[논문] 수소에너지
J. of the Korean Hydrogen Energy Society
Vol. 9. No. 1(1998)

수소 에너지 생산, 수송 및 이용에 대한 통합시스템 해석

오 병수, 서 석진

전남대학교 기계공학과
광주광역시 북구 용봉동 300, 500-757

Analysis of the total system for production, transportation and utilization of hydrogen energy

Byeong-Soo Oh, Seog-Jin Seo

Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University
300 Yongbong-Dong, Puk-Ku, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

An energy crisis is expected in near future. Fossil fuel such as oil and natural gas has been used and will be no longer supplied enough to demand in the beginning of coming century. The use of the fuel makes a lot of environmental pollution to threaten human being's health especially in big cities and produces a lot of CO_2 to make green house effect of the earth. It is the time to use clean fuel such as hydrogen to prevent the expected energy crisis and the pollution. A new engine such as fuel cell can be used instead of the conventional internal combustion engine with 2 to 3 times higher efficiency of the conventional engine. The fuel cell uses hydrogen and oxygen and produces electric energy and pure water, which is a calm engine without air pollution. In big cities the city buses and the taxies powered by hydrogen fuel cells are suggested to be operated for clean environment. A model of the total energy system for production, transportation and utilization of hydrogen is calculated.

1. 서론

인류가 사용한 연료의 역사를 보면 나무, 석탄, 석유, 천연가스 등으로써 고체, 액체, 기체연료로 변천하여 가고 있다. 연료는 주로 탄소와 수소 성분으로 이루어지는데 고급연료로 변함에 따라 탄소보다는 수소가 많이 함유되는 구성을 이룬다. 궁극적으로는 탄소가 전혀 없이 순수한 수소만이 미래의 연료라는 예측이 가능한 것이다. 지구에는 오랜 세월동안 식물이나 동물이 땅 속에 매장되어 축적된 석탄, 석유 및 천연가스와 같은 화석연료가 저장되어 있다. 산업혁명 이후로 이런 화석연료의 소비가 급증하여 21세기 초에는 고갈될 것으로 에너지 전문가들은 예측하고 있다. 미국은 이미 자국 내의 기름 생산량 증가가 1970년대 중반부터 감소되고 있고, 많은 에너지 전문가들의 진단에 의하면 1995, 2000, 2005 또는 2010년에 세계 기름 생산량의 증가가 최대가 되고 그 이후로는 감소한다고 예측했다. [1, 2, 3] 중국이나 인도 등 아시아의 많은 나라들의 경제성장률이 높아 더욱 많은 에너지 소모가 예상되며 세계적인 에너지 수요는 급격히 상승하고 있다. 이러한 결과 에너지 위기(Energy Crisis)가 예상된다. 수 만년 동안 태양에너지가 축적된 화석연료를 몇 백년 동안에 모두 소비함으로써 탄산가스를 너무 많이 배출하고 있다. 이로 인한 지구의 온실효과와 화석연료의 연소 시 많은 공해물질을 배출함으로써 인류의 생존에 대한 위협을 받고 있다. 특히 인구가 밀집된 대도시의 공해는 많은 시민들의 건강을 해치고 있으므로 화석연료 대신에 새로운 청정연료(Clean fuel)인 수소를 대체연료로 사용할 필요가 있다. 고체연료인 석탄을 사용할 때는 외연기관이 적절하였고 액체연료인 석유를 사용하는 현재는 내연기관의 시대이다. 그러나 천연가스나 수소와 같은 연료는 기체상태이므로 그에 맞는 새로운 기관이 등장할 시점이다. 세계적으로 연료전지를 활발히 연구하고 있는데 연료전지의 원리는 수소와 산소가 들어가서 전기에너지를 발생시키고 부산물로서 물이 나온다. 내연기관에서 발생되는 공해물질을 연료전지에서는 배출하지 않고 또한 연료전지의 에너지 변환 효율이 내연기관보다 2 또는 3배 더 좋다. 미국, 일본, 캐나다 및 독일에서는 수소를 사용하는 연료전지 자동차를 만들어 실험을 하고 있다. 이 논문에서는 표본적으로 선택한 일부의 지역에서 태양에너지 및 풍력에너지를 이용하여 수소를 생산하고 대도시에서 수소 연료전지 자동차를 운행할 경우의 모델을 제시하기 위하여 에너지 관련 계산을 하였다.

2. 수소생산

국내의 육지에서 태양에너지를 최대로 받기 위해서는 눈이 내리지 않고 일사량이 많은 최남단 지역과 풍력에너지가 풍부한 지역을 선정할 필요가 있다. 그 외에도 파력, 조력, 소수력, 해수온도차, 지열 등 청정에너지원을 더불어 활용할 수 있는 곳도 고려하여야 한다. 일반적으로 맑은 날씨에는 태양에너지가 많고 흐린 날씨에는 풍력에너지가 많기 때문에 두 가지의 에너지를 결합하여 수소를 생산하는 것이 안정적이라고 판단된다. 이러한 점을 고려하여 표본적으로 해남, 완도 및 진도를 선정하였다. 광주지방기상청에서 각 지역의 1996년도 매일 평균 풍속 데이터는 구할 수 있으나 일사량 데이터는 목포와 광주만 있어서 편의상 가까운 목포의 데이터를 기준 일사량으로 계산하였다. Table 1에 광주와 목포의 1996년 일년 동안 수평면 일사량을 월별 합계로 나타냈고 그것을 Fig. 1과 같이 도표로 그렸다.

Table 1. Incident solar energy at horizontal surface area.

(MJ/m^2)

MONTH	KWANG JU	MOK PO
1	268.95	290.38
2	328.97	356.24
3	369.60	380.67
4	537.23	547.36
5	563.07	618.50
6	346.67	374.88
7	513.71	572.09
8	494.32	570.22
9	459.14	496.72
10	367.59	415.65
11	235.04	249.48
12	227.59	257.46
TOTAL	4711.88	5129.65

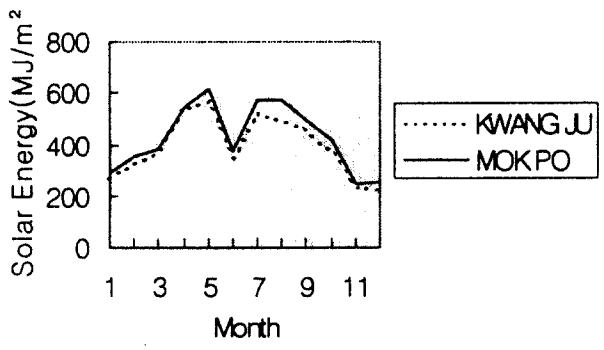

Fig. 1 Incident solar energy at horizontal surface.

6월에 일사량이 감소되었는데 흐린 날씨가 많은 것을 알 수 있다. Table 2에는 진도, 완도 및 해남 지역의 일일 평균 풍속 데이터를 기초로 하여 단위 수직면 당 풍력 에너지를 $E = 1/2\ m\ v^2$ 식에 의하여 컴퓨터로 계산한 뒤 월별로 합산하였다.

공기의 질량 m 은 표준상태의 공기 밀도(1.26 kg/m^3)와 공기의 속도 v를 곱한 것에

Table 2. Calculated wind energy from the daily mean velocity through the vertical area.

(MJ/m^2)

MONTH	JIN DO	WAN DO	HAE NAM
1	240.09	220.90	254.28
2	180.20	154.98	195.61
3	112.53	70.77	120.03
4	54.29	28.32	76.33
5	227.81	36.40	59.77
6	108.27	21.55	38.37
7	130.66	15.94	71.36
8	53.92	39.48	21.23
9	32.03	30.89	14.49
10	50.29	50.38	48.89
11	233.96	146.59	69.57
12	108.97	118.26	80.07
TOTAL	1533.02	934.46	1050.00

비례하므로 실제의 풍력 에너지는 속도의 3승에 비례한다. 그러므로 대부분의 풍력에너지는 최대 풍속에 의하여 좌우되고 저속일 때는 무시할 만큼 작다. 더욱 정확한 풍력에너지를 계산하기 위해서는 일일 평균속도 또는 시간 평균, 분 평균 보다 순간속도로 계산하여야 한다. 순간속도로 계산한 풍력에너지가 산술 평균속도를 이용하여 계산한 풍력에너지 보다 많다. Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 각 지역의 단위 수직면 당 풍력에너지를 월별 및 일별로 표현하였다.

이러한 그래프에서 보이는 것처럼 낮은 준위의 에너지 보다 높이 솟은 에너지의 양이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 풍력 발전기로 에너지를 수집할 때는 최대 풍속을 우선 순위로 고려하여야 된다.

Fig. 5에서 보면 여름 보다 겨울에 풍력에너지가 더욱 많은 경향인데 태양에너지는 겨울에 더 적으므로 풍력 및 태양에너지의 조합이 매우 적절한 것으로 간주된다. 진도는 타 지역보다 풍력에너지가 더 많고 다른 지역보다 더 남쪽이므로 태양에너지가 더 많을 것으로 판단되어 실제 수소생산의 표준계산으로 활용했다.

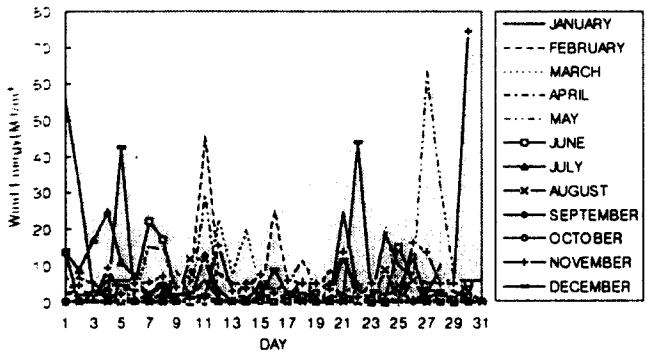

Fig. 2 Calculated wind energy from the daily mean velocity through the vertical area at Jin Do.

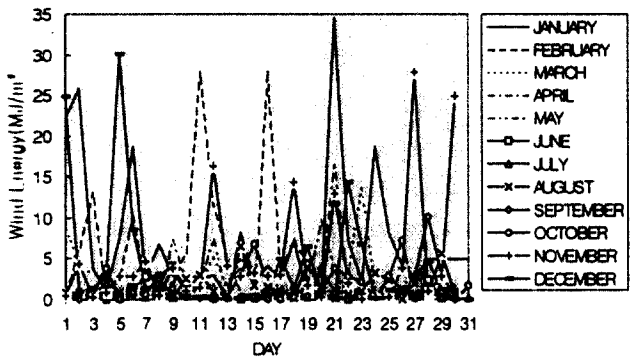

Fig. 3 Calculated wind energy from the daily mean velocity through the vertical area at Wan Do.

Table 3에서는 태양전지의 효율을 5, 10 또는 15%로 하고 전기분해 효율을 90%로 하였을 때 단위 수평면 당 획득할 수 있는 수소의 양과 풍력 발전기의 효율을 30 또는 40%로 하였을 때의 단위 수직면 당 획득할

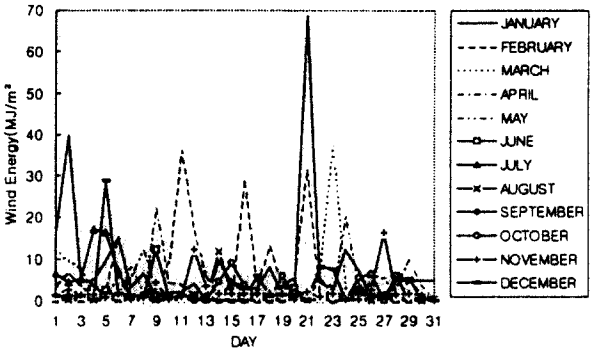

Fig. 4 Calculated wind energy from the daily mean velocity through the vertical area at Hae Nam.

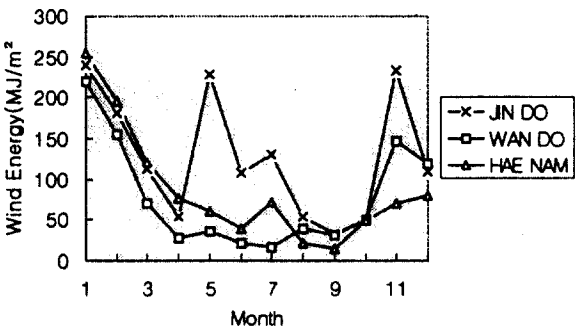

Fig. 5 Wind energy through the vertical area.

Total Solar Energy(Mok Po or Kwang Ju) ×Solar cell Eff.(%) × Electrolysis Eff.(%) / (12(Month)× LHV) = Hydrogen Producion

Total Wind Energy(Jin Do, Wan Do or Hae Nam) × wind turbine Eff.(%) × Electrolysis Eff.(%) / (12(Month)× LHV) = Hydrogen Producion

여기에서 LHV는 Lower Heating Value로서

121MJ/kg 이다.

Table 3. Producion of hydrogen fuel for a year.

	AREA	Solar cell or wind turbine Eff.(%)	Electro-lysis Eff. (%)	Hydrogen Producion (kg/m^2)
SOLAR ENERGY	MOK PO	5	90	0.159
		10		0.318
		15		0.477
	KWANG JU	5		0.146
		10		0.292
		15		0.438
WIND ENERGY	JIN DO	30		0.285
		40		0.380
	WAN DO	30		0.174
		40		0.232
	HAE NAM	30		0.195
		40		0.260

3. 수송

현재 연료로 사용되는 가솔린 및 경유는 국내의 많은 정유회사에서 만들어서 요소 요소에 설치된 주유소 망을 통하여 공급이 되고 있다. 새롭게 공급되고 있는 도시가스는 수입한 액체천연가스(LNG)를 인천에서 기화시켜 서울, 대전, 부산, 전주 및 광주 등으로 도시가스 배관 망을 타고 공급되고 있다. 또한 액체천연가스 통 및 압축 천연가스 통을 트럭에 싣고 수송하여 공급하기도 한다. 수소는 청정에너지원이 풍부한 남쪽에서 생산하고 위의 대도시에서 주로 에너지를 소모하므로 도시가스 배관 망을 역순으로 활용하거나 새로 수소 배관 망을 전국적으로 매설하여 공급하는 것이 바람직하다. 수소를 생산지에서 압축하여 배관을 통하여 공급하면 마찰 손실이 적어 전선에 의한 전기에너지 공급보다 에너지 손실이 적다. 또한 액화시켜서 액체수소 탱크로 장거리 수송하여 공급할 수도 있다. 각각의 소비 장소 즉 현재와 같은 주유소에서 액체수소를 기화하거나 액체수소 자체로 소비자에게 공급할 수도 있다. 생산지나 소비지역에서 수소를 액체수소, 금속수소화합물 및 고압수소 형태로 저장하여 수송 또는 소비자에 공급하도록 한다.

4. 이용

1980년대에는 내연기관에 가솔린이나 디젤연료 대신에 수소를 넣어 작동할 수 있도록 개조한 수소 자동차에 대한 많은 연구를 하였다. 이제는 수소엔진이 기존의 가솔린엔진과 같이 작동할 수 있도록 기술적인 문제들은 대부분 해결되었고 수소연료의 가격이 가솔린에 비하여 비싼 점과 기존의 주유소와 같은 수소 연료 공급시스템이 형성되지 않은 점들이 문제로 남아있다. 또한 수소연료 탱크가 가솔린 연료 탱크 보다 단위 부피, 단위 무게 당 저장하는 에너지가 적으므로 장거리 운행하는데 문제점이 남아 있다. 1990년대에는 연료전지의 연구가 활발히 되어 현재는 미국 시카고와 캐나다의 뱅쿠버에서 수소 연료전지로 다니는 시내버스를 실험적으로 운행하고 있다. 이런 시내버스에는 300기압으로 압축한 수소가스를 연료로 사용하고 있다. 시내버스는 일정한 노선을 반복하여 운행하므로 주유소와 같은 수소 공급 시설이 어디에 있을까 하는 걱정은 없다. 시내버스는 현재의 주유소와 같은 전국적인 망이 없다고 하여도 양쪽 종점 또는 도중에 수소 공급시설이 하나만 있어도 된다. 시내버스에는 액체수소, 고압기체수소 및 금속수소화합물 연료 탱크 중 어느 것을 사용해도 가능성이 있다. 연료전지는 기존

의 가솔린이나 디젤기관의 효율보다 2.5배 정도 좋으므로 수소 연료 탱크가 가솔린 연료의 에너지량에 해당되는 수소량 보다 적게 저장해도 차량이 같은 거리를 갈 수 있다. 승용차보다 대형 버스는 무게가 무겁고 부피가 크므로 수소 연료 탱크의 무게나 부피의 비중이 상대적으로 작다. 지금까지 개발된 양자교환막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)는 기존의 디젤기관과 부피 및 무게가 거의 같은 크기로서 동등한 출력을 낼 수 있다. 현재는 국제적으로 연료전지의 기술적인 것보다 경제적 문제점이 남아있다. 연료전지의 양극 및 음극에 고가의 백금이 들어가고 비싼 막이 사용되므로 연료전지의 가격이 매우 비싸다. 수소 연료전지를 이용하는 자동차의 개발 중 일부를 Table 4에 나타내었다.

이러한 자동차는 진동 및 소음이 기존의 내연기관에 비하여 거의 없고 배기로 물만 나오는 무공해 자동차이다. 인구 및 차량이 밀집되어 환경오염이 심한 서울을 비롯한 대도시에서 이러한 시내버스부터 운행을 시작하면 점진적으로 수소 공급 망이 형성되고 영업용 택시, 우편 배달 차량 등에 확대 적용할 수 있다.

Table 4. Hydrogen fuel cell powered vehicles.

continue to

No.	Organization	Vehicle type	Vehicle weight (kg)	Fuel cell power (kw)	Fuel cell specific power (kw/kg)	Maximum speed (km/h)
1	Daimler-Benz Necar II	Van	2,600	50	0.17	110
2	Ballard Phase2 New Flyer	Heavy duty bus	13,608	205	0.29	97
3	Daimler-Benz NEBUS	Bus	18,000	250	0.18	24

Table 4. Continued.

No.	Acceleration (s)	Range (km)	Storage pressure (bar)	Stored hydrogen (kg)	Refueling time (min)	Year
1	12 (0~48km/h)	250	GH_2 250	4.6	15	1996
2	19 (0~48km/h)	402	GH_2 300	66		1994
3		250	GH_2 300	21	60	1997

5. 필요한 수소량과 생산면적

시범적으로 대도시에서 시내버스 3대와 영업용 택시를 10대 운행시킨다는 가정 하에 필요한 수소량을 계산하였다. 버스는 Table 4에 있는 Ballard의 New Flyer 버스를 기준으로 하여 수소 66 kg으로 402 km를 가는 것으로 했다. 택시는 Daimler-Benz의 Necar II Van을 모델로 하여 수소 4.6 kg으로 250 km를 운행할 수 있다는 기준으로 계산했다.[4, 5, 6] 시내버스와 영업용 택시가 하루에 주행하는 거리를 매일 평균 400, 600, 800, 1000 km로 임의 가정을 한 뒤 매달 필요한 수소량을 계산하여 Table 5에 나타냈다. 만일 버스 3대와 택시 10대가 매일 평균 각각 600 km를 주행한다는 가정을 하면 필요한 수소량은 매달 12,187 kg이다. 생산 면적을 계산할 때 계산 편의상 10 cm x 10 cm 즉 100 cm^2의 면적을 갖는 태양전지를 33,000 m^2(약 10000평) 설치한다고하면 3,300,000 개의 전지가 필요하다.

Table 5. Required hydrogen.

Vehicle	No. of Vehicles	Expected Range per Day (km)	Required Hydrogen per Month (kg)	Reference Vehicle
Bus	3	400	5,910	Ballard Phase 2 New Flyer
		600	8,865	
		800	11,820	
		1,000	14,776	
Taxi	10	400	2,208	Daimler-Benz Necar II
		600	3,312	
		800	4,416	
		1,000	5,520	

목포의 수평면 일사량을 기준으로 하고 태양전지의 효율을 10%로 하면 매달 평균 10,494 kg의 수소를 생산할 수 있다. 나머지 필요한 수소량을 채우기 위하여 풍력 발전기를 사용한다면 직경 6m 날개를 사용할 경우 수직면 6,140 m^2 이 필요하고 217개의 풍력 발전기의 설치가 요구된다. 풍력 발전기 1대 당 15 m x 15 m 즉 225 m^2의 면적이 필요하다고 가정하면 수평면적으로 48,825 m^2이 요구된다. 풍력에너지를 Table 3에서 진도와 풍력발전 효율 30%를 기준으로 하면 매달 평균 1,750 kg의 수소를 생산할 수 있으며, 이를 Table 6에 나타내었다. 이 태양에너지와 풍력에너지로부터 생산한 수소량을 더하면 매달 평균 12,244 kg의 생산량

Table 6. Energy farm area

Energy	No. of Solar Cells or Wind Turbines	Horizontal Installation Area (m^2)	Hydrogen Production (kg)	Reference
Solar	3,300,000	33,000	10,494	Mokpo Eff. 10%
Wind	217	48,825 (6,140)	1,750	Jin Do Eff. 30%

( ): Vertical area swept by wind turbines

이 되므로 필요량 12,187 kg을 능가한다. 이것은 단순한 계산으로써 하나의 모델을 제시한 것이다. 실제는 태양전지를 남쪽 방향으로 경사지게 고정 설치하여 태양의 남중시 태양에너지를 수직으로 태양전지에 받도록 매일 또는 매달 경사조절을 하면 더욱 많은 에너지를 생산할 수 있다. 가능하면 하루에도 해가 떠서 질 때까지 자동 태양 추적 장치를 부착하여 태양전지가 항상 햇빛에 수직으로 받도록 하면 더욱 완벽한 시스템이다. 수소에너지의 수송 및 저장 손실에 대한 것은 고려하지 않았으나 위와 같은 보정을 하면 손실에 의한 에너지량 정도는 충분히 보상할 수 있다.

6. 결론

대도시에서 시내버스 및 택시를 운행할 때 필요한 수소량을 모델로 계산하여 필요한 면적과 태양전지 및 풍력 발전기의 갯수를 추정하였고 그것을 기준으로 다양하게 적용할 수 있는 토대를 마련하였다. 태양에너지와 풍력에너지 또는 기타 에너지가 풍부한 곳에 수소에너지 농장(Hydrogen Energy Farm)을 만들어 수소를 생산하고, 전국적인 수소 배관망을 설치하여 대도시와 같은 주요 소비처로 공급한다. 이러한 수소의 생산 및 수송, 이용에 대한 Total Energy System을 구성하여 활용하면 대도시의 환경오염을 예방하고, 국가의 에너지 자급률을 높여 화석연료(석유 및 천연가스)의 고갈에 따른 에너지 위기(Energy Crisis)를 동시에 해결할 수 있다. 현재의 국내 경제 파동보다 더 큰 에너지 위기에 따른 충격을 미리 방지하기 위하여 국가에서 이러한 Total Energy System에 미리 투자하고 민간 기업의 투자를 유도하는 것이 제안된다.

참고문헌

1. Brewer, G.D., "The prospects for liquid hydrogen fueled aircraft", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 7, No. 1, pp. 21-41(1982)
2. Winter, C.J.,"Hydrogen energy-expected engineering break-throughs", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 8, pp.521-546(1987)
3. Lodhi, M.A.K. and Mires, R.W., "How safe is the storage of liquid hydrogen?", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 1, pp. 35-43(1989)
4. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Vol. XI, No.6(1996)
5. Ballard, G.E.H., "Engine of change", Hydrogen energy progress XI, pp. 1357-1371(1996)
6. Barbir, F. and Gomez, T., "Efficiency and economics of proton exchange membrane(PEM) fuel cells", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 21, No. 10, pp. 891-901(1996)