

# 디젤기관의 LPG 혼합에 의한 오염배출물 저감특성

## Emissions Characteristics of Diesel Engine by Mixing LPG

장 영 준\*, 전 충 환\*\*, 이 춘 우\*\*\*  
Y. J. Chang, C. H. Jeon, C. W. Lee

### ABSTRACT

In this study, the characteristics of decreasing exhaust gas of diesel engine was examined in dual fuel method by using commercial LPG for automotive. LPG was supplied to engine intake port by fumigation method and flow rate was controlled by using the needle valve. LPG supply ratios were 0, 20, 30% of total fuel amount to be supplied to engine by mass base. We investigated the effect of LPG supply ratio on exhaust gas concentrations related to excess air ratio and engine load at 1600, 1800, 2000 rpm.

Soot concentration decreased about 30% in proportion to the increase of the LPG supply ratio. NO<sub>x</sub> concentration decreased in proportion to the increase of the LPG supply ratio. HC, CO concentration were higher in case of supplying LPG than diesel only and the increase rate was higher at low engine load. BSFC(Brake specific fuel consumption) was lower in proportion to the increase of the LPG supply ratio at high engine load and to the decrease of LPG supply ratio at low engine load.

주요기술용어 : Combustion emission(연소 배출물), Dual fuel(이종연료), Supply ratio(공급비율), Emission concentration(배출물 농도), Excess air ratio(공기과잉율)

### 1. 서 론

디젤기관에서 배출되는 연소배출물은 CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, 등의 가스상 물질과 Soot 등의 입자상 물질 등으로 구성되어 있다. 이들 중 HC, NO<sub>x</sub>는 대기중에 방출되었을 때 공기중의 산소와

태양의 자외선에 의하여 복잡한 물리·화학적 변화를 거쳐 이차생성물을 생성시켜, 안개 또는 기온역전 현상과 더불어 광화학 Smog 현상을 일으키는 원인이 되고 있으며, 이것이 인체와 생태계에 매우 나쁜 영향을 미치고 있다. 특히 자동차에 의한 오염물질중 디젤기관에서 배출된

\* 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과, 부산대학교 기계기술연구소

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 한전 고리원자력 발전소

물질이 차지하는 비율이 SO<sub>2</sub>는 99%에 이르고, Soot는 87%, NO<sub>x</sub>는 78%, CO는 22%, HC는 33%에 이르고 있으며 가솔린기관보다 배출비중이 낮은 것은 CO와 HC뿐이다.

디젤기관의 배기가스의 저감에 대한 대책은 크게 두가지 방향으로 시도되고 있다. 첫째는 연소제어방법으로 연소실 형상의 개선, 고압분사 및 노즐의 소구경화, 과급, 분사량 및 분사시기의 최적 제어 등의 새로운 디젤연소기술의 개발에 의한 것과 대체에너지를 이용하는 이중연료(Dual Fuel)법 등이다. 이들중 이중연료법은 연소실내의 연소특성의 개선으로 배기가스의 저감에 상당한 효과를 보이고 있다. 둘째는 이미 연소된 배출물을 배기관에서 필터에 의하여 거르거나 촉매장치를 이용하여 미연가스나 Soot 등을 2차연소시키거나 환원시키는 방법으로서 Filter의 성능, 재사용의 가능성, 수명, 경제성 등의 효율의 측면에서 볼 때 Ceramic filter trap은 가장 유망한 기술중의 하나이다.

디젤기관에 이중연료방식의 하나인 LPG를 혼합하여 Soot를 저감시키는 방법에는 Fumigation 방식과 Pilot 분사방식이 있다. 이들 방법은 디젤의 일정비율을 LPG로 대체시키고, 디젤은 LPG의 점화원으로 연소시키므로 디젤연료계통은 그대로 유지되지만 LPG를 공급하기위한 별도의 장치가 요구된다. 그러나 엔진의 개조범위는 그리 넓지 않아 많이 시도되고 있는 방법중의 하나이다. 이중 LPG를 흡입공기와 함께 혼합시키는 Fumigation 방식은 디젤기관에 디젤을 주연료로 하고 LPG를 일정비율로 공급하는 방식으로 大聖 등은 직접분사식 디젤기관에 고부하 운전시 LPG를 공급하여 그 연소특성을 밝히고, LPG 공급비율에 따른 배기가스의 농도특성을 분석하였다.<sup>1)</sup> 太田 등의 실험에 의하면 LPG 공급비율의 증가와 더불어 Soot의 농도 저감과 고부하에서 연료소비율의 향상이 있다고 보고하고 있으며, 특히 太田은 분사시기를 변화시켜 NO<sub>x</sub>와 HC 농도의 변화 뿐만 아니라 배기성분을 정밀분석하여 발암성 물질로 의심받고 있는 HC, 미립자와 CO의 저감특성을 밝혔다.<sup>2)</sup>

따라서 본 논문에서는 디젤기관의 효율 향상

과 유해 배기물질의 저감을 위한 새로운 기관의 개발 및 설계를 위한 기초자료를 얻기 위하여 소형 예연소실식 디젤기관에 Fumigation 방식으로 자동차용 LPG를 첨가하여 기관의 회전수, 공기과잉을 및 부하에 따라서 연소압력 및 압력변동 등의 연소특성과 Soot, CO, NO<sub>x</sub>, HC 등의 배기가스 농도 및 연료소비율에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치의 구성

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 크게 동력계, 연료-공기공급계, 배기가스 및 압력측정계로 나누어지며 사용된 기관은 무과급, 수냉, 단기통, 4 사이클, 예연소실식 디젤기관이며, 그 주요사양과 기관의 운전 조건은 Table.1과 같다.

연료공급계는 디젤을 주연료로 하고, LPG를 일정비율로 흡기행정시에 기화시켜 공기와 함께 실린더 내로 공급하였다. 디젤의 공급유량은 체적식 연료소비계를 이용하여 단위시간당 평균 유량을 측정하였으며, LPG 공급장치는 LPG 탱크, 필터 및 차단용 솔레노이드 밸브, 기화기, 가스유량계, 유량조절용 니들 밸브 등으로 구성되어 있다. 기화기에 기관 냉각수를 흐르게 하여 LPG를 예열시켰으며, LPG의 공급압력은 대기압과 같이 유지되도록 조절하였다. LPG공급유

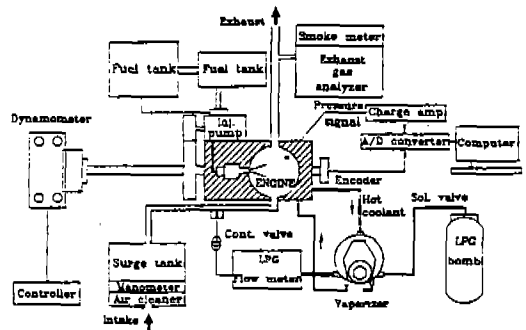


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Engine specification and experimental conditions

Item		Spec. & Condition		Remark
Engine	Type	Water Cooled. 4 cycle prechamber		
	Bore×Stroke(mm)	75mm×75mm		
	Displacement	331cc		
	Compression ratio	23		
Test condition	Speed(rpm)	1600, 1800, 2000		
	Load	25~100%		Torque method
	LPG supply ratios	0, 20, 30%		Fumigation
	Coolant temperature	75°C		
	Injection timing	15°C BTDC		
	Opening pressure	130kg/cm <sup>2</sup>		
	Nozzle type	Pintle		
Measurement item	Exhaust gas analysis	Soot(%)		Bosch smokemeter
		NO(ppm)		Electrochemical sensor
		HC(ppm)		NDIR
		CO(Vol%)		NDIR
Fuel	Specification	Diesel oil	L.P.G	
	(A/F)th ratio	14.37	15.43	
	Specific gravity	0.84	2.0068	

량의 조절은 미세조정이 용이하게 니들 밸브를 이용하여 조절하였다. 흡입공기유량은 공기의 맥동유동을 흡수할 있는 다이아프램식 공기탱크를 사용하였으며, 총류유량계로 보정한후 마노미터를 이용하여 흡입공기 유량을 측정하였다.

배기가스 측정계는 샘플링프로브를 기관의 배기밸브에서 3m되는 지점의 배기관에 직접 삽입하여 샘플링하였다. 사용된 배기가스 분석장비로는 NO<sub>x</sub> 분석기(Anerac-2000 : Horiba製), CO와 HC 농도분석기(MEXA-32F : Horiba製)를 사용하였고, Soot의 측정은 Smokemeter(SB-16 : Bosch製)를 이용하였다.

연소압력 측정은 주연소실에 스트레인게이지식 압력변환기(MP-100 : Tokyo meter製)를 설치하고 캠축의 360pulse/rev의 엔코더와 동기시켜 크랭크각도에 따른 압력값을 얻을 수 있도록 하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에 사용된 단기통 기관의 운전조건은 운전상태가 안정되고, 사이클변동이 적어서 정확한 데이터를 얻을 수 있고, 또 사용빈도가 높은 중속범위가 기관회전수 1600, 1800, 200rpm을 채택하였다. 토오크법에 의한 각 부하조건에 따라 일정한 회전수에서 전체 연료소비량에 대한 LPG 공급비율은 전체적인 경향을 알아보기 위하여 예비실험을 토대로 하여 크게 질량비율로 0, 20, 30%로 공급하면서 흡기공기유량, 디젤과 LPG의 공급유량, 연소실 압력, 배기가스 농도 등을 측정하였다. LPG 40% 경우에는 이상음과 함께 연소실의 압력이 급격히 상승하는 노킹현상이 발생되어 장시간의 실험이 불가능하여 연소압력만 얻은 후 배기가스의 농도측정 실험조건에서는 제외하였다.

디젤과 LPG의 공급비율  $R_s$ 는 질량에 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$R_s = \frac{M_{LPG}}{M_{DSL} + M_{LPG}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서  $M_{LPG}$ 는 첨가된 LPG의 질량,  $M_{DSL}$ 는 디젤의 질량을 나타낸다.

공기과잉을  $\lambda$ 는 디젤의 이론공연비를 기준으로 하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\lambda = \frac{M_{AIR}}{M_{DSL} \times (A/F)_{DSL} + M_{LPG} \times (A/F)_{LPG}} \quad (2)$$

단,  $M_{AIR}$ 는 공기의 질량,  $(A/F)_{DSL}$ 과  $(A/F)_{LPG}$ 는 디젤 및 LPG의 이론공연비이다.

연소압력은 20 사이클을 평균한 연소최고압력 및 TDC에서 연소 최고압력까지의 연소기간에 있어서의 연소특성을 고찰하였다. 배기가스 측정시 기관이 각 운전조건의 정상상태에 충분히 도달된 후 5분 동안 연속측정한 평균값을 측정값으로 하였다. Soot 측정은 각 운전조건에서 5회의 샘플링을 행한후, 그 산술평균값을 1회의 측정값으로 하였다. 배기가스의 측정단위는 CO는 Vol%로, HC는 Hexane base의 ppm으로,  $No_x$ 는 ppm단위로 했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소특성

디젤만으로 운전시에는 연료분사 개시 후, 일차 착화지연기간을 거친 후 TDC 직전에 예연소실에서 일차 연소가 일어나 주연소실로의 분류화염 전파시간 및 이차 착화지연기간인 약 0.5~0.6ms 이후 급격한 압력상승이 일어나는 급격연소기간이 있으나, LPG 공급시에는 동일한 일차 착화지연기간을 거친 후, TDC 직전에 예연소실에서 일차 연소가 일어남과 거의 같은 시기에 급격연소시간이 나타난다. 이것은 LPG 예혼합상태에서는 화염전파속도가 디젤만의 확산연소속도보다 빠를 뿐만아니라 연소초기에

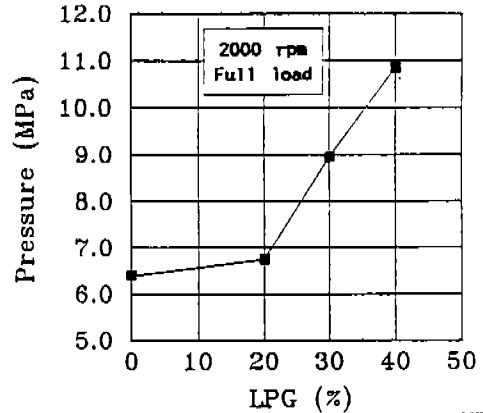


Fig.2 Effect of LPG supply ratio on ensemble averaged peak pressure

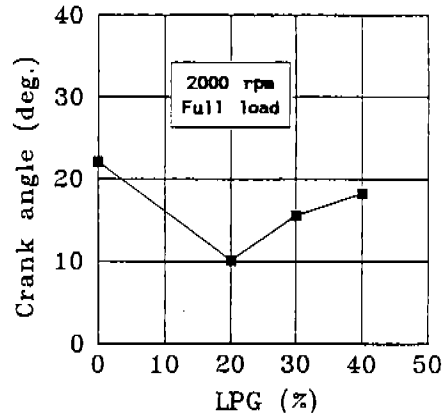


Fig.3 Effect of LPG supply ratio on burning duration from TDC to peak pressure point

LPG 혼합비율 만큼 연소대상 연료량이 실린더 내에 많이 존재하기 때문이라고 생각된다. Fig.2은 기관속도 2000rpm 및 전부하 상태에서 LPG 공급비율에 따른 주연소실의 20 사이클을 평균한 연소최고압력의 특성을 나타낸 것이다. 연소최고압력은 LPG 공급비율이 20%인 경우는 0.35~0.4MPa 정도 증가하나, 30%인 경우는 2.3~2.4MPa 정도의 급격한 증가를 하고 있으며, 40%인 경우는 급격연소기간에서 불규칙적인 급격한 압력상승 구간이 나타나는 이른바 노킹현상이 일어남을 알 수 있었다. 따라서 Fig.4부터의 배기가스 분석에서는 LPG 공급비율이 40%인 경우는 제외하였다. Fig.3은 Fig.2와 같은 조건하

에서 LPG 공급비율에 따른 TDC에서 연소최고 압력까지의 크랭크 각도, 즉 연소기간을 20 사이클 평균한 값이다. 연소최고압력 도달시간은 20%인 경우가 가장 빠르고 안정적인 연소상태를 나타내었으며, 디젤만의 경우가 가장 늦었다. 따라서 LPG 공급시에는 연소압력이 급격히 높아지므로 연소안정화를 위하여 연소압력을 낮추는 것이 효과적이다. 이것은 디젤의 분사시기를 약간 지연시켜서 디젤과 LPG가 동시에 폭발적으로 연소되는 기간을 노킹이 일어나기 않는 범위내에서 최대로 분리시켜 줌으로서 가능할 것이다.

### 3.2 배기가스 특성

#### 3.2.1 Soot의 농도특성

Fig.4는 공기과잉율 부하에 따른 Soot 농도의 변화를 나타낸 것이다. LPG 공급비율이 증가할수록 Soot의 농도가 저감하고 있으며, 그 저감율은 공기과잉율이 적은 연료가 농후한 혼합기의 연소상태 및 고부하에서 더욱 컸다. LPG공급비율이 30%인 경우 1600rpm에서는 최대 약 37.7%, 1800rpm에서는 약 44%, 2000rpm에서는 약 40.5%의 Soot 저감효과가 있으나, 공기과잉율이 큰 희박연소에서는 저감효과가 거의 없었다. 이것은 희박연소 상태 및 저부하에서는 디젤만의 경우도 Soot 농도가 낮기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 Soot 저감현상은 Fig.2의 연소최고압력과 Fig.3의 최고압력에 도달하는 크랭크 각도와 비교해 보면 LPG 공급되는 경우의 급격 연소 기간이 디젤만의 경우보다 빠르기 때문에,

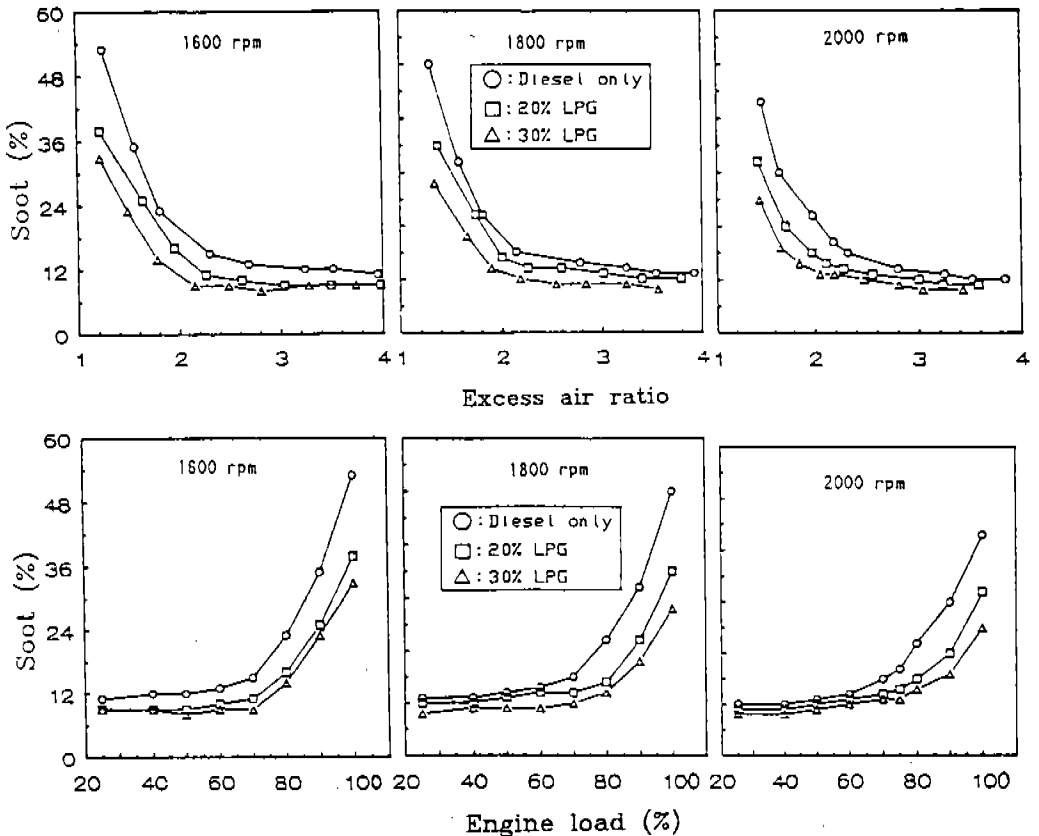


Fig.4 Effect of LPG supply ratio on Soot concnue other air related to excess air ratio and engine load

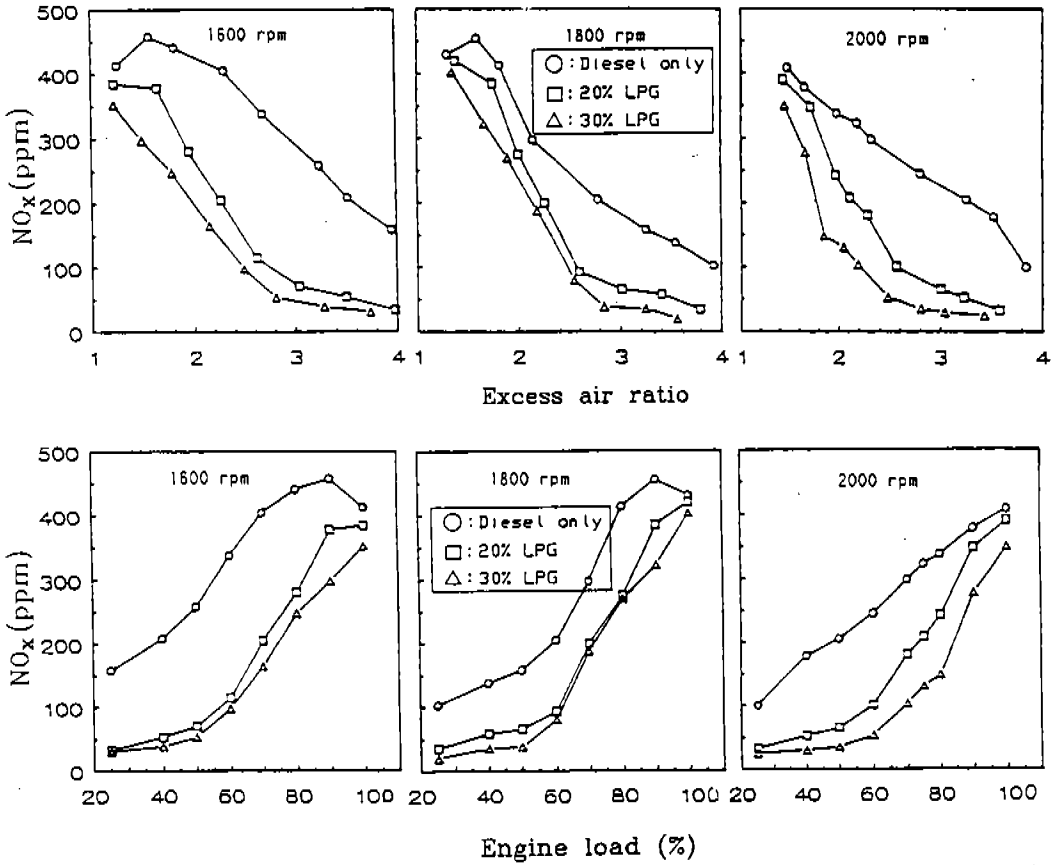


Fig.5 Effect of LPG supply ratio on NO concentration related to excess air ratio and engine load

이때 형성된 고압·고온의 연소장에 의하여 예연소실에서 과농상태에서 생성된 탄소상 미립자가 주연소실에서 산화됨으로, 디젤만의 경우보다 산화율이 크고, 또한 LPG 공급비율만큼 디젤의 분사량이 줄어들기 때문이라고 생각된다.

### 3.2.2 NO<sub>x</sub>의 농도 특성

Fig.5는 공기과잉율 및 부하에 따른 NO<sub>x</sub> 농도를 나타낸 것이다. NO<sub>x</sub>의 농도는 LPG의 공급비율이 증가할수록 낮아지나, 그 저감비율은 희박측 및 저부하에서 더욱 커지는 경향을 보였다. 이것은 디젤만의 경우는 주연소실의 연소압력 및 연소온도는 LPG 공급시보다 낮지만, 고온·고압인 예연소실에서 NO<sub>x</sub>의 생성비율이 커지는 Fenimore 기구를 따르는 Prompt NO<sub>x</sub>가 지배적

이기 때문이라고 생각된다. 또한 LPG 공급시는 LPG 공급비율 만큼 디젤의 분사량이 줄기 때문에 Prompt NO<sub>x</sub>의 생성이 줄고, 또한 초기연소시 급격하게 연소가 일어남으로 주연소실의 연소압력 및 연소온도가 높아 Zeldovich 기구를 따르는 Thermal NO<sub>x</sub>가 지배적이나, 초기의 급격한 연소에 의한 산소량이 상대적으로 감소하므로 주연소실에서의 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 둔화되기 때문이라고 생각된다. 이러한 NO<sub>x</sub>의 감소현상은 太田의 실험결과와 거의 같은 경향을 보인다.

### 3.2.3 HC의 농도 특성

Fig.6은 공기과잉율 및 부하에 따른 HC 농도를 나타낸 것이다. 디젤만의 경우는 공기과잉율 및

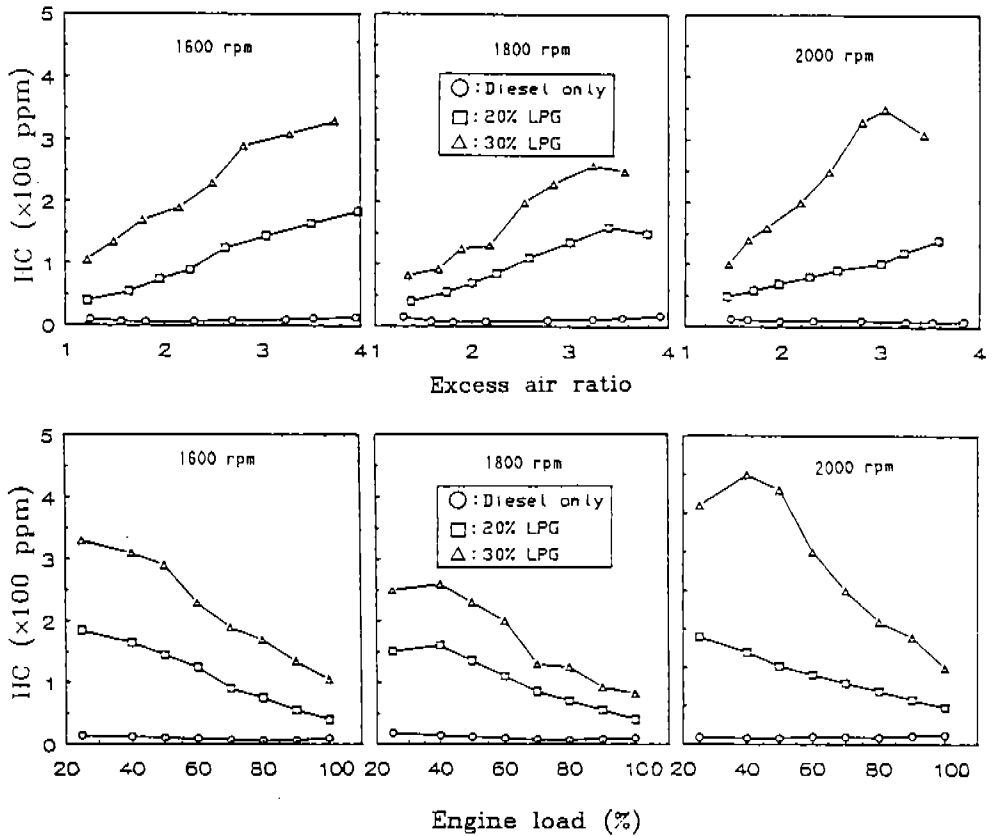


Fig.6 Effect of LPG supply ratio on HC concentration related to excess air ratio and engine load

부하에 따라 배출농도가 상당히 낮을 뿐만 아니라 큰 변화가 없으나, LPG 공급비율을 증가할수록 상대적으로 배출농도는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 또한 30% LPG 공급비율인 경우에는 연료가 농후한 혼합기인 경우의 연소상태 및 고부하로 감에 따라 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 LPG의 공급비율에 따른 전체적인 HC의 증가현상은 디젤보다도 LPG 예혼합기가 실린더 벽의 소염작용(Wall quenching)에 의하여 미연소 연료의 양이 많아지기 때문이라고 생각된다. 또한 연료가 희박한 혼합기인 경우의 연소상태 즉, 저부하로 갈수록 HC의 농도가 급증하는 것은 희박 혼합기에서 화염이 발달하지 못하여 실화가 많아지기 때문이라고 생각된다. 그리고 30% LPG 공급비율인 경우

농후한 연소상태 및 고부하로 갈수록 HC의 농도가 급격히 감소하는 것은 농후한 연소상태 및 고부하에서는 연소압력 및 온도가 높으므로, 상대적으로 실화가 잘 뿐만 아니라 소염두께도 얇아지기 때문이라고 생각된다. 결국 LPG 공급비율의 증가와 더불어 HC의 농도가 증가하는 것은 LPG 공급비율이 증가할수록 미연소상태로 배출되는 LPG 예혼합기 농도가 증가하기 때문이라고 생각되며, 가솔린기관의 경우보다는 낮았다.

### 3.2.4 CO 농도 특성

Fig.7은 공기과잉율 및 부하에 따른 CO 농도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전체적으로 LPG 공급비율이 증가함에 따라 CO의 배출농도가 증가하고 있다. 그러나 농후한 연소상태 및

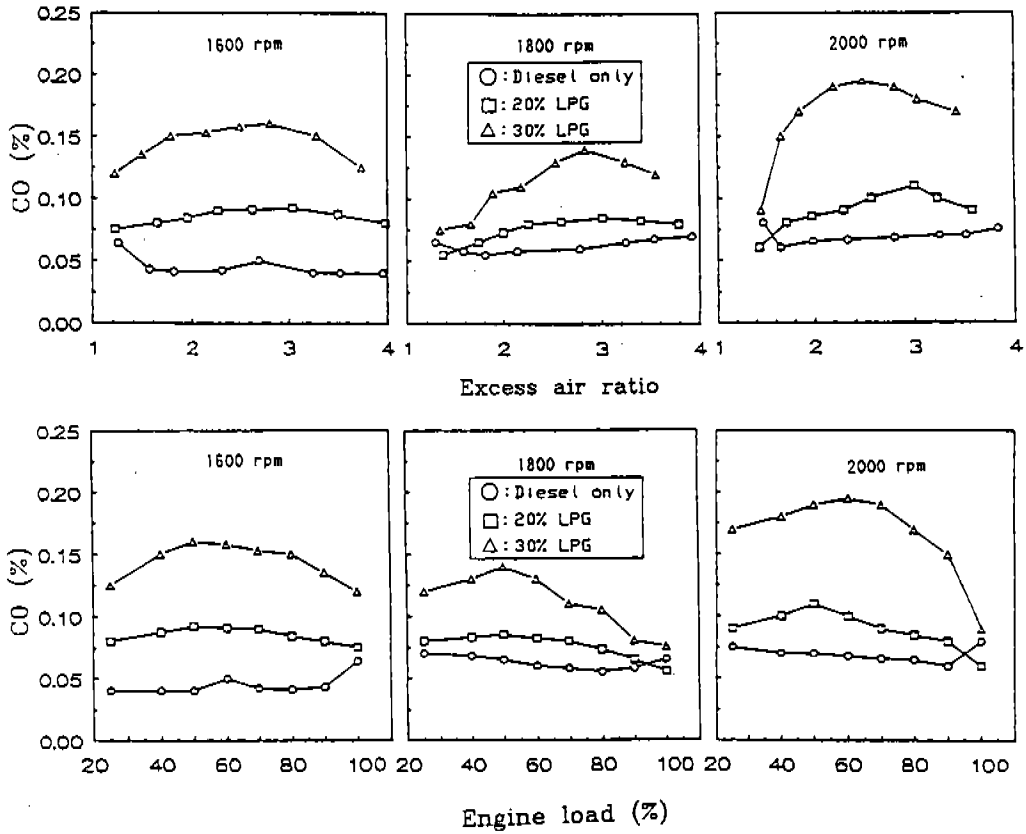


Fig.7 Effect of LPG supply ratio on CO concentration related to excess air ratio and engine load

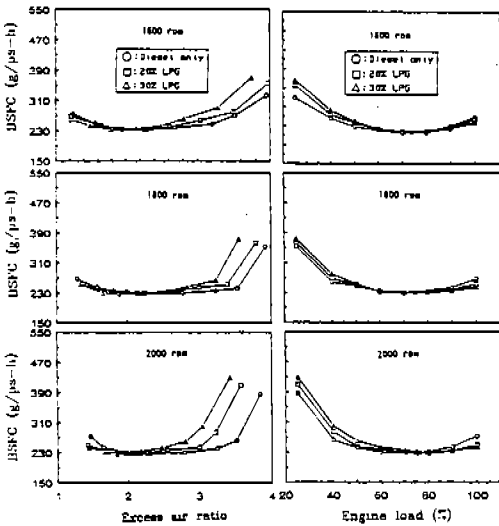


Fig.8 Effect of LPG supply ratio on BSFC concentration related to excess air ratio and engine load

고부하시에 LPG를 20%를 공급한 경우가 오히려 디젤만의 경우보다 CO의 농도가 낮을 뿐만 아니라 30% 공급인 경우도 디젤만의 경우와 거의 비슷한 농도를 나타내었다. 그러나 30% 공급인 경우에는 희박연소상태 및 저부하쪽 갈수록 급격한 CO의 증가현상이 나타났다. 이러한 현상은 희박한 혼합기상태에서는 화염의 발달과정중 일어나는 실화 뿐만아니라 LPG를 공급하는 경우가 주연소실에서의 착화지연기간이 짧으므로 제어연소기간이 디젤만의 경우보다 길어지므로 연료가 농후한 혼합기인 경우의 분류화염에서 일어나는 불완전연소 때문이라고 생각된다.

### 3.3 연료소비율 특성

Fig.8은 각각 LPG 공급비율에 따라 공기과잉율과 기관부하에 대한 연료소비율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 공기과잉율이 2 이하 및



기관부하가 80% 이상에서는 LPG의 공급비율이 증가함에 따라 연료소비율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 그러나 공기과잉율이 2 이상인 희박측 및 저부하에서는 오히려 LPG 공급비율이 증가함에 따라 연료소비율이 높아지는 경향을 보였으며, 각 기관회전수에 대해서도 거의 같은 경향임을 알 수 있었다. 따라서 실기관에 적용시 고부하 운전시 LPG를 공급하는 것이 바람직할 것이다.

## 5. 결 론

예연소실식 디젤기관에 LPG를 이용한 이중 연료 방식을 적용하여 본 실험의 범위내에서 기관의 연소특성 및 배기배출물 특성을 고찰하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연소 최고압력 상승율은 일정한 부하상태에서 LPG 공급비율을 증가시킬수록 급격히 커진다.
  2. Soot의 농도는 LPG 공급비율이 증가할수록 저감되며, 그 저감비율은 30% 이상이 되며 고부하일수록 크다.
  3. NO<sub>x</sub>의 농도는 LPG의 공급비율이 증가할수록 낮아지나 저감비율은 저부하일수록 더 크다.
  4. 연료소비율은 고부하에서는 LPG 공급비율을 증가시킬수록, 저부하에서는 LPG 공급비율을 적게할수록 작아진다.
- 이상의 결과로부터 디젤기관의 주된 오염원이

Soot와 NO<sub>x</sub>이므로 HC, CO가 다소 증가하더라도 저부하에서는 디젤만으로 운전하고 고부하에서 LPG를 공급하는 것이 효과적이며, 또한 LPG 공급비율은 30% 정도가 적당하다.

## 참 고 문 헌

1. 小早川 隆. 1986. "ディーゼル黒煙低減に関する提言(2)" 内燃機関 Vol.25, No.314, pp.16~22.
2. 大聖 泰弘. 1989. "LPG 混入 大型 ディーゼル機関における燃焼特性について", 自動車技術會 學術講演會前刷集 892, pp.253~256.
3. Lois E. 1984, "Substitution of Diesel Fuel by Gaseous Fuel", TNO Research Institute of Road Vehicles, pp.39~50.
4. 大阪工業會. 1985. ディーゼル車の黒煙を低減する技術(DLP技術)の實用化 實證テスト結果について", 工業, No.449, pp.125~129.
5. Nightingale, D.R. 1975. "A Fundamental Investigation into the Problem of NO Formation in Diesel Engine", SAE Transaction, Vol.84, pp.2196~2212.
6. Greeves, G. and Wang, C.H.T. 1978. "Origin of Hydrocarbon and Carbon Monoxide Emissions from Diesel Engine", 17th International Congress FISITA, pp.779~804.
7. 이인우, 김영길. 1991. "자동차 배출가스 규제 현황 및 대응 기술개발", KATECH Tech. Seminar, pp.5~62.