

CNG 전소기관의 성능 및 배출가스 예측에 관한 연구

A Study on Performance and Exhaust Gas Prediction in dedicated CNG Engine

오 용 석**, 김 경 배**, 한 영 철*
Y. S. Oh, K. B. Kim, Y. C. Han

ABSTRACT

To reduce the particulate matter and nitrogen oxides from diesel engine, many studies are proceeding and being accomplished practically. In this situation CNG engine has important meaning both as a clean fuel and an alternative energy. In order to present the direction and application of CNG, we simulated various operating conditions, that is, spark timing, compression ratio and fuel composition etc. Thus we try to understand how those affect performance and exhaust characteristics. The simulation program results found that the optimum combustion start angle was 21° at 1800rpm and fuel composition affects performance and emissions, also we could understand the formation of emission as crank angle is changed.

주요기술용어 : CNG(Compressed Natural Gas : 압축천연가스), RON(Research Octane Number : 리서치 옥탄가)

1. 서 론

최근 들어 석유에너지에 대한 대체 에너지 개발을 위한 노력이 여러 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 이는 석유 자원의 고갈에 대한 대비 뿐만 아니라 전세계적으로 심각해져 가고 있는 환경 오염 문제에 대처하기 위한 노력의 일환

으로 자동차의 저공해성 실현이 모든 자동차 제작사 및 부품업체의 당면과제로 되어가고 있다. 이러한 대체연료중 하나인 CNG는 세계적으로 매장량이 약 120조m³로 추측되며 매년 2조m³ 정도가 생산되어 석유를 대신할 유력한 대체 연료 에너지로서 매우 중요한 연구대상이 되고 있다. 이에 본 연구는 기존디젤기관을 CNG전소기관으로 개조하여 실험한 결과와 NASA에서 개발한 ZMOTTO프로그램을 이용한 결과를 비교·검증한 후 다양한 운전조건 즉 점화시기, 압축

* 국민대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

비, CNG의 조성 등에 따른 성능결과와 배출물을 예측해 보았다.

2. 이론적 고찰

2.1 CNG연료의 특성

CNG는 메탄(CH₄)이 주성분으로 탄소량이 적은 탄화수소계 연료이며 메탄 외에 소량의 에탄(C₂H₆), 프로판(C₃H₈) 및 부탄(C₄H₁₀) 등이 함유되어 있다. 메탄의 함유량은 산지에 따라 다르며, 83~99%범위에 이르고 기타 다른 성분도 소수 포함되어 있다. 이들의 조성 변화에 따라, 이론 혼합비나 발열량이 변하는 만큼, 안티노크성(옥탄가)에도 다소 차이가 있다. CNG 연소특징으로는 옥탄가가 상당히 높고(RON : 120~136), 세탄가는 낮으므로(거의 0수준) 불꽃점화 Otto사이클 연소를 행한다. 가스상으로 기관에 흡입되며, 이때 가스의 체적유량은 액상의 가솔린에 비해 증가하므로, 증가한 부분만큼 기관으로 흡입된 공기량은 감소(체적효율의 저하)하고, 타 연료에 비해 연소속도가 느리다. 반면 가스상으로 공기와 혼합되기 쉬우므로 혼합기의 형성이 액상의 가솔린이나 경유에 비해 용이하여 균질혼합기의 회박화와 회박연소가 용이하다.

2.2 CNG기관의 성능에 미치는 인자

CNG연료를 사용한 경우 다양한 운전조건, 즉 점화시기, 압축비, EGR율, CNG가스의 조성 그리고 주위 온도나 습도가 기관 성능이나 배출가스 등에 어떠한 결과들을 가져오는지 미리 예측하는데 주요한 목적으로서 이하의 항목에 대해 조사를 하였다.

먼저 점화시기는 BTDC 18~27° 노킹과 밀접한 관련이 있는 압축비는 9~12까지 변경시키면서 성능 및 배출가스에 미치는 영향에 대해 파악해 보고자 한다. 또한 CNG의 연료조성은 지역과 계절 등에 따라 큰 차이가 있어 이에 따라 기관출력 성능과 배기가스에도 비교적 큰 영향을 미치며, 따라서 장래의 보다 엄격한 배기규제에 대비하기 위하여 사전에 이와 같은 연료조성에 의한 배출가스 특성의 영향을 명확히 하는 것이

CNG 차량의 연구개발에 있어 중요한 과제⁴⁾, 본 연구에서는 천연가스 연료조성의 차이를 고려하여 메탄 함유를 최대 100%에서 최저 60%까지 변화시킨 4종류의 연료를 이용하여 천연가스조성이 성능과 배출가스특성에 미치는 영향과 이의 원인을 알아보고자 한다. Table 1은 시뮬레이션에서 실행한 CNG연료의 조성을 나타내고 있다.

3. 수학적 모델

본장에서는 프로그램에서 사용한 수치모델인 Fourier와 Wiebe의 연소율 모델중 Fourier 모델(1)식을 사용하였으며 열전달은 각 계수에 따라 여러식으로 표현되나 식(2)의 Karim & Watson 모델을 택하였고 흡배기 유동은 식(3)을 사용하였다.²⁾

$$M_f = \begin{cases} M_b(\theta_0) + [M(\theta_0) - M_b(\theta_0)] \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\pi z & \theta_0 \leq \theta \leq \theta_f \\ M(\theta_0) & \theta_f \leq \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{h} = c_1 + c_2 \left(\frac{k}{B} \right) (Pr)^a (Re)^b + c_3 \frac{T^4 - T_w^4}{T - T_w} + c_4 v^{1/3} (pT)^{1/2} \quad (2)$$

- A. $c_2=c_3=c_4=0.0$: Constant heat transfer
- B. $c_1=c_2=c_3=0.0$: Eichelberg form
- C. $c_1=c_4=a=0.0$: Annand form

Table 1 Fuel composition

	Fuel A	Fuel B	Fuel C	Fuel D
	Mass %	Mass %	Mass %	Mass %
Methane	60.0	75.0	85.0	100
Ethane	25.0	10.0	10.0	-
Propane	15.0	15.0	5.0	-
A/F stoi.	14.63	16.77	15.88	17.10

- D. $c_1=c_3=c_4=0.0$: Dittus-boetler correlation accompanying turbulent flow
- E. $c_1=c_3=c_4=a=0.0$: Karim & Watson's expression

$$P(x) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{10} r_n x^n, & \sum_{n=1}^{10} r_n = 0 \quad \text{Polynomial for } m \\ x(1-x) \exp\left(\sum_{n=1}^{10} r_n x^{n-1}\right) & \text{Exponential for } m \end{cases} \quad (3)$$

그 외의 점성은 Wilke's model을, 열전도는 Lindsay & Bromley's model을 사용하였다.

3.1 ZMOTTO 프로그램 개요

방대한 양의 프로그램(약10000Line)으로 안전성과 정확성에 초점을 두었으며 복잡한 일반 모델까지 계산 가능하도록 개발되었다. 입력문에서 대입하는 Level이 높을수록 모델은 복잡해지며

3.2 알고리즘 및 입·출력 데이터

3.3.1 알고리즘

많은 시간이 걸리는 한편 실제기관에 가깝고, 레벨이 낮을수록 시간은 적게 걸리나 이상 사이클에 가까워진다. 상사점에서 시작해 720도의 크랭크각 간격동안 입력 데이터에 의해 원하는 결과값을 각도별, 또는 사이클별로 결과를 얻게 되어 있고 Table 2에 Modeling level을 간단히 나타내었다.

Table 2 Modeling level

Feature	Modeling level				
	5	4	3	2	1
Rlow	Poppet valve formulas		Zero pressure drop flow : flow reversal only at where dis-continuities are possible		
Flame	Kinetic	Equilibrium			
Flame propagation	Mass burning formulas				Instantaneous
Burned gas chemistry	Finite rate			Equilibrium	

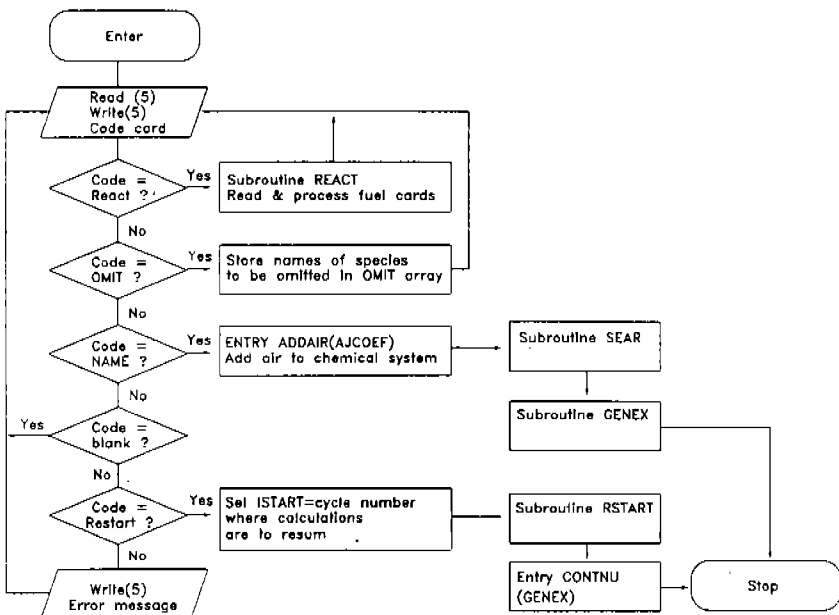


Fig.1 Algorithm of ZMOTTO

3.3.2 입출력 데이터

기존 Base기관의 제원을 Table 3에 나타내었으며 Table 4에는 본 프로그램에 대입하 입·출력 데이터를 정리해 놓았다.⁴⁾

Table 3 Specification of base engine

Item	Contents
Engine type	Direct 4-stroke
Bore×Stroke	123mm×155mm(6)
Displacement	11,051cc
Compression ratio	11.0 : 1
Max. power	225PS/2,200
Max. torque	81.5kg · m/1,400
Fuel injection order	1-5-3-6-2-4

Table 4 Input & output data

Input		Output
SpecI- fication	Reactants, RPM, Bore, Stroke, Connect rod, Combustion area, Wall temperature, Compression ratio. Exhaust pressure, Manifold pressure, Fuel pressure, Humidity, Air temperature.	Mass / Cycle (g)
		Mean intake mass flow rate (g/sec)
		Mean exhaust mass flow rate (g/sec)
		Energy / Cycle (J)
		Average energy rate-power (kW)
		Cycle efficiencies
		Indicated work
		Indicated power
		Net work
Air-fuel input	Equivalent ratio, Spark timing, EGR rate, Burn timing, Cycle number, Level number.	Indicated pump work
		Indicated pump power
		Heat loss
		Heat loss rate
		Exhaust chemical energy
Flow Input	Parameters for Intake flow, Parameters for exhaust flow, Intake valve open, Intake valve close Exhaust valve open, Exhaust valve close.	Exhaust power
		Indicated mean effective pressure (atm)
		Pump mean effective pressure (atm)
		Mean torque (N-m)
		Composite exhaust gas mole fractions
		Fresh charge mole fractions

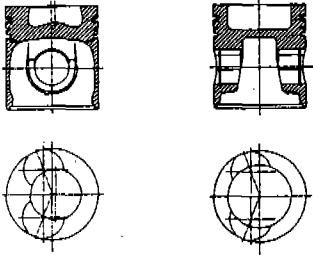
4. 실험장치 및 방법⁴⁾

4.1 실험장치

기관의 개조를 위해 기존 디젤연료 분사펌프를 제거하고 그 위치에 천연가스 공급장치를 부착하였다. 천연가스는 기관 흡기 다기관 입구측에 설치된 천연가스/공기 믹서를 이용하여 기관으로 공급하였으며 스로틀 밸브를 사용하여 기관의 부하를 조절하였다. 압축착화 방식의 디젤기관과는 다르게 CNG기관은 점화플러그를 이용한 불꽃점화방식을 사용하기 때문에 기존 연료분사노즐 장착위치에 점화플러그를 장착하였다. 기타 부품은 대부분 기존기관을 그대로 사용하였으며 Table 5에 전소기관의 주요 변경사항을 요약하였다. 그리고 Fig.2는 기존 디젤기관의 피스톤과 CNG기관의 피스톤을 비교한 것이며 Fig.3은 실

Table 5 Modification items

Modification	Base engine	CNG engine
Piston	Reentrant	Open dish
Control	Pump governor, Timer	ECM
Turbo-charger	Mechanical waste gate	Electronical waste gate
Ignition device	-	Plug-cable-coil-ignition control device
Fuel supply	Pump, nozzle	Injector, CNG/Air mixer, Throttle



(a) Diesel piston (b) CNG piston
Fig.2 Comparison of piston

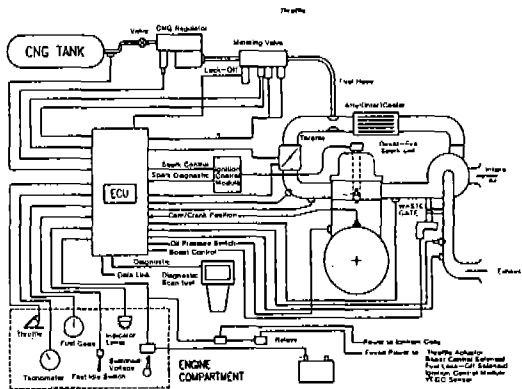


Fig.3 Schematic diagram of test apparatus

험장치의 구성도이다.

5. 결과 및 고찰

본 시뮬레이션은 기관속도 1,000~2,200rpm에서 운전한 실험결과를 바탕으로 MBT21°, 최대 torque 1,800rpm, 압축비 11.0을 기준해 점화진각 18°~27°, 압축비 9.0~12, 연료조성은 Table 1에 나타난 것과 같이 변경하면서 성능과

배출가스 결과를 비교하였다. Fig.4~7은 각각 압력선도, 연소 및 미연소온도 및 배출가스의 생성의 계산결과이다. 최고압은 55atm까지, 점화시 화염온도는 2,300K까지 상승하였으며 CO는 점화가 시작되면서 0.068%까지 급상승하다가 급격히 0.0001%까지 감소하는 것을 보여주고 있고 NOx 역시 점화와 동시에 6,000ppm 까지 상승하다가 흡기밸브로 신기가 들어오면서 농도가 감소함을 알 수 있다.

Fig.8~10은 기관작동조건이 시뮬레이션조건과 동일한 상황에서의 실험결과로서 시뮬레이션 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, Fig.11~17은 시뮬레이션의 결과로써 Fig.11의 CO에 있어서는 배출량도 적고 변화도 거의 없었으나 NOx는 18~31g/kW-hr까지 증가하였다. 이는 시뮬레이션의 여러 가정들에 의한 차이로 사료된다. Fig.12, 13은 점화시기 변경에 따른 성능 및 배출가스량을 나타내고 있으며 1,800rpm의 경우 21°에서 출력이 최고임을 알 수 있었고 배출물의 변화는 그다지 차이가 없었다. Fig.14, 15의 압축비가 증가함에 따라 성능은 3kW정도 향상되었고 NOx도 2g/kW-hr가량 증가하였으나 CO는 변화가 없었다. Fig.16, 17은 4종류의 CNG를 이용한 결과로써 NOx는 메탄 함유율이 높게 될수록 감소하여 연료A와 연료D에서 1.3%정도 감소하였고 CO는 0.01g/kW-hr이하로 변화가 없었다. Fig.16에서 메탄 함유율이 높게 되는 만큼, 즉 H/C의 비가 큰 연료D는 단일 화염온도가 저하되어 동력이 낮게 나타났고 이 화염온도의 저하는 주로 연소가스 중의 수분에 의한 비열의 증대로 인한 것이다.⁶⁾ 이것에 의해 H/C 비가 큰 연료일수록 NOx의 저감효과가 크다. 또한 H/C 비가 크게 되면 CO도

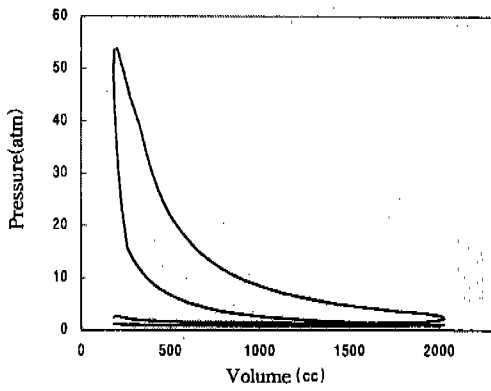


Fig.4 Indicator diagram

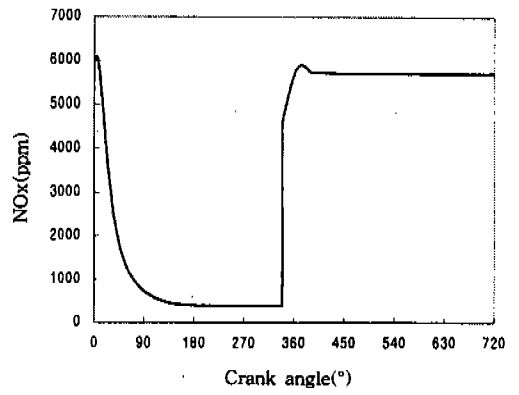


Fig.7 NO_x formation

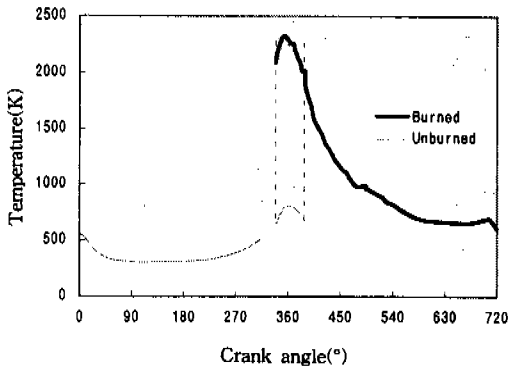


Fig.5 Temperature in chamber

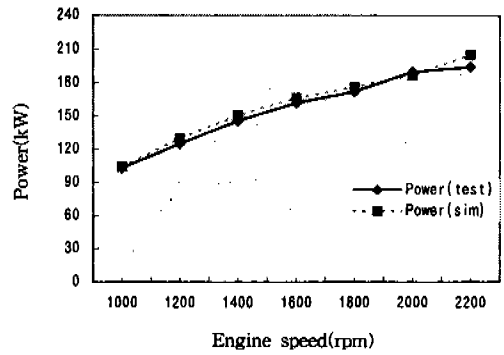


Fig.8 Power

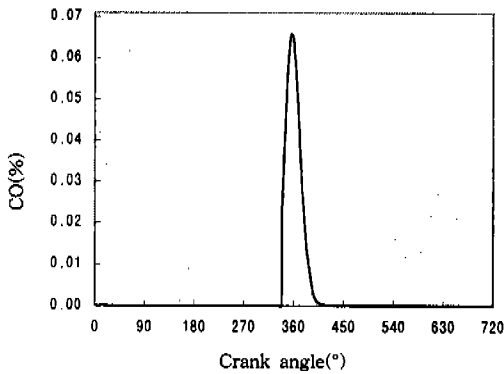


Fig.6 CO formation

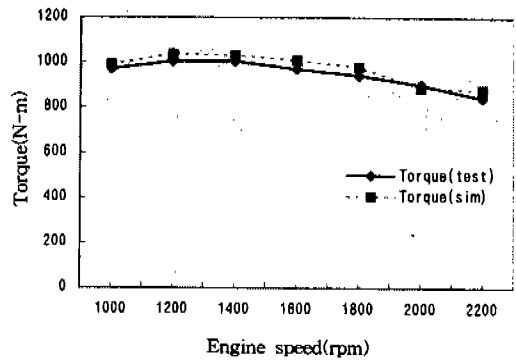


Fig.9 Torque

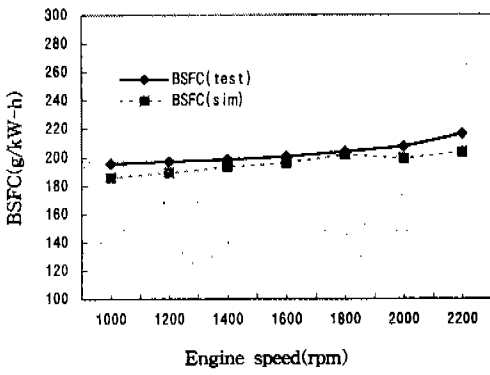


Fig.10 BSFC

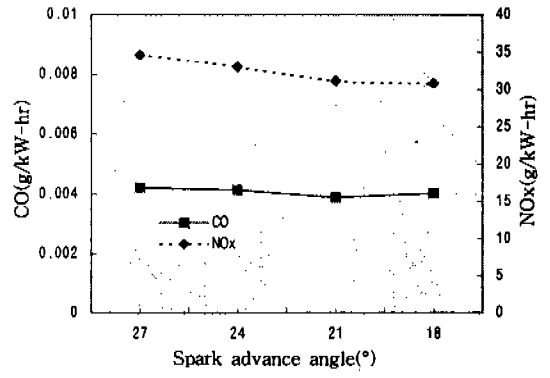


Fig.13 Effect of spark timing to emissions

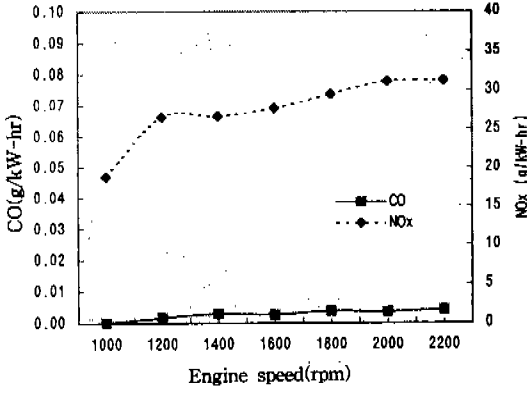


Fig.11 Emissions

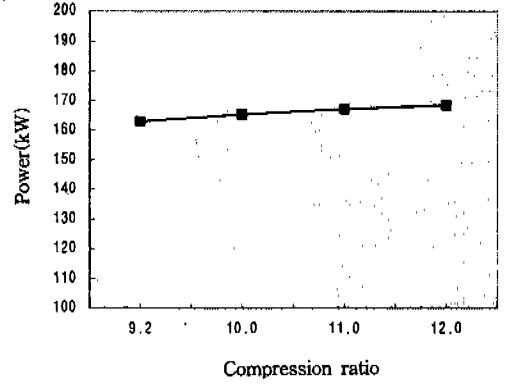


Fig.14 Effect of Compression ratio to power

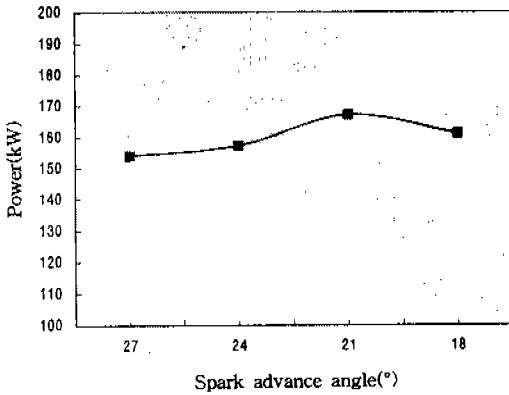


Fig.12 Effect of spark timing to power

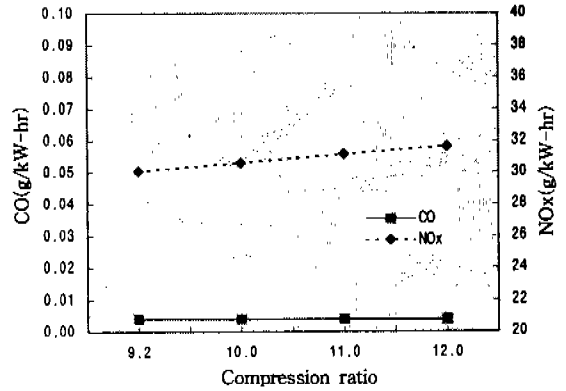


Fig.15 Effect of Compression ratio to emission

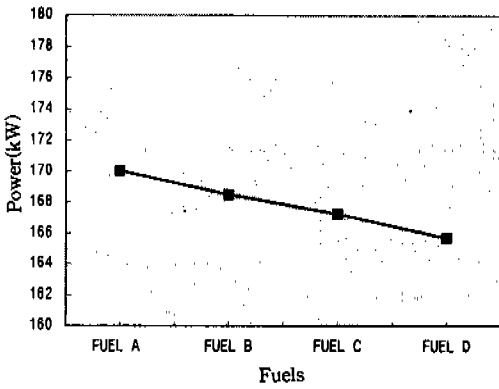


Fig.16 Effect of fuel composition to power

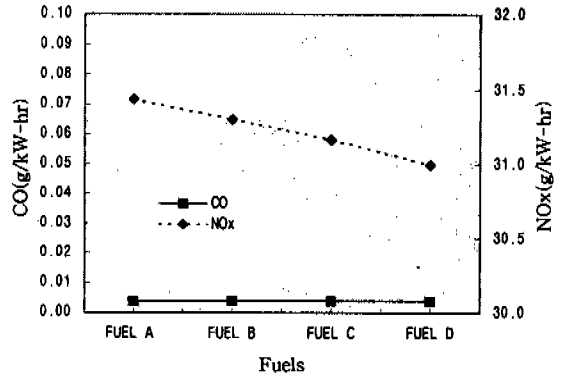


Fig.17 Effect of fuel composition to emission

저감하는데, 이것은 주로 연료 중의 카본 중량의 감소에 의한 것이다.

6. 결 론

CNG 성능 및 배출가스 예측 프로그램으로부터 연구, 검토 한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기관속도에 따른 기본성능 실험결과와 시뮬레이션 결과값은 잘 일치하였으며 추후 다른 운전조건에 따른 성능예측에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.
- 2) 크랭크 각도에 따른 CO와 NOx는 점화와 함께 급속히 증가하나 CO는 곧 0에 가깝게 감소하고 NOx는 6000ppm을 유지하며 배출된다. 기관속도에 따른 NOx는 1,000~2,200rpm에 걸쳐 18~31g/kW-hr까지 증가하였으나 CO는 희박연소로 인해 0.01g/kW-hr이하로 나타났다.
- 3) 점화시기 변경에 따른 결과에서 기관속도 1800rpm일때 21°에서 최고임을 알 수 있었다.

- 4) 압축비의 증가에 따라 성능은 3kW정도 향상되었고 NOx도 2g/kW-hr가량 증가하였으나 CO는 큰 변화가 없었다.
- 5) 메탄함유율이 높은 연료의 NOx, CO는 저감하나 성능은 2.4% 감소함을 알수 있었다.
- 6) 향후 성능뿐만 아니라 배출가스측면에서도 실험과의 검증이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 遠藤拓也외, "新エネルギー自動車", 山海堂, 1993.
2. Frank J. Zeleznik 등, 'Modeling the Internal Combustion Engine', NASA, 1985.
3. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book, 1988.
4. 신동성등, "G-7 환경공학기술개발과제 중간발표회", 대우중공업, 1997.
5. 井上 太 編, "自動車原動機的環境對應技術", 自動車技術會, 1997.
6. 石井 光教 등, "天然가스燃料組成が排氣特性に及ぼす影響", 日産自動車研究所, 1995.