



가솔린 엔진개조 CNG 발전기 개발과 동급 디젤엔진의 배출가스 특성 연구

Development of Gasoline Engine Renewal CNG Generator and a Study on Exhaust Gas Characteristics of Equivalent Diesel Engine

이정천*† · 김기호* · 이정민* · 박언영**

Jung-Cheon Lee*†, Ki-Ho Kim*, Jung-Min Lee* and An-Young Park**

(Received 14 September 2018, Revision received 19 November 2018, Accepted 26 November 2018)

Abstract: Compressed natural gas has a high octane number and low particulate emission characteristics as compared with petroleum-based fuels, so it can respond to exhaust gas regulations positively. A natural gas engine has been introduced to improve the quality of the atmosphere, a diversity of fuel, a stable supply, and it has widely been used in city buses and garbage trucks. Recently, the natural gas engine has received attention by overcoming the disadvantage of the theoretical air-fuel ratio method through the development of EGR cooler and engine parts with the development of LP-EGR technology. In this study, we try to develop the cogeneration system that can simultaneously generate electric power and heat by remodeling the gasoline engine to the mixer type CNG engine. As a result, it was able to reduce the NOx (approximately 77%) compared to the diesel engines with same displacement.

Key Words : Emission, Greenhouse gas, Air temperature

1. 서 론

압축천연가스(CNG, Compressed Natural Gas)는

풍부한 매장량, 뛰어난 열효율 및 경제성을 갖추고 있고, 석유계 연료에 비하여 고옥탄가와 낮은 미세먼지 배출의 특성을 가지고 있어 세계적으로

*† 이정천(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5897-257X>) : 연구원, 한국석유관리원 석유기술연구소

E-mail : ljcheon@kpetro.or.kr, Tel : 043-240-7958

*김기호 : 팀장, 석유관리원 석유기술연구소

*이정민 : 연구소장, 한국석유관리원 석유기술연구소

**박언영 : 교수, 충청대학교 항공자동차기계학부

*† Jung-Cheon Lee(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5897-257X>) : Researcher, Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority.

E-mail : ljcheon@kpetro.or.kr, Tel : 043-240-7958

*Ki-Ho Kim : Team Manager, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority Research Institute of Petroleum Technology.

*Jung-Min Lee : Chief Technology Officer, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority Research Institute of Petroleum Technology.

*An-Young Park : Professor, Faculty of Aerospace, Automobile & Machine Design, Chung Cheong University.

강화 되고 있는 배출가스 규제에 적극적으로 대응할 수 있는 청정연료로 부각되고 있다. 또한 전세계적으로 광범위하게 매장되어 있어 안정적으로 공급되는 특징을 가지고 있다.¹⁾ 특히 국내 대기질 개선대책과 수송용 연료의 다양성 및 안정적 공급을 위하여 도입된 천연가스엔진은 시내버스 및 청소차 등에 널리 사용되고 있으며, 최근 LP-EGR 기술 발전과 함께 EGR 쿨러 및 엔진부품 재질개발을 통해 이론공연비방식의 단점을 극복함으로써, 이론공연비 천연가스엔진이 주목받고 있다.²⁾ 또한 정밀한 이론공연비 제어를 위해 인젝션 방식의 엔진이 개발되고 있으나 고가이며, 부가적인 장치와 제어기술이 접목되어야 한다. 그러나 다양한 스피드와 부하 조건에서 사용되어지는 자동차나 상용차와 달리 단일 스피드와 부하를 이용하는 발전기의 경우 Mixer방식의 연료분사 방식을 이용함으로써 엔진 개발 비용을 절감할 뿐 아니라 배출가스에 대한 문제점도 해결할 수 있다.

본 연구에서는 가솔린 엔진을 Mixer 방식의 CNG엔진으로 개조하여 전력과 열을 동시에 발생시킬 수 있는 열병합 발전시스템(Cogeneration System)을 개발하고자 하였으며, 동급 디젤엔진과 배출가스 특성을 비교하여 효율을 검증해보고자 하였다.

2. 시험엔진, 장비 및 시험방법

2.1 가솔린 개조 엔진

연구에 사용된 CNG엔진은 기존의 가솔린 엔진

Table 1 Specification of test Engine(G50D)

| | | |
|------------------------|--------------------------|----------------------|
| Engine Type / Cylinder | | V type / 8 cylinders |
| Fuel | | CNG |
| Rated Power(kW/rpm) | | - |
| Max Toque(kg·m/rpm) | | - |
| Cylinder | Bore × Stroke (mm) | 97.0 × 84.0 |
| | Displacement Volume (cc) | 4,966 |
| Compression Ration | | 10.0 : 1 |
| Firing Order | | 1-5-4-2-6-3-7-8 |



Fig. 1 G50D Engine

을 개조하여 사용하였다. 개조된 엔진의 상세제원과 장착된 모습을 Table 1과 Fig 1에 나타내었다.

2.2 디젤 엔진

CNG개조 엔진과의 배출가스 비교를 위해 배기량이 비슷한 디젤엔진을 선정하였으며, 상세제원은 Table 2에 엔진이 장착된 모습은 Fig 2에 나타내었다.

Table 2 Specification of test Engine(4M50-TLE3A)

| | | |
|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Engine Type / Cylinder | | In line type / 4 cylinders |
| Fuel | | Diesel |
| Rated Power(kW/rpm) | | 129 / 2700 |
| Max Toque(kg·m/rpm) | | 54 / 1600 |
| Cylinder | Bore × Stroke (mm) | 114 × 120 |
| | Displacement Volume (cc) | 4,899 |
| Compression Ration | | 17.5 : 1 |
| Firing Order | | 1-3-4-2 |



Fig. 2 4M50-TLE3A Engine

2.3 시험장비

연료소비량은 중량식 질량유량 측정방식의 Endress hauser사의 PROMASS F300, 냉각수유량계는 Y.K Flowmeter사의 FD-LWGY으로 사용하였다. 시험에 사용된 모든 유량계는 교정을 완료하였으며, 장착된 사진을 Fig 3에 나타내었다. 엔진동력계는 Fig 4에 나타내었으며, AVL사의 330 kW 이하 중대형 엔진을 시험할 수 있는 AC동력계를 사용 하였다. 배출가스 분석기는 Fig 5에 나타내었



Fig. 3 Gas Flow Meter

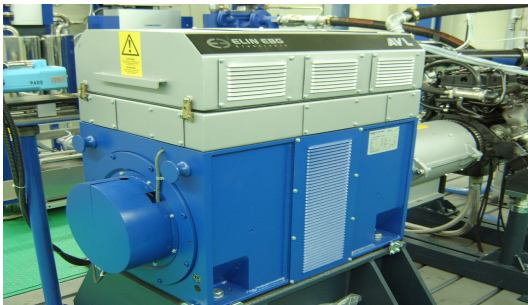


Fig. 4 AC Type dynamometer



Fig. 5 Potable emissions analyzer

으며, HORIBA사의 MAXA-7100로 THC, CO, CO₂, NO_x 등을 측정할 수 있는 장비로서, 환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률에 근거하여 형식승인을 득하고 매년 정도검사를 수행하고 있는 장비이다.

2.4 시험방법

가솔린 엔진에 대한 Mixer방식의 CNG엔진 개조를 위하여 최적의 연소조건을 찾기 위하여 공기유량에 대한 Mapping을 실시하였으며, 이를 바탕으로 발전기 사용 구간에 대한 RPM별 MBT지점을 찾아 최적의 점화시기를 선정하였다. 또한 Mapping된 ECU 데이터를 토대로 성능평가를 수행함으로써 발전기 효율이 가장 좋은 RPM을 선정하여 최종 CNG 개조 엔진을 개발하였다.

2.4.1 Charge Model Calibration

이론공연비 제어에 필요한 산소량과 연소에 필요한 공기량 계산을 위하여 ECU에 흡입공기량을 측정 하였다. 측정조건은 해당 엔진의 전 영역인 1,020~3,020 rpm을 200 rpm씩 증가시켜가며 평가를 수행하였다. 교정된 공기유량계와 실제 엔진에 사용된 공기유량센서와의 차이를 비교하여 에러율을 산정하였다.

2.4.2 MBT(Maximum Break Toque) Spark timing

엔진의 최적의 연소조건을 만들어주기 위하여 점화시기를 점차 진각시켜 최적의 출력구간을 찾는 MBT 평가를 수행하였다. 시험조건은 해당 엔진의 전 영역인 1,000~3,000 rpm 중 회전수를 100 rpm 단위로 변경해 가며 수행하였다. 엔진 사용 영역 전체를 Mapping함으로써 단일모드로 발전되는 발전기의 최적의 효율구간을 찾고자 하였다.

2.4.3 Torque Model Calibration

엔진의 Throttle Model 및 Torque Model Calibration을 위하여 ETC(Electronic Throttle Control) 개도량에 따른 회전수별 공기량과 회전수별 토크를 측정하여 최적의 연소구간을 찾고, 최대 효율 구간을 선정하고자 하였다.

2.4.4 Performance Test

선행한 Charge Model Calibration, MBT, Throttle Model 및 Torque Model Calibration 수행 결과를 반영하여 해당 엔진의 최종 토크를 측정함으로써 개발엔진에 대한 최종 전부하 성능을 확인하였다.

2.4.5 발전효율 측정

건물용 내연 가스엔진 열병합발전 유닛-성능 시험방법(KS B 0000:2017)의 발전효율 측정 및 계산을 사용하여 각 부하별 최적의 발전구간을 선정하고자 하였으며, 이때 사용된 수식은 아래와 같다.

$$3.6 \times \frac{\text{power output (kW)}}{\text{gas consumption (kg/h)} \times \text{low calorific power (MJ/kg)}} \quad (1)$$

2.4.6 배출가스 특성 비교

최종 개발된 CNG 개조엔진과 발전기 엔진으로 주로 사용되고 있는 디젤엔진 중 동급(5L급)의 발전 엔진을 선정하여 배출가스(NOx:질소산화물)를 측정하였다. 시험은 저·중·고속 3 Point(1,500, 1,800, 2,400 rpm)를 선정하여 배출가스를 측정하였으며, CNG 발전기에 대한 청정성을 확인하고자 하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 가솔린엔진 개조

3.1.1 Charge Model Calibration

Fig 4는 흡기공기량과 ECU에 표기된 공기량을 비교한 결과이다. 실제 검·교정된 공기유량계와의 비교 결과, 저압부영역인 400 hPa 이하에서는 실측 흡입공기량 대비 최대 20%의 에러율을 보였다. 그러나 400~1,100 hPa 영역에서는 ±3%의 에러율을 보임에 따라 실제 발전기의 사용구간인 고부하 영역에서의 에러율은 큰 차이가 없으므로 판단되어지며, 저부하 영역에서의 교정을 수행하였다.

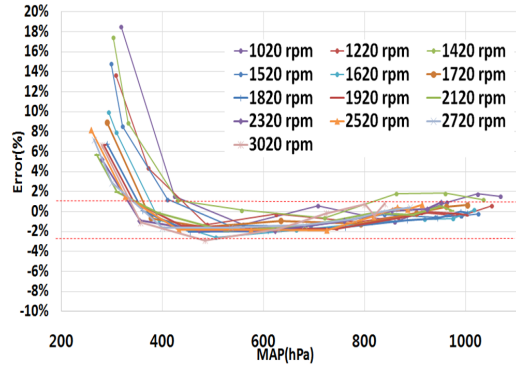


Fig. 6 G50D Engine Charge Calibration

3.1.2 MBT Spark timing

각 RPM별 MBT평가를 수행하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전체 영역에서 노킹은 발생하지 않았으며, 저부하 영역인 1,000 rpm 이하에서는 대부분 BTDC 20°에서 MBT 지점을 나타내었다. 그러나 각 부하를 10%씩 변경해 가며 RPM별 MBT지점을 측정된 결과, 1,500 RPM 영역부터 BTDC 20°에서 점차 진각된 지점에서 MBT지점이 나타났으며, 3,000 rpm의 경우, 부하별 차이를 보였으나 BTDC 23~30° 부근에서 MBT지점을 나타냈다. 실험에서 CNG엔진의 경우, 최적연비는 BTDC 24~26°에서 얻었다³⁾고 한 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

전체 사용 영역에 대한 MBT지점의 점화시기를 Mapping함으로써 최적의 연소조건을 부여하였다.

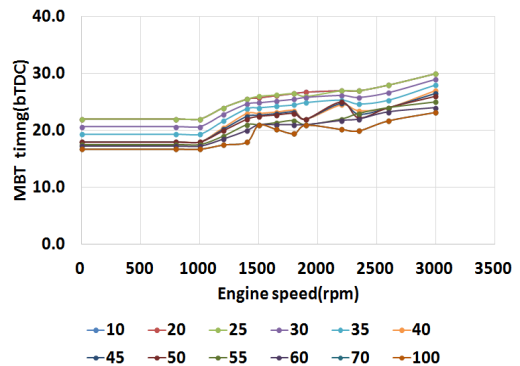


Fig. 7 G50D Mixer Type MBT timing

3.1.3 Torque Model Calibration

엔진의 Throttle Model 및 Torque Model Calibration을 위하여 ETC 개도량에 따른 회전수별 공기량과 회전수별 토크를 평가 및 모니터링 하였다. 1,000~3,000 rpm의 전 영역에서 흡기공기유량과 토크를 측정된 결과를 Fig 8에 나타내었으며, 스로틀 30%까지는 비슷하였으나 많이 사용되는 중영역대(1,500~1,900 rpm)는 150~220 kg/h구간에 고영역대(2,200~3,000 rpm)는 240~310 kg/h구간에 형성되어 있는 것을 볼 수 있었다.

3.1.4 Performance Test

Charge Model Calibration, MBT, Throttle Model 및 Torque Model Calibration 수행 결과를 반영하여 해당 엔진을 Mapping하고 전 구간 데이터를 분석하였다. Fig 9는 엔진 출력과 토크를 나타낸 것으로, 최대출력(Power(kW) / 3,000 rpm)은 약 67 kW, 토크(Torque(N·m) / 3,000 rpm)는 약 214 N·m로 측정되었다.

3.2 개조엔진의 발전효율

Fig. 10은 개조엔진의 발전효율을 나타내었다. 발전효율의 경우, 약 33 / 27 / 28%로 고 부하로 갈수록 다소 낮게 나온 것을 알 수 있었으며, 이는 가스소비량이 각 9.62 / 13.32 / 15.83 kg/h로 증가함에 따라 발전효율식으로부터 가스소비량이 증가함에 따라 효율은 저감된다. 따라서 연비를 고려한 최적의 운행조건으로는 1,500 rpm 영역이라고 할 수 있다.

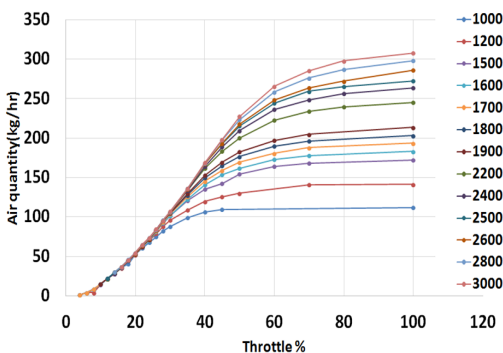


Fig. 8 G50D Mixer Type Air quantity

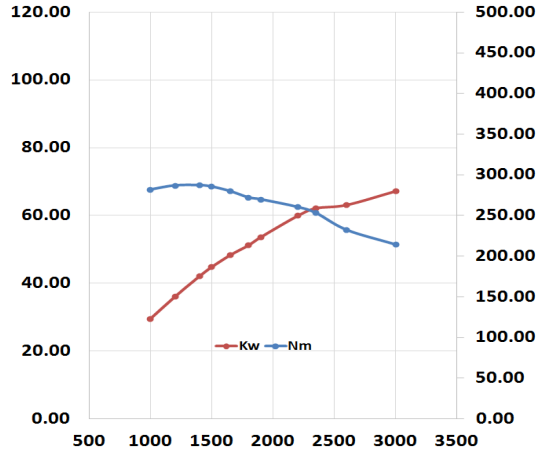


Fig. 9 G50D Mixer Type WOT Performance

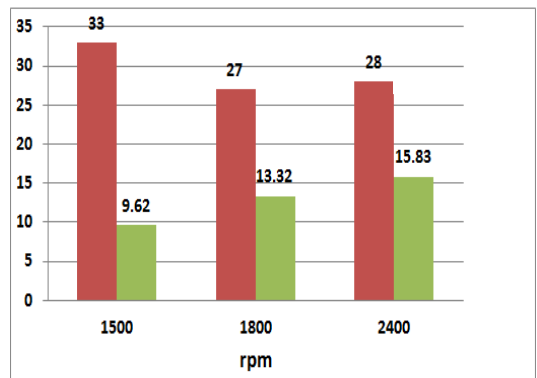


Fig. 10 Generating Efficiency

3.3 배출가스 특성 결과 및 고찰

3.3.1 배출가스 특성 비교(NOx)

기존 디젤엔진의 경우, 질소산화물에 대한 규제가 점차 강화되고 있으며, 디젤 발전기의 경우 질소산화물 저감에 대한 문제가 지속적으로 제기되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 개조엔진과 동급 디젤엔진에 대한 평가를 수행하였으며, Fig. 11에 CNG엔진과 디젤엔진에 대한 질소산화물 측정값을 나타내었다.

CNG 개조엔진의 경우, 디젤 엔진대비 약 77% 낮은 결과값을 나타냈는데, 질소산화물의 경우 온도에 기인하는 Thermal NOx가 대부분임에 따라 연소실 내 연소온도가 디젤 엔진에 비해 낮은 CNG 개조 엔진이 낮은 질소산화물 결과를 나타

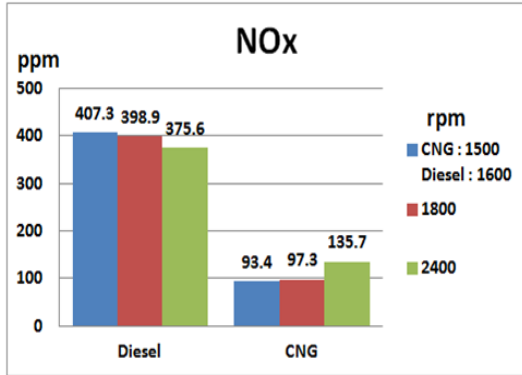


Fig. 11 NOx

낸 것으로 사료된다. 이는 청정연료로 알려진 CNG의 경우, NOx의 배출량이 기존 디젤보다 낮게 나타나는 것으로 보고⁴⁾ 되고 있어 본 연구에서도 동일한 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 가솔린 엔진을 Mixer 방식의 CNG엔진으로 개조하여 열병합 발전시스템을 개발하고, 동급 디젤엔진과 질소산화물을 비교한 연구결과에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Charge Model Calibration 결과, 저압부영역인 40 hPa 이하 영역에서는 20%의 에러율을 보였으며, 400~1,100 hPa에서는 3%의 에러율을 보였다.
- 2) MBT 시험 결과, 저부하 영역인 1,000 rpm 이하 에서는 대부분 BTDC 20°에서 MBT 지점을 나타내었으며, 3,000 rpm에서는 BTDC 23~30° 부근

에서 MBT지점을 나타내어 기존 연구³⁾ 결과와 유사함을 알 수 있었다.

3) CNG 개조 엔진의 성능테스트 결과, 최대출력(Power(kW)/3,000 rpm)은 약 67 kW, 토크(Toque(N·m)/3,000 rpm)는 약 214 N·m로 나타났다.

4) 개조된 CNG엔진의 가스소비량 및 엔진효율을 3Point(1,500 / 1,800 / 2,400 rpm)으로 측정하였고, 가스소비량 9.62 / 13.32 / 15.83 kg/h와 엔진효율 33.19 / 27.75 / 28.50%로 나타내어 최적의 연비조건은 1,500 rpm 영역임을 알 수 있었다.

5) CNG엔진과 디젤엔진에 대한 배출가스 특성을 비교한 결과, NOx의 경우 디젤엔진 대비 약 77% 낮게 나타났다.

References

1. www.kangv.org.
2. S. W. Lee, G. H. Lim, C. W. Park, S. Y. Lee, Y. Choi and C. G. Kim, 2014, "Combustion and Emission Characteristics According to EGR Rate on Stoichiometric CNG Engine", KIGAS, 5-5.
3. S. Maji, R. Ranjan and P. B. Sharma, 2000, "Comparson of emissions and fuel consumption from CNG and Gasoline fueled vehicles effect of ignition timing", SAE 2000-01-1432.
4. Y. R. Kim and K. N. Choi and D. S. Jeong, 2012, "Comparison of Fuel Consumption and Exhaust Gas Emission between Euro 5 Diesel Bus and CNG Bus", pp. 448-451.