

풍력-태양전지에 의한 수소에너지 생산과 이용 모델 분석

이기문, 박창권, 정귀성, 오병수

전남대학교 기계공학과
광주광역시 북구 용봉동 300, 500-757

Model analysis for production and utilization of hydrogen energy from wind power and solar cell

Kee Mun Lee, Chang Kwon Park, Kwi Seong Jeong, Byeong Soo Oh

Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University
300 Yongbong-Dong, Bukgu, Gwangju 500-757, KOREA

Abstract

Fossil fuel such as oil and natural gas has been used and will be no longer supplied enough to demand in the beginning of this 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 CO₂ 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 taxis powered by hydrogen fuel cells are suggested to be operated for clean environment. The energy and cost analysis performed for hydrogen and electricity production from wind power and solar cell.

1. 서론

인류가 사용한 연료의 역사를 보면 나무, 석탄, 석유, 천연가스 등으로서 고체, 액체, 기체 연료로 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 연료가 되리라는 예측이 가능하다.

현재의 에너지 공급은 화석연료에 기초를 두고 있다. 세계 에너지 소비의 90%정도는 석유, 천연가스, 석탄 등에 의해 공급된다. 화석연료는 에너지 밀도가 높고, 장기간의 보관이 가능하며, 수송의 편리성 등의 장점이 있다. 화석연료를 이용하기 위한 주유소, 송유시설, 파이프라인 등의 기반 시설이 갖추어져 있다.

그러나 화석연료는 매장량에 한계가 있어 에너지 고갈과 그에 따른 가격의 폭등, 산업의 붕괴현상이 발생할 것이다. 화석연료는 또한 환경에 영향을 미친다. 황산화물, 질소산화물, 탄화수소 등의 오염물질이 배출되고, 화석연료의 연소시에는 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 CO_2 의 배출을 피할 수 없다.

미래의 에너지원은 환경에 영향을 미치지 않고 고갈의 문제가 없는 에너지원이어야 한다. 태양에너지, 수력, 풍력 등의 에너지원은 열, 전기와 같은 유용한 에너지의 형태로 전환되거나, 수소와 같은 화학적 에너지 매개체로 변환되어 사용된다.

수소는 현재의 석탄, 석유, 천연가스등의 에너지원을 대체하게 될 것이다. 현재의 화석연료에 비하면 수소의 에너지 밀도는 낮

다. 그러나 화석연료와 같은 방법으로 저장, 수송할 수 있으며, 현재의 천연가스 저장, 수송의 기반시설을 그대로 활용할 수 있다. 태양에너지에 의한 수소의 생산이 경제적 경쟁력만 갖추게 되면 수소는 무한대의 완전 무공해 사이클을 이루는 에너지로 사용될 것이다.

이 논문에서는 풍력-태양 에너지를 이용하여 수소를 생산하고 대도시에서 연료전지 자동차를 운행하는 경우의 모델을 제시하고 이를 기반으로 에너지 이용 및 경제성에 대한 분석을 하였다.

2. 풍력-태양광 발전

2.1 풍력 발전

바람은 속도와 방향이 바뀌는 가변적인 에너지원이므로 풍속 특성을 예측하기 위해서는 통계적인 방법이 사용된다. 풍속을 나타내는 통계적 방법으로 Weibull의 분포함수로 표현하며 확률밀도함수 $f(V)$ 는 다음과 같다.

$$f(V) = (K/C)(V/C)^{K-1} \exp[-(V/C)^K] \quad (1)$$

여기서 V 는 예상되는 풍속을 나타내고, C 는 Scale parameter로서 연간 평균풍속에 비례하는 상수이고 K 는 Shape parameter로서 편차의 크기를 나타내는 상수이다.^[1]

바람이 갖고 있는 운동에너지 $P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$ 이고 질량유량 $\dot{m} = \rho A V$ 이므로 단면적 A 를 통과하는 풍력에너지 $P = \frac{1}{2} \rho V^3 A$ 이다. Weibull의 확률 밀도 함수를 이용하면 단위 시간당의 바람으로부터

터 얻을 수 있는 에너지는

$$P = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV$$

$$= \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma(1 + \frac{3}{K}) \text{이다.} \quad (2)$$

풍속 관측소의 높이는 지역 및 지형에 따라 차이가 있어 관측된 풍속은 동일한 높이의 위치로 환산하여 사용한다.

실제 풍력 시스템이 바람으로부터 동력을 얻기 위해서는 풍차와 전달장치 그리고 발전기를 필요로 한다. 또한 기계적인 마찰 및 손실이 있기 때문에 풍속이 증가하여 풍차 날개에서 발생하는 토크가 이를 극복할 때 풍차가 회전하게 되며 이때의 풍속을 시동 풍속이라 한다. 풍속이 증가하면 정격이 되며 시스템의 출력이 일정하게 유지되고, 중단풍속에서는 시스템의 안전을 위해 운전 을 중단한다.

단위 면적당 풍력 발전기의 출력은 출력 곡선과 확률 분포식을 곱하여 풍속에 대해 적분하여 얻는다.^[1]

$$E/A = \frac{1}{A} \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) dV \quad (3)$$

표 1)은 기상청 측정결과와 에너지 기술 연구소에서 측정한 자료를 참고로 계산한 Weibull상수, 평균속도, 연간 풍력에너지 밀도를 나타낸 것이다. 울릉도와 제주도 그리고 서남해안이 풍력에너지가 풍부한 것으로 조사되고 있다.^{[2][3]}

Table 1 지역별 풍력자원 특성

구분 지역	평균풍 속 (m/s)	Weibull		풍력에너지 밀도 (kWh/ m ²)
		C (m/s)	K	
울릉도	4.18	4.592	1.304	1311.7
울진	3.91	4.227	1.288	1099.1
목포	3.77	4.167	1.487	773.3
여수	3.82	4.233	1.511	787.3
전남 여천군 하화도	4.28	4.718	1.453	1171.9
북제주군 구좌읍 하도리	4.65	5.225	1.754	1191.6
북제주군 한림읍 월령리	5.50	5.654	1.695	1150.5

그림 1)은 1996년 일년 동안 진도, 완도 및 해남 지역의 일일 평균 풍속 데이터를 기초로 하여 단위 수직면 당 풍력 에너지를 $E = 1/2 \rho A v^3$ 식에 의하여 컴퓨터로 계산한 뒤 월별로 합산하였다. 월별 평균 풍속의 경우 계절적인 변화가 뚜렷하게 나타나며 풍력에너지 밀도는 겨울철이 높게 나타난다.^[4]

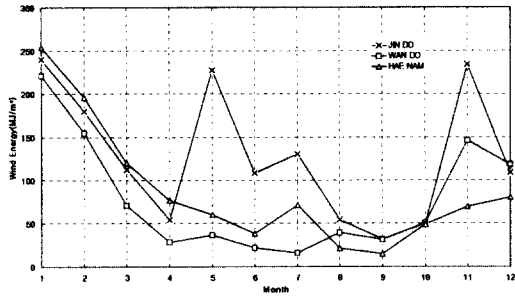


Fig. 1 Wind energy through the vertical area.

풍력발전기에 의한 전력 생산량은 풍속의 변화와 풍력 발전기의 특성에 따라 변화가 크게 나타난다. 표 2)는 여러 가지 풍력 발전기의 특성을 나타낸 것이다. 식 (1), (2), (3)을 바탕으로 풍력 발전기 모델에 따른 제주 구좌, 제주 월령, 목포, 군산, 여천 하와도 등의 출력을 표 3)에 나타내었다. 제주도 구좌 지역의 풍력 발전량이 가장 높았으며 600kW급 풍력발전기를 사용할 경우 735.495MWh/year 정도였다. 전라도 서남 해안의 경우 350~550MWh/year 정도로 계산되었다.

Table 2 풍력발전기의 특성

정격출력 (kW)	100	250	600	1,000
모 델	Nordex N27/150kW	Nordex N29/250kW	VESTAS -V42	SEAS 1000kW
형 식	3-blades upwind	3-blades upwind	3-bladed upwind	3-blades upwinds
시동풍속 (m/s)	3~4	3~4	4.0	4.0
중단풍속 (m/s)	25	25	25	25
정격풍속 (m/s)	13	13	13	13
회전자 직경(m)	27	29.7	44	50
회전자 면적(m^2)	572	693	1385	1963
허브 높이(m)	37	37	45	55

Table 3 지역별 연간 풍력 발전기의 예상 출력 (단위 : MWh/year)

풍력발전기 모델	풍력발전기 출력(kW)	제주 월령	제주 구좌	목포	여수	여천 하와도
Nordex N29/250kW	250	233.384	306.457	146.072	149.192	222.016
VESTAS-V42	600	560.122	735.498	350.573	358.06	532.81
SEAS 1000kW	1000	953.537	1225.83	584.289	596.769	888.017

2.2 태양광 발전

태양은 3.8×10^{23} kW의 에너지를 방출하며 이중 지구에 도달하는 태양에너지는 1.7×10^{14} kW정도이다. 지구에 입사된 태양에너지의 30%는 우주 공간에 반사되고, 47%는 지표나 대기중으로 흡수되며, 23%는 지표면의 물을 증발시키거나 식물의 광합성에 사용된다. 지표면에 도달하는 에너지량은 맑은 날 지상 $1 m^2$ 의 면적에 약 1kW이고 $1 cm^2$ 당은 100mW이다.

태양에너지는 열전달 매개체가 없는 복사의 형태로 전달되며 지표면에 도달되는 형태에 따라 직달 일사량과 산란일사량으로 구분한다. 직달 일사량은 태양의 복사에너지가 대기권에서 산란, 굴절, 편광되지 않고 지표면에 도달되는 방향성을 갖는 성분이고 산란 일사량은 지구의 대기권에서 수분, 공기입자, 공해물질에 의해서 산란된 방향성이 없는 성분이다.

실제 태양 에너지를 이용하는 태양전지나 태양열 집열관의 경우에는 수평면 일사량보다 경사면 일사량을 이용하게 된다. 경사면 일사량은 경사면 직달일사량, 산란일사량, 지면 반사 성분의 합으로 구한다.

국내 지역별 수평면 일사량은 부산, 목포, 광주, 진주 등 남해안 지방의 일사량이 높고, 서울, 대구, 포항 등은 일사량이 낮다. 여름철의 태양에너지 밀도가 높고 겨울철 태양에너지 밀도가 낮다. 그림 2는 광주와 목포의 1996년 일년 동안 수평면 일사량을 나타낸 것이다. 6월에 일사량이 감소되었는데 흐린 날씨가 많은 것을 알 수 있다.^[4] 태양 고도의 변화에 따라 가장 높은 태양에너지 밀도를 갖는 경사각이 다르게 나타난다. 목포의 경우 년 평균 일사량은 경사각이 25

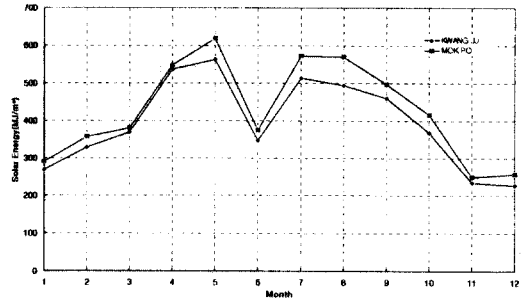


Fig. 2 Incident solar energy at horizontal surface.

도일 때 $14.89 MJ/m^2 \cdot day$ 가장 높고, 10도 일 때는 $14.65 MJ/m^2 \cdot day$, 90도일 때는 $9.587 MJ/m^2 \cdot day$ 로 낮다. 고정식으로 태양전지를 사용한다면 25도 정도의 경사각으로 태양전지를 설치하는 것이 가장 많은 양의 전력을 생산할 수 있다.^[5]

3. 전기분해장치를 이용한 수소 생산

시내버스 3대와 택시 10대를 운행한다는 조건하에 필요한 연간 수소량을 표 3)에 나타내었다. 시내버스는 Ballard New Flyer, 택시는 Daimler-Benz Nocar II를 기준으로 한 것이다. Ballard New Flyer 버스는 수소 66kg으로 402km, Daimler-Benz Nocar II는 수소 4.6kg으로 250km를 운행할 수 있다는 기준으로 한 것이다. 버스 3대와 택시 10대가 하루 300km를 운행할 경우 수소량은 연간 73,062kg이 필요하고, 하루 600km를 운행할 경우 수소량은 146,124kg이 필요하다.^{[6][7]}

표 4)는 연료전지 버스 3대와 택시 10대

Table 4 연간 필요 수소량

Vehicle	Number of Vehicle	Expected Range per Day (km)	Required Hydrogen per Year (kg)	Reference Vehicle
Bus	3	300	53,933	Ballard
		400	71,910	
		500	89,888	Phase 2 New Flyer
		600	107,866	
Taxi	10	300	20,148	Daimler-Benz
		400	26,864	
		500	33,580	Necar II
		600	40,296	

운행하는 경우를 모델로 하여 자동차의 하루 주행거리에 따른 필요 전력량과 필요 전력량을 생산해 낼 수 있는 단위 시스템의 규모를 나타낸 것이다. 수소의 전기 분해 효율은 75%로 하였으며 수소의 액화시 30%의 전력이 더 소모되는 것으로 가정하여 계산하였다. 태양전지의 효율은 10%로 가정하였다.

표 5)는 연료전지 자동차의 운행거리에 따른 필요 전력량 및 풍력발전기 수와 태양전지 면적을 계산한 것이다. 표 3을 참고로 하여 600kW급 풍력 발전기는 500MWh/m², 1000kW급 풍력발전기는

Table 5 연료전지 자동차 운행거리에 따른 필요 풍력발전기 수 및 태양광 발전 면적

1일 주행거리 (km/day)	필요 수소량 (kg/year)	필요 전력 (MWh/year)	소요 풍력발전기 수		태양광 발전 면적 (m ²)
			1000 kW 급	600 kW급	
300	74,080	5,565	7	12	38,385
400	98,774	7,421	9	15	51,180
500	123,468	9,276	11	19	63,975
600	148,162	11,132	13	23	76,770

900MWh/m² 전력 생산량을 기준으로 계산하였다. 태양전지의 경우는 일사량이 부산이 1485kWh/m²·year, 목포가 1424kWh/m²·year 인 것을 고려하여 1450kWh/m²·year으로 하여 계산하였다.

하루 주행거리가 400km 일 때 600kW급 풍력 발전기를 사용할 경우 15기, 1000kW급을 사용할 경우 9기가 필요하다. 태양전지의 경우 연료전지 자동차의 하루 주행거리가 300km일 때 38,385m², 주행거리가400km 일 때는 51,180m²의 면적이 필요하다.

4. 경제성 분석

연료전지 자동차가 하루 400km를 주행할 경우 7,421MWh/year의 전력이 필요하다. 연료전지 자동차의 필요 수소량은 다소 차이가 날 수 있고 풍력, 태양광 발전 시스템에 의한 전력 생산량도 기후 조건이나 발전 시스템의 성능에 따라 다소 차이가 날 수 있으므로 필요 전력량을 8,100MWh/year로 하여 연료전지 자동차의 운행에 따른 풍력 발전과 태양광 발전의 경제성을 분석하였다.

대형풍력 발전기를 사용하는 경우 전력 생산 단가는 낮아진다. 풍력 발전기는 1MW급을 준으로 하였다. 1MW 풍력발전기로 연료전지 자동차를 운행하기 위해서는 9기의 풍력 발전기가 필요하다. 풍력 발전기 1기당 가격은 Lower case의 경우 10억원, Middle case의 경우 15억원, Higher case의 경우 20억원으로 하였다. 풍력 발전의 건설비용은 1MW급 1기당의 설치비용은 15억원으로 하면 전체 풍력 단지의 건설비용은 135억원 정도의 비용이 소요될 것이다.

Table 6 수소 및 전력 생산 비용

	풍력		태양 전지	
	전력생산 비용 (원/kWh)	수소생산 비용 (원/kg)	전력생산 비용 (원/kWh)	수소생산 비용 (원/kg)
Lower case	130.5	11,423	318.2	25,679
Middle case	195.75	16,325	689.6	53,578
Higher case	261	21,228	1060.9	81,477

태양광 발전으로 연료전지 자동차의 운행에 필요한 수소를 생산하기 위한 필요 면적은 55,862m²이다. 태양전지의 가격은 Lower case의 경우 300\$/m², Middle case의 경우 650\$/m², Higher case의 경우 1000\$/m²으로 하였다. 현재 120W급 태양전지 module의 경우 600\$/m² 정도이다. 제어 장치 및 기타 시스템 건설비용 등을 포함하면 1000\$/m² 기준으로 계산하면 전체 건설비용은 670억원 정도가 소요될 것이다.

상업적인 단위 규모의 전기분해 장치 비용은 200Nm³/hour 규모의 경우 현재 12억 원 정도로 보고 있다. 이 논문에서도 전기분해 장치의 비용은 이를 기준으로 하였다. 풍력, 태양광 발전 시스템의 수명은 20년으로 하였으며, 이자 비용 5%, 관리 유지비 5%를 기준으로 하였다.^[8]

전기의 생산비용은 Middle case를 기준으로 풍력의 경우 195.75원/kWh이고 태양광의 경우 689.6원/kWh이다. 수소의 생산비용은 풍력의 경우 16,325원/kg, 태양광의 경우 53,578원/kg이다. 고위 발열량을 기준으로 가솔린과 비교하면 가솔린 1ℓ에 해당하는 수소의 생산비용은 Middle case를 기준으로 풍력의 경우 3,978원, 태양전지의 경

우 13,057원 정도 이고 Lower case를 기준으로 하면 풍력의 경우 2,784원, 태양전지의 경우 6,257원 이다.

풍력발전기를 대형화하고 대규모 단지를 건설한다면 풍력 발전의 단가는 하락할 것이다. 또한 전기분해 장치의 효율 향상과 가격이 하락하면 수소의 생산 단가는 더 하락할 것이다.

5. 결론

풍력 및 태양에너지 밀도는 제주도와 한반도 서남해안 일대가 풍부한 것으로 조사되고 있다. 이런 지역에서 수소를 생산하고 대도시에서 연료전지 자동차를 시범적으로 운행하는 경우 필요 전기량, 필요 수소량을 계산하였다. 또한 전력의 생산비용 및 수소의 생산비용에 대한 경제성 분석을 하였다.

현재 시점에서 풍력 및 태양전지에 의한 전력 생산의 단가는 높은 편이다. 수소의 생산 비용도 풍력의 경우 가솔린에 비해 2-5배정도 높은 편이다. 그러나 풍력 발전의 대형화와 기술의 발달, 대규모 단지의 건설로 그 비용은 줄일 수 있다.

풍력 및 태양전지 발전에 의해 수소를 생산하여 연료전지 자동차를 운행하면 완전한 무공해이고, 에너지 고갈의 문제가 없으며, 해외에서 수입하는 석유의존도를 줄일 수 있다. 에너지 파동의 충격을 줄이기 위한 대비책으로도 수소에너지에 대한 투자와 연구는 지속적으로 수행되어야 한다. 연료로서 수소의 가격이 가솔린보다 2-5배 이지만 연료전지의 효율이 기존의 내연기관보다 2배 이상 높으므로 미래 연료전지 자동차의 운행가능성은 높다.

후기

본 연구는 2000년 Brain Korea 21 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 태양에너지 핸드북, 한국태양에너지학회
2. 풍력발전 유망지역 및 풍력자원 정밀조사, 한국에너지기술연구소, 1997
3. 풍력발전단지 건설 및 타당성 분석 연구, 한국에너지기술연구소, 1998
4. 수소에너지 생산, 수송 및 이용에 대한 통합 시스템 해석, 수소에너지 제9권 1호, 1998
5. Solar Cells and Their Applications
6. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Vol. XI, No.6(1996)
7. Ballard, G.E.H., "Engine of change", Hydrogen energy progress XI, pp. 1357-1371(1996)
8. D. L. Block, Comparative cost of hydrogen production from photovoltaic electrolysis and from photoelectrochemical processes. Proceeding of the 12th World Hydrogen Energy Conference, Buenos Aires, Argentina, p185-194, 1998