

압축천연가스기관에서 부스트압력 변화에 따른 성능 및 배출가스에 관한 실험적 연구

한영출*, 오용석**, 강호인***

An Experimental Study on Performance & Exhaust Emission by Boost Pressure Change in Compressed Natural Gas Engine

Young-Chool. Han*, Yong-Suk. Oh**, Ho-In. Kang***

Abstract

Recently, air pollution is increased according to increase of vehicle. So many countries are studying about compressed natural gas engine.

Research on the development of CNG dedicated engine that has important meaning both as a clean fuel and an alternative energy to reduce the exhaust emission from diesel engine are actively going on these days. In this study, the characteristics of CNG engine was investigated and the engine performance experimented by changing the parameters such as boost pressure.

The CNG engine performance and exhaust emission were measured by engine performance mode at maximum load condition with increasing the rpm in the range of 1,000 ~ 2,200rpm. The exhaust emission was also measured at D-13 mode and compared to the emission regulation.

Key Words : CNG Dedicated Engine, Boost Pressure, Exhaust Emission

1. 서 론

최근 들어 석유에너지에 대한 대체 에너지 개발 및 전 세계적으로 심각해져 가고 있는 환경오염문제에 공동으로 대처하기 위한 노력의 일환으로 CNG(Compressed Natural Gas)를 디젤기관에 적용하는 방법은 기존 디젤기

관의 실린더에 천연가스와 공기의 혼합기를 흡입시키고 이를 직접 분사된 경유의 분무화염으로 착화시키는 혼소(Duel-fuel) 방식⁽⁸⁾과 기존 디젤기관의 인젝터 대신에 점화 플러그를 장착하여 천연가스를 전기점화에 의하여 착화시키는 전소(Dedicated) 방식⁽¹⁾이 있으며 현재 전소방식이 연구 및 개발의 핵심이 되고 있다. 한편, 국내에서도 CNG

* 국민대학교 기계-자동차공학부
** 국민대학교 대학원
*** 동해대학교 자동차공학과

차량 실용화를 위하여 정부투자기관과 기업이 공동 프로젝트를 구성하여 전소 및 혼소 방식에 관한 연구 개발을 진행중이며, 특히 1998년 7월 환경부 주관으로 전소방식 CNG버스 시범 운행식을 필두로 하여 현재 각 자동차회사에서 개발에 박차를 가하고 있으나 기술적인 면에서 아직은 미흡한 단계이다. 따라서 본 연구에서는 CNG 전소기관을 대상엔진으로 하여 CNG의 연소특성 파악과 기관 성능 및 배출가스를 이론적으로 고찰하였으며, 실험은 11,050cc급 CNG 기관을 기관동력계 상에서 부스트압력을 변화시켜가면서 기관성능 및 배출가스 실험을 하여 기존의 디젤기관에 비해 성능면이 다소 떨어지는 CNG 전소기관 개발에 조금이나마 도움이 되고자 한다.

2. CNG의 배경 및 고찰

2.1 CNG의 특성

CNG는 메탄(CH_4)을 주성분으로 하고, 탄소량이 적은 탄화수소계 연료이며 메탄 외에 소량의 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8) 및 부탄(C_4H_{10}) 등이 함유되어 있다. CNG 연소 특징으로는 옥탄가가 비교적 높고(RON : 120~136) 세탄가는 낮아(거의 0 수준) 불꽃점화의 오토사이클의 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. 단위 체적당의 발열량이 가솔린에 비해 약 1/4정도여서 크고 무거운 고압용기를 사용해야하고 따라서 중량이 무겁게 되고 트렁크 등의 공간 활용이 적으며 성능에 있어 항속 거리가 가솔린에 비해 1/2 이하로 낮은 단점이 있다. 또한 연소속도가 느리고 회박연소에서 연소온도가 저하할 경우 HC는 피스톤의 틈사이로 영입이 쉬워 팽창행정에서 산화되기 어려우므로 디젤에 비해 미연 HC가 증가하기 쉽다.^[2, 3, 4]

2.2 CNG기관의 종류

CNG기관의 종류에는 크게 나누어 보면 기존의 가솔린 기관 차량에 CNG 연료공급 장치를 추가로 장착하여 운전 모드에 따라 가솔린만 사용하거나 또는 CNG만 단독적으로 사용이 가능한 바이퓨엘기관과 천연가스와 경유를 함께 연소실에 넣어 혼소시키는 혼소기관 및 천연가스만을 연료로 사용하는 CNG기관으로 구분된다. 이중 본 연구에서의 실험대상기관은 전소방식을 채택하였다. 전소기관은 탁월한 배기가스 저감효과와 높은 열효율 그리고

노이즈 저감효과 등의 장점이 있는 반면에 기관 부품 중 실린더 헤드, 피스톤 링, 밸브시트 등의 설계 변경이 필요한 단점도 있다.^[5]

2.3 CNG기관의 성능 및 배출가스에 미치는 인자

2.3.1 점화시기

CNG기관의 경우 높은 옥탄가와 낮은 연소속도로 인해 점화시기를 기존의 가솔린 기관보다 진각시킬수 있으며 이처럼 점화시기를 앞당기면 실린더내 최고 압력이 형성되는 시기가 상사점에 가까워지고 또한 그 압력도 높아진다. 이론상으로 상사점에서 연소에 의해 최고압력으로 도달하는 압력파형일 때 출력이 가장 커지게 되지만 실제의 기관에서는 크랭크각 $40^\circ \sim 60^\circ$ 의 연소기간이 필요하므로 점화시기를 지나치게 진각시키면 TDC 전의 연소비율이 커져서 출력이 저하된다.

2.3.2 압축비

압축비는 도시열효율과 공기유량에 영향을 주며 압축비가 커질수록 도시열효율이 좋아지고 또한 연료유량이 적어 공기유량은 증가되어 도시평균유효압력이 커지게 된다. 그러나 어느 이상의 압축비에서는 노킹이 발생하여 급격한 성능저하와 함께 기관의 장애를 초래하게 되므로 압축비의 한계를 조사하여 적절한 노킹제어가 필요하다.

2.3.3 공연비

CNG기관의 장점중 하나는 공기와의 혼합이 타 기관보다 용이하여 희박조건에서도 운전이 가능하다는 점인데 이러한 희박영역에서는 연소온도의 저하로 냉각손실의 저감이나 비열비의 증대효과가 있어 이론공연비보다 열효율이 향상한다.

2.3.4 가스조성

천연가스의 연료조성은 지역과 계절 등에 따라 상당한 차이가 있다. 이는 천연가스의 연료조성에 따라 기관출력 성능과 배기가스에도 영향을 미치며, 따라서 장래의 보다 엄격한 배기규제를 위해서는 사전에 연료조성에 의한 배출가스 특성의 영향을 명확히 하는 것이 CNG기관의 개발에 있어 중요한 과제로 되고 있다.

2.4 CNG 기관의 배출가스 생성원리^[6, 7]

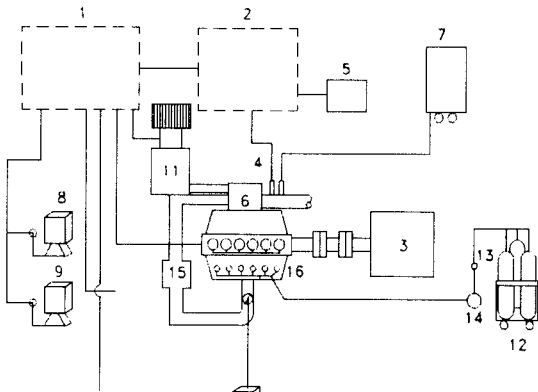
CNG차량의 배출가스는 가솔린자동차와 비교해 보면 HC는 거의 동등하거나 약간 적은 수준이며 CO는 50%

이하 NOx는 80%정도이다. 그러나 배출되는 HC 가운데 미연 메탄 함량이 가솔린 자동차의 경우 2%미만인 것에 비해 CNG차량은 50%이상이다. 더구나 메탄은 고탄소 탄화수소에 비해 산화가 어려워 촉매상에서 분해가 잘 되지 않으므로 CNG촉매의 HC정화율은 가솔린용 삼원촉매에 비해 낮은 편이다. 따라서 CNG차량용 촉매는 메탄에 대한 정화율이 비교적 우수한 Pd가 가솔린이나 디젤에서의 주 담지 귀금속성분인 Pt 및 Rh보다 주로 사용된다. CNG차량용 촉매의 또 다른 하나의 특징은 이온공연비 이상의 희박연소영역에서 HC의 정화율이 낮고, NOx의 정화율도 이온공연비에서부터 급격히 저하되기 때문에 HC, CO, NOx에 대해 공통적으로 활성을 보이는 공연비 영역(Window)이 매우 좁다는 점이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 실험기관과 측정장치로 나눌 수 있으며, CNG기관의 성능 및 배출가스를 측정을 위하여 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.



- 1. Dynamometer control desk
- 2. Exhaust gas analyzer
- 3. Engine dynamometer
- 4. Exhaust gas
- 5. Data recorder
- 6. Turbocharger
- 7. MDT(Mini dilution tunnel)
- 8. Cooling water temperature controller
- 9. Oil temperature
- 10. Throttle actuator
- 11. Air surge tank
- 12. CNG tank
- 13. Solenoid valve
- 14. CNG flow meter
- 15. Intercooler
- 16. Spark plug

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

3.1.1 실험기관

기관의 제원은 Table 1와 같고, 기존 디젤기관의 압축비에서 CNG기관에 적합한 압축비로 낮추기 위해서 피스톤 헤드부의 형상을 가공하여 연소실을 Open-chamber형으로 가공하였으며 디젤 인젝터를 탈거하고 점화플러그를 장착하였다. CNG기관용 터보차저는 기존의 디젤기관과는 달리 흡입 공기량에 따라 연료량이 제어되므로 과도한 실린더의 열부하를 막기 위해서 고안한 솔레노이드 밸브에 의해 구동되는 웨이스트게이트를 장착한 터보차저를 사용하였다. 따라서 기관의 과급압은 기존의 디젤에 비해 낮은 편이며 웨이스트게이트의 작동은 ECU에 의해 제어된다. 차량용 CNG연료용기는 200bar이상의 압력으로 충전하는 것이 보통이므로, 본 연구에서는 압력조정기를 2단으로하여 사용하였으며, 10bar의 가스연료압력에서 동작하는 솔레노이드 구동 센ترل 인젝션 유닛방식을 채택하였다. CNG분사장치는 유량제어의 정밀도를 높이기 위해 고속, 고정도의 솔레노이드를 사용하였고, 정확한 공연비제어를 위해 산소센서를 0 또는 1로 반복제어하였으며, 분사시기제어를 위해 홀 이펙트 유닛장치를 사용하였다.

Table 1 Test engine specification

Item	CNG engine
Type	4 stroke, in line
Combustion chamber type	Open-chamber
Cylinderbore × stroke-number	123mm × 155mm-6
Total piston volume	11.051cc
Compression ratio	10.5:1
Max. horse power	260ps/2,200rpm
Max. torque	104kg · m/1,400rpm
Injection order	1-5-3-6-2-4

3.1.2 측정장치

3.1.2.1 기관 동력계

기관 동력계는 수동력계(220kW, ZOLLNER)로 그 제원은 Table 2과 같다.

3.1.2.2 배출가스 분석기

기관의 배출가스 분석기는 직접채취식 분석기(HORIBA사)이며, 분석원리는 CO는 NDIR(Nondispersive infrared)법, THC는 HFID(Heated flame ionization detector)법 및 NOx는 CLD (Chemiluminescence detector)법

Table 2 Specification of engine dynamometer

Items	Specification
Model	GPM4/330300
Speed range at rated braking torque	800 ~ 2500rpm
Speed control range	300 ~ 7000rpm
Max. braking power	220kW
Rated braking torque	8.27 kN·m
GD ² of the rotor	23.5 N · m ²
Supplied volume of cooling water	110 l /min
Supplied pressure of cooling water	About 68.6kPa
Accuracy	±0.5% of F. S. +measuring accuracy

Table 3 Specification of analyzer

Model	MEXA-9100H, HORIBA, Japan					
Component of interest	CO	CO	CO ₂	NO	THC	NOx
Measuring principle	NDIR	NDIR	NDIR	NDIR	H.FID	CLD
Measuring concentration range	0~0.1% 0~0.3%	0~0.3% 0~10%	0~8% 0~16%	0~2000ppm 0~5000ppm	0~100ppmC 0~50000 ppmC	0~20% 0~10000 ppm
Power source	AC 100V, 50Hz/60Hz					

으로 분석하며, 분석된 데이터는 6 Pen recorder에 기록되어 출력된다. 배출가스 분석기의 제원은 Table 3과 같다.

3.1.2.3 CNG유량계

CNG의 유량을 정확히 제어하기 위해 관로내에 흐르는 유량을 필라멘트 센서로 측정하였다. 그 제원은 Table 4와 같다.

Table 4 Specification of the CNG flow meter

Item	Specification
Company	OMEGA Engineering Inc., USA
Model	FMA - 7892
Max. flow	10.35MPa
Output voltage	0 ~ 5 VDC
Operating voltage	±15 VDC
Power	AC 110V

3.2 실험방법

3.2.1 실험내용

기관성능 실험은 전부하상태에서 기관사양에 맞춰서 기관회전속도를 1,000rpm에서부터 2,200rpm까지 200rpm씩 증가시켜 가면서 기관의 출력, 토크 및 BSFC를 3분 동안 30초마다 Data acquisition을 하여 평균을 내어 계산하였다.

본 실험기관의 이론 공연비는 17.2:1 이며, 부스트압력 변화에 의한 기관성능을 알아보기 위해서 당량비 0.8의 조건에서 부스트압력을 1.65, 1.72 및 1.79bar로 0.07bar씩 증가시키면서 동일한 방법으로 출력, 토크, BSFC 및 배출가스를 측정하였다. 부스트압력은 CNG 전소기관의 여러 가지 성능관련 인자들 중에서 가장 민감하게 다루어야 하는 부분인데 이것은 부스트압력에 따라 기관 흡입공기유량이 변화하고 이에 따라서 분사되는 연료량도 조절되므로 부스트압력을 과도하게 하면 과도한 연료량에 의해서 기관의 열부하가 심하게 되어 기관의 파손이 우려되므로 본 연구에서는 부스트압력을 0.07bar씩 증가시키면서 실험하였고 기존의 디젤기관보다 CNG기관은 출력 및 성능면이 다소 떨어지므로 현 디젤기관을 CNG기관으로 전환시 이를 보충하기 위해 기존기관보다 약 0.25bar정도 올려서 실험하였다. 이러한 과도한 부스트압력에 의한 실린더 내부의 열부하를 막기 위해서 본 실험에서는 전자제어식 웨이스트게이트를 사용하여 웨이스트게이트의 작동범위를 넓혀서 실험하였다.

Table 5 D-13 Mode driving pattern

Mode No.	Speed/Load rate(%)	Weight factor
1	0/0	0.25/3
2	60/10	0.08
3	60/25	0.08
4	60/50	0.08
5	60/75	0.08
6	60/100	0.25
7	0/0	0.25/3
8	100/100	0.10
9	100/75	0.02
10	100/50	0.02
11	100/25	0.02
12	100/10	0.02
13	0/0	0.25/3

이상의 실험결과에 의해서 얻어진 부스트압력을 현재 대형디젤의 국제 규약 모드인 D-13모드로 테스트를 실시하여 결과를 비교하였다. Table 5는 D-13모드의 운전조건과 중량계수를 나타낸 것이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기관의 성능 및 배출가스 결과

기관의 작동조건은 점화시기를 각각 16°; 1000rpm, 18°; 1200rpm, 22°; 1400rpm, 23°; 1600rpm, 24°; 1800rpm, 25°; 2000rpm, 25°; 2200rpm로 하고 당량비를 0.7로 한 조건에서 측정하였다. Fig. 2와 3은 부스트압력 변화에 따른 기관 출력과 토크를 나타낸 것으로 부스트압력이 0.07bar씩 증가함에 따라서 출력이 9.5kW 정

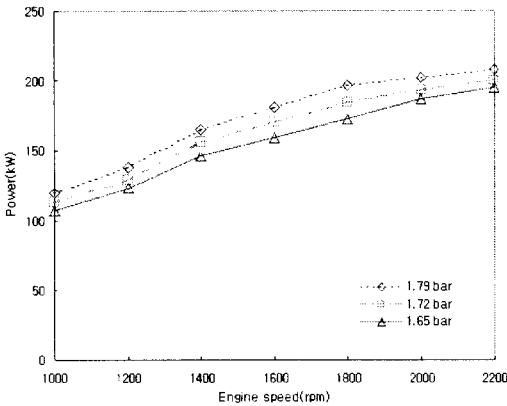


Fig. 2 Effect of boost pressure on power

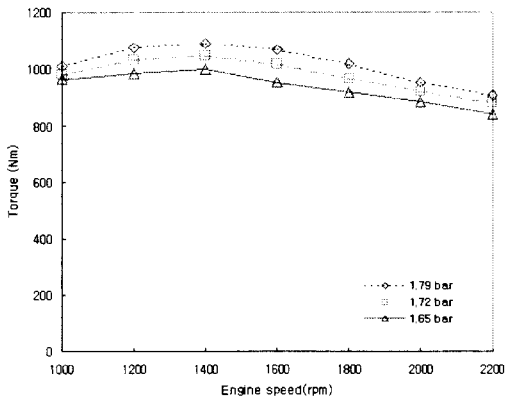


Fig. 3 Effect of boost pressure on torque

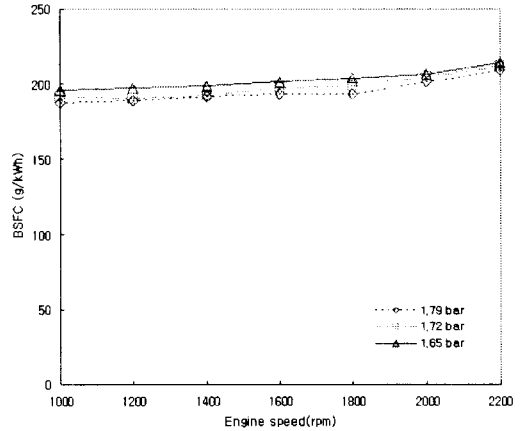


Fig. 4 Effect of boost pressure on BSFC

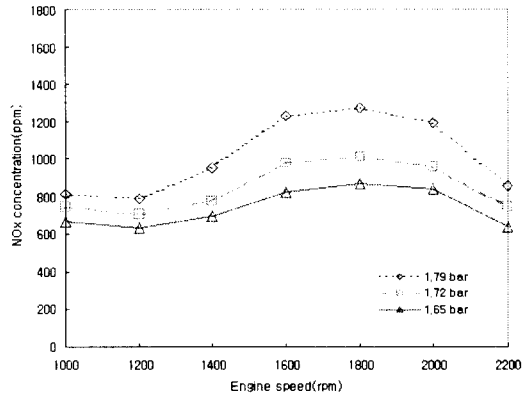


Fig. 5 Effect of boost pressure on NOx emission

도 높아지는 것으로 나타났으며 토크는 평균 39Nm 정도 높아지는 것으로 나타났다. 이는 부스트압력이 상승함에 따라 기관 흡입 공기량이 상승하고 그에 따라서 분사되는 연료량도 증가하기 때문이다.

Fig. 4는 부스트압력 변화에 따른 BSFC를 나타낸 것으로 부스트압력이 0.07bar씩 증가함에 따라서 BSFC는 평균 5.3g/kWh 정도 감소하는 것으로 나타났으며 부스트압력의 상승에 의해서 증가된 연료량에 비해서 출력이 더욱 상승하였기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5, 6 및 7은 부스트압력 변화에 따른 배출가스 중 NOx, THC 및 CO 에미션을 나타낸 것이다. Fig. 5에 나타났듯이 부스트압력이 0.07bar 증가함에 따라서 NOx 에미

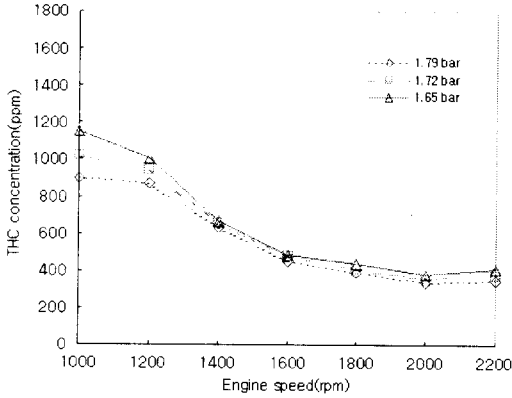


Fig. 6 Effect of boost pressure on THC emission

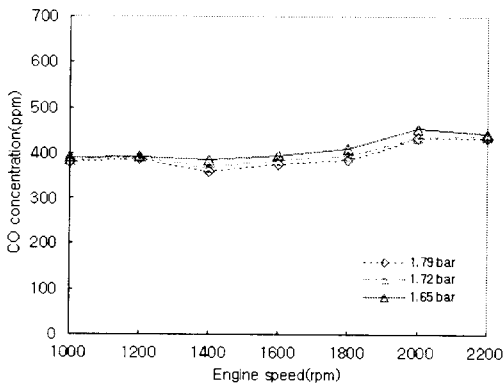


Fig. 7 Effect of boost pressure on CO emission

션은 평균 111ppm 정도 상승하는 것으로 나타났으며 기관회전속도가 1400~2000rpm인 영역에서 그 차이가 더욱 심한 것으로 나타났다. Fig. 6 및 7에 나타났듯이 THC와 CO 에미션은 부스트압력이 증가함에 따라서 다소 감소하는 것으로 나타났으며 그 변화량은 NOx 에미션에 비해 상당히 작은 것으로 나타났다.

4.3 D-13모드 테스트 결과

Fig. 8은 점화시기와 당량비는 기관의 성능 및 배출가스 작동조건과 동일하며, 부스트압력은 Test A에서는 1.65로 Test B에서는 1.79의 두 조건에서 D-13모드 테스트 결과이며 그 차이는 Test A는 기관의 최고출력을 191KW/2200rpm으로 매칭시킨 데이터이며 Test B는 기관 최고출력을 209KW/2200rpm으로 매칭시킨 데이터이기 때

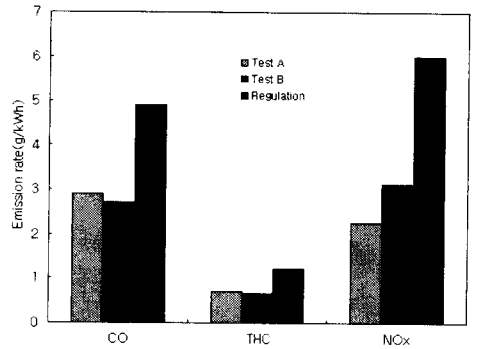


Fig. 8 D-13 mode test result

문이다. 그림에 나타낸 THC는 CH4를 제외한 비메탄탄화수소(NMHC)를 나타낸 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 Test B의 경우 Test A에 비해서 NOx 에미션이 0.87g/kWh 증가되고 THC와 CO가 각각 0.07g/kWh, 0.11g/kWh 감소하는 것으로 나타났다. 점화시기, 당량비 및 부스트압력의 변화에 의해 연소조건이 보다 양호하게 되어 NOx 에미션이 상당량 증가하였지만 이러한 결과는 2000년 대형 디젤기관 배출가스 허용기준을 충분히 만족하는 결과로 나타났다.

5. 결론

CNG 전소기관의 부스트압력 변화가 기관성능 및 배출가스에 미치는 영향을 실험을 통해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부스트압력 변화에 따른 실험결과 부스트압력을 0.07bar씩 증가시킴에 따라서 출력 및 토크가 각각 9.5kW, 39Nm 정도 증가하였으며, BSFC는 평균 5.3g/kWh 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 부스트압력이 0.07bar 증가함에 따라서 NOx는 평균 111ppm 정도 상승하는 것으로 나타났으며 기관회전속도가 1400~2000rpm인 영역에서 그 차이가 더욱 심한 것을 말할 수 있었으며, THC와 CO는 부스트압력이 증가함에 따라서 다소 감소하는 경향을 볼 수 있었다.
- (3) 이상의 실험결과 CNG를 연료로 함으로서 현 규제치에 충분히 만족하는 것을 알 수 있었으나 성능면에서는 기존디젤기관에 비해 많이 떨어지므로 디젤기관의 CNG기관으로의 전환을 위해서는 부스트압력을 1.79bar보다 높여주어야 할 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) Karim, G.A., Ali, I.A., “The Effects of Low Ambient Temperatures on the Combustion of Natural Gas in a Single Cylinder Spark Ignition Engine”, SAE 730084, 1973.
- (3) 환경부, “CNG자동차 보급확대방안을 위한 Workshop”, 1995.
- (4) 신동성, “G-7 환경공학 기술개발 과제 중간 발표회”, 대우중공업, pp. 29~46, 1997.
- (5) 한영출, 오용석, 나완용, “디젤엔진개량에 의한 천연가스차량전환에 관한 연구”, 한국공작기계학회지, pp. 94~99, 1999.
- (6) “천연가스 자동차 보급 방안”, 한국가스연맹, 1996.
- (7) “압축천연가스를 사용하는 대형상용차량용 엔진의 성능향상에 관한 연구”, 아시아자동차, 1997.
- (8) 엄명도, “CNG 混燒機關에 關한 研究”, 국민대학교 대학원 박사학위논문, 1997.