

## AHP를 이용한 CO<sub>2</sub> 저감 및 처리기술 분석

### An analysis on the CO<sub>2</sub> reduction and sequestration technology using the AHP

이덕기, 최상진, 박수억  
한국에너지기술연구원

#### Abstract

이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 프로그램은 과학기술부에서 지원하고 있는 21세기 프론티어 사업 중 하나로, 2002년부터 2012년까지 연간 9백만 탄소 톤 상당의 이산화탄소 저감 및 처리기술개발과 개발 기술의 상용화를 목표로 하고 있다. 동 프로그램의 주요 개발기술 분야는 고온순산소 연소기술, 반응분리 동시공정기술, 미활용에너지 이용기술, 이산화탄소 회수처리기술 등 4개 부문에 걸쳐 추진하고 있으며, 현재 1단계 2차년도 사업이 진행되고 있다.

동 프로그램의 목표는 단순한 기술개발에 머물지 않고 향후 실용화 가능성이 높은 과제를 선별하여 집중적인 투자와 함께 기술개발이 이루어지고 있으며 동 프로그램을 통해 이산화탄소 저감 기술 시장에서 우위를 확보하고 기술 이전 및 수출을 통해 연간 1.5조원의 경제적 효과와 함께 배출권 확보에 기여할 것으로 보고 있다.

본 논문에서는 기후변화에 관련된 온실가스 감축을 위해 추진되고 있는 이산화탄소 저감 및 처리기술의 개발에 따른 성과제고를 위해 개발기술들을 대상으로 향후 발생될 여러 가지 영향요인(impact factor)을 발굴하고 이를 토대로 결정론적 평가법 및 AHP기법을 이용한 분석평가를 수행하였다.

#### 1. 서론

##### 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 연구개발 계획을 구상하고 있다.

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

2001년 9월에는 대응체계를 강화하기 위해서 국무총리훈령을 제정하여 범정부대책기구를 기후변화협약 대책위원회로 확대개편하고, 2002년 3월 국내의 환경변화를 수용하여 기후변화협약 대응 제2차 종합대책을 수립하였다. 제1차 종합대책이 부문별 온실가스 감축시행에 중점을 두었다면 제2차 종합대책은 각 부문별 온실가스 감축시책 강화와 함께 추진사업들을 구체화하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 일련의 기후변화에 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)과 AHP(Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 CO<sub>2</sub>저감 및 처리기술에 대한 분석 및 평가를 수행하고 중요도의 계량적 제시와 함께 그 결과로서 우선순위를 제시하였다.

##### 1-2. 분석방법

대안의 선정 및 최적 자원배분을 위한 평가의 경우 지금까지 여러 가지 기법이 개발되어 왔으나 계량적인 방법들의 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 평가에 가장 적합한 결정론적 평가법의 평점법(scoring models method)과 다속성 의사결정방법중 AHP를 선정하여 수행하였다.

우선 평점법에 의해 대상이 되는 기술들에 대한 직관적 설문을 통해 계량화한 지수를 구한 후 다시 AHP를 통한 중요도를 산출하여 이를 승산한 값으로 최종 가중치를 산출하여 순위를 정하였다.

1차적으로 평점법에 의한 조사대상은 총 41개 기술에 대한 전수조사를 실시하였으며 이의 결과에 따른 기술분야별 평가요인 지수를 산출하였다. 2차로 AHP를 위한 설문조사로서 총 21명의 전문가에 의뢰하여 16매를 회수하고 이중 일관성이 결여한 설문서를 3매를 기각하고 13매를 최종선정하여 중요도를 산출하였으며 산출된 중요도와 평점법에 의해 산출된 지수를 승산하여 최종 결과를 도출하였다.

분석대상이 되고 있는 기술에 대한 정의는 크게 4가지로 구분하여 41개 기술을 대표하는 중규모 기술로 그룹화하였으며 이들 연구분과를 대상으로 분석을 실시하였다.

<표 1> 대안의 정의

대안명	기술분야
Tech.1	고온순산소연소기술분야
Tech.2	반응분리공정기술분야
Tech.3	미활용에너지기술분야
Tech.4	CO <sub>2</sub> 회수처리기술분야

## 2. 결정론적 평가법에 의한 분석

본 조사에서 5점 척도로써 가중치를 부여할 수 있는 20개 조사항목 중 12개의 설문항목별 평균점수는 0.762로서 전체적으로 높은 지수를 보이고 있다. 특히, 개발기술의 우수성(0.960)은 월등하게 높은 조사결과로 나타났으며 상용화 가능성(0.812), 시장진입가능성(0.808), 국외개발 동향(0.805)순으로 조사 결과를 보이고 있다.

반면에 국내인프라 구축수준이 상대적으로 낮은 것으로 나타났는데 이는 개발기술 자체의 우수성은 높지만, 국내에는 아직까지 인프라구축이 제대로 되어있지 않음을 시사하고 있는 것으로서 국외 기술개발 수준과는 어느 정도의 차이를 보인다는 점에서 기술개발의 당위성을 확보할 수 있을 것으로 분석된다.

<표 2> 결정론적 평가법에 의한 결과

대항목	중항목	Tech.1	Tech.2	Tech.3	Tech.4
기술성	국외 기술개발 동향	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 <sub>2</sub> 저감량	0.633	0.713	0.650	0.820
상업성	경제적 부가가치 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
연계성	분과내 목표달성 기여도	0.733	0.550	0.600	0.660
	분과내 타 기술과의 연계성	0.900	0.663	0.825	0.720
	특허분쟁소지	0.733	0.850	0.825	0.760
	Total	9.133	9.153	8.925	8.900

4개 기술분과별 및 특성별 평균값의 경우 고온순산소기술(Tech.1)의 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.

반응분리공정기술(Tech.2)의 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.

미활용에너지기술(Tech.3)의 경우 상업적 측면(0.781)이 가장 높게 나타났으며 다음으로 기술연계 측면(0.735), 기술적 측면(0.710)순으로 나타났으며 CO<sub>2</sub>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 과제별 책임자의 주관적인 판단으로 정해지는 것이기 때문에 설문항목별 점수에 대한 객관성이

다소 결여되어 있다고 할 수 있다.

## 3. AHP에 의한 분석

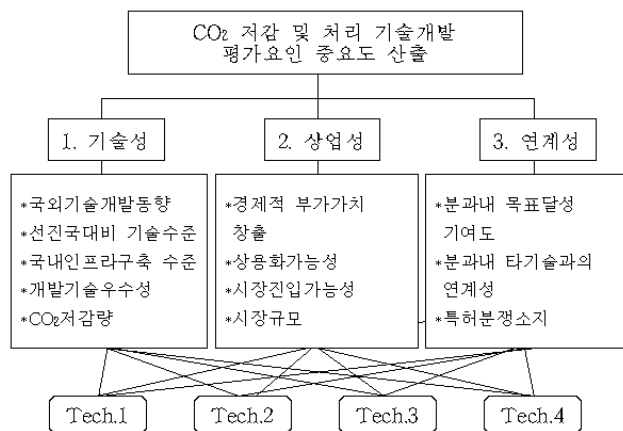
일반적으로 AHP 방법은 복잡한 의사결정 문제를 체계적으로 세분하여 분석할 수 있도록 하는 도구를 제공한다. 기술의 평가에 있어서 다속성, 다기준에 의한 최선의 대안 선정이 필요하며 평가 요소들을 계층적으로 세분화한 후 이를 종합하는 과정이 필요하다. 따라서 이를 만족할 수 있는 방법으로 AHP방법은 동 분야의 우선순위 결정에 적합한 의사결정 방법으로 평가된다. 이는 AHP가 가지는 장점에서 오는 것으로서 그 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, AHP는 판단의 일관성 유무에 대한 점검 도구를 제공해 준다. 둘째, 기준들간 상호작용 효과를 고려해 줄 수 있다. 셋째, 평가체계를 목표체계와 연결시킬 수 있다. 넷째, 다수 의사결정자 참여 시 단순 가중치 부여를 피하고 갈등문제를 해결할 수 있다. 다섯째, 정성적인 요소를 모형에 고려함으로써 주관적 판단을 체계적으로 계량화시킬 수 있다. 여섯째, 문제를 분해해서 평가하고, 이를 다시 종합하여 최종결정을 내리는 AHP의 문제해결 구조가 인간의 논리적인 문제해결 구조와 유사하므로, 현실에 실제로 적용하기가 용이하기 때문에 미래를 투영하고 위험과 불확실성으로부터 방어를 위한 다양한 체계의 계획수립이 가능하다.

AHP기법은 여러 대안들을 다수의 목표 또는 요인에 의하여 평가하는 방법이며 정성적 또는 무형적 기준과 정량적 또는 유형적 기준을 동시에 평가할 수 있는 적합한 방법으로 판단된다.

### 3-1. 평가기준의 계층구조 기본설계

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



<그림 1> 계층 구성 모형

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.

제1계층으로는 기술성, 상업성, 기술연계성으로

구분하였으며 이는 다시 특성별 요인에 따라 제2계층(hierarchy 2)으로 나누었다.

제2계층의 세부특성으로는 국외기술개발동향, 선진국대비 기술수준, 국내인프라구축 수준, 개발기술우수성, CO<sub>2</sub>저감량, 경제적 부가가치 창출, 상용화가능성, 시장진입가능성, 시장규모, 분과내 목표달성 기여도, 분과내 타기술과의 연계성, 특허분쟁소지의 12개 하위특성으로 구성하였다.

### 3-2. AHP 모형의 적용방법

이산화탄소 저감 및 처리기술의 각 연구분과별 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.

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

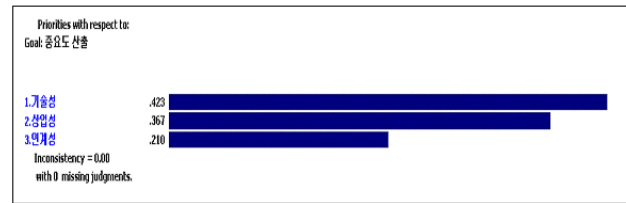
$$r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}, \text{ 최소치 기준의 경우,}$$

### 3-3. AHP적용 중요도 산출

본 연구에서 사용한 CDRS개발기술에 대한 각 평가특성의 중요도는 Expert Choice2000을 사용하여 산출하였으며 13명의 전문가에게 설문 조사한 결과를 토대로 기하 평균된 수치를 입력하여 계산하였다.

#### ■ Hierarchy 1의 요인별 중요도 산출

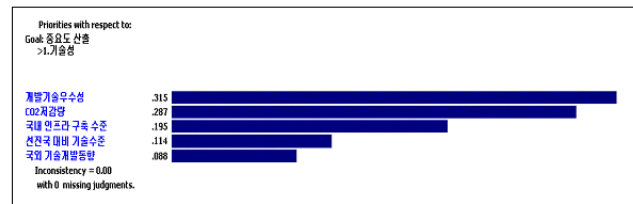
계층 1의 특성으로 분류된 3가지 요인은 기술성, 상업성, 기술연계성 등의 순서로 평가되었으며 이 중에서 기술성의 가중치는 42.3%로 가장 높게 나타났으며 다음이 상업성으로 36.7%, 기술연계성 21.0%의 순서로 가중치를 지니고 있는 것으로 계산되었다.



<그림 2> hierarchy1 factor의 가중치

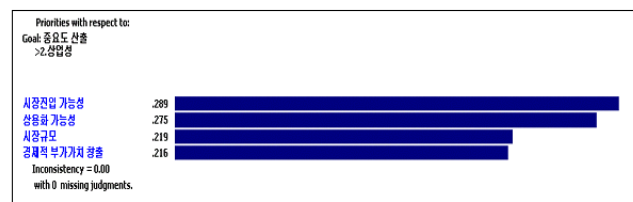
#### ■ Hierarchy 2의 요인별 중요도 산출

기술성의 하위 특성에 대한 중요도는 개발기술우수성이 가장 높은 31.5%를, CO<sub>2</sub>저감량이 28.7%, 국내인프라 구축수준(11.4%), 국외기술개발동향(8%)순으로 계산되었다.



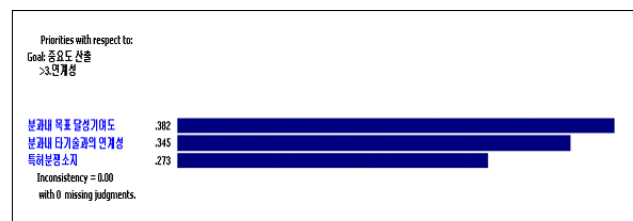
<그림 3> hierarchy2(기술성) 가중치

상업성의 하위 특성에 대한 중요도는 시장진입가능성이 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 있지는 않은 것으로 나타났다



<그림 4> hierarchy2(상업성) 가중치

기술연계성의 하위 특성에 대한 중요도는 분과내 목표달성기여도가 38.2%로 가장 높게 평가되었으며 다음으로 분과내 타기술과의 연계성(34%), 특허분쟁소지(27.3%)순으로 나타났다



<그림 5> hierarchy2(기술연계성) 가중치

### 3-4. 종합가중치 산출

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

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

세부 평가요인 모두 중요도에서 하위를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 3> 종합가중치 산출

요인	1계층		2계층			순위
	가중치 (A)	세부요인	가중치 (B)	종합가중치 (C=A*B)		
				weights	normalize	
기술성	0.423	국외기술개발동향	0.088	<b>0.0373</b>	0.2798	12
		선진국대비 기술수준	0.114	<b>0.0484</b>	0.3631	11
		국내인프라구축 수준	0.195	<b>0.0826</b>	0.6197	5
		개발기술우수성	0.315	<b>0.1333</b>	1.0000	1
		CO <sub>2</sub> 저감량	0.287	<b>0.1215</b>	0.9115	2
상업성	0.367	경제적 부가가치 창출	0.216	<b>0.0794</b>	0.5956	8
		상용화가능성	0.275	<b>0.1009</b>	0.7569	4
		시장진입가능성	0.289	<b>0.1062</b>	0.7967	3
		시장규모	0.219	<b>0.0804</b>	0.6032	6
연계성	0.210	분과내 목표달성기여도	0.382	<b>0.0802</b>	0.6017	7
		분과내 타기술과의 연계성	0.345	<b>0.0725</b>	0.5439	9
		특허분쟁소지	0.273	<b>0.0573</b>	0.4299	10
Total	1.000	Total		<b>0.9427</b>		

### 3-5. 복합 가중치 계산

각 평가특성의 가중치를 AHP에 의해 구하고 여기에 대응되는 결정론적 평가법에 의해 구해진 평가특성의 값을 규준화하여 종합가중치를 곱하여 얻은 총 점수를 복합가중치로 계산고 이 중에서 가장 큰 값을 가진 순서로서 대안을 선택한다.

<표 4> 복합가중치 산출

1계층 (weight)	2계층 (weight)	복합가중치			
		Tech <sub>1</sub>	Tech <sub>2</sub>	Tech <sub>3</sub>	Tech <sub>4</sub>
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 <sub>2</sub> 저감량(0.287)	0.09372	0.10556	0.09623	0.12140
	sub-total		0.38440	0.39756	0.36940
상업성 (0.245)	경제적 부가가치 창출(0.216)	0.06733	0.07927	0.07349	0.07349
	상용화가능성(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
	sub-total		0.34202	0.35702	0.34764
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
	sub-total		0.20211	0.17089	0.18772
total		0.92853	0.92547	0.90476	0.90380

### 3-6. 종합분석

복합가중치에 따른 순위에 있어서 4개 분야의 기술들이 아주 미세한 차이로서 Tech<sub>1</sub>, Tech<sub>2</sub>, Tech<sub>3</sub>, Tech<sub>4</sub> 순으로 나타났다.

기술성 측면에서 살펴보면 국외기술개발동향, 선진국 대비 기술수준, 국내 인프라 구축 수준 모두 반응분리기술분야가 가장 우수한 것으로 나타났으며 개발기술의 우수성에서는 고온순산소분야, CO<sub>2</sub> 저감량분야에서는 CO<sub>2</sub>회수처리분야가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이를 종합한 기술성에서 가장 높은 복합가중치는 반응분리기술분야로서 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 고온순산소분야, 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 집중에 위한 노력이 필요하며 이를 토대로 성과를 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 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 복합가중치를 산출함으로써 향후 개발에 따른 방향성을 결정할 수 있는 방안을 제시하였다.

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

## 참고문헌

이덕기외, 국내 CO<sub>2</sub> 저감 및 처리기술개발 현황 분석, 2004 한국자원경제학회 춘계학술대회 프로시딩, 2004. 2. 12.

이덕기외, AHP를 이용한 에너지시스템 대안선정 평가, 자원환경경제연구, 제12권 4월호 pp611-635

Hwang, C. L., and Lin, M. J., *Group Decision Making under Multiple Criteria-Methods and Applications*, Springer-Verlag, 1987, pp342-370

Rubenstein, A. H., "Setting Criteria for R&D", *Harvard Business Review*, Jan.-Feb. 1975., pp.95-104.

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