

# 압축비 변경에 따른 CNG기관의 성능특성 연구

## Performance Characteristics of CNG Engine at Various Compression Ratios

김 봉 석\* 이 영 재\* 고 창 조\*\*  
B. S. Kim, Y. J. Lee, C. J. Koh

### ABSTRACT

Natural gas is one of the most promising alternative fuels for automotive vehicles, because it has lower exhaust emissions and better fuel economy characteristics than gasoline and can be used in conventional engines with a little modification. In the present study, a conventional gasoline engine was modified to a CNG dedicated engine, which can be operated with CNG (compressed natural gas) only, and a engine bench test was performed at various compression ratios. As a result, it was revealed that the prototype CNG engine can be operated with lower exhaust emissions, better fuel economy and better thermal efficiency, but with a slightly reduced brake horse power, compared to the conventional gasoline engine.

### 1. 서 론

지난 70년대의 2차에 걸친 석유위기 이래, 범세계적인 차원에서 대체에너지의 개발에 대한 연구가 추진되어 왔으며, 최근의 페르시아만 사태로 인하여 이 분야에 대한 연구는 더욱 가속화되고 있다. 또한 지구온실효과, 산성비, 오존층파괴 등 제반환경문제를 야기하는 대기오염물질중의 상당량이 에너지 사용기에 의해 발생하고 있다는 관점에서 저공해 에너지원에 대한 관심도 점차 고조되고 있다. 특히 자동차분야의 경우 현재 운행중인 차량의 거의 전부가 석유계연료에 의존하고 있고, 또한 도심지역의 대기오염에서 자동차 배기가스가 차지하는 비중이 날로 증가추세에 있어

서 각국의 정부, 연구기관, 메이커 등에서는 저공해 대체연료자동차의 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는, 기존 내연기관의 구조를 크게 변경시키지 않고도 사용이 가능하며, 안전성, 내구성 등에 있어서 기존 내연기관의 연료에 손색이 없는 우수한 특성을 가지고 있고, 또한 저공해성연료이며 매장량이 풍부한 에너지원<sup>1)</sup>인 압축천연가스(CNG: Compressed Natural Gas)를 차량용 연료로 사용하기 위하여 기존 가솔린기관의 압축비를 변경하고, 기관회전수, 공기연료비 및 점화시기 등의 운전변수를 변화시켜 이에 따른 기관의 출력, 연료소비율, 열효율 및 배기배출물 등의 제특성을 살펴보았다.

\* 정회원, 한국동력자원연구소 수송연구실

\*\* 한국동력자원연구소 수송연구실

2. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략을 나타낸 것으로서, 실험장치는 크게 실험용기관, CNG 연료 공급시스템, 배기가스분석기, 연소분석기, 기관동력계 및 주변기기 등으로 구성되어 있다. 실험에 사용한 엔진은 기존압축비가 9:1인

4기통 4사이클 전기점화기관으로서 주요제원은 Table 1에서와 같다. CNG 연료공급시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 3단식 압력조정기, LPG전용믹서를 변경한 가스에어믹서, 진공리처버, CNG실린더 등으로 구성되어 있다. 주요측정장치의 제원은 Table 2에서와 같다.

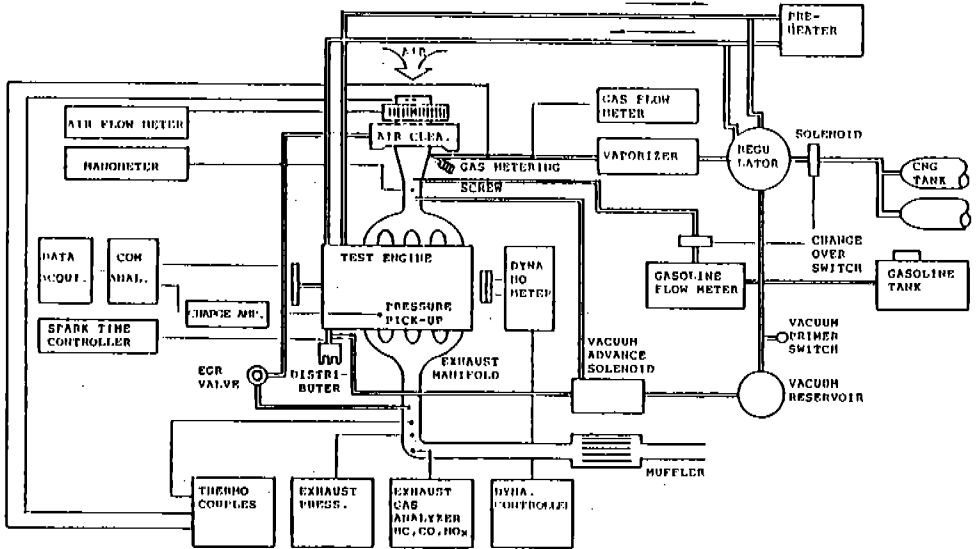


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

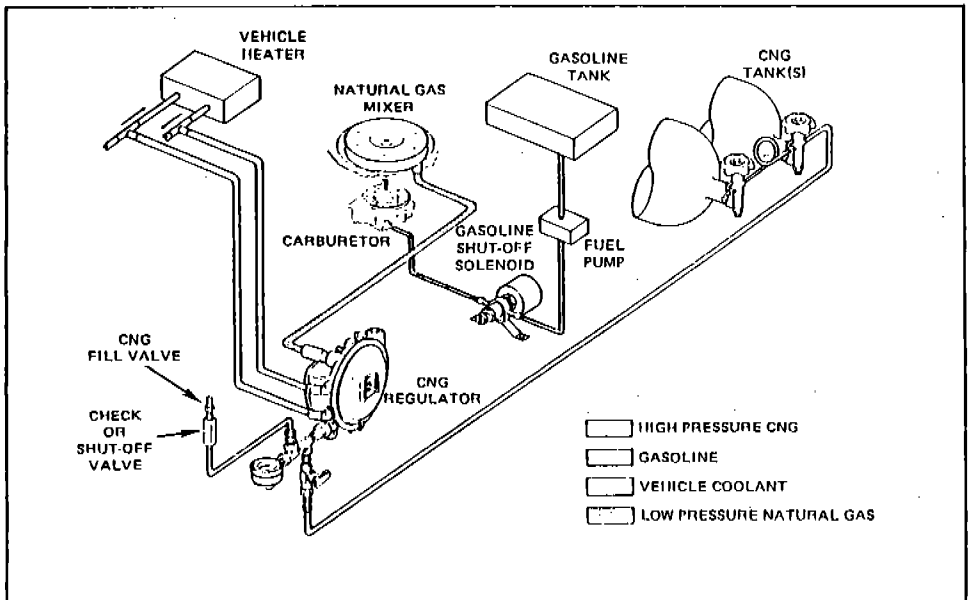


Fig.2 Schematic Diagram of Fuel Supply System

Table 1 Test Engine

Engine Type	4 Cyl. IN-OHC
Bore(mm) x Stroke(mm)	73 x 86
Displacement(cc)	1439
Compression Ratio	9.0
Combustion Chamber	Hemispherical Type
Max. Output(ps / rpm)	68 / 5000
Max. Torque(kg-m / rpm)	10.67 / 2500

Table 2 Measuring Apparatus

	Measurement Items	Model, Maker
Dynamometer	Torque, rpm, Spark Advance, Temperature, Air & Fuel Flow, etc.	ED-15D, Ono Sokki
Exhaust Gas Analyzer	CO, HC(NDIR)	MEXA 324-F, Horiba
	NOx(CLD)	955 NO/NOx, Beckman
Combustion Analyzer	P-θ, P-V, P <sub>max</sub> -θ, etc.	CB-366, Ono Sokki
Gas Flow Meter	CNG Flow Rate	MASFLO F-333, Oval

### 3. 실험방법

실험은 압축비 9:1, 10:1, 11:1인 CNG기관 및 기존압축비상태의 가솔린기관에 대하여 각각 실시하였다. CNG기관의 압축비는 실린더헤드의 밀면을 절삭함에 의해 변화시켰다. CNG는 한국가스공사(株)의 인도네시아산 천연가스를 사용하였으며, 주요성분은 메탄(86.3%), 에탄(8.6%), 프로판(4.0%), 부탄(1.1%) 등이다.

주요 기관운전변수로서 기관회전수, 공기과잉을 및 점화시기를 변경시켜, 이에 따른 동력계하중, 연료 및 공기소비량, 배기배출물(CO, HC, NOx) 및 배기가스온도 등을 측정

Table 3 Test Matrix

	CNG	Gasoline
Compression Ratio	9.0, 10.0, 11.0	9.0
Engine Speed(rpm)	1500, 2000, 2500, 3000, 3500	
Throttle Opening	WOT	
Excess Air Ratio	0.75 ~ 1.35	0.88 ~ 1.3
Spark Timing	MBT	

하였다. 또한, 연소분석기를 사용하여 연소실내의 지압전도와 연소실내의 노킹발생여부를 조사하였다.

기관회전수는 WOT(wide open throttle) 상태에서 1,500rpm에서 3,500rpm까지 500rpm 간격으로 변화시켰다. 공기과잉율은 미터링스크류에 의해 연료유량을 조절함에 의해 변화시켰으며, CNG기관의 경우 0.75에서 1.35까지, 가솔린기관의 경우 0.88에서 1.3까지 각각 변화시켰다. 점화시기는 디스트리뷰터의 캠위상각을 변화시켜 CNG 및 가솔린 기관 모두 MBT(minimum spark advance for best torque)로 설정하였다. CNG기관의 MBT는 천연가스의 느린 연소속도로 인하여<sup>2)</sup> 동일조건인 가솔린기관에서보다 12~17도 정도 진각된 값이다. Table 3에 전체적인 운전조건을 나타낸다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 기관출력

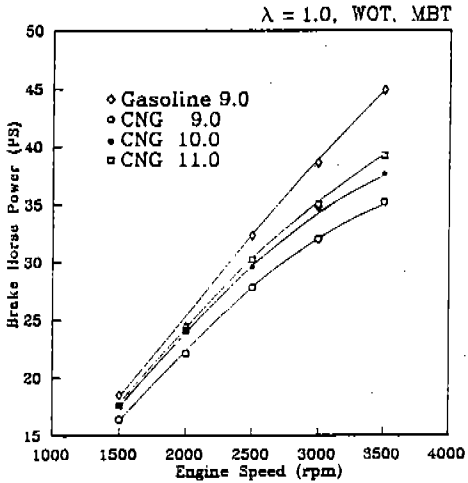
Fig.3 (a), (b), (c), (d)는 공기과잉을  $\lambda=1.0$ , WOT, MBT 상태에서 기관회전수를 변화시켰을 때의 출력, 토크, 지시평균유효압력, 체적효율을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 CNG 9.0, CNG 10.0, CNG 11.0은 각각 압축비 9.0, 10.0, 11.0인 CNG기관을, Gasoline 9.0은 기존압축비 9.0의 가솔린기관을 나타낸다.

그림 (a)에 의하면, 기존압축비 9.0의 CNG기관의 출력은 가솔린기관에 비하여 10~20% 정도 크게 저하하고 있다. 그러나 압축비를 높여 줌에 의해 이러한 출력저하가 개선되

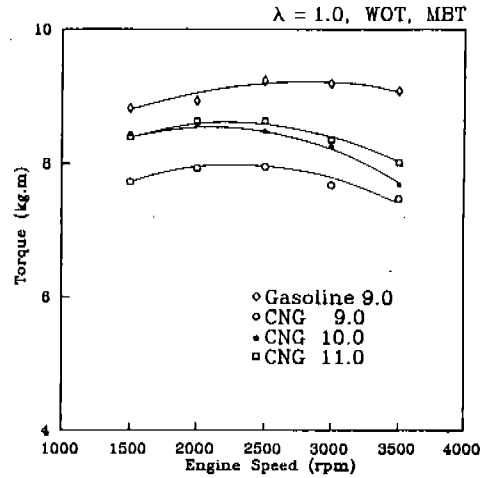
어, CNG 11.0의 경우에는 가솔린기관에 대하여 저회전수역에서 거의 비슷한 출력이 고회전수역에서 10% 정도의 출력저하가 보여지고 있다. 또한 그림 (b), (c)의 토크와 평균유효압력에 있어서도, 상술한 출력곡선에서와 마찬가지로, CNG기관의 경우가 가솔린기관에 비하여 저회전수역에서 낮은 값을 보이고 있으며, 압축비의 증가에 따라 약간씩 높아지는 경향을 보이고 있다. 한편, CNG기관의 경우에 있어서 압축비의 증가로 인한 노킹현상은 인지할 수 없었으며, 이는 CNG의 옥탄가(ON

130)가 가솔린의 옥탄가(90전후)에 비하여 훨씬 높기 때문으로 생각된다<sup>3)</sup>

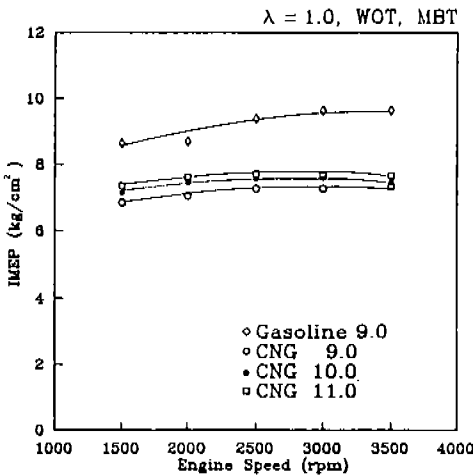
이와 같이 CNG기관의 출력이 가솔린기관에 비하여 크게 저하하는 이유로서는, 그림 (d)에서 보는 바와 같이 CNG기관의 체적효율이 가솔린기관에 비하여 저회전수역에서 10% 정도, 고회전수 영역에서 17% 정도 크게 저하하는 것, 연료의 단위질량당 발열량은 CNG (11.700 kcal/kg)가 가솔린(10.550 kcal/kg)보다 더욱 크지만, 이론공기연료비는 CNG(17:1)가 가솔린(14.7:1)보다 크기 때문에 연료



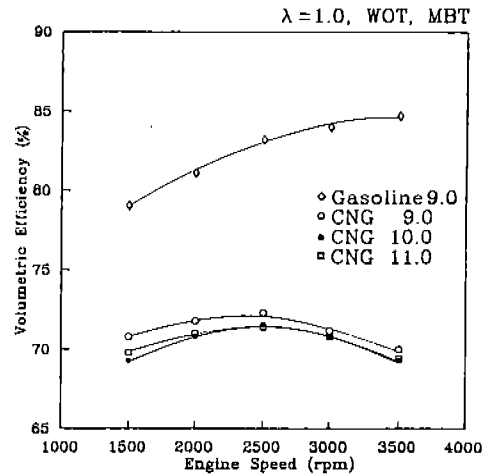
(a) Brake Horse Power



(b) Torque



(c) IMEP



(d) Volumetric Efficiency

Fig.3 Performance Characteristics as a Function of Engine Speed for CNG and Gasoline Engine

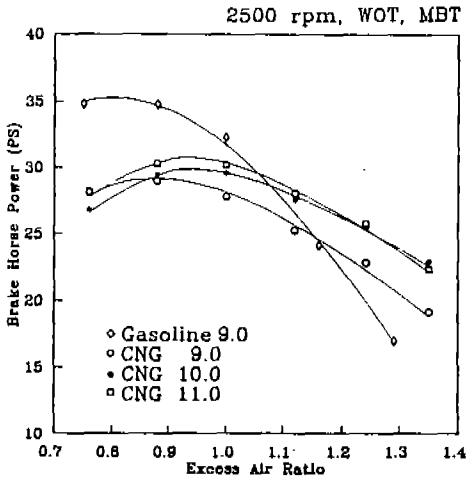


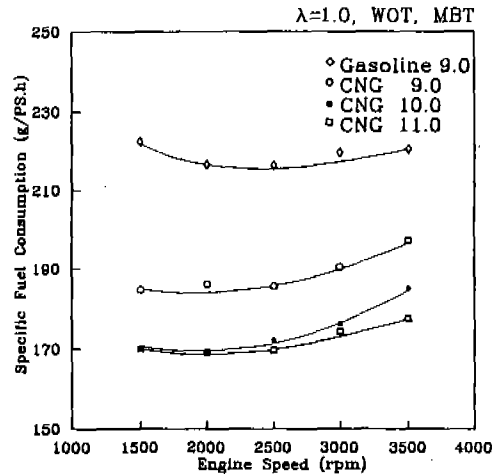
Fig. 4 Brake Horse Power as a Function of Excess Air Ratio for CNG and Gasoline Engine

공기혼합기의 단위체적당 발열량이 상대적으로 낮아지는 것 등을 들 수 있다.<sup>4,5)</sup>

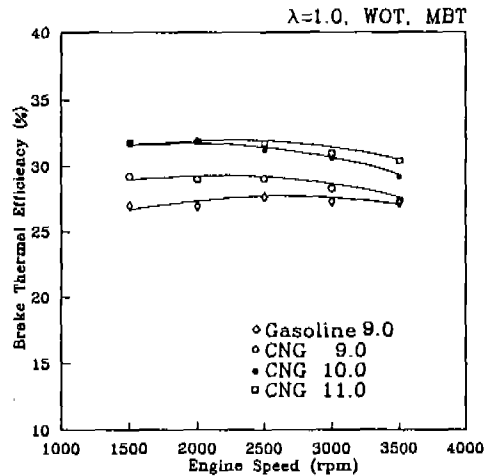
Fig. 4는 기관회전수 2,500 rpm, WOT, MBT 상태에서 공기과잉율을 변화시켰을 때의 기관출력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 CNG기관의 출력은, 공기과잉율 1.1 이하의 영역에서는 가솔린기관의 그것보다 저하하나, 1.1 이상에서는 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 압축비를 높여줌에 따라 점차 회복됨을 볼 수 있다. 한편, 가솔린기관의 최대출력이  $0.8 < \lambda < 0.9$ 에서 나타나고 있는데 대하여, CNG기관에서는  $0.9 < \lambda < 1.0$ 에서 나타나고 있으며,  $\lambda > 1.0$ 에서의 출력의 저하 경향이 가솔린기관에서와는 달리 상당히 완만하다. 따라서 CNG기관의 경우에는 기관출력의 별 희생이 없이 희박혼합기운전이 가능하며, 이를 통하여 후술하는 바와 같이 연료소비율과 배기배출물 특성을 개선시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 연료소비율 및 열효율

Fig. 5 (a), (b)는  $\lambda=1.0$ , WOT, MBT 상태에서 기관회전수를 변화시켰을 때의 연료소비율 및 열효율을 나타낸 것이다. 그림 (a)에 의하면 CNG기관의 연료소비율은 가솔린기관에 비하여 현저히 감소하고 있다. 예로서 CNG



(a) Specific Fuel Consumption



(b) Brake Thermal Efficiency

Fig. 5 Some Characteristics as a Function of Engine Speed for CNG and Gasoline Engine

11.0의 연료소비율은 가솔린기관에 비하여 20여% 정도 감소하며, 이는 압축비의 증가에 따른 열효율의 향상으로 인하여 CNG 9.0에 비하여 10% 정도 더욱 감소한 것이다. 이처럼 CNG기관의 연료소비율이 가솔린기관에 비하여 크게 감소하는 것은, 전술한 바와 같이 전연가스의 단위질량당 발열량이 가솔린의 그것보다 10% 정도 더 높다는 이유 이외에도 액상의 가솔린보다 기상의 CNG가 흡기다기관에서의 혼합 및 분배성이 양호하고 또한 연소실내에서의 연료의 증발과정이 없어서 보다

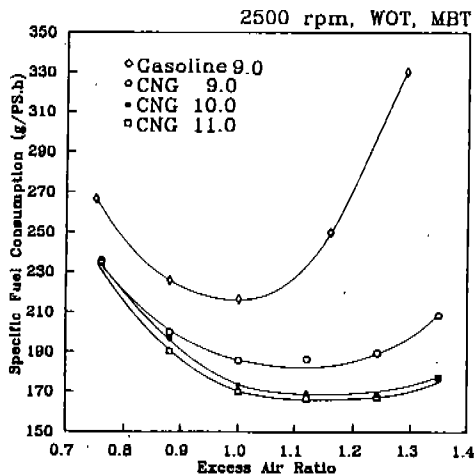


Fig. 6 Specific Fuel Consumption as a Function of Excess Air Ratio for CNG and Gasoline Engine

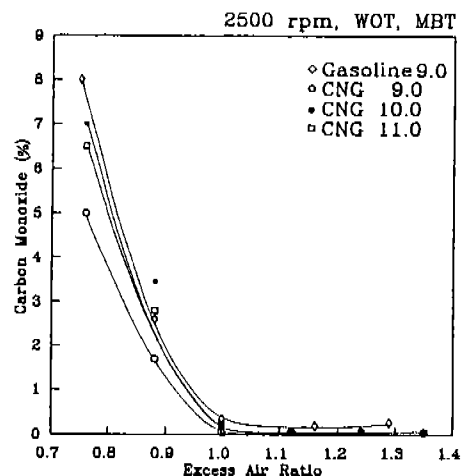
완전한 연소가 가능하며, 그림 (b)에서 보는 바와 같이 가솔린기관에 비하여 10~15% 정도 열효율이 향상되었기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6은 기관회전수 2,500 rpm, WOT, MBT 상태에서 공기과잉율을 변화시켰을 때의 연료소비율을 나타낸 것이다. CNG기관의 연료소비율은 전 공기과잉율 영역에 걸쳐서 가솔린기관에 비하여 현저히 감소하며, 압축비를 높인 경우에는 그의 절감폭이 더욱 증가하고 있다. 한편, 가솔린기관의 최저연료소비율이  $\lambda=1.0$  부근에서 나타나고 있음에 대하여, CNG기관의 경우에는  $1.1 < \lambda < 1.2$  부근에서 나타나고 있으며, 또한  $\lambda > 1.0$ 의 희박혼합기 영역에 있어서 공기과잉율의 증가와 더불어 가솔린기관의 연료소비율이 급격히 증가하는 것과는 달리, CNG기관의 경우에는 거의 변화를 보이지 않고 있다. 따라서, 전술한 출력성능에서 살펴 본 바와 같이 CNG기관의 희박혼합기 운전특성이 가솔린기관에 비하여 양호함을 알 수 있다.

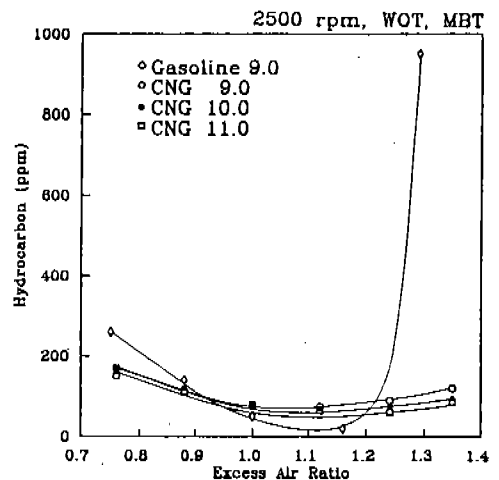
#### 4.3 배기배출물

Fig. 7 (a), (b), (c)는 엔진회전수 2,500 rpm, WOT, MBT 상태에서 공기과잉율을 변화시켰을 때의 배기배출물농도를 나타낸 것이다.

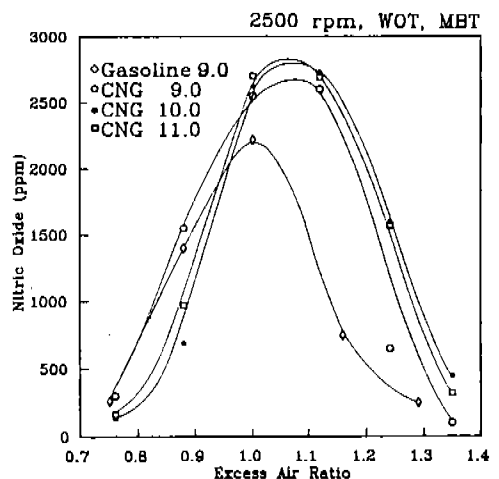
그림 (a)의 일산화탄소 배출농도에 의하면, 공기과잉율 1.0 이하의 영역에서는 CNG 기관



(a) Carbon Monoxide



(b) Hydrocarbon



(c) Nitric Oxide

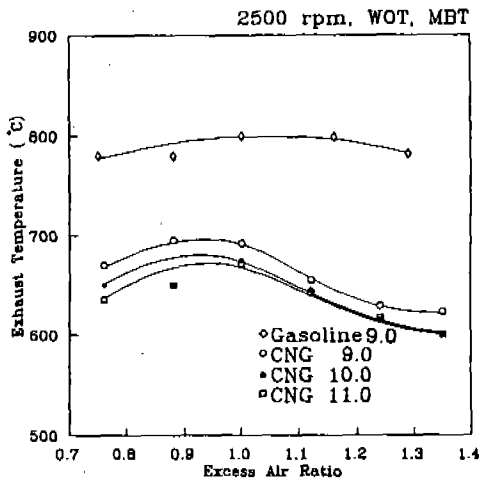
Fig. 7 Exhaust Emissions as a Function of Excess Air Ratio for CNG and Gasoline Engine

과 가솔린기관의 배출농도가 비슷한 수준을 보여주고 있으며, 1.0이상의 희박혼합기영역에서는 CNG 기관의 배출농도가 가솔린기관에 비하여 감소함을 보여주고 있다. 한편, CNG 기관과 가솔린기관 모두 공기과잉을 1.0 이하의 농후혼합기영역에서는 일산화탄소의 배출농도가 급격히 증가하며, 1.0이상의 희박혼합기영역에서는 급격히 저하하는 일반적인 경향을 보여주고 있고, 또한 압축비의 변화에는 거의 영향을 받고 있지 않음을 보여주고 있다.

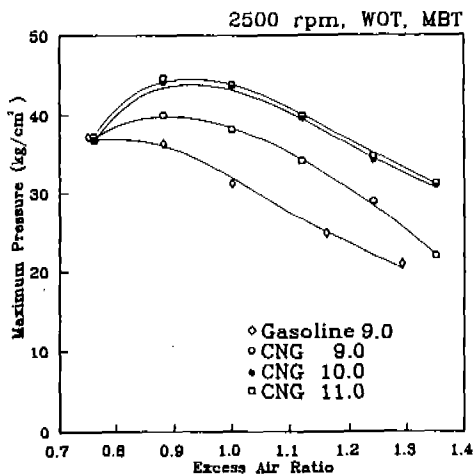
그림 (b)의 탄화수소 배출농도에 의하면, 공기과잉을 0.95~1.20 사이의 영역에서는 CNG 기관의 경우가 가솔린기관에 비하여 약간 더 배출되고 있으나, 이 이외의 농후 및 희박혼합기영역에서는 가솔린기관보다 더 적게 배출되고 있다. 특히  $\lambda > 1.20$ 의 희박혼합기영역에서 가솔린기관의 경우에는 탄화수소의 배출농도가 급격히 증가하고 있으나, CNG 기관의 경우에는 아주 완만한 증가를 보이고 있다. 압축비의 변화에 따른 영향을 검토해 보면, 공기과잉을 1.0이하의 농후혼합기영역에서는 압축비의 증가에 따라 배출농도가 증가하며, 1.0이상의 희박혼합기영역에서는 반대로 감소하고 있다. 일반적으로 기관의 압축비가 증가하면 탄화수소의 배출농도가 증가하는 것으로 알려져 있으나, 이와 같이 부분적으로 상반되는 결과가 나온 이유는, 이 이외에 점화시기의 변화 등이 복합적으로 작용하였기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 상술한 바와 같이 CNG 기관의 탄화수소의 배출농도가 가솔린기관에 비하여 부분적으로 다소 증가하고 있으나, CNG기관에서 배출되는 탄화수소인 메탄( $CH_4$ )은 가솔린기관에서 배출되는 탄화수소와는 달리 스모그를 만드는 광화학반응에는 관여하지 않는 것으로 알려져 있으므로<sup>6)</sup> 문제시되지 않을 것으로 생각된다.

그림 (c)의 질소산화물 배출농도에 의하면 공기과잉을 0.95이하의 영역에서 CNG 10.0, CNG 11.0의 배출농도가 가솔린기관에 비하여 적게 배출되고 있는 이외에는 CNG 기관의 경우가 가솔린기관에 비하여 더욱 많이 배출되고 있다. 또한, 압축비가 증가할 수록 그의

배출량이 더욱 많아지고 있다. Fig.8 (a)에서 보는 바와 같이 CNG기관의 배기가스온도가 가솔린기관의 그것보다 더 낮음에도 불구하고, 이와 같이 CNG기관의 질소산화물이 가솔린기관에 비하여 더 많이 배출되는 이유는 Fig. 8 (b)에서 보는 바와 CNG기관의 연소최고압력  $P_{max}$ 가 가솔린기관의 그것보다 더 높아서 연소최고온도가 높아지기 때문인 것으로 생각된다. 또한 압축비의 증가에 따른 질소산화물의 배출농도의 증가도 이러한 연소최고온도의 증가에 기인하는 것으로 생각된다.



(a) Exhaust Temperature



(b) Maximum Pressure

Fig.8 Some Characteristics as a Function of Excess Air Ratio for CNG and Gasoline Engine

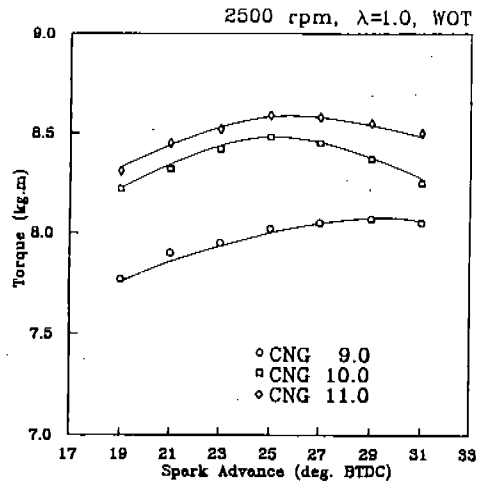
이렇게 CNG 기관의 경우에 질소산화물 배출농도가 증가하는 것은 불리한 요인이다. 그러나, Fig. 7 (c)는 CNG 기관의 경우에 있어서 희박혼합기운전에 의하여 질소산화물의 배출농도를 저감시킬 수 있음을 시사하고 있다. 즉, 가솔린기관의 공기과잉율 1.0 부근(이는 통상 가솔린기관이 운전되는 공기과잉율 근처임)에서의 질소산화물의 배출농도와 공기과잉율 1.2 이상의 희박혼합기영역에서의 CNG 기관의 그것을 비교하면, CNG 기관의 경우가 훨씬 낮은 값을 보이고 있어서 CNG 기관의 경우에는 희박혼합기 운전을 통하여 질소산화물의 배출농도를 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. 물론, 전술한 바와 같이, CNG 기관의 경우에는 이러한 희박혼합기운전에 의하여, 출력의 커다란 저하없이 연료소비를, 일산화탄소 배출농도 등도 개선할 수 있다.

한편, 본 연구에서 사용한 시험엔진은 촉매 컨버터가 장착되지 않은 구형의 가솔린기관이나, 최근에 생산되는 승용차량의 엔진에는 모두 촉매컨버터가 장착되어 있으므로, 차후 이러한 엔진에 대한 실험도 수행하여야 할 것이다.

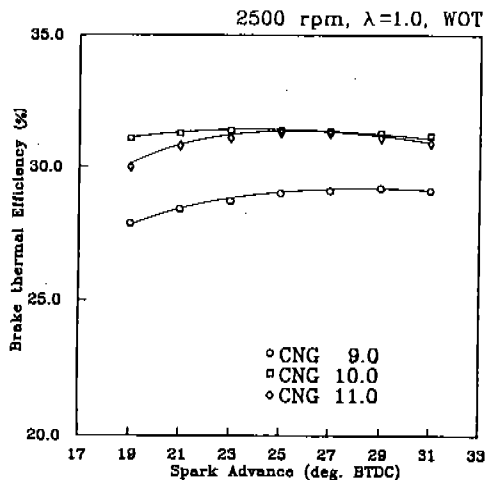
4.4 점화시기의 영향

전술한 바와 같이 천연가스의 연소속도는 가솔린의 그것에 비해 느리기 때문에 CNG에 최적의 기관성능을 얻기 위해서는 가솔린사용시에 비하여 점화시기를 진각시켜 주어야 한다.

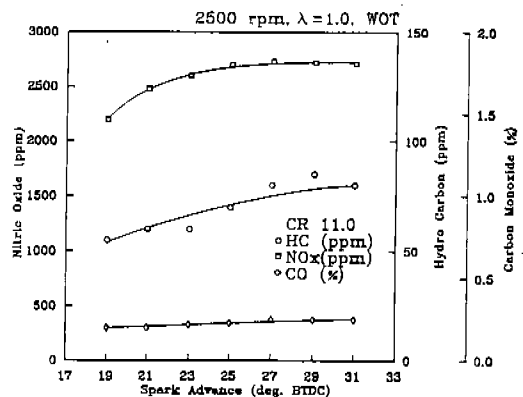
Fig. 9 (a), (b), (c)는 기관성능에 대한 점화시기의 영향을 살펴보기 위하여 기관회전수 2500 rpm,  $\lambda=1.0$ , WOT 인 조건하에서 CNG 기관의 토크, 제동열효율, 배기배출물을 각각 구한 것이다. 단, 그림 (c)의 배기배출물 농도는 대표적으로 CNG 11.0의 경우에 대해서만 나타낸 것이다. 그림 (a)에 의하면, CNG 9.0의 MBT는 30° BTDC 부근에서 나타나며, CNG 10.0, CNG 11.0의 경우에는 이보다 다소 리타드된 25° BTDC 부근에서 나타나고 있다. 또한 이 경우에 기관의 제동열효율도 가장 좋을 것을 볼 수 있다. 그림에는 나타내지 않으나 이때의 가솔린기관의 MBT는 13° BTDC 이므로



(a) Torque



(b) Brake Thermal Efficiency



(c) Exhaust Emissions

Fig. 9 Some Characteristics as a Function of Spark Timing for CNG Engine



CNG기관의 경우에는 가솔린기관에 비하여 점화시기가 12~17도 정도 진각된 것이다. 한편, 압축비의 증가에 따라 MBT가 리타드된 이유는, 기관의 압축비가 증가하면 혼합기의 초기온도가 증가하여 초기화염핵의 성장이 빨라지고 또한 화염전파속도가 빨라져서 초기연소시간이 짧아지기 때문인 것으로 생각된다.<sup>6)</sup> 그림 (c)의 배기배출물 농도에 의하면, 일산화탄소의 배출농도는 점화시기에 영향을 받지 않고, 탄화수소와 질소산화물의 배출농도는 점화시기가 진각될 수록 증가하는 일반적인 경향을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

기존가솔린기관을 CNG전용기관으로 개조하기 위하여 압축비를 변경하고 기관회전수, 공기과잉율, 점화시기 등의 제 기관운전변수를 변화시켜 이때의 기관출력, 토크, 연료소비율, 열효율 및 배기배출물 등을 살펴보았다. 이러한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존 압축비 9.0인 CNG기관의 출력은 가솔린기관의 출력에 비하여 10~18% 정도 저하하였다. 그러나 압축비를 높여 줌에 의해 출력을 향상시킬 수 있었으며, 압축비 11.0인 CNG기관의 경우, 가솔린기관에 대한 출력의 감소폭이 최대 10% 이하로 줄어들었다.

2. CNG기관의 연료소비율 및 열효율은 가솔린기관에 비하여 대폭 향상되었으며, 압축비의 증가에 따라 더욱 향상되었다. 예로서 압축비 11.0인 CNG기관의 연료소비율은 가솔린기관에 비하여 20~30% 감소하였으며, 열효율은 10~15% 정도 향상되었다.

3. CNG기관의 일산화탄소 배출농도는 공기과잉율 1.0이하의 농후혼합기영역에서는 가솔린기관과 비슷한 수준이 배출되었으며, 1.0이상의 희박혼합기영역에서는 가솔린기관에 비하여 감소하였다.

4. CNG기관의 탄화수소 배출농도는 가솔린기관에 비하여 부분적으로 증가 또는 감소되었다. 그러나 CNG기관에서 배출되는 탄화수소인 메탄은 광화학 스모그를 형성하지 않

는 것으로 알려져 있어서 문제시되지 않는 것으로 생각되었다.

5. CNG기관의 질소산화물 배출농도는 동일한 공기과잉율에서 비교할 경우에는 가솔린기관에서보다 증가하였고, 또한 압축비의 증가에 따라 더욱 증가하였다. 그러나 희박혼합기운전을 통하여 그의 배출농도를 감소시킬 수 있으며, 이 경우에 기관의 출력은 다소 저하하나 연료소비율, 일산화탄소 배출농도 등의 개선도 동시에 이룰 수 있는 것으로 판단되었다.

6. CNG기관의 MBT 점화시기는 가솔린기관에 비하여 12~17도 진각되었으며, 압축비의 증가에 따라 리타드되었다.

## 참 고 문 헌

1. IGU-CNG task force report, "Natural gas for Vehicle-global Perspective," June, 1988.
2. Ralph, D.F., et al., "Potential for Improving the Efficiency of a Spark Ignition Engine for Natural Gas Fuel," SAE 720125.
3. Genard, J., et al., "The Natural Gas Fueled Engine," Plenum Press, 1982.
4. Jessen, P.F., "Combustion Fundamentals Relevant to Burning of Natural Gas," Energy and Combustion Science, Pergamon Press, 1979.
5. Evans, R.L., et al., "The Performance of a Spark Ignition Engine Fuelled with Natural Gas and Gasoline," SAE 840234.
6. Hayashi, H., "Introduction of the Automotive Engine (6)," Automotive Engineering, Vol. 12, No. 140, 1973.