



CNG엔진에서 합성가스 연료의 연소 및 배기 특성 평가

이성원 · 임기훈* · †박철웅 · 최영 · 김창기

한국기계연구원, *과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과
(2012년 6월 13일 접수, 2015년 11월 3일 수정, 2015년 11월 4일 채택)

Characteristics of Combustion and Emission for Synthetic Natural Gas in CNG Engine

Sungwon Lee · Gihun Lim* · †Cheolwoong Park · Young Choi · Changgi Kim

Korea Institute of Machinery and Materials, 104 Sinseongno Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea

*Dept. of Environment & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajungro Yuseong-gu Daejeon 305-350, Korea

(Received June 13, 2012; Revised November 3, 2015; Accepted November 4, 2015)

요약

합성가스(SNG)는 석탄 가스화를 통하여 얻어지는 가스연료로서, 고유가로 인한 천연가스가격 상승을 대비할 수 있는 대체연료 중의 하나로 주목받고 있다. 본 연구에서는 메탄 90.95%, 프로판 6.05%와 수소 3%의 조성비를 갖는 SNG연료 모사가스와 압축천연가스(CNG)를 11리터 급 CNG 엔진에 적용하여 연소 및 배기 특성을 비교실험 하였다. 연료공급시스템, 분사시기 등 엔진의 연소제어인자를 일정하게 하고 전부하 운전조건에서 엔진회전수 변화에 따른 출력, 열효율, 연소안정성 및 배기특성을 비교하였다. 1260rpm, 전부하 운전조건에서 노킹특성도 분석하였다. SNG 연료를 사용했을 때 출력 저하 없이 연소안정성이 향상되어 열효율이 증가하였다. 질소산화물(NO_x)의 배출은 CNG연료의 경우에 비해 증가되었으나 이산화탄소(CO₂)의 배출은 감소하였다. SNG 연료를 이용하여 운전할 경우 내노킹성이 향상되었다.

Abstract - Synthetic natural gas(SNG), acquired from coal, is regarded as an alternative to natural gas since a rise in natural gas due to high oil price can be coped with it. In the present study, 11-liter heavy duty compressed natural gas(CNG) engine was employed in order to examine the combustion and emission characteristics of SNG. The simulated SNG, made up 90.95% of methane, 6.05% propane and 3% hydrogen was used in the experiment. Power output, thermal efficiency, combustion stability and emission characteristics were compared to those with CNG at the same engine operating conditions. Knocking phenomenon was also analyzed at 1260 rpm, full load condition. Combustion with SNG was more stable than CNG. Nitrogen oxides emissions increased while Carbon dioxides emissions decreased. Anti-knocking characteristics were improved with SNG.

Key words : synthetic natural gas(SNG), compressed natural gas(CNG), power output, thermal efficiency, combustion stability, emission, knocking margin

1. 서론

경제가 성장하고 사회가 발전함에 따라 필요로

하는 에너지는 점점 증가되고 있으나, 현재 주 에너지원인 화석연료는 높은 석유의존도와 한정된 매장량에 의하여 가격이 점점 증가하고 공급안정성이 악화되고 있다. 그에 따라 대표적인 운송수단의 연료인 가솔린과 디젤을 대체하기 위한 액화석유가스(Liquefied petroleum gas; LPG) 및 압축천연가스

†Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

(Compressed natural gas; CNG)와 같은 가스연료의 활용이 이루어지고 있다. 특히, CNG 엔진은 가솔린 엔진에 비하여 높은 열효율과 낮은 배기가스 배출하는 장점을 가지고 있다. 가장 강력하게 규제가 강화되고 있는 배출물인 질소산화물(NO_x)의 배출은 삼원촉매의 적용 또는 희박연소를 통하여 줄일 수 있다. 이러한 CNG 엔진의 장점 때문에 세계적으로 버스와 같은 전형적인 운송 산업에 이용되고 있는 실정이다.[1,2]

그러나 고유가로 인하여 가스연료의 가격이 동반 상승함에 따라 석탄을 이용하여 가스연료를 만드는 방법이 새롭게 주목받고 있다.[3,4] 석탄을 고온, 고압, 그리고 산소와 스팀을 이용하여 가스화한 후 산성가스를 제거하는 정제과정을 거쳐 메탄 등을 합성하여 생산되는 연료를 합성가스(Synthetic natural gas; SNG)라고 한다. 특히 주원료가 되는 석탄은 가격이 저렴하고 풍부한 매장량을 가지고 있기 때문에 가격경쟁력이 있는 연료이다. 이러한 낮은 생산가격을 고려할 때 보일러, 산업장비 및 운송수단에 적용하여 경제적 이익이 기대된다.[5,6]

SNG는 생산될 때 메탄, 일산화탄소, 이산화탄소 및 수소의 성분을 지니지만, 정제과정을 거치면 주로 메탄과 수소로 구성되게 된다.[7] 연료의 주성분이 CNG와 매우 유사하기 때문에 대체 가능한 잠재력을 가지고 있으며, SNG 연료를 CNG 엔진에 적용하였을 때 낮은 유지비의 장점이 나타날 수 있다.

SNG의 생산에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행된 결과가 있으나, 대체연료로서 CNG 엔진에 SNG 연료의 적용 등의 이용에 관한 연구는 미흡한 상태이다. 이에 본 연구에서는 CNG 엔진에 SNG를 연료로 사용하였을 때의 적용가능성 검토를 목표로 하여, 각각의 연료에 대한 연소 및 배기특성을 살펴보고, 연료공급시스템 및 분사시기 등의 엔진운전 제어변수를 일정하게 하고 엔진의 출력 및 배기가스 배출량을 비교하였으며, 최대출력조건에서의 노킹현상을 비교하여 내노킹성을 검토하였다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1. 연료 조성 및 발열량

본 실험에서 사용한 CNG와 SNG의 조성은 Table 1과 같다. SNG연료를 직접 합성하여 사용하기 어렵기 때문에 SNG 모사가스로서 메탄 90.95%, 프로판 6.05% 및 수소 3%로 합성한 시험가스를 이용하였다.

2.2. 실험장치

시내버스용 11L급 6기통 CNG엔진을 설치하여

실험을 진행하였으며 Fig. 1에 엔진을 포함한 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 기존의 희박연소를 구현하는 연소시스템을 기반으로 하여 CNG 및 SNG 공급·제어시스템을 설치하였으며, 엔진의 제원은 Table 2에 나타내었다.

CNG는 실제 엔진에서 사용되는 연료용기를 사용하여, 20 MPa 정도로 충전된 고압연료용기로부터 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압된 연료가 Metering valve 및 Mixer를 통하여 흡기매니폴드로 공급되도록

Table 1. Properties of CNG and SNG

Component	CNG	SNG
Methane (CH ₄)	91.332%	90.95%
Ethane (C ₂ H ₆)	5.363%	-
Propane (C ₃ H ₈)	2.136%	6.05%
Iso-butane (i-C ₄ H ₁₀)	0.459%	-
Normal-butane (n-C ₄ H ₁₀)	0.476%	-
Iso-pentane (i-C ₅ H ₁₂)	0.015%	-
Normal-pentane (n-C ₅ H ₁₂)	0.002%	-
Nitrogen (N ₂)	0.217%	-
Hydrogen (H ₂)	-	3%
Higher heating value	10400 kcal/Nm ³ (43.54 MJ/Nm ³)	10200 kcal/Nm ³ (42.71 MJ/Nm ³)

Table 2. Engine specification

Number of cylinders	6 ea
Displaced volume	11.051 L
Bore	123 mm
Stroke	155 mm
Compression ratio	10.5:1
Max. power	222 kW at 2100 rpm
Max. torque	1150 Nm at 1260 rpm
Type of ignition	Spark ignition
Type of injection	Single point injection
Type of turbocharger	Waste gate

하였다. 이때 연료량은 가스분사기 8개가 하나의 모듈을 구성하는 Metering valve에 의해 제어되었으며, 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 과도한 냉각을 막기 위해 열교환기를 장착하였다. SNG는 12 MPa로 충전된 여러 개의 고압가스용기를 병렬로 연결하여 레귤레이터 전단에 공급하고, 레귤레이터의 후단은 기존의 연료공급시스템을 이용하였다.

EMS(Engine management system)를 이용하여 실험조건을 변경하였으며, 와전류식 동력계(Schenck co.)를 이용하여 엔진의 회전수 및 부하를 제어하였다. 점화플러그형 압력센서와 연소해석기(DEWETRON co.)를 통하여 연소압력데이터를 측정하였다. 또한, 배기가스 배출량의 측정은 배기분석기(AVL co., AMA i60)을 사용하여 측정하였다.

2.3. 실험 방법 및 조건

(1) 전부하 특성 실험

CNG 엔진에서 SNG연료를 사용했을 때의 엔진 성능을 살펴보기 위하여 엔진작동조건을 일정하게 하고 엔진냉각수, 엔진오일 및 흡기온도가 충분히 Warm-up된 상태에서 실험을 진행하였다. 출력성능, 열효율, 연소안정성 및 배기특성을 분석하기 위하여 1000 rpm ~ 2100 rpm까지 200 rpm 간격으로 스톱들이 전부 개방된 전부하 실험을 수행하였다.

(2) 노킹특성 실험

노킹현상은 연소가 완료되기 전에 미연가스 영역의 온도가 자발화온도를 넘어서는 경우가 발생하여 화염전파 말단에 있는 미연가스 전체가 거의 동시에 자발화함으로서 급격한 압력상승을 일으키는 현상을 말한다. 본 연구에서는 연소기간 동안 압력이 얼마나 빨리 증가하는지를 보여주는 압력변화율을 기준으로 하여 노킹의 여부를 판단하였다.[9] Fig. 2와 같이 연소기간 동안 실린더 내의 압력변화율이 500 kPa/Crank angle degree(CAD) 이상일 때 연소후반부의 열발출량이 이상연소에 의하여 급격하게 증가하는 현상을 확인하였으며, 이때를 노킹 발생으로 판정하였다. 실험조건은 최대토크가 발생하는 1260 rpm, 전부하 조건에서 최적점화시기 (Minimum advance

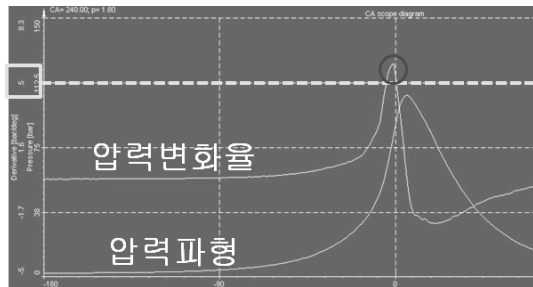


Fig. 2. In-cylinder pressure derivative.

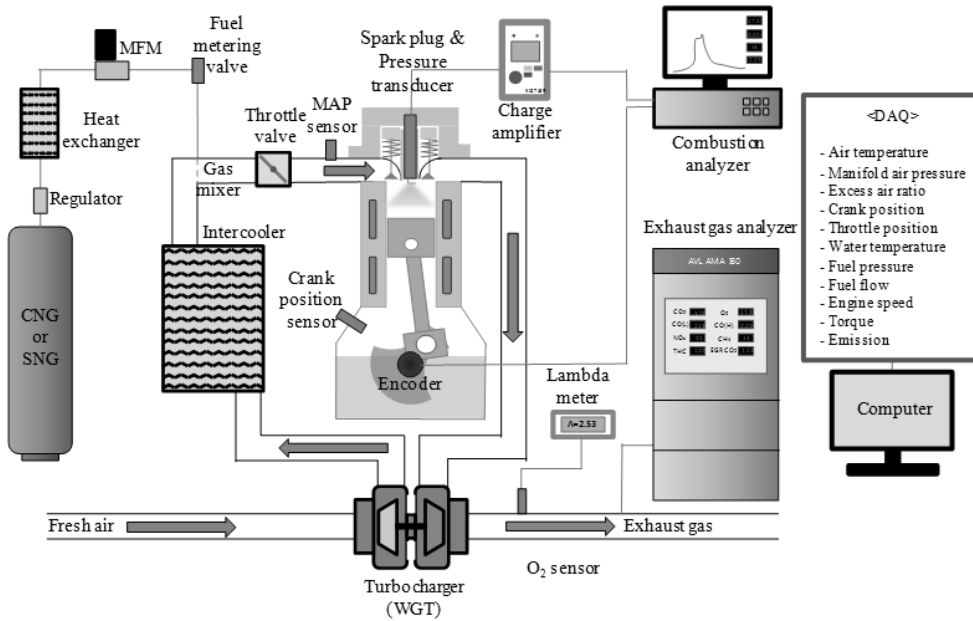


Fig. 1. Schematic diagram of engine experimental setup.

for best torque; MBT) 부근에서 점화시기를 2 CAD 씩 전각시키며 연료에 따른 실험을 수행하였다.

III. 실험결과

3.1. 전부하 특성 실험

(1) 전부하 출력특성

본 실험에서 사용된 SNG 연료는 CNG에 비하여 발열량이 2% 낮고 수소가 3% 함유되어있는 것이 특징이다. Fig. 3은 엔진속도에 따른 CNG와 SNG의 토크곡선을 보여주고 있다. SNG는 CNG에 비해 발열량이 2% 낮지만, 천연가스와 동등 유사한 토크곡선을 보이고 있다. 이는 합성가스가 천연가스보다 열효율이 개선되었음을 의미하며, Fig. 4에 도시된 것과 같이 SNG의 경우 CNG에 비해 높은 열효율 결과를

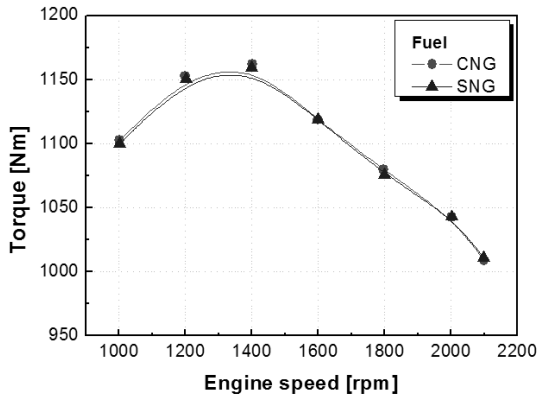


Fig. 3. Comparison of torque characteristics versus engine speed.

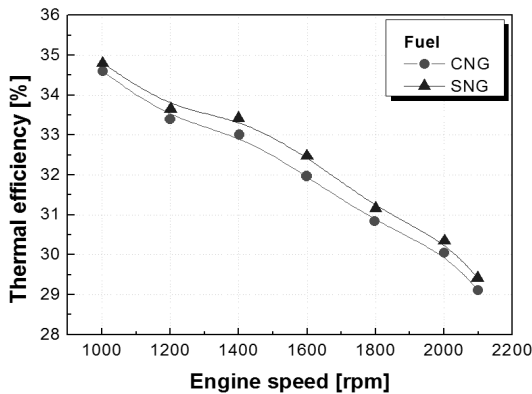


Fig. 4. Comparison of thermal efficiency versus engine speed.

보이고 있다. 그 원인은 연소안정성 개선에서 확인할 수 있는데, 사이클간 실린더내의 연소변동률을 나타내는 COV_{IMEP} 결과를 도시한 Fig. 5를 살펴보면 SNG연료를 사용했을 때 약 2% 정도 감소되었다. 이는 SNG의 경우 연료 내의 수소가 화염 발달 및 전파를 빠르게 하여 사이클 간 연소변동률이 저감된 것이 원인으로 판단되며, 이러한 결과는 이전의 연구결과와 일치하는 결과이다.[9] SNG의 상대적으로 우수한 연소안정성은 열효율의 증가를 야기하여 CNG의 경우와 동등한 출력성능을 토출한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 엔진속도의 변화에 따른 각 연료의 점화시기 및 연소기간을 보여주고 있다. MFB(Mass Fraction Burned)는 실린더내의 연료가 얼마만큼 연소되었는지를 보여주는 값이며, MFB 10%는 연소가 시작

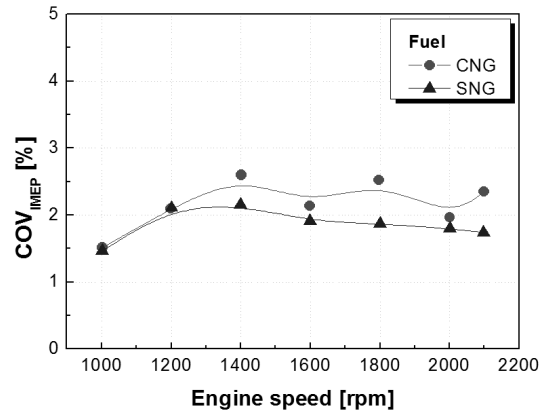


Fig. 5. Comparison of combustion stability versus engine speed.

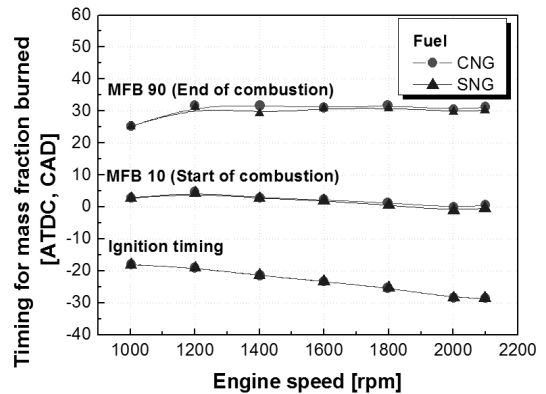


Fig. 6. Spark ignition timing and Mass Fraction Burned (MFB) 10% and 90% results versus engine speed.

하는 시점이고 90%는 연소가 종료되는 시점으로 볼 수 있다. 이에 따라 점화시기부터 MFB 10%까지는 점화지연기간, MFB 10% ~ 90%까지는 연소기간으로 정의 하였다. SNG의 경우는 고속영역에서 점화지연이 1CAD감소하였다. 이는 수소의 빠른 화염전파에 영향으로 판단되지만, 그 차이가 크지 않기 때문에 엔진성능에는 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

(2) 배출가스 특성

Fig. 7은 엔진의 속도변화에 따른 NO_x 배출경향을 보여주고 있다. SNG의 경우 CNG 연료에 비해 NO_x의 배출이 증가하는 것을 볼 수 있다. 전 부하 조건에서 각각 1000rpm에서 6.6% (111 ppm), 2100rpm 에서는 4.6% (22 ppm)증가하였다. 이는 SNG 내에 함유된 수소와 프로판의 연소가 전체적인

연소온도의 증가에 영향을 미치지 때문인 것으로 판단된다. 상대적으로 공기과잉률이 낮고 진각된 점화시기 조건에서 운전되는 1000rpm에서는 NO_x의 배출이 두 연료 모두에 대해서 높게 나타났다. SNG 연료를 사용했을 때 CNG 연료 대비 평균 3.5% 증가하였지만 절대치로는 수십 ppm 수준인 것을 알 수 있다. 이러한 NO_x 배출량 증가는 점화시기를 지각시키거나 혼합기의 희박한 정도를 증가시킴으로써 NO_x배출량을 CNG연료와 비슷한 수준까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8에 CO₂ 배출을 나타내었으며, SNG연료를 사용했을 때 배출량이 평균 2.5% 저감되는 것을 볼 수 있다. CO₂의 배출은 연료의 탄소성분에 영향을 많이 받는데, SNG의 H/C 비(연료의 탄소대비 수소의 비율)는 3.83이고 CNG는 3.77이다. 따라서 동일한 유량의 연료를 공급하여 연소가 일어나면, SNG연료를

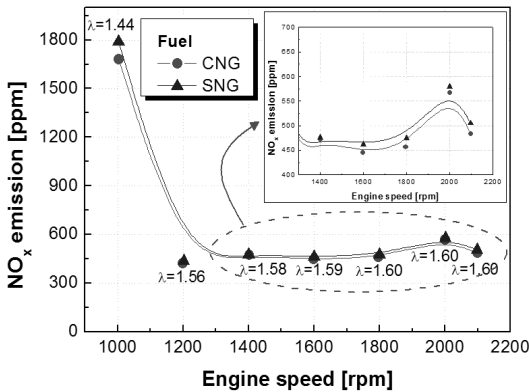


Fig. 7. Comparison of NO_x emissions versus engine speed.

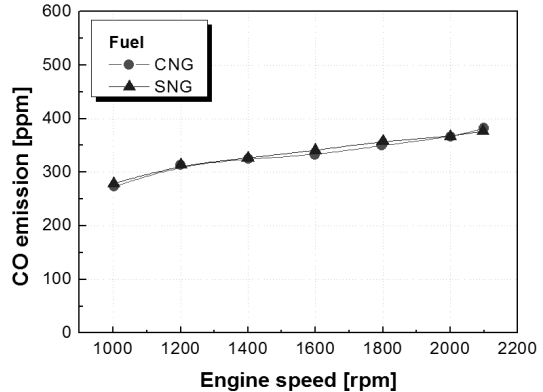


Fig. 9. Comparison of CO emissions versus engine speed.

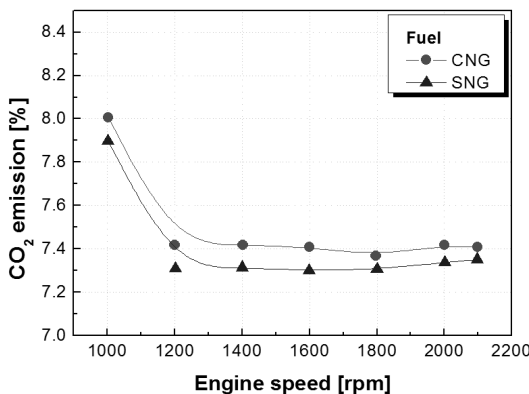


Fig. 8. Comparison of CO₂ emissions versus engine speed.

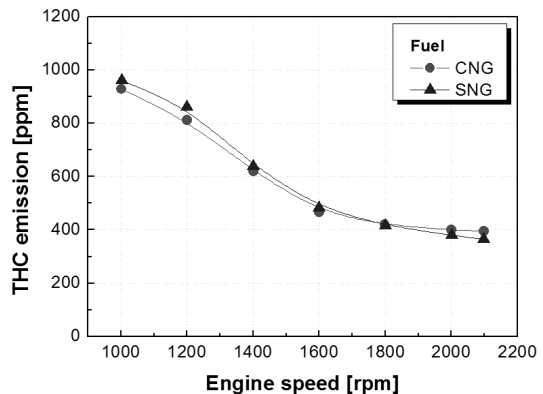


Fig. 10. Comparison of THC emissions versus engine speed.

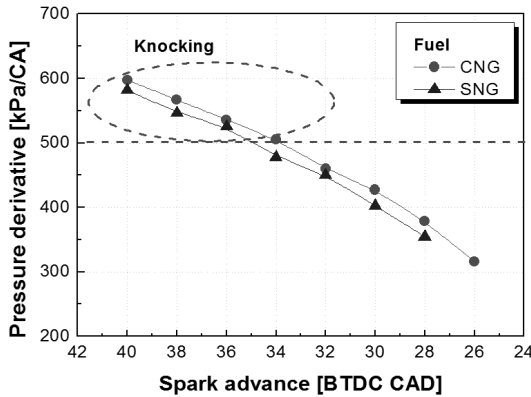


Fig. 11. Pressure derivative changes for both fuel with various spark advance timing.

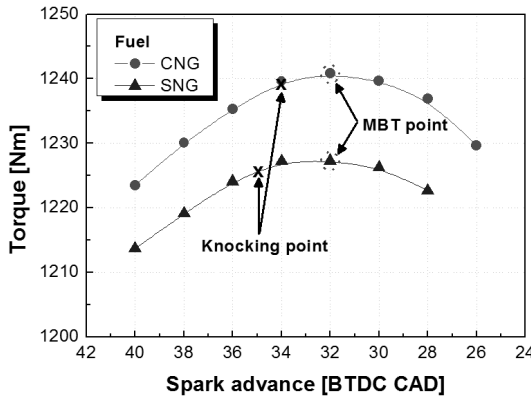


Fig. 12. MBT and Knocking point from torque curve with various spark advance timing.

사용했을 때 CO₂의 배출이 감소하게 되고, 온실가스 저감에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Fig. 9, 10은 각각 엔진의 회전수 변화에 따른 CO와 THC 배출 결과를 보여주고 있다. SNG와 CNG 연료에 대해서 유사한 배출 수준을 보이고 있으며, 소량의 수소 또는 프로판 함유율이 불완전연소에 의한 배기 배출물 감소에는 영향을 주지 않았음을 알 수 있다.

3.2. 노킹 특성 실험

일반적으로 노킹현상은 연소 후반부에 급격한 연소 압력 변화를 동반하며, 본 연구에서는 압력변화율이 500 kPa/CAD 이상일 때를 노킹 발생으로 판정하였다. Fig. 11은 점화시기변화에 따른 연소압력변동률을 보여주고 있으며, SNG의 경우 CNG에 비해 상대적으로 낮은 압력변동률을 나타내었다. 노킹이

발생하는 시점은 BTDC 35 CAD로 CNG의 BTDC 34 CAD보다 1 CAD 진각 되었다. 위의 결과로부터 Fig. 12에 나타낸 것과 같이 각 연료에 대하여 MBT 점화시기와 노킹 발생 시기를 비교하였다. 두 연료에 대해서 최대효율시점인 MBT는 동일하지만, 노킹 시점이 진각된 것은 SNG 연료가 CNG 연료에 비해 높은 내노킹성을 갖고 있음을 의미한다. 이러한 내노킹성은 엔진 운전조건의 급격한 변화 또는 고장작동 시에 이상연소 발생가능성이 상대적으로 낮게 하기 때문에 안정적인 운전이 가능한 장점으로 작용할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 SNG연료의 CNG 엔진 적용가능성 평가를 목적으로, 엔진의 연소제어인자 변경 없이 SNG연료를 사용했을 때의 연소 및 배기특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) SNG 연료는 CNG 연료에 비하여 발열량이 2% 정도 낮지만, 높은 연소안정성에 의해 열효율이 개선되고 엔진출력 성능을 만족하는 특성을 보였다.
- (2) NO_x 배출이 3.5% 증가되었으나, 그 절대값의 차이가 크지 않고 점화시기 지각 또는 보다 희박한 혼합기를 이용하여 배출가스 규제를 만족할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) CO와 THC의 배출의 차이는 거의 나타나지 않았으며, CO₂ 배출량은 탄소비율이 낮아짐에 따라 2.5% 감소하였다.
- (4) SNG와 CNG 연료에 대해서 최대효율시점인 MBT는 동일하지만, SNG 연료의 경우 노킹 발생 시기가 진각되어 CNG 연료에 비해 내노킹성이 높은 특성을 나타냈다.
- (5) SNG 연료는 CNG 엔진의 제어변수 및 구조 변경 없이 사용가능 할 것으로 판단되며, CNG 연료 대비 열효율 증가 및 CO₂ 저감효과가 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Jahirul, M. I., Masjuck, H. H., Saidur, R., Kalam, M. A., Jayed, M. H., and Wazed, M. A., "Comparative Engine Performance and Emission Analysis of CNG and Gasoline in a retrofitted Car Engine", 30(14-15), 2219-2225, (2010)
- [2] Kim, C. U., Kim, C. G., Kim, S. S., Pang, H. S., Han, J. O., and Cho, Y. S., "A Study on the Per-

- formance Improvement for a Natural Gas Engine under Lean Burn & WOT Condition”, *Transaction KSAE*, 4(6), 11-17, (1996)
- [3] Kopyscinski, J., Schildhauer, T. J., Biollaz, and S.M.A., “Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Coal and Dry Biomass - A Technology Review form 1950 to 2009”, *Fuel*, 89(8), 1763-1783, (2010)
- [4] Felder, R., Dones, R., “Evaluation of Ecological Impacts of Synthetic Natural Gas from Wood Used in Current Heating and Car Systems”, *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 403-145, (2007)
- [5] Steubing, B., Zah, R., and Ludwig, C., “Life Cycle Assessment of SNG from Wood for Heating, Electricity, and Transportation”, *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2950-2960, (2011)
- [6] Vitasari, C. R., Jurascik, M., and Ptasinski, K. J., “Exergy Analysis of Biomass-to-Synthetic Natural gas (SNG) Process via Indirect Gasification of Various Biomass Feedstock”, *Energy*, 36(6), 3825-3837, (2011)
- [7] Kim, S. H., Yoo, Y. D., Kim M. H., Kim, N. R., and Kim, H. T., “The Study on SNG(Substitute Natural Gas) Production Process Using Synthesis Gas for Gasification”, *Presented at KOSEE Fall Conference 2007*, 153-158, (2007)
- [8] Valtadoros, T. H., Wong, V.W., and Heywood, J. B., “Engine Knock Characteristics at the Audible Level”, *SAE Technical Paper 910567*, (1991)
- [9] Ma, F., Ding, S., Wang, Y., Wang, Y., Wang, J., and Zhao, S., “Study on Combustion Behaviors and Cycle-by-Cycle Variations in a Turbocharged Lean Burn Natural Gas S.I. Engine with Hydrogen Enrichment”, 33(23), 7245-7255, (2008)