

## 밸브 타이밍 지각과 과급에 의한 흡기관 분사식 수소기관의 고성능 실현

이광주\*<sup>†</sup>, 허상훈\*, 이종태\*\*

\*성균관대학교 대학원, \*\*성균관대학교 기계공학부

## The Realization of High Performance in a Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture by Retarding Valve Timing and Super Charging

KWANGJU LEE\*<sup>†</sup>, SANGHOON HUR\*, JONGTAE LEE\*\*

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

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

### ABSTRACT

In order to analysis the possibility of high expansion and performance without backfire in a hydrogen-fueled engine using external mixture injection, combustion characteristics and performance enhancement were analyzed in terms of retarding valve timing and increasing the boosting pressure. As the results, it was found that thermal efficiency increased by retarding intake valve timing with the same level of supplied energy is over 6.6% by the effect of high expansion including effect of combustion enhancement due to supercharging. It was also shown that the achievement of high power (equal to that of a gasoline engine), low brake specific fuel consumption and low emission (NOx of less than 16 ppm) without backfire in a hydrogen-fueled engine is possible around a boosting pressure of 1.5 bar, intake valve opening time of TDC and  $\phi=0.35$  in fuel-air equivalence ratio.

**KEY WORDS** : Retarded valve time(밸브타이밍 지각), Supercharging(과급), H<sub>2</sub> engine with external mixture (흡기관 분사식 수소기관), High expansion(고팽창), High performance(고성능)

### 1. 서 론

수소기관은 연료공급방식에 따라 흡기관 분사식

과 직접 분사식으로 나눌 수 있다. 흡기관 분사식은 직접 분사식에 비해 혼합기간이 길어 열효율이 높으며, 저압의 분사밸브를 사용하므로 용이하게 수소기관화 할 수 있다<sup>1,2)</sup>. 하지만 흡기관분사식 수소기관에서는 고부하시 역화가 발생되어 출력발생에

<sup>†</sup>Corresponding author : kjlee81@skku.edu

[ 접수일 : 2009.9.28 수정일 : 2009.10.13 게재확정일 : 2009.12.15 ]

제약이 있다. 이로 인해 고출력을 달성하면서 역화를 억제하는 기술 확립은 수소 내연기관 및 수소 자동차의 상용화를 위한 중요한 관건이다.

저자들은 실린더 내에 모종의 점화원에 의해 발생된 화염의 역류기간을 흡기밸브 열림시기의 지각으로 감소시켜 고부하시 역화억제가 가능함을 밝혔다<sup>3-6)</sup>. 그리고 고출력달성에 요구되는 공급열량을 고희박혼합기를 과급하여 공급함으로서 역화발생없이 고출력, 고효율과 저배기를 동시에 달성할 수 있는 가능성을 해석하고 있다.

주지의 사실과 마찬가지로 흡기밸브 열림시기를 압축과정까지 지각시키면 흡입된 신기가 흡기관내로 역류되어 유효압축비가 감소된다. 이로 인해 팽창과정이 압축과정보다 큰 고폽창효과, 즉 밀러 사이클(miller cycle)효과가 제반성능에 수반된다. 오토사이클 수소기관에서 역화억제를 위하여 흡기밸브 열림시기를 지각시키고 출력향상을 도모하기 위해 과급을 하면 밀러 사이클 효과가 나타나지만 이에 대한 해석은 아직 명확하지 않다.

본 연구에서는 흡기관 분사식 수소기관에서 흡기밸브 타이밍 지각과 과급에 의한 고폽창 효과, 고출력 및 저NOx 달성 가능성을 해석하기 위하여 흡기밸브 열림시기와 과급압을 변화시키는데 따른 연소특성 및 기관성능을 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 수소기관은 흡기관 분사방식의 단기통 연구용기관이며 그 상세한 제원을 Table 1에

Table 1 Specification of test engine

Valve mechanism	DOHC
Bore × Stroke	86 mm × 86 mm
Compression ratio	10.5
Displacement volume	500 cc
IVO / IVC	10 BTDC / 67 ABDC
EVO / EVC	34 BBDC / 10 ATDC

나타낸다.

Fig. 1은 구조 및 제어가 간단하고 가변 범위가 넓은 기계식 연속 가변밸브 타이밍인 MCVVT(mechanical continuous variable valve timing)시스템이 장착된 단기통 연구용 수소기관을 나타낸 것이다. 흡기 및 배기밸브에 장착한 MCVVT 시스템은 동일한 구조이며 이를 각각 조절하면 배기밸브 열림시기 및 흡기밸브 닫힘시기가 동시에 변경되어 밸브 오버랩기간을 변화시킬 수 있다<sup>7)</sup>.

실험장치의 개략도를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 실험 장치는 전술한 수소기관, 동력측정계통, 수소공급계통, 흡기 및 배기계통, 냉각계통, 데이터 취득부 및



Fig. 1 MCVVT system for the hydrogen-fueled engine.

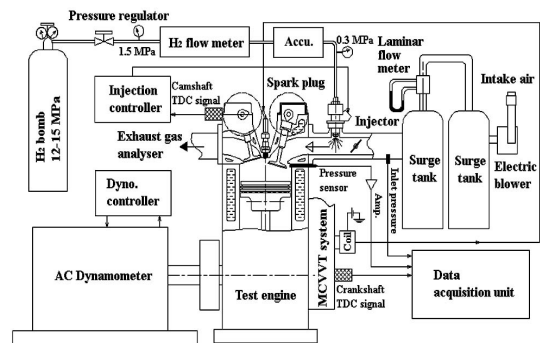


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

과급기로 구성된다. 수소연료는 150bar로 충전된 고압가스봄베로부터 1, 2차 감압기를 거쳐 3bar로 감압된 후 가스 인젝터를 통해 기관으로 공급된다. 수소 분사량은 인젝터 컨트롤러(Mobi Itek, MT2010)을 통하여 제어하며, 열전대식 수소유량계(Bronchus, P-113AC-HAD-55-V)로 측정한다. 수소유량계와 가스 인젝터 사이에는 연료분사에 의한 맥동현상을 줄이기 위해 3.8ℓ 용량의 어큐물레이터를 설치하였다. 과급은 외부 과급방식으로 링블로워(DongBu Industrial Machinery, DBR-1002)를 사용하였다. 과급압을 제어하기 위해 링블로워 출구 쪽과 서지탱크 입구 쪽에 bypass 밸브를 각각 부착하였다. 링블로워 출구쪽에는 과급온도를 제어하는 수냉식 인터쿨러가 위치한다. 과급에 의한 맥동을 감소시키기 위해 기관 흡기관과 인터쿨러 출구사이에 2개의 서지탱크를 사용하였으며 서지탱크 사이에 공기유량계를 설치하였다. NOx의 배출량은 배기가스 분석장치(Horiba, MEXA-554JKNOx)를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 실험방법

흡기관 분사식 수소기관의 밸브 타이밍 지각에 의한 효과를 해석하기 위한 주요 실험변수는 흡기 밸브 열림시기와 과급압이다.

흡기밸브 열림시기는 BTDC 40°CA 부터 TDC 까지 10°CA씩 단계적으로 지각시켜 흡입기간을 변화시켰다. 상기의 경우 배기밸브 닫힘시기는 배기 효율이 높은 ATDC 10°CA에 고정시켰다. 밀러 사이클 기관은 흡기밸브 닫힘시기 지각에 따른 흡입 공기량 감소를 보상하기 위해 보통 최대 흡기관 내압력을 1.5~2.0bar 정도까지 과급시킨다. 따라서 과급압 변화에 대한 실험은 자연흡입상태부터 1.5bar 까지 0.1bar씩 단계적으로 변화시켰다.

Fig. 3은 기존 밸브오버랩기간을 20°CA로 고정한 경우, 역화가 발생하기 직전의 당량비인 역화한계당량비를 기관회전수변화에 대해 나타낸 것이다. 역화한계 당량비는 기관을 10분간 운전시켜 역화가 1회라도 발생하지 않은 경우이다. 실제 장시간 안

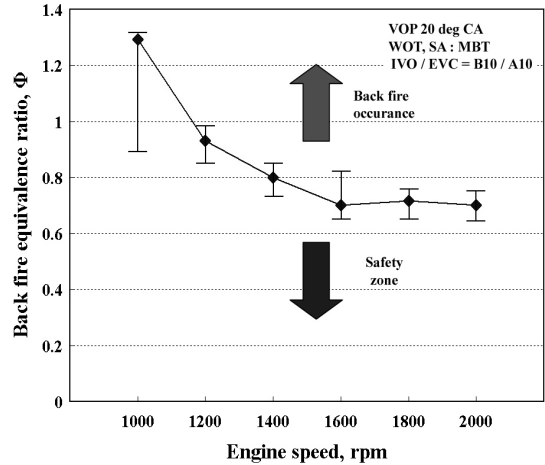


Fig. 3 Back fire limit equivalence ratio versus engine speed in IVO / EVC = 10 BTDC / 10 ATDC.

정적으로 운전할 수 있는 영역은 이보다 약간 낮은 당량비라 판단된다.

그림에 나타난 바와 같이 기관회전수의 증가에 따른 충전효율의 증가와 단위시간당의 공급열량의 증가에 기인하여 역화한계 당량비는 전반적으로 감소하는 것을 나타낸다. 1600rpm부터는 연료공기 당량비  $\phi = 0.7$  부근으로 거의 일정한 경향이다. 1000rpm인 경우의 역화한계 당량비는  $\phi = 1.0$  이상이며, 2000rpm인 경우  $\phi = 0.7$ 로 가장 작은 값을 보였다. 본 실험에서 기관회전수는 역화한계 당량비가 일정해지기 시작한 1600rpm으로 고정시켰다. 또한 점화 시기는 MBT로 고정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 밸브 타이밍 변화에 따른 고폽창 효과

흡기관분사식 수소기관의 흡기밸브 열림시기 변화에 대한 흡기밸브 닫힘시기와 역화한계 당량비를 나타낸 것이 Fig. 4이다.

흡기밸브 닫힘시기는 동일 cam profile을 사용하였으므로 흡기밸브 열림시기 지각에 대응하여 동시에 지각되는 것을 나타낸다.

역화한계 당량비는 최대토크가 발생하는 흡기밸

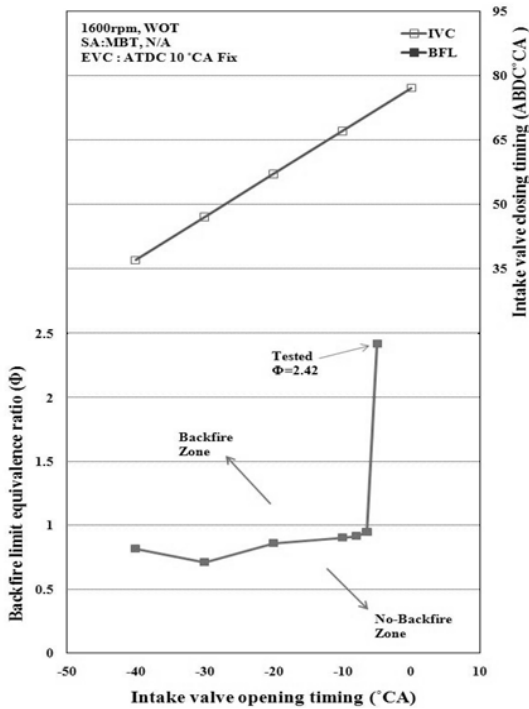


Fig. 4 IVC and backfire limit equivalence ratio with the variation of IVO.

브 열림시기인 BTDC 30°CA보다 지각시키면 전반적으로 증가되는 경향이다. 흡기밸브 열림시기 BTDC 65°CA에서의 역화한계 당량비는 BTDC 30°CA보다 약 32.7% 증가된 0.95정도이다. 이보다 흡기밸브 열림시기가 약간 지각된 BTDC 5°CA에서는 당량비가 농후한 영역인  $\Phi=2.4$  이상에서도 역화가 전혀 발생되지 않는 것을 나타낸다. 이는 역화 억제에 흡기밸브 열림시기의 지각이 효과적이며, 또한 흡기밸브 열림시기를 TDC로 설정하면 모든 당량비에서 역화를 억제할 수 있다는 것을 보이는 결과이다.

역화가 억제되는 흡기밸브 열림시기 TDC와 역화가 발생하는 흡기밸브 열림시기 BTDC 30°CA에서 당량비 변화에 대한 출력을 나타낸 것이 Fig. 5이다.

그림에서 보는 바와 같이 당량비가 증가할수록 출력이 증가하지만 흡기밸브 열림시기 TDC에서의 출력은 동일 당량비에서 흡기밸브 열림시기 BTDC 30°CA보다 약 13.4% 정도 감소한다. 이는 흡기밸브

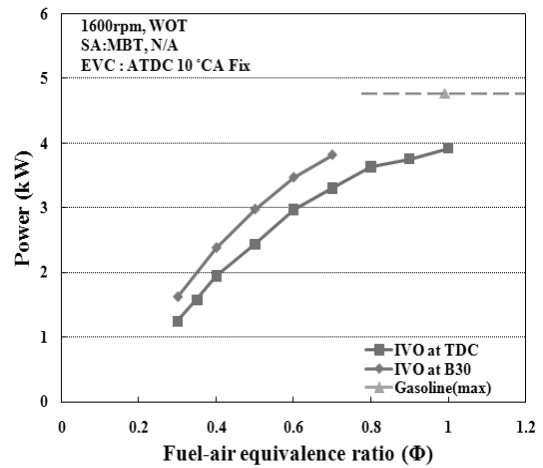


Fig. 5 Power with the variation of fuel-air equivalence ratios.

브 열림시기 지각에 따른 흡입공기량 감소에 의하여 공급열량이 감소하는데 기인한다. 그러나 흡기밸브 열림시기를 TDC에 고정되는데 따른 화염 역류기간의 감소에 의해 역화가 억제되므로 진술한 바와 같이 당량비  $\Phi=1.0$  이상에서도 정상운전이 가능하다. 동일 기관회전수와 자연흡입 상태 하에서 수소기관의 최고출력은 가솔린기관에 비해 약 17.7%정도 적은 값이다. 수소기관의 상용화를 위해서 가솔린과 동등한 출력을 얻기 위한 방안의 강구가 요구된다.

Fig. 6은 흡기밸브 열림시기 변화에 상관없이 동일한 열량을 공급한 경우의 제동 열효율을 나타낸 것이다.

밀러 사이클은 흡기밸브 닫힘시기가 지각되는데 따른 압축일의 감소로 도시일이 증가된다. 흡기밸브 닫힘시기 지각에 의해 밀러 사이클을 실현시키는 경우 흡기밸브 열림시기는 고정되는 것이 통상적인 구조이다. 반면에 실험에 사용된 연구용 수소기관은 Fig. 4에서 논한 바와 같이 동일 캠을 사용하였으므로 흡기밸브 열림시기는 흡기밸브 닫힘시기 지각에 대응하여 지각된다. 흡기밸브 열림시기 지각에 의한 흡입공기량의 감소는 압축일 및 팽창일에 영향을 미친다. 고팽창에 인한 효과를 파악하고자 흡기밸브 열림시기 변화에 상관없이 과급에

의해 공급열량을 동일하게 유지하였다.

그림에서 보는 바와 같이 열효율은 흡기밸브 열림시기가 지각하는데 따른 압축일 감소 및 상대적인 고폽창효과에 의해 지속적으로 증가하는 경향이 다. 흡기밸브 열림시기가 TDC인 경우의 열효율은

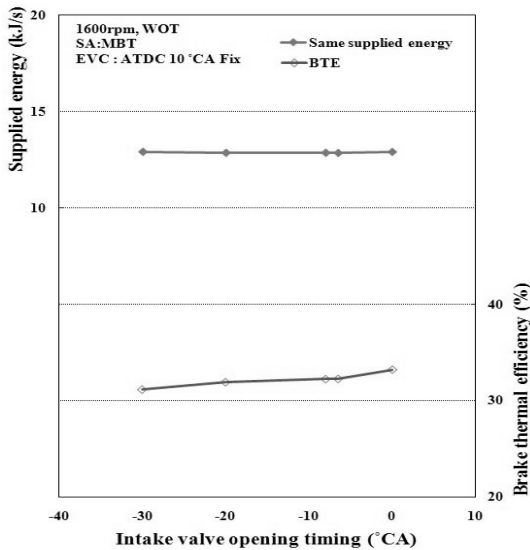


Fig. 6 Supplied energy and brake thermal efficiency vs intake valve opening timing.

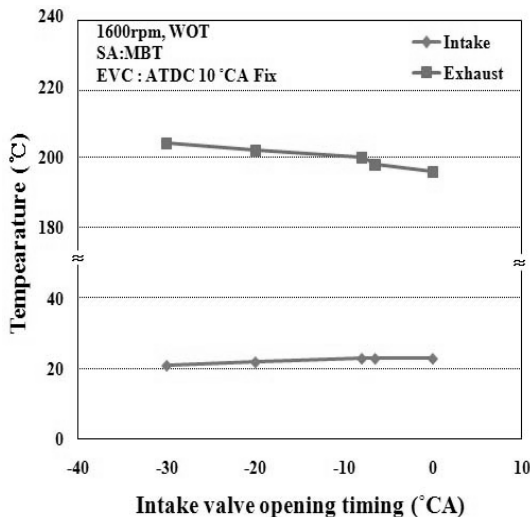


Fig. 7 Intake and Exhaust gas temperature as a function of the intake valve opening timing.

흡기밸브 열림시기 BTDC 30°CA보다 약 6.6% 정도 증가된 것을 보인다.

흡기밸브 닫힘시기 지각에 의한 열효율향상은 고폽창 효과 뿐만 아니라 과급에 의한 온도상승 및 유동증가 영향이 수반되므로 흡기밸브 열림시기 변화에 따른 흡입 공기 온도와 배기가스 온도를 파악한 것이 Fig. 7이다.

흡입 공기온도는 흡기밸브 열림시기의 지각에 상관없이 동일 열량을 공급하기 위한 과급압 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 반대로 배기가스 온도는 흡기밸브 열림시기가 지각될수록 감소하는 경향을 보인다. 동일열량을 공급하는데 따른 과급에 의한 신기온도증가와 유동증가에 수반하는 연소온도 상승은 배기가스온도를 증가시키는 역할을 한다. 그럼에도 불구하고 배기가스온도가 현저히 감소하는 것은 고폽창 즉, 밀러 사이클 효과가 열효율증가의 주요한 인자라는 것을 확인하는 결과이다.

### 3.2 과급압 변화에 따른 고성능 가능성

전술한 바와 같이 흡기밸브 열림시기를 TDC에 고정시키고 과급을 하면 공급열량의 증가와 상관없

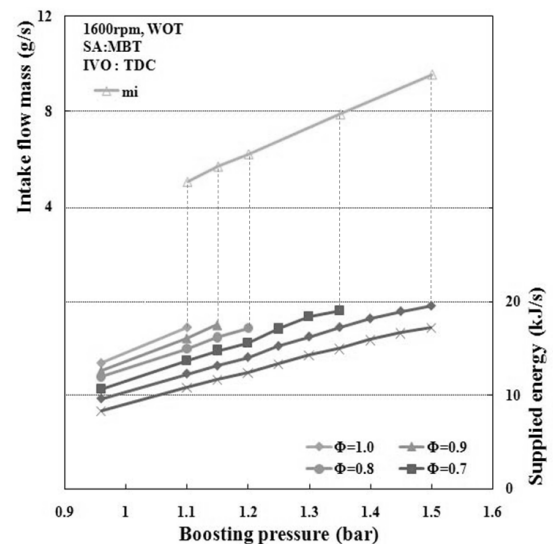


Fig. 8 Intake flow mass and supplied energy as a function of the boosting pressure.

이 역화를 억제할 수 있으나 고과급에 의해 노킹이 발생한다. Fig. 8은 노킹이 발생할 때의 신기질량과 과급압 변화에 따른 공급열량을 각각의 당량비에 대하여 나타낸 것이다. 공급열량은 과급압 및 당량비가 증가할수록 증가하는 경향이며, 노크 발생 시의 공급열량은 당량비가 희박할수록 증가될 것을 나타낸다. 또한 노크 발생 시의 신기질량은 노킹 발생 과급압이 당량비와 상관관계가 있으므로 과급압이 증가할수록 즉, 당량비가 희박할수록 증가하는 것을 보인다.

노크가 발생하는 착화조건은 다양한 인자에 의해 좌우되지만 실린더 내의 가스온도가 주된 역할을 한다. 연소에 의한 실린더 내 온도상승은 공급열량에 비례하고 신기질량에 반비례한다. 그러므로 당량비가 희박할수록 과급압 증가에 의해 공급열량이 증가되어 실린더 내로 흡입되는 신기온도의 증가에 의한 압축말기의 온도상승을 신기의 질량 증가로 이를 상쇄시켜 유사한 착화조건이 형성되어 노킹이 발생한 것으로 생각된다.

Fig. 9는 부하를 의미하는 출력 변화에 따른 연료 소비율을 각각의 과급압에 대하여 나타낸 것이다. 실험 장치에서 논한 바와 같이 과급은 외부 과급방식으로 링블로워를 사용하였기 때문에 과급일은 고

려하지 않았다.

연료소비율은 출력이 작은 영역, 즉 저부하 영역에서 큰 값을 보이며 부하의 증가에 따라 감소하다가 고부하 영역에서는 다시 증가하는 경향을 보인다. 그리고 과급압이 증가함에 따라 연료소비율은 전반적으로 감소하지만 상기의 경향은 동일하다. 연료소비율의 최소치는 과급압 1.4bar 부근에서 보여진다. 이보다 과급압을 증가시켜도 연료소비율의 정성적 경향 및 정량적인 크기는 대체로 동일한 것을 나타낸다.

수소기관에서 가솔린기관 수준의 출력달성은 과급압 1.1bar부터 가능하다. 가솔린기관 수준의 출력을 달성하며 최소의 연료소비율을 나타내는 과급압 1.4bar에서의 연료소비율은 가솔린기관에 비해 무려 71.2%정도 적은 값이다. 이것은 수소연료와 가솔린연료사이의 연소속도 및 희박한계의 차이에 의한 연소촉진효과, 냉각손실 감소효과 및 고폭창효과와의 차이가 과급압 증가에 따라 커지는데 기인하는 것으로 볼 수 있다.

각각의 과급압에 대하여 출력 변화에 따른 NOx 배출량을 나타낸 것이 Fig. 10이다.

NOx 배출량은 각각의 과급압에서 출력이 증가할수록 증가되며 동일한 출력에서 과급압이 증가할

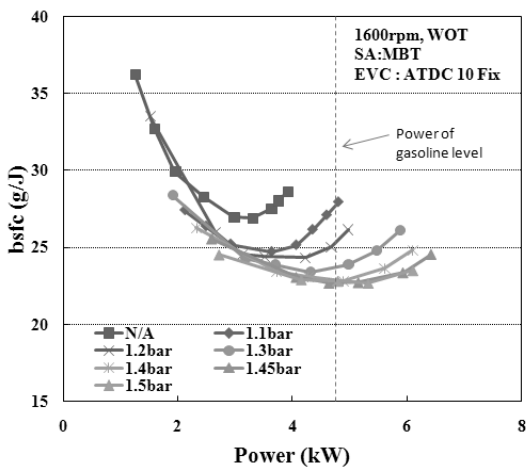


Fig. 9 Bsf with as a function of the power at each boost pressure.

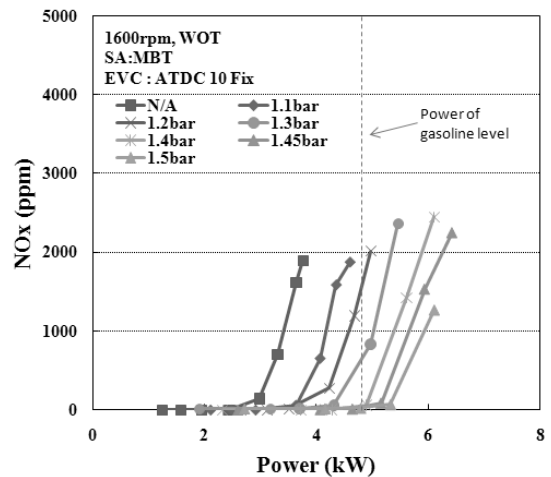


Fig. 10 NOx with the variation of the power at each boost pressure.

수축 감소된다. 특히 가솔린 기관 수준의 출력에서 과급압 1.5bar의 NOx 배출량은 16ppm으로 과급압 1.2bar보다 약 99.2% 감소된 값이다. 이는 공급열량이 높더라도 과급에 따른 고회박 혼합기사용에 의한 실린더 내 온도가 감소된 효과에 기인한 것으로 생각된다. 또한 흡기밸브 열림시기의 지각에 의한 고펡창 효과에 의해 배기가스온도가 감소되는데 따른 연소실온도 저감도 부가적으로 영향을 줄 수 있다.

상기와 같은 결과들은 수소기관에서의 흡기밸브 열림시기 지각과 과급압 증가방식이 역화 발생없이 가솔린기관 수준의 출력을 유지하면서 저연료소비를 및 저NOx를 달성할 수 있는 방안의 하나라는 것을 의미하는 것이다.

#### 4. 결 론

흡기관 분사식 수소기관에서 밸브 타이밍 지각과 과급에 의한 제반성능 향상효과를 해석하기 위하여 연소특성 및 기관성능을 비교, 분석하였다.

공급열량을 동일하게 한 경우, 열효율은 흡기밸브 열림시기를 지각시켜 TDC에 고정시키면 역화 발생없이 압축일 감소에 의한 밀러 사이클 효과로 흡기밸브 열림시기 BTDC 30°CA보다 약 6.6% 정도 증가된다.

가솔린 기관 수준의 출력은 과급압을 증가함에 따라 과급압 1.1bar부터 가능하며, 과급압 1.4bar의 연료소비율은 가솔린기관에 비해 무려 71%정도 감소되었다.

NOx는 과급압 1.5bar에서 가솔린 기관과 동등한 수준의 출력을 발생하는데도 불구하고 약 16ppm 정도 배출되어 흡기밸브 타이밍 지각과 과급이 수소기관의 고성능화에 유용하다는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) K. Koyanagi, M. Hiruma, S. Furuhashi, "Study on Mechanism of Backfire in Hydrogen Engines", SAE 942035, 1994.
- 2) J. M. Kim, Y. T. Kim, J. T. Lee, S. Y. Lee, "Performance characteristics of Hydrogen Fueled Engine with the Direct Injection and Spark Ignition System", SAE 952488, pp. 162-175, 1995.
- 3) J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. W. Lee, "An Investigation of a Cause of Backfire and its Control due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine", ASME, ICE-Vol. 34-3, pp. 23-30, 2000.
- 4) Y. Y. Kim, T. H. Ryu, J. T. Lee, "Backfire Occurrence by Abnormal Electric Discharge In Hydrogen Fueled engine", Trans. of the Korea Hydrogen Energy Society, Vol. 13, No. 1, pp. 65-73, 2002.
- 5) T. C. Huynh, J. K. Kang, K. C. Noh, J. T. Lee, "A Study on Performance and Combustion Characteristics for Valve Overlap Period Variation in a Hydrogen-fueled Engine with External Mixture", KSAE 07-S0304, pp. 1936-1941, 2007.
- 6) K. J. Lee, T. C. Huynh, J. K. Kang, J. T. Lee, "Back-Fire Control of a Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture by Using Intake Valve Opening Timing", KSAE 08-S0098, pp. 600-605, 2008.
- 7) J. K. Kang, T. C. Huynh, K. C. Noh, J. T. Lee, J. H. Lee, "A Development and Basic Characteristics of MCVVT Research Hydrogen Engine for Practical Use of External Mixture Hydrogen-Fueled Engine", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 17, No. 3, pp. 255-262, 2006.