

흡기관 분사식 수소기관의 실용화를 위한 MCVVT 연구용 수소기관의 개발과 기본 특성

강준경[†], Huynh Thanh Cong*, 노기철**, 이종태**, 이제형***
*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부, ***현대자동차

A Development and Basic Characteristics of MCVVT Research Hydrogen Engine for Practical Use of External Mixture Hydrogen-Fueled Engine

J. K. Kang[†], T. C. Huynh*, K. C. Noh**, J. T. Lee**, J. H. Lee***

*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ. 300,
Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-Si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

***Hyundai Motor Company.772-1, Jangduk-Dong. Hwaseong-Si,
Gyeonggi-do, 445-706, Korea

ABSTRACT

To develop a hydrogen fueled engine with external mixture which uses in high reliability, low cost and low pressure, the single cylinder research engine with MCVVT(Mechanical Continuous Variable Valve Timing) system is developed and its basic characteristics analyzed. The MCVVT developed has high reliability and the valve timing change is possible in wide range continuously. Though the mechanical loss due to MCVVT system is increased a little, back-fire suppression research for valve overlap period is no difficulty. It's also confirmed that the hydrogen-fueled engine has lower torque and is possible high lean burn. As fuel-air equivalence ratio is high, as thermal efficiency is remarkable increasing.

KEY WORDS : hydrogen fueled engine with external mixture (흡기관 분사식 수소기관), mechanical continuous variable valve timing (기계식 연속 가변 밸브 타이밍), back-fire (역화), valve overlap period (밸브 오버랩 기간)

1. 서 론

수소기관은 연료공급방식에 따라 수소를 흡기

관에 분사하여 공기와 혼합된 상태로 연소실 내에 공급하는 흡기관 분사식과 수소를 연소실 내에 분사하는 직접 분사식으로 나눌 수 있다^{1,2)}.

직접 분사식의 경우 근본적인 역화발생의 회피와 출력 향상의 장점이 있지만 혼합기의 불균질

[†]Corresponding author : phantomzwei@naver.com

성으로 인한 열효율 저하 및 고압 인젝터 개발의 문제점이 있다^{3,4)}. 이에 비해 흡기관 분사식의 경우 혼합기간이 길어 고열효율을 얻을 수 있으며, 기존 기관의 큰 구조변경이 없이 이용이 가능하고 저압의 수소를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 단기간 내 고열효율의 수소기관을 실용화 하는데 흡기관 분사식 수소기관이 보다 유리할 것으로 판단된다. 그러나 흡기관 분사식 수소기관은 수소연료의 독특한 물성치 및 연소 특성에 의해 고부하시 역화발생이 상존하여 실용화에 걸림돌이 되고 있다. 수소기관의 역화는 실린더 내 혼합기가 모종의 점화원에 의해 조기착화 되어 밸브 오버랩 중 빠른 연소 속도에 의해 화염이 흡기관내로 역류되는데 기인하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 역화 발생을 억제하기 위해서 희박혼합기, 피스톤 크레비스 볼륨 제거 등의 방법에 의해 모종의 발화원을 제거하고자 하는 시도가 있었으나 밸브 오버랩의 변화에 대한 역화억제 시도는 아직 명확히 해석되지 않은 것이 많다⁵⁻⁹⁾.

본 연구에서는 밸브 오버랩 기간의 단축 등에 의한 역화발생 억제효과를 파악하기 위한 전초 단계로서 흡기밸브와 배기밸브 타이밍을 각각 조절할 수 있는 기계식의 연속 가변 밸브 타이밍(MCVVT: Mechanical Continuous Variable Valve Timing) 시스템을 장착한 기관을 제작하고 이 기관의 기본 성능 특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 MCVVT 시스템

연속 가변 밸브 타이밍 시스템은 유압식과 슬레노이드 밸브 구동방식을 고려할 수 있다. 이러한 구동방식은 시스템의 복잡성과 밸브 개폐시기의 범위가 제한되는 점이 있다. 따라서 제어가 용이하고 밸브개폐 시기의 가변 범위가 넓은 기계식 연속 가변 밸브 타이밍 시스템을 고안하였다. Fig. 1은 기계식 연속 가변 밸브 타이밍 시스템의 작동원리를 나타낸 것이다.

그림에서 VVT 기어1의 위치를 1에서 2로 이

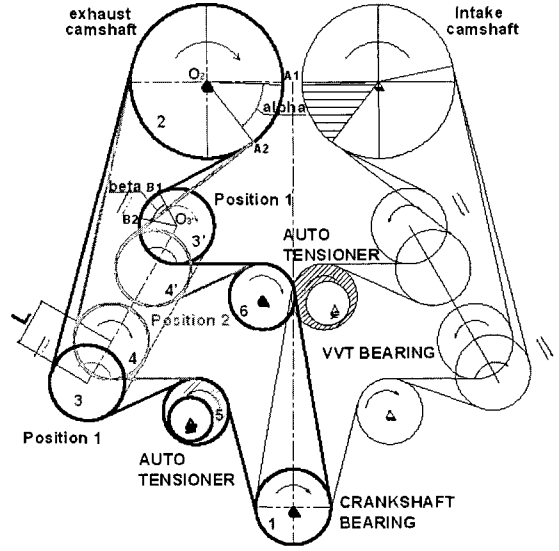


Fig. 1 Operating principle of MCVVT system

동시키면 캠축은 α 만큼 회전하여 밸브 개폐시기가 조절된다. 이때 VVT 기어1이 움직이면서 변화되는 벨트 길이의 증가로 인해 반대편에 부착되어 있는 VVT 기어2가 1'에서 2'로 이동하면서 상쇄되는 원리를 활용하였다. VVT 기어1의 이동에 따른 타이밍 벨트의 장력변화는 오토 텐션너

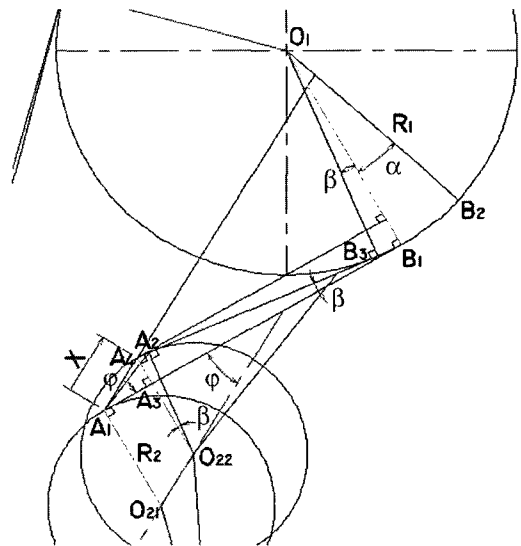


Fig. 2 Relation of cam phase and displacement in MCVVT system

흡기관 분사식 수소기관의 실용화를 위한 MCVVT 연구용 수소기관의 개발과 기본 특성

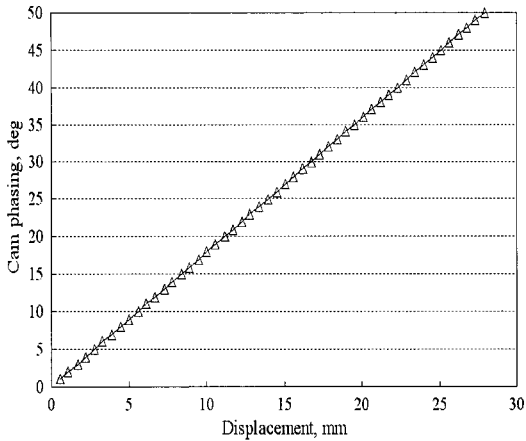


Fig. 3 Relation of cam shaft phase and displacement in MCVVT system

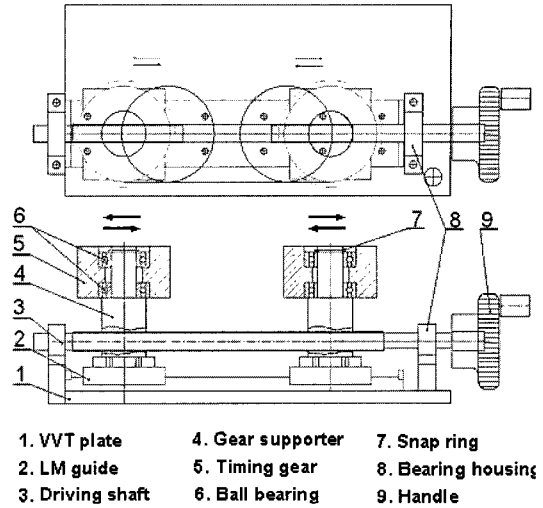


Fig. 4 Schematic diagram and photograph of MCVVT system

를 설치하여 동일한 장력이 유지되도록 하였다.

상기의 기계식 연속 가변 밸브 타이밍 시스템은 흡입 및 배기 캠축에 각각 타이밍 벨트로 연결하여 임의대로 흡·배기 밸브 타이밍을 독립적이며 연속적으로 가변시킬 수 있다.

Fig. 2는 MCVVT 시스템의 VVT 기어의 변위와 캠 위상각의 관계를 나타낸 것이다.

벨트와 VVT 기어의 접점까지의 벨트 길이는 변화하지 않는다. 따라서 VVT 기어의 변위와 캠축의 회전각 사이의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{A_1B_1} = \overline{A_2B_2} \quad (1)$$

$$\overline{A_1B_1} = \overline{A_1A_3} + \overline{A_3B_1} = X \cos \phi + \overline{A_3B_1} \quad (2)$$

여기서, ϕ : MCVVT 시스템 실제 설치각도

$$\overline{A_2B_2} = \overline{A_2B_3} + \overline{B_3B_2} = \overline{A_2B_3} + \frac{\alpha + \beta}{360} \pi D_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{A_2B_3} &= \overline{A_4B_1} - \overline{A_4A_2} - \overline{B_3B_1} \\ &= \overline{A_4B_1} - \frac{\beta}{360} \pi D_2 - \frac{\beta}{360} \pi D_1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, α : 캠 기어의 위상각

β : VVT 기어 위상각

D_1 : 캠 기어의 지름($D_1=128\text{mm}$)

D_2 : VVT 기어 지름($D_2=63\text{mm}$)

식 (1), (2), (3) 및 (4)로부터 VVT 기어의 변위 X와 캠 및 VVT 기어 위상각과의 관계를 알 수 있다.

$$X = 1.29\alpha - 0.63\beta \quad (\text{since } \overline{A_3B_1} \approx \overline{A_4B_1}) \quad (5)$$

아이들 기어의 위상각 및 캠 기어의 위상각은 기하학적으로 대략 $\beta \approx 0.24\alpha$ 의 관계가 있다.

Fig. 3은 상기 관계식으로부터 구한 VVT 기어의 이동거리와 캠축의 회전각의 관계를 나타낸 것이다.

VVT 기어의 이동거리를 증가시킴에 따라서 캠의 위상각은 선형적으로 변화되는 것을 알 수 있다. 캠축을 50° CA만큼 회전시키려면 VVT 기어

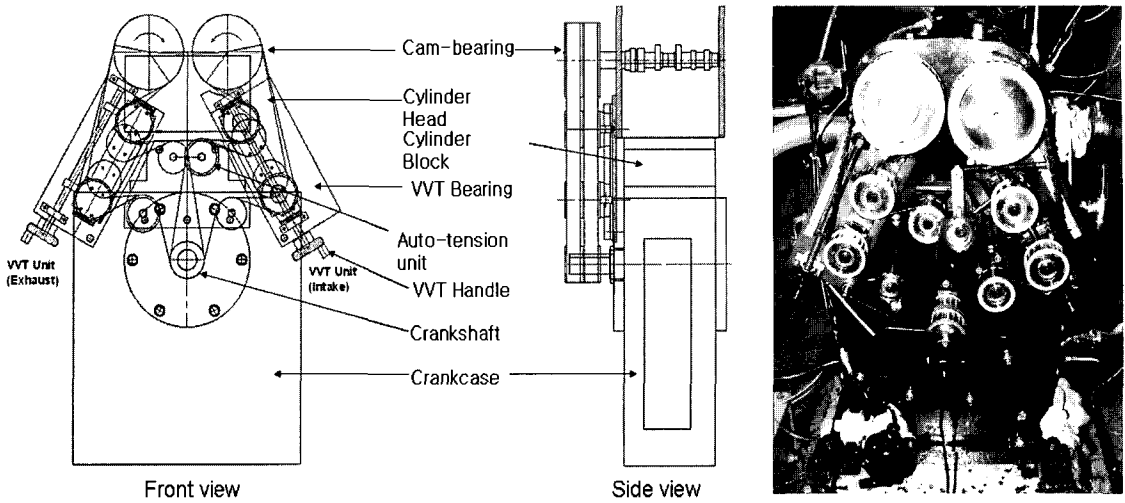


Fig. 5 Schematic diagram and photograph of experimental hydrogen fueled engine with MCVVT system

를 약 27.9 mm정도 이동되는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 가변 밸브 타이밍 기어를 구동하기 위한 MCVVT 시스템 유닛의 개략 및 실물사진을 나타낸다.

VVT 기어 시스템은 왼나사와 오른 나사로 구성된 구동축, 대향방향으로 움직이는 2개의 VVT 기어, 1개씩의 아이들 기어와 오토 텐션너, VVT 기어를 직선적으로 이동시키는 트래버스 장치 등으로 구성된다.

2개의 VVT 기어의 지름은 밸브 타이밍 및 설

치위치 등을 고려하여 캠축 지름의 1/2로 결정하였다. VVT 기어를 이동시키는 구동축의 지름 및 피치는 각각 10 mm 및 1.25 mm이다. VVT 기어의 이동가능 길이는 30 mm로서 밸브 타이밍을 50° CA이상 조절할 수 있다. 또한 기관운전 중에도 핸들 조작으로 쉽게 밸브 타이밍을 제어할 수 있는 특징이 있다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 5는 MCVVT 시스템이 장착된 연구용 흡

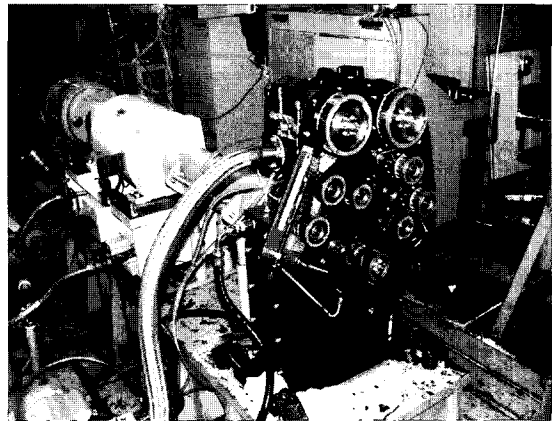
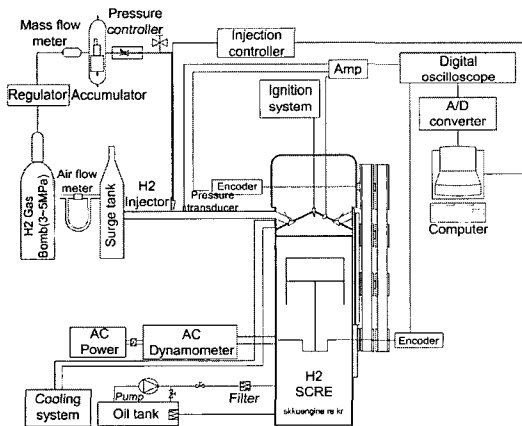


Fig. 6 Schematic diagram and photograph of experimental apparatus

기관 분사식 수소기관의 개략 및 실물사진을 나타낸 것이다.

MCVVT 연구용 수소기관은 보어 및 스트로크가 각각 86 mm이며 압축비가 $\epsilon=10.5$ 인 배기량 499.5 cc의 DOHC 단기통 기관이다. 그리고 상기 기관의 크랭크 기구 및 연소실은 기존 상용기관의 주요 부품을 개조하여 제작하였으며, 추후 가변 압축비화가 가능하도록 기관 본체의 사양을 결정하였다.

Fig. 6은 전체 실험장치의 개략 및 실물사진을 나타낸다. 실험장치는 전문 연구용 단기통 수소기관, AC 동력계, 연료공급장치, 수소 연료 및 공기량 측정장치, 연소실압력 측정장치와 냉각장치 등으로 구성된다.

수소연료는 150 bar의 고압 볼베에서 공급되어 압력조절기에서 10 bar로 1차 감압된다. 그리고 필터와 수소유량 측정기를 거쳐 저압 조절기에서 3 bar로 2차 감압되어 어큐뮬레이터를 거쳐 기관으로 공급된다. 수소연료 공급량은 인젝터 콘트롤러를 통하여 조절되며 열전대식 유량계로 측정하였다. 기관의 냉각에는 직수를 사용하였고 실린더 헤드 및 블럭에 독립적으로 공급하였다.

실험은 제작된 기관의 기밀성 및 재현성의 평가와 MCVVT 시스템의 장착여부에 따른 기관의 성능을 평가하는 것이다. 실험변수는 기관회전수와 연료-공기 당량비이며 각각에 대해 점화 시기는 MBT이고 부하는 WOT로 고정하였다.

3. MCVVT 기관의 성능 평가

3.1 기밀성 및 재현성

Fig. 7은 MCVVT 시스템이 장착된 경우와 없는 경우 기관회전수에 대한 도시 평균유효압력 및 연소실 최고압력의 변동계수를 나타낸 것이다. 여기서, 연료-공기 당량비는 $\phi=0.6$ 이다.

변동계수는 재현성을 나타내는 지표로서 일반적으로 5~10%미만이면 안정된 것으로 평가될 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 도시 평균유효압력 및 연소실 내 최고압력의 변동계수가 모두

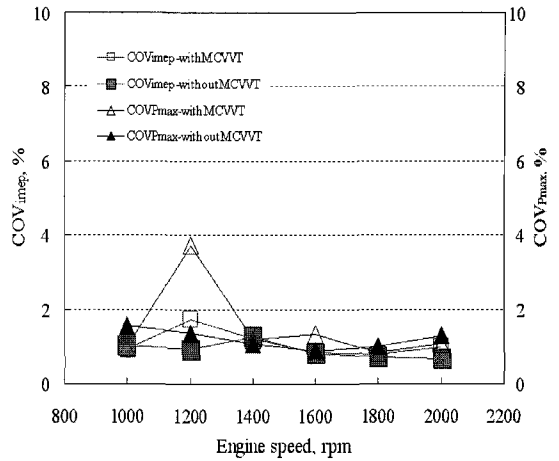


Fig. 7 Coefficient of variation of imep and in-cylinder maximum pressure versus engine speed

5% 미만의 안정된 값을 가진다. 또한 MCVVT 시스템의 적용 여부와 관계없이 변동계수는 안정된 값을 보인다.

Fig. 8은 제작된 기관의 기밀성을 파악하기 위해 모터링 운전 시의 실린더 내 압력을 예측치와 비교하여 나타낸 것이다.

제작한 연구용 단기통 기관의 실린더 내 압력은 흡입밸브가 닫힌 후 압축에 의해 실린더 내의 압력이 증가하여 상사점부근에서 최고압력을 나타내고 있다. 실린더 내 압력곡선은 최고 압축압

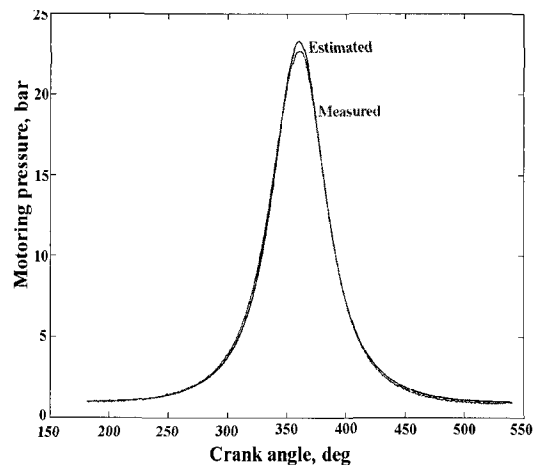


Fig. 8 In-cylinder pressure in motoring

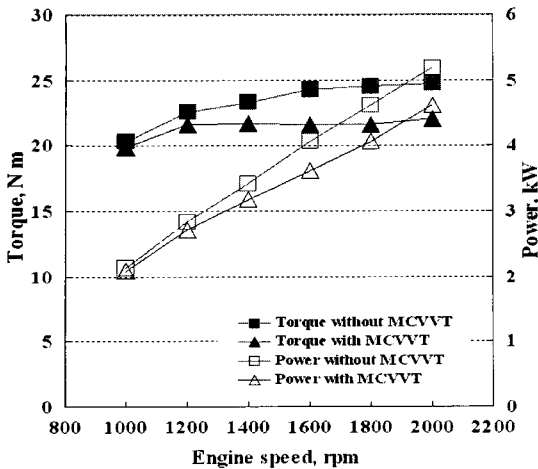


Fig. 9 Torque and power with and without MCVVT versus engine speed

력이 나타나는 부근을 제외하고 예측치와 대체로 유사한 것을 보이고 있다. 측정된 실린더 내 압력과 압축비의 관계로부터 구한 압축과정 중의 폴리트로픽 지수는 약 1.35정도를 보이고 있다. 이와 같은 경향으로 기밀성에 문제가 없음을 알 수 있다.

3.2 MCVVT 장착에 의한 기계손실

Fig. 9는 MCVVT를 장착한 경우의 제동 토크 및 기관출력을 MCVVT를 장착하지 않은 경우와 기관회전수에 대해 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 MCVVT 시스템의 장착 여부에 따른 제동 토크 및 기관출력은 모두 기관회전수가 증가할수록 커지는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 그러나 MCVVT 시스템이 장착된 경우의 제동 토크 및 기관출력은 다수의 타이밍 기어 및 아이들 기어를 사용하는데 따른 기계손실로 인해 MCVVT 시스템을 장착하지 않은 경우보다 전반적으로 모든 기관회전수에 대하여 약간 작은 값을 보이고 있다. 이러한 기계손실은 저속운전의 경우 그리 크지 않지만 기관회전수가 증가될수록 그 차이는 점차적으로 증가하는 것을 나타낸다. MCVVT 시스템을 장착하는데 따른 기계손실은 기관회전수가 1000 rpm에서는 약 3%정

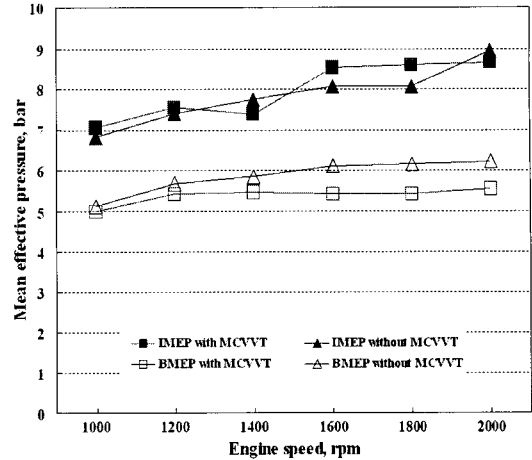


Fig. 10 Mean effective pressure versus engine speed with and without MCVVT

도이며 2000 rpm에서는 약 11%정도인 것을 보이고 있다.

Fig. 10은 기관회전수를 변화시킨 경우 MCVVT 시스템의 장착 유·무에 따른 도시 및 제동 평균 유효압력을 나타낸 것이다.

전술한 바와 같이 제동 평균유효압력은 MCVVT 시스템의 장착에 의한 기계손실 증가의 영향이 나타나지만 도시 평균유효압력은 대체로 MCVVT 시스템의 장착 유·무에 무관한 것을 확인 할 수 있다.

따라서 MCVVT 시스템에 의해 밸브 타이밍을 변화시킨 경우 도시 토크 및 도시 열효율 등과 같이 실린더 내 압력에 의한 결과는 MCVVT가 장착되지 않은 경우와 동일한 신뢰성을 갖는다. 또한 일정 기관 회전속도에 있어서 밸브 타이밍 변화에 따른 출력축 쪽의 제반 특성의 정성적 경향을 파악하는데 있어 문제가 없을 것으로 생각된다.

3.3 기관의 기본 성능

Fig. 11은 본 기관에서 최대 토크가 발생하는 기관회전수를 파악하기 위해 기관회전수에 대한 제동 토크를 나타낸 것이다. 여기서 연료-공기 당량비는 $\phi=0.6$ 인 경우이다.

흡기관 분사식 수소기관의 실용화를 위한 MCVVT 연구용 수소기관의 개발과 기본 특성

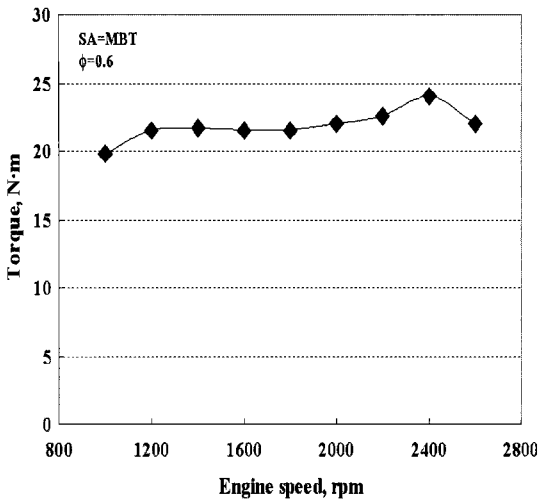


Fig. 11 Brake torque versus engine speed

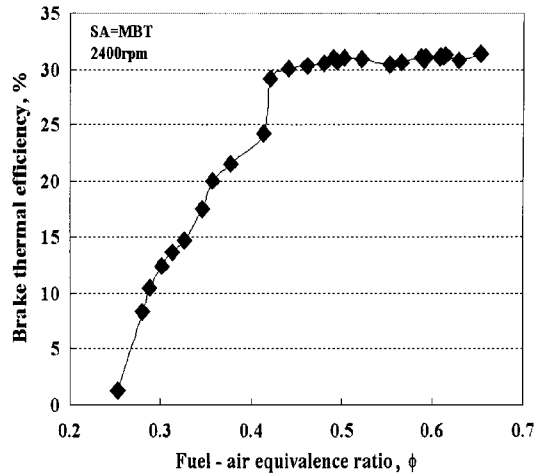


Fig. 12 Brake thermal efficiency versus fuel-air equivalence ratio

그림에서 보는 바와 같이 MCVVT를 장착한 흡기관 분사식 수소기관은 같은 당량비의 조건에서 기관회전수의 증가에 따라 토크가 미미하게 증가하며 기관회전수가 2400 rpm 부근에서 최대 토크를 갖는 것을 알 수 있다.

최대토크가 발생되는 기관회전수 2400 rpm에서 수소연료공기 당량비 변화에 대한 제동 열효율을 나타낸 것이 Fig. 12이다. 여기서 점화시기는 MBT로 하였다.

그림에 나타난 바와 같이 흡기관 분사식 수소기관의 가연한계는 수소연료의 적은 점화에너지, 빠른 연소속도 등에 의해 연료-공기 당량비 $\phi = 0.25$ 부근까지 초회박연소가 가능한 것을 나타낸다. 이보다 농후하게 하면 연소가 안정되나 역화 발생에 의해 $\phi = 0.65$ 부근까지만 정상운전이 가능하였다.

한편 흡기관 분사식 수소기관의 제동 열효율은 직접분사식 수소기관 및 가솔린기관보다 높은 약 31% 정도를 나타낸다. 상기 결과는 수소기관의 열효율 향상에 흡기관 분사방식이 직접분사방식보다 유용하다는 것을 입증하는 것이다. 그리고 열효율은 연료-공기 당량비 $\phi = 0.45$ 부터 역화가 발생될 때까지 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이는 수소기관의 경우 공기연료비 변화에 대한 연

소안정성의 변화가 그리 크지 않다는 것이며, 또한 기관출력 변화 시 스로틀을 사용하지 않고 수소가스 공급량의 제어만으로 고효율의 달성이 가능하다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결 론

밸브 오버랩 기간이 흡기관 분사식 수소기관의 역화발생에 미치는 영향을 해석하기 위한 전초연구로서 기계식 가변 밸브 타이밍 장치가 장착된 연구용 수소기관을 제작하고 기본성능을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개발된 MCVVT 시스템은 고 신뢰성을 갖고 넓은 범위에서 연속적으로 흡배기 밸브 타이밍의 변화가 가능하였다.
- 2) MCVVT 시스템의 장착에 의해 기계손실은 약간 증가되지만 밸브 타이밍 및 밸브 오버랩 기간의 변화에 의한 역화억제 연구에는 지장이 없음을 알 수 있었다.
- 3) 한정된 실험조건이지만 흡기관 분사식 수소기관은 연료-공기 당량비 $\phi = 0.25$ 부근까지 초회박연소가 가능하였으며, $\phi = 0.45$ 부근부터 역화가 발생하는 당량비까지 대체로 동일한 높은 열효율을 나타내어 공기연료비 변화에 대한

연소안정성의 변화는 그리 크지 않다는 것을 알 수 있었다.

- 4) 그리고 흡기관 분사식 수소기관의 제동 열효율은 직접분사방식보다 현저히 높아 수소기관의 열효율 향상에 흡기관 분사방식이 유리한 것이 확인되었다.

참 고 문 헌

- 1) Jack Levi and David B. Kittelson, "Further Studies with a Hydrogen Engine", SAE 780233, 2006, pp.1-8.
- 2) 이종태, 이성열, 이재천, 김용환, "수소엔진 개발에 관한 기초연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 초록집, 1988, pp. 59-63.
- 3) 이종태, "수소엔진 및 수소자동차의 개발현황", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 4, No. 1, 1993, pp. 51-64.
- 4) J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee and S. Y. Lee, "Performance Characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", SAE 952488, 1995, pp.162-175.
- 5) 백성호, 이종태, "흡기관 분사식 수소기관의 특성 및 역화한계당량비의 해석", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 7, No. 1, 1996, pp. 55-62.
- 6) F.Elynch. "Backfire Control Techniques for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines", Hydrogen Energy, Part B, Miami, 1974, pp. 686-696.
- 7) 이창욱, 오태석, 김윤영, 이종태, "수소기관의 역화발생에 미치는 crevice volume의 영향에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), 1996, pp. 646-651.
- 8) 백성호, 박재범, 김윤영, 이종태, "수소기관의 역화한계당량비 확장에 관한 연구", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 8, No. 3, 1997, pp. 95-100.
- 9) 김윤영, 류태호, 이종태, "수소기관의 이상점화에 의한 역화발생", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 13, No. 1, 2002, pp. 65-73.