

AHP를 이용한 수소에너지의 국가경쟁력 평가

김 봉진*[†], 김 종욱**, 최 상진**, 강 석훈**, 강 경석***

*단국대학교 산업공학과, **한국에너지기술연구원 정책연구부, ***(주)시온텍

An Evaluation of the National Competitiveness of Hydrogen Energy

Bongjin Gim*[†], Jong-Wook Kim**, Sang Jin Choi**, Seok-Hun Kang**, Kyung-Seok Kang***

*Dankook University, Department of Industrial Engineering, San 29
Anseo-dong Cheonan Chungnam 330-714, Korea

**Korea Institute of Energy Research, R&D Policy Research Dept. 71-2
Jang-dong Yusong-ku Daejeon 305-343, Korea

***Siontech, Chungnam National University, Sanhakeyon 603, 220
Gung-dong Yusong-ku Daejeon 305-746, Korea

ABSTRACT

This paper deals with the national competitiveness of hydrogen energy. The effectiveness of investments for hydrogen energy R&D and constructions of hydrogen energy infrastructures can be evaluated by the national competitiveness of hydrogen energy, and it is evaluated by an AHP(analytic hierarchy process) method. The evaluation indices of the national competitiveness are selected as the technical level, the number of researchers, the investments for R&D, and the infrastructure of hydrogen energy. Similarly, the technical level is divided into the number of published papers, the number of foreign patents, and the number of published proceeding papers. The evaluation indices of the technical level and the number of researchers were investigated by database searches. It appears that South Korea locates the sixth position in the world. The results of our study suggest that South Korea is relatively competitive in the technical level and the number of researchers. However, our country needs the long-term and well-focused R&D, and the expansion of infrastructures to enhance the national competitiveness of hydrogen energy in the future.

KEY WORDS : hydrogen energy(수소 에너지), national competitiveness(국가 경쟁력), analytic hierarchy process(계층적 분석과정), database search(데이터베이스 탐색)

Subscripts

AHP : analytic hierarchy process

DB : data base

CR : consistency ratio

[†]Corresponding author : bjgim@dankook.ac.kr

RI : random index
 CI : consistency index
 SCI : science citation index
 KW : key word
 CA : chemical abstract

1. 서 론

우리나라는 대부분의 에너지를 해외로부터 수입하여 사용하고 있으며 국가 에너지 정책의 핵심은 에너지 절약, 에너지 안보 강화, 환경 보호 등이다. 최근에는 석유류를 비롯한 화석연료로부터 고갈 우려가 없는 청정에너지로의 전환이 전 세계적으로 관심을 끌고 있으며 수소는 지속가능한 에너지 시스템을 구축할 수 있는 유력한 청정에너지 매체로 대두되고 있다.

수소는 화석연료, 원자력, 바이오매스 등의 다양한 에너지원으로부터 얻을 수 있다. 현재는 화석연료를 열분해 하거나 화학분해 하여 대부분의 수소를 생산하고 있으며, 국내에서는 대부분의 수소가 석유정제나 석유화학 등의 산업에서 원료 또는 첨가제로 사용되고 있다.

수소를 에너지로 이용하는 상용화 기술은 아직 충분히 개발되지 않은 상태로서 바이오매스, 풍력 및 태양에너지 등의 재생에너지를 이용하여 수소를 생산하거나 고체 재료를 이용하여 수소를 저장하는 분야 등에서는 기술적 타당성 및 경제성 등에 상당한 애로점을 갖고 있다. 수소에너지의 상용화를 위해서는 상당한 기술진보가 이루어져야 하고 이에 따른 경제성 확보가 필수적이다. 그러나 수소에너지의 장점이 단점을 능가하기 때문에 일부 회의적인 시각이 존재하나 수소경제 시대로 진입하는 것은 시간상의 문제인 것으로 전망되고 있다.

미국, 일본 및 유럽연합은 수소경제 시대에 대비하여 수소 제조 및 저장 기술, 수소연료전지 자동차, 발전용 및 가정용 연료전지, 수소에너지 인프라구축 등에 많은 투자와 노력을 하고 있다. 우리나라도 최근 수소 및 연료전지 분야를 차세대

성장동력산업으로 선정하고 과학기술부의 수소에너지사업단과 산업자원부의 수소연료전지사업단 등을 발족하였다.

정부는 수소경제로의 원활한 이행을 위하여 수소에너지 및 연료전지에 대한 집중적인 투자를 하고 있으며, 이러한 집중 투자에 대한 효율성 및 타당성을 체계적으로 분석하고 평가하는 것이 필요한 시점이다. 본 연구는 그동안의 수소에너지 및 연료전지 분야에 대한 투자의 효율성과 수소에너지의 국내 수준을 파악하기 위하여 수소에너지에 대한 국가경쟁력을 평가한다.

국가경쟁력 지수는 한 국가가 지속적으로 발전해 나갈 수 있는가를 나타내는 상대적 지표이다. 수소에너지의 국가경쟁력 평가는 여러 가지 상반된 기준 또는 요소들을 종합적으로 고려하여 판단하는 것이 필요하며, 수소에너지의 국가경쟁력 지표로는 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등을 들 수 있다.

수소에너지의 국가경쟁력 평가 요소는 정량적 요소와 정성적 요소로 구분할 수 있으나, 평가자료 확보의 어려움 때문에 상대적으로 쉽게 자료를 얻을 수 있는 정량적 평가 요소만을 평가 대상으로 한다. 또한 수소에너지 국가경쟁력 평가 자료를 쉽게 얻을 수 없는 경우에는 관련 정보의 데이터베이스(DB) 검색을 통하여 평가 자료를 추출한다.

본 연구는 여러 가지 상반된 평가 기준을 종합적으로 고려하여 대안들의 순위를 결정하는 문제에 적합한 것으로 알려진 계층적 분석과정(AHP: analytic hierarchy process)방법을 이용하여 주요 국가별 수소에너지의 주요 평가지표에 대한 현황을 소개하고, 주요 국가의 수소에너지 국가경쟁력 우선순위를 제시한다. 또한 수소에너지의 국가경쟁력 평가를 통하여 국내수소에너지의 기술개발 및 투자정책에 대한 체계적 분석기반을 마련하고자 한다.

2. AHP 방법

2.1 개요

수소에너지의 국가경쟁력 평가는 여러 가지의 상반된 기준 또는 요소들을 고려하여 판단하는 것이 필요하다. 대안의 선정이나 자원 배분을 위한 평가의 경우에 여러 가지 평가 기법들이 개발되었으나 계량적인 방법들의 실제 활용은 미미한 실정이다. 다기준 평가 기법은 결정론적 평가방법, 경제학적 평가방법, 경영과학적 평가방법 등으로 분류할 수 있다.

AHP는 여러 대안들을 다수의 목표 또는 요인에 의하여 평가하는 방법이며 정성적 기준과 정량적 기준을 동시에 평가할 수 있는 장점을 갖고 있다. AHP는 복잡한 의사결정 문제를 체계적으로 세분하여 분석할 수 있는 도구를 제공한다. 특히 다속성 및 다기준에 의한 대안의 평가를 위해서 평가 요소들을 계층적으로 세분화한 후, 이를 종합하여 평가한다.

Saaty(1986)는 의사결정의 도구로서 단순성과 복잡성을 동시에 갖고 있는 AHP를 제안하였으며, AHP는 역수비교, 비교 가능성, 독립성, 기대성 등과 같은 전제 조건을 만족시키는 것을 가정하고 있다.

역수비교는 속성 a가 속성 b보다 y배 만큼 선호된다면, 속성 b는 속성 a보다 $1/y$ 배 만큼 선호되는 것을 의미한다. 비교 가능성은 속성 또는 지표들이 비교 가능하고 선호도를 제한된 척도로 나타낼 수 있는 것을 나타낸다. 독립성은 판단 기준들이 속성들의 성질과 관계가 없는 것을 나타내며, 기대성은 의사결정의 계층적 구조가 완전하다는 것을 의미한다. 모든 대안들과 기준은 계층에 포함되어야 한다.

AHP의 응용분야는 경제학, 경영학, 사회학 등의 인문 분야로부터 공학 분야까지 매우 다양하며, AHP에 대한 연구는 이론에 대한 연구와 응용연구로 구분할 수 있다. 이론에 관한 연구로는 쌍대비교 및 일관성에 대한 연구, 경영과학 기법과의 결합에 관한 연구, 순위반전에 관한 연구, 타 기법과의 비교에 관한 연구 등으로 분류할 수 있다.

쌍대비교(pairwise comparison)에 관한 연구는 주로 쌍대비교의 횟수를 감소시키는 것에 관한 연구로서 Weiss and Rao(1987)과 Lim and

Swenseth(1993)의 연구를 들 수 있다. 일관성비율에 관한 연구로는 Apostolou and Hassel(1993)과 Dadkhah and Zahedi(1993) 등의 연구를 들 수 있다. 기타 연구로는 Schriederjans and Wilson(1991)과 Thurston and Tian(1993) 등의 연구 등이 있다.

2.2 평가지표 선정 및 계층 구성

AHP의 첫째 단계는 대안들의 평가지표를 결정하고 이들을 계층으로 분류하여 의사결정 계층을 설정하는 것이다. 수소에너지 국가경쟁력 평가지표는 수소에너지 전문가 회의를 통하여 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등으로 선정하였다. 또한 기술수준은 다시 논문, 특허, 논문발표 등의 세부 평가지표로 구분하였다.

수소에너지 기술수준의 세부 평가항목은 논문, 해외특허, 해외논문발표 등으로 구분하였다. 논문은 중요도를 감안하여 SCI(science citation index)에 게재된 논문을 대상으로 한다. 해외특허는 출원건수를 대상으로 미국특허와 유럽특허를 대상으로 하였고, 논문발표는 SCI에 등재된 논문의 학술회의에 발표된 논문을 기준하였다.

수소에너지 국가경쟁력 평가지표는 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등으로 분류할 수 있으며, 수소에너지 국가경쟁력 평가지표의 계층구성 모델을 Fig. 1에 수록하였다.

2.3 쌍대비교 및 일관성

AHP의 둘째 단계는 수소에너지 기술을 평가할 수 있는 전문가 집단을 구성하고, 수소에너지의 국가경쟁력에 대한 설문조사표를 배포하여 수소에너지 전문가들의 평가지표에 대한 상대적인 중요도를 얻는 것이다.

전문가는 두 평가지표를 상대적으로 비교하는 쌍대비교 방식에 의하여 모든 평가지표들의 상대적인 중요도를 평가한다. 또한 상위 목표를 달성하는데 관련이 있는 하위 계층의 평가지표들을 비교하여 쌍대비교 행렬 A를 도출한다.

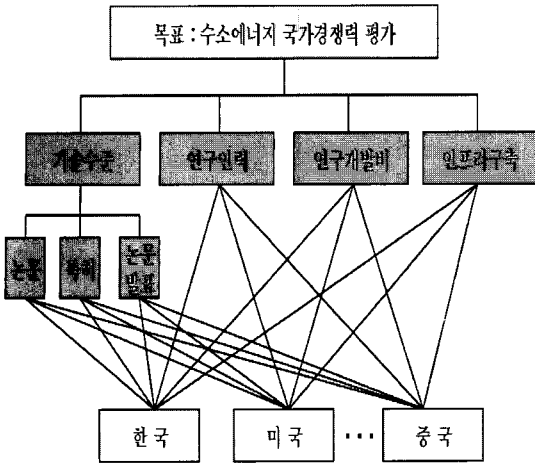


Fig. 1 Model for the national competitiveness of hydrogen energy

Saaty(1980)는 비교 대상이 되는 두 평가지표의 쌍대비교를 위하여 Table 1과 같은 9 단계의 척도를 제안하였다.

AHP의 셋째 단계는 전문가의 평가결과에 대한 일관성을 검증하는 것이다. 다수의 전문가들이 평가한 값에 대하여 기하평균값을 산출하고 이러한 기하평균값에 의하여 평가지표들의 상대적인 중요도를 산출한다.

w_i 를 평가특성 i 의 가중치로 표기하고 속성 i 에 비교한 속성 j 의 중요도를 a_{ij} 로 표기한다면, $a_{ij}=w_i/w_j$ 로 구성된 쌍대비교 행렬 A 는 주대각(main diagonal) 상의 요소가 모두 1이고 대칭(symmetric)인 행렬이다.

일관성 비율은 전문가의 평가에 의하여 얻어진 중요도에 대한 쌍대비교 자료가 서수적 순위에 신뢰성이 있는 가를 나타내는 척도이다. w 는 (w_1, w_2, \dots, w_n) , λ 는 A 의 고유치일 때, 행렬 A 가 일관성을 갖기 위한 조건은 다음과 같다.

$$A w = \lambda w \quad (1)$$

식 (1)의 양변이 정확하게 일치하기는 어려우므로, 설문 자료에 의하여 얻어진 행렬 A 가 상대적으로 일관성을 갖고 있는 지를 평가하기 위하여 다음과 같은 식에 의하여 λ_n 에 대한 추정치를 나타내는 λ_{max} 를 계산한다.

Table 1 Importance index of pairwise comparison

척도	정 의	설 명
1	동등하게 중요	2개의 속성이 차상위목표 기준으로 볼 때 똑같이 중요
3	약간 중요	한 속성이 다른 속성보다 약간 중요
5	매우 중요	한 속성이 다른 속성보다 매우 중요하거나 가치가 있음
7	확실히 중요	한 속성이 다른 속성보다 대단히 중요하거나 가치가 있음
9	절대적으로 중요	다른 속성에 비해 비교할 수 없을 정도로 절대적 중요
2, 4, 6, 8	근접해 있는 가까운 척도 간의 중간 정도의 중요성	필요한 경우에 사용
위의 역수	한 속성이 다른 속성보다 중요한 경우, 후자의 중요도는 전자의 중요도와 비교하여 그 역수의 값을 갖는다.	

$$A w = \lambda_{max} w \quad (2)$$

여기서 λ_{max} 는 λ 보다 항상 크거나 같게 되며, λ_{max} 가 λ 에 근접할수록 행렬 A 는 일관성을 갖는 조건에 근접하게 된다.

쌍대비교 행렬이 일관성을 갖고 있는 지는 일관성 비율(CR: consistency ratio)로 측정한다. 일관성 비율은 일관성 지표(CI: consistency index)를 랜덤일관성 지표(RI: random index)로 나눈 값이다. CI는 다음과 같이 정의된다.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (3)$$

랜덤일관성 지표 RI는 Saaty가 모의실험을 통하여 산출한 가중치들의 평균값이며, Taha(2002)에 의하면 RI는 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$RI = 1.98 n/(n - 1) \quad (4)$$

그러면 일관성 비율 CR은 다음 식과 같이 정의된다.

$$CR = CI / RI \quad (5)$$

CR이 0.1 이하이면 전문가의 평가가 일관성이 있는 것으로 평가하고, 0.2 이내이면 허용할 수 있는 정도인 것으로 판단한다.

2.4 국가경쟁력 우선순위 산출

AHP의 마지막 단계는 각 대안의 종합 평가점수를 산출하는 것이다. 다기준 평가 모형은 어떠한 요소의 유리한 평가가 다른 요소의 불리한 평가를 상쇄하지 못하는 경우의 선호보정이 없는 모형과 요소간의 상쇄가 가능한 선호보정이 있는 모형으로 분류할 수 있다.

선호보정이 없는 모형에서는 각 요소의 평가만으로 각 대안을 비교하며, 선호보정이 있는 모형은 각 평가자의 요소들에 대한 선호도의 정보를 얻을 수 있는 경우에 사용된다. 수소에너지 국가경쟁력에 관한 평가 기준에 관한 선호도는 전문가 집단의 의견을 취합하여 얻을 수 있으므로 선호보정 모형을 사용하였다.

규준화(scaling)는 서로 다른 측정단위를 갖는 요소들의 값을 비교 가능한 척도로 변환하는 절차이다. 본 연구는 규준화의 방법으로 일반적으로 많이 사용되고 있는 선형변환 방법을 이용하였다. 선형변환에서는 수치가 높을수록 높은 선호도를 갖는 요소에 대해서는 최대치를 기준하여 평가하고, 수치가 낮을수록 높은 선호도를 갖는 요소에 대해서는 최소치를 기준하여 평가한다.

각 국가의 종합점수는 규준화한 평가치에 각 대안의 가중치를 곱하여 산출한다. 또한 각 대안의 종합점수를 내림차순으로 정렬하여 모든 대안들의 우선순위를 도출한다.

3. 국가경쟁력 평가자료

3.1 평가자료 수집

국가별 논문, 특허, 논문발표, 연구인력 등의 실적인 관련 자료에 대한 DB 분석을 통하여 도출하

였고 연구개발비와 수소충전소는 해외 자료를 수집하여 파악하였다.

수소에너지의 연구개발비는 수소에너지와 연료전지에 대한 국가별 예산자료를 수록한 OECD/IEA (2004)의 보고서를 기준하여 작성하였다. 이 보고서에 수록된 대부분의 예산은 2002년과 2004년 사이의 예산을 대상으로 하였으며, 연간 연구개발비를 기준하였다.

우리나라의 수소에너지 및 연료전지 연구개발비는 2004년을 기준하였으며 과기부의 수소에너지 연구개발비 100억원과 산자부의 연료전지 연구개발비 150억원을 합한 250억원을 기준하였다. 이러한 금액을 2004년도 환율인 1\$당 1,150원을 기준하여 달러로 환산하면 21.74백만달러가 된다. 또한 1유로는 1,250원을 기준하였다.

주요 국가의 수소충전소 수는 Fuel Cells(2006)의 웹사이트에 나타난 수소충전소를 기준하여 작성하였다. 이러한 수소충전소에는 건설 중에 있는 수소충전소도 일부 포함되어 있다.

3.2 DB 처리

특허는 2000년 이후에 출원된 미국 및 유럽의 공개·등록된 특허를 대상으로 하였다. 일본특허 및 한국특허는 자국의 특허수가 압도적으로 많기 때문에 평가의 공정성을 훼손할 우려가 있어서 DB 검색 대상에서 제외하였다.

수소는 에너지 이외에도 원료 및 첨가제 등으로도 사용될 수 있으므로 원래 자료의 여과(filtering)를 통하여 수소에너지의 제조, 저장, 이용 등에 대한 DB 구축을 하였다. 여과 작업은 주요 단어(KW: key word) 여과, 국제특허 코드(international patent code) 여과, 출원인·발명자 여과 등으로 구성되며 이에 근거하여 세계 30개 주요 국가의 특허 수를 도출하였다.

논문은 CA(chemical abstract) 중에서 상위 30개 논문집(journal)에 속하는 SCI 논문을 대상으로 하였다. CA 30위에 속하는 대표적인 논문집은 International Journal of Hydrogen Energy,

Journal of Alloys and Compounds, Journal of Power Sources, Applied Catalysis, Journal of the American Chemical Society, Fuel Cells 등이다.

논문도 특허와 마찬가지로 수소에너지의 제조, 저장, 이용 분야 등에 대하여 KW 여과, CA 여과를 통하여 DB 구축을 하였고, 이러한 DB 검색을 통하여 2000년 이후에 CA 상위 30개 논문집에 게재된 논문 수를 산출하였다.

논문발표는 CA 상위에 속하는 8개의 프로시딩을 선택하여 수소에너지의 제조, 저장, 이용 분야 등에 대하여 KW 여과, CA 여과를 통하여 DB 구축을 하였다. 대표적인 프로시딩은 Material Research Society Symposium Proceedings, AIP Conference Proceedings, American Chemical Society National Meeting, Proceedings of SPIE, AIChE Annual Meeting 등이다. 이러한 DB 구축과 검색을 통하여 2000년 이후에 CA 상위 8개 프로시딩에 게재된 논문발표 수를 산출하였다.

연구인력은 특허, 논문, 논문발표에 나타난 연구자를 대상으로 DB를 구축하고, 중복하여 나타난 연구자를 제외하여 각 국가별 연구인력 수를 산출하였다. 이러한 자료수집과 DB 처리에 의하여 산출된 세계 주요 30개 국가의 수소에너지 국가경쟁력 평가자료를 Table 2에 수록하였다.

Table 2를 보면 우리나라는 수소에너지 및 연료전지 분야에서 세계적으로 특허 5위, 논문 4위, 논문발표 5위, 연구인력 5위 등으로 나타나 수소에너지의 기술수준과 연구인력이 상대적으로 높은 수준인 것으로 나타났다.

4. 수소에너지 국가경쟁력 평가

4.1 설문조사 및 자료처리

수소에너지 기술을 평가할 수 있는 수소에너지의 제조·저장·이용 분야별 전문가집단을 조사대상으로 하였다. 조사대상 전문가는 수소에너지 분야에 종사하고 있는 전문 인력으로 구성하며 국내 에너지 전문기관, 대학교, 정부, 산업체 등에 소속

Table 2 Evaluation data for the national competitiveness of hydrogen energy

국가	평가항목						
	1 논문	2 특허	3 논문 발표	4 연구 인력	5 연구 개발비	6 수소 충전소	
아시아 / 오세아니아	한국	199	69	23	590	22	1
	일본	577	645	92	2663	191	18
	중국	378	10	13	934	NA	2
	타이완	51	28	5	167	NA	0
	인도	73	6	6	161	NA	1
	이스라엘	19	9	2	67	NA	0
	싱가폴	23	3	3	54	NA	2
	터키	35	0	0	67	4.6	0
	호주	17	8	2	62	NA	2
미주	미국	571	1023	578	3813	340	43
	캐나다	127	94	19	429	26	9
	멕시코	22	1	0	75	NA	0
	브라질	42	0	1	100	NA	0
유럽	독일	161	201	26	885	76	19
	영국	77	31	44	405	32	1
	프랑스	84	47	2	361	48	1
	이탈리아	95	11	4	327	52	2
	네덜란드	45	15	1	168	36	1
	노르웨이	40	6	1	102	11	0
	스위스	47	7	3	134	16	1
	스웨덴	41	3	3	97	NA	1
	러시아	37	5	4	157	NA	0
	덴마크	28	10	5	94	22	1
	스페인	48	1	3	182	12	2
	오스트리아	5	3	3	37	9.1	0
	폴란드	33	0	0	78	NA	0
	벨기에	0	1	0	3	9.2	2
	포르투갈	12	0	0	36	NA	2
	그리스	28	2	0	81	6.1	1
아이슬란드	0	0	2	4	NA	1	

주) 연구개발비의 단위는 백만불이며, NA는: 자료가 없음을 의미

된 박사급 전문 연구 인력으로 구성하였다.

AHP를 이용하여 수소에너지의 국가경쟁력을 평가하기 위한 항목은 전문가 회의를 통하여 선정하였으며, 51명의 수소에너지 전문가 집단을 대상으로 이메일을 이용하여 설문조사를 수행하여 33 명으로부터 응답을 받았다. 이 중에서 평가의 일관성이 유지되지 않은 9매의 설문지를 제외하고 24 명의 전문가에게 설문조사한 결과를 기준하여 평가하였다.

전문가를 대상으로 한 설문조사의 평가결과와 자료조사 결과를 대상으로 한 평가지표별 가중치

AHP를 이용한 수소에너지의 국가경쟁력 평가

Table 3 Pairwise comparison matrix of performance indices for hierarchy 1

계층1	기술수준	연구인력	연구개발비	인프라구축
기술수준	1	1.1746	1.1420	1.7047
연구인력	0.8513	1	1.1658	1.8165
연구개발비	0.8757	0.8578	1	1.7753
인프라구축	0.5866	0.5505	0.5633	1

산출, 평가결과 규준화, 국가경쟁력 평가결과 등의 과정은 80586 마이크로컴퓨터와 EXCEL 6.0을 이용하여 작성된 프로그램에 의하여 도출하였다.

4.2 평가지표별 가중치

전문가의 전체적인 평가결과가 소수의 극단적인 평가결과에 좌우되는 것을 방지하기 위하여 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등의 평가지표에 대한 기하평균값을 이용하여 각 평가항목의 중요도를 산출하였다.

설문조사에 의한 평가지표의 기하평균값을 이용하여 도출한 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등의 계층 1의 평가지표별 쌍대비교 행렬을 Table 3에 수록하였다.

계층 1의 평가지표에 대한 쌍대비교 행렬을 이용하여 계산한 결과는 $\lambda_{max}=4.0084$, $n=4$ 이다. 이를 각기 식 (4)와 식 (5)에 대입하면 $CI=0.0028$, $RI=0.99$, $CR=0.0028$ 이다. 계층 1의 평가항목에 대한 일관성 비율은 0.0028이므로 평가결과에 대한 일관성이 유지된 것으로 판단할 수 있다.

이러한 쌍대비교 행렬을 이용하여 계층 1의 평가항목에 대한 가중치를 산출하였으며, 평가지표별 가중치는 기술수준 29.88%, 연구인력 28.14%, 연구개발비 26.10%, 인프라구축 15.88% 등의 순서로 평가되었다.

기술수준은 논문, 특허, 논문발표 등의 계층 2의 평가지표들로 분류된다. 계층 2의 평가지표들도 기하평균값을 이용하여 가중치를 산출하였고, Table 4에 계층 2의 평가지표에 대한 쌍대비교 행

Table 4 Pairwise comparison matrix of performance indices for hierarchy 2

계층 2	논문	특허	논문발표
논문	1	0.6386	5.0679
특허	1.5659	1	5.2881
논문발표	0.1973	0.1891	1

렬을 수록하였다.

계층 2의 평가지표에 대한 일관성 비율은 0.018이며, 평가결과에 대한 일관성이 유지된 것으로 판단할 수 있다. 계층 2의 평가지표에 대한 가중치는 논문 38.59%, 특허 52.65%, 논문발표 8.76% 등의 순서로 평가되었다.

계층 2의 평가지표인 해외특허, SCI 논문, 논문발표 등의 전체적인 복합가중치는 기술수준의 가중치인 29.88%에 계층 2의 평가지표에 대한 가중치를 각기 곱하여 산출할 수 있다. 전체적인 평가지표의 복합가중치는 Fig. 2와 같이 논문 11.53%, 특허 15.73%, 논문발표 2.62%, 연구인력 28.14%, 연구개발비 26.10%, 수소충전소 15.88% 등이다.

4.3 국가경쟁력 평가결과

수소에너지의 국가경쟁력 평가항목들은 서로 다른 측정 단위를 사용하므로 이들을 비교 가능한

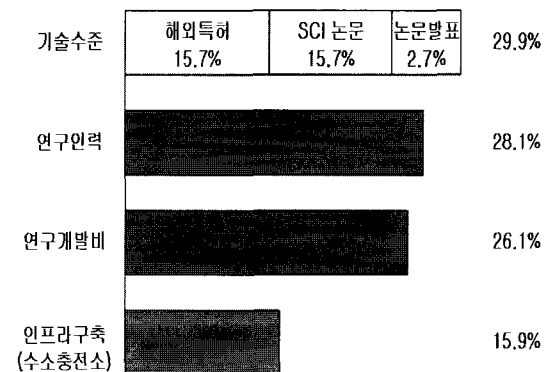


Fig. 2 Weights for evaluation indices of hydrogen energy

척도로 변환하는 표준화 과정이 필요하다. 본 연구의 국가경쟁력 평가지표는 모두 클수록 높은 선호도를 가지므로 각 평가항목의 최대치를 기준하여 각 요소를 변환하는 선형변환 방법을 사용하였다. 선형변환 방법에 의해 얻어진 수소에너지의 국가별 평가결과를 Table 5에 수록하였다.

Table 5를 보면 미국은 수소에너지 분야에서 세계 2위를 차지한 논문을 제외한 모든 평가지표들에 대하여 세계 1위를 차지했으며, 일본은 논문분야에서 1위이고 기타 평가지표에서는 모두 2위를 차지하였다. 전체적으로 미국은 만점에 가까운 0.9988로 1위이고, 일본은 0.6283의 점수로 2위를 차지한 것으로 분석되었다.

한국은 0.1155의 점수를 얻어 캐나다 다음으로 세계 6위를 차지한 것으로 나타났다. 우리나라는 특허 5위, 논문 4위, 논문발표 5위, 연구인력 5위 등으로 기술수준과 연구인력은 상대적으로 높은 수준인 것으로 나타났다. 그러나 연구개발비 9위, 수소충전소는 12위로 상대적으로 낮은 수준을 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문은 계층적 분석과정 방법을 이용하여 수소에너지의 국가경쟁력을 평가하는 문제를 다루었다. 최근에는 수소에너지 및 연료전지 분야의 연구개발비가 크게 증가하고 있으며 이러한 투자에 대한 효율성 및 타당성을 평가하는 것이 요구되는 시점이다. 수소에너지의 국가경쟁력 평가지표로는 기술수준, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등을 선정하였고 기술수준은 다시 특허, 논문, 논문발표 등의 세부 평가지표로 구분하였다.

수소에너지의 국가경쟁력 평가결과로서 미국은 논문을 제외한 모든 평가지표에서 1위를 차지하여 세계 1위이고, 일본은 모든 평가지표에서 2위 이상을 차지하여 세계 2위인 것으로 분석되었다. 우리나라는 특허 5위, 논문 4위, 논문발표 5위, 연구인력 5위 등으로 수소에너지 분야의 기술수준과 연

Table 5 Evaluation results for the national competitiveness of hydrogen energy

평가항목	1 논문	2 특허	3 논문발표	4 연구인력	5 연구개발비	6 수소충전소	7 총점수	8 순위	
아시아 / 오세아니아	한국	0.3449	0.0674	0.0398	0.1547	0.0647	0.0233	0.1155	6
	일본	1.0000	0.6305	0.1592	0.6984	0.5618	0.4168	0.6283	2
	중국	0.6551	0.0098	0.0225	0.2450	0	0.0465	0.1540	4
	타이완	0.0884	0.0274	0.0087	0.0438	0	0.0000	0.0271	15
	인도	0.1265	0.0059	0.0104	0.0422	0	0.0233	0.0314	14
	이스라엘	0.0329	0.0088	0.0035	0.0176	0	0.0000	0.0102	28
	싱가포르	0.0399	0.0029	0.0052	0.0142	0	0.0465	0.0166	21
	터키	0.0607	0.0000	0.0000	0.0176	0.0135	0.0000	0.0155	23
	호주	0.0295	0.0078	0.0035	0.0163	0	0.0465	0.0167	20
	미주	미국	0.9896	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9988	1
캐나다		0.2201	0.0919	0.0329	0.1125	0.0765	0.02093	0.1255	5
멕시코		0.0381	0.0010	0.0000	0.0197	0	0.0000	0.0101	29
브라질		0.0728	0.0000	0.0017	0.0262	0	0.0000	0.0158	22
유럽	독일	0.2790	0.1965	0.0450	0.2321	0.2235	0.4419	0.2581	3
	영국	0.1334	0.0303	0.0761	0.1062	0.0941	0.0233	0.0803	9
	프랑스	0.1456	0.0459	0.0035	0.0947	0.1412	0.0233	0.0913	8
	이탈리아	0.1646	0.0108	0.0069	0.0858	0.1529	0.465	0.0923	7
	네덜란드	0.0780	0.0147	0.0017	0.0441	0.1059	0.0233	0.0551	10
	노르웨이	0.0693	0.0059	0.0017	0.0268	0.0324	0.0000	0.0249	16
	스위스	0.0815	0.0068	0.0052	0.0351	0.0471	0.0233	0.0365	12
	스웨덴	0.0711	0.0029	0.0052	0.0254	0	0.0233	0.0196	19
	러시아	0.0641	0.0049	0.0069	0.0412	0	0.0000	0.0199	18
	덴마크	0.0485	0.0098	0.0087	0.0247	0.0647	0.0233	0.0349	13
	스페인	0.0832	0.0010	0.0052	0.0477	0.0353	0.0465	0.0399	11
	오스트리아	0.0087	0.0029	0.0052	0.0097	0.0268	0.0000	0.0113	27
	폴란드	0.0572	0.0000	0.0000	0.0205	0	0.0000	0.0124	26
	벨기에	0.0000	0.0010	0.0000	0.0008	0.0271	0.0465	0.0148	24
	포르투갈	0.0208	0.0000	0.0000	0.0094	0	0.0465	0.0124	25
	그리스	0.0485	0.0020	0.0000	0.0212	0.0179	0.0233	0.0203	17
아이슬란드	0.0000	0.0000	0.0035	0.0010	0	0.0233	0.0041	30	

구인력은 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 그러나 연구개발비는 9위, 수소충전소는 12위로 상대적으로 낮은 수준인 것으로 나타났다.

우리나라는 2003년 이후에 수소에너지와 연료 전지 분야에 대한 집중투자를 통하여 국가경쟁력이 급성장한 것으로 나타났다. 하지만 수소에너지의 국가경쟁력 평가점수는 세계 1위인 미국에 비교하여 11.6%에 불과한 것으로 평가되었다. 따라서 향후에는 장기간에 걸쳐서 수소에너지 분야의 연구개발비를 늘리고 선택과 집중을 통하여 수소에너지의 기술경쟁력을 향상시킬 필요가 있다. 또한 수소경제 시대를 열어 나갈 수 있도록 하는 수소경제 인프라구축을 확대할 필요가 있는 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 과학기술부 프론티어 연구사업인 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) B. Apostolou, and J.M. Hassel, "An Empirical Examination of the Sensitivity of the Analytic Hierarchy Process to Departure from Recommended Consistency Ratios", *Mathematics and Computer Modelling*, Vol. 17, 1993, pp. 121-129.
- 2) K. M. Dadkhah, and F. Zadehi, "A Mathematical Treatment of Inconsistency in the Analytic Hierarchy Process", *Mathematics and Computer Modelling*, Vol. 17, 1993, pp. 203-211.
- 3) <http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>, 2006.
- 4) K. H. Lim, and S. R. Swenseth, "An Iterative Procedure for Reducing Problem Size in Large Scale AHP Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 67, 1993, pp. 55-62.
- 5) OECD/IEA, "Hydrogen & Fuelcells-Review of National R&D Programs", 2004.
- 6) T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.
- 7) T. L. Saaty, "Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process", *Management Science*, Vol. 32, 1986, pp. 841-849.
- 8) M. J. Schniederjans, and R. L. Wilson, "Using the Analytic Hierarchy Process and Goal Programming for Information System Project Selection", *Information and Management*, Vol. 20, 1991, pp. 105-112.
- 9) H. A. Taha, *Operations Research*, Prentice Hall, 2002.
- 10) D. L. Thurston, and Y. Q. Tian : "Integration of the Analytic Hierarchy Process and Integer Programming with Linear Constraints for Long Range Production Planning", *Mathematics and Computer Modelling*, Vol. 17, 1993, pp. 131-140.
- 11) E. N. Weiss, and V. R. Rao, "AHP Design Issues for Large-Scale Systems", *Decision Sciences*, Vol. 18, 1987, pp. 43-61.