

LPG 엔진에서 수소첨가에 따른 배기 성능과 열효율에 미치는 영향

Effects of hydrogen-enriched LPG fuelled engine on exhaust emission and thermal efficiency

jinho Kim, unglae Cho, gyeungho Choi
University of Keimyung

Absatact

The purpose of study is to obtain low-emission and high-efficiency in LPG engine with hydrogen enrichment. The test engine was named heavy-duty variable compression ratio single cylinder engine (VCSCE). The fuel supply system provides LPG/hydrogen mixtures based on same heating value. Various sensors such as crank shaft position sensor (CPS) and hall sensor supply spark timing data to ignition controller. Displacement of VCSCE is 1858.2cm³. VCSCE was runned 1400rpm with compression ratio 8. Spark timing was set MBT without knocking. Relative air-fuel ratio(λ) of this work was varied between 0.76 and 1.5. As a result, i) Maximum thermal efficiency occurred at λ value 1.0. It was shown that thermal efficiency was increased approximately 5% with hydrogen enrichment at same λ value. ii) Engine-out carbon monoxide (CO) emissions were decreased at a great rate under LPG/hydrogen mixture fuelling. iii) Total hydrocarbon (THC) emission was much exhausted in rich zone, same as CO. But THC was exhausted a little bit more in lean zone. iv) Finally, engine-out oxides of nitrogen (NOx) was increased with λ value 1.0 zone at a greater rate with hydrogen enrichment due to high adiabatic flame temperature.

Key word : VCSCE(Variable compression ratio single-cylinder engine : 가변 압축 단기통엔진), LPG(Liquefied petroleum gas : 액화석유가스), compression ratio(압축비), MBT(Maximum brake torque timing : 최적점화시기), λ (Relative air-fuel ratio : 공기-연료 당량비)

1. 서론

가운데 환경오염은 중대한 관심사로 부각되고 있다. 현재 사용중인 자동차 연료로서 CNG, LPG, 가솔린, 디젤 등을 들 수 있다. 이들은 기반 시설 및 안전성 측면에서 유리하지만 이들 연료는 탄소원자를 포함하고 있기 때문에 CO₂, CO, THC를 배출하는 것은 큰 단점으로 지적된다. 이러한 근본적인 문제를 해결할 수 있고 향후 ZEV(Zero emission vehicle)의 개발을 고려할 때 청정·대체연료 개발은 반드시 필요하다.^{1) ~ 3)}

이 문제의 해결책 중 한가지는 차세대 연료로서 각광 받고 있는 수소 연료를 사용하는 것이다. 수소는 연료에 탄소원자를 포함하지 않아 거의 무공해에 가깝기 때문에 탄소를 기본으로 하는 배기가스 저감에 탁월한 효과가 있다.⁴⁾ 또한 Table 1에 나타난 바와 같이 수소는 연소속도가 LPG보다 약 4배정도 빨라 거의 정적연소에 가깝기 때문에 엔진에 사용할 경우 열효율의 상승을 도모 할 수 있다. 그러나 약 400℃ 정도 단열화염온도가 높아 NO_x의 배출은 증대되며 고 부하 영역에서 역화가 발생하는 단점도 있다.

본 연구에서는 자동차용 연료로서 널리 사용되는 LPG연료에 같은 공급 발열량을 유지하며 수소 연료를 첨가한 LPG 엔진의 열효율 개선 및 배기가스 저감을 목적으로 하고 있다. LPG에 수소 연료 첨가는 수소 엔진보다 역화 문제를 완화시킬 수 있기 때문에 유리하며 LPG전소 보다 더 깨끗한 배기 조건을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이렇게 LPG 연료에 수소 첨가의 의미는 연료에 탄소가 차지하는 비율을 줄여 탄소계 배출물을 줄인다는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Table 1 연료 특성

구분	C ₄ H ₁₀	H ₂
저위발열량(MJ/Kg)	45.84	120
이론공연비	15.5	34.3
자기착화온도(℃)	585	450
가연한계	0.4 ~ 1.7	0.12 ~ 10.12
가스 밀도(Kg/m ³)	2.64	0.0899
단열화염온도(℃)	≈ 1990	2384
난류 연소속도(m/s)	≈ 0.4	1.7

2.1.1 VCSCE 설계 개념

가스 연료 사용에 따른 기초 성능 및 배기 성능을 파악하기 위한 기초실험 장치로서 VCSCE는 제작되었다.⁵⁾ 제작된 VCSCE는 디젤 6기통, 12ℓ를 단기통 엔진으로 변경해 전기점화기관으로 사용된다. 엔진을 제작하기 위한 중요한 설계 개념은 다음과 같으며 주요 제원을 Table 2에 나타내었다. i) 실린더헤드는 디젤 분사노즐 대신 스파크플러그를 삽입할 수 있도록 변경했으며 피스톤은 대야형(Bath tub)으로 가공했다. ii) 크랭크축은 디젤 6기통에서 단기통이 되도록 절단 가공을 했으며, 별도의 크랭크 케이스를 제작했다. iii)진동 및 각 가속도를 최소화하기 위해 밸런스 샤프트와 플라이휠을 제작했으며, 보다 정확한 엔진 성능을 파악하기 위해서 냉각장치와 윤활 장치는 외장형으로 했다.

2.1.2 주요 변경 부품

2.1.1의 설계 개념을 토대로 다음과 같이 주요 부품을 변경하였으며 상세한 내용은 다음과 같다.

2.1.2.1 실린더헤드

대형 디젤엔진의 연료분사노즐을 제거하고 M14 × P1.25의 스파크플러그를 분사노즐 자리에 탭 가공 후 장착하였다. 또한 냉각수의 유출을 막기 위해서 부싱 지지대를 설치하였다.

Table 2 VCSCE의 주요 제원

항 목		사 양
형 식		OHV
실린더 수		1
총 높이		1,020 mm
총 너비		440 mm
총 길이		720 mm
실린더 내경		130 mm
행 정		140 mm
배 기 량		1,858.2 cc
가변 압축 범위		7 ~ 14
흡기밸브	개	BTDC 18 °
개폐시기	폐	ABDC 50 °
배기밸브	개	BBDC 50 °
개폐시기	폐	ATDC 18 °
공 회 전 수		600 rpm
밸브 간극		흡기 - 0.4 mm 배기 - 0.6 mm
밸런스 샤프트 갯수		2개
커넥팅로드길이(중심간)		260mm

Fig.1은 실제 VCSCE의 실린더헤드에 스파크플러그를 삽입한 형상도를 나타낸다.

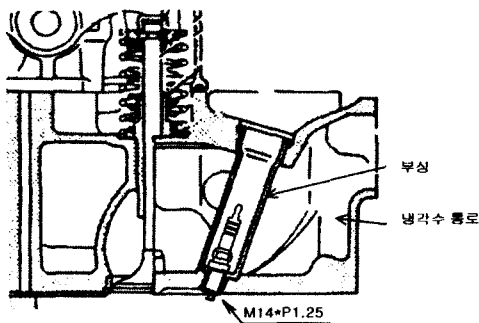


Fig. 1 VCSCE의 실린더헤드 형상도

2.1.2.2 피스톤

Fig. 2는 가공전후 VCSCE의 피스톤을 나타낸다. 직접분사 방식 대형 디젤엔진의 간극체적은 하트(heart) 형상을 한 크라운 부분이 대부분

차지하며 충분한 내구성을 확보한다. 이러한 피스톤 형상은 연소실내에서 액적의 디젤 연료와 압축공기의 원활한 혼합을 도모하기 위한 형상으로 되어있다. 그러나 가스 연료에는 피스톤 형상을 콤팩트(Compact) 하면서 가공이 쉽고, 압축말기에 스퀴시(Squish) 효과에 의해 혼합기 형성이 유리한 대야형(Bath tub)으로 가공하였다.

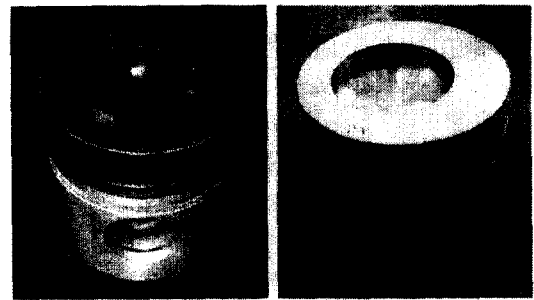


Fig. 2 가공전후 피스톤

2.1.2.3 플라이휠

크랭크축이 회전력을 얻는 것은 4행정 중 동력 행정 뿐이며, 그 밖의 행정은 전혀 회전력을 얻지 못하며, 압축행정의 경우는 반대로 크랭크축의 회전을 멈추게 하는 작용을 하여 주기적으로 회전 속도에 변동이 생긴다. 따라서 플라이휠은 운전 불능이 될 우려를 막고 회전속도를 고르게 하여 엔진의 작동을 원활하게 하기 위하여 설치하는 것이다. 플라이휠은 다음 수식에 의하여 설계하였다.⁶⁾

$$W = \frac{\xi \Delta E g}{\delta \omega R_0^2} \dots\dots\dots (1)$$

- W : 플라이휠중량
- ξ : 에너지변동율 - 1.3(4사이클단기통엔진)
- E : 에너지변동
- g : 중력가속도
- δ : 속도변동율 - 1/40 (일반동력기계용)
- ω : 평균각속도
- R₀ : 플라이휠의 평균반지름

2.1.3 실험장치

제작된 VCSCE에서 가스연료 사용 시 기본 성능과 배기 특성을 파악하기 위한 실험장치 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 기관의 회전수 및 부하를 조절하기 위해 플라이휠 쪽에 130KW 동력계를 연결했다. 또한 일반적인 센서를 엔진에 부착하여 오일온도, 냉각수온도, 배기온도, 흡기부압, 배기압력 등을 측정한다. 그리고 필요시에 엔진을 정지할 수 있도록 비상 스위치를 설치했다. 기관의 배기특성을 파악하기 위하여 호리바(Horiba) 사의 Mexa 9100DEGR 배기 분석기를 이용했다. 배기 분석기는 CO, CO₂, THC, O₂, NO_x를 기본으로 측정한다. 또한 엔진의 크랭크축 폴리에 CPS(Crank shaft position sensor)를 설치하고, 캠축 폴리에 홀 센서(Hall sensor)를 설치하여 이들로부터 출력된 신호가 Motec사의 점화제어장치에서 연산 후 연소실에 전기에너지를 공급함과 동시에 점화시기를 제어한다. 연료계는 LPG와 수소의 적절한 혼합이 되게 했고, 연료량 조절은 연료조절 장치(Duty drive)와 솔레노이드밸브(Solenoid valve)가 사용된다. LPG 연료 소모량을 중량 저울을 사용하여 측정했으며 중량저울의 분해능은 1g이다. 또한 수소 연료는 200bar로 완충된 고 순도 수소를 사용하여 압력조정기, 유량계, 긴급차단 솔레노이드 밸브, 역화방지기를 거쳐 흡기관으로 연료를 공급한다. VCSCE의 흡입 맥동을 줄이기 위하여 서지탱크를 흡기구 쪽에 설치하고, 냉각수와 오일은 외장형 펌프를 사용하여 성능에 민감한 기관의 동력손실을 최소화했다.

2.2 실험방법

모든 실험은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 실험을 하였다. 기관 회전수 및 부하는

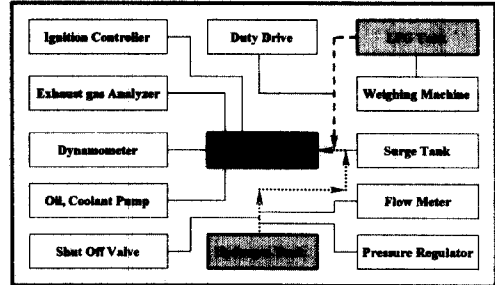


Fig. 3 실험장치 개략도

기관에 무리가 가지 않으며 최대 토크가 발생하는 회전수 및 부하를 채택했다. 압축비는 기관의 보어가 크므로 스파크플러그에서 정상 화염면에도 도달할 수 있는 거리가 멀어지게 되어 이상연소를 유발시킬 것으로 판단된다. 이렇게 기관의 이상연소를 최소로 할 수 있는⁷⁾ 기관 압축비 8에 설정했다.

기관이 정상작동 상태임을 파악하고 난 뒤 1차적으로 공기-연료 당량비(λ)가 0.8이 되도록 LPG만을 기관에 공급한다. 그 후 동일한 발열량이 되도록 LPG 연료를 감소시키고 점차적으로 수소 연료를 첨가시킨다. 이와 같은 방법으로 LPG 연료의 공기-연료 당량비를 0.8부터 1.5까지 0.1씩 증가시키고 그에 따라서 점화시기를 MBT가 되는 점화시기로 조정했다. 그러나 혼소시 최대 공기-연료 당량비가 약 1.3정도가 되는 것은 희박에 따른 LPG 연료의 감소 공급과 동일 발열량 기준에서 수소 첨가에 따른 LPG 감소 공급에 기인하여 LPG 연료 소모량 측정시간이 길어지므로 정량적인 값을 나타내기 어렵기 때문이다. Fig. 4는 보다 정확한 공기-연료 당량비를 측정하기 위한 플로우차트(Flow-chart)이다. Fig. 4에서 보듯이 목표 공연비와 LPG 연료의 소비량이 목표에 도달하지 않을 경우 듀티(Duty) 및 메인제트(Mainjet)를 조절을 하게 된다.

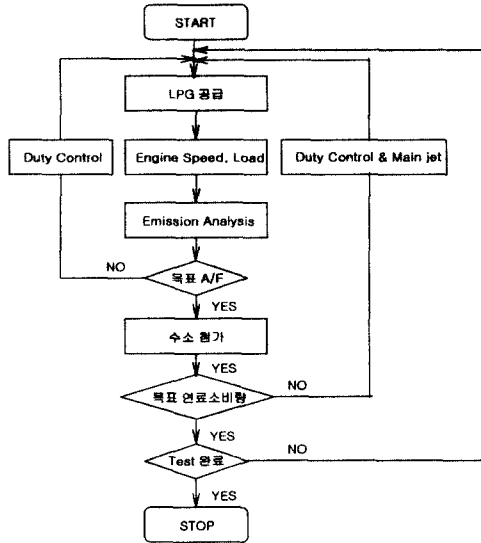


Fig. 4 LPG/수소 혼합시에 공기-연료 당량비 조절 flow-chart

3 실험결과 및 고찰

3.1 모터링 테스트(Motoring test)

기관을 모터링 시킬 때 크랭크 각도에 따른 측정압력과 이론 계산식을 이용하여 비열비에 따른 시뮬레이션 압력을 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 시뮬레이션을 통해 구해진 압력선도와 비교하였을 때 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다. 이것은 기관 제작 상 누설이 없다는 것을 나타낸다. 또한 상사점 전에는 약간 낮으며 상사점 이후에는 약간 높은 성향을 나타낸다. 이것은 모터링 시 흡입밸브의 닫힘이 하사점을 지난 이후에 이루어져 유효압축비가 이론압축비보다 낮아지기 때문인 것으로 생각된다.⁸⁾

3.2 CO 배출 특성

Fig. 6은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 공기-

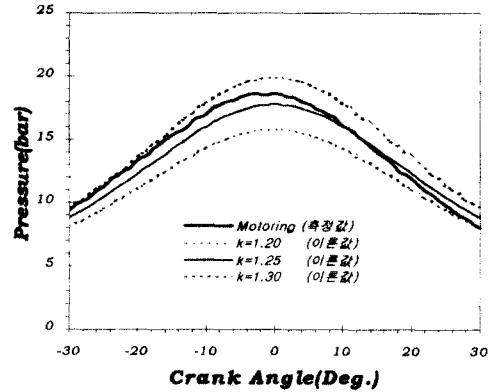


Fig. 5 Motoring한 VCSCE의 압력선도와 비열비에 따른 이론 압력 선도의 비교

연료 당량비($\lambda = 1/\phi$)를 0.76에서 1.5까지 증가

시켜감에 따라 CO 배출은 감소한다. 또한 수소를 첨가할수록 CO의 배출은 감소한다.⁹⁾ CO는 농후한 영역 즉, $\lambda = 0.8$ 부근에서 최대를 나타내고, $\lambda = 1.2$ 영역 이상에서는 거의 0(Zero)에 가깝다. 이것으로 보아 CO는 농후한 공기-연료 혼합기가 연료의 모든 탄소를 CO₂로 완전히 연소시키는데 충분한 산소가 부족하여 불완전연소되어져 다량 발생된다. 따라서 CO의 배출은 공기-연료 당량비의 함수로 표현되어 λ 에 크게 영향을 받는다고 판단된다. 게다가 수소 첨가에 따라서 연소 후 탄소계 성분인 CO의 배출은 감소한다고 생각되어진다.

3.3 THC 배출 특성

Fig. 7은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 THC의 배출 특성을 나타낸 것이다. THC의 단위 ppmc는 ppm의 3배이다. 공기-연료 당량비($\lambda = 1/\phi$)를 0.76에서 1.5까지 증가시켜감에 따라 THC의 배출 경향은 농후한 영역에서는 CO와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 희박 영역이 되면 오히려 배출량이 증가하는 것을 알

수가 있다.⁹⁾ 또한 수소 첨가에 따라서 농후한 영역에서 탄소계 배출물이 덜 배출된다. THC는 미연 연료공기 혼합기가 연소실내 틈으로 들어가 연소 시 틈 사이로 화염이 전파되지 못하여 불완전 연소된 가스가 팽창 및 배기 행정 시에 배출되는 특성으로 농후 혼합기일 때는 다량 배출된다. 또한 희박 혼합기일 때는 화염전파가 느리고 연소온도가 낮아 화염이 연소실 벽에 근접할 때 화염이 꺼져 THC의 배출이 증대되는 것으로 판단된다.¹⁰⁾

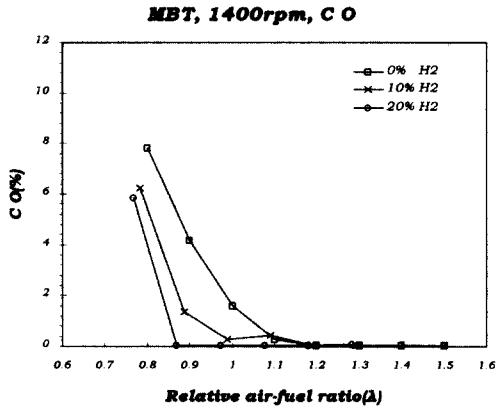


Fig. 6 수소첨가에 따른 CO 배출 특성

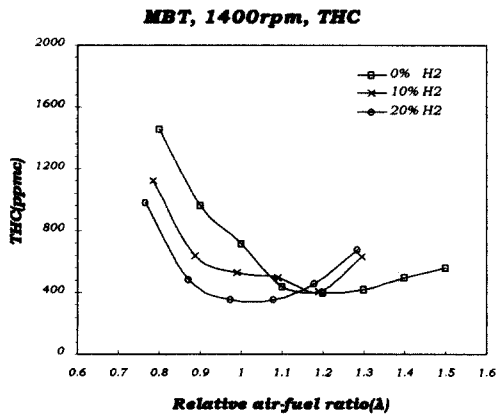


Fig. 7 수소첨가에 따른 THC 배출 특성

3.4 NOx 배출 특성

Fig. 8은 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 NOx의 배출 특성을 나타낸 것이다. 전체적인 경향은 $\lambda = 1$ 영역에서 최대가 되며, 배출물의 농도 수준에서는 수소 첨가 20%인 경우에서 LPG만을 연소시킬 때 보다 약 40%정도 상승됨을 보인다. 이것은 수소 연료의 특성상 급속한 연소가 이루어지며 연소실내 최고 온도와 압력이^{11) ~ 14)} LPG만을 연소시킬 때 보다 높아지기 때문인 것으로 판단되어진다.

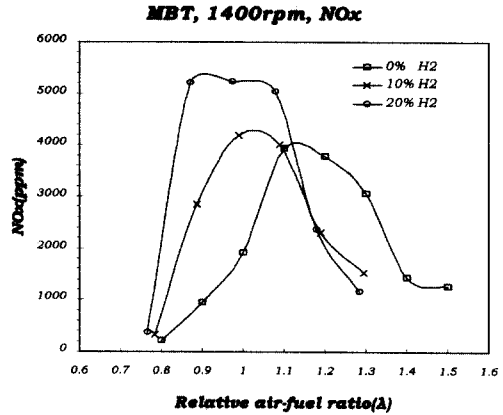


Fig. 8 수소첨가에 따른 NOx 배출 특성

3.5 연료소비율 및 열효율 선도

Fig. 9는 1400rpm, MBT, WOT, 압축비 8 조건에서 연료소비율 나타낸 선도이다. 열효율을 의미하는 연료소비율은 단위시간에 대한 질량유동율로서 사이클 당 흡입되는 연료량의 증가에 비해 제동출력의 증가가 큰 것으로 판단된다.¹⁵⁾ 수소 첨가에 따라서 LPG연료를 연소시킬 때 보다 연료소비율이 낮은 것은 수소의 연료 특성상 정적상태에서 빠른 화염전파속도에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 기관 열효율을 나타낸 선도이다. 기관 운전 조건은 동일하며 기관에 연료공급 시 동

일한 발열량을 기준으로 했다. 그림에서 보듯이 전체적으로 수소 첨가 시에 열효율은 상승됨을 보인다. 특히 $\lambda = 1$ 영역에서 기관의 열효율은 수소 20% 첨가시 약 5%정도 상승됨을 보인다. 이렇게 수소 연료는 순간적으로 연소를 완료시키므로 인해 열효율의 상승을 가져오는 것으로 생각되어진다.

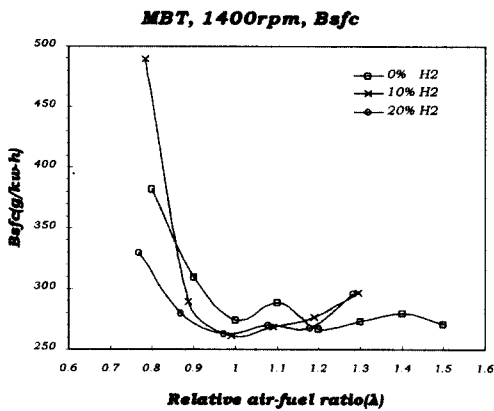


Fig. 9 수소첨가에 따른 연료소비율 선도

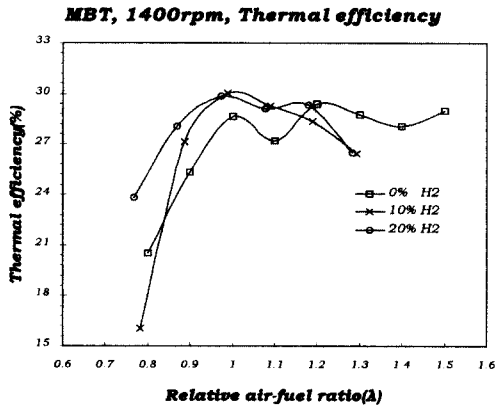


Fig. 10 수소첨가에 따른 열효율 선도

4. 결 론

본 연구에서는 LPG 연료에 수소 연료를 첨가

하여 배기가스 저감 및 엔진 열효율 상승을 도모하고자 한다. VCSE엔진을 제작하여 동일 발열량 기준으로 공기-연료 당량비 변화에 따라서 테스트한 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전형적인 실린더 압력선도와 시뮬레이션을 통해 구해진 압력선도를 비교하였을 때 유사한 경향을 나타낸다. 이것은 기관 제작 상 누설이 없다는 것을 나타낸다.

2) CO의 배출은 공기-연료 당량비의 함수로 표현되어 λ 에 크게 영향을 받아 농후하면 많이 배출된다. 특히 수소 첨가 비율에 따라서 CO의 배출은 낮아진다.

3) THC는 농후 혼합기일 때 다량 배출되며 또한 희박 혼합기 일때는 화염전파가 느리고 연소온도가 낮아 화염이 연소실 벽에 근접할 때 화염이 꺼져 HC의 배출이 증대된다. 특히 수소 첨가 비율에 따라서 THC의 배출은 낮아진다.

4) NOx의 배출 농도는 급속한 연소와 연소실 내 최고 온도의 영향으로 수소 첨가 20%인 경우 LPG만을 연소시킬 때 보다 약 40%정도 상승됨을 보인다.

5) 전체적으로 수소 첨가 시에 열효율은 상승됨을 보인다. 특히 $\lambda = 1$ 영역에서 기관의 열효율은 수소연료 20% 첨가시 약 5%의 열효율이 상승됨을 보인다.

이와 같이 LPG 연료와 수소 연료 혼소 연구에서 NOx를 제외한 배기가스 저감에 효과가 있으며 열효율 상승을 가져왔다.

후 기

"본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다."

참 고 문 헌

- 1) 이종태, 이성열, 이재천, 김용환, “수소엔진 개발에 관한 기초연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 강연초록집, pp.59 ~ 63, 1988
- 2) 이황복, 이석재, 한봉훈, 윤금중, “수소엔진의 연소특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp.137 ~ 142, 1995
- 3) R. Sierens, “Variable Composition Hydrogen/Natural Gas Mixtures For Increased Engine Efficiency and Decreased Emissions”, 성균관대학교, 2000
- 4) Alexandra Cattelan, Jim Wallace, “Exhaust Emission and Energy Consumption Effects from Hydrogen Supplementation of Natural Gas”, SAE 952497, pp.155 ~ 165, 1995
- 5) 이종윤, 김상만, 이종태, 이성열, “가변압축비 수소기관의 제작과 평가”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 강연초록집, pp.76 ~ 81, 1991
- 6) 박영조, “기계설계”, 보성문화사, pp.471 ~ 479, 1996
- 7) Tomas Kaelblein, Y. I. Jeong and K. T. Rhee, “Knock Effects on Spark-Ignition Engine Emission and Performance”, SAE 900712, 1990
- 8) Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke, “Fundamental of classical Thermodynamics”, John Wiley & Sons, Inc, pp.382 ~ 388, 1994
- 9) Heywood, J. B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”. New York : McGraw Hill, 1988
- 10) 이성열, “내연기관”, 보성각, pp.154, 1997
- 11) 권병준, 이종윤, 이종태, 이성열, “직접분사식 스파크점화 수소기관의 연소 및 성능 특성에 미치는 압축비의 영향”, SAE 933746, pp.17 ~ 26, 1993
- 12) H. C. Watson, L. C. Goldsworthy, and E. E. Milkins, “Cycle by Cycle Variations of HC, CO, and NOx”, SAE 760753, 1976
- 13) Edward F. Obert, “Internal Combustion Engines and Air Pollution”, Intext Educational Publishers, pp.349 ~ 367, 1994
- 14) Robert L. Hoekstra, Peter Van Blarigan, Neal Mulligan, “NOx Emission and Efficiency of Hydrogen, Natural Gas, and Hydrogen/Natural Gas Blended Fuels”, SAE 961103, pp.1 ~ 13, 1996
- 15) 이형승, 이석재, 이종화, 유재석, 김웅서, “흡기관 분사 방식 수소 연료기관의 성능 및 배출물에 관한 연구”, SAE 933747, pp.27 ~ 33, 1993