한국수소 및 신에너지 학회 논문집(2003.9), 제14권 제3호
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society (2003.9), Vol. 14, No. 3, pp. 276~282

중대형 수소-천연가스 기관의 수소혼합율 변화에 대한 연소 및 배기특성

임희수*, 김윤영*, 이종태**
*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

An Investigation of Combustion and EmissionCharacteristics in Heavy-Duty Hydrogen-CNG Engine

H. S. LIM*, Y. Y. KIM*, J. T. LEE**
**Grad. School of Sungkyunkwan Univ.*
***School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.*
300 Chunchundong Jangangu, Suwon, Gyeonggido, 440-746, Korea

ABSTRACT

A hydrogen enriched CNG engine can be stably operated at ultra lean condition and reduce emission extremely. It also has advantage to increase gradually the use of hydrogen for the coming hydrogen-energy age. In this studies, the combustion and emission characteristics of heavy-duty hydrogen-CNG engine were investigated to verify the enhancement of performance by enriched hydrogen into natural gas. The results showed that a hydrogen-CNG engine could achieve ultra lean operation and low emission, while power was reduced by the decrease of intake air flow.

주요기술용어 : Heavy-duty Hydrogen-CNG engine(수소-천연가스 중대형 기관), Ultra lean-burn(초희박 연소), COVimep(사이클변동계수), Low emission(저공해), Enriched hydrogen gas(수소 첨가)

1. 서 론

천연가스 동력시스템은 비교적 청정기관으로 유해배기가스 배출이 큰 시내버스등에 활발히 이용되고 있다. 천연가스 기관의 경우 향후 현재보다 80%이상 강화되는 중대형 차량의 배기가스 규제치를 만족시키기 위해서는 초희박 연소시스템의 도입이 필수적이다. 천연가스는 느린 연소속도와 좁은 가연한계 특성상 희박운전영역에서의

사이클 변동과 배기가스 배출이 증가한다[1,2]. 이에 반해 수소는 가연한계가 넓고 빠른 연소속도 특성을 갖고 있으므로 천연가스에 수소연료를 첨가시켜 사용할 경우 희박운전영역의 확장과 배기성능을 향상시킬 수 있다.

또한 수소-천연가스 혼합연료 동력시스템은 수소 이용율을 점진적으로 증가시킴으로 본격적인 수소에너지 시대에 대비한 기술적 완충역할을 할 수 있고 수소에너지에 대한 대중적 불신을 불식시킬수 있다.

본 연구에서는 수소-천연가스 혼합연료 중대형 동력시스템의 개발을 위한 기초연구단계로서 수소-천연가스 혼합연료의 수소 첨가에 따른 동력시스템의 연소 및 배기특성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 단기통 수소-천연가스 기관

Fig. 1은 제작된 수소-천연가스 중대형 단기통 기관의 실물사진을 나타낸 것이다. 단기통 기관의 주요제원은 Table 1에 나타낸다. 단기통 수소-천연가스 기관은 크게 크랭크 샤프트와 메인베어링 하우징을 포함한 크랭크 케이스부, 실린더 블록 및 플라이휠 부, 실린더 헤드 및 OHC 구동부와 오일공급장치 및 냉각계통으로 구성된다.

Table 1 Test engine specification

Bore	111mm
Stroke	139mm
Displacement volume	1345cc
Compression ratio	Typical 10.9
Number of cylinder	Single
Cooling type	Water cooling type
Valve system	Over head cam

제작된 크랭크샤프트는 반복적인 연소실내 폭발에너지에 의한 비틀림과 굽힘 모멘트, 회전시 발생하는 진동과 소음을 고려하여 완전밸런스로 설계 제작하였다. 실린더 라이너는 건식 라이너로서 2리터 용량의 워터 자켓이 설치된 라이너 슬리브에 장착하였다.

수소-천연가스 기관은 발화운전중 압축비를 변경할 수 있도록 캠축을 헤드 상부에 설치하는 over head cam 구동방식을 채택하였다. 캠은 실린더 헤드 위쪽에 설치된 캠하우징에 장착되며 캠축 지지부에는 볼 베어링을 삽입하였다. 캠축의 회전변위는 태핏에 의해 로커암에 전달되고 로커암의 움직임은 푸쉬로드를 거쳐 밸브를 구동한다. 태핏과 푸쉬로드의 마찰을 감소시키기 위해 윤활통로와 가이드부를 설치하였다.

오일 펌프에 의해 가압된 오일은 오일 필터를 거쳐 메인 베어링 하우징, 크랭크샤프트, 커넥팅

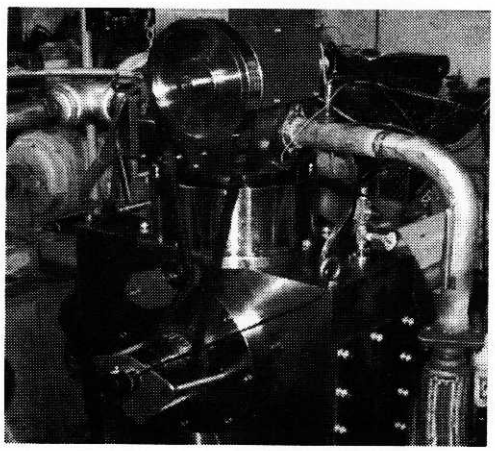

Fig. 1 Photograph of test engine

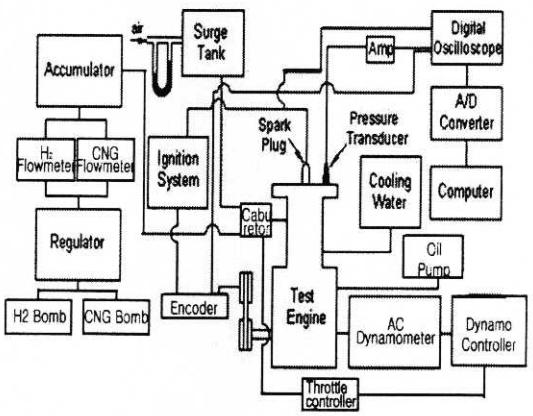

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2 Hydrogen and CNG fuel properties

구 분	H_2	CH_4
Density, kg/m³	0.083	0.79
저위발열량, kcal/kg	28700	11900
이론 공기연료비(weight)	34.3	17.2
가연한계(당량비, ϕ), %	4(0.7)~75(7.1)	5.3(0.5)~15(1.6)
층류화염속도, cm/sec	170	42
단열화염온도, K	2384	2227

로드 대단부, 로커암 등의 구동부위로 공급된다. 피스톤부의 냉각과 윤활을 위해 별도의 오일 자켓을 설치하여 피스톤 내부로 오일이 공급되도록 하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 단기통 수소-천연가스 기관, 혼합연료 공급 계통, 흡기 및 배기계통, 냉각계통, 동력측정 장치와 기타 계측장치 등으로 구성된다.

수소-천연가스 연료 공급은 고압으로 충전되어 있는 고압가스 봄베로부터 공급된다. 연료의 공급압력은 1차 감압기에서 30bar로 감압된 후 각각의 수소, 천연가스 유량계를 거쳐 압력 조절기에서 4 bar로 일정하게 유지된다. 흡기관의 전방에는 약 200 리터 용량의 서어지 탱크를 설치하여 맥동현상을 최소화하였다. 흡입공기량은 서어지 탱크 상부에 설치된 laminar flowmeter로 측정하였다. 배기관 후방에는 람다센서와 배기가스 분석계를 설치하였다. 냉각수는 실린더 헤드와 실린더 블록에 독립적으로 순환한 후 배출되도록 제작하였다.

수소-천연가스 기관의 출력축에는 동력계를 직결하였다. 연소실내 압력측정을 위한 piezo 타입의 압력변환기를 연소실 내부에 삽입하였다. 압력신호는 charge amp에 의해 증폭된 후, data recorder와 A/D 변환기가 내장된 컴퓨터로 입력되고 해석된다.

실험은 천연가스 연료에 수소를 첨가시킬 경우의 희박영역 확장 및 배기성능 개선효과를 파악하는 것이다. 기관회전수는 1400rpm, 냉각수 온도는 70℃로 고정하였다.

3. 수소-천연가스의 연료특성

Table 1은 수소와 천연가스의 연료특성을 비교하여 나타낸 것이다[3].

수소의 경우 연소실내로 유입된 윤활유에 의해 발생하는 미량의 CO, CO_2, HC를 제외하고는 탄화수소계 배기가스를 배출되지 않는다. 다만 수소의 높은 단열화염온도(2384K)에 의해 NOx 생성은 불가피하지만 희박연소를 시키는 경우 거의 문제가 되지 않는 것으로 보고되고 있다[4]. 천연가스는 탄소성분이 비교적 적어 가솔린과 경유등의 탄화계 연료에 비해 유해배기가스의 배출이 적다. 그러나 강화되는 배출규제를 만족할 수 있는 희박운전 영역에서 좁은 가연한계, 느린 연소속도 등으로 연소불안정이 초래되어 유해 배기가스가 증가하게 된다[5].

수소의 층류화염속도는 170cm/s로서 매우 빨라 질량이 작은데도 불구하고 난류화염속도가 비교적 빠른 특징이 있다[6]. 가연한계는 4~75% 정도로 매우 넓어 초희박 운전영역에서도 안정된 운전이 가능하다[7]. 그러나 수소의 넓은 가연한계와 작은 소염거리로 인해 고부하영역에서 종종 역화가 발생할 수 있다[8,9]. 천연가스의 층류화염속도는 40cm/s정도로 가솔린 연료에 비하여 빠르다. 그러나 연료의 질량이 작은데 따른 난류생성의 감소로 기관내의 난류연소속도는 오히려

가솔린을 포함한 다른 탄화수소계 연료보다 느린 경향이 있다. 따라서 천연가스 연료의 느린 화염속도는 희박운전영역에서 사이클 변동을 증가시킨다.

수소와 천연가스는 밀도가 작아 공급되는 연료의 비체적이 크다. 이에 따라 동일 실린더내에 수소와 천연가스를 각각 공기와 혼합 흡입시킨 경우의 발열량은 가솔린에 비하여 각각 15%와 7%정도 감소된다[10]. 그러나 수소 또는 천연가스 연료를 실린더내 직접분사 방식으로 공급한 경우 흡입공기량이 증대되어 출력은 가솔린의 경우보다 증대할 수 있다.

수소와 천연가스 연료는 상기와 같이 연소 및 배기가스 배출특성에 관한 장단점이 서로 상반되므로 천연가스에 수소연료를 첨가시킬 경우 희박운전영역 확장, 유해 배출물 감소, 연소효율 증대, 사이클 변동치 감소 등의 효과를 도모할 수 있다.

4. 수소첨가에 의한 연소 및 배기 특성

4.1 수소 첨가에 따른 연소 특성

Fig. 3은 기관회전수 1400rpm에서 단기통 천연가스 기관의 공기-연료 당량비 변화에 대한 출력을 나타낸다. 천연가스 기관의 토크는 공기-연료 당량비 λ=1 부근에서 최대치를 나타내며 이보다 희박 또는 농후해 질수록 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 공기-연료 당량비 λ=0.8 이하의 농후영역과 λ=1.4 이상부터의 희박 운전조건에서는 기관출력이 급격히 감소하고 λ=1.5 이상의 희박운전영역에서는 안정적인 운전이 어려운 것을 보인다.

천연가스 기관에서 정상적인 운전이 가능한 공기-연료당량비 영역을 보다 정확히 파악해보기 위해 상기 운전조건에서의 공기-연료 당량비 변화에 대한 사이클 변동을 조사하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 천연가스 기관은 공기-연료당량비 λ=1.43 조건에서 사이클 변동치가 약 12%정도로 더이상의 희박운전조건에서는 안정적인 정상운전이 어렵다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 천연가스 기관의 λ=1.8 이상에 해당

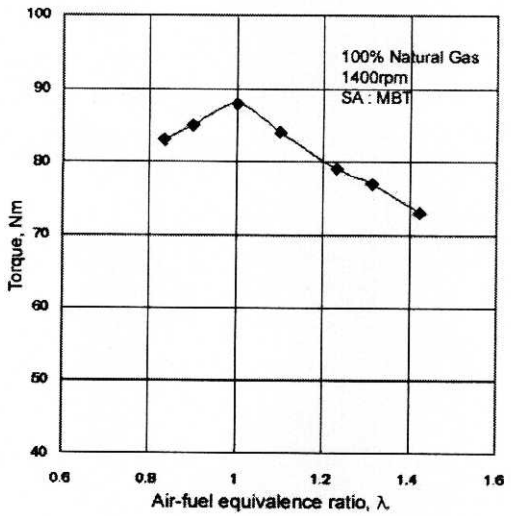

Fig. 3. Torque as a function of air-fuel equivalence ratio.

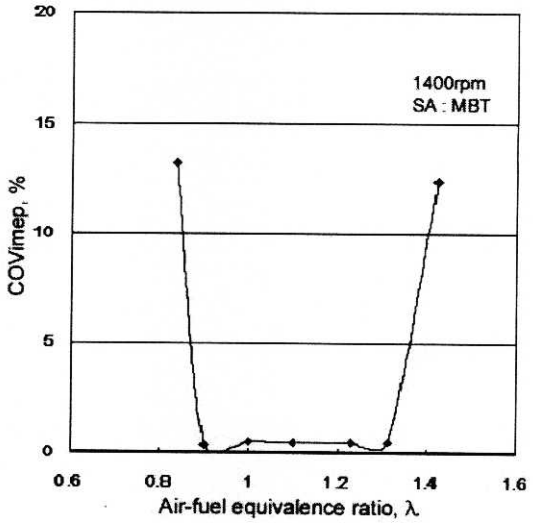

Fig. 4. Coefficient of variation at each air-fuel ratio.

하는 희박운전조건에서 수소가스 연료를 첨가한 경우의 사이클 변동을 나타낸 것이다. 여기서 수소가스 첨가량은 약 4.88mg/cycle 이다. 그림에서 보는바와 같이 천연가스 연료에 수소를 첨가한 경우 공기-연료당량비 λ=1.8~2.2의 희박영역에서도 1% 정도의 사이클 변동치를 나타낸다. 전술한바와 같이 천연가스만으로 운전한 경우 공기-연료당량비 λ=1.5이상에서는 정상운전이 어려웠지만 수소를 첨가한 경우 λ=2.2 이상에서도 안정적인 운전이 가능하다.

혼합연료의 연소특성을 파악해 보기 위해 천연가스만으로 운전한 경우와 혼합연료의 실린더내 압력선도를 비교하여 Fig. 6에 나타낸다. 여기서 수소첨가율 0%는 천연가스만을 사용한 경우이다. 수소를 첨가한 경우의 연소실내 압력은 천연가스만을 사용한 경우보다 다소 빠르게 상승하며, 실린더내 최고압력은 수소를 첨가한 경우가 천연가스만을 사용한 경우보다 약간 빠른 것을 나타낸다.

순수 천연가스만을 사용한 기관에서와 혼합연료 기관에서의 전체 연소기간을 Fig. 7

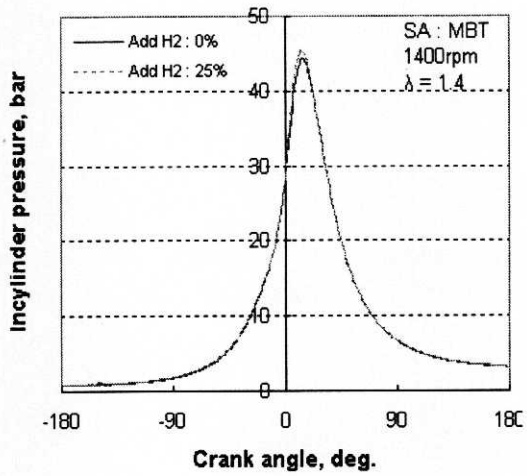

Fig. 6. Pressure curve with addition of hydrogen.

에 나타낸다. 여기서 공기-연료 당량비 λ는 1.4이며, 수소첨가율은 3.2%에 해당한다. 수소첨가율은 식(1)에 나타난바와 같이 전체 공급연료량에 대한 수소가스 공급량의 체적비로 정의한다.

그림에서 나타난 바와 같이 천연가스에 수소가스를 소량 첨가한 경우의 전체연소기간이 천연가스만으로 운전한 경우보다 다소 감소하는

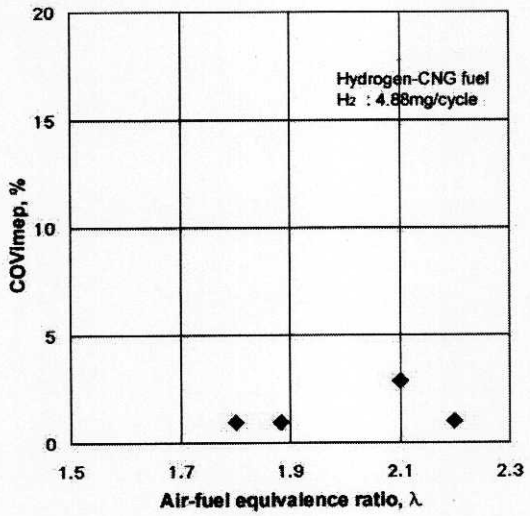

Fig. 5. Coefficient of variation at each air-fuel ratio.

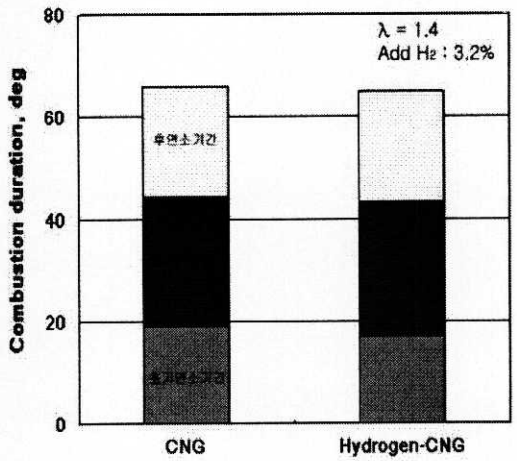

Fig. 7. Combustion improvement by using hydrogen-CNG fuel.

$$\text{수소첨가율}(\%) = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{CH_4}} \quad (1)$$

것을 알 수 있다. 전체연소기간 중 주연소기간과 후기연소기간의 경우 비슷한 기간을 나타내지만 수소-천연가스의 초기연소기간이 천연가스에 비해 뚜렷이 감소한다. 수소-천연가스 혼합연료의 초기연소기간이 천연가스 보다 빨리 진행되는 것은 수소의 빠른 연소특성과 넓은 가연한계 특성에 의해 초기화염의 성장이 촉진되었기 때문으로 파악된다.

4.2 수소 첨가에 따른 배기특성 개선 및 출력 저감 문제

Fig. 8은 수소-천연가스 혼합연료와 천연가스의 배기특성을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 혼합연료의 공기-연료 당량비는 각각 λ=1.45, λ=2.2이며 수소첨가율은 3.2%, 10.4% 기관회전수는 1400rpm이다.

천연가스만으로 운전한 경우 희박운전에 따른 기관운전의 불안정성에 기인하여 HC는 960ppm, CO는 1.02% 정도로 다소 높은 것을 보인다. 천연가스에 수소연료를 첨가시킬 경우 수소첨가

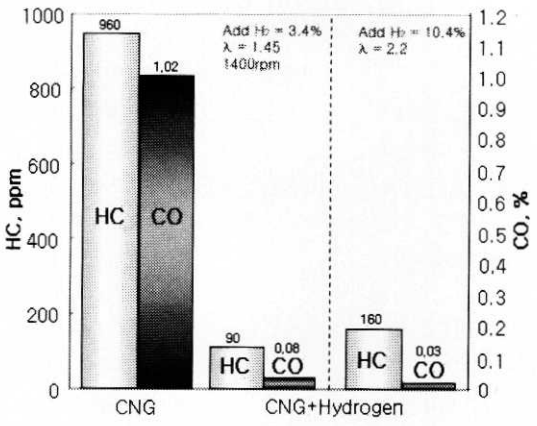

Fig. 8. Emission characteristics of hydrogen enriched CNG engine.

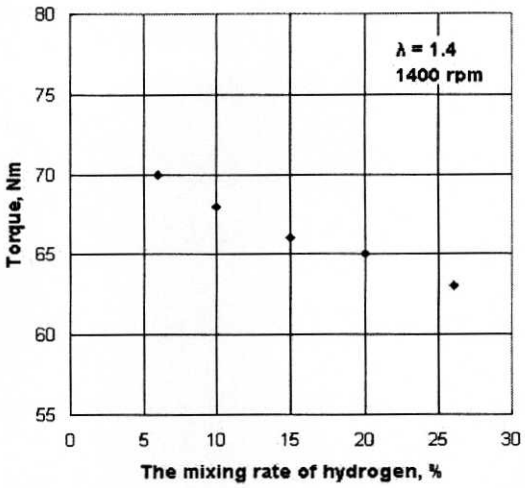

Fig. 9. Torque as a function of the mixing rate of hydrogen.

율 3.2%에서 HC 90ppm, CO 0.08% 정도로 감소된다. 또한 연료-공기당량비 λ=2.2와 수소첨가량 10.4% 조건으로 운전한 경우 혼합연료의 HC는 160ppm, CO는 0.03% 정도로 공기-연료 당량비 λ=2.2 부근의 초희박영역에서도 수소-천연가스의 배기성능이 우수함을 알 수 있다.

수소-천연가스 혼합연료의 배기특성이 우수하게 나타나는 것은 천연가스에 수소연료를 첨가시킴에 따라 연료중 탄소성분의 감소와 함께 혼합기의 연소가 촉진되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 공기-연료 당량비 λ=1.4, 기관회전수 1400rpm의 조건에서 수소첨가율 증가에 따른 수소-천연가스 기관의 토크를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 수소 첨가율이 증가할수록 출력은 감소하는 경향을 나타낸다. 천연가스 연료에 일정량의 수소를 첨가시킬 경우 희박영역이 확장되고 배기특성이 우수해지지만 수소연료(H_2)의 경우 천연가스(CH_4)에 비해 단위체적당 질량비는 1/8정도로 작고 동일 행정체적 조건에 대해서 체적비는 오히려 2배가 더 큰 특징을 가지고 있다. 따라서 수소첨가율 증가에 따라 흡입되는 공기량이 감소하게 되어 Fig. 9와 같이 토크가 감소된다.

이와 같이 수소-천연가스 혼합연료 기관에서 수소 첨가량이 증가함에 따라 희박영역확장 및 배기성능의 개선이 가능하지만 출력 저감과 역화가 발생할 수 있으므로 추후 최적 혼합율과 적정분사방식에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

수소-천연가스 중대형 단기통 기관에 대하여 수소 첨가율 변화에 대한 연소 및 배기특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천연가스 연료로 연소시 공기-연료 당량비 λ =1.4이상에서의 희박운전 조건에서는 정상적인 운전이 불가능하지만 수소를 소량 첨가함으로써 λ=1.8~2.2이상의 희박운전 영역에서도 정상적인 운전이 가능하다.
2. 수소-천연가스 혼합연료 기관에서의 배기특성은 천연가스 연료에 수소를 첨가시킬 경우 혼합기의 연소가 촉진되어 천연가스 기관보다 CO와 HC의 배출특성이 현저히 감소한다.
3. 수소 첨가량을 증가시킴에 따라 수소연료의 큰 비체적에 의해 흡입 공기량의 감소로 출력이 감소하는 경향을 나타낸다.
4. 따라서 수소-천연가스 동력시스템의 개발을 위해 희박운전의 안정성, 배기성능, 출력 및 이상연소 등을 고려한 최적분사율과 적정분사방식의 결정이 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지 · 자원 기술개발사업 및 계명대학교의 저공해자동차 부품기술개발센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1) Shoichi Furuhama, "Trend of Social Requirement and Technological Development of Hydrogen-Fueled Automobiles", JSME Review, vol.13, No.1, 1991, pp.4-13.
2) Joseph G. Finegold et. al, "The UCLA Hydrogen Cat : Design, Construction, and Performance", SAE730507, pp. 1626-1637.
3) Ennio P. Silva, Waldyr L. R. Gallo, Jaime Szajner Edurado G. Armaral, Carlos R. Bezerra, "State of the Art in the Use of Hidrogen as a Automotive Fuel", SAE 931706
4) J. Futon, F. Lynch, R. Marinara, B. Wilson, "Hydrogen for Reducing Emissions from Alternative Fuel Vehicles", SAE 931813
5) Per Tunestal, Magnus Christensen, Patrik Einewall, Tobias Andersson, Bengt Johansson, Owe Jonsson : "Hydrogen Addition For Improved Lean Burn Capability of Slow and Fast Burning Natural Gas Combustion Chambers", SAE 2002-01-2686
6) 김윤영, 강정호, 이종태, "고출력 저배기 CNG기관의 개발을 위한 실린더내 직접분사방식의 검토", 한국자동차공학회, 추계학술대회 논문집, 2001. 11, pp. 196-202.
7) 이종태, "수소기관의 개발현황 및 특성", 한국자동차 공학회지 Vol.18, No.2, 1996, pp. 29-52.
8) 이창욱, 백성호, 이종태, "수소기관의 역화방지에 관한 기초연구", 한국에너지기술연구소, 제11회 에너지절약워크샵, 1996. 11, pp. 217-230.
9) 최한규, 김윤영, 이종태, "고효율 고성능의 이중분사식 수소기관 개발에 관한 연구(흡기관 분사영역 확장을 위한 역화 억제의 검토)", 한국수소 및 신에너지학회, 춘계학술대회초록집, 1999.5, pp. 107-116.
10) 이종태, "직접분사식 천연가스기관의 개발을 위한 수소기관 개발기술의 접목", 한국가스학회, 가스산업과 기술, 2000. 5, pp. 32-46