산출변수로 설정하고, GHG 저감기술별 개발비용을 투입변수로 설정하였다. Fig. 2는 AHP기법 적용시 평가기준을 도식한 것이다.

GHG 저감기술은 다음과 같이 CO₂ 저장 및 전환기술, Non-CO₂ 처리기술, 연소처리기술,

석탄청정 및 전환기술, 석유청정 및 전환기술, 디메틸에테르(DME)제조기술, 천연가스액화기술, 가스하이드레이트, GHG 저감기술정책의 9개 기술로 구성되어있다. GHG기술분야 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문결과는 AHP기법의 쌍대비교를 통해서 일관성(C.R)값이 0.1이하인 일관성을 가지는 값을 선정하고, GHG 저감기술들의 상대적 가중치값을 도출하였다. Table 2는 GHG 저감기술 및 상대적 가중치 값을 나타낸 것이다.

Table 3 CCR-I and BCC-I efficiency score

| Technology | CCR-I efficiency | BCC-I efficiency | Scale efficiency | RTS | Rank |
|---|------------------|------------------|------------------|-----|------|
| CO ₂ capture storage and conversion tech | 0.753 | 1.000 | 0.753 | DRS | 8 |
| Non-CO ₂ gas tech | 1.000 | 1.000 | 1.000 | CRS | 1 |
| Advanced combustion tech | 0.441 | 0.561 | 0.786 | IRS | 5 |
| Next-generation clean coal tech | 0.215 | 0.218 | 0.989 | CRS | 2 |
| Clean petroleum and conversion tech | 0.426 | 0.555 | 0.769 | IRS | 6 |
| DME tech | 0.569 | 0.651 | 0.874 | IRS | 4 |
| GTL tech | 0.606 | 0.662 | 0.915 | IRS | 3 |
| Gas hydrate | 0.472 | 0.621 | 0.760 | IRS | - |
| GHG mitigation policy | 0.500 | 1.000 | 0.500 | IRS | 9 |

4. 수리 예제

AHP기법을 통해서 도출된 항목별 가중치값을 적용한후, CCR-I와 BCC-I DEA기법을 적용하여 GHG 저감 기술의 효율성을 측정하였다. Table 3은 DEA기법을 적용한 각 모델별 효율성지수와 규모의 효율성(SE)을 나타낸 것이다.

본 연구에서 투입물의 수가 1개(Single)이므로 CCR-I모형은 CCR-Output모형(산출중심) 모형과 같은 결과값을 도출하고, BCC-I모형은 BCC-Output(산출중심)모형과 같은 결과값을 도출한다. CCR-I모형에서 가장 효율성이 높은 기술은 Non-CO₂ 처리기술이며, 나머지 8개 GHG 저감 기술은 상대적으로 투입대비 비효율적인 기술개발 그룹에 해당한다. BCC-I모형의 경우 CO₂ 처리기술, Non-CO₂ 처리기술, GHG 저감 기술정책의 3가지 기술이 가장 효율성이 높으며, 나머지 6개 GHG 저감 기술은 상대적으로 비효율적으로 분석되었다. 규모의 효율성측면의 경우 Non-CO₂ 처리기술이 가장 효율적인 선두그룹(Efficient frontier group)에 속하며 나머지 8개 GHG 저감 기술은 규모의 측면에서 비효율적인 그룹에 포함된다. 또한 규모의 효율성이 비효율적인 GHG 저감 기술들중 투입규모를 증가(IRS)함으로써 상대적인 효율성이 향상 될 수 있는 GHG 저감 기술은 연소처리기술, 디메틸에테르(DME)제조기술, 천연가스액화기술, 가스하이드레이트, GHG 저감기술정책 등의 5가지 기술이며, 현재 투입규모를 감소(DRS)함으로써 효율성을 향상할 수 있는 GHG 저감기술은 CO₂ 처리기술과 석탄청정 및 전환기술이다. 또한 현재 효율성값이 1인 Non-CO₂ 처리기술은 규모의 효율성측면에서 투입과 산출의 변화가 불필요한(CRS) 최적의 조합을 이루고 있다.

5. 결 론

우리경제의 급속한 성장 견인을 위해 국내소비 에너지원의 97%를 수입에 의존하고 있는 에너지 다소비국으로 우리나라의 에너지환경을 전략적으

로 해결하기 위해 장기적 에너지자원기술개발의 중요성은 더욱 더 증가하고 있다. 또한 최근 배럴당 130달러의 고유가시대에서 에너지기술개발은 제2의 에너지자원기술개발이라고 할 수 있다.

본 연구의 확장된 모형적용결과 규모의 경제성 측면에서 Non-CO₂ 처리기술은 투입과 산출이 다른 기술과 비교시 최적의 대안으로 규모의 변화가 불필요하며, 연소처리기술, 디메틸에테르(DME)제조기술, 천연가스액화기술, 가스하이드레이트, GHG 저감기술정책 등의 5가지 기술은 투입의 규모증대를 통해서 상대적으로 효율적인 GHG 저감 기술이 될 수 있었다. 또한, CO₂ 처리기술과 석탄청정 및 전환기술은 규모감소를 통해서 상대적으로 효율적인 GHG 저감기술이 될 수 있다.

본 연구는 2005년에 수행된 연구의 확장된 연구로 AHP/DEA 혼합기법을 통해 계량경제학적 관점에서 GHG 저감기술의 효율성을 살펴보았다. 특히, 본 연구는 다기준의사결정기법의 혼합모형을 에너지분야에 적용하여 예산 할당 및 효과적인 R&D 개발 및 정책측면에서 과학적인 틀을 제시하였다. 본 연구결과는 정책결정자 및 의사결정자의 에너지기술개발 정책수립시 R&D 예산의 효과적 배분 및 에너지기술개발의 효율성 등 계량경제학적 관점에서 중요한 의사결정자료로 활용 될 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *European Journal of Operations Research*, Vol. 2, No. 6, 1978, pp. 429 - 444.
- 2) B. Casu, E. Thanassoulis, "Evaluating cost efficiency in central administrative services in UK universities", *Omega*. Vol. 34, 2006, pp. 417 - 426.
- 3) BP Statistical Review of World Energy 2008, *British Petroleum*, England, 2008.
- 4) C. Schaffnit, D. Rosen, J.C. Paradi, "Best

- Practice Analysis of Bank Branches: An Application of DEA in a Large Canadian Bank," *European Journal of Operations Research*, Vol. 98, 1997, pp. 269 - 289.
- 5) G. Vitner, S. Rozenes, S. Spraggett, "Using data envelope analysis to compare project efficiency in a multi-project environment", *International Journal of Project Management*, Vol. 24, 2006, pp. 323 - 329.
 - 6) H. H. Chang, "Determinants of Hospital Efficiency: the Case of Central Government-owned Hospitals in Taiwan", *Omega*, Vol. 26, 1998, pp. 307 - 317.
 - 7) Key World Energy Statistics 2007, IEA, France, 2007.
 - 8) S.K. Lee, J.W. Kim, "World energy outlook and measures". KIER-A52417, 2005, pp. 299-354.
 - 9) S.K. Lee, J.W. Kim, Y.J. Yoon, "A study on World Energy outlook and the optimal alternatives for Developing Energy Technology: Focusing on coal utilization technology", *J. of Energy Engineering*, 15(3), 2006, pp. 174-180.
 - 10) S.K. Lee, Y.J. Yoon, J.W. Kim, "Long-term improvements in national energy efficiency and GHG control plans using the AHP approach", *Energy Policy*, Vol. 35(5), 2007, pp. 2862-2868.
 - 11) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "Assessment model for selecting the strategic R&D programs of energy technology development: analytic network process", *Proc. of Korea Institute of Chemical engineers Fall Conf.*, 2007, p. 233.
 - 12) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "A study on the framework for selecting core R&D programs in Energy Technology Roadmap by the DEA approach", *Proc. of World Energy Congress 2007*, 2007, pp. 1-25.
 - 13) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "A fuzzy AHP approach to prioritize the energy technology development strategy and policy", *New and Renewable Energy*, Vol. 4(1), 2008, pp. 19-24.
 - 14) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "The competitiveness of Korea as a developer of energy technology: the AHP approach", *Energy Policy*, Vol. 36(4), 2008, pp. 1284-1291.
 - 15) S.K. Lee, G. Mogi, S.C. Shin, J.W. Kim, "Measuring the relative efficiency of greenhouse gas technologies: an AHP/DEA hybrid model approach, *Proc. of Int'l Conf. on Industrial Engineering 2008*, 2008, pp. 1615-1619.
 - 16) T.L. Saaty, "Exploring optimization through hierarchies and ratio scales", *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 20, 1986, pp. 355-363.
 - 17) T.L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process", *European Journal of Operations research*, Vol. 48, 1992, pp. 9-26.
 - 18) T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", first ed., New York: McGraw-Hill, 1980.
 - 19) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, S.C. Shin, "Strategy of energy technology development for establishing the hydrogen economy", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 207-215.
 - 20) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "Prioritizing the weights of hydrogen energy technologies in the sector of the hydrogen economy by using a fuzzy AHP approach", *Proc. of the 3rd Korea-USA Joint Symposium on Hydrogen & Fuel Cell Technologies*, 2008, pp. 263-272.
 - 21) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "A fuzzy analytic hierarchy process approach for assessing national competitiveness in the hydrogen technology sector", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 23,

- 2008, pp. 6840-6848.
- 22) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "A fuzzy AHP/DEA hybrid model for allocating energy R&D resources efficiently: In case of energy technologies against high oil prices", Proc. of 7th International Conference on Sustainable Energy Technologies 2008, 2008, pp. 2042-2049.
- 23) S.K. Lee, G. Mogi, J.W. Kim, "Multi-Criteria Decision Making for Measuring Relative Efficiency of Greenhouse Gas Technologies: AHP/DEA Hybrid Model Approach", Engineering Letters, Vol. 16(4), 2008, pp. 1-5