



Heavy-duty HCNG엔진의 연소 및 배기성능 최적화에 관한 연구

†최 영 · 박철웅 · 원상연 · 김창기

한국기계연구원

(2011년 3월 1일 접수, 2011년 4월 25일 수정, 2011년 4월 25일 채택)

A Study on the Optimization of Combustion and Emission Performance in a Heavy-duty HCNG Engine

†Young Choi · Chulwoong Park · Sangyeon Won · Changgi Kim

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, 305-343, Korea

(Received March 1, 2011; Revised April 25, 2011; Accepted April 25, 2011)

요 약

도심 대기오염을 줄이고자 도입된 CNG 버스는 현재의 배기규제 기준을 만족시켜 도시 대기환경 개선에 많은 기여를 했지만 추가적인 후처리 장치의 도움 없이는 차기 배기기준인 유로6 배기규제를 만족시키기 매우 어렵다. 수소는 매우 활발하고 빠른 반응성을 가지고 있으며 희박가연한계 또한 매우 넓어 기존 연료와 함께 사용 시 개선된 연소 및 배기성능을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시내버스용 대형 CNG 엔진에 수소를 일정 부분 CNG와 혼합한 HCNG 연료를 공급하여 희박연소를 시킴으로써 연소 및 배기성능을 개선하는 실험을 수행하였다. 수소혼합비율, 공연비, 점화시기 변화에 따른 연소 및 배기성능을 살펴보고 최적운전조건을 찾아내었으며 산화촉매 성능평가를 통해 11리터 버스용 HCNG 엔진의 상용화 가능성을 검토하였다.

Abstract - Although CNG is able to meet the current emission standards, it is expected to be impossible to satisfy the requirements of the next EURO-6 emission regulation without an additional after-treatment device. Hydrogen is known to be a gaseous fuel which features the wide flammability limit and the fast reactivity. A certain amount of hydrogen addition to CNG is able to extend the lean combustion range and produce lesser amounts of harmful emissions. In this research, the combustion and emission characteristics of HCNG(mixture of Hydrogen and CNG) fuel were experimented in an 11-liter heavy duty lean burn engine varying hydrogen contents, air-to-fuel ratio and spark timing. The optimization of this HCNG engine for a city bus was performed through the evaluations of oxidation catalyst characteristics.

Key words : hydrogen, CNG, heavy-duty HCNG engine, combustion, emission, lean burn

1. 서 론

천연가스는 연료로서 매우 청정하고 매장량 또한 매우 풍부하기 때문에 안정적이고 장기적인 공급이 가능한 석유 대체 에너지로서 많은 수요를 창출해내고 있다. 대기환경 개선과 다양한 에너지원의 활용을 위해 1990년대 이후 세계 각국은 석유를 대신하여 천연가스를 수송용 연료로 사용하기 시작했으며

2000년 이후에 세계적으로 천연가스 자동차의 보급이 급격하게 증가하였고 2009년도에 이미 천만대를 넘어선 것으로 보고되어지고 있다. 우리나라에서도 2002년 한·일월드컵을 계기로 도심지 대기환경을 개선할 목적으로 천연가스 버스의 보급을 지속적으로 확대해 왔으며 2010년 말 기준으로 2만5천대 이상의 천연가스 자동차가 운행 중에 있다. 현행의 배기규제를 만족시키기 위해 Heavy-duty(대형) CNG 엔진의 경우 희박연소를 이용하여 질소산화물(NOx)을 저감시키고 산화촉매를 이용하여 희박연소로 인해

†주저자:ychoi@kimm.re.kr

증가된 미연탄화수소(THC)와 일산화탄소(CO)를 저감시켜주는 전략을 사용하고 있다[1,2]. 하지만 현재 적용된 기술만으로는 수년 내에 발효가 예정되어 있는 차기 배기규제인 유로(EURO)6 기준을 만족시킬 수 없으며, 부가적인 후처리장치 없이 이와 같은 차기 배기규제 기준을 만족시킬 수 있는 대체 기술이 절실하게 요구되어지고 있다. 대형 CNG 자동차의 추가적인 유해배출물 저감을 도모할 수 있는 기술 중에서 가장 효과적인 기술로서 대두되고 있는 기술이 수소를 CNG에 일정비율로 첨가하여 이용하는 HCNG 기술이다[3~5]. 수소는 가스상태로 천연가스와 쉽게 섞을 수 있어 단일연료로 엔진에 공급이 가능하며 더욱이 일반적인 탄화수소 연료 중 탄소수 대비 수소수가 가장 많은 연료인 메탄을 스팀개질하여 얻을 수 있어 기존의 천연가스 충전인프라를 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 수소는 반응성이 매우 활발한 화학적 연소 특성을 지니고 있으며 가연한계가 매우 넓어서 초희박연소가 가능하고 소염거리가 매우 짧아서 쉼칭에 의한 미연탄화수소 발생을 최소화할 수 있는 장점을 보유하고 있다. 또한 수소는 매우 작은 점화에너지와 가지고 있으며 자발화온도도 매우 높고 화염전파속도도 빨라 불꽃점화 엔진에 적용이 용이하다[6,7]. 일반적으로 HCNG엔진은 CNG 연료에 수소를 일정량 첨가하고 수소로 인해 한층 증가된 희박한계를 이용한 초희박연소를 적용하여 유로6 배기규제 항목 중 가장 달성하기 어려운 항목인 질소산화물을 저감시켜 만족시키고 CNG엔진과 마찬가지로 희박연소로 증가된 미연탄화수소와 일산화탄소는 산화촉매를 이용하여 저감시킨다[8].

본 연구에서는 천연가스에 수소를 부피비로 10~40% 첨가한 HCNG 연료를 대형 CNG 엔진에 적용하여 공연비, 점화시기를 변화시켜가면서 연소 및 배기 성능을 살펴보고 연비와 질소산화물 저감 최적점을

찾아낸다. 또한 대상엔진의 연소 및 배기성능 최적화를 위한 산화촉매 성능평가를 수행한다. 궁극적으로 본 연구를 통해 HCNG엔진의 최적운전영역을 도출해내고 CNG 차량용 엔진 부품의 HCNG 적용 가능성과 개선점을 찾아낼 수 있을 것으로 기대된다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험을 위해 도심형 버스에 사용되는 6기통 11리터 천연가스 엔진이 사용되었는데 Table 1은 대상 HCNG 엔진의 주요 제원을 나타낸다. 이 실험 대상 엔진은 Schenck 와류식 동력계에 연계되어 벤치 테스트가 가능하도록 설치되었으며 개별적인 CNG와 수소 공급시스템이 연료를 공급하도록 구비되었다.

주연료인 천연가스는 약 200bar 정도로 압축된 압축천연가스 용기로부터 압력 레귤레이터에 의해 8bar로 감압 조절되어 유량밸브를 지나 믹서를 거쳐 흡기매니폴드로 공급되어진다.

이 때 천연가스 공급 유량은 여덟 개의 가스 인젝터로 구성된 유량밸브 계측모듈에 의해 제어되어진다. 압축된 천연가스가 레귤레이터에서 감압되면서 팽창할 때 발생하는 냉각현상을 방지하기 위해 열교환기가 설치되었으며 이 부분에서의 가스온도는 약 40°C로 유지되도록 구성하였다. 수소의 경우는 압력 조절기에서 8bar로 감압한 후 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 유량을 제어하면서 흡기관내로 공급하는데 이 때 흡기관의 상류에서 수소가 공급될 수 있도록 구성하여 공기와 수소가 일정한 조성으로 잘 섞여서 매니폴드로 공급되도록 하였다. 원래 HCNG 연료는 가스상태인 수소와 천연가스가 잘 혼합되기 때문에 기혼합된 형태로 제작, 저장하여 단일연료로써 공급할 수 있지만 현재 실험실 규모의 테스트를 위해 HCNG 연료를 기혼합하여 벤치 테스트용 엔진에 공급하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서 본 실험에서는 CNG와 수소를 각각 따로 공급하여 흡기관내에서 충분히 잘 혼합되도록 구성하였으며 각 매니폴드에서의 HCNG 조성이 일정함을 사전에 확인하여 실험의 정확성을 기했다.

천연가스 연료의 분사량과 분사시간, 점화시기는 ECS(Engine Control System)에 의해 제어되고 엔진 회전수와 엔진 부하는 동력계상에서 제어된다. 흡입공기 유량은 흡기 쓰로틀밸브 컨트롤러를 사용하여 제어되고 연료와 공기의 질량비율은 ETAS사의 LA4 Lambda meter를 사용하여 공기과잉률로서 계측하였다. 또한 배기관내에 가스 샘플링 프로브를 설치하여 이것을 HORIBA사의 MEXA 7000 시리즈 배기

Table 1. Test engine specifications

Bore (mm)	123
Stroke (mm)	155
Compression ratio	10.5
Displacement (cc)	11,050
Idle speed (rpm)	600 ± 50
Max. power	213 kW / 2,200 rpm
Max. torque	1,226 Nm / 1,260 rpm

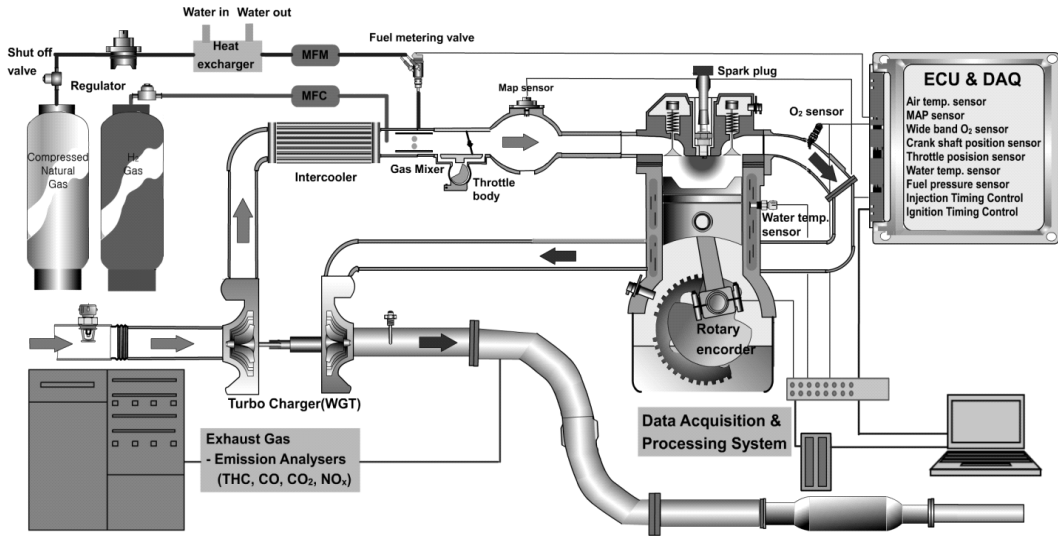


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

분석기에 연결하여 배기가스 성분을 측정 분석하였다. 이 배기분석장비에서는 NDIR(Non- Dispersive Infra-Red absorption) 방법을 이용하여 CO와 CO2를 측정하며 CLD(Chemil- uminescence Detector)를 이용하여 NOx를, FID(Flame Ionization Detector)를 이용하여 미연탄화수소(THC)를 각각 측정한다. 엔진 실린더 내에서의 연소 현상을 규명하기 위해 스파크플러그 타입의 압력센서를 장착하여 연소압을 실시간으로 측정하였다. 받은 연소압과 배기 데이터, 엔진제어 데이터를 이용하여 연소 및 배기현상을 분석하기 위해 실시간으로 많은 채널의 데이터를 처리할 수 있는 National Instruments사의 LabView 소프트웨어를 활용하여 데이터 획득 프로그램을 구성하였다. Fig. 1은 실험장치와 계측장비, 연료공급장치의 구성을 보여주고 있다.

2.2. 실험방법

HCNG엔진 희박연소 안정성 평가 및 연소와 배기 성능 최적화 실험조건은 가장 빈번하게 운행되는 운전 조건을 반영하여 결정되었는데 엔진회전수는 최대토크가 발생하는 1260rpm이며, 연소특성과 배기 특성시험은 최대 토크의 1/2인 600Nm 조건에서 수행하였다. 정확한 실험을 위해 실험 전 엔진이 충분히 워밍업되도록 하였으며 냉각수 온도제어시스템을 이용하여 냉각수의 온도가 $82.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 조절하였다. 본 실험은 HCNG엔진의 연소 및 배기성능 최적화와 그에 따른 실용화 검토를 주목적으로 하기

때문에 점화시기는 최대제동토크 (MBT, Maximum Brake Torque) 지점의 점화시기로부터 2~4CAD씩 점화시기를 지각시켜가면서 공기과잉률(λ)은 최고 효율의 안정적 희박연소를 보이는 공기과잉률로부터 0.1간격으로 증가시키면서 그 때의 연소 및 배기성능을 파악한다. 이 때 연소안정성의 척도로 쓰이는 평균제시유효압력(IMEP)의 COV 값이 3%를 초과하기 전까지만 주어진 공기과잉률에서 점화시기를 지각시키면서 실험을 수행한다.

HCNG 연료의 수소혼합비율은 부피비로 0~40%를 10%단위로 사용하며 HCNG엔진의 실용화를 위해 최적성능을 보일 것으로 예상되는 HCNG30의 연소 및 배기성능을 검증한다. 또한 점화시기 지각에 따른 산화촉매 전후단의 배출가스 성분을 비교하여 CNG 산화촉매의 기본성능을 파악한다. CNG 엔진과 부품의 HCNG 연료 적용성을 파악하기 위해 모든 실험은 100% CNG 연료를 사용한 경우와 비교하며 실험을 수행한다.

III. 실험결과

Fig. 2는 중속 중부하 조건인 1260rpm, 600Nm, MBT 조건에서 희박연소에 따른 연소 및 배기특성을 수소 혼합비 10~40%에 대해 보여주고 있다. 본 결과는 CNG 연료 사용 시를 기준으로 하여 정규화된 것으로서 CNG에 대한 HCNG 엔진의 희박연소 특성을 상대비교한 값이다. 수소첨가비율 30% 조건인 HCNG30

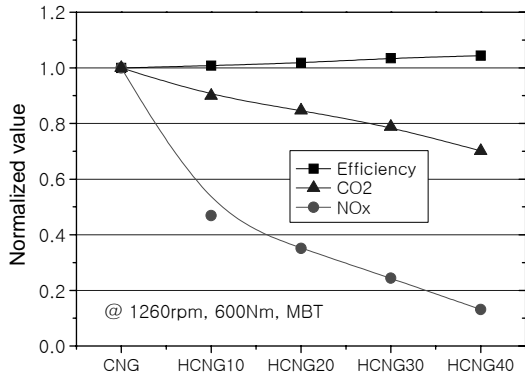


Fig. 2. Variations of efficiency, NOx and CO2 emission with different hydrogen contents of 0~40%.

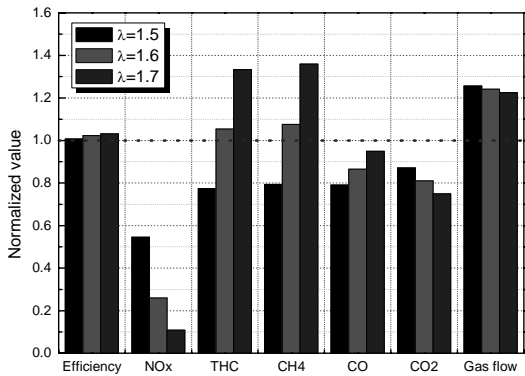


Fig. 3. Variations of combustion and emission characteristics for different λ with optimized spark timing retard.

에서 질소산화물은 75% 저감 가능했으며 이산화탄소는 22% 저감되었다. 또한 MBT 조건에서 점화시기 지각 실험을 통해 수소첨가비율 30% 일 경우 약 3% 이내의 효율상승분 희생을 통해 85%까지 질소산화물 저감이 가능함을 확인하였다.

통상 실제 적용에 있어서는 MBT조건을 사용하지 않고 희박가연한계보다 조금 농후한 조건에서 점화지각을 통하여 질소산화물을 저감한다. Fig. 3은 점화지각이 최적화된 CNG를 기준(100)으로 정규화하여 HCNG30에 대해 나타난 결과로서 중속 중부하인 1260rpm, 600Nm, 수소혼합비 30%, 각기 다른 공기과잉률 조건에서 점화시기를 MBT 시기에서 13CAD 까지 지연시켰을 경우에 대해 상대적으로 비교한 연소 및 배기성능값을 보여주고 있다. 질소산화물의

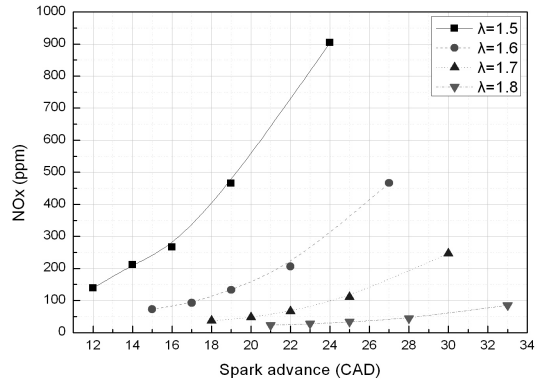


Fig. 4. Variations of NOx emissions for different λ with spark timing retard.

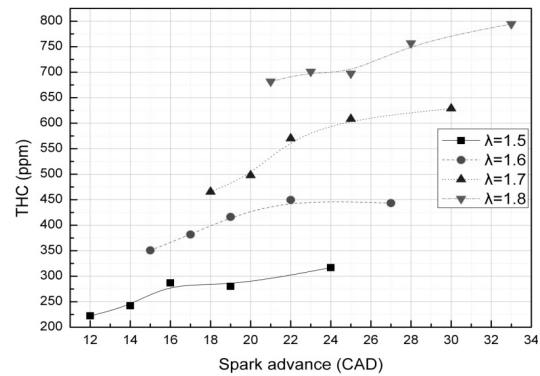


Fig. 5. Variations of THC emissions for different λ with spark timing retard.

경우 공기과잉률(λ) 1.6 일 때 0.79 g/kWh에서 공기과잉률 1.7 일 때 0.35 g/kWh로 감소하고 있는데 이와같이 공연비와 점화시기 최적화를 통해 질소산화물의 추가적인 저감이 가능하여 후처리 장치의 도움 없이도 차기배기규제인 유로6 기준치(0.4)를 만족시킬 수 있음을 실험적으로 규명하였다. Fig. 4는 수소혼합비 30%를 엔진에 공급했을 경우 각기 다른 공기과잉률에서의 점화시기 지각에 따른 질소산화물 저감효과를 보여주고 있다.

비록 희박할수록 NOx 저감량이 크지만 Fig. 5의 같은 조건에서의 미연탄화수소(THC) 배출특성 결과를 보면 질소산화물의 경우와 반대로 공기과잉률이 증가할수록 미연탄화수소의 배출이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 점화시기를 지각하면서 발생하는 효율저감을 극복하고 동시에 질소산화물 저감효과를 극대화시키면서 미연탄화수소의 배출 또한

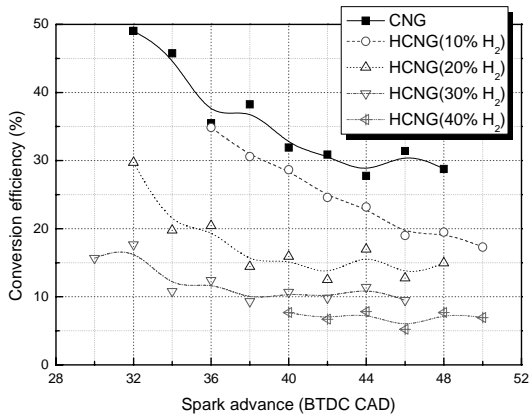


Fig. 6. Variations in THC conversion efficiency of oxidation catalyst for different hydrogen contents of 0~40% with spark timing retard.

산화촉매의 변환 범위내에 위치하기 위해서는 공연비를 약간 농후하게 가져가면서 점화시기를 MBT시기로부터 지각시키면서 최적의 점화시기를 찾아 최적화시키는 전략이 필요함을 알 수 있다.

다음으로 CNG와 HCNG 엔진에서 기존 CNG 산화촉매 사용에 따른 수소혼합비별 배출가스 저감 특성 실험을 수행하였는데 그 결과는 다음의 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 엔진 운전조건은 이전 실험과 마찬가지로 1260rpm, 600Nm에서 실험을 수행하였으며 각각의 수소혼합비에 따른 최고 엔진효율을 보이는 최적 공연비 조건에서 실험을 실시하였다(CNG λ =1.6, HCNG : H₂ 10% λ =1.7, 20% λ =1.8, 30% λ =1.8 and 40% λ =2.0).

Fig. 6 결과에서 볼 수 있듯이 수소혼합비가 증가할수록 미연탄화수소(THC)의 산화촉매 변환효율이 감소함을 확인할 수 있는데 이것은 수소혼합비가 높을수록 배기가스내의 메탄 성분비의 증가에 따라 나타난 결과이다. 수소혼합비 증가에 따른 희박연소에 의해 연소실 내에서의 연소온도가 낮아져 매우 안정한 분자인 메탄이 불완전연소 되기 때문에 메탄 성분비의 증가를 초래한 것으로 분석된다. 하지만 점화시기를 지각했을 경우 변환효율이 증가함을 확인할 수 있는데 이것은 배기가스의 온도 상승에 기인한 것으로서 점화시기 지각이 질소산화물의 저감과 더불어 산화촉매의 활성화에도 기여를 하고 있음을 보여주고 있다.

그럼에도 불구하고 추후 실용화를 위해 최적성분비로 고려하고 있는 수소혼합비 30%의 경우 여전히

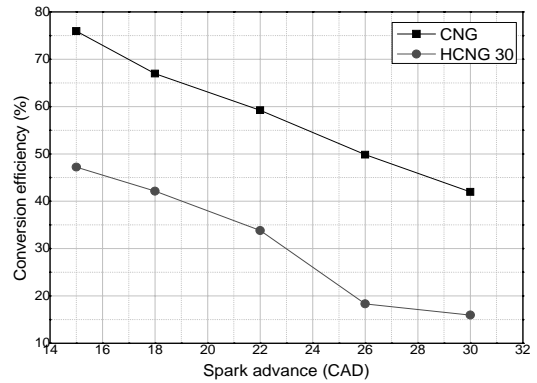


Fig. 7. Variations in THC conversion efficiency of oxidation catalyst for CNG and HCNG30 with spark timing retard at λ =1.6.

변환효율이 낮기 때문에 이에 대한 보완이 필요한데 이것 또한 공연비를 농후하게 가져가면서 점화시기 지각에 의해 상당부분 해소될 수 있을 것으로 기대된다. 아래 Fig. 7은 공기과잉률을 1.8에서 1.6으로 조절한 후 최적점화시기에서 10CAD 이상 지각시켜 배기가스 온도를 상승시켜 추가적인 THC 배출 저감을 가져오는 결과를 산화촉매의 변환효율로서 보여 주고 있다.

수소혼합비 30% HCNG 연료의 사용으로 배기가스 중의 메탄 성분이 CNG 연료만을 사용했을 경우에 비해 증가하기 때문에 촉매 변환효율이 감소되지만 점화시기의 지각으로 약 47%의 변환효율을 얻을 수 있었다. 또한 점화시기를 15CAD까지 지각함으로써 메탄의 배출을 최저 163ppm (0.49g/kWh) 수준으로 저감시킬 수 있어 유로6 규제치(0.5)를 만족시킬 수 있음을 보였다.

IV. 결론

시내버스용 6기통 11리터 가스엔진을 대상으로 CNG에 수소를 부피비로 10~40% 첨가한 HCNG 연료를 적용하여 연소 및 배기성능을 최적화시키는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수소첨가비 30%, MBT 점화시기 조건에서 안정적인 희박연소를 구현하여 질소산화물배출은 75%, 이산화탄소 배출은 22% 저감하였으며 점화시기 지각을 통해 85% 이상의 질소산화물 저감이 가능하였다.
2. 최적효율을 보이는 희박연소 조건보다 다소 농

후한 혼합기를 조성한 후 점화시기를 지각시킴으로써 추가적인 질소산화물 저감이 가능함을 실험적으로 규명하였으며 질소산화물 배출값이 추가적인 후처리장치의 도입없이도 차기배기규제인 유로6 기준을 만족시킬 수 있음을 보였다.

3. 수소혼합비가 증가할수록 배출가스의 메탄 성분비의 증가에 기인하여 미연탄화수소의 산화촉매 변환효율이 감소함을 확인하였으며, 다소 농후한 혼합기를 사용하고 점화시기를 지각시켜 배출가스의 온도를 상승시킴으로써 산화촉매의 변환효율을 높일 수 있음을 밝혔다.

후 기

이 연구는 환경부의 무저공해자동차사업단에서 지원하는 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

[1] K. Collier, N. Mulligan, D. Shin and S. Brandon, "Emission results from the new development of a dedicated hydrogen-enriched natural gas heavy duty engine", *SAE technical paper*, 2005, SAE 2005-01-0235

[2] R. Sierens, E. Rosseel, "Variable composition hy-

drogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions", *Trans. of ASME, J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, 2000, pp. 135-140

[3] M. Fanhua, W. Yu, L. Haiquan, L. Yong, W. Junjun and Z. Shuli, "Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 32, 2007, pp. 5067-5075

[4] A. S. Orhan, D. Zafer, K. Nafiz and V. T. Nejat, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixture", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 29(14), 2004, pp. 1527-1539

[5] P. Kavathekar, D. Rairikar, S. Thipse, "Development of a CNG injection engine compliant to EURO-IV Norms and development strategy for HCNG operation", *SAE technical paper*, 2007, SAE 2007-26-029

[6] C. Kukkonen, M. Shelef, "Hydrogen as a alternative fuel : 1993 update", *SAE technical paper*, 1994, SAE 940766

[7] 전홍신, 최영, "자동차공학", 도서출판 인터비전, 2007, pp. 598-610

[8] B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", *McGraw-Hill*, 1988