



바이오가스의 성분 변화가 엔진 성능에 주는 영향

박승현** · 박철웅* · 김영민* · †이선엽*,** · 김창기*

*한국기계연구원 그린동력연구실, **과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과
(2011년 7월 28일 접수, 2011년 10월 28일 수정, 2011년 10월 28일 채택)

Effects of Biogas Composition Variations on Engine Performance

Seunghyun Park** · Cheolwoong Park* · Youngmin Kim*

†Sunyoup Lee*,** · Changgi Kim*

*Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

**Dept. of Environmental System Eng., Univ. of Sci. and Tech., Daejeon 305-333, Korea

(Received July 28, 2011; Revised October 28, 2011; Accepted October 28, 2011)

요 약

바이오가스는 Biomass, 유기성 폐기물 등의 혐기소화 공정을 통해 얻을 수 있는 대표적인 신재생연료로 저발열량에도 불구하고 탄소중립적인 특성이 있기 때문에 이를 엔진에 적용하여 에너지를 생산하고자 하는 노력이 계속되어왔다. 바이오가스는 원료의 종류 및 혐기소화 공정 조건에 따라 그 연료 조성이 달라질 수 있는데, 이러한 조성 변화는 엔진 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 다양한 발열량을 갖는 바이오가스를 연료 내 불활성가스 비율을 변화시켜 모사하고 이를 이용하여 바이오가스 내 불활성가스 비율의 변화, 즉 발열량의 변화가 엔진 성능 및 배기 특성에 주는 영향을 파악하였다. 실험 결과로 각 불활성가스 함량에 따른 최적 점화시기를 결정하였으며, 발열량 변화가 엔진 출력, 효율, 배기 성능에 미치는 영향을 제시하였다.

Abstract - Biogas obtained from the biodegradable organic wastes in an anaerobic digester consists of CH₄ and inert gases such as CO₂ and N₂. Since the composition of biogas varies by anaerobic digester conditions and the origin of wastes, it is necessary to respond to these variations so as to make stable combustion and accomplish high efficiency when it is used as a fuel for power generating SI engines. In this study, efforts have been made to investigate the effect of changes in the calorific values of biogas on the engine performance and exhaust characteristics. The biogas was simulated by supplying of CH₄ with N₂ dilution of various ratios, and ECM was developed to achieve accurate control of ignition and combustion. The results show that as the CH₄ concentration of the biogas decreases, the optimal spark timing is advanced due to the elevated thermal capacity and lowered O₂ concentration of the in-cylinder charge. Furthermore, since combustion temperature was reduced by increased inert gas, NO_x emissions decreased, whereas THC emissions increased.

Key words : biogas, spark ignition engine, renewable energy, power generation system

†주저자:sunylee@kimm.re.kr

I. 서론

이산화탄소는 지구 온난화의 주범으로 지목받고 있는 대표적인 온실가스로 이를 효과적으로 저감하는 것은 세계적으로 에너지 이용에 있어 가장 큰 관심사 중 하나이다. 현재 이산화탄소 저감에 가장 효과적인 방법 중 하나로 여겨지고 있는 것은 유기성 폐기물이나 Biomass 등의 혐기소화로부터 얻을 수 있는 바이오가스를 활용하는 방법이다. 바이오가스는 약 40%~70% 정도의 메탄과 그 외의 불활성 가스 성분으로 이루어진 가스연료로 일반적인 화석연료와 달리 대기 중의 이산화탄소 양을 증가시키지 않고 재순환시키는 탄소 중립형 연료이기 때문에 이산화탄소를 저감하는 동시에 미래 에너지 고갈에 대응할 수 있는 재생에너지원으로서의 가능성을 높게 평가받고 있다.

하지만 불활성 가스의 함유로 인한 낮은 발열량과 불균일한 가스 성분으로 인해 대부분의 경우 바이오가스를 활용하지 못하고 단순 방출하거나 소각 처리 하고 있는 실정이다. 특히 대기 중에 바이오가스를 방출하는 경우 이산화탄소의 약 21배의 온실효과를 유발하는 메탄이 대기 중에 그대로 노출되어 지구 온난화를 가속시킬 수 있다. 따라서 생성된 바이오 가스를 가스터빈이나 가스엔진과 같은 발전용 동력기관에 적용함으로써 단순 방출을 방지함과 동시에 전기에너지 생산에 사용하는 것은 매우 효과적인 에너지 활용의 방법이라고 할 수 있다.

바이오가스가 소량 생산되는 경우 가장 효율이 높은 발전 방법은 왕복동 내연기관 엔진을 이용하는 것이다. 하지만 이것은 산지별/원료별로 달라지는 바이오가스 성분과 낮은 발열량 때문에 엔진의 지속적이고 안정적인 가동이 어렵다는 단점이 있다. 특히 바이오가스만을 연료로 사용하는 바이오가스 전소 엔진에서는 이러한 단점들로 인한 잦은 실화와 불완전 연소 등으로 인해 엔진 파손이나 내구성 저하 등과 같은 더 큰 문제가 야기될 수 있다.

따라서 이번 연구에서는 안정적으로 고효율 발전을 도모할 수 있는 바이오가스 SI 엔진 개발에 관한 연구의 일환으로 바이오가스의 성분 변화 및 낮은 발열량이 엔진 성능과 배기에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 이를 위해 본 연구에서는 CNG (Compressed Natural Gas)에 N_2 를 희석한 모사 바이오가스를 연료로 사용하였는데 특히, 저발열량 바이오가스를 모사하기 위해 N_2 희석비는 단위 부피당 발열량을 기준으로 결정하였다.

실험결과로부터 바이오가스 내의 N_2 희석비가 증가할수록 MBT (Minimum Advance for Best Torque)

점화시기가 진각되고, 효율이 높아짐을 알 수 있었다. 또한, N_2 희석비가 늘어날수록 NO_x (Nitrogen Oxides)의 배출은 줄어들지만 THC (Total Hydrocarbon)의 배출은 증가함을 확인하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 기본 엔진

본 연구에서는 바이오가스 전소엔진을 개발하기 위한 기본 베이스 엔진으로 과급기와 인터쿨러를 장착한 8,071cc, 6기통 압축천연가스엔진을 이용하였다. 이때 발열량이 낮은 바이오가스에서 60 kW의 출력 성능을 구현하고 내구성을 확보하기 위해 엔진의 높은 배기량은 필수적이며 그 제원은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 전소 엔진 실험장치 구성

Figure 1은 본 연구에서 사용한 바이오가스 전소 엔진과 실험 장치의 대략적인 구성을 나타낸다. 먼저

Table 1. Specifications of the base gas engine

Type	Description
Number of cylinder	6
Bore (mm)	111
Stroke (mm)	139
Displacement volume (cc)	8,071
Fuel	CNG
Max. power	176.5 kW / 2300rpm

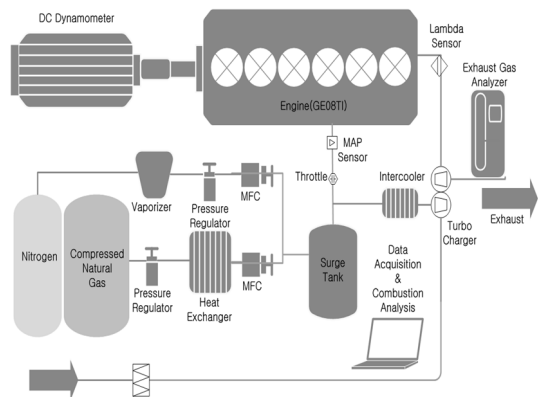


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

바이오가스 전소엔진의 성능을 향상시키고 최적화하기 위해 이번 연구에서는 점화제어장치(ICM; Ignition Control Module)와 엔진제어장치(ECU; Engine Control Unit)로 구성되는 전소용 엔진 제어시스템(ECM; Engine Control Module)을 개발하였다. 이때 ICM은 점화 시기의 정밀한 제어를 수행하고 ECU는 엔진회전속도, 공연비, 연료량 등 전반적인 엔진의 거동을 정밀하게 제어하는 역할을 하도록 설계하였다.

실제 바이오가스를 사이트에서 수송해 오거나 실험실 환경에서 생산하는 것은 큰 어려움이 따르기 때문에 여기서는 실제 바이오가스 대신 메탄에 질소를 희석하는 방식으로 모사 바이오가스를 합성하여 연료로 사용하였다. 이때 바이오가스의 엔진 적용에 있어 가장 큰 난관인 메탄 함량 변화를 모사하기 위해 메탄/질소 희석비를 단위 부피당 발열량을 기준으로 결정하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$\text{질소희석비} = \frac{\text{질소함유량}}{\text{Biogas 모사가스량}} \times 100$$

바이오가스 모사를 위한 N₂/메탄의 희석비 제어를 위해 메탄은 CNG를 정압기 및 열교환기를 통하여 압력과 온도를 8 bar, 40 °C로 일정하게 유지시킨 후 MFC (Mass Flow Controller; Brooks Instruments)를 이용하여 공급하였으며, 질소의 경우 액화질소를 강제기화기를 통해 기화시킨 후 MFC (Bronkhost High-Tech B.V.)에 공급함으로써 유량을 제어하였다. 엔진의 운전에 의한 가스의 맥동 방지를 위해 엔진 연료 입구 전단에 Surge Tank를 설치하였으며 Surge Tank 입구 상류 측에서 CNG와 N₂를 만나게 함으로써 충분한 혼합이 이루어지도록 하였다.

엔진의 모터링 및 엔진 회전수 제어를 위하여 DC (Direct current) 동력계를 사용하였다. 엔진 크랭크 축에 엔코더(Autonics, E40S8)를 장착하였으며, 연소압력을 측정하기 위하여 1번 실린더에 스파크 플러그 타입 압력센서(KISTLER, Type 6117BCD17)를 설치하고 이로부터 취득한 엔코더 신호와 압력 신호를 연소해석기(DEWETRON)를 이용하여 연소특성 분석을 수행하였다. 또한, 배기구에 광역산소센서를 장착하여 공연비를 모니터링 하였으며, 배기가스 분석기(HORIBA, MEXA-8120)를 이용하여 운전조건 변화에 따라 달라지는 배기가스 성분을 측정하였다.

2.3. 전소 엔진 실험방법

CNG 저위발열량(LHV; Lower heating value; $LHV_{CNG} = 9393 \text{ kcal/Nm}^3$)의 20~60% 정도인 바이오가스를 주 연료로 사용하는 경우 희박연소 운전은 불안전 연소나 실화의 가능성을 크게 증가시키고 엔진 출력을

저하시킬 수 있기 때문에 이번 연구에서는 연소실내 공기/연료 혼합비를 항상 이론공연비로 제어, 엔진을 운전하였다. 또한 일반적인 발전 주파수인 60 Hz와의 동기화를 위하여 엔진회전수를 1800rpm으로 고정하였으며, 목표출력 60 kW 조건 하에서 질소 희석비(발열량) 변화에 따른 최적 점화시기를 결정하였다. 동시에 바이오가스 발열량 변화에 따른 엔진 효율, 연소 특성 그리고 배기 특성 변화를 확인하였다.

한편 바이오가스는 발열량뿐만 아니라 그 발생량 또한 변화가 심한 특성도 있기 때문에 이런 상황에 용이하게 대응하기 위해 출력 변화에 따른 엔진 연소특성과 배기배출물 변화에 대한 연구 역시 CNG 100% 조건에서 진행하였다. 본 연구에서 사용한 엔진 실험 조건은 Table 2와 같다.

III. 실험장치 및 방법

3.1. 출력에 따른 엔진 실험

Figure 2는 본 실험에 사용된 엔진의 부하변동에 따른 흡기매니폴드의 압력의 변화를 과급기의 유무에 따라 나타낸 것이다. 먼저 목표 출력인 60 kW

Table 2. Biogas engine test conditions

Experimental condition	Description
Nitrogen blending ratio with respect to CNG (Vol %)	0, 20, 40, 60, 80
Engine speed (rpm)	1800
Air / Fuel ratio	1
Power (kW)	30, 45, 60

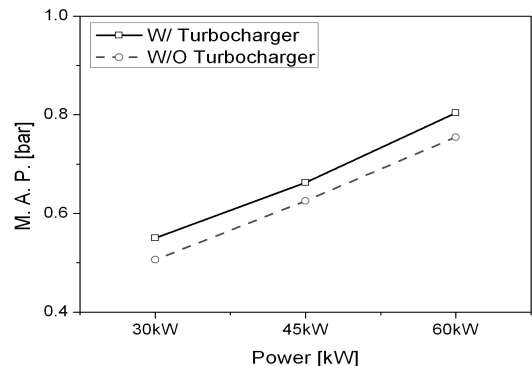


Fig. 2. Comparison of MAP with and without turbocharger (N₂ blending ratio 60%, spark timing BTDC 22 CAD, 1800rpm, λ=1).

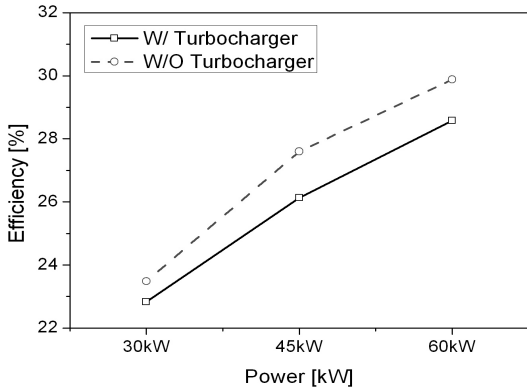


Fig. 3. Comparison of efficiency according to existence of turbocharger (Blending ratio N₂ 60%, spark timing BTDC 22 CAD, 1800rpm, λ=1).

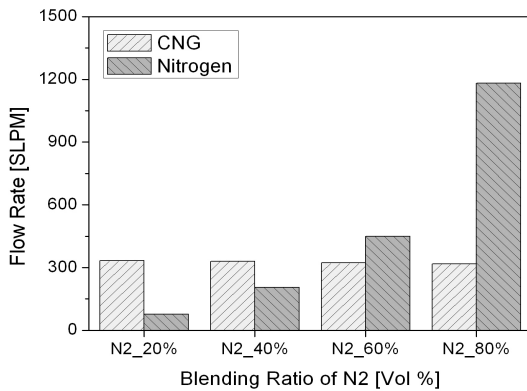


Fig. 4. Comparisons of flow rate of nitrogen according to various N₂ blending ratio (60kW, λ=1, W/O turbocharger, 1800rpm).

조건에서 질소희석비 60%의 모사 바이오가스를 연료로 공급하는 경우 과급을 하더라도 흡기매니폴드 압력은 약 0.8 bar 정도로 대기압에 미치지 못한다. 따라서 이번 연구에서는 과급방식이 아닌 자연흡기 방식으로도 충분히 목표 출력을 달성할 수 있을 것으로 판단, 과급기를 제거하였으며, 이렇게 과급이 없는 경우 흡기매니폴드 압력은 약간 낮아진 0.75 bar 정도로 측정되었다.

Figure 2에서는 또한 부하가 증가할수록 흡기매니폴드의 압력이 증가함을 볼 수 있는데 이는 부하가 높아질수록 요구되는 연료량도 많아져서 흡입공기량 역시 증가하기 때문이다.

Figure 3은 엔진의 부하변동에 따른 효율의 변화를

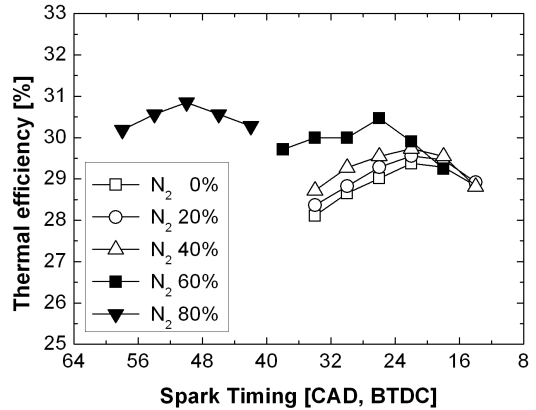


Fig. 5. Comparisons of efficiency according to various blending ratio of N₂ with various spark timing (1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

과급기의 유·무에 따라 나타낸 것이다. 과급기의 설치로 인해 효율이 감소하는 것은 과급으로 인한 이득은 미미한 반면에 과급기의 터빈 구동으로 인한 배압의 증가로 발생하는 손실은 더 커지기 때문으로 판단된다.

3.2. 발열량 변화에 따른 엔진 실험

(1) 발열량 변화에 따른 엔진 성능

바이오가스의 발열량 변화에 따른 엔진 연소특성과 배기 특성을 파악하기 위하여 Table 2의 실험 조건을 바탕으로 엔진실험을 수행하였다.

Figure 4는 N₂ 희석비 20, 40, 60, 80%에 대해 출력 60 kW를 내기 위한 MBT 점화시기에서의 바이오가스 모사가스 공급량을 메탄과 질소 유량으로 각각 나누어 나타낸 것이다. 그림을 보면 동일 출력 달성을 위해 필요한 CNG의 양은 거의 비슷한 반면에 N₂ 공급량은 크게 차이가 나는데 특히 N₂ 80% 희석조건 (CNG:N₂ = 2:8 = 4:16)에서는 N₂ 60% 조건 (CNG:N₂ = 4:6)에 비해 약 2.5 배 이상의 질소가 투입됨을 알 수 있다.

Figure 5은 질소 희석비에 따른 점화시기별 엔진 효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 질소희석비가 0%에서 80%로 증가할수록(발열량이 낮아질수록) 효율은 꾸준히 상승하는데, 이는 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 60kW 출력조건 (BMEP=6.78 bar)에서 바이오가스 내의 불활성 성분이 증가할수록 PMEP가 감소하고 연소실 내 혼합기의 열용량 증가에 의한 연소온도 감소로 냉각수로의 열손실이 줄어드는 효과가 동시에 작용하여 낮은 발

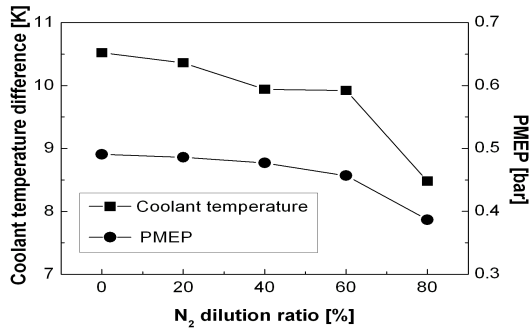


Fig. 6. PMEP and temperature difference comparisons according to various blending ratio of N₂ with various spark timing (1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

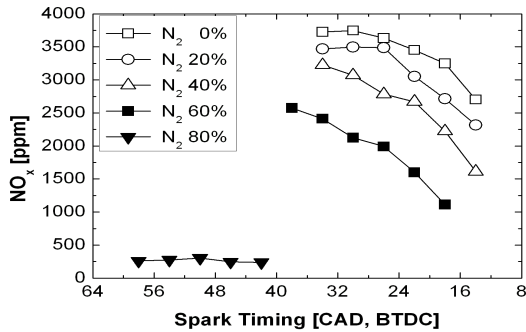


Fig. 7. Comparisons of NO_x emission according to various blending ratio of N₂ with various spark timing (1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

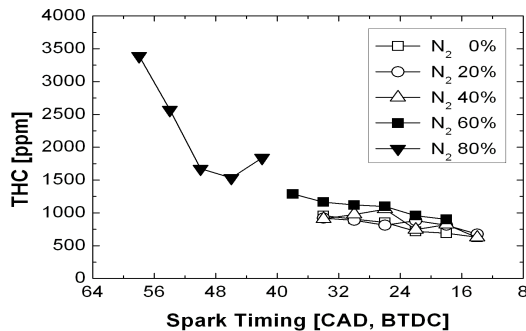


Fig. 8. Comparisons of THC emission according to various blending ratio of N₂ with various spark timing (1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

열량 연료 적용 시 발생할 수 있는 연소효율 저하를 충분히 상쇄하고 남기 때문에 판단된다.

Figure 5에서는 또 질소희석비가 증가할수록 MBT timing을 위한 점화시기가 BTDC 22 CAD에서 BTDC 52 CAD까지 진각됨을 볼 수 있다. 이는 발열량이 낮아질수록 질소에 의한 희석효과가 커지고 연소실 내 산소농도가 저하되어 더 긴 점화지연이 요구되기 때문인데, 특히 Fig. 4에서 살펴본 것처럼 질소희석비 80%의 경우는 60% 조건에 비해 N₂의 희석효과가 2.5 배 이상이기 때문에 점화지연 효과 역시 월등히 커지고 점화시기 또한 크게 진각해야함을 알 수 있다.

(2) 발열량 변화에 따른 배기특성

Figures 7과 8은 서로 다른 N₂ 희석 조건에서 점화시기 변화에 따른 NO_x와 THC의 배출량 변화를 각

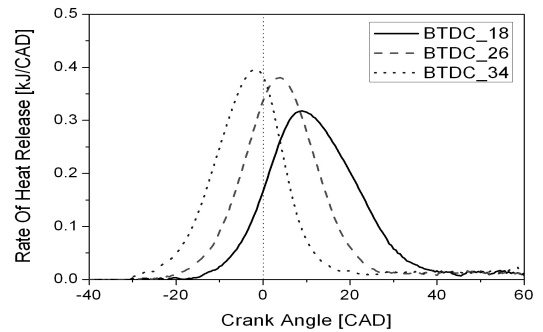


Fig. 9. Comparisons of rate of heat release according to spark timing (60% N₂ blending ratio, 1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

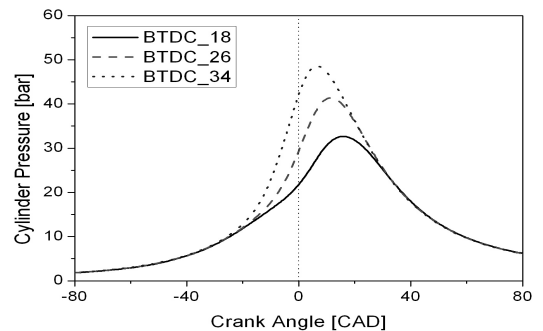


Fig. 10. Comparisons of cylinder pressure trace according to spark timing (60% N₂ blending ratio, 1800rpm, 60kW, λ=1, W/O turbocharger).

각 나타낸 것으로 질소회석비 60% 이하 조건에서는 점화시기가 지각될수록 NO_x 및 THC의 배출이 모두 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 경향이 나타나는 원인은 질소가 60% 희석된 바이오가스 모사가스 연소 시 측정된 열방출을 및 압력선도(Figs. 9과 10)로부터 유추할 수 있는데, 먼저 Fig. 9을 보면 점화시기가 지각될수록 TDC 이후 팽창과정에서 더 많은 열방출이 일어나고 그 결과 스쿠시 지역에 있는 미연 탄화수소의 산화를 촉진하기 때문에 THC emission 배출이 감소하는 것으로 판단된다. NO_x emission의 경우 점화시기가 지각함에 따라 팽창과정에서의 열방출이 증가하면 연소실 내의 연소최고압력 및 연소최고온도를 낮아지기 때문에 NO_x의 발생량 역시 감소하게 된다.

Figure 7에서 질소회석비 80% 조건의 경우 질소회석 60% 조건에 비해 약 2.5배 정도 급격히 늘어난 바이오가스 내의 질소함유량 (Fig. 4) 때문에 연소최고온도가 크게 낮아지고 그 결과 다른 조건들에 비해 매우 낮은 NO_x 배출 수준을 유지함을 보여주고 있다. Figure 8의 질소 회석비 80% 조건에서의 THC emission은 점화시기가 지각할수록 MBT 점화시기 부근을 최소값으로 감소했다 증가하는 모습을 보이는데 이는 지나치게 진각된 점화시기(42-58 CAD, BTDC)로 인해 점화시기가 지각되더라도 대부분의 열방출이 TDC 이전에 일어나기 때문에 미연 탄화수소의 후연소 효과보다는 MBT timing을 중심으로 한 연소효율변화 경향을 그대로 따르기 때문으로 판단된다.

IV. 결 론

이번 연구에서는 바이오가스를 이용한 발전용 전소엔진 개발에 관한 실험을 진행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 바이오가스 전소 운전 시 질소 회석비가 증가(즉, 발열량이 감소)함에 따라 MBT 점화시기는 BTDC 22 CAD에서 BTDC 52 CAD 까지 진각되고, 엔진 열효율은 다소 증가하는 것으로 나타났다.

(2) N₂ 60% 이하 질소회석비 조건에서는 점화시기가 지각될수록 TDC 이후 팽창과정에서의 열방출

이 증가하여 미연 탄화수소의 산화를 촉진하기 때문에 THC emission 배출은 감소한다. N₂ 80% 조건은 MBT 점화시기가 지나치게 진각되어 있기 때문에 대부분의 열방출이 TDC 이전에 발생, 미연 탄화수소의 후연소 효과는 미미하다.

(3) 점화시기 지각으로 인한 팽창과정에서의 과도한 열방출 현상은 연소최고 압력 및 연소최고 온도를 감소시키기 때문에 NO_x의 발생을 억제한다.

(4) 질소회석비의 증가는 연소실 내의 연소온도와 산소농도를 낮추기 때문에 NO_x는 감소하고 THC는 증가시킨다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 기관고유사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Manitas, K., "Progress in Biomass Gasification: An Overview", ECOTEC, 2002
- [2] Lee, S., Park, C., Kim, C., Won, S., and Lee, J., "Development of 60kW Biogas-Diesel Dual Fuel Engine", *Proceedings of KSAE*, 307-312, (2009) KSAE 09-A0054
- [3] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, (1988)
- [4] Kim, C., "Development of 60kW Class Engine Using Syngas", 3rd report, KIMM, (2010)
- [5] Porpatham, E., Ramesh, A., and Nagalingam, B., "Investigation on the Effect of Concentration of Methane in Biogas When Used As a Fuel for a Spark Ignition Engine", *Fuel*, 1651-1659, (2008)
- [6] Tewari, P. G., Subrahmanyam, J. P., and Gajendra-Babu, M. K., "Experimental Investigations on the Performance Characteristics of a Producer Gas Fuelled Spark Ignition Engine", SAE 2001-01-1189, (2001)
- [7] Neyeloff, S. and Gunkel, W., "Performance of a CFR Engine Burning Simulated Anaerobic Digester's Gas", *ASAE Publication*, 2, 324-329, (1981)