

수소와 산소를 이용한 가스터빈의 구동에 관한 실험 연구

강진성 · 오병수

전남대학교 기계공학과

An Experimental Study about the Running of a Gas Turbine by using Hydrogen and Oxygen

J. S. Kang · B. S. Oh

Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University

Abstract

Because of environmental pollution and reserve limitations of fossil fuels, several alternative energies have been developing. One of them, the hydrogen is researched as a highly probable solution.

In this study pure hydrogen gas and oxygen gas are burned in combustor to reduce the emission, and a gas turbine is used. Cooling water around the combustor recovers the cooling heat loss to useful work by being expanded from liquid to vapor, being injected into the combustor and making pressure rise with working fluid to get more turbine power. Because pure hydrogen and oxygen are used, there is no carbonic emission such as CO, CO₂, HC nor NO_x and SO_x. The power is obtained by turbine system, which makes lower noise and vibration than any reciprocating engine.

Running of a turbine is searched under various conditions of hydrogen flow rate and water injection rate. Maximum speed of the turbine is obtained when the combustion

reaches steady state. It is enable to determine the optimum rate between hydrogen flow and water injection which makes turbine run maximum speed.

1. 서론

화석 연료는 연소 과정에서 공해 유발 물질인 SO_x나 NO_x를 발생할 뿐 아니라 CO, CO₂ 등이 항상 생성된다. 이러한 물질들은 인체에 유해할 뿐만 아니라 대기오염, 지구 온난화 등 생태계에도 나쁜 영향을 미친다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 각종 대체 에너지들이 연구, 실험 중에 있다. 화석 연료 대신 태양의 복사열, 지열, 생물자원(biomass), 풍력, 수력, 바다의 조수차 등을 이용하여 에너지를 확보하고 유용한 에너지로 변환하고 있는데, 수소 또한 유망하게 각광 받고 있는 대체 연료 중의 하나이다. 수소는 2차적 에너지이지만 고효율과 에너지 매개체로 직접 사용이 가능하여 미래의 유용한 대체 에너지로 부상되고 있다.

대기오염의 주범은 화석 연료인 가솔린과 중유를 사용하는 자동차이다. 수소를 연료로 하여 연소할 경우 연료 중에 탄소 성분이 없기 때문에 이산화탄소, 일산화탄소, 탄화수소 등 탄소 함유 공해 물질의 배기는 없어진다. 수소를 연료로 사용해도 연소 매질로 공기를 사용하면 공기 중의 질소 성분 때문에 기존의 화석 연료를 사용하는 것보다 질소 산화물(NO_x)의 발생을 줄일 수 있지만 완전 무공해의 이상적인 시스템은 아니다. 본 연구에서는 연소 매질로 산소만을 사용하여 공해 성분을 원천적으로 방지하고, 기존의 내연 기관 대신 수소 연료를 연속적으로 연소시키는 가스터빈 시스템을 구성하였다. 본 연구의 목적은 순수 수소와 산소를 연소기에서 연소하고 가스터빈을 구성하여 수소 가스 터빈의 운전 가능성을 평가해 보는 것이 그 목적이다.

2. 시스템 구성 및 해석

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치이다. 연료로 수소 가스를 그리고 연소 매질로는 산소 가스를 사용하여 연소기에서 연소하고 가스터빈을 통하여 동력을 얻는 시스템이다. 통상의 가스터빈은 작동 유체나 연소기의 냉각을 위해 공기를 사용하나 본 연구에서는 물분사 방식을 택했다. 즉 연소기에 연료인 수소와 연소 매질인 산소가 충전되어 연소를 할 때 이 연소실안으로 미세한 물방울이 주입된다. 플러그에서 점화된 화염은 주입된 물에 열을 가하여 증기가 되게 하고 물이 증기가 되면서 급격히 부피 팽창을 하게 되면 연소기라는 제한된 부피 때문에 압력 증가의 요인이 된다. 이 압력으로 가스터빈의 동익에 회전력을 주게 된다. 연소기 입구, 가스터빈 입구, 가스터빈 출구의 상태를 측정하였다. 계산의 편의를 위해서 연소기에서 정상유동, 정상상태로 완전 연소되고 미연 가스는 과잉 공급된 산소 가스만 존재한다고 가정한다. 가스터빈 입구(첨자 2)와 출구(첨자 3) 사이의 에너지 평형을 고려해 보면

$$(\dot{m}_{H_2O} h_{H_2O})_2 + (\dot{m}_{O_2} h_{O_2})_2 = (\dot{m}_{H_2O} h_{H_2O})_3 + (\dot{m}_{O_2} h_{O_2})_3 + W_3$$

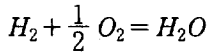
이 된다. 그런데 터빈 입구와 출구에서 질량 유동은 변화가 없으므로 터빈 일(W₃)은

$$W_3 = (\dot{m}_{H_2O})_2 [(h_{H_2O})_2 - (h_{H_2O})_3] + (\dot{m}_{O_2})_2 [(h_{O_2})_2 - (h_{O_2})_3]$$

이 된다. 터빈 입구에서의 유량

$$\begin{aligned}
 & (\dot{m}_{H_2O})_2 + (\dot{m}_{O_2})_2 \\
 & = (\dot{m}_{H_2})_1 + (\dot{m}_{O_2})_1 + (\dot{m}_w)_1
 \end{aligned}$$

이다. 여기에서 첨자1은 연소기 입구를 나타낸다. 수소의 연소식이



이므로 연소기 입구에서 수소의 공급량과 산소의 공급량 그리고 물 분사량이 결정되면 가스터빈 입구에서의 질량 유량이 계산된다. 터빈의 효율이

η_T 라면 터빈 출력 W_T 는

$$W_T = \eta_T \cdot W_3$$

이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

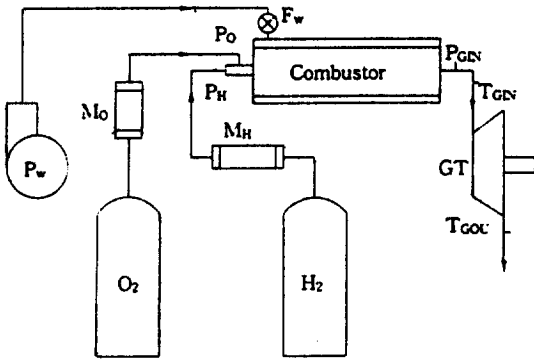
본 실험에서 사용된 연소기는 총 길이 700mm의 내외통 2중 구조를 가진 스테인레스관으로 자체 제작하였다. 내통의 직경은 114.3mm이고 길이가 690mm이다. 외통은 직경이 139.8mm이다. 수소와 산소의 연소는 내통에서 이루어지며 물은 내통과 외통 사이로 분사된다. 내통에는 증기로 변한 물이 유입될 수 있도록 직경 1mm의 구멍을 후방에 20개 설치하였다. 연소기의 전면에는 수소와 산소를 공급하는 노즐과 물을 분사하는 노즐, 점화용 플러그가 설치되어 있다.

산소와 수소 분사 노즐도 자체 제작하였다. 수소는 노즐팁의 중심축에서 분사되고 산소는 노즐팁의 외측에서 수소 주위로 분사된다. 산소는 연소실을 향해 직선적으로 분사되도록 하였고 수소는 방사형으로 분사하여 산소와 충돌하도록 하였다.

가스터빈은 독일 Garrett사의 GT15 모델의 소형 터빈으로 터빈 특성은 Table 1과 같다.

3.2 실험 방법

본 연구에서는 가스터빈을 통하여 기동 출력을 얻기 위해 대기압하에서 수소와 냉각수의 공급 유량을 변화시키면서 무부하로 연소 실험을 수행하여 회전수를 측정하였다. 수소와 산소의 공급 유량이 mass flow meter/ controller에 의해 조정되고 연소기 입구의 수소와 산소의 압력도 측정하였다. 터빈 입구와 출구의 온도 측정을 위해서 K



H ₂	Hydrogen Gas	O ₂	Oxygen Gas
M _H	Mass Flow Controller for H ₂	M ₀	Mass Flow Controller for O ₂
P _H	Pressure Sensor for H ₂	P ₀	Pressure Sensor for O ₂
P _{GIN}	Pressure Sensor at Gas Turbine Inlet	T _{GIN}	Temperature Sensor at Gas Turbine Inlet
T _{GOU}	Temperature Sensor at Gas Turbine Outlet	P _w	Water Pump
F _w	Water Flow Control Valve	GT	Gas Turbine

Fig. 1 Schematic diagram of the system

Table 1. Specification of gas turbine

Model	GT1544	Inlet Press.	0.24MPa
Tip Dia.	41mm	Outlet Press.	0.12Mpa
Inlet Temp.	830℃	Press. Ratio	2.0
Outlet Temp.	630℃	Power	15Kw

형의 열전대를 사용하여 측정하였다. 모든 값들은 A/D converter에 의해 host computer에 수집되고 수소의 양과 산소의 양이 제어되고 비상시에 시스템을 중단시키도록 프로그램을 작성하였다.

실험에서는 먼저 산소를 연소기에 충전 시킨 후 12V의 점화 플러그를 예열한다. 잠시 후 소량의 수소를 연소기에 공급하여 점화한다. 수소와 산소의 양을 조금씩 증가시키면서 물을 분사하여 증기를 발생시킨다. 본 실험에서는 산소의 공급 유량을 1.0g/sec.로 유지하고 산소의 공급 유량을 0.08~0.12g/sec. 사이로 변화시키면서 실험하였다. 연소가 진행되면 터빈이 회전을 하게 되는데 이 때의 회전수를 측정한다. 회전수는 광전식 회전계를 사용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 수소 공급량의 변화에 따른 터빈의 이론 출력을 나타낸 것이다. 이론 해석에 필요한 값들은 실제 실험을 수행하면서 얻은 결과 값을 사용하였다. Fig에서 알 수 있듯이 수소 연료의 공급 유량이 증가함에 따라 터빈 출력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 3는 물 분사량에 따른 출력의 변화를 나타낸 것이다. 이때 수소량은

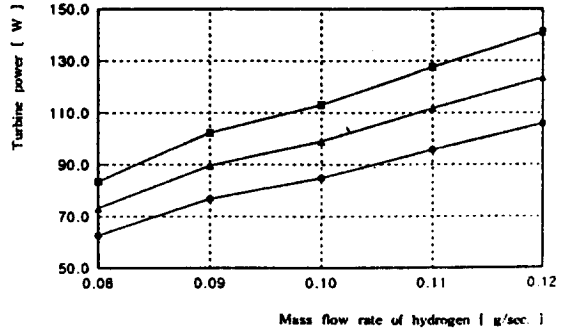


Fig. 2 Effect of hydrogen flow rate on gas turbine power using experimental data [$w = 3.0 \times 10^{-3}$ g/sec. ● : $\eta_T=0.6$, ▲ : $\eta_T=0.7$, ■ : $\eta_T=0.8$]

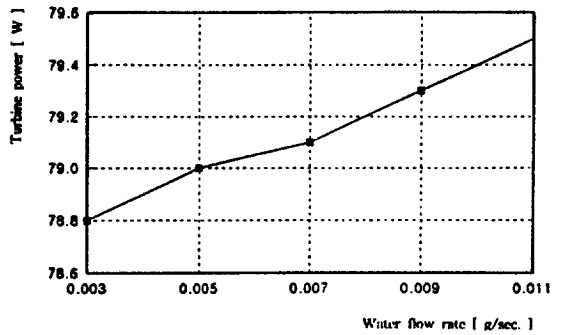


Fig. 3 Effect of water injection rate on gas turbine power using experimental data [$H_2 = 0.1$ g/sec., $T_{IN}=600$ K, $\eta_T=0.7$]

0.1g/sec.으로 유지되고 터빈 입구 온도는 600K, 출구 온도는 550K로 하였다. Fig. 4은 터빈 출구의 온도를 500K로 하고 터빈 입구의 온도를 변화시켰을 때의 터빈 출력을 나타낸 것이다. 수소의 공급량은 0.10g/sec., 물 공급 유량은 7.0×10^{-3} g/sec.이다. 역시 터빈 출력은 물의 공급 유량과 터빈 입구 온도에 비례하여 증가함을 보여준다.

Fig. 5는 실제 실험에서 수소량의 증가에 따른 터빈의 회전수를 나타낸다. 물의 공급량은 7.0×10^{-3} g/sec.로 일정하게 유지하였다. 수소 공급 유

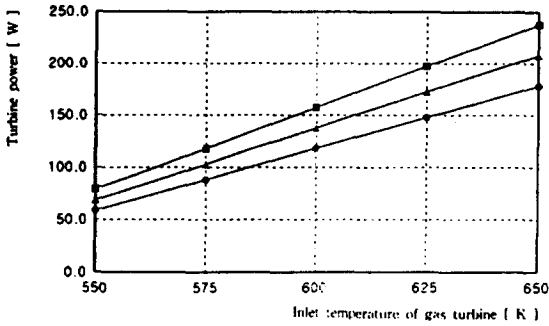


Fig. 4 Effect of turbine inlet temperature on gas turbine power using experimental data [$H_2 = 0.1g/sec.$, $T_{OUT} = 500K$, \bullet : $\eta_T = 0.6$, \blacktriangle : $\eta_T = 0.7$, \blacksquare : $\eta_T = 0.8$]

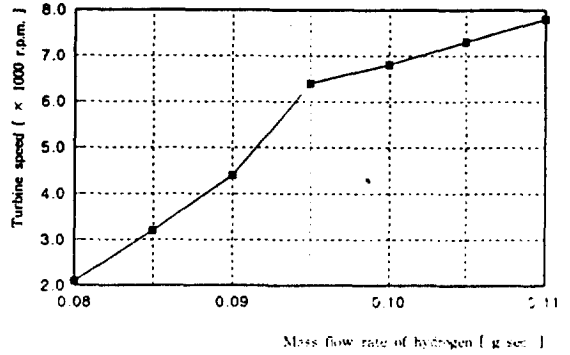


Fig. 6 Relation between hydrogen flow rate and maximum gas turbine speed

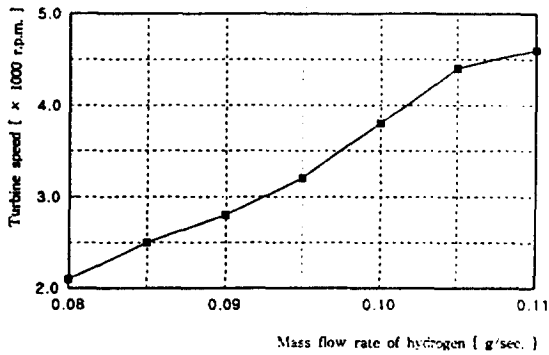


Fig. 5 Relation between hydrogen flow rate and gas turbine speed [$w = 7.0 \times 10^{-3}g/sec.$]

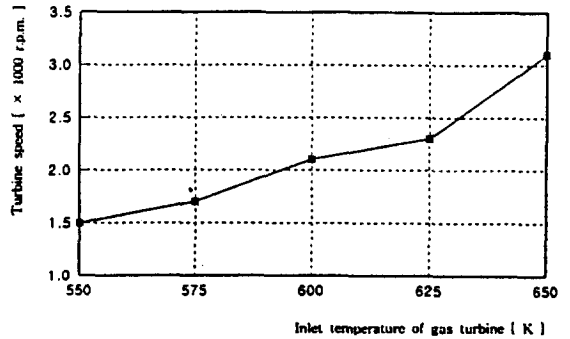


Fig. 7 Relation between turbine inlet temperature and turbine speed [$H_2 = 0.1g/sec.$, $w = 5.0 \times 10^{-3}g/sec.$]

량이 0.1g/sec.씩 증가함에 따라 약 800~1000 r.p.m. 정도의 일정한 증가를 보이고 있다. Fig. 6은 각 수소량에서 얻을 수 있는 최고 회전수를 나타낸 것이다. 수소 공급 유량이 적을 때(0.095 g/sec.까지)는 공급량의 증가에 따른 터빈 회전의 증가가 급격하나 공급량이 많아지면 터빈 회전수의 증가량이 둔화되는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 수소량을 0.1g/sec.로 하고, 물의 공급량도 $5.0 \times 10^{-3}g/sec.$ 로 유지하면서 터빈 입구의 온도에 따른 회전수를 나타낸다. 이 때는 정상 상태에 도달

하지 않았기 때문에 터빈 입구의 온도는 계속 증가한다. 터빈 입구의 온도가 증가하면서 회전수가 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 8은 수소 공급량을 고정하고 공급되는 물의 양을 조절할 때의 회전수를 보여준다. 물의 공급량이 많아지면 회전수가 증가하나 임계점을 넘으면 오히려 회전수가 감소함을 알 수 있다. 이는 물 분사량이 많아지면서 물을 증기로 변환시키기 위해 연소열을 많이 소모하기 때문이라 생각된다. 또한 많은 물이 주입되면 증발된 냉각수의 증기가 화염에 영향을 미

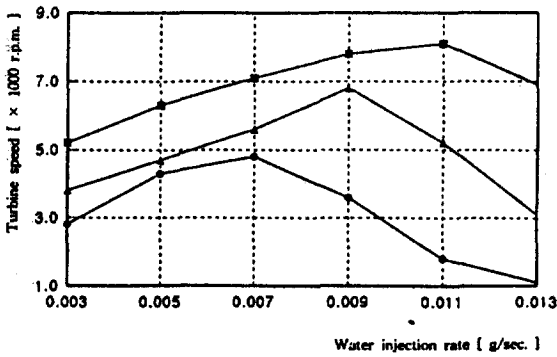


Fig. 8 Relation between water injection rate and gas turbine speed (● : H₂=0.9g/sec., ▲ : H₂=1.0g/sec., ■ : H₂=1.1g/sec.)

치는 맥동 현상이 관찰되었다.

5. 결 론

본 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수소의 공급 유량이 증가할수록, 터빈 입구의 온도가 증가할수록 터빈의 회전수는 증가한다.
2. 터빈 입구의 온도보다는 수소의 공급 유량이 터빈 속도 증가에 더 많은 영향을 미친다.
3. 공급되는 물 분사량이 많을수록 터빈의 회전수는 증가하나 임계점 이상 분사되면 오히려 회전수가 감소한다.
4. 임의의 수소 공급 유량에서 최고의 회전수를 얻을 수 있는 물 분사량을 결정할 수 있다.

이 논문은 1995년도 전남대학교 자동차연구소 공모과제 연구비에 의해 연구되었음.

Reference

1. The German Aerospace Research Establishment(DLR), the Solar and Hydrogen Energy Research Center(ZSW) and the Ministry of Economic Affairs and Technology for the State of Baden-Württemberg, Federal Republic of Germany, 'Solar Hydrogen Energy Carrier for the Future', companion brochure for an exhibition prepared.
2. N. Nemeth, 'Environment and Energy : Problems, Resolutions', Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 7, pp. 457-462, 1990.
3. F. Michel, H. Fieseler, G. Meyer and F. Theißen, 'Onboard equipment for liquid hydrogen vehicles', proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Vol. 2, pp. 1063-1077, 1996.
4. P. Sampath and F. Shum, 'Combustion Performance of Hydrogen in a Small Gas Turbine Combustor', Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 10, No. 12, pp. 829-837, 1985.
5. O. Hirao and R. K. Pefley, 'Present and Future Automotive Fuels-Performance and Exhaust Clarification', John Wiley & Sons, pp. 128-139, 1988.
6. 馬賢凝, '水素 燃料을 사용한 터빈시스템 開發에 關한 基礎 研究', 박사학위논문, 전남대학교, 1994.