

<논문> SAE NO. 2000-03-0029

# CNG와 경유의 2원 연료 디젤기관의 성능 및 배출가스 개선을 위한 실험연구

## Improving Performance and Emissions in a Diesel Engine Dual Fueled with Compressed Natural Gas

김복석\*, 塩路昌廣\*\*, 박찬국\*\*\*  
BokSeok Kim, Masahiro Shioji, ChanGuk Park

### ABSTRACT

This paper deals with a study on combustion and emission characteristics of a direct injection diesel engine dual fueled with natural gas. Dual fuelling systems tend to emit high unburned fuel especially at low load, resulting in a decreased thermal efficiency. This is because natural gas-air mixtures are too lean for flame to propagate under low load conditions. Suction air quantity and injection timing controls are very useful to improve emissions and thermal efficiency at low load.

주요기술용어 : Dual Fuel Engine(2원 연료엔진), CNG and Gas-oil(압축천연가스와 경유)  
Combustion and Emission(연소와 배기), Air Quantity(공기량), Hydrocarbon(탄화수소)

### 1. 서론

우리에게 편의를 제공하는 수단들로 인해 지구의 온난화, 산성비, 대기오염 등의 환경오염이 생활의 위협요소로 작용하고 있고, 국제적으로도 편리함보다 환경보호가 우선하는 사회구조를 요구하고 있다. 그 때문에 차량, 선박, 발전 등에 폭넓게 사용되는 내연기관에 있어서도 유해 배출가스에 대한

저감과 그 요구가 더욱 강화되리라 생각한다. 현재 운송용 내연기관의 대부분은 경유와 가솔린의 사용이 주류를 이루고 있고, 이의 대량소비로 인하여 매년 심각해지는 환경오염과 석유자원의 고갈에 대비하는 연구가 폭넓게 연구되고 있다.<sup>1, 3)</sup>

환경보전과 석유자원의 입장에서 대체연료로 부상되는 것 가운데 하나로 천연가스가 있다. 천연가스는 세계의 광범위한 곳에 분포되어 있고, 가채년수(可採年數)가 석유보다 더 길어서 장래 안정공급을 계속할 수 있을 뿐만이 아니라 환경 면에 있어서도 이산화탄소 배출량이 적고, 유황 등의 불순물

\* 회원, 전남대학교 자동차연구소

\*\* 일본 교토대학 공학부

\*\*\* 회원, 전남대학교 공과대학

이 함유되어있지 않아 유황산화물의 발생이 없어서 공해성(公害性)이 낮은 연료라 말할 수 있다. 연료를 채굴한 상태 그대로 사용할 수 있어 가공손실이 없지만 기체연료이기 때문에 운반이 용이하지 않은 문제는 있지만 대도시를 중심으로 도시가스 공급망(供給網)이 형성되어 있기 때문에 인프라 구조 정비가 용이한 점이 있다. 그래서, 천연가스의 연소특성상 연소의 안정성(安定性)과 열효율을 높이기 위해 천연가스를 예혼합하고, 경유를 착화유(着火油)로 사용하여 디젤기관을 기본(base)으로 하는 천연가스 2원 연료기관의 실험을 실시하여 보다 낮은 기관으로서의 기초를 마련하려는 연구가 진행되어 왔다.<sup>2, 3)</sup>

본 연구에서는 당량비가 작은 낮은 출력에서 천연가스의 혼합가스가 너무 희박해져 연소효율이 악화되고, 이로 인해 대량의 미연소 탄화수소(THC)가 배출됨과 동시에 열효율이 악화되는 문제가 있다.<sup>3, 4)</sup> 이를 개선하기 위해 교축밸브(throttle valve)를 이용한 예혼합공기량을 조절했을 때 연소와 배기특성을 밝히려는데 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험기관에는 토로이달(toroidal)형 연소실을 갖는 수냉식 단기통 4cycle 디젤기관(Yanmar NFD170)을 사용했다. 이 기관의 주요 제원은 Table 1과 같고, 실린더 헤드

및 연소실의 개략은 Fig. 1에 나타냈다. 이 기관은 표준분사 시스템으로 Jerk식 분사펌프(플런저경 7.5mm, 딜리버리 양 25mm<sup>3</sup>/st)와 분사관 내경과 길이 1.5mm와 600mm, 분공수(噴孔數) 4개, 분공직경(噴孔直徑) 0.24mm인 노즐(4-0.24mm)로 구성된 분사시스템을 설치했다.

천연가스의 조성은 메탄 88%, 에탄 6%, 프로판 4% 및 부탄 2%의 연료를 사용하고, 고압용기로부터 0.15MPa까지 압력을 낮춰 LPG자동차용 벤츄리식 혼합기(混合器)에 의해 예혼합(豫混合)되어 흡기관(吸氣管)에 정상 공급했다. 예혼합 공기량은 교축밸브의 개도조정으로 하고, 기관회전수는 성능과 배기특성면에서 그 변화가 안정적인 동력계의 정속모드 2000rpm으로 제어하여 수행했다. 교축밸브의 완전개방한 상태(WOT)의 예혼합 공기량을 기준하여 이를  $Q_m=100\%$ 로 하고,  $Q_m=90, 80\%, \dots$ 로 조절하고, 여러가지  $Q_m$ 에 대해 일정압력이 있는 천연가스 양을 변화시켜 출력을 조정했다. 천연가스 유량은 열선형유량계, 흡입공기량은 층류형유량계, 경유소비량은 액면유량계로 측정하고, 착화 보조유인 경유의 분사량을 포함한 총 당량비  $\phi$ , 를 구했다. 실린더내의 압력p는 압전식(壓電式)변환기, 분사밸브 니들 양정은 와전류식(渦電流式) 간극센서로 측정하고, 그 출력을 여러가지 변환기를 통해서 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope, ReCroy 9304A)로 관측 및 기록을 했다.

Table 1 Specification of single cylinder engine

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

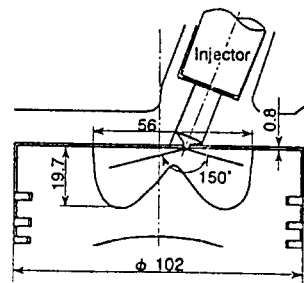


Fig. 1 Diagram of combustion chamber

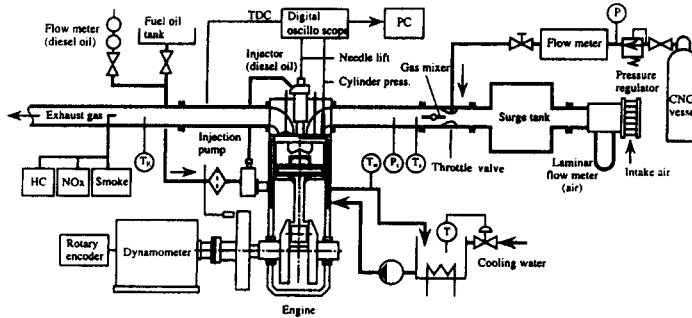


Fig. 2 Experimental apparatus

배기가스 가운데 배기매연농도는 보쉬(Bosch)식 농도계로,  $\text{NO}_x$ 농도는 화학발광 분석계로 측정했다. THC는 측정가스를 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 보온 샘플관을 통해서 가스색층분석기(gas chromatography)에 유도해 가열 FID로  $\text{CH}_4$ 를 환산한 ppm으로 측정했다. 이의 실험장치는 Fig. 2와 같으며, CNG의 낮은 착화성 확보는 경유의 분사량을 조절하고, 천연가스 유량, 예혼합공기량 조절과 분사시기의 변화를 변수로 하여 기관성능 및 배기특성을 조사했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

지금까지의 실험은 교축밸브를 WOT상태로 기관의 특성을 조사했다. 여기서는 낮은 출력에서 혼합가스가 희박하면 연소효율이 악화되어 대량의 THC를 배출하기 때문에 교축밸브에 의해 그 양을 조절하였을 때의 그 특성을 조사했다. 예혼합공기량의 감소는 연소실의 압축비  $\epsilon$ (壓縮比)를 저하시켜서 출력이 낮아질 수 있고, 착화보조경유에 의한 착화가 어렵게되는 문제와 흡기행정이 이루어질 때 실린더 내의 압력이 낮아 펌프 손실이 증가할 수 있다. 그래서, 필요한 출력범위를 확보하기 위해서는 설정 당량비와 예혼합 공기량을 잘 조절할 필요가 있다고 본다.

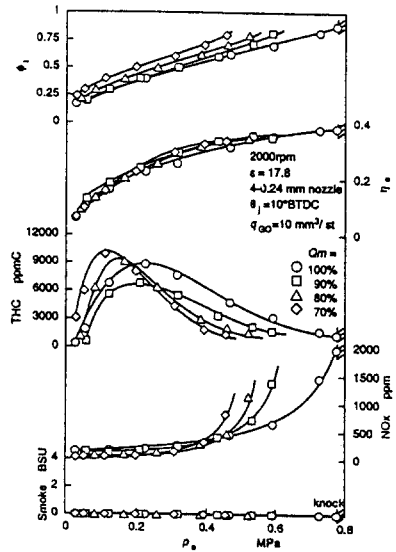


Fig. 3 Effects of the opening of throttle valve on engine performance and pollutant emissions

#### 3.1 성능 및 배기 특성

Fig. 3은 기관회전수를 2000rpm으로 하고, 보조경유 분사량을  $q_{GO} = 10\text{mm}^3/\text{st}$ , 분사시기  $\theta_j = 10^{\circ}$  BTDC에 고정하고 교축밸브에 의해 예혼합공기량을 조절하여 실험한 성능 및 배기특성을 나타낸 것이다. 여러 예혼합공기량에 대한 출력은 천연가스 유량을 조절한 총 당량비에 의해 실험한 결과를 나타냈다.

Fig. 3을 보면  $p_e > 0.3\text{MPa}$ 에서는 흡입량의 감소에 따라 THC가 크게 감소하고, 정미

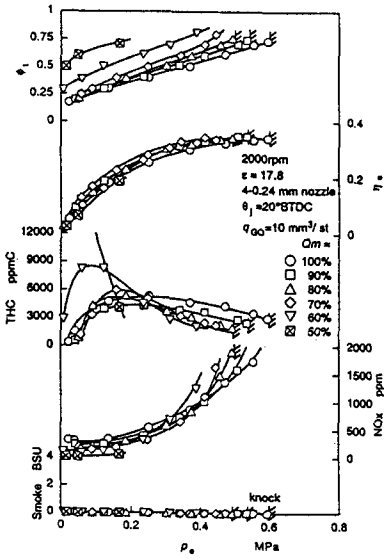


Fig. 4 Effects of the opening of throttle valve on engine performance and pollutant emissions

열효율  $\eta_e$  은 상승하고 있다. 이것은 같은 유효압력에서는 공기량의 감소에 따라 총당량비  $\phi_1$ 가 증가하기 때문에 천연가스 혼합기의 연소효율이 향상한 것으로 본다. 이것은 펌프손실의 증가의 영향을 웃도는 결과로 생각할 수 있다.  $p_e < 0.2\text{MPa}$ 의 낮은 출력에서는 공기량을 80%이하로 조절했을 때 반대로 THC가 증가했다.  $\text{NO}_x$ 는 공기량의 감소에 따라서  $p_e < 0.4\text{MPa}$ 에서는 감소하지만 당량비  $\phi_1$ 가 0.7을 넘을 때에는 크게 증가했다.

다음은 보조경유의 착화성(着火性)의 악화를 개선하기 위해서 경유 분사시기를 빠르게 하여 실험했다. Fig. 4는 분사시기를  $\theta_j = 20^\circ$  BTDC로 했을 때의 성능 및 배기 특성을 나타냈다. 분사시기가 빠르면 혼합가스의 연소가 활발하게 이루어지게 되며, 운전 가능한  $Q_m$  60% 이하까지 확대해 실시했다.  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC와 같이  $p_e > 0.3\text{MPa}$ 에서는  $Q_m$ 의 감소에 따라 연소하지 않은 탄화수소(THC)가 감소하고 있다. 특히  $p_e = 0.1 \sim 0.3\text{MPa}$ 에

어서는 THC를  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC로 했을 때보다도 낮아지고 있음을 알 수 있다. 그래서, 이 조건에서는 높은 출력에 있어  $\text{NO}_x$ 배출량의 증가가 보다 높아지고,  $Q_m > 70\%$ 에서는 총 당량비가 0.7을 넘으면 노크가 발생하고, 그 이상의 출력으로 증가시킬 수 없었다.

### 3.2 열발생을 변화

흡입공기량의 감소에 따라 실린더내의 열 발생 과정이 어떻게 변하는가를 조사하기 위해, 25사일을 평균해서 실린더내의 압력의 변화상태로부터 혼합기의 단위 질량당 열발생률을 크랭크각에 따라 계산한 것을 관찰하면, Fig. 5에  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC에서 실린더내의 압력 및 혼합가스의 단위 질량당 열발생률의 변화를 나타냈다.  $Q_m = 100\%$  상태에서 2원 연료운전의 열 발생률은 디젤의 운전 때와 같은 상태로 경유의 분사가 이루어진 후 착화지연이 있고, 착화지연의 영향으로 열발생률이 높은 초기 연소가 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 그 이후에는 열발생률이 낮은 연소가 이어지고 있다. 같은 공기량에서 총당량비를 변화시키면 총당량비의 증가에 따라 초기연소에 비해 주 연소가 크게 증가하고 있고, 천연가스는 주로 주 연소과정에서 연소가 이루어지고 있다고 말할 수 있다. 교축밸브를 조절해  $Q_m$ 을 감소시키면 압축력이 낮아져 경유의 착화지연이 증가하고, 연소가 완만하게되는 초기연소와 주 연소의 구별이 이루어지고 있다. 열발생률이 큰 것은 공기량을 90%로 감소시켰을 때 증가하지만, 80% 이하에서는 감소했다.

경유만으로 운전했을 때도  $Q_m$ 의 감소에 의해 열발생률은 증가했다가 감소하고 있으며, 공기량의 조절에 있어 경유의 착화성 변화가 그대로 천연가스의 연료에 영향이 있음을 알 수 있다. 또,  $Q_m$ 을 65%까지 감소시키면 총당량비가 0.4이상에서는 거의 열 발

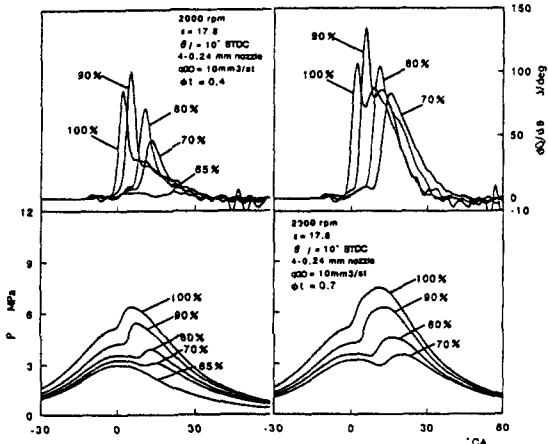


Fig. 5 Variations of p and heat release rate depending on throttle valve( $\theta_j = 10^\circ$  BTDC)

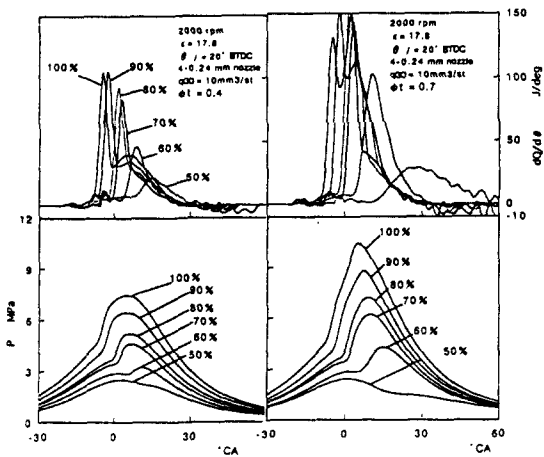


Fig. 6 Variations of p and heat release rate depending on throttle valve( $\theta_j = 20^\circ$  BTDC)

생이 보이지 않고 있다.

그래서, 2원 연료기관의 운전에서 공기량을 감소시키면 공기량의 감소에 따라 압축력이 감소하여 경유의 착화지연이 길어지기 때문에 초기연소를 활발하게 하고, 천연가스 혼합기의 연소를 도와주지만, 압축력이 낮아 보조경유의 착화가 불충분하여 혼합가스의 연소가 완만하게 이루어지는 것으로 생각된다.

Fig. 6은  $\theta_j = 20^\circ$  BTDC에 있어서 연소 과정을 나타냈다. 분사시기를 빠르게 하면

착화지연이 길어지게 되고, 긴 착화지연 기간을 이용해서 경유분무에 천연가스의 예혼합에 의한 흡입가스가 잘 혼합되기 때문에 초기연소가 활발하게 된다.  $\theta_j = 10^\circ$  BTDC에 비해서 열발생률 및 연소할 때 압력상승이 크게됨을 알 수 있다. 이 압력상승이  $\theta_j = 20^\circ$  BTDC에 있어 NO<sub>x</sub>의 증가와

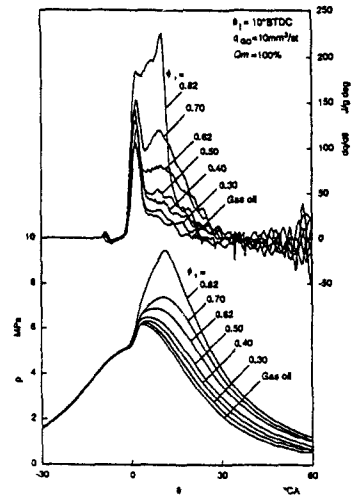


Fig. 7 Variations of p and heat release rate depending on  $\phi_t$  ( $Q_m = 100\%$ )

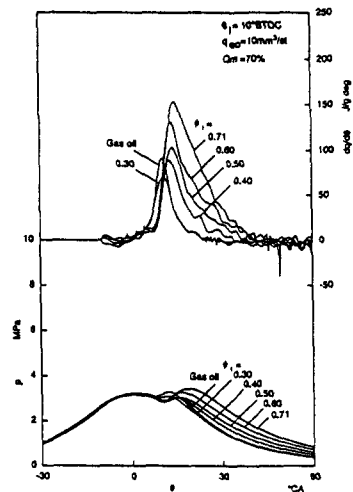


Fig. 8 Variations of p and heat release rate depending on  $\phi_t$  ( $Q_m = 70\%$ )

노크(knock)한계 당량비의 원인이 될 수 있음을 생각할 수 있다. 공기량을 조절할 때  $Q_m$ 을 감소시킬 경우의 열발생률 과정은  $\theta_j=10^\circ$  BTDC의 경우와 거의 같고, 착화 지연이 길어지며 열발생률이 가장 높은 것은  $Q_m=90\%$ 에서 증가하고, 그 이하의 공기량에서는 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7, Fig. 8은  $Q_m=100\%$ 일 때와 70%일 때, 총당량비의 변화에 따라 실린더내의 압력의 변화와 열발생률의 과정을 나타냈다.  $Q_m=100\%$ 에서 총 당량비가 증가함에 따라 경유의 착화지연은 보이지 않고 열발생률은 열발생률은 증가하고 있다. 흡입공기량을 70%로 했을 때는  $\phi_t=0.4$ 까지는 연소의 시작이 늦어지고, 초기연소의 열발생률이 감소하지만,  $\phi_t$ 가 0.4를 넘으면 초기연소의 열발생률이 증가한다. 그래서 공기량의 감소는 낮은 당량비에 있어서 천연가

스의 증가가 경유의 착화를 악화시킨 것으로 생각된다.

### 3.3 THC의 저감효과

Fig. 9는  $\theta_j=10^\circ$  BTDC와  $\theta_j=20^\circ$  BTDC에 있어서 흡기량을 변화시켰을 경우 연소율  $\eta_c$ 을 나타냈다. 앞서서도 말했듯이 분사시기에서도 당량비가 낮아짐에 따라 연소효율  $\eta_c$ 이 낮아진다. 특히,  $\theta_j=10^\circ$  BTDC에서는 총당량비가 0.6이하가 되면 급격히  $\eta_c$ 가 낮아진다.  $\theta_j=10^\circ$  BTDC와  $\theta_j=20^\circ$  BTDC을 비교하면  $\theta_j=20^\circ$  BTDC의 경우가 연소효율이 높음을 알 수 있다. 연소효율의 변화는 높은 당량비에서 공기량에 따라 거의 차이가 없어지지만, 당량비가 낮아질 경우 공기량이 90%일 때 연소효율이 향상하고, 그 이상 공기량을 감소시키면 낮아지는 경향을 보임을 알 수 있다.

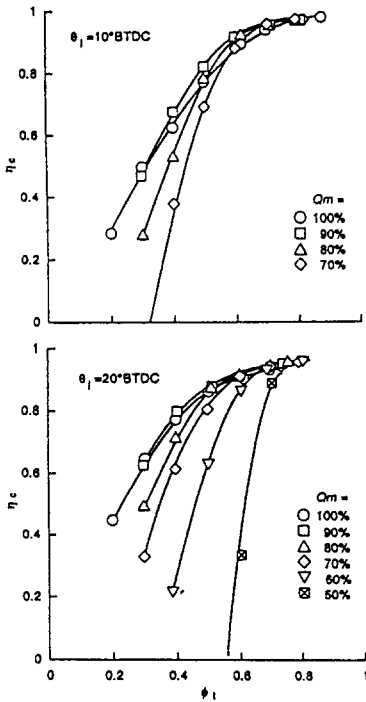


Fig. 9 Effects of throttle valve for combustion efficiency

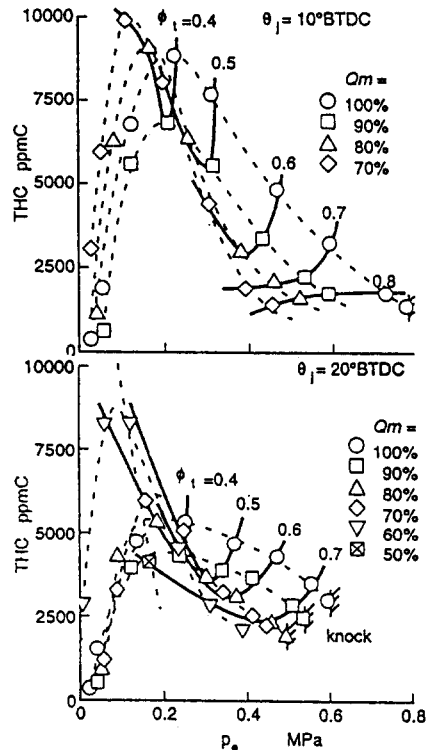


Fig. 10 The variation of THC depending on  $Q_m$ ,  $\phi_t$  and  $p_e$

Fig. 10에는 흡입공기량, 당량비와 THC의 관계를 그림으로 나타냈다. 총당량비를 고정하고 흡입공기량을 감소시키면 앞에서 얘기했듯이 압축력이 낮아져서 연소특성이 변화하고 THC값이 달라짐을 볼 수 있다. THC가 가장 낮은 값은  $\phi_t < 0.6$  회박할 때에는 경유의 분사시기를 빠르게 했을 경우 ( $\theta_j = 20^\circ$  BTDC)가 낮고, 이보다 당량비가 높을 때는 분사시기를 지연한 경우 ( $\theta_j = 10^\circ$  BTDC)가 낮게 나타내고 있다. 또,  $p_c < 0.2$  MPa의 낮은 출력의 경우를 제외하고, 흡입공기량과 분사시기의 조절에 의해 어느 정도 THC를 저감할 수 있음을 알았다.

#### 4. 결론

기존의 디젤기관을 천연가스 Dual Fuel기관으로의 전환을 위해, 천연가스를 예혼합하여 착화보조유인 경유를 직접 분사하여 연소시키는 기관 실험을 실시했다. 이 실험에서 흡입되는 공기량을 교축밸브에 의해 조절하고 분사시기와 당량비에 따라 나타난 기관의 연소와 배기 특성의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실린더 압력이 0.3MPa 이상에서는 흡입 공기량의 감소에 따라 열효율이 향상되어 THC의 배출농도가 크게 감소했다.
- 2) 낮은 출력에서 흡입공기량을 WOT의 80%이하로 줄였을 때 연소효율이 저하하여 THC의 배출농도가 증가했다.
- 3) 연소효율은 착화보조경유의 분사시기의 진각에 따라 커지지만 높은 당량비에서 연소효율이 커지면 실린더압력이 상승하여 NOx의 배출농도가 높아졌다.
- 4) 당량비가 높을 경우 흡입공기량을 90%

로 했을 때 연소효율은 향상하고 그 이하일 경우는 낮아졌다.

- 5) 당량비 0.6이하에서는 경유의 분사시기를 진각하고, 그 이상에서는 분사시기를 지연시켜 운전하면 배출되는 THC농도를 저감할 수 있다.

#### 참고 문헌

- 1) 中山 茂樹 외 5인, "천연가스 Dual Fuel 디젤기관의 성능 및 배기가스 특성의 개선", 일본 자동차기술회, No. 9739165, 1997.
- 2) 佐藤 利春 외 2인, "Dual Fuel가스 디젤기관의 연소", 일본 자동차기술회 논문집, vol. 26, 1995.
- 3) 塩路 昌廣, "천연가스를 연료로 한 디젤기관", 일본 자동차기술회 심포지엄, No. 9431111, 1994.
- 4) 草鹿 仁 외 3인, "천연가스 Dual Fuel 디젤기관의 연소와 배기가스 특성", 일본 자동차기술회, No. 9838903, 1998.
- 5) Weaver C. S., Turner S. H., "Dual Fuel natural gas / diesel engine : technology, performance and emissions", SAE No.940548, 1994.
- 6) 김복석 외 3명, "천연가스 Dual Fuel 디젤기관 경유분사밸브의 최적화 실험", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, No. 99s311, 1999.
- 7) 김복석 외 3명, "흡입공기량 조절에 의한 천연가스 Dual Fuel기관의 성능 및 배기특성", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, No.99380058, 1999.