

## 물분사 수소 가스터빈의 출력 향상을 위한 연구

정귀성, 오병수

전남대학교 기계공학과  
광주광역시 북구 용봉동 300, 500-757

### A Study for the Output Increament of the Hydrogen Gas Turbine with Water Injection

K. S. Jung, B. S. Oh

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

#### Abstract

Most of today's energy supply is obtained from fossil fuels. Despite of high energy density, higher store efficiency and long mileage, fossil fuels cause environmental pollution and their reserves are limited.

In this study pure hydrogen gas and oxygen gas are burned without the emission of pollution. A gas turbine is used to obtain power. Water is injected into a combustor, which prevents overheating and recovers cooling heat. Excessively supplied water is recirculated. With variation of mass flow rate and equivalence ratio, the affection of water injection rate and the temperature of injected water

on efficiency and power are experimented.

Injected water gets cooling heat, is expanded from liquid to vapor and raises the thermal efficiency. It is enable to determine the rate of water injection, which makes the maximum power. The increase of temperature of water injection raises the efficiency of the system.

## 1. 서론

수소를 간헐 연소기관인 왕복동 내연기관에 사용할 경우 조기착화나 역화 등의 이상 연소를 일으켜 운전의 불안정성을 유발한다. 반면에 가스터빈을 사용하면 조기착화나 역화의 염려가 없으며, 수소의 빠른 화염속도 때문에 연소실의 크기가 작게 되어 기관의 중량을 줄일 수 있다.<sup>[2]</sup> 가스터빈은 속도형 열기관의 일종으로 소형, 경량, 배기청정 및 배열의 유효성등의 특징을 가지고 있으며, 기동성이 양호하고 보수가 간단하여 활발히 연구 발전되어 왔다.<sup>[2][3]</sup>

수소와 공기를 사용하여 연소하는 경우 배기중으로 탄소산화물, 탄화수소는 나오지 않지만 공기중의 질소성분으로 인하여 질소산화물이 발생한다. 그러나 연료로서 수소와 연소매질로서 산소를 사용한다면 배기 공해의 문제는 완전히 해결될 수 있다.<sup>[1][4][5]</sup>

따라서 본 연구에서는 연소매질로 산소만을 사용하여 공해 성분의 생성을 원천적으로 방지하고, 기존의 내연기관 대신 수소연료를 연속적으로 연소시키는 가스터빈 시스템을 구성하였다. 연소기 냉각열을 회수하기 위해 물분사 방식을 채택하였다. 이 시스템 하에서 수소 가스터빈에서 물분사에 따른 효율 및 출력의 특성을 파악하고 운전 가능성을 평가해 보는 것을 목적으로 한다.

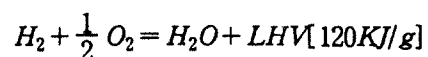
## 2. 시스템의 구성 및 관련식

그림 1은 수소 가스터빈 시스템의 구성도이다. 연료로는 기체 수소를 사용하고, 연소 매질로는 기체 산소를 사용하여 연소시키므로 대기오염물질의 배출을 원천적으로 봉쇄하였다.

동력은 연소기에서 연소에 의한 작동유체의 고온의 엔탈피로 가스터빈을 사용하여 획득하였다. 연소기는 이중용기의 형태로 이루어 있다. 내부에서 수소와 산소 가스의 분사에 의한 연소가 이루어지고, 외부 용기로는 물이 분사된다. 외부용기로 분사된 물은 연소기의 열을 회수하여 증발되어서 내부연소기로 분사된다. 연소기 외부에서 증발되지 않고 과잉 공급된 물은 물탱크로 순환된다.

그림 1의 point 1은 연소기 입구의 상태, point 2는 펌프 입구의 물의 상태, point 3은 펌프출구의 물의 상태, point 4는 연소기에서 순환되는 물의 상태, point 5는 가스터빈 입구의 작동유체의 상태, point 6은 가스터빈 출구의 상태를 나타낸다. 연소기에서는 정상유동, 정상상태로 완전 연소되고 미연의 가스는 과잉 공급된 산소 가스만 존재한다고 가정한다.

반응의 관련식은 다음과 같다.



내부 연소기에 공급된 증기의 분사량은

$$\dot{m}_{st} = (\dot{m}_{H_2O})_3 - (\dot{m}_{H_2O})_4$$

이다. 터빈에 공급된 작동유체의 유량은 수소와 산소 연소의 반응 생성물과 미연의 산소 가스 그리고 증기 분사량의 합이 된다.

$$\begin{aligned} (\dot{m}_{H_2O})_5 &= \dot{m}_{st} + 9(\dot{m}_{H_2})_1 \\ &= (\dot{m}_{H_2O})_3 - (\dot{m}_{H_2O})_4 + 9(\dot{m}_{H_2})_1 \end{aligned}$$

$$(\dot{m}_{O_2})_5 = (\dot{m}_{O_2})_1 - 8(\dot{m}_{H_2})_1 \quad \text{이고,}$$

$$\dot{m}_5 = (\dot{m}_{H_2O})_5 + (\dot{m}_{O_2})_5 \quad \text{이다.}$$

물분사를 위해 사용한 펌프의 일은 가역 단열, 비압축성 유체로 가정하면

$$\begin{aligned} (W_P)_{ideal} &= (\dot{m}_{H_2O})_2 (h_3 - h_2) = (\dot{m}_{H_2O})_2 \int_2^3 dh \\ &= (\dot{m}_{H_2O})_2 \int_2^3 v dp \\ &= (\dot{m}_{H_2O})_2 (P_3 - P_2) \end{aligned} \quad (2-1)$$

이 된다. 펌프의 단열효율을  $\eta_P$  라하면 실제 펌프의 일은

$$W_P = \frac{(W_P)_{ideal}}{\eta_P} \quad (2-2)$$

이다.

가스터빈에 의해 획득되어진 일은 터빈의 단열효율을  $\eta_T$  라 하면

$$W_T = \eta_T [(\dot{m}h_{H_2O} + \dot{m}h_{O_2})_5 - (\dot{m}h_{H_2O} + \dot{m}h_{O_2})_6] \quad (2-3)$$

이다. 가스터빈의 일 중에서 열교환된 증기에 의한 일은

$$W_{st} = \dot{m}_{st} (h_5 - h_6)_{H_2O} \quad (2-4)$$

이며, 열교환된 증기에 의한 일의 비율은

$$SE = \frac{\eta_T W_{st}}{\dot{m}_{H_2} LHV + W_P} \quad (2-5)$$

로 나타낸다.

이 시스템의 효율은

$$\begin{aligned} \eta_{net} &= \frac{W_{net}}{\dot{m}_{H_2} LHV + W_P} \\ &= \frac{W_T - W_P}{\dot{m}_{H_2} LHV + W_P} \end{aligned} \quad (2-6)$$

이 된다.

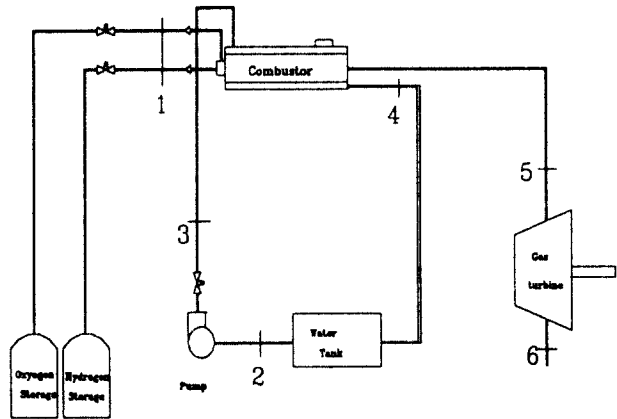


Fig. 1 Schematic diagram of the system

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3-1 실험장치

실험장치는 연료공급장치, 연소기, 가스터빈, 물분사장치, 자료취득 및 분석장치로 구성된다. 연료 공급장치는 고압의 수소, 산소의 용기에서 압력조정기를 통하여 일정한 압력으로 연소기에 공급한다. 역류방지를 위

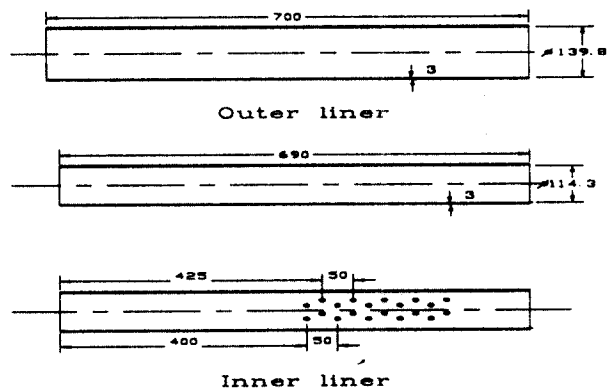


Fig. 2 Outer and inner liners of combustor

하여 Check Valve를 연소기 입구에 설치하였다. 그림 2와 같이 연소기는 이중용기의 구조로 되어 있다. 외부연소기의 길이는 700mm이고 내경은 139.8mm 이다. 내부 연소기의 길이는 690mm 이고 내경은 114.3mm이다. 외부 연소기로는 물이 분사되어 연소기를 냉각시키고 이때의 냉각열로 증기가 되어서 내부 연소기로 분사되게 하였다. 물분사는 배인 펌프를 사용하였으며 과잉 공급된 물은 순환되게 하였다. 수소와 산소는 노즐을 통하여 연소기에서 혼합되어 연소한다. 연료인 수소는 노즐바디의 중앙을 관통하여 노즐팁으로 유입된 후 팁의 말단부에 뚫어 놓은 노즐공을 통하여 연소실로 분사되며, 산소는 노즐 바디의 외측부에서 노즐팁의 외측부에 뚫어 놓은 노즐공을 통하여 연소실로 분사된다. 산소는 연소실을 향해 직선으로 분사되고 수소는 7도의 와류 각도로 분사된다. 내부 연소기의 상단부에는 Glow Plug가 설치되어 있다. 12V의 전원을 연결한 Glow Plug에 의해 점화가 이루어지며 한번 화염이 생성되면 Glow Plug의 전원을 제거하여도 화염은 지속된다.

### 3-2. 실험 방법

본 실험에서는 물분사가 수소와 산소의 연소에 의한 가스터빈의 출력성능에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 수소와 산소의 당량비를 일정히 하고 수소연료의 변화에 따른 물분사량을 변화시키면서 실험을 실시하였다. 또 배열 회수 시스템을 설치하였을 경우를 고려하여 분사되는 물의 온도가 본 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 분사되는 물의 온도를 변화시키면서 실험을 실시하였다.

수소의 공급유량은 0.034, 0.041, 0.055, 0.069 [g/sec]로 공급하였고, 당량비 0.5로

산소를 공급하였다. 물분사량은 처음 0.3[g/sec]을 공급하였으며 0.3[g/sec]씩 증가시키면서 실험을 계속하였다. 물분사 온도가 본 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 물공급의 온도는 23℃에서 80℃까지 연속적으로 변화시켜 실험을 실시하였다. 이때 물분사량은 앞에서 실시한 상온의 물을 분사하는 실험에서 얻은 최적의 물 분사량보다 10%더 많은 상태로 일정한 유량을 분사하였다.

## 4. 결과 및 고찰

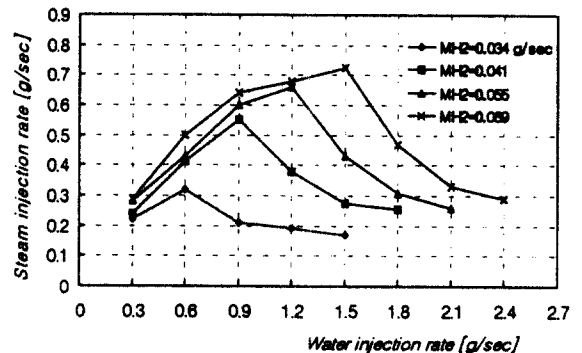


Fig. 3 Relation between water injection rate and steam injection rate

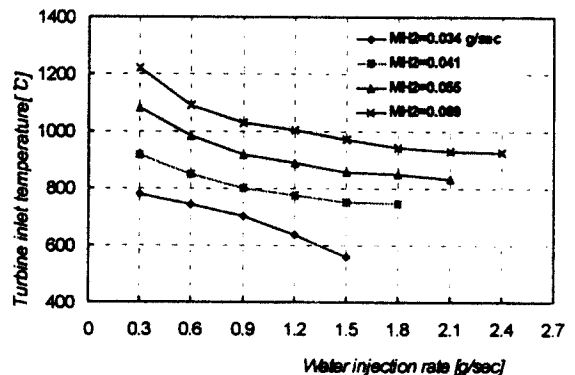


Fig. 4 Relation between water injection rate and turbine inlet temperature

결과의 계산에서 펌프와 터빈의 단열효율  $\eta_P$ 는 0.8,  $\eta_T$ 는 0.8으로 하였다. 그림 3은 물분사량의 변화에 따른 연소기에 공급되는 증기의 분사량을 나타낸다. 처음에는 물분사량의 증가와 함께 물분사량의 대부분이 열교환에 의해 증기로 되어 내부연소기로 공급되어 증기의 분사량은 선형적인 증가를 하고, 다음 단계에서는 분사된 물의 일부만이 증기가 되어 내부연소기로 공급되어 증기의 분사량은 완만한 증가와 감소를 하고 마지막에는 0.2 - 0.3[g/sec]로 일정해진다. 그림 4은 물분사량의 증가에 따른 터빈 입구의 온도를 나타낸다. 터빈 입구의 온도는 처음에는 많은 하락을 하는데 이는

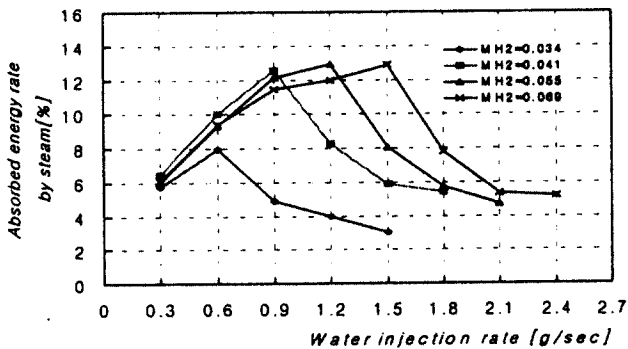


Fig. 5 Relation between water injection rate and absorbed energy rate by steam

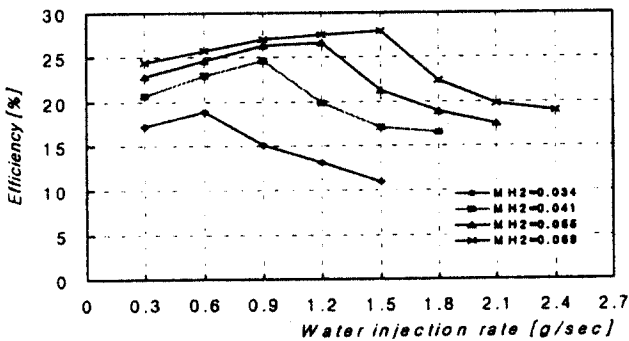


Fig. 6 Effect of water injection rate on efficiency

처음 분사된 증기가 연소가스와 내부연소기에서 혼합되면서 나타나는 현상이다. 물분사량이 증가하면서 증기의 분사량은 감소하고 냉각손실이 증가하여 터빈입구의 온도는 완만한 감소를 한다. 그림 5는 물분사량의 변화에 따른 증기에 흡수된 에너지에 의한 일의 비율을 나타낸다. 증기에 흡수된 에너지에 의한 일의 비율이 처음 터빈입구 온도의 감소에도 증가하는 것은 열교환된 증기 분사량의 증가로 인한 것이며 최고효율점 이후는 연소기 내부로 공급되는 증기량의 감소와 터빈입구 온도의 하락으로 인하여

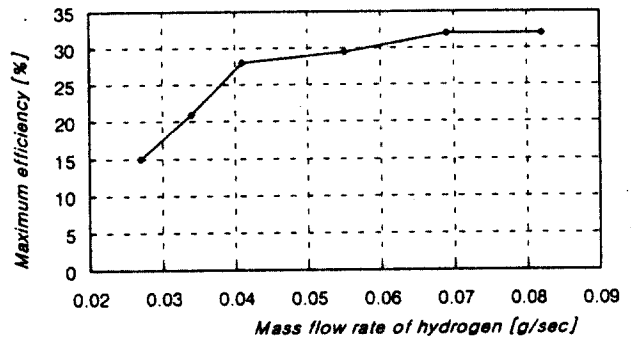


Fig. 7 Relation between mass flow rate of hydrogen and maximum efficiency

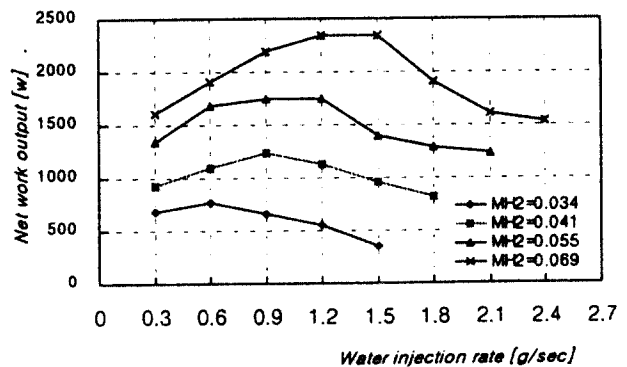


Fig. 8 Relation between water injection rate and net work output

급격히 감소한다. 그림 6는 물분사량의 변화에 따른 효율을 나타낸다. 물분사량이 증가함에 따라 효율은 점차 증가를 하는데 이

는 증기에 흡수된 에너지에 의한 일 비율의 증가에 기인된 것이며 최고효율점을 이루고 증기에 흡수된 에너지율의 감소와 냉각손실의 증가로 인해 급격한 감소를 한다. 그림 7은 각 수소량에서의 최고 효율을 나타낸다. 수소량이 0.041 [g/sec]일 때까지는 급격히 증가하고 그 이후 완만한 증가를 한다. 그림 8은 각 수소량에서의 출력을 그림 9은 무부하 구동시의 회전수[R.P.M]을 나타낸다. 회전수도 물분사량의 증기와 함께 증가하다

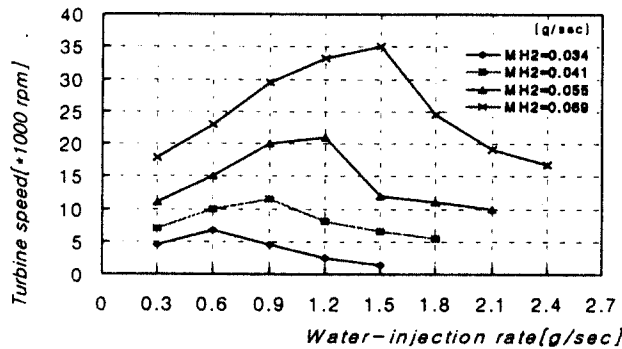


Fig. 9 Relation between water injection rate and turbine speed

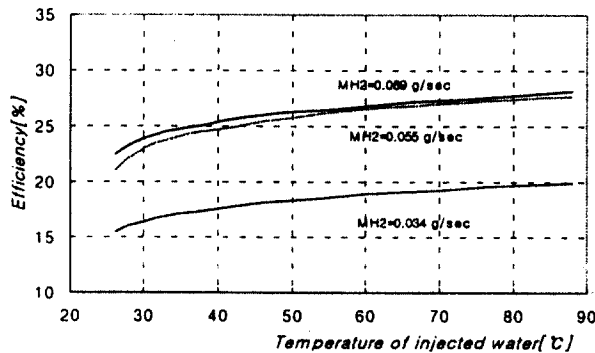


Fig. 10 Influence of temperature of injected water on efficiency

최고 회전수를 나타내고 점차 감소하게 되는 효율의 그래프와 같은 경향을 나타낸다. 수소량이 0.069[g/sec]일 때 최대 출력은 2.2kW였으며 최대의 회전수는 35000 [R.P.M] 이었다.

그림 10는 수소량이 0.034, 0.055, 0.069 [g/sec]일 때의 분사된 물의 온도가 효율에 미치는 영향을 나타내는 그래프이다. 분사된 물의 양은 상온의 물을 분사시켰을 때 최고의 효율점 보다 0.3 [g/sec]이 많은 양을 분사시켰다. 세 경우 모두 처음 15°C 상승시까지 3%정도의 상승을 보이는데 이는 최고 효율점보다 10% 더 많은 양의 물을 분사함으로써 물분사 온도의 상승에 따라 내부 연소기로 공급되는 증기의 분사량이 급격히 증가하여 증기에 흡수된 에너지에 의한 일이 증가하기 때문이다. 분사된 물의 온도가 40°C 이상이 되면 효율은 완만한 상승을 하며 88°C에서는 상온의 물을 공급하는 경우의 최고효율점보다 5%정도 상승하였다.

### 5. 결론

1. 물분사량이 증가함에 따라 효율은 점차 증가를 하고 최고 효율점 이상이 되면 급격히 감소한다. 그러므로 물분사량의 조절이 출력향상의 가장 중요한 요인임을 알 수 있다.
2. 분사되는 물의 온도가 증가할수록 효율과 출력은 증가한다.
3. 물분사는 냉각열 회수에 의한 증기의 팽창으로 터빈에 공급되는 에너지를 증가시켜 효율과 출력은 증가한다.

※ 이 논문은 1996년도 전남대학교 연구년 교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

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. 馬賢湜, '水素 燃料를 사용한 터빈시스템 開發에 關한 基礎 研究' , 박사학위 논문 , 전남대학교, 1994.
  3. 朴柱鎬, '無排氣 水素 가스터빈 製作을 위한 熱力學的 計算' , 석사 학위 논문, 전남대학교, 1995.
  4. J. S. Wallace and C. A. Ward, 'Hydrogen as a Fuel', Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 8, No. 4 pp 255-268, 1983.
  5. N. Nemeth, 'Environment and Energy ; Problems, Resolutions', Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 7, pp. 457-462, 1990.
  6. Y. S. H. Najjar, 'A Cryogenic Gas Turbine Engine using Hydrogen for Waste Heat Recovery and Regasification of LNG' , Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 129-134, 1991