

## 수소 첨가에 따른 30kW급 가스엔진 발전기의 발전효율 및 질소산화물 배출량 특성 연구

차효석\*, 김태수\*, 엄태준\*, 전광민\*\*, 송순호\*\*<sup>†</sup>

\*연세대학교 대학원 기계공학과, \*\*연세대학교 기계공학부

## A Study on the Generating Efficiency and NO<sub>x</sub> Emissions of a 30kW Gas Engine Generator with Hydrogen Addition

HYOSEOK CHA\*, TAESOO KIM\*, TAEJUN EOM\*, KWANG MIN CHUN\*\*, SOONHO SONG\*\*<sup>†</sup>

*\*Department of Mechanical Engineering, Grad. School of Yonsei Univ.,  
262, Seonsan-ro, Seodaemoon-gu, Seoul, 120-749, Korea*

*\*\*School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., 262, Seongsan-ro,  
Seodaemoon-gu, Seoul, 120-749, Korea*

### ABSTRACT

This study is about characteristics of generating efficiency and NO<sub>x</sub> emissions of a 30 kW gas engine generator in case of using model biogas with hydrogen addition. In this case, both generating efficiency and NO<sub>x</sub> emissions are lower than the case of using urban gas (LNG). However, generating efficiency and NO<sub>x</sub> emissions are higher than the case of using model biogas only. It means that adding hydrogen which has a high flame propagation velocity has the possibility to improve the generating efficiency, but simultaneously it is also able to increase the NO<sub>x</sub> emissions of a gas engine generator.

**KEY WORDS** : Generating efficiency(발전효율), NO<sub>x</sub> emissions(질소산화물 배출량), Gas engine generator(가스엔진 발전기), Biogas(바이오가스), Hydrogen addition(수소 첨가)

### Nomenclature

BTDC : before top dead center, ° (degree)

EAR : excessive air ratio,  $\lambda$  (lambda)

NO<sub>x</sub> : nitrogen oxides

TDC : top dead center

### 1. 서 론

화석연료의 고갈과 지구온난화 문제로 인해 신·재생에너지원들에 대한 관심이 최근 들어서 커지고 있다. 다양한 신·재생에너지원들 중에서 바이오가스는 음폐수, 하수슬러지, 축산분뇨 등과 같은 유기성 폐자원을 활용할 수 있다는 측면에서 친환경적이라는 장점이 있다. 바이오가스는 주로 혐기성 소화조(anaerobic digester)에서 생산되며 메탄(CH<sub>4</sub>)

<sup>†</sup>Corresponding author : soonhosong@yonsei.ac.kr

[ 접수일 : 2011.4.20 수정일 : 2011.6.20 게재확정일 : 2011.6.20 ]

Table 1 Compositions of urban gas (LNG) and model biogas

	Urban gas (LNG)	Model biogas
Methane (CH <sub>4</sub> )	88.9%	60%
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	8.9%	-
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	1.3%	-
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	-	40%
Others	0.9%	-

과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 주성분으로 한다. 원료에 따라서 차이가 있지만, 바이오가스 내 메탄의 비율은 44~67.9%정도이고 이산화탄소 비율은 24~41%정도이다<sup>1)</sup>. 그러므로 바이오가스는 메탄이 주성분인 천연가스의 대체연료로써 가능성이 있으나 적은 메탄 함량으로 인한 낮은 발열량을 가지는 단점이 있다<sup>2)</sup>.

이러한 바이오가스는 분산발전 설비 및 차량용 연료, 개질용 연료, 화학물질 합성 등에 이용할 수 있다<sup>3,4)</sup>. 이 중 가스터빈, 마이크로 가스터빈, 가스엔진 발전기 등과 같은 분산발전 설비의 연료로써 이용하고자 하는 연구들이 국내외에서 이루어지고 있다<sup>5-7)</sup>. 여러 분산발전 설비들 중에서 가스엔진 발전기는 내구성 및 설치비용의 측면에서 타 분산발전 설비들과 비교했을 때 우수한 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>.

가스엔진 발전기의 연료로 기존에는 도시가스(urban gas)를 주로 이용하였다. 액화천연가스(LNG)를 주로 공급하는 도시가스는 국내에서 88.9%의 메탄 성분을 가진다. 따라서 이보다 적은 메탄 성분으로 인해서 낮은 발열량을 갖는 바이오가스를 연료로써 보다 효율적으로 이용하기 위한 개선 방안이 필요하다. 여러 가지 개선 방안들 중 본 연구에서는 상대적으로 빠른 화염전파속도를 가진 수소<sup>9)</sup>를 발열량을 기준으로 일정한 비율만큼 바이오가스에 첨가하였다. 그리고 이 경우의 가스엔진 발전기의 발전효율과 질소산화물 배출량을 도시가스 및 바이오가스를 이용하였을 경우들과 비교 분석하였다.

실제 실험은 모델 바이오가스(model biogas)를 이용하였고, 포스코건설의 광양 바이오가스 생산시



Fig. 1 Gas engine generator

설의 조성을 기준으로 하였다. 도시가스와 모델 바이오가스의 조성 비교는 Table 1과 같다.

## 2. 실험장치 및 조건

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 30kW급 소형 가스엔진 발전기를 이용하였다. (주) HANATECH에서 제작한 것으로 실제 형상과 주요 사양은 Fig. 1 및 Table 2와 같다.

4기통의 배기량 2286cc 디젤 엔진을 기반으로 개조하였으며 압축비는 13:1이고 점화방식은 스파크(spark) 점화방식을 채택하였다. 공기와 연료의 혼합기를 압축하여 공급할 수 있는 터보차저(turbocharger)를 장착하였고, 최고 출력은 25.4kW이다. 실제로 실험을 수행할 때에는 가스엔진 발전기의 기계적 손상을 방지하고자 출력을 15kW로 유지하였다. 초기 시

Table 2 Specifications of the gas engine generator

Type	Vertical water-cooled 4-stroke diesel engine
Displacement	2286cc
Cylinder number	4
Compression ratio	13:1
Maximum speed	1800rpm
Ignition system	Spark ignition
Intake system	Turbocharger
Maximum power	25.4kW

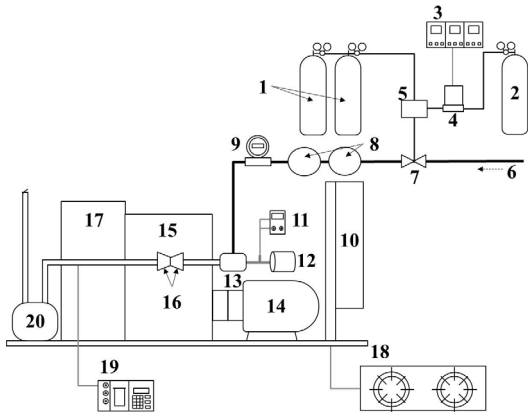


Fig. 2 Schematic diagram  
 (1. Model biogas, 2. Hydrogen, 3. MFC controller, 4. MFC, 5. Gas mixer, 6. Urban gas, 7. Valve, 8. Regulator, 9. Flow meter, 10. Engine control panel 11. Air flow meter, 12. Air filter, 13. Air-fuel mixer, 14. Generator, 15. Engine, 16. Turbocharger, 17. Radiator, 18. Load resistor, 19. Gas analyzer, 20. Muffler)

동에서 엔진 회전수는 1200rpm이며 전력을 출력할 때의 엔진 회전수는 1800rpm으로 올라간다.

가스엔진 발전기를 포함한 전체적인 실험장치 구성도는 Fig. 2와 같다. 도시가스와 모델 바이오가스는 레귤레이터(regulator)를 거쳐서 가스엔진 발전기가 요구하는 500mmH<sub>2</sub>O의 게이지압력으로 공급된다. 수소는 모델 바이오가스의 공급 열량을 기준으로 5%에 해당하는 유량을 질량유량계(MFC: mass flow controller)를 통해서 공급하였다. 가스엔진 발전기에서 발생한 전력은 부하 저항기(load resistor)에서 소모되고, 배기가스 내의 질소산화물 배출량은 휴대용 가스분석기인 Greenline MK2를 이용하여 측정하였다.

## 2.2 실험조건

전체 실험조건을 Table 3에 정리하였다. 모든 실험들은 가스엔진 발전기의 출력이 15kW일 때 상대 공연비(EAR) 1.2 조건에서 수행하였다. 처음으로 도시가스를 이용하여 점화시기를 변경하면서 가스엔진 발전기의 발전효율과 질소산화물 배출량을 조사하였다. 점화시기는 1도(°)단위로 변경을 하였다.

Table 3 Experimental conditions

Fuel type	Urban gas (LNG)	Model biogas	Model biogas + 5% H <sub>2</sub> (by heating value)
Ignition timing (BTDC, °)	13°~15°	14°~17°	12°~14°
EAR (λ)	1.2		
Electric power output	15kW		
Engine speed	1800rpm		

다음으로 모델 바이오가스를 이용해 동일한 방법으로 가스엔진 발전기의 발전효율과 질소산화물 배출량을 조사하였다. 마지막으로는 모델 바이오가스 공급 열량 5%에 해당하는 수소를 첨가하여 점화시기에 따른 가스엔진 발전기의 발전효율과 질소산화물 배출량을 조사하였는데, 여기서 모델 바이오가스의 공급 열량 값은 최대 발전효율에서의 열량 값을 기준으로 하였다. 열량기준으로 5%의 수소 농도는 부피기준으로 약 9% 정도에 해당한다.

가스엔진 발전기의 발전효율은 아래 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 가스엔진 발전기의 출력은 분자에 해당하며 본 실험에서는 15kW로 일정하다. 분모는 공급하는 전체 연료의 시간당 총 공급 열량을 의미한다. 즉, 도시가스와 모델 바이오가스 그리고 수소를 첨가한 모델 바이오가스의 시간당 열량을 뜻한다.

$$\eta_{electric} = \frac{electric\ power\ output}{\sum \dot{m}_i \cdot Q_{LHV,i}} \times 100 \quad (1)$$

분모의  $\dot{m}_i$ 는 전체 연료의 질량 유량을 의미하고,  $Q_{LHV,i}$ 는 전체 연료의 저위발열량(LHV: lower heating value)을 의미한다. 분모와 분자의 단위는 서로 같으므로 상쇄되어 무차원화 된다. 이를 통해 최종적인 퍼센트(%) 단위를 구할 수 있다.

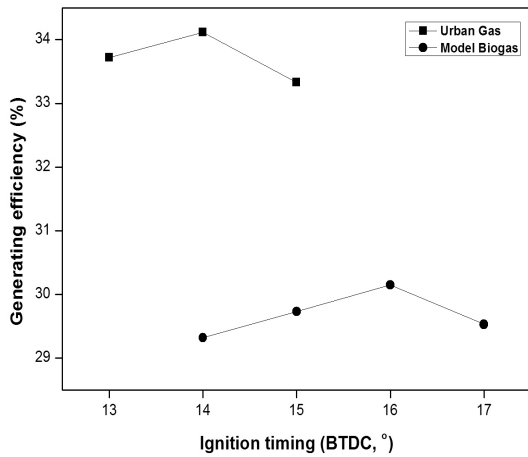


Fig. 3 Comparison of generating efficiencies for urban gas and model biogas with various spark timings

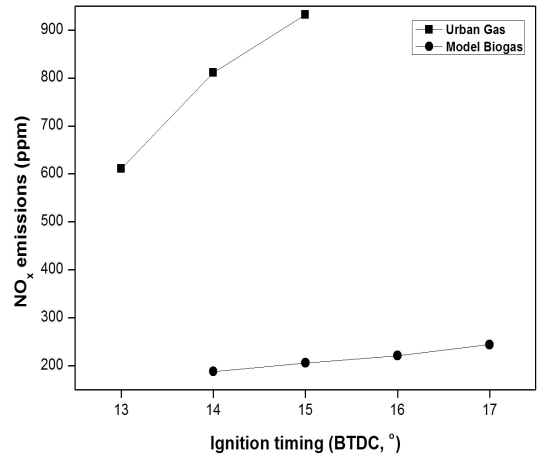


Fig. 4 Comparison of NO<sub>x</sub> emissions for urban gas and model biogas with various spark timings

### 3. 실험결과

#### 3.1 도시가스와 모델 바이오가스 비교

Fig. 3은 도시가스와 모델 바이오가스를 이용한 점화시기에 따라서 발전효율을 비교한 내용이다. 도시가스의 경우 점화시기를 BTDC 13°에서 BTDC 15°까지 변화시켰다. 이 경우 BTDC 14°에서 34.12%의 가장 높은 발전효율을 보였다. 이를 통해 도시가스를 이용할 때의 최적 점화시기는 BTDC 14°임을 알 수 있다. 모델 바이오가스를 이용할 경우 점화시기를 BTDC 14°에서 BTDC 17°까지 변화시켰다. 이 경우 BTDC 16°에서 30.15%의 가장 높은 발전효율을 보였다. 즉, 모델 바이오가스를 이용할 때의 최적 점화시기는 BTDC 16°임을 알 수 있다.

최적 점화시기에서 모델 바이오가스의 발전효율은 도시가스의 최적 점화시기에서 발전효율의 88.34% 정도인 것으로 나타났다. 또한 모델 바이오가스의 최적 점화시기가 도시가스의 최적 점화시기에 비해 2°정도 진각(spark advance)된 것을 알 수 있다. 이는 모델 바이오가스의 이산화탄소 성분으로 인하여 화염속도가 낮고 결과적으로 연소가 지연되기 때문이다<sup>7)</sup>.

Fig. 4는 도시가스와 모델 바이오가스에서의 점화시기에 따른 질소산화물 배출량을 비교한 내용이

다. 질소산화물 배출량의 경우 도시가스를 이용하였을 경우가 모델 바이오가스를 이용하였을 경우보다 더 높게 나옴을 알 수 있다. 점화시기 BTDC 14°를 기준으로 도시가스의 질소산화물 배출량은 811ppm이고 모델 바이오가스의 질소산화물 배출량은 188ppm이다. 모델 바이오가스를 이용하였을 경우 질소산화물 배출량이 상대적으로 낮은 이유는 모델 바이오가스 내 이산화탄소로 인해 연소과정에서 실린더 내부 온도가 낮아지기 때문이다<sup>10)</sup>.

#### 3.2 수소첨가에 따른 특성 비교

Fig. 5는 모델 바이오가스에 열량 기준으로 5%의 수소를 첨가한 경우의 발전효율을 도시가스와 모델 바이오가스를 이용한 경우와 비교한 것이다. 수소를 첨가한 경우 점화시기는 BTDC 12°에서 BTDC 14°까지 변화시켰다. 이중 점화시기 BTDC 13°에서 31.33%의 가장 높은 발전효율을 보였다. 이는, 모델 바이오가스의 경우와 비교해서 4%정도 향상이 된 수치이다. 각 연료의 최적 점화시기들을 기준으로 발전효율을 비교해보면, 도시가스를 이용한 경우가 34.12%로 가장 높았고 다음으로 모델 바이오가스에 수소를 첨가한 경우가 31.33%, 끝으로 모델 바이오가스를 이용한 경우가 30.15%의 순서로 나타났다.

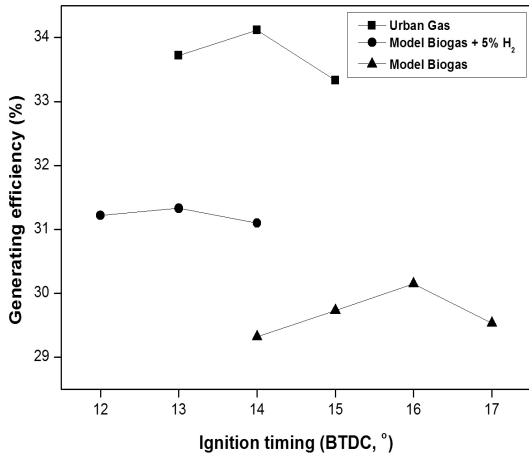


Fig. 5 Comparison of generating efficiencies for urban gas and model biogas + 5% H<sub>2</sub> and model biogas with various spark timings

수소 첨가의 경우 최적 점화시기 BTDC 13°는 도시가스의 최적 점화시기 BTDC 14°와 모델 바이오가스의 최적 점화시기 BTDC 16°보다 1~3°가량 지각(spark retard)된 것을 의미한다. 이는, 화염전파속도가 빠른 수소로 인해서 연소가 촉진되기 때문이다<sup>11)</sup>.

수소 첨가의 경우 가스엔진 발전기의 질소산화물 배출량 특성 비교는 Fig. 6에 나타나 있다. 수소를

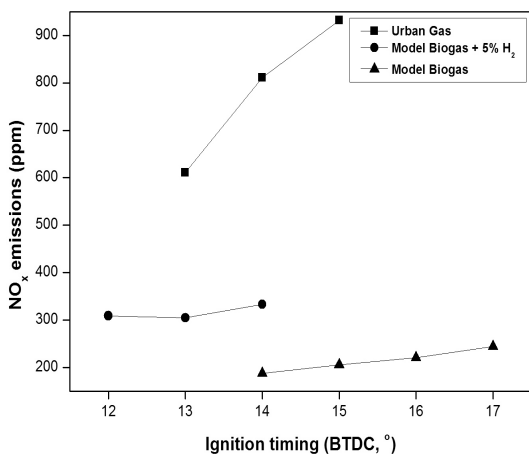


Fig. 6 Comparison of NO<sub>x</sub> emissions for urban gas and model biogas + 5% H<sub>2</sub> and model biogas with various spark timings

Table 4 Summary of the experimental results

Fuel type	Urban gas (LNG)	Model biogas	Model biogas + 5% H <sub>2</sub> (by heating value)
Optimal ignition timing (BTDC, °)	14°	16°	13°
Generating efficiency	34.12%	30.15%	31.33%
NO <sub>x</sub> emissions	811ppm	221ppm	305ppm

첨가한 경우의 질소산화물 배출량은 최적 점화시기에서 305ppm으로 811ppm인 도시가스의 경우보다는 낮고 221ppm인 모델 바이오가스의 경우보다는 높았다. 이는 도시가스의 경우보다는 62.4%정도 낮은 수치이고, 모델 바이오가스를 이용한 경우보다는 38%정도 높은 수치이다. 이러한 특징은 수소 첨가로 인하여 연소과정에서의 실린더 내부 온도가 상대적으로 높아지기 때문이다<sup>11)</sup>.

따라서 각 연료들의 최적 점화시기 및 최적 점화시기에서의 발전효율과 질소산화물 배출량을 정리하면 다음 Table 4와 같다.

#### 4. 결 론

모델 바이오가스에 수소를 열량기준 5%를 첨가할 경우 도시가스 보다는 발전효율이 낮지만 모델 바이오가스만을 이용하였을 경우보다는 발전효율이 개선되는 것으로 나타났다. 질소산화물 배출량의 경우 수소 첨가로 인하여 모델 바이오가스만을 이용하였을 경우보다는 높아졌지만 도시가스를 이용하였을 경우보다는 낮은 것으로 나타났다. 각 연료들에 대한 최적 점화시기 및 최적 점화시기에서의 발전효율과 질소산화물 배출량을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 모델 바이오가스를 이용할 경우 도시가스의 경우와 비교하여 가스엔진 발전기의 최적 점화시기는 진각되며 수소를 첨가할 경우에는 최적 점

화시기가 지각된다.

- 2) 모델 바이오가스에 수소를 첨가함으로써 발전효율의 개선이 가능하나 동시에 질소산화물의 배출량은 증가한다.

이 실험 결과를 바탕으로 향후에 수소 첨가를 통하여 가스엔진 발전기의 발전효율을 향상시키는 것과 동시에 질소산화물 배출량을 저감할 수 있는 방안에 대해서 좀 더 연구를 진행할 필요가 있어 보인다. 또한, 바이오가스의 성분 변화 및 수소 첨가 비율 변화에 따른 가스엔진 발전기의 운전특성에 대한 연구도 수행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2008NWA02P010000, No. 20104010100500)

## 참 고 문 헌

- 1) S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala, "Trace compounds of biogas from different biogas production plants", *Energy*, Vol. 32, No. 8, 2007, pp. 1375-1380.
- 2) J. K. Jensen, A. B. Jensen, "Biogas and natural gas fuel mixture for the future", 1<sup>st</sup> World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, 2000.
- 3) 김승수, "바이오가스 활용과 품질기준", *유기물 자원화*, Vol. 18, No. 3, 2010, pp. 38-49
- 4) 임문섭, 전영남, "3D-IR Matrix 버너 개질기

- 를 활용한 모사 바이오가스 수증기 개질 연구", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 22, No. 1, 2011, pp. 100-108.
- 5) 박정극, 허광범, 임상규, "30kW급 바이오가스 마이크로가스터빈 시험 운전 결과", *유체기계 연구개발 발표회 논문집*, 2008, pp. 563-564.
- 6) K. K. Gupta, A. Rehman, R. M. Sarviya, "Bio-fuels for the gas turbine: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, 2010, pp. 2946-2955.
- 7) E. Porpatham, A. Ramesh, B. Nagalingam, "Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine", *Fuel*, Vol. 87, No. 8-9, 2008, pp. 1651-1659.
- 8) EIA, "Assumptions to the annual energy outlook 2009", 2009, pp. 34.
- 9) M. Ilbas, A. P. Crayford, I. Yilmaz, P. J. Bowen, N. Syred, "Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: An experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 12, 2006, pp. 1768-1779.
- 10) J. Huang, R. J. Crookes, "Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine", *Fuel*, Vol. 77, No. 15, 1998, pp. 1793-1801.
- 11) E. Porpatham, A. Ramesh, B. Nagalingam, "Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 12, 2007, pp. 2057-2065.