

흡기중의 수소첨가가 산업용 디젤기관의 성능에 미치는 영향 박권하[†] · 이진아¹ · 이화순²

(원고접수일 : 2010년 6월 3일, 원고수정일 : 2010년 8월 18일, 심사완료일 : 2010년 9월 29일)

The Effect of Hydrogen Added into In-let Air on Industrial Diesel Engine Performance

Kweon-Ha Park[†] · Jin-A Lee¹ · Wha-Soon Lee²

요 약 : 디젤기관은 공기만을 흡입 압축한 후에 연료를 분사하여 연소하기 때문에 높은 압축비가 가능하다. 높은 압축비에 의한 고효율의 장점과 연료의 직접분사에 의한 매연미립자의 배출 및 질소산화물의 배출이 많은 단점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구들이 진행되었으며 수소를 흡기중에 공급하는 기술도 연구되고 있다. 본 논문에서는 미량의 수소를 연소실에 공급하여 엔진성능에 미치는 영향을 평가하였다. 토크와 엔진속도를 100%, 75%, 50%, 25%, 0%와 700rpm, 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm로 구분하여 실험하였다. 실험결과 질소산화물이 약간 증가하였지만 연료소비율, 스모크와 일산화탄소 배출은 감소하였다. 수소의 첨가는 저부하 영역에서는 효과가 거의 없었지만 고부하 영역에서 큰 효과가 있었다.

주제어 : 수소, 산업용디젤기관, 성능시험

Abstract: Diesel engines introduce only air into the cylinder, and the air is highly compressed. Fuel is directly injected into the combustion chamber in high temperature and pressure. Therefore diesel engines have high thermal efficiency because of the high compression ratio, while having high level of particulate matter and nitrogen oxide emissions because of the direct fuel injection. Many technologies have been developed to reduce particulate matter and nitrogen oxide emissions from diesel engines. One of the technologies is hydrogen fuel introduced into the combustion chamber with diesel fuel. In this thesis tiny amount of hydrogen is supplied into the combustion chamber in order to enhance the combustion performance. The engine, in which hydrogen is introduced, is tested. There are 20 test conditions given as 5 torque values of 100%, 75%, 50%, 25%, 0%, and 4 engine speeds of 700rpm, 1000rpm, 1500rpm and 2000rpm for the two cases with or without hydrogen addition. Maximum torques and Idle torques at each engine speed are measured, then the torque values are divided into 4 levels with 25% increasing step. The result shows that the fuel consumption, smoke, CO are reduced while the NOx emission is slightly increased, and the hydrogen addition has not a great effect on the performance at low loads but a great effect at a maximum load.

Key words: Hydrogen, Industrial diesel engine, Performance test

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4367)

¹ 한국해양대학교 대학원 기계공학과

² 한국폴리텍대학 자동차과

1. 서론

디젤기관은 공기를 흡입 압축하여 고온고압의 분위기를 조성한 후 디젤연료를 분사하여 연소시킴으로써 동력을 얻는 기관이다. 공기만을 흡입하기 때문에 고압축이 가능하고 높은 열효율을 얻을 수 있다. 그러나 연소실에 직접 분사되는 디젤연료의 완전연소가 어렵기 때문에 다량의 매연미립자가 배출되는 문제점이 있다. 배기문제를 해결하면서 디젤 고유의 높은 열효율을 얻기 위하여 많은 기술이 개발되고 있는데, 대체연료기술과 예혼합압축착화기술은 기존의 엔진에 비교적 쉽게 접근할 수 있는 기술로서 주목 받고 있다.

대체연료기술로서 DME(Dimethylether)는 탄소의 함량이 적고 산소를 포함하고 있는 합산소연료로 매연미립자의 배출이 거의 없으며[1], 매탄과 수소를 8 대 2의 비율로 혼합한 Hythane™ 연료도 사용되고 있다[2]. 탄소를 포함하지 않은 수소연료는 무공해연료로서 많은 연구가 진행되고 있지만 빠른 연소와 급격한 압력상승의 영향으로 연소실내에 공급이 어려운 문제 등이 있다. 그러나 빠른 연소는 정적연소 즉 정적사이클의 높은 효율을 기대할 수 있기 때문에 미래의 기술로서 받아들이고 있다[3-7]. 한편 디젤분사량을 최소화하면서 불꽃점화 가솔린 기관의 장점을 살리기 위한 예혼합압축착화(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진에 대한 연구가 차세대기술로서 개발되고 있다[8]. 희박한 혼합기를 흡입하여 압축한 후 최소한의 연료를 분사시켜 점화원으로 사용함으로써 질소산화물과 매연미립자의 배출을 동시에 저감할 수 있는 기술이다. 상기의 두 기술인 대체연료기술과 예혼합압축착화기술을 융합하고자 하는 연구로서 최[9]는 디젤기관의 흡기와 함께 수소를 주입하여 예혼합압축하고 디젤연료를 분사시켜 연소를 시작하는 연구를 수행하였다. 그러나 연비와 배기배출면에서 좋은 결과를 얻을 수 없었다. 기존의 디젤기관 시스템의 개조 없이 수소만을 다량 첨가하는 경우 점화시기나 연소실 형상 등이 수소를 적절히 연소시키는 데에 부적합했던 것으로 판단된다.

탄화수소계연료(CnHm)의 연소에서 초기 활성기인 수소이온 또는 수산화이온 등이 발생하는 연소시작반응 기간이 전체 연소의 상당 부분을 차지하며 탄소고리를 공격하여 연소 속도를 증가시키는 역할을 하기 때문에, 연소성능의 향상을 위해서는 이 기간의 단축이 매우 중

요한 역할을 한다. 본 논문에서는 전기분해할 때 발생하는 산소 및 극미량의 수소를 연소실에 공급하여 디젤연료의 연소촉매로 사용하였으며, 수소의 공급량을 디젤분무 액적 표면분자수의 5%정도가 되도록 설정하였다. 기존의 상업용 디젤기관에 수소발생장치를 장착하여 수소를 공급하면서 성능실험을 수행하여, 미량의 수소공급이 디젤기관의 연소 및 배기에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장치 및 조건

Figure 1은 사용된 수소발생장치이다. 24V의 전압을 공급하고 컴퓨터와 연결 후 발생 전류를 조절하여 수소의 발생량을 제어한다. 입력 전류의 최대값은 16A 이고 압력이 1.3bar 이상이면 수소가 공급되기 시작한다.

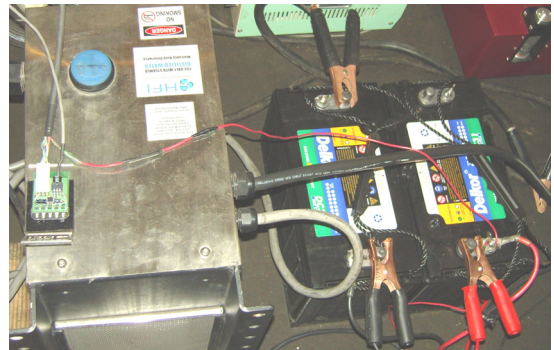


Figure 1: Photo of the hydrogen generator

실험엔진의 사양은 3.3리터 4 실린더 산업용 디젤 기관으로 상세한 제원은 Table 1과 같다.

Figure 2는 실험장치의 구성도이다. 수소발생장치를 터보차저 직전의 흡기관에 연결하였으며, 수소발생의 시작과 공급량은 컴퓨터에서 공급전력을 조절하여 제어하였다. 연료는 연료탱크에서 연료측정기인 400ml 유리관을 통하여 공급되었으며, 토크와 엔진회전수는 300마력 6000rpm용 수동력계를 사용하여 조절된다. 배기측정을 위하여 Testo350 모델의 가스분석계와 DS-330D 스모크미터를 배기다기관 후단에 연결하였다.

실험조건은 Table 2와 같이 최대토크를 4등분하여 0%, 25%, 50%, 75%, 100%에서 실험하였으며, 엔진회전수를 700rpm, 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm으로 구분하였다. 모든 경우에 수소의 공급량은 0.105g/min로 유지하였다. 이 량은 최대토크에서 공급되는 디젤연료의

0.1% 정도이며, 예혼합연소에 참여하는 디젤액적 표면 분자수의 5% 정도에 해당된다.

Table 1: Specification of the test engine

Type	Turbo diesel engine(D4AK-C)
Cooling method	Water cooler
No. of cyl. & arrangement	4-IN line
Valve mechanism	Overhead valve
Combustion chamber type	Direct injection
Bore × Stroke	100mm × 105mm
Total piston displacement	3,298cc
Compression ratio	16:1
Rated output (KSR 1004)	80/2400(ps/RPM)
Peak torque (KSR 1004)	25.5/1800(kg.m/RPM)
NO-load minimum speed	700~750 RPM
NO-load Maximum speed	2640±20 RPM
Firing order	1-3-4-2
Injection timing	16°±1°BTDC

Table 2: Test condition

Hydrogen (g/min)	Oxygen (g/min)	Percentage of torque	Speed (rpm)
0.105	1.68	Max(100%)	700
		75%, 50%, 25%, Idle(0%)	1000
			1500
			2000

3. 실험결과 및 고찰

디젤 연료의 0.1% 정도에 해당되는 극미량의 수소를 공급하여 연소촉매로 사용한 엔진성능실험의 결과는 다음과 같다.

3.1 최대토크

Figure 3은 수소공급 전후의 엔진회전수별 최대토크 변화를 나타낸 그래프 이다.

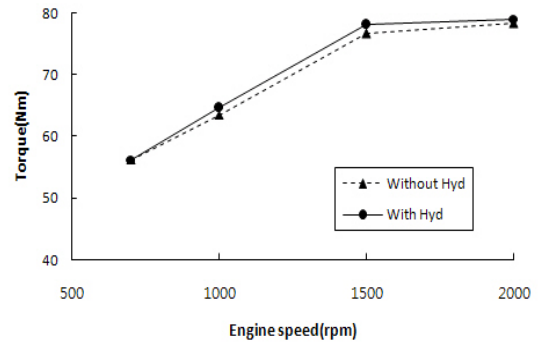


Figure 3: Maximum torque variation with hydrogen at 700rpm to 2000rpm

수소 공급후 최대토크가 700rpm에서는 변화가 없었으나 1000rpm에서 1.85%, 1500rpm에서 1.84%, 2000rpm에서 0.9% 증가, 평균 1.2%정도 증가되었다.

수소 공급이 상대적으로 많은 700rpm에서 토크가 증가되지 않은 것은 저속에서 수동력계가 더 이상 축을 잡아줄 수 없었기 때문으로 판단된다. 700rpm을 제외하면 최대토크의 증가량은 엔진속도의 증가와 함께 감소되는 것은 알 수 있는데 이는 디젤 연료공급량이 증가하면서 수소 공급율이 상대적으로 감소했기 때문으로 생각된다. 그러나 0.1%정도 공급된 수소의 양을 생각하면 매우 큰 향상을 보인 것이다.

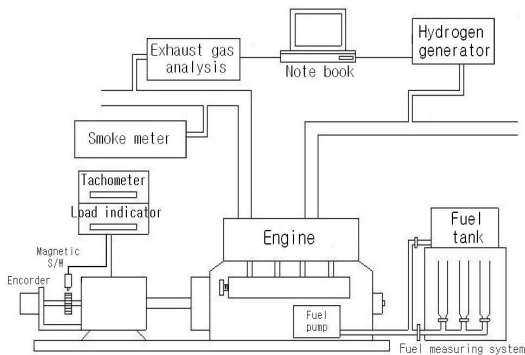


Figure 2: Experimental setup

3.2 연료소모율

연료소모율은 디젤연료의 공급량과 첨가된 수소의 디젤연료상당량을 더하여 계산되었다. 수소첨가 에너지를 고려한 디젤유 첨가 공급량은 다음과 같은 방법에 의하여 계산되었다.

수소의 질량유동율은 공급된 수소의 체적유동율을 기체상태방정식에 적용하여 다음 식과 같이 구한다.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

여기서 P는 대기압력으로 101,325N/m²이며, V는 공급된 수소의 체적으로 수소의 분당체적유동율이다.

수소와 디젤유의 발열량을 고려한 수소의 디젤유 상당 질량유동율은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\dot{m}_{H_2_{eq}} = \frac{LHV_{H_2}}{LHV_{Diesel}} \times \dot{m}_{H_2}$$

Figure 4는 엔진속도에 따른 연료소모율의 변화를 측정된 것으로 엔진속도에 따른 토크 100%, 50%, 0%에서의 측정값을 보여주고 있다.

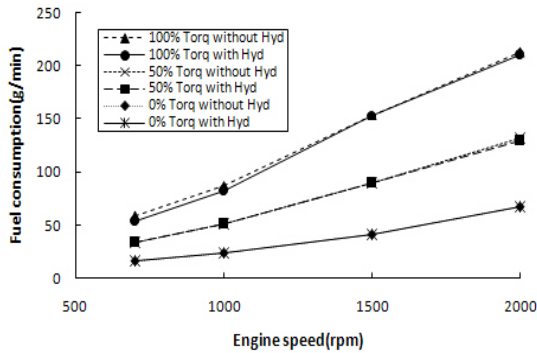


Figure 4: Comparison of fuel consumptions at torques of 0%, 50%, 100%

무부하 상태인 0%의 경우와 중간부하인 50%의 경우는 각각 0.5%와 0.9%의 미미한 연료소모율 저감을 나타내었지만, 최대토크인 100%에서는 평균 4.1%의 연료소모율 저감을 보여주었다. 저부하인 50%와 0% 토크영역의 경우 공급된 디젤유에 비하여 연소에 충분한 량의 산소가 공급되기 때문에 연소촉매로서의 수소 작용이 적었으며, 고부하인 100% 토크영역에서는 분사된 연료의 량이 증가되어 연소에 필요한 산소의 공급이 부족하며

연쇄반응을 시작하기 위한 조건이 부족한 상태에서 수소의 연소촉매역할이 연소활성화를 가져온 것으로 판단된다.

3.3 배기성분

3.3.1 스모크

Figure 5는 속도변화 및 부하 0%, 50%, 100%에서 스모크의 변화량을 나타낸다.

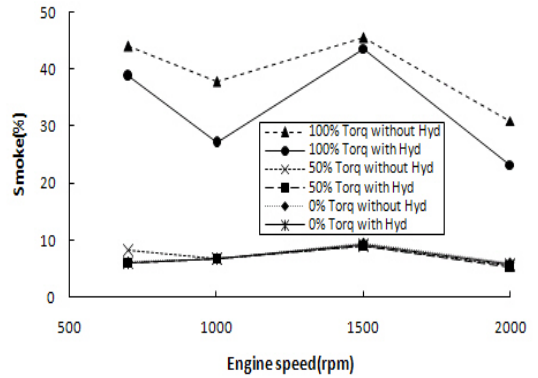


Figure 5: Comparison of smoke emissions at torques of 0%, 50%, 100%

토크 0%와 50%의 비교적 낮은 부하에서는 스모크의 배출이 10% 미만으로 낮은 상태이며 수소를 공급한 경우에도 각각 2.4%, 8.7%의 낮은 저감효과를 보여준다. 그러나 100% 토크의 경우에는 17.4%의 매우 큰 스모크 저감효과를 나타낸다. 이는 수소의 연소촉매효과가 산소가 부족한 영역인 최대토크에서 크게 작용한다는 것을 보여준다.

3.3.2 일산화탄소

Figure 6은 일산화탄소 배출량을 보여준다. 무부하 상태와 중간부하에서 배출량이 매우 낮은 값을 나타내며 최대토크에서 매우 높은 값을 나타낸다.

수소를 공급하였을 때 무부하에서는 평균 1.62%증가 되었으며, 50%와 100%토크에서는 평균치가 각각 2.86%와 10.89% 저감되었다. 무부하 상태에서의 일산화탄소 증가원인은 저온분위기에서 불완전연소가 많은 영역이기 때문에 수소와 함께 공급된 산소가 일산화탄소까지만 불완전 연소되는 영역을 증가시킨 것이 아닌가

생각되며 고부하 영역에서 감소한 것은 수소 연소활성화에 의한 영향으로 판단된다.

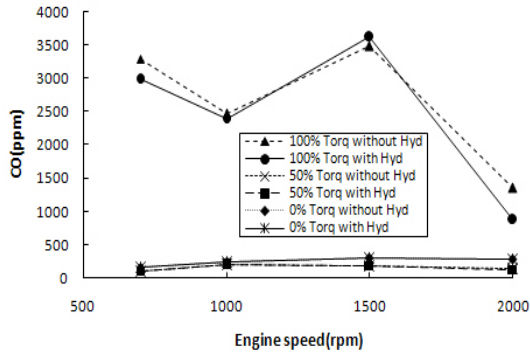


Figure 6: Comparison of CO emissions at torques of 0%, 50%, 100%

3.3.3 질소산화물

Figure 7은 토크와 엔진회전속도 변화에 따른 질소산화물 배출농도의 변화를 나타낸다. 모든 하중영역에서 증가와 감소가 혼조상태로 큰 변화는 없지만 무부하 상태와 중부하에서는 평균 2.22%, 1.0% 감소되었으며 최대부하에서는 1.3% 증가되었다. 이는 수소에 의한 연소 영역의 확산에 의한 연소온도저감과 수소연소촉진에 의한 국부적인 온도 상승의 영향이 복합적으로 작용한 것으로 최대토크에서는 연소촉진에 의한 국부적인 온도 상승이 더 큰 영향을 미친 것으로 생각된다.

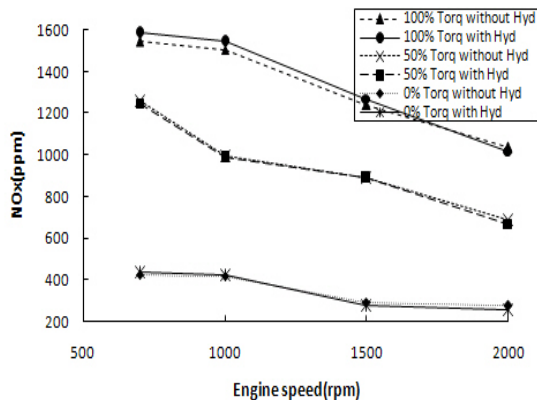


Figure 7: Comparison of NOx at torques of 0%, 50%, 100%

3.4 엔진부하변동에 따른 엔진성능

엔진속도 1000rpm에서 토크변화에 따른 연료소모율, 스모크, 일산화탄소, 질소산화물의 배출특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

3.4.1 연료소모율

Figure 8은 1000rpm에서 토크가 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 증가할 때 수소공급전후의 연료소모율을 측정하는 것이다. 수소공급후 0%부터 100%까지 토크가 증가될 때 연료소모율은 0.96%, 2.63%, 0.57%, 0.82%, 6.85% 저감되었다. 최대토크에서 큰 연비향상이 이루어진 것은 역시 산소가 부족한 영역에서 수소가 연소촉매로서 크게 작용한다는 것을 보여준 것이다.

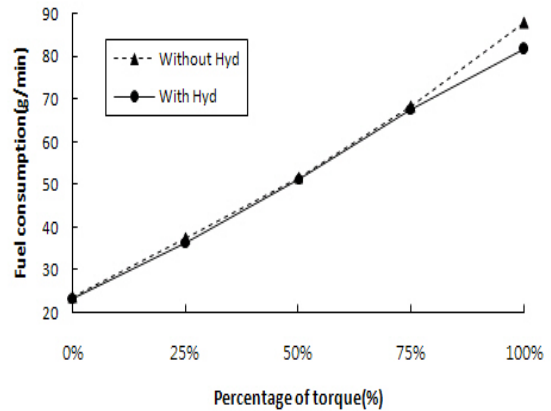


Figure 8: Comparison of fuel consumptions with/without hydrogen addition at 1000rpm

3.4.2 스모크

Figure 9는 1000rpm에서 부하변화에 따른 스모크 농도를 나타낸다. 엔진에 부하가 낮은 50%까지는 스모크에 변화가 없었으며 75%와 100%에서는 각각 1.10%, 28.63% 향상 되었다. 최대토크에서 큰 저감효과를 나타내고 있는데, 많은 연료가 분사되는 최대부하에서는 분사된 연료가 농후하게 분포하기 때문에 산소가 부족하여 수산화이온 등이 발생하는 연소의 시작반응이 지연된다. 하지만 수소 및 산소가 공급되는 경우에는 신속하게 탄소고리를 공격하는 경로가 발생되고, 이는 연소의 활성화와 연소시간을 단축시켜 미연소배출물을 줄이는 역할을 하는 것으로 판단된다.

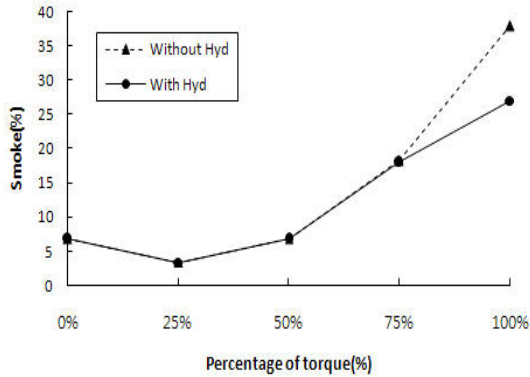


Figure 9: Comparison of smoke emissions with/without hydrogen addition at 1000rpm

3.4.3 일산화탄소

Figure 10은 토크변화에 따른 일산화탄소 농도변화를 나타낸다. Idle상태에서는 수소 공급후 오히려 일산화탄소의 함유량이 1.72% 증가 하였지만, 그 외는 1.88%, 0.50%, 3.34%, 3.12% 감소됨을 알 수 있다. 확산연소가 진행되는 디젤기관의 경우에는 항상 미연소 연료가 존재하고 동시에 불완전연소가스인 일산화탄소가 분포하고 있기 때문에 연소의 활성화가 일산화탄소를 줄여주는 것만은 아니다. 무부하의 저온 영역에서는 오히려 증가시키는 역할을 한다. 하지만 고부하에서는 연소의 후반에서 나타나는 이산화탄소의 생성까지 활성화가 진행되어 배출농도를 낮춘 것으로 판단된다.

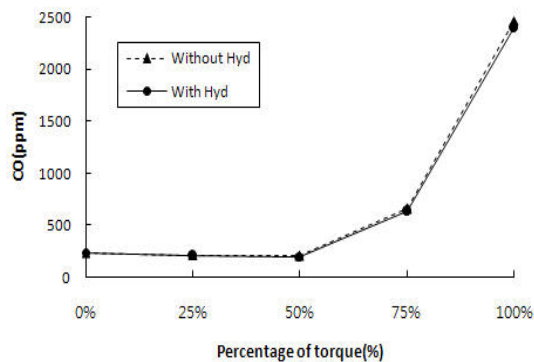


Figure 10: Comparison of CO emissions with/without hydrogen addition at 1000rpm

3.4.4 질소산화물

Figure 11은 토크변화에 따른 질소산화물 변화곡선을 보여준다.

수소공급후 무부하에서 0.70%의 질소산화물 저감이 있었지만, 토크의 증가와 함께 4.76%, 2.45%, 1.66%, 2.46% 증가 되었다. 질소산화물의 배출은 수소를 혼합하는 경우 조건에 따라 증감하지만 전반적으로 미량 증가된다. 이는 전술한 바와 같이 수소에 의한 연소확산증가에 의한 연소온도저감효과와 수소의 연소활성화에 의한 온도상승의 효과가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

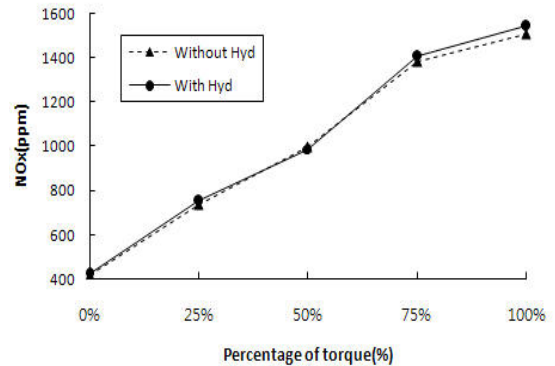


Figure 11: Comparison of NOx emissions with/without hydrogen addition at 1000rpm

4. 결 론

디젤기관에 미량의 수소를 공급한 경우의 엔진성능을 수소공급이 없는 경우와 비교한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1)최대토크:700rpm을 제외한 엔진회전속도에서 최대토크는 평균 1.5%의 증가를 나타냈다. 이 값은 수소 공급량이 디젤유공급량의 0.1%인 것과 비교하면 매우 큰 증가량이다.
- (2)연료소모율:75%이하의 부하에서는 연료소모율의 저감이 크지 않지만 최대부하에서는 평균 4.1%의 매우 큰 저감효과를 나타내었다. 이는 산소의 공급량이 충분하지 못한 최대부하영역에서 추가로 공급된 수소가 연소활성화에 크게 기여한 것으로 판단된다.
- (3)스모크: 연료소모율의 경우와 유사하게 낮은 부하영역에서는 큰 효과가 없으나 최대부하조건에서 평균 17.4%의 큰 저감효과를 나타낸다. 이는 흡기와 함께 공급된 미량의 수소가 연료 분사량이 많은 최대부하에서 연소활성화에 크게 기여한 것임을 나타낸다.

(4)일산화탄소: 무부하에서는 평균 1.62%가 증가되었고 최대부하에서는 10.89%감소되었다.

(5)질소산화물: 전 영역에서 큰 영향은 없었지만 무부하 상태와 중간부하에서는 감소되었고 최대부하에서는 증가되었다.

이상의 결과를 종합하면, 디젤기관에 미량의 수소를 촉매로 첨가하는 경우 저부하 영역에서는 큰 영향이 없었으며 고부하 영역에서는 연소활성화에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] H. Teng et al., "Compression ignition delay (Physical+Chemical) of dimethyl ether", SAE paper 2003-01-0759, 2003.
- [2] S.O. Akansi, Z. Dulger, N. Kahraman, T.N. Veziroglu et al., "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures.", International journal of hydrogen energy, vol. 29, pp. 1527-1534, 2004.
- [3] 이종태, 이성열, 이재천, 김용환, "수소엔진개발에 관한 기초연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 강연 초록집, pp. 59-63, 1988.
- [4] 이황복, 이석재, 한봉훈, 윤금중, "수소엔진의 연소특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회, pp. 137-142, 1995.
- [5] J.D. Naber and D.L. Siebers, "Hydrogen combustion under diesel engine conditions", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 23, no. 5, pp. 363-371, 1998.
- [6] Y.J Lee, "A trends development of hydrogen internal combustion engine vehicles", Auto journal, vol. 28, no. 3, pp.34~43, 2006.
- [7] J.H Lee, "A study on the hydrogen engine combustion characteristics", Auto Journal, vol. 28, no. 2, pp.26-33, 2006.
- [8] Fuquan, Z., Thomas, W. A., Dennis, N. A., John, E. D., James, A. E and Paul, M. N., "Homogeneous charge compression ignition engine," Society of Automotive Engineers,

PT94, pp. 151-154, 2003.

- [9] 최경호, "수소첨가에 따른 직분식 디젤기관에서의 연소 및 스모크특성에 관한 연구", 한국수소에너지학회지, pp. 23-29, 1997.

저 자 소 개



박권하(朴權夏)

1982년 성균관대학교 기계공학과(공학사), 1991년 UMIST 기계공학과(공학석사), 1995년 UMIST 기계공학과(공학박사), 1995년 - 1998년 한국기계연구원(선임연구원), 1998년 - 현재 한국해양대학교 기계정보공학부(교수). 관심분야: 기계공학, 연소, 내연기관, 나노냉각, 나노윤활



이진아(李陳珂)

2008년 한국해양대학교 기계정보공학부(공학사), 2010년 한국해양대학교 기계공학과(공학석사), 관심분야: 기계공학, 연소, 내연기관



이화순(李和純)

1988년 창원기능대학 자동차공학과, 1993년 대전공업대학교 기계공학과(공학사), 1997년 대전공업대학교기계공학과(공학석사), 2005년 한국해양대학교 기계공학과(공학박사), 1983년-1992년 한구도로공사(장비직) 1992년 - 1998년 한국산업인력공단(자동차과 교사), 1998년 - 현재 한국폴리텍대학 자동차과(부교수). 관심분야: 자동차공학, 연소, 내연기관, 대체연료, 나노윤활