

CNG Dual Fuel 디젤기관의 성능과 배출가스 개선을 위한 수소혼합 실험

김복석* · 塩路昌廣**

*전남대 자동차연구소, **日本京都大學

Experimental Study to Improve the Performance and Emission of CNG Dual Fuel Diesel Engine Mixed with Hydrogen

Bok Seok Kim* and Masahiri Shioji**

*Automotive Research Center, Chonnam National University, **Kyoto University, Japan

요 약

본 연구는 기존의 디젤기관을 천연가스기관으로 전환하기 위하여 압축 천연가스를 예혼합흡입하여 압축 말에 경유를 분사시켜 압축착화하는 방식으로 운전되는 기관이다. 이 CNG Dual Fuel 디젤기관은 저당량비에서 연소하지 않은 탄화수소의 배출농도가 높은 것이 단점이다. 이를 개선하기 위한 방법의 하나로 천연가스에 수소를 혼합하여 기관의 성능향상과 배출가스를 줄이고자 실험을 실시한 결과 연소 효율을 높일 수 있었고 흡입 공기량을 WOT의 90%로 제어했을 때 열효율을 보다 향상시킬 수 있었다. 그러나, 착화 보조유인 경유의 분사시기의 진각으로, 노크한계 당량비는 감소하고 NO_x 생성은 증가하는 경향을 보였다.

Abstract— In this study, the performance and pollutant emission of CNG engine using diesel oil as a source of ignition, so called CNG dual fuel diesel engine is considered by experiment. One of the unsolved problems of the natural gas dual fuel engine is that there is too much exhaust of total hydrocarbon (THC) at a low equivalent mixture ratio. To fix it, a natural gas mixed with hydrogen was applied to engine test. The results showed that the higher the mixture ratio of hydrogen to natural gas, the higher the combustion efficiency. And when the amount of the intake air is reached to 90% of WOT, the combustion efficiency was promoted. But, like a case making the injection timing earlier, the equivalent mixture ratio for the knocking limit decreases and the produce of NO_x increases.

1. 서 론

오늘날 에너지 소비량의 증가로 환경오염의 심각성이 국제적으로 부각되고 있다. 그 가운데 석유계 연료의 사용에 대한 비율이 비교적 높은 운반용 기체의 공급이 확대되어 생활 환경오염의 심각성이 높아지고 있다.

환경 오염에 대한 규제가 국제적으로 강화되고 있고 우리는 이에 대응하여 대체에너지를 이용한 엔진개발의 필요성을 느끼고 있다. 그래서, 본 실험연구는 천연가스의 특성을 고려하여 비교적 배출되는 오염원이 적은 천연가스 Dual Fuel 기관의 실험을 실시했다. 이는 기존의 디젤기관을 약간의 변형을 통해 사용할 수 있다는 이점이 있고, 또한 배출가스를 저감할 수 있으면서 높은 당량비에서 디젤기관과 동등 이상의 성능을 갖는 기관

으로 개발이 가능하다는 장점이 있다.^{[1][2]} 그러나 이 기관의 문제점은 중·저 당량비에서 연소되지 않은 탄화수소(THC)의 배출농도가 높다는 것이다.^{[3][4]} 이를 개선하기 위해 국내외적으로 많은 연구보고가 있어왔지만 체계적인 실험을 통해 명확한 개발가능성을 제시하지는 못한 것 같다. 그래서 우리는 연료계통을 최적화하기 위해 plunger 직경을 변경해가면서 착화보조를 위한 소량의 경유를 안정적으로 분사할 수 있는 분사펌프를 선택하고, 실험기관에 최적인 경유의 분사노즐을 선택하기 위해 다양한 노즐에 대한 성능 및 배출가스에 대한 실험을 행한바 있다.^[5] 그 가운데 보다 우수한 특성을 갖는 분사노즐(분공 4개, 분공경 0.24 mm)을 가지고 여러 조건에서 그 특성을 파악했다. 그 가운데 본 실험 연구는 천연가스에 일정한 비율의 수소를 혼합(이하 hythane 이

라 명명함), 수소의 연소특성을 고려하여^{[7][8]} 엔진의 성능 및 배출가스 저감을 위해 실험을 수행했다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

실험기관에는 toroidal형 연소실을 가진 수냉식 단기통의 4행정 직접분사식 디젤기관(Yanma NFD170)을 사용했다. 이 기관의 주요 제원은 Table 1과 같고 흡·배기밸브는 각각 한 개씩으로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 전체 실험장치로는 Fig. 1에 그 개략도를 나타냈다. 이 그림에서 알 수 있듯이 천연가스와 수소가스는 탱크로부터 압력을 낮춰 일정압력으로 공급되며, 혼합용기로 연결된 공급관에 가스유량을 조절할 수 있는 조절밸브를 설치하여 혼합비율을 조절했다. 다공층(多孔

層)으로 이루어진 혼합용기를 통해 혼합된 연료는 연결관을 통해 교축밸브로 연결되고 여기서 공기와 예혼합되어 실린더내로 유입될 수 있게 장치했다.

2-2. 측정 방법

천연가스(메탄 88%, 에탄 6%, 프로판 4%, 부탄 2%)는 고압 가스용기로부터 0.15 MPa까지 압력을 낮춰 LPG 자동차용 벤츨리형 혼합기에 의해 예혼합하여 흡기관에 정상공급 된다. 천연가스의 유량은 열선형 질량유량계로 측정하고, 흡입공기의 유량은 증류형 유량계로 측정하며, 경우 소비량은 액면(液面)유량계로 측정했으며, 착화를 위한 보조경유를 포함한 총당량비(總當量比, ϕ)를 종합해서 구했다.

배기 매연농도, 질소산화물 농도(NO_x), 전체 연소되지 않은 탄화수소 농도(THC)를 개략도에 나타낸 것처럼 계측기를 설치하여 측정했다. 실린더내의 압력을 전기적 신호를 변환해주는 압전식(壓電式) 변환기를, 기관의 출력은 몇 개의 charge amp. (KISTLER)와 변환기(電子應用, AEC-55 MS-s), 시그널 컨디셔너(共和電業, CVD-700A)을 통한 후에 로터리 엔코더, 외부의 oscilloscope(LeCroy 9304A)로 관찰 기록 저장하고, 실린더내의 압력을 측정하여 열발생율의 계산에 사용하였다. 배기의 매연농도는 Bosch형 배기농도계(ZEXEL, DSM-10B)로, NO_x의 농도는 화학발광분석계(Yanaco, KA-200)로, THC는 측정가스를 200°C로 보온되는 샘플 관을 통해서 가스 chromatography(Yanaco, G3800) 유도가열(誘導加熱) FID로 메탄

Table 1. Specification of test engine.

Engine Type	Direct-injection Diesel Engine Single Cylinder, Water-cooled
Bore×Stroke	102 mm×105 mm
Displacement	857 cc
Compression Ratio	17.8:1
Swirl Ratio	2.4
Combustion Chamber	Deep-bowl Type
Fuel Injection Pump	Bosch PFR-1AW, PE2A Plunger Dia. 7.5 mm

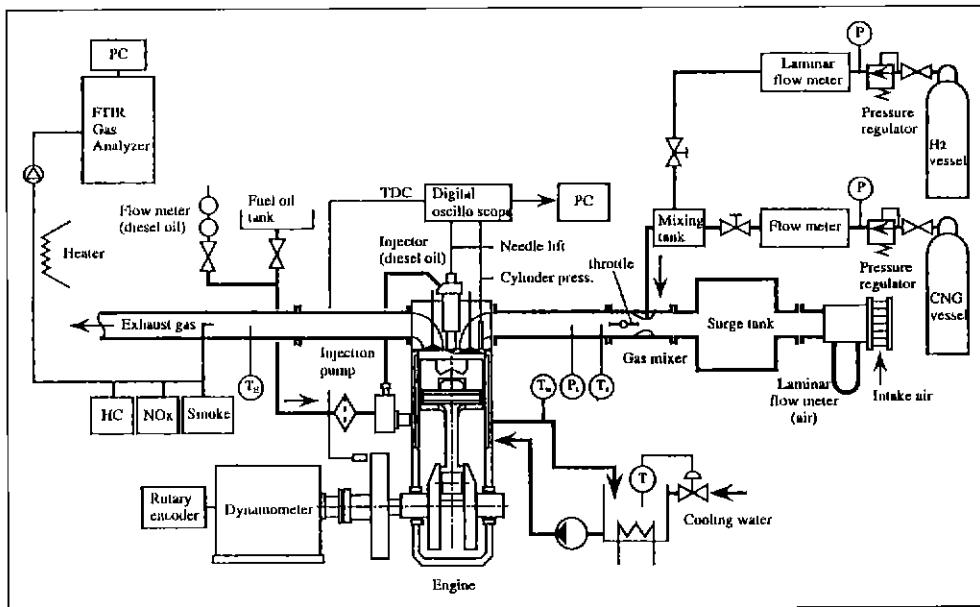


Fig. 1. Experimental apparatus.

을 환산하여 ppm 값으로 재측했다.

3. 실험결과 및 고찰

기존의 디젤기관은 어떤 기관에 비해 높은 열효율을 갖는 기관임을 알고 있다. 천연가스를 주 연료로 하고 착화보조를 경유로 하여 운전되기 때문에 디젤기관과 같은 성능을 가지면서 배출가스를 저감할 수 있는 장점을 가진 기관이 천연가스 Dual Fuel기관이다^[7]. 이 기관의 성능과 배기 개선을 위해 수소를 혼합한 가스를 공기와 예혼합하여 기관실험을 수행했으며 그 결과를 고찰하고자 한다.

3-1. 엔진의 기본성능 및 배기 특성

교축밸브를 완전히 개방(WOT)한 조건으로 Dual Fuel 기관의 기본적인 특성을 Fig. 2에 나타냈다. 분사시기를 $\theta_1=10^\circ$ BTDC로 일정하게 하고, 경유를 $q_{GO}=5, 10, 18 \text{ mm}^3/\text{st}$ 로 정량분사 한 상태에서 천연가스의 질량유량을 제어하여 총 당량비 ϕ 를 변화시켰을 때 그 결과를 그래프로 그린 것이다. Fig. 3은 착화보조 경유량을 $q_{GO}=10 \text{ mm}^3/\text{st}$ (경유만의 당량비 0.17에 해당)로 일정하게 분사하고 분사시기를 $\theta_1=5, 10, 15, 20^\circ$ BTDC로 변화시켰

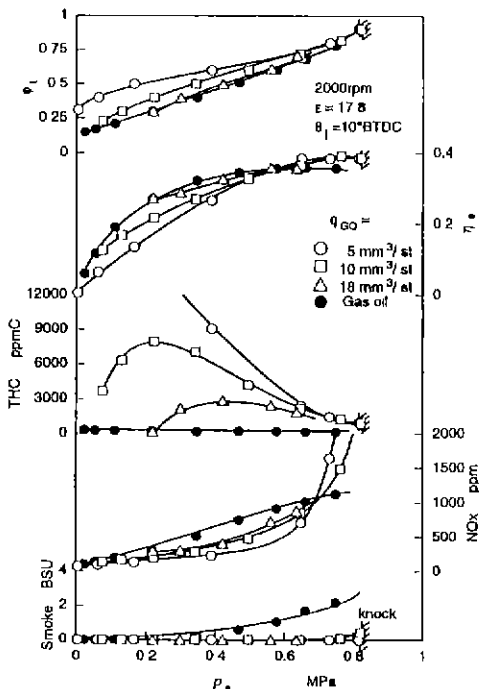


Fig. 2. The engine performance and pollutant emissions depending on mean effective pressure.

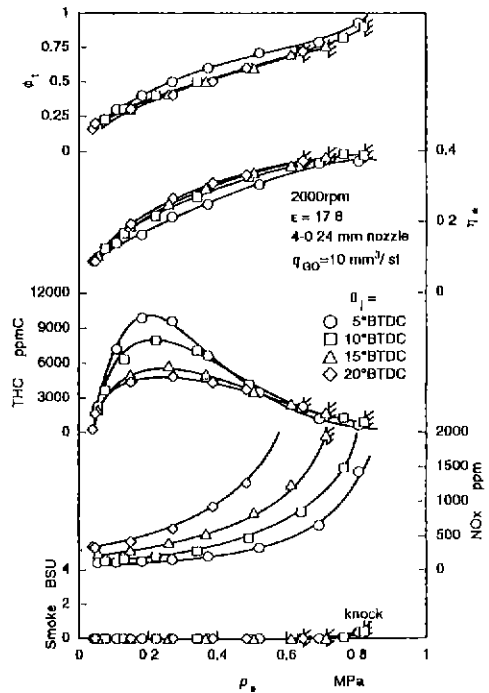


Fig. 3. Effects of injection timing on engine performance and pollutant emissions.

을 때의 결과로 횡축은 정미평균 유효압(p_e)으로 나타냈다.

경유만으로 운전했을 때와 비교하면 Dual Fuel 기관은 고출력에서 매연의 발생이 없고, 높은 열효율을 기록하고 있음을 알 수 있다

그러나, 총 당량비가 0.7 이상에서 NO_x 가 증가하며, 낮은 출력에서는 THC의 배출농도가 높음과 동시에 열효율이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 두 그림에서 낮은 당량비에서 경유의 분사량을 증가시키고, 분사시기를 앞당겨서 어느 정도 THC를 저감할 수 있음을 알 수 있다.

이 같은 기본 특성을 통해, 낮은 당량비에서 효율을 개선함과 동시에 THC를 저감하는 방법 가운데 하나로 수소를 천연가스에 혼합하여 개선점을 찾고자 했다.

3-2. 수소혼합에 의한 특성 개선

여기서는 천연가스의 주성분인 메탄보다 회박한계가 넓은 수소를 천연가스연료에 혼합하여 실험했다. 회박한계의 연소변동과 THC의 배출량을 억제할 수 있는 가능성이 있기 때문이다^[7]. 천연가스에 수소를 혼합한 연료인 hythane을 혼합비율에 따라 나타내는 그 성능과 배기특성을 살펴 그 가능성을 알아보겠다.

3-2-1. 수소혼합의 영향

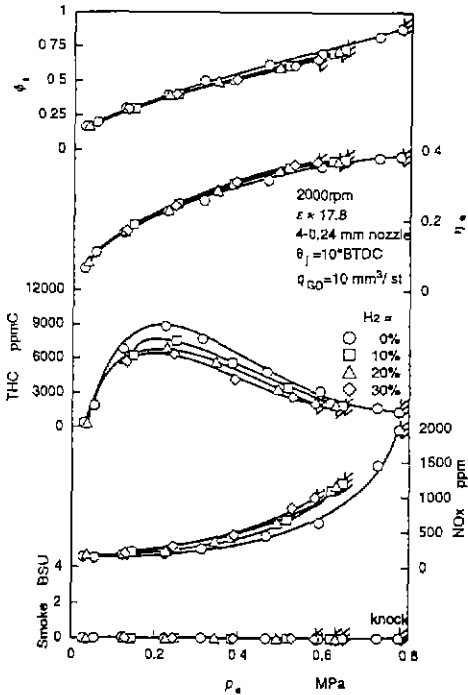


Fig. 4. Effects of hythane for engine performance and pollutant emissions.

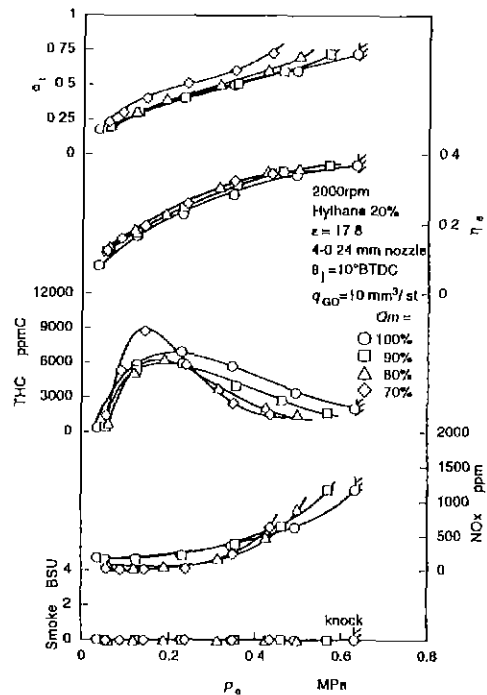


Fig. 5. Effects of the opening of throttle valve ($\theta_j = 10^\circ \text{BTDC}$).

수소의 혼합비율이 기관의 성능과 배기 특성에 어떤 영향이 있는가를 조사했다. 천연가스와 수소의 혼합비율은 체적비로 수소가 10%, 20%, 30%로 조절했다. Fig. 4는 착화 보조경유 분사량 $q_{GO} = 10 \text{ mm}^3/\text{st}$, 분사시기 $\theta_j = 10^\circ \text{BTDC}$ 로 하고, WOT 상태에서 총 당량비를 변화시켜가며 실험한 성능과 배기 특성을 나타냈다.

수소 혼합비율이 높아짐에 따라 THC의 배출농도가 감소하고, 그에 따라 열효율의 상승에 영향을 미치는 것으로 생각한다. 이는 수소의 혼합에 의해 연소가 개선되고 있음을 알 수 있다. 다만, Fig. 4에서 보면 수소를 혼합하면 보조경유의 분사시기를 진각할 경우와 비슷하게, 노크한계 당량비가 낮아지고, NOx의 배출량이 증가하는 문제가 발생한다.

그 외의 실험에서 수소를 20% 혼합했을 때 착화 지연이 짧아졌는데, 이는 같은 당량비에서 수소의 연소가 천연가스의 연소를 도와 전체의 열발생량이 증가한 것으로 판단할 수 있다.

3-2-2. 공기량 조절의 영향

다음은 수소가스를 혼합하여 흡입 공기량을 변화시켜 줌으로서 그 특성을 조사했다 Fig. 5과 Fig. 6은 수소 혼합비율을 20%로 한, $\theta_j = 10^\circ \text{BTDC}$ 와 $\theta_j = 20^\circ \text{BTDC}$ 에 있어서 공기량 Q_m 에 따른 특성은 흡기량의 감소에 따

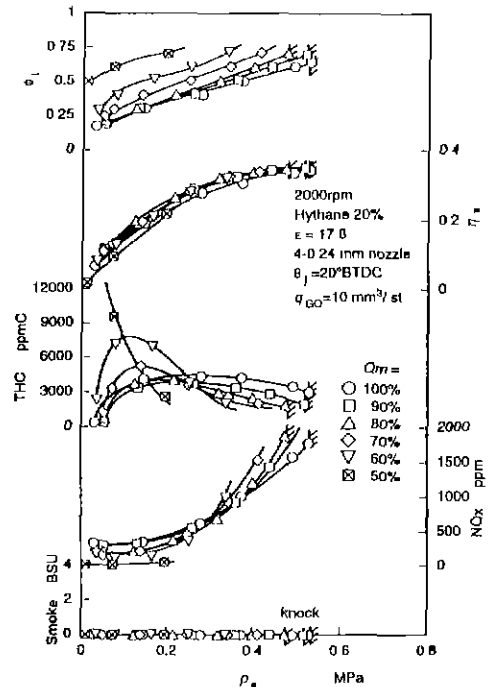


Fig. 6. Effects of the opening of throttle valve ($\theta_j = 20^\circ \text{BTDC}$).

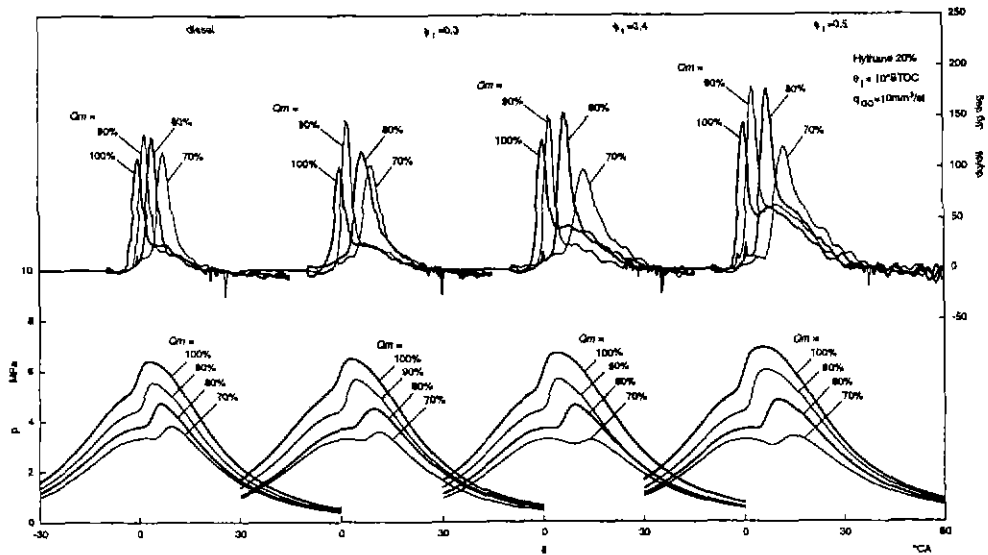


Fig. 7. Variations of cylinder pressure and heat release rate.

라 THC의 배출량이 증부하 이하에서 감소하고, 열효율은 향상한다. 여기서도 분사시기 θ_f 의 진각과 고죽벨브에 의한 공기량 Q_m 을 감소시킴으로서 기관의 유효압력 p_e 에 대한 총 당량비 ϕ 는 증가하지만 노크한계가 낮아지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 $\theta_f=10^\circ$ BTDC의 분사시기에 있어서 수소를 혼합하지 않은 것에 비해 수소를 혼합한 경우가 초기연소의 열발생률 변화의 peak가 높게 나타난다. 공기량의 감소에 따라 열발생률의 변화는 혼합하지 않은 경우와 거의 비슷하게 나타나지만, 공기량의 감소에 따라 연소하는 시기가 점점 지연되어짐을 알 수 있다. 열발생률은 $Q_m=90\%$ 에서 증가한 후, 그보다 낮은 공기량에 대해서는 저하하는 경향을 보인다. 그림으로 나타내지 못했지만 확보보조유인 경우의 분사시기 $\theta_f=20^\circ$ BTDC에 있어서도 초기연소가 크게 발생하기는 하나 대체적인 경향은 명확하지가 않았다.

3-2-3. 연소효율의 평가

이 Dual Fuel 기관의 경우분사벨브 최적화실험 연구⁶⁾에서처럼 수소를 혼합하지 않은 경우와 같이 경유와 수소는 완전히 연소한 것으로 보고, THC의 배출량으로부터 천연가스의 연소효율 η_c 를 계산했다.

Fig. 8은 수소 혼합 비율을 변화시켰을 때 연소효율을 나타냈다 수소의 혼합비율의 증가에 의해 η_c 의 증가도 이루어지고 있다.

Fig. 9의 (a), (b)는 공기량의 감소에 따른 연소효율의 관계를 나타냈다. 수소를 혼합하지 않은 경우에 비해 공

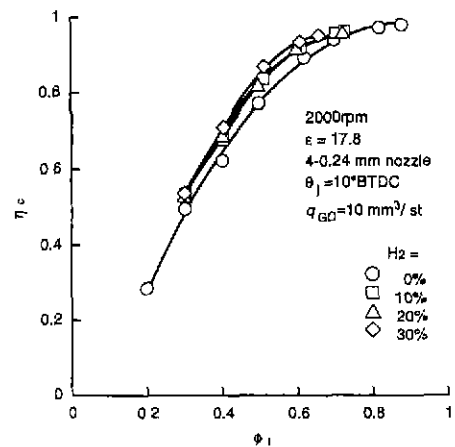


Fig. 8. Effects of hythane on combustion efficiency.

기량에 있어서도 수소혼합의 영향에 의해 연소효율이 개선되고 있다. Q_m 이 90%에서 연소효율이 향상하고 그 이하의 공기량에 대해서는 앞에서의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다.

이상의 결과로부터 수소를 혼합한 천연가스 Dual Fuel 기관에서는 수소혼합에 의한 THC의 저감은 공기량과 분사시기의 적절한 조절에 의해 THC를 저감할 수 있는 효과가 있음을 알았다. 그러나, NO_x 가 증가하고, 노크한계 당량비가 낮아져서 출력을 높일 수 없는 것이 문제이다.

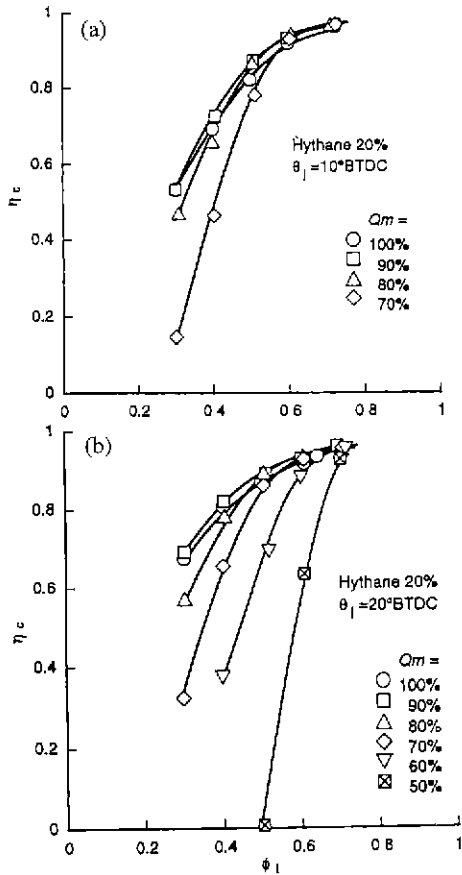


Fig. 9. Effects of air quantity (Q_m) for combustion efficiency.

4. 결 론

천연가스를 예혼합 흡입하여 압축말기에 경유를 분사 압축착화 연소시키는 CNG Dual Fuel 기관은 중·저 당량비에서 연소하지 않는 탄화수소의 배출농도가 높은 것이 단점이다. 이를 개선하기 위한 방법 가운데 하나로 천

연가스에 수소를 혼합하여 기관의 성능향상과 배출가스를 저감하고자 실험을 실시 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다

- 1) 배출가스 가운데 중·저 당량비에서 수소의 혼합 비율이 높을수록 연소효율을 높일 수 있었다.
- 2) 흡입 공기량에 있어 WOT의 90%의 공기량으로 제어했을 때 열효율이 보다 향상했다.
- 3) 착화보조유인 경유의 분사시기를 10° BTDC 이상으로 전각시켜서 수행했지만 그 이상의 분사시기 진각에 있어서는 뚜렷한 개선효과는 없었다.
- 4) 천연가스에 수소를 혼합하면 분사시기를 전각시킬 경우와 비슷하게 노크한계 당량비가 낮아지고, NO_x 의 배출농도가 증가했다.

참고문헌

1. 塩路 昌廣, “天然ガスを燃料としたディーゼルエンジン”, 日本自動車技術會 シンポジム, No. 9431111 (1994)
2. 草鹿 仁 外 3名, “天然ガスDual Fuelディーゼルエンジンの燃焼と排氣ガス特性”, 日本自動車技術會, No. 9838903 (1998).
3. 佐藤 利春 外 2名: “Dual Fuel 가스ディーゼルエンジンの燃焼”, 日本自動車技術會 論文集, Vol. 26 (1995).
4. 김복석 외 3명: “천연가스 Dual Fuel 디젤기관 경유 분사밸브의 최적화 실험”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, No. 99s311 (1999).
5. 古山 幹雄 外 1명: “CNG車エンジンの混合比特性 - 燃焼溫度の影響”, 日本 第14回 内燃機關 シンポジム 講演論文集 (1997)
6. Weaver, C.S. and Turner, S.H.: “Dual fuel natural gas/Diesel engine: Technology, Performance and Emissions”, SAE No. 940548 (1994).
7. Ryan, T.W. and Worthen, R.P.: “Alternate Fuels”, SAE SP-480 (1981).
8. 김재수: “현대자동차 저공해자동차 개발동향”, 한국자동차공학회지, 제18권 2호, pp. 122-129 (1996).