

## 천연가스 Dual Fuel기관의 성능과 배출가스 개선을 위한 수소혼합 실험

김복석, 이연수(전남대 대학원), Masahiro Shioji(Kyoto Univ.)\*, 박찬국\*\*(전남대)

### ABSTRACT

One of the unsolved problems of the natural gas dual fuel engine is that there is too much exhaust of Total Hydrogen Carbon(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 NOx increases.

중요단어: 천연가스, 수소, 당량비, Dual Fuel Engine, 연소효율

### 1. 서론

오늘날 에너지 소비량의 증가로 환경오염의 심각성이 국제적으로 부각되고 있다. 그 가운데 석유계 연료의 사용에 대한 비율이 비교적 높은 운반용 기계의 공급확대가 커져 생활환경오염의 심각성이 높아지고 있다. 환경오염에 대한 규제가 국제적으로 강화되고 있고 우리는 이에 대응하여 대체에너지를 이용한 엔진개발의 필연성을 느끼고 있다. 그래서, 본 연구는 천연가스의 특성을 고려하여 비교적 배출되는 오염원이 적은 천연가스 Dual Fuel기관의 실험을 실시했다. 이는 기존의 디젤기관을 약간의 변형을 통해 사용할 수 있다는 이점이 있고, 또한 배출가스를 저감할 수 있으면서 고당량비에서 디젤기관과 동등 이상의 성능을 갖는 기관으로 개발이 가능하다는 장점이 있다<sup>1,2)</sup>. 그러나 이 기관의 문제점은 중·저 당량비에서 연소하지 않는 탄화수소(THC)의 배출농도가 높다는 것이다<sup>3)</sup>. 이를 개선하기 위해 국내외적으로 많

은 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 펌프를 선택하고, 경유의 분사노즐을 실험기관에 최적인 것을 선택하기 위해 다양한 노즐에 대한 성능 및 배출가스 실험을 행한바 있다<sup>4)</sup>. 그 가운데 보다 우수한 특성을 갖는 분사노즐(분공 4개, 분공경 0.24mm)을 가지고 여러 조건에서 그 특성을 파악했다. 그 가운데 본 실험 연구는 천연가스에 일정한 비율의 수소를 혼합하여(이하 hythane이라 명명함) 엔진의 성능 및 배출가스의 저감을 위해 실험을 수행했다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험장치

시험기관에는 toroidal형 연소실을 가진 수

냉식 단기통의 4행정 직접분사식 디젤기관 (Yanma NFD170)을 사용했다. 이 기관의 주요제원(主要諸元)은 Table 1과 같고 실린더 헤드 및 연소실에 대한 형태는 Fig. 1에 나타난 것과 같다.

Engine Type	Direct Injection Diesel Engine Single Cylinder Water Cooled
Bore × Stroke	102 mm × 105 mm
Displacement	0.857 l
Compression Ratio	17.8
Swirl Ratio	2.4
Combustion Chamber	Deep Bowl Type (Bowl Dia. 56 mm)
Fuel Injection Pump	Bosch PF2A (Dual Fuel engine)
Plunger Dia.	6.0, 7.5, 9.0 mm
Pipe Length	600 mm
Inside Dia.	1.5 mm
Injector	DLA-p hole nozzle
Injection Angle	150 °
Open Pressure	20 MPa
Injection Nozzle	4 × φ0.24

Table 1 Specification of test engine

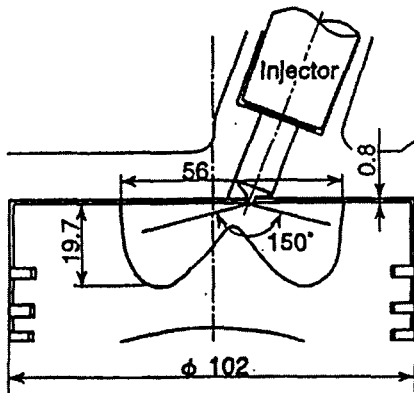


Fig. 1 Cylinder head and Combustion chamber

본 실험에 사용된 장치로는 Fig. 2에 그 개략도(概略圖)를 나타냈다.

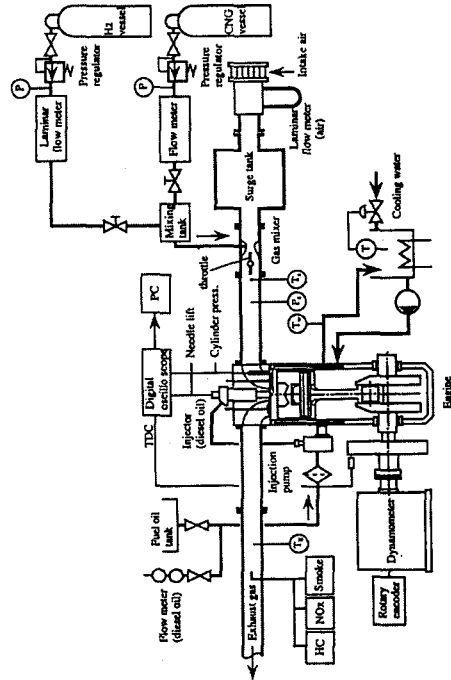


Fig. 2 Experimental apparatus

## 2.2 측정 방법

천연가스(메탄 88%, 에탄 6%, 프로판 4%, 부탄 2%)는 고압 가스용기로부터 0.15MPa까지 압력을 낮춰 LPG자동차용 벤츄리형 혼합기(混合器)에 의해 예혼합(豫混合)하여 흡기관(吸氣管)에 정상공급 된다. 천연가스의 유량은 열선형 질량유량계로 측정하고, 흡입공기의 유량은 층류형 유량계로 측정하며, 경유 소비량(消費量)은 액면(液面) 유량계로 측정하여 보조경유(補助輕油)를 포함한 총당량비(總當量比,  $\phi_t$ )를 종합해서 구했다.

배기 매연농도(煤煙濃度), 질소산화물(窒素酸化物) 농도(NOx), 전체 미연소 탄화수소(未燃燒炭化水素) 농도(THC)를 개략도에서 처럼 계측기를 설치하여 측정했다. 실린더 내의 압력은 전기적 신호를 변환해주는 압전식 변환기(壓電式 變換器)를, 기관의 출력을

몇 개의 charge amp.(KISTLER製)와 변환기(電子應用製, AEC-55MS-s), signal conditioner(共和電業, CVD-700A)을 통한 후에 rotary encoder를 외부의 oscilloscope(LeCroy 9304A)로 관찰 기록 저장하고, 압력은 열발생율(熱發生率)의 계산에 사용하였다.

배기의 매연농도는 Bosch형 배기농도계(ZEXEL製, DSM-10B)로, NOx의 농도는 화학발광분석계(化學發光分析計, Yanaco製, KA-200)로, THC는 측정가스를 200℃의 보온 sample관을 통해서 gas chromatography(Yanaco製, G3800) 유도가열(誘導加熱) FID로 매탄을 환산하여 ppm값으로 계측했다.

### 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<sup>5)</sup>. 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 Fuel기관의 기본적인 특성을 Fig. 3에 나타냈다. 분사시기를  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC로 일정하게 하고, 경유를  $q_{GO} = 5, 10, 18 \text{ mm}^3/\text{st}$ 로 정량분사 한 상태에서 천연가스의 질량유량을 제어하여 총 당량비를 변화시켰을 때 그 결과를 그래프로 그린 것이다. Fig. 4는 착화보조 경유량을  $q_{GO} = 10 \text{ mm}^3/\text{st}$ (경유만의 당량비 0.17에 해당)로 일정하게 분사하고 분사시기를  $\theta_j = 5, 10, 15, 20^\circ$  BTDC로 변화시켰을 때의 결과로 횡축은

정미평균 유효압( $P_e$ )으로 나타냈다.

경유만으로 운전했을 때와 비교하면 Dual Fuel기관은 고출력에서 매연의 발생이 없고, 높은 열효율을 기록하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 총 당량비( $\phi t$ )가 0.7 이상에서 NOx가 증가하며, 낮은 출력에서는 THC의 배출농도가 높음과 동시에 열효율이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 두 그림에서 낮은 당량비에서 경유의 분사량을 증가시키고, 분사시기를 진각시킴으로서 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.

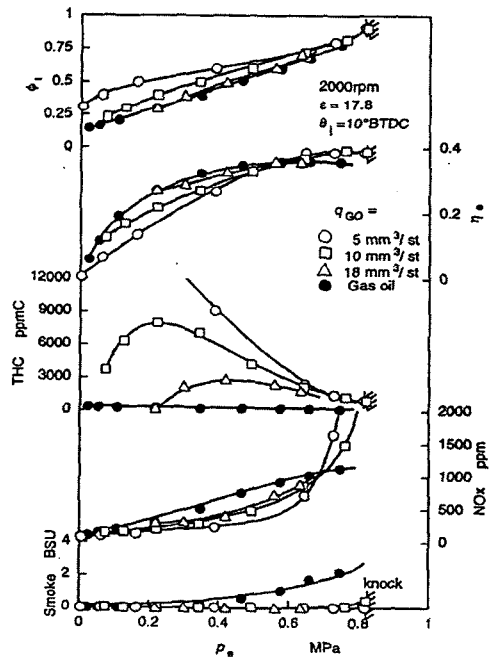


Fig. 3 The engine performance and pollutant emissions depending on total equivalence ratio( $\phi t$ )

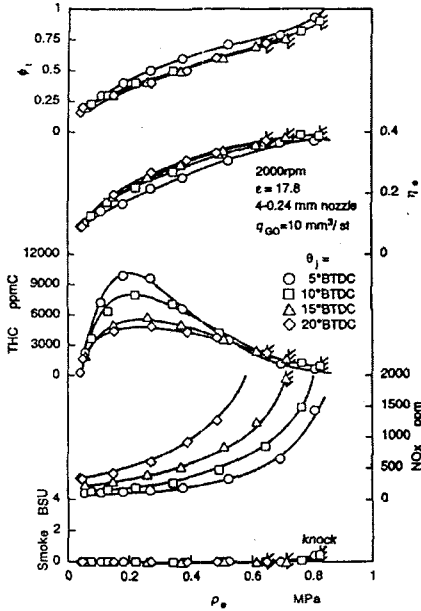


Fig. 4 The engine performance and pollutant emissions depending on total equivalence ratio( $\phi_t$ )

### 3.2 수소혼합에 의한 특성 개선

여기서는 천연가스의 주성분인 메탄보다 희박한계가 넓은 수소를 연료 가운데 혼합하여 실험했다. 희박할 때의 연소변동과 THC의 배출량을 억제할 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 천연가스에 수소를 혼합한 연료를 Hythane이라고 명명하고 그 가능성을 살펴 보겠다.

#### 가) 수소혼합의 영향

수소의 혼합비율이 기관의 성능과 배기 특성에 어떤 영향이 있는가를 조사했다. 천연가스와 수소의 혼합비율은 체적비(體積比)로 수소가 10%, 20%, 30%로 조절했다. Fig. 5는 착화 보조경유 분사량  $q_{CO} = 10\text{mm}^2/\text{st}$ , 분사시기  $\theta_i = 10^\circ \text{BTDC}$ 로 하고, WOT 상태에서 총 당량비를 변화시켜가며 실험한 성능과 배기 특성을 나타냈다.

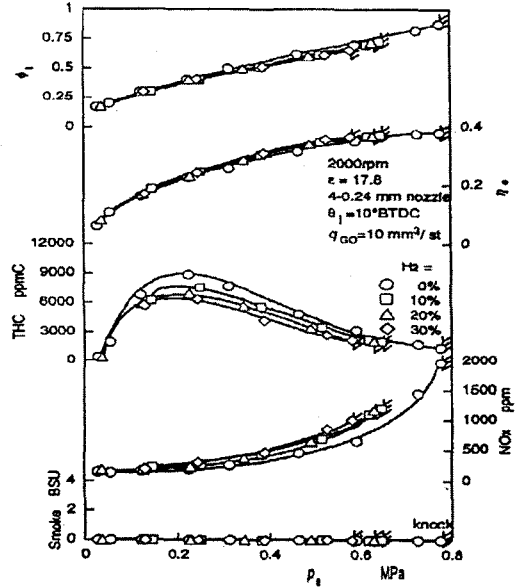


Fig. 5 Effects of engine performance and pollutant emissions for hythane

수소 혼합비율이 높아짐에 따라 수소 혼합비율의 정도에 따라 THC가 감소하고, 그에 따라 열효율이 상승하며, 이는 수소의 혼합에 의해 연소가 개선되고 있음을 알 수 있다. 다만, Fig. 5에서 보면 수소를 혼합하면 보조경유의 분사시기를 진각할 경우와 비슷하게, knock한계 당량비가 낮아지고,  $NO_x$ 의 배출량이 증가하는 문제가 발생한다.

수소를 20% 혼합했을 때 혼합하지 않은 경우와 비교해서 연소과정을 나타냈다. 수소 혼합에 의해 착화 지연이 짧아지고 같은 당량비에서는 전체의 열 발생량이 많아지고 있다. 천연가스에 비하여 연소속도가 높아 수소가 혼합가스의 연소를 활성화 시켜주고 있음을 알 수 있다.

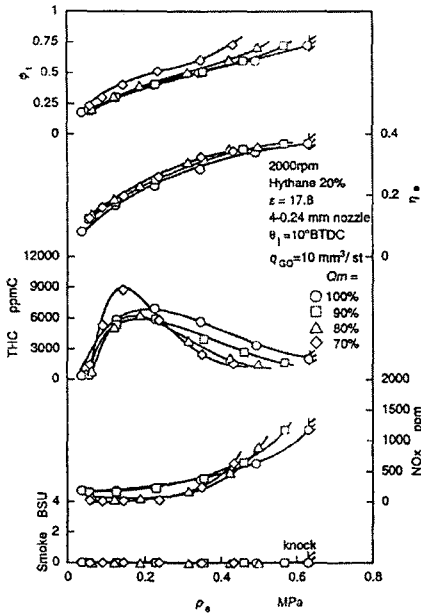


Fig. 6 Effects of air quantity for hythane ( $\theta_j = 10^\circ$  BTDC)

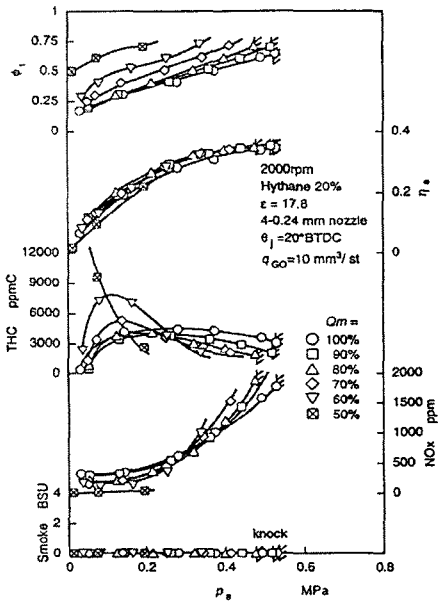


Fig. 7 Effects of air quantity for hythane ( $\theta_j = 20^\circ$  BTDC)

#### 나) 공기량 조절의 영향

다음은 수소가스를 혼합하여 흡입 공기량을 변화시켜줌으로서 그 특성을 조사했다. Fig. 6과 Fig. 7은 수소 혼합비율을 20%로 한,  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC와  $\theta_j = 20^\circ$  BTDC에 있어서 공기량  $Q_m$ 에 따른 특성은 흡기량의 감소에 따라 THC의 배출량이 감소하고, 열효율은 향상한다.

어느 분사시기에 있어서도 수소 혼합의 효과보다 혼합하지 않은 경우에 비해서, 초기 연소의 열발생을 변화의 spike가 높게 나타난다. 공기량의 감소에 따라 열발생률의 변화는  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC에서 혼합하지 않은 경우와 거의 비슷하게 나타나지만, 공기량의 감소에 따라 연소하는 시기가 점점 지연되며, 열발생률의 spike는  $Q_m = 90\%$ 에서 증가한 후, 그보다 낮은 공기량에 대해서는 저하하는 경향을 보여주었다.  $\theta_j = 20^\circ$  BTDC에 있어서는 초기연소가 크게 발생하지만 대체적인 경향은 명확하지가 않았다.

#### 다) 연소효율의 평가

수소를 혼합하지 않은 경우와 같이 경유와 수소는 완전히 연소한 것으로 보고, THC의 배출량으로부터 천연가스의 연소효율  $\eta_c$ 를 계산했다. Fig. 8은 수소 혼합 비율을 변화시켰을 때 연소효율을 나타냈다. 수소의 혼합 비율의 증가에 의해  $\eta_c$ 의 증가도 이루어지고 있다.

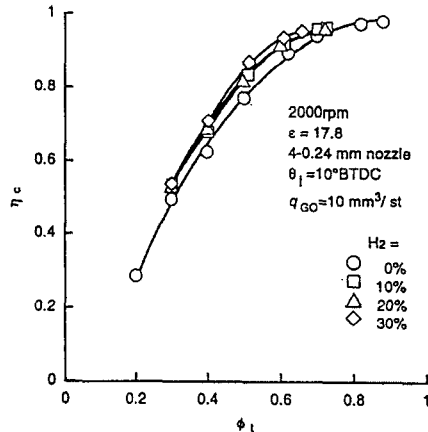


Fig. 8 Effects of combustion efficiency for hythane

Fig. 9는 공기량의 감소에 따른 연소효율의 관계를 나타냈다. 수소를 혼합하지 않은 경우에 비해 공기량에 있어서도 수소혼합의 영향에 의해 연소효율이 개선되고 있다.  $Q_m$ 이 90%에서 연소효율이 향상하고 그 이하의 공기량에 대해서는 앞에서의 경우와 비슷하게 경향을 보이고 있다.

이상의 결과로부터 수소를 혼합한 천연가스 Dual Fuel기관에서는 수소혼합에 의한 저감효과와 공기량 조절과 분사시기의 적절한 조절에 의해 THC를 저감할 수 있는 효과가 있음을 알았다. 그러나,  $NO_x$ 가 증가하고, knock한계 당량비가 낮아져서 출력을 높일 수 없는 것이 문제이다.

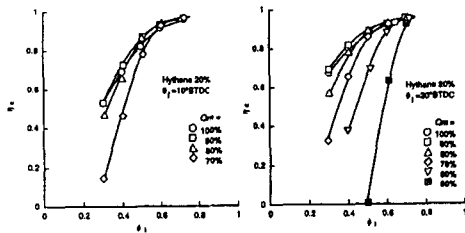


Fig. 9 Effects of combustion efficiency for  $Q_m$  (hythane 20%)

#### 4. 결론

천연가스를 예혼합 흡입하여 압축말기에 경유를 분사 압축착화 연소시키는 Dual Fuel 기관은 중·저 당량비에서 연소하지 않는 탄화수소의 배출농도가 높은 것이 단점이다. 이를 개선하기 위한 방법 가운데 하나로 천연가스에 수소를 혼합하여 기관의 성능향상과 배출가스를 저감하고자 실험을 실시 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 배출가스 가운데 중·저 당량비에서 수소의 혼합비율이 높을수록 연소효율을 높일 수 있었다.

2) 흡입 공기량에 있어 WOT의 90%의 공기량으로 제어했을 때 열효율이 보다 향상했다.

3) 착화보조유인 경유의 분사시기를  $10^\circ$  BTDC 이상으로 진각시켜서 수행했지만 뚜

렷한 개선효과는 없었다.

4) 천연가스에 수소를 혼합하면 분사시기를 진각시킬 경우와 비슷하게 노크한계 당량비가 낮아지고,  $NO_x$ 의 배출농도가 증가했다.

#### 참고 문헌

1. 塩路 昌廣, “천연가스를 연료로 한 디젤기관”, 일본 자동차기술회 심포지엄, No. 9431111, 1994.
2. 草鹿 仁 외 3명, “천연가스 Dual Fuel 디젤기관의 연소와 배기가스특성”, 일본 자동차기술회, No. 9838903, 1998.
3. 佐藤 利春 외 2명, “Dual Fuel 가스 디젤기관의 연소”, 일본자동차기술회 논문집, Vol. 26, 1995
4. 김복석 외 3명, “천연가스 Dual Fuel 디젤기관 경유분사밸브의 최적화 실험”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, No. 99s311, 1999
5. 古山 幹雄 외 1명, “CNG 자동차 기관의 혼합비 특성 - 연소온도의 영향”, 일본 제14회 내연기관 심포지엄 강연 논문집, 1997.

Asoc