

액체수소의 Exergy를 이용한 연료전지 시스템의 성능향상

박동필, 정귀성, 오병수
전남대학교 기계공학과

The Performance Improvement of Fuel Cell System by using LH₂ Exergy

Dong Pil Park, Kwi Seong Jeong, Byeong Soo Oh
Dept. of Mechanical Eng. Chonnam National Univ.

Abstract

From wood to coal and petroleum, mankind has used various fuel. Since using such fuel, mankind has developed power source of mechanism. We obtain numerous power from caloric force. Present energy supply is based on the fossil fuel. Fossil fuel has high energy density and is convenient for transportation and storage. Human being prepared countermeasure of energy economy, high energy efficiency and substitution energy for limits of fossil fuel. High energy efficiency among them is very important. This research will improve total output by physical exergy recovery of LH₂-fuel cell system.

1. 서론

화석연료의 고갈과 대기오염의 문제성을 극복하기 위한 여러 방법이 대두되고 있는데, 수소 연료는 현재의 화석 연료를 대체할 에너지원으로서의 가능성이 크다. 미래의 대체 에너지원으로서 수소를 이용하는 자동차 및 각종 동력 시스템이 미국, 일본, 독일 등 선진국 중심으로 활발히 진행 중이다. 특히 연료전지 시스템은 수소연료의 이용 측면에 있어서 많은 장점을 가지고 있기 때문에 빠른 진전을 이루고 있다.

수소연료의 동력 시스템 이용에 있어서 가솔린 또는 그 외의 화석연료에 비해 에너지 밀도가 낮은 점이 현재 해결하여야 할 큰 과제중 하나이다. 현재 개발중인 수소의 저장 방법에는 금속수소화물, 고압기체수소, 액체수소로 분류할 수 있으며 그 외에 탄소 나노튜브는 최근에 대두되고 있는 새로운 저장 방법으로 볼 수 있다. 액체 수소는 -253°C 라는 극저온의 상태를 유지하기 위한 단열 기술이 필요하지만 다른 방법에 비해 단위 부피당, 단위 무게당 에너지 저장량이 많아 차량에서 항공기 분야에 이르기까지 광범위한 사용을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 표 1은 가솔린과 수소의 단위 GJ 당 부피, 중량을 나타낸 것이다.^[1]

상온 기체상태의 수소를 극저온의 액체 수소로 바꾸기 위해서는 많은 양의 일이 필요하다. 이러한 점도 액체수소를 동력원으로 사용하기 위해 극복하여야 할 과제의 하나이다. 그와 반대로 액체수소가 상온의 온도로 기화되어 작동유체로 활용될 때의 팽창에너지는 일로 획득할 수 있다. 본 연구에서는

액체수소의 exergy를 분석해 보고 회수 가능한 physical exergy가 연료전지 시스템에 있어서 얼마의 출력 향상을 이루는가를 분석해 보고자 한다.

Table 1. Hydrogen storage

Fuel		Volume (m ³ /GJ)	Weight (kg/GJ)
Gasoline		0.026	30.7
Liquid Hydrogen		0.124	12.3
Compressed Hydrogen (136atm)		0.407	640.8
Metal Hydri de	FeTi Hydride	0.161	540.3
	Mg ₂ Ni Hydride		

2. 액체 수소의 Exergy

Exergy라는 개념은 1956년 Rent에 의해 도입된 것이며 유효 에너지 또는 availability라고도 한다. 이것은 계의 상태가 주위의 상태까지 변화하는 동안에 이루어지는 최대의 일량을 의미하는 것이며 다음 식으로 표시한다.

$$E = H - T_0 \cdot S$$

$$\Delta E = (H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (1)$$

그림 1은 압력 및 온도에 따른 수소의 physical exergy를 나타낸 것이다. 대기압에서 -253°C 액체수소의 physical exergy는

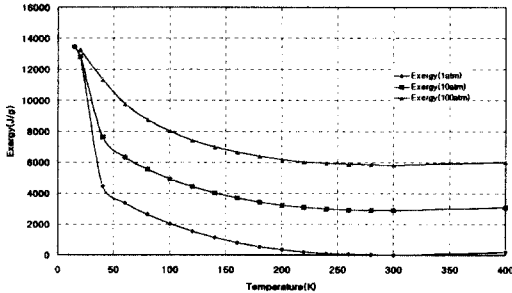


Fig. 1. Exergy of hydrogen

12,491.7kJ/kg으로 이는 수소의 저위발열량 (120MJ/kg)을 기준으로 하는 chemical exergy의 10%에 해당한다. 이를 동력 시스템에서 효과적으로 얻을 수 있다면 physical exergy를 연료전지 시스템의 출력 향상에 크게 기여할 것이다.^{[2][3]}

3. 시스템의 구성

그림 2는 연료전지 시스템에 액체 수소의 exergy를 이용하는 구성도이다. 저온 액체 수소를 pump를 사용하여 고압으로 올리고 열교환기를 통하여 증발-팽창시킨다. 이 고압 수소의 exergy를 turbine 일로 변환시킨 다음 연료전지 시스템에 공급한다. 열교환기는 연료전지의 냉각수를 이용하여 수소와 열교환을 한다.

액체수소 turbine 시스템의 경우 고온의 열원과 저온의 열원이 고정되어 있는 Rankine cycle로 이상적인 모델을 설정할 수 있다.^[4]

4. 시스템 모델

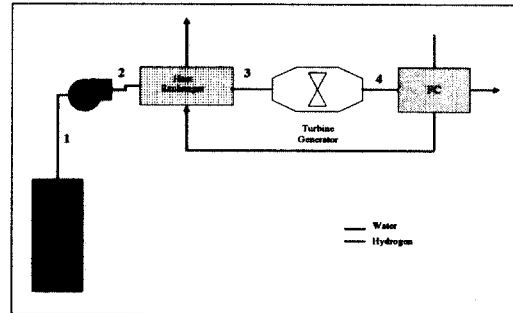


Fig. 2. Fuel cell system using physical exergy of LH₂

연료전지와 turbine 모델을 설정하여 연료전지 시스템에서 저온 액체수소의 exergy를 이용한 터빈 시스템이 전체 시스템의 성능 향상에 미치는 영향을 알아보았다. 공기의 압축일 등 보조적인 동력 소모는 생략하였다.

4.1 Turbine 시스템

단열과정의 펌프의 일은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_P = \frac{v(P_1 - P_2)}{\eta_P} \quad (2)$$

여기서 $v=12.82 \text{ cm}^3/\text{g}=12.82 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{g}$.

Turbine의 단열과정 출력은 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} w_T &= \eta_T \cdot (h_3 - h_4) = \eta_T \cdot c_p (T_3 - T_4) \\ &= \eta_T \cdot c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 γ 는 수소의 비열비이며 1.405이다.

Turbine system의 전체 일은 다음과 같다

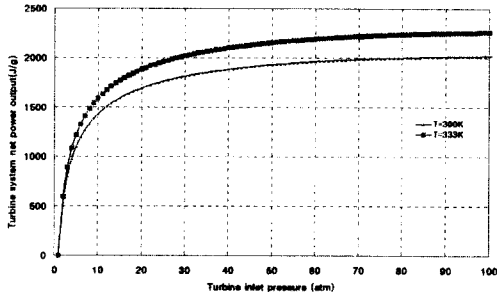


Fig. 3. Relation between turbine system output and turbine pressure

$$w_{T, net} = w_T + w_P \quad (4)$$

여기서 turbine과 pump의 효율은 각각 0.7, 터빈 출구의 압력은 0.1MPa로 하였으며, 터빈 입구와 출구의 수소 속도에 의한 에너지 항은 생략하였다. 펌프 출구의 압력 P_2 와 터빈 입구의 압력 P_3 는 같다고 가정하였다. 그림 3은 터빈 입구의 온도가 300K, 333K 일 때 터빈 입구의 압력에 따른 터빈의 출력을 나타낸 것이다. 압력비가 100, 터빈 입구 온도가 333K일 때 터빈의 출력은 2260J/g 이었다. 터빈의 출력은 입구의 온도 높을수록 증가한다. 그러므로 열교환기를 효율적으로 설계하고 연료전지의 냉각수를 효율적으로 이용하면 터빈 출력을 향상시킬 수 있다. 터빈의 출력은 압력비의 증가에 따라 처음에는 급격히 증가하다 증가규모는 점차 줄어든다.

4.2 Fuel cell

Table 2. Electrode-kinetic and mass-transfer parameters for the PEMFC cell

E_0 (V)	b mV/dec^{-1}	R Ωcm^2	m Ωcm^2	n (cm^2/A)	i_d (A/cm^2)
1.02	68.0	0.33	0.18	0.15	0.65

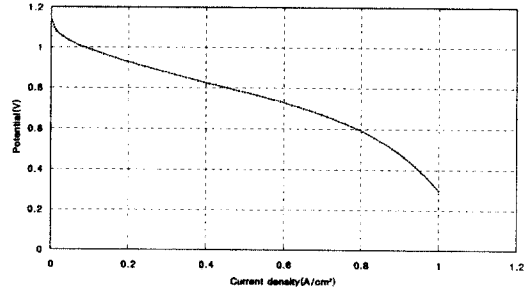


Fig. 4 Potential- current behavior of PEM fuel cell

연료전지의 출력 특성은 일반적으로 전압-전류 곡선으로 나타낸다. 아래의 식은 연료전지의 전압-전류관계를 나타내는데 사용되는 식이다. 상수들은 보통 연료전지 실험을 통해서 값을 구하게 된다. 연료전지의 출력 특성 온도, 압력, 습도 등의 작동 조건과, 연료전지 자체의 특성에 의해 큰 차이를 보인다. 표 2는 이 식에 사용되는 상수를 나타낸 것이다. 참고문헌의 자료와 최근의 연료전지의 성능곡선을 참고로 하였다. 그림 4는 이 실험식을 사용하여 연료전지의 특성을 나타낸 것이다.^{[5][6]}

$$E_i = E_0 - b \cdot \log(1000i) - Ri$$

$$- i_m \cdot m \cdot \exp(ni_m)$$

$$i_m = i - i_d \quad (\text{where } i > i_d)$$

$$i_m = 0 \quad (\text{where } i \leq i_d) \quad (5)$$

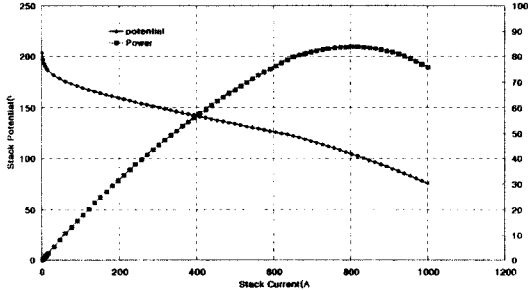


Fig. 5 PEM fuel cell stack performance curve.

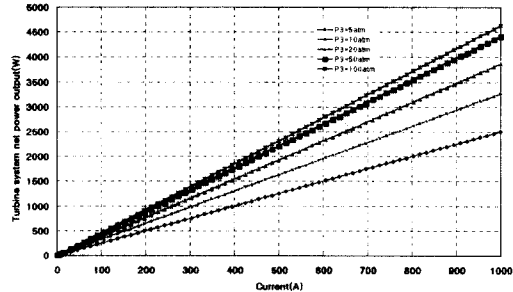


Fig. 6 Relation between turbine system net power output and fuel cell stack current. ($T_2 = 333K$)

5. 시스템 출력 특성

일반적인 승용차의 출력은 50-100kW 정도이다. 이 논문에서는 연료전지의 전극 면적을 1000cm^2 , 셀의 수를 200개로 가정하였으며, 단위전지의 성능이 stack에서 변화가 없다고 가정하였다. 연료전지 stack의 성능 곡선을 그림 5에 나타내었다. 연료전지의 전압은

전류가 증가함에 따라 감소한다. 연료전지의 출력은 전류의 증가와 함께 증가하다 최대 출력 이후 감소한다. 최대 출력은 105V, 803 A에서 84kW 정도이다.

연료전지에 공급하는 수소량은 다음과 같으며 전류량과는 비례한다.^[7]

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{1C/\text{sec}}{1A} \cdot \frac{1 \text{ equivalence of } e^-}{96,478C} \cdot \frac{1 \text{ gmol } H_2}{2 \text{equiv. of } e^-} \cdot \frac{2g}{1 \text{ gmol } H_2} = 10.26 \times 10^{-6} g/(\text{sec} \cdot A)$$

시스템 전체의 출력은 연료전지의 출력과 가스 터빈 시스템 출력의 합이 된다. 다음식은 시스템 전체의 출력과 전류와의 관

계를 나타낸 것이다.

$$W_{\text{sys}} = W_T + W_P + W_{fc} =$$

$$\dot{m} \cdot \eta_T \cdot c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right] + \dot{m} \cdot \frac{v(P_1 - P_2)}{\eta_P} + E_{\text{stack}} \cdot I$$

$$= 10.26 \times 10^{-6} \cdot n \cdot I \cdot (\eta_T \cdot c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right] + \frac{v(P_1 - P_2)}{\eta_P}) + E_{\text{stack}} \cdot I \quad (6)$$

여기서 n 은 연료전지 셀의 수, I 는 연료전지 스택 전류, E_{stack} 은 연료전지 스택의 전압이다.

그림 6은 Turbine 입구의 압력에 따른 stack의 전류와 Turbine의 출력과의 관계를

나타낸 것이다. Turbine의 출력은 연료전지의 전류에 비례하여 증가하며, 압력비의 증가에 따라 증가한다.

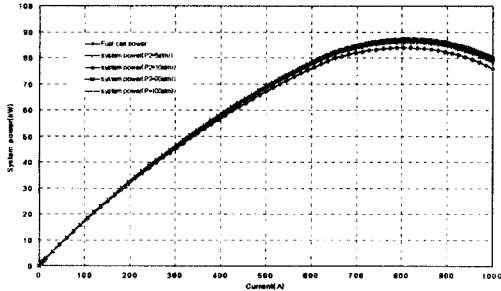


Fig. 7 Relation between system net power output and fuel cell stack current. ($T_2 = 333\text{K}$)

그림 7은 연료전지와 터빈을 포함 전체 시스템의 출력을 나타낸 것이다. 전류의 증가에 따른 연료전지의 특성과 가스터빈의 특성으로 인해 고출력 부분에서 연료전지 시스템의 출력을 보완하는 gas turbine의 출력 비율은 증가한다.

그림 8은 가스 터빈 압력비의 변화에 따른 최대 출력을 나타낸 것이다. 압력비가 증가함에 따라 최대 출력은 증가한다.

연료전지 시스템에 액체 수소의 exergy를 이용하는 터빈 시스템을 조합함으로써 전체 시스템의 최대 출력을 증가시킬 수 있다. 압력비가 100, 터빈 입구 수소가스의 온도가 60°C 일 때 최대 출력은 87.73kW 로 연료전지만으로 작동하는 시스템보다 4.5%의 출력이 증가하였다. 전체 시스템의 효율은 가스터빈으로 획득하는 에너지만큼 효율은 증가하게 된다.

6. 결론

연료전지 시스템에서 액체수소의 physical

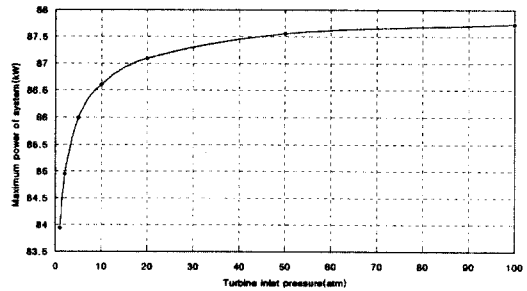


Fig. 8 Relation between system net power output and turbine inlet pressure.

exergy로부터 gas turbine을 이용하여 일을 얻을 수 있다. gas turbine으로 얻을 수 있는 일의 양은 압력비의 증가에 따라 증가한다. gas turbine work는 수소 공급량의 증가에 따라 증가한다. 연료전지 출력은 전류의 증가와 함께 따라 증가하다 감소하며 이때 전압의 감소에 따라 효율은 하락한다.

연료전지와 가스터빈의 특성으로 인해 고출력 부분에서 연료전지의 출력을 보완하는 gas turbine의 출력 비율은 증가한다. 또한 전체적인 시스템의 출력을 증가시킬 수 있어 연료전지의 출력 용량을 작게 할 수 있다. 100kW 연료전지의 경우 gas turbine을 사용하여 4.5% 정도의 출력을 더 얻을 수 있다

연료전지의 출력은 공급 가스의 압력이 증가하면 증가하는 경향이 있다. 출력을 높이기 위해 공기를 가압 하는데 이때 압축기를 사용한다. 공기를 압축하는데 turbo charger를 사용하여 액체 수소의 저온 exergy를 이용할 수 있다. 그러므로서 연료전지 시스템의 전체 효율과 출력을 증대시킬 수 있다.

후기

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

7. 참고 문헌

1. 정진삼, 자동차용 액체수소 저장 용기의 개발에 관한 연구, 석사학위 논문, 전남대학교, 1999.
2. 마현식, 수소연료를 사용한 터빈 시스템의 개발에 관한 기초 연구, 박사학위논문, 전남대학교, 1994.
3. Lide David, R, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1988.
4. C. Knowlen, A. T. Mattick, A. P. Bruckner, A. Hertzberg, High Efficiency Energy Conversion System for Liquid Nitrogen Automobiles, SAE, 1998.
5. D. Chu, R. Jiang, C. Walker, Analysis of PEM fuel cell stacks using an empirical current-voltage equation, Journal of Applied Electrochemistry 30, 2000.
6. Dreyen Chu, Rongzhong Jiang, Comparative studies of polymer membrane fuel cell stack and single cell. Journal of Power Sources 80, 1999.
7. Fuel Cell Handbook Fifth Edition, 2000.