

바이오가스를 이용한 가스엔진 발전기의 발전효율 및 질소산화물 배출 특성

*이 경택¹⁾, 차 효석²⁾, 전 광민³⁾, **송 순호⁴⁾

Generating efficiency and NOx emissions of a gas engine generator fuelled with biogas

*Kyungtaek Lee, Hyoseok Cha, Kwangmin Chun, **Soonho Song

Abstract : Concern for new and renewable energy is growing globally. Biogas is one of the alternative fuels and consists of methane and carbon dioxide. It is difficult to achieve efficient engine operation due to a lower heating value of biogas compared to that of natural gas. In order to improve generating efficiency, finding an optimum point of ignition timing and excess air ratio is important. From this fact, generating efficiency and pollutant emissions of 2300cc gas engine generator operated by biogas as functions of ignition timings and excess air ratios were investigated in this study. As a test result, the generating efficiency of the gas engine generator using biogas was 27.34 % in the condition of the BTDC of 16° and the excess air ratio of 1.4

Key words : Biogas(바이오가스), Ignition timing(점화시기), Excess air ratio(공기과잉율), Gas engine generator(가스 엔진 발전기), NOx(질소산화물), Hydrogen(수소)

Nomenclature

NOx : nitrogen oxides
BTDC : before top dead center
QLHV : lower heating value of the fuel

1. 서론

산업발전과 인구증가에 따른 영향으로 각종 폐기물의 발생량은 해마다 증가하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 폐기물을 효율적으로 처리하는 방안에 대한 관심도 고조되고 있다. 특히 하수슬러지, 음식물 쓰레기, 가축 분뇨 등의 유기성 폐기물은 재활용되지 않을 경우 주변 수계나 토양을 오염시키는 것으로 알려져 있다.

하지만, 이러한 유기성 폐기물의 경우, 혐기성 소화조에서 바이오 가스 생산을 위한 원료로 사용할 수 있다. 이와 같이 유기성 폐기물을 효율적으로 재활용할 수 있는 방안에 대한 연구들이 진행되어 오고 있다.¹⁾

유기성 폐기물을 통해 생산된 바이오가스의 일반적인 조성은 Table 1 과 같다. 이러한 바이오 가스는 열병합 발전에 이용될 수 있으며, 이미 유럽에서는 이를 이용하여 전력을 공급하고 있

다. 또한 국내에서도 바이오 가스를 이용한 발전이 이루어지고 있다.²⁾

바이오가스는 폐기물을 친 환경적이며 효율적으로 에너지화 할 수 있는 장점이 있지만 천연가스(CH₄ 88%)에 비해 발열량이 떨어지기 때문에 발전효율도 상대적으로 낮을 것으로 보인다. 바이오가스의 효율을 향상시키기 위한 방법으로 수소 첨가 방안이 있으며, 실제로 천연가스에 수소를 첨가하여 열효율을 향상시킨 연구결과를 확인하였다.³⁾ 하지만 바이오가스에 수소를 첨가하기 위해서는 기존의 천연가스엔진을 바이오가스에 맞게 혼합기, 인터쿨러, 연료라인 등의 크기를 변경해야 한다. 또한 점화시기(ignition timing) 및 공기과잉율(excess air ratio)에 따라 엔진효율과 배출가스가 변화하기 때문에⁴⁾ 바이오가스에

- 1) 연세대학교 기계공학과 내연기관연구소
E-mail : powerboost@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2819 Fax : (02)312-9846
- 2) 연세대학교 기계공학과 내연기관연구소
E-mail : hspecial@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2819 Fax : (02)312-9846
- 3) 연세대학교 기계공학과
E-mail : kmchun@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2819 Fax : (02)312-9846
- 4) 연세대학교 기계공학과
E-mail : soonhosong@yonsei.ac.kr
Tel : (02)2123-2811 Fax : (02)312-9846

맞는 최적 점화시기 및 공기과잉율을 확인할 필요가 있다.

본 연구는 폐기물을 친환경적이며 효율적으로 재활용할 수 있는 바이오가스를 발전에 적용하기 위해 실제 바이오가스를 가스엔진 발전기에 이용하여 점화시기 및 공기과잉율 변화를 통해 NOx 규제치를 만족하면서 최대효율을 보이는 구간을 확인하는 것을 목적으로 한다.

Table 1 Composition of Biogas⁵⁾

CH ₄	55~65 %	N ₂	0~3 ppm
CO ₂	35~45 %	H ₂	0~1 ppm
H ₂ S	0~1 ppm	O ₂	0~2 ppm
NH ₃	0~1 ppm		

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치 개략도이다. 바이오가스는 전남 광양에서 하수슬러지를 통해 생산되는 가스를 이용하였다. 엔진은 2300cc 발전용 가스엔진을 사용하였으며, 엔진제원은 Table 2와 같다.



Fig. 1 Experimental setup

Table 2 General engine specifications

Engine type	Vertical water-cooled Spark-ignition engine
Number of cylinder	4 cylinder
Displacement	2286 cc
Bore x stroke	88 x 94 mm
Compression ratio	13 : 1
Engine speed	1200 rpm
Maximum power	22 kW
Intake system	Turbocharger

2.2 실험방법

가스엔진발전기의 연료는 천연가스와 바이오가스를 이용하였으며, 이때 부하(load)는 10kW로 고정하였다. 점화시기와 공기과잉율을 변화시키면서 발전효율과 NOx 발생량을 비교하였다. 발전효율은 가스유량계를 통해 소모된 연료량과 저위

발열량(Q_{LHV}), 전기적 출력을 이용하여 계산하였다.

$$\text{발전효율} = \frac{\text{전기적출력}}{m_{CH_4} Q_{LHV, CH_4}} \times 100 \quad (1)$$

공기과잉율(λ)는 대기 중의 산소농도(20.9%)와 배기가스의 산소농도를 측정하여 계산하였다.

$$\text{공기과잉율}(\lambda) = \frac{20.9}{20.9 - O_2} \quad (2)$$

각 연료별 실험 조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Test conditions

Fuel	Natural gas	Biogas
Composition of gas	CH ₄ : 88 %	CH ₄ : 60 %
	C ₃ H ₈ : 10 %	CO ₂ : 39 %
	C ₂ H ₆ : 2 %	H ₂ S, NH ₃ ..
Electric Power	10 kW	
Engine speed	1200 rpm	
Air Temperature	295~297 K	
Operation time	30 min/case	
Ignition timing	BTDC	BTDC
	14, 15, 16	14, 15, 16
Excess air ratio (λ)	1.0~1.6	1.0~1.4

3. 실험결과 및 고찰

3.1 천연가스 적용실험

Fig.2, 3은 가스엔진발전기의 천연가스 적용시 점화시기에 따른 발전효율과 NOx 배출량을 나타낸다. 공기과잉율(λ) 1.0에서부터 대기환경보전법의 NOx 규제치 50 ppm을 맞추기 위해 1.6의 희박연소 구간에서 실험을 진행하였다.

점화시기가 진각 될수록 발전효율과 NOx 배출량은 증가하였으며, 공기과잉율 1.2에서 발전효율과 NOx 발생량이 가장 높았다. 이것은 기존의 압축비가 11:1 엔진이 아닌 압축비가 13:1 엔진을 이용하였기 때문에 연소실 내의 압력과 온도가 상승하여 공기과잉율이 기존 연구결과에^{6, 7)} 비해 높은 것으로 보인다.

NOx 규제치를 만족하면서 효율이 높은 지점은 공기과잉율 1.6구간이며 이때의 점화시기는 BTDC 15도, 발전효율은 33.29% 이다.

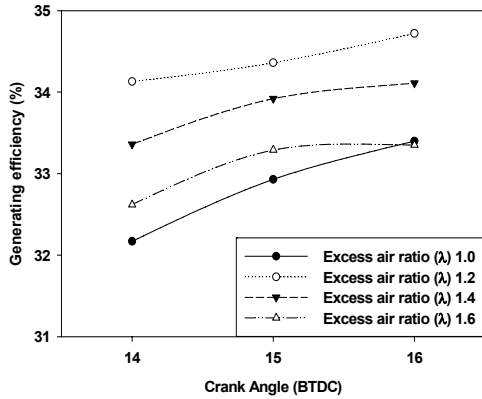


Fig. 2 Generating efficiency for natural gas as a range of crank angle

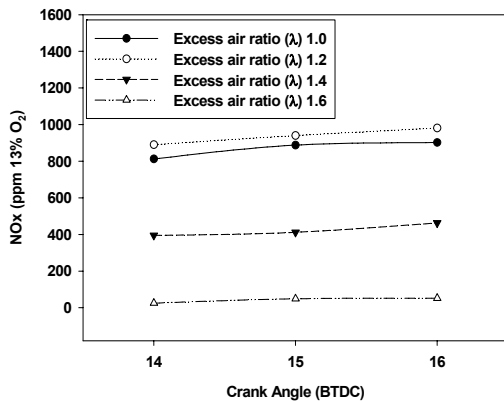


Fig. 3 NOx emissions for natural gas as a range of crank angle

3.2 바이오가스 적용실험

Fig.4, 5 은 가스엔진발전기의 바이오가스 적용 시 점화시기에 따른 발전효율과 NOx 배출량을 나타낸다. 천연가스와는 달리 바이오가스는 공기과잉율(λ) 1.6의 희박연소 구간에서 엔진이 불안정하였다. 이는 천연가스에 비해 낮은 발열량 때문으로 보인다. 안정적인 연소를 위해 바이오가스는 공기과잉율 1.0~1.4 까지 실험을 진행하였다.

천연가스와 같이 바이오가스도 점화시기가 진각 될수록 발전효율과 NOx배출량은 증가하였으며, 공기과잉율 1.2에서 가장 높게 나타났다.

NOx 규제치를 만족하면서 효율이 높은 지점은 공기과잉율 1.4구간이며 이때의 점화시기는 BTDC 16도, 발전효율은 27.34% 이다.

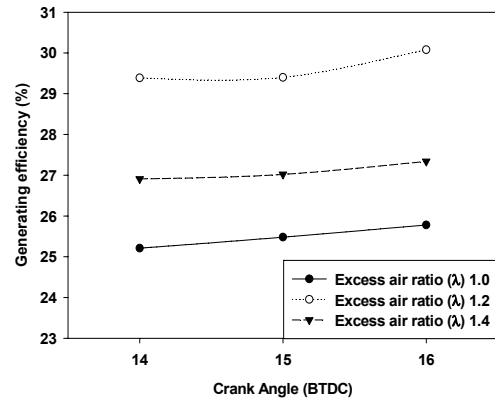


Fig. 4 Generating efficiency for biogas as a range of crank angle

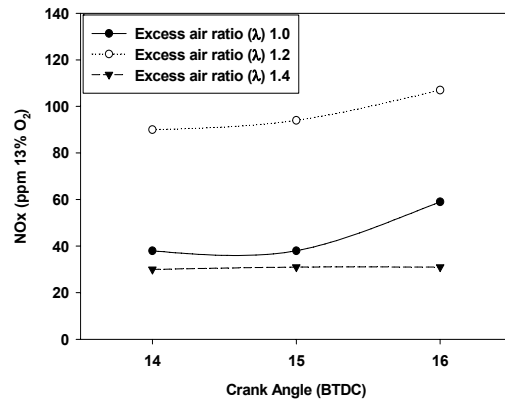


Fig. 5 NOx emissions for biogas as a range of crank angle

3.3 천연가스와 바이오가스 비교

Fig 6 은 천연가스와 바이오가스의 발전효율을 공기과잉율에 따라 비교하여 나타냈다. 천연가스와 바이오가스의 점화시기는 각각 BTDC 15, 16도이다. 바이오가스는 천연가스에 비해 약 5~7% 효율이 낮았으며, 연료 모두 공기과잉율 1.2에서 최대 효율을 보인 이후에 감소하였다.

Fig 7 은 천연가스와 바이오가스의 NOx 배출량을 공기과잉율에 따라 비교하여 나타냈다. 바이오가스는 천연가스에 비해 NOx 배출량이 현저히 낮았다. 이는 천연가스가 발열량이 높기 때문에 연소실내의 온도가 상승하여 NOx 배출량이 늘어난 것으로 보인다. 하지만 바이오가스와는 달리 천연가스는 공기과잉율 1.6의 희박연소가 가능하였고 이때 NOx 배출량이 급격히 감소하였다.

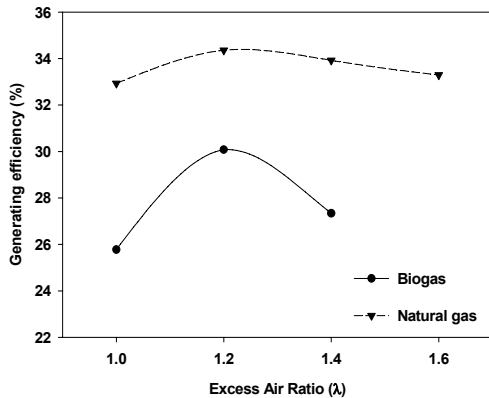


Fig. 6 Generating efficiency for biogas as a range of excess air ratio

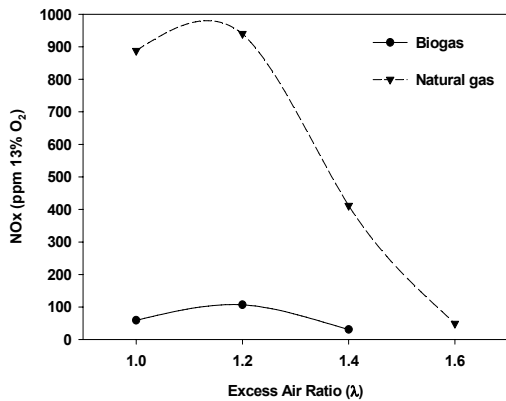


Fig. 7 NOx emissions for biogas as a range of excess air ratio

Table 4는 각 연료별로 NOx 규제치 50 ppm 을 만족하면서 최대 발전효율을 보이는 구간을 정리하였다.

Table 4 Test results for NOx restriction

Fuel	BTDC	λ	η (%)	NOx <50ppm>
Natural gas	15 °	1.6	33.29	49
Biogas	16 °	1.4	27.34	31

4. 결론

2300cc 발전용 가스엔진발전기를 이용하여 천연가스와 바이오가스 적용 시 점화시기와 공기과잉율(λ)에 따른 발전효율과 NOx 배출량을 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 바이오가스의 점화시기를 BTDC 14도에서 16도로 진각 할수록 발전효율은 약 0.6% 향상되었으며 이때 NOx 배출량도 함께 증가하였다.
- (2) 바이오가스는 천연가스에 비해 발전효율이 5~7% 낮았으며, NOx 배출량은 현저히 낮았다. 이것은 천연가스가 바이오가스에 비해 발열량이 상대적으로 높아 고온에 NOx 가 쉽게 생성되기 때문이다.
- (3) 천연가스와 바이오가스 모두 공기과잉율 1.2 구간에서 발전효율이 가장 높았으며 NOx 발생량도 가장 높았다. 이것은 기존 엔진에 비해 압축비가 높기 때문에 연소실 내의 압력과 온도가 올라갔기 때문으로 보인다.
- (4) 바이오가스 적용시 NOx 규제치를 만족하는 구간은 점화시기를 BTDC 16도, 공기과잉율 1.4이며, 이때의 발전효율은 27.34 %이다.
- (5) 바이오가스는 천연가스에 비해 효율이 낮기 때문에 향후 수소첨가를 통해 효율을 향상시키는 연구가 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지 폐기물 부문 과제(2008-N-WA02-P-01) 및 에너지자원인력양성 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 성세제. 유기성폐기물을 이용한 에너지 사업. 유기성자원학회 2008년 추계 심포지엄 2008.11, pp103~114
- [2] 폐자원에너지팀. 유기성폐자원 에너지 활용시설 현황. 환경부 2009.4
- [3] Ceper B, Akansu SO, Kahraman N. Investigation of cylinder pressure for H₂/CH₄mixtures at different loads. Int. J. Hydrogen Energy 2009;34:4855-61
- [4] Kahraman N, Ceper B, Akansu SO, AydinK. Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends. Int J Hydrogen Energy 2009;34:1026-34.
- [5] Speight JG. Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance. New York, USA: McGraw-Hill 2008.
- [6] Akansu SO, Dulger Z, Kahraman N, Veziroglu TN. Internal combustion engines fuelled by natural gas-hydrogen mixtures. Int. J. Hydrogen Energy 2004;29:1527-39.
- [7] Baurer CG, ForestTW. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: Effect on SI engine performance. Int. J. Hydrogen Energy 2001;26:55-70