



## 바이오가스 내의 불활성 가스 성분 변화가 SI 엔진 성능에 주는 영향

†이선엽\*,\*\* · 박승현\*\* · 박철웅\* · 김창기\* · 이장희\* · 우세종\*

\*한국기계연구원 그린동력연구실, \*\*과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과  
(2012년 7월 6일 투고, 2012년 9월 24일 수정, 2012년 10월 10일 채택)

### Effects of Inert Gas Composition Variations in Biogas on the Performance of a SI Engine

†Sunyoup Lee\*,\*\* · Seunghyun Park\*\* · Cheolwoong Park\* · Changgi Kim\*  
Janghee Lee\* · Sejong Woo\*

\*Engine Research Team, Korea Inst. of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

\*\*Dept. of Environmental System Eng., Univ. of Sci. and Tech., Daejeon 305-350, Korea

(Received July 6, 2012; Revised September 24, 2012; Accepted October 10, 2012)

#### 요약

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. 본 연구에서는 바이오가스 연료 내 불활성가스의 종류 및 비율을 변화시켜 모사하고 이를 이용하여 바이오가스 내 불활성가스 종류의 변화가 엔진 성능 및 배기 특성에 주는 영향을 파악하였다. 실험 결과로 각 불활성가스 종류 및 함량에 따른 최적 점화시기를 결정하였으며, 불활성 가스 조성 변화가 엔진 출력, 효율, 배기 성능에 미치는 영향을 제시하였다.

**Abstract** - Biogas can be obtained from biogenic materials through an anaerobic digestion process. Since biogas has low calorific value and its composition significantly varies, appropriate combustion strategies need to be established to obtain stable combustion in engine applications. In this study, efforts have been made to investigate the effects of inert gas composition variations on engine performance and emissions. Results show that the MBT spark timing was advanced and NO<sub>x</sub> was reduced as the inert gas in the biogas rose. Moreover, NO<sub>x</sub> emission drop in CO<sub>2</sub> diluted biogas was more significant than that of N<sub>2</sub> due to higher heat capacity of CO<sub>2</sub>, while THC emissions showed the opposite tendency. Thermal efficiency was increased in N<sub>2</sub> case with elevation of N<sub>2</sub> due to the decreased heat loss and PMEP. However, there is no difference in CO<sub>2</sub> case because of deteriorated flame propagation speed.

**Key words** : SI engine, Inert gas, Biogas, CO<sub>2</sub> dilution, N<sub>2</sub> dilution

†주저자:sunylee@kimm.re.kr

## I. 서론

최근 급등하는 석유가격에 따른 염려와 더불어 지구온난화를 촉진시키는 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 저감하기 위한 방안의 하나로 새로운 대체에너지의 개발 및 효과적인 이용은 세계적으로 가장 뜨거운 관심사 중 하나이다. 바이오가스는 이에 부합하는 대체에너지 중 하나로, Biomass나 유기성 폐기물 등의 원료로부터 혐기소화 과정을 통해 얻을 수 있다 [1,2]. 이처럼 바이오가스는 버려지는 자원을 재활용하기 때문에 이산화탄소를 재순환시키는 탄소 중립(carbon neutral)의 특징을 갖고 있을 뿐만 아니라 화석연료의 사용 자체를 줄이는 효과를 거둘 수 있어 대기 중으로의 이산화탄소 순배출량을 감소시키는 효과를 거둘 수 있다[3,4]. 따라서 바이오가스를 내연기관에 활용하여 전기를 생산하는 것은 지구온난화 방지와 미래 에너지 고갈에 대응할 수 있는 방법으로서 그 활용 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

일반적으로 바이오가스는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 주성분으로 하는 가연성 가스 40~70%, 질소(N<sub>2</sub>)와 CO<sub>2</sub>를 주성분으로 하는 불활성가스 30 ~ 60%, 그리고 황화수소(H<sub>2</sub>S)와 같은 기타 미량의 불순물로 구성되어 있다. 하지만 바이오가스는 그 안에 존재하는 불활성가스 때문에 일반적인 가스연료인 LPG/CNG에 비해 낮은 발열량을 가질 뿐만 아니라 원료가 되는 폐기물의 종류와 혐기소화 조건의 차이에 의해 그 구성성분이 일정하지 않은 단점이 있다 [5-7].

이 중 바이오가스 조성비 변화가 불꽃점화 내연기관의 성능에 미치는 영향에 대해 살펴보면, 지금까지의 연구는 주로 바이오가스 내에 존재하는 가연성 가스 (주로 메탄)의 함유량 변화에 따른 엔진 성능의 변화에 주목해왔다. Porpatham [8] 등은 메탄 함유량이 감소할수록 열효율이 감소하고 NO<sub>x</sub>의 배출 역시 감소함을 확인하였으며 Crookes [1] 등도 유사한 결과를 보고하였다.

이와 달리 바이오가스 내 불활성가스의 조성 변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정으로 불활성가스의 주성분인 CO<sub>2</sub> 와 N<sub>2</sub>의 열역학적 성질의 차이를 고려해볼 때, CO<sub>2</sub> 분위기의 바이오가스와 N<sub>2</sub> 분위기의 바이오가스가 엔진 성능에 주는 영향은 크게 다를 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 압축천연가스에 불활성 가스 성분으로 질소를 0 ~ 60%까지 희석한 바이오가스 모사가스와 이산화탄소를 0 ~ 60%까지 희석한 바이오가스 모사가스를 연료로 사용하여 바이오가스 내의 불활성 가스 조성 변화가 불꽃점화엔진의

효율과 배기가스에 미치는 영향을 살펴보는 실험을 진행하였다.

## II. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에서는 발열량이 낮은 바이오가스로 충분한 출력 성능을 구현하기 위하여 과급기와 인터쿨러가 장착된 8,071cc, 6기통 대형 CNG엔진 (Doosan Infracore Inc., GE08TI)을 기본 엔진으로 선정하였으며 그 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 엔진과 기타 실험 장치의 구성을 나타낸 개략도이다. 낮은 발열량과 가스 조성 변화에 따른 바이오가스 엔진의 최적점화시기(MBT)를 찾고 이에 따라 달라지는 엔진의 거동을 제어하기 위하여 점화제어장치(ICM)와 엔진제어장치(ECU)를 개발하였다. 이때 ICM은 점화시기의 정밀한 제어를 수행하고 ECU는 연료량 변화, throttle 개도, 공연비 등 전반적인 엔진의 거동을 제어하는 역할을 수행하였다.

엔진의 부하와 회전수를 제어하기 위해 직류동력계(Schenk, 150 kW)를 사용하였다. 바이오가스 내 불활성가스 조성 변화에 따른 연소압력을 측정하기 위하여 1번 실린더에 스파크 플러그 타입의 압력센서(KISTLER, Type 6117BCD17)를 설치하였으며 엔진의 크랭크 축에 엔코더(Autronics, E40S8)를 설치하였다. 취득한 연소압력과 크랭크각 신호를 이용하여 연소해석기(Dewetron)에서 연소 특성 분석을 수행하였다. 또한 배기구에 광역산소센서(Etas co., LA 4)를 장착하여 공연비를 모니터링 하였고, 배기가스 분석기(Horiba, MEXA-8120)를 이용하여 운전조건에 따라 달라지는 배기가스 배출물을 측정하였다.

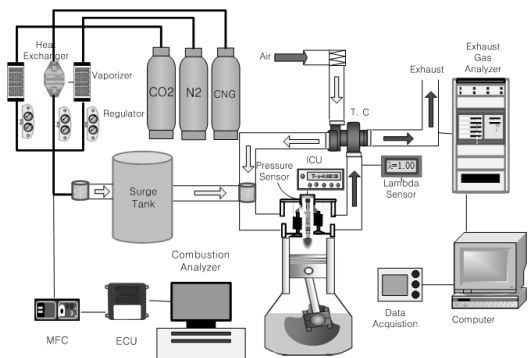


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

바이오가스 내의 불활성가스 조성 변화의 모사는 단위 부피당 발열량을 기준으로 CNG에 질소와 이산화탄소를 각각 희석비 0% ~ 60%까지 희석하여 이루어졌다. 이때 사용한 바이오가스 내 불활성가스 희석비의 정의는 다음과 같다.

$$\text{희석비 (vol. \%)} = \frac{\text{불활성가스 함유량}}{\text{Biogas 모사가스량}} \times 100$$

바이오가스의 조성비 제어를 위해서는 각 가스성분의 공급유량을 정밀하게 제어하는 것이 중요하며 이를 위해 이번 연구에서는 Fig. 1과 같은 모사 바이오가스 공급장치를 제작하여 사용하였다. 먼저 바이오가스의 가연성분인 CNG의 경우 약 150 bar의 CNG 탱크로부터 나온 CNG를 정압기 및 열교환기를 통과시켜 압력과 온도를 0.8 MPa, 40 °C로 일정하게 유지시킨 후 MFC (Brooks Instruments)를 이용하여 공급하였다. 불활성성분인 질소는 액화질소를 열교환기가 장착된 강제 기화기를 통해 기화시킨 후 기화기 하류에 장착된 정압기에서 약 0.5 MPa로 맞추었으며 MFC(Bronkhost Inco.)를 이용하여 유량을 제어하였다. 이산화탄소의 경우 고압 이산화탄소를 정압기와 열교환기를 차례로 통과시켜 압력과 온도를 맞춘 후 MFC(Bronkhost Inco.)를 거쳐 공급

하였다. 엔진의 운전에 의한 가스의 맥동 방지를 위하여 믹서 상류에는 Surge Tank를 설치하였다. 그리고 Surge Tank 입구에서 각 가스 성분 공급라인을 통합하여 각 가스 성분들이 충분히 혼합될 수 있도록 하였다. 이렇게 만들어진 모사 바이오가스는 다시 흡기 매니폴드 전단에 있는 믹서를 통해 흡입공기와 충분한 혼합이 이루어질 수 있도록 하였다.

## 2.2. 실험 방법 및 조건

이번 연구에서 적용한 엔진 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. 먼저 바이오가스 내 불활성가스의 조성비가 엔진 거동에 미치는 영향을 보기 위해 두 가지 불활성가스에 대해 희석비를 0~60%까지 20%씩 증가시키며 실험을 진행하였다. 그리고 왕복동 엔진의 발전 주파수인 60 Hz와 일치시키기 위해 엔진 회전수를 1800 rpm으로 고정하였으며 목표 출력은 60 kW에 맞추어 사용하였다. 연소실 내부의 공기/연료 혼합비는 이론공연비로 유지하며 엔진을 운전하였다. 엔진 실험은 먼저 각 불활성가스 희석비 조건별로 점화시기 변경을 통한 MBT 점화시기를 결정하는 작업을 수행한 후 MBT 점화시기 위치에서 엔진의 효율, 연소특성, 그리고 배기 특성의 변화를 확인하였다.

Table 1. Specifications of 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

Table 2. Biogas engine test conditions

Experimental condition	Description
Inert gas (N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> ) blending ratio (Vol %)	0, 20, 40, 60
Engine speed (rpm)	1800
Power (kW)	60
Excess air ratio	1

## III. 실험 결과 및 고찰

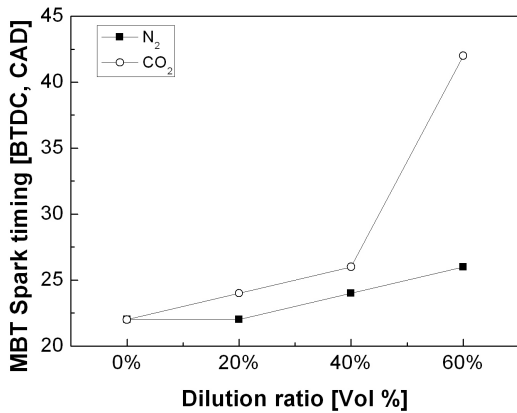
### 3.1. 희석비 변화에 따른 연소특성

Fig. 2는 모사 바이오가스 내부에 불활성 가스 성분인 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>를 희석비 0%에서 60%로 증가시켰을 때 MBT 점화시기 변화를 나타내는 것이다. 먼저 그림에서는 바이오가스 내 불활성 가스의 희석비율이 증가할수록 최대 토크를 위한 점화시기가 진각하는 것을 볼 수 있다. 이는 바이오가스에 포함된 불활성 가스가 실린더 내의 혼합기를 희석하는 역할을 함으로써 산소농도는 저하되고 혼합기 자체의 질량 증가로 인해 열용량(heat capacity)이 증가하여 보다 긴 점화지연이 발생하기 때문으로 판단된다 [9].

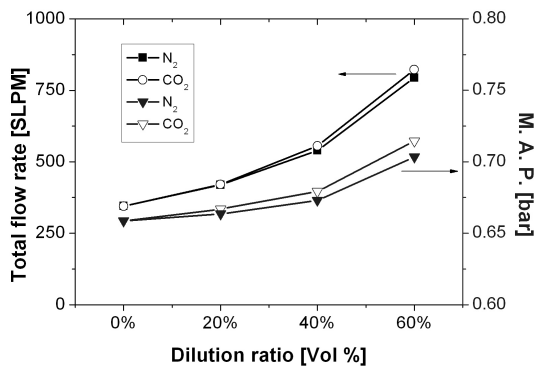
Fig. 2에서는 또한 바이오가스를 구성하는 불활성 가스가 N<sub>2</sub> 보다는 CO<sub>2</sub> 일 때 최대 효율을 얻기 위한 MBT 점화시기를 더 많이 진각해야 함을 알 수 있는데 희석비 60% 조건의 경우 N<sub>2</sub> 희석 바이오가스는 MBT 점화시기가 BTDC 22 Crank angle degree (CAD)에서 BTDC 26 CAD까지 4 CAD 진각하는 반면 CO<sub>2</sub> 희석 바이오가스는 BTDC 22 CAD에서 BTDC 42 CAD까지 16 CAD 진각하는 것을 볼 수 있다. 이는 CO<sub>2</sub>의 높은 비열로 인해(Table 3 참조) 실린더 내 혼합기의 열용량은 증가하는 반면 CO<sub>2</sub>의

**Table 3.** Properties of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>

	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Molecular weight (g/mol)	28.01	44.01
Density (g/L at 1 atm, 15°C)	1.18	1.87
Heat capacity at const. volume C <sub>v</sub> , (J/mol·K at 1 atm, 25°C)	20	28
Ratio of specific heat, $\gamma$ (C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> ) (1 atm, 25°C)	1.404	1.294



**Fig. 2.** Comparisons of MBT spark timing according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide (1800rpm, 60 kW,  $\lambda = 1$ ).



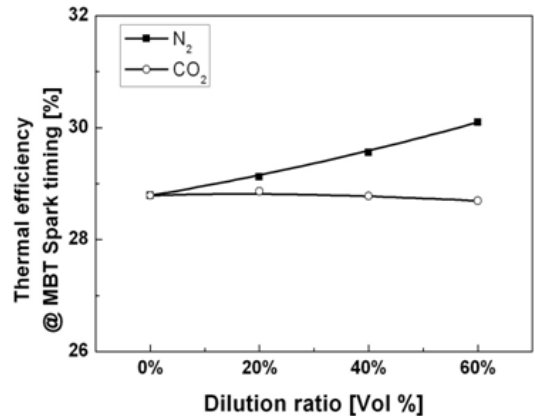
**Fig. 3.** Comparisons of total flow rate and manifold air pressure according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide (1800rpm, 60 kW,  $\lambda = 1$ ).

낮은 비열비로 인해 압축압력 상승이 상대적으로 제한되어 연소실 내 혼합기 온도가 낮아지고 화염전파 속도가 감소하여 MBT 위치가 진각하게 되는 것으로 판단된다 [10]. 이때 이론공연비 운전 하에서는 바이오가스 내 불활성 가스 종류에 관계없이 불활성 가스 비율이 동일하면 실린더 내 혼합기의 산소 농도 역시 동일하기 때문에 산소농도가 주는 MBT 점화 시기 진각에 주는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 희석비 조건에서 바이오가스에 포함되어 공급되는 불활성 가스 유량과 흡기 매니폴드 압력 (MAP)의 변화를 나타내는 것이다. 본 연구에서의 목표 출력은 60 kW로 일정하기 때문에 바이오가스의 희석비가 증가하더라도 바이오가스에 포함되어 연소실로 들어가는 가연 성분(CNG)의 양은 크게 변하지 않는 반면 불활성 가스 성분은 크게 증가하게 되고 이에 따라 MAP 역시 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 4는 두 종류의 바이오가스에 대해 바이오가스 내 불활성 가스 희석비 변화에 따른 엔진 열효율 변화를 나타낸 것이다.

먼저 N<sub>2</sub> 희석 바이오가스의 경우를 살펴보면, 희석 비율이 0%에서 60%로 늘어날수록 엔진 효율이 증가하는데, 이는 크게 두 가지 요인에 의해서 발생하는 것으로 판단된다. 첫째, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 이론공연비 운전 하에서 바이오가스 내 포함된 N<sub>2</sub>의 양이 증가할수록 실린더 내로 흡입되는 혼합기의 총질량이 늘어나면서 MAP이 올라가고 충전 효율이 증가하는 것이 엔진 효율의 증가로 이어지는



**Fig. 4.** Comparisons of thermal efficiency according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide with various spark timing (1800rpm, 60 kW,  $\lambda = 1$ ).

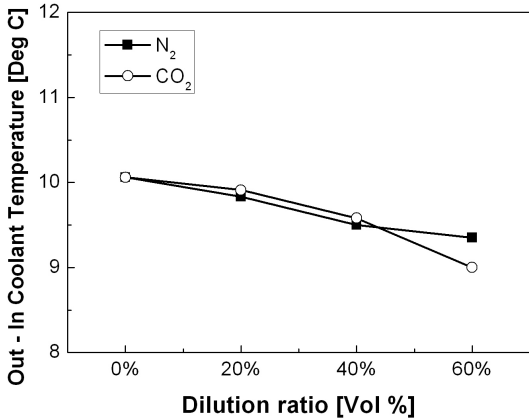


Fig. 5. Comparisons of coolant temperature difference between inlet and outlet according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide (1800 rpm, 60 kW,  $\lambda=1$ ).

것으로 보인다 [11]. 둘째, 냉각수 입구와 출구의 온도 차이를 보여주는 Fig. 5로부터 N<sub>2</sub> 희석비가 증가할수록 연소실 내 혼합기의 연소 온도가 감소하여 외부로의 열손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 효율이 완만하게 증가하는 것으로 판단된다.

다음으로 CO<sub>2</sub> 희석 바이오가스를 살펴보면, N<sub>2</sub> 희석의 경우 보다 MAP 및 냉각손실 면에서 열효율 상승에 더 유리한 결과를 보임에도 불구하고 희석비 증가에 따른 효율의 증가를 관찰할 수 없었다. 이는 Table 3에서 볼 수 있는 것처럼 1) N<sub>2</sub> 대비 CO<sub>2</sub>의 높은 비열 및 낮은 비열비로 인해 화염전파속도가 크게 감소하고 [12], 2) CO<sub>2</sub>의 고온 열해리 효과 역시 발생하여 연소효율이 악화되는 효율 감소 효과가 나타나고 이것이 충전효율 증가 및 냉각손실 감소로 인한 효율상승 효과와 서로 상쇄되기 때문으로 판단된다.

### 3.2. 희석비 변화에 따른 배기특성

Figs. 6과 7은 모사 바이오가스 내부에 불활성 가스 성분인 질소와 이산화탄소를 희석비를 0%에서 60%로 증가시켰을 때 NO<sub>x</sub>와 THC의 배출량 변화를 나타낸 것이다. 먼저 불활성가스의 조성변화에 따른 배기 배출물 변화를 살펴보면, 바이오가스 내에 불활성 가스가 서로 동일한 비율로 존재하더라도 불활성성가스의 종류에 따라 NO<sub>x</sub>와 THC의 배출 경향이 크게 달라짐을 알 수 있다. 이를 보다 자세히 살펴보면 그림으로부터 CO<sub>2</sub>를 희석한 경우 N<sub>2</sub> 희석 연료보다 NO<sub>x</sub> 배출은 더 낮아지고 THC 배출은 증가하

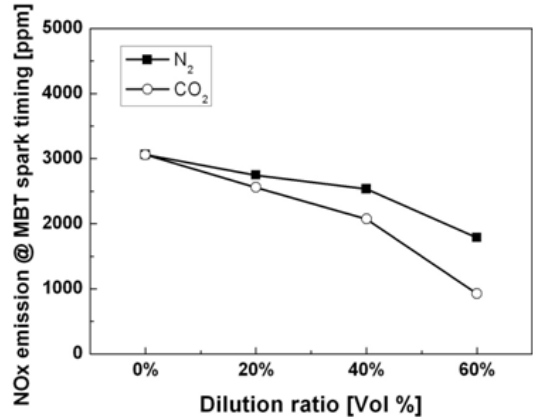


Fig. 6. Comparisons of NO<sub>x</sub> emission according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide with various spark timing (1800 rpm, 60 kW,  $\lambda=1$ ).

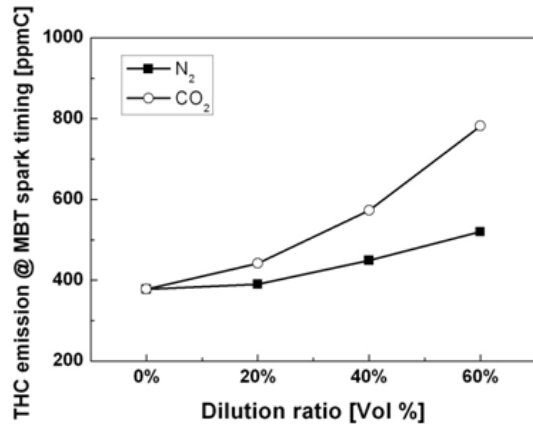


Fig. 7. Comparisons of THC emission according to various blending ratio of nitrogen and carbon dioxide with various spark timing (1800rpm, 60 kW,  $\lambda=1$ ).

며 그 차이는 희석비가 증가할수록 커짐을 볼 수 있다. 이는 NO<sub>x</sub> 생성이 온도에 크게 영향을 받음을 고려할 때 [13,14], 질소보다 이산화탄소의 비열이 더 커서 희석비 증가에 따른 열용량 증대 효과가 두드러지고 그 결과 연소 온도 및 연소 효율이 감소하기 때문으로 판단된다.

이 같은 연소 특성의 악화는 CO<sub>2</sub> 희석 바이오가스와 N<sub>2</sub> 희석 바이오가스 연소에 따른 연소압력을 비교한 Fig. 8로부터 보다 정확히 관찰할 수 있다.

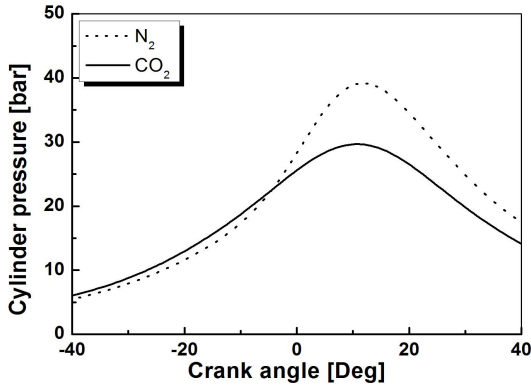


Fig. 8. Comparisons of in-cylinder combustion pressure between nitrogen and carbon dioxide diluted biogas (40% dilution rate).

그림으로부터 희석비 40% 조건의 경우 N<sub>2</sub> 희석 연료에 비해 CO<sub>2</sub> 희석 연료 연소 시 비열비 및 비열의 차이에 의해 완만한 연소압 상승과 함께 최대 압력이 낮아짐을 확인할 수 있다. 이 같은 연소 압력의 차이는 CO<sub>2</sub> 바이오가스의 연소온도가 낮아지고 연소 효율이 악화되는 원인이 되며 결국 NO<sub>x</sub>는 감소하고 THC의 배출은 증가하게 만드는 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

이번 연구에서는 바이오가스 내의 불활성 가스의 성분 변화와 바이오가스 희석비 변화가 연소특성과 배기 배출물에 미치는 영향에 대해 살펴보는 실험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 바이오가스 내 불활성 가스 성분의 증가에 따라 MBT 점화시기가 진각 되었는데, 60% 희석 시 100% CNG 대비 N<sub>2</sub>의 경우 MBT 점화시기가 4 CAD 만큼 진각되는 반면에 CO<sub>2</sub>의 경우 24 CAD 진각 되었다. 이는 CO<sub>2</sub>의 열용량이 N<sub>2</sub>보다 크기 때문에 화염전파속도가 크게 감소하는 것이 주 원인으로 판단된다.

(2) 바이오가스 내 N<sub>2</sub>의 희석비가 증가할수록 throttling loss 및 열손실이 감소하여 엔진 열효율은 100% CNG 운전 대비 1% 가량 향상된다. 하지만, CO<sub>2</sub> 희석의 경우에는 N<sub>2</sub>의 경우보다 화염전파 속도가 감소하고 CO<sub>2</sub>의 고온 열해리 현상이 발생하여 연소효율이 악화되고 효율의 상승 요인을 상쇄시킨다. 그 결과 CO<sub>2</sub> 희석가스 사용 시 열효율은 큰 변화가 없었다.

(3) 동일 희석비 조건에서는 CO<sub>2</sub>를 희석한 경우가 N<sub>2</sub>를 희석한 경우 보다 높은 CO<sub>2</sub>의 열용량으로 인해 연소온도가 더욱 낮아져서 NO<sub>x</sub>의 배출은 감소하고 THC 배출은 증가한다. 그리고 이러한 현상은 불활성 가스의 희석비가 증가할수록 두드러졌다.

(4) CO<sub>2</sub> 희석 바이오가스의 연소압력이 N<sub>2</sub> 희석 바이오가스의 연소압력보다 더 낮게 그리고 더 완만하게 상승하기 때문에 연소온도는 감소하고 연소효율은 악화되어 THC 배출은 증가하고 NO<sub>x</sub> 배출은 감소한다.

#### 감사의 글

이번 연구는 한국기계연구원 기관고유사업에 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Huang, J., and Crookes, R.J., "Assessment of Simulated Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine", *Fuel*, **77**(15), 793-1801, (1998)
- [2] Stone, C. R. and Ladommatos, N., "Design and Evaluation of a Fast-Burn Spark-Ignition Combustion System for Gaseous Fuels at High Compression Ratios", *Journal of the Institute of Energy*, **64**(461), 202-211, (1991)
- [3] Marcari, N. C. and Richardson, R. D, "Operation of a Caterpillar 3516 Spark-Ignited Engine on Low-Btu Fuel", *Trans. ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, **109**(4), 443-447, (1987)
- [4] Mueller, G. P., "Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine", *Trans. ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, **117**(4), 820-825, (1995)
- [5] Moss, A.R., *Methane*, Chalcombe Publications, Kingston, 23-47, (1993)
- [6] Porpatham, E., Ramesh, A., and Nagalingam B., "Effect of Hydrogen Addition on the Performance of a Biogas Fuelled Spark Ignition Engine", *Int'l Journal of Hydrogen Energy*, **32**(12), 2057-2065, (2007)
- [7] Muraro, W., and Shiraiwa, N. M., "Evaluation of Engine Running with Gas of Low Power Heat Rate from of Biomass (Rice Husk) Produced by Gasifier", SAE 2005-01-2185, (2005)
- [8] Porpatham, E., Ramesh, A., and Nagalingam B., "Investigation on the Effect of Concentra-

- tion of Methane in Biogas When Used as a Fuel for a Spark Ignition Engine", *Fuel*, **87**(8-9), 1651-1659, (2008)
- [9] Jang, J., and Bae, C., "Effect of Nitrogen and Carbon Dioxide on DME Homogeneous Charge Compression Ignition Engine", *KSAE*, **16**(5), 171-178, (2008)
- [10] Huang, J., and Crookes R., "Spark-Ignition Engine Performance with Simulated Biogas-a Comparison with Gasoline and Natural Gas." *J. Inst. Energy*, **71**, 197-203, (1998)
- [11] Kutlar, O. A., Arslan, H., and Calik, A. T., "Methods To Improve Efficiency of Four Stroke, Spark Ignition Engines at Part Load", *Energy Conversion and Management*, **46**(20), 3202-3220, (2005)
- [12] Burbano, H. J., Pareja, J., Andre's, and Amell, A., "Laminar Burning Velocities and Flame Stability Analysis of Mixtures with Dilution of N<sub>2</sub> and Co<sub>2</sub>", *International journal of hydrogen energy*, **36**, 3232-3242, (2011)
- [13] Lee, K., Kim, T., Cha, H., Song, S., and Chun, K.M., "Generating Efficiency and Nox Emissions of a Gas Engine Generator Fueled with a Biogas-Hydrogen Blend and Using an Exhaust Gas Recirculation System", *International journal of hydrogen energy*, **35**, 5723-5730, (2010)
- [14] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, (1988)