



## 디젤-CNG 혼소엔진에서 CNG 발열량 변화가 연소 특성에 미치는 영향

†김용래 · 장형준\* · 이장희 · 김창기

한국기계연구원, \*가천대학교 기계공학과

(2015년 12월 4일 접수, 2015년 12월 23일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

### Effects of CNG Heating Value on Combustion Characteristics of a Diesel-CNG Dual-Fuel Engine

†Yongrae Kim · Hyeongjun Jang\* · Janghee Lee · Changgi Kim

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

\*Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Seongnam, 461-701, Korea

(Received December 4, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 24, 2015)

#### 요약

2012년 7월부터 우리나라 천연가스 열량에 대한 기준이 기존의 표준열량제에서 열량범위제로 변경되면서 가정이나 산업체로 공급되는 가스 열량 변화가 가스기기 성능에 미치는 영향을 규명하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 특히 천연가스를 주 연료로 사용하는 열병합 발전용 엔진의 경우 이러한 열량 변화에 의해 엔진 성능 전반에 걸쳐 영향이 있을 것으로 예상된다. 따라서 이번 연구에서는 열량범위제를 고려한 CNG 열량 변화가 디젤-CNG 혼소엔진의 효율 및 연소특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. CNG 모사 연료의 발열량은 10,400 kcal/Nm<sup>3</sup>에서 9,400 kcal/Nm<sup>3</sup>까지 질소 가스를 CNG에 희석하는 방식으로 변경을 하였다. 우선 디젤연료의 분사 시기와 혼소율을 80%로 고정한 조건에서 가스연료의 발열량 변화가 엔진 효율 및 출력 변화에 미치는 영향을 살펴 보았으며, 열방출율 및 연소압력 등의 변화를 측정하였다. 실험 결과로부터 가스 열량이 낮아질수록 엔진 출력과 효율이 모두 감소함을 알 수 있었으며, 점화지연시간과 연소기간은 가스 열량 감소에 관계없이 일정하게 유지되는 반면 최대연소압력은 낮아짐을 볼 수 있었다.

**Abstract** - In this study, a dual fuel engine fueled with natural gas and diesel was tested to investigate the effects of heating value variation of CNG fuel. CNG substitution rate which is defined as the ratio of CNG and diesel supplied in a heating value basis was fixed at 80%. The higher heating value was varied from 10,400 kcal/Nm<sup>3</sup> to 9,400 kcal/Nm<sup>3</sup> by mixing nitrogen gas with pure CNG and diesel fuel was injected at a fixed injection timing. The engine test results showed that thermal efficiency and power output were decreased as the heating value of mixed CNG fuel was decreased. And the peak cylinder pressure was also decreased but the ignition delay time and the combustion duration and timing were almost same.

**Key words** : dual fuel engine, heating value variation, cng substitution rate, thermal efficiency

#### 1. 서론

천연가스 수입원의 다변화와 함께 세계적인 천연가스 저열량화 추세와 맞물려 우리나라 도시가스 열량에 대한 기준은 2012년 7월부터 기존의 표준열량

제에서 보다 유연한 열량범위제로 변경되었다[1]. 열량범위제에서는 표준열량을 맞추기 위해 열량이 높은 천연가스를 선택 구입하거나 높은 열량의 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG) 혹은 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)가스를 천연가스에 섞어 발열량을 높이지 않아도 되기 때문에 원가 부담을 줄이는 긍정적 효과를 기대할 수 있다. 하지만 열량범위제의 도입으로 인해 가정이나 산업체로 공급되는 도시가스의

†Corresponding author:yrkim@kimm.re.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

열량 변화가 보다 넓은 범위에서 허용되므로 현장에서 사용되는 가스기기 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이를 규명하고자 하는 노력이 한국가스공사를 중심으로 다양한 가스기기를 대상으로 이루어지고 있다. 그중에서도 도시가스를 주 연료로 사용하여 전기에너지와 열을 동시에 생산하는 열병합 발전용 엔진의 경우 이러한 열량 변화에 의해 출력과 효율 등 엔진 성능 전반에 걸쳐 직접적인 영향을 받을 수 있을 것으로 예상되며, 이는 발전 사업자의 수익성 확보와 밀접한 연관이 있는 민감한 문제이다. 따라서 열량 범위제 내에서의 도시가스 열량 변화로 인해 열병합 발전용 엔진의 성능이 얼마나 변하는가를 명확하게 규명하는 것은 기술적은 물론 경제적, 사회적으로도 매우 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

현재 현장에서 사용되고 있는 열병합 발전용 가스엔진은 크게 전소엔진(Dedicated Engine)과 혼소엔진(Dual-Fuel Engine)으로 나눌 수 있다[2, 3]. 전소엔진은 도시가스만을 연료로 사용하는 스파크 점화 방식(Spark Ignition, SI) 엔진으로 주로 희박연소 운전을 통해 높은 효율과 내구성을 달성하고 있으며 유해 배기배출물, 그 중에서도 특히 질소산화물(Nitrogen oxides, NOx)의 저감을 위한 후처리장치를 함께 갖추고 있다. 혼소엔진은 주 연료로 사용되는 도시가스의 연소를 위해 소량의 디젤 연료를 점화원으로 이용하는 압축 착화 방식(Compression Ignition, CI) 엔진으로 유해배기배출물이 증가할 수 있다는 단점에도 불구하고 도시가스 외에도 저발열량 가스나 조성 변화가 심한 연료로도 전력을 안정적으로 생산할 수 있다는 장점이 있다[4-7].

이번 연구에서는 상기 열병합 발전용 엔진 중 디젤-CNG 혼소엔진을 대상으로 열량범위제 내에서의 가스 열량 변화에 따른 엔진 연소 특성 변화를 살펴 보았다. 가스연료의 열량 변화를 모사하기 위해 도시가스에 질소(N<sub>2</sub>)를 희석시켜 엔진에 공급하였으며 점화원으로 사용되는 디젤 연료의 분사압과 분사기간을 제어하기 위해 인젝터 드라이버 및 혼소엔진용 범용 ECU(Engine Control Unit)를 개발하였다. 특히 엔진 연소실에 연소압력 센서를 설치하고 연소압력을 측정함으로써 디젤/도시가스 혼소 특성을 조사하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에서는 사용한 기본 엔진은 5.9리터급 6기통 디젤엔진으로 그 세부 제원은 Table 1과 같다. 디젤연료를 연소실 내에 직접적으로 분사하여 연소

시키는 직접분사식 엔진으로 연료 고압분사를 위한 CRDI(Common Rail Direct Injection) 시스템을 갖추고 있기 때문에 연료 조건 변화에도 안정적인 착화가 가능한 장점이 있어 혼소엔진 개조를 위한 기본 엔진으로 선택하였다.

Fig. 1은 디젤-CNG 혼소엔진 시험 장치의 전반적인 구성도이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 흡입 공기는 터보차저의 압축기에서 가압된 후 엔진으로 공급되는 구조이며, 혼소운전 시 점화원으로 사용되는 디젤 연료는 연료유량계를 지나 고압 연료펌프에서 가압되어 커먼레일로 공급되고 인젝터를 통하여 연소실 내부로 분사된다. 주연료인 도시가스의 경우 열량 변화를 모사하기 위해 CNG에 질소를 희석시켜 공급하였으며 각각의 공급유량을 정밀하게 제어하기 위해 MFC(Mass Flow Controller)를 설치하였다. 이때 CNG 탱크의 공급압력은 100 bar 이상으로 도시가스 공급압력보다 훨씬 높기 때문에 이를 감압시키기 위해 CNG 탱크 후단에 정압기를 설치하였으며 정압기에서의 급격한 부피 팽창으로 인한 온도 강하를 보상하기 위해 정압기 후단에 열교환기를 설치하여 가스연료의 온도를 상승시켰다. 열교환기에서 가열된 CNG는 MFC를 지나 질소용 MFC에서 나온 질소와 혼합되어 원하는 열량의 도시가스가 되며 터보차저의 컴프레서 후단에서 흡입 공기와 만나 흡기매니폴드를 거쳐 엔진 연소실로 공급하였다.

혼소엔진 제어시스템 구축을 위해 혼소 엔진용 범용 ECU 장비 및 인젝터 드라이버를 설계 및 제작하였으며 이를 통해 디젤 분사압력, 분사시기와 분사기간을 제어하였다. 연소 특성을 관찰하기 위해 엔코더와 함께 1번 실린더에 압력 센서를 설치하였으며 압력센서에서 나온 실린더 압력신호는 연소해석기(Dewetron, DEWE-800)로 전달함으로써 결과를 가시적으로 확인 및 저장하였다.

Table 1. Specifications of the base engine

Number of cylinder	6
Bore (mm)	103
Stroke (mm)	118
Displacement volume (cc)	5,899
Fuel	Diesel
Compression ratio	17.0
Max. power	187.5 kW / 2,500 rpm
Max. torque	95 kgf·m / 1,400 rpm

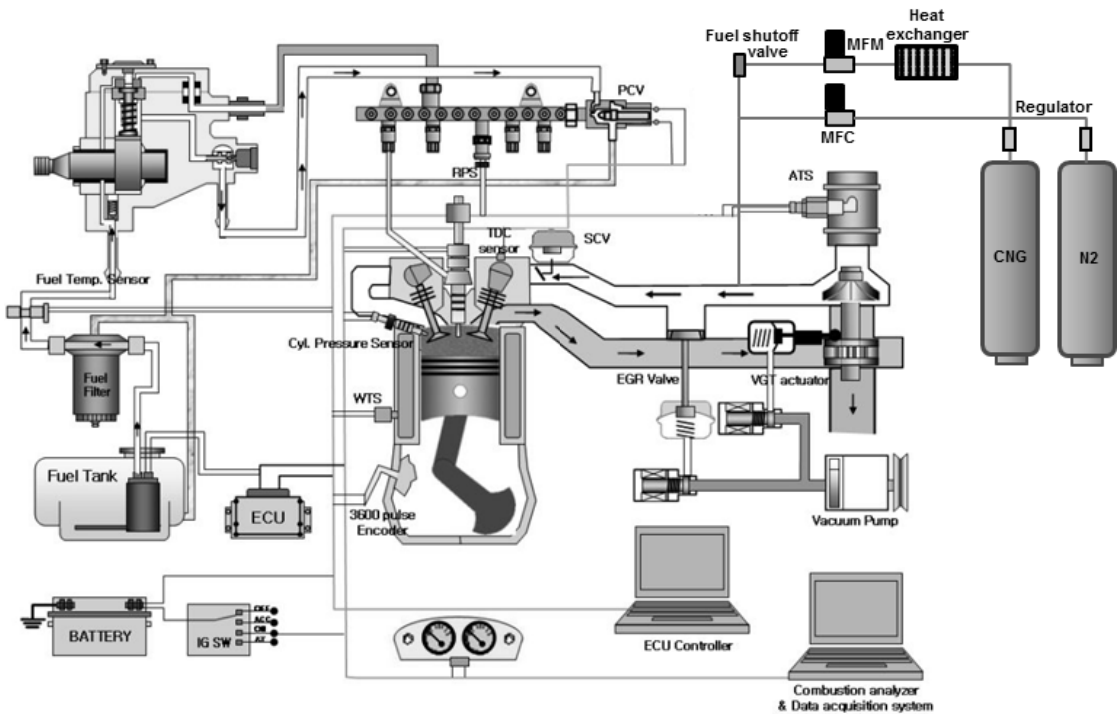


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

## 2.2. 실험 방법

엔진 실험 조건은 Table 2와 같다. 먼저 혼소율은 일정 출력 조건에서 공급에너지를 기준으로 도시가스가 디젤 연료를 대체하는 비율을 나타내는 것으로 이번 연구에서는 80% (80% CNG, 20% 디젤)를 사용하였다. 또한 대상엔진이 열병합발전용임을 고려하여 엔진회전수 1,800 rpm에서 정상상태시험을 진행하였으며 냉각수 온도는 모든 시험조건에서 70 °C를 유지하였다.

가스연료는 고위발열량 10,400 kcal/Nm<sup>3</sup>인 CNG에 질소를 섞어 열량범위제의 최저한계치(9,800 kcal/Nm<sup>3</sup>)보다 낮은 9,400 kcal/Nm<sup>3</sup>까지 200 kcal/Nm<sup>3</sup>의 간격으로 고위발열량을 감소시키면서 변경하였다. 또한 열량범위제를 적용하더라도 열병합발전용 엔진으로 공급되는 가스연료의 유량은 일정하기 때문에 이번 연구에서도 발열량 변화에 상관없이 모든 CNG/N<sub>2</sub> 혼합가스 유량은 기준이 되는 10,400 kcal/Nm<sup>3</sup> CNG 연료를 적용한 경우와 항상 동일하게 공급하였다. 기준이 되는 발열량 가스 적용 시에 500 Nm의 토크가 발생하는 조건에서 모든 엔진제어 인자들이 고정되었고, 따라서 발열량 변화가 있는 가스연료의 공급에 따른 출력변화가 있을 것으로 예상

Table 2. Dual-fuel engine test conditions

Substitution rate (%)	80
Engine speed (rpm)	1,800
Fuel injection pressure (MPa)	110
Higher Heating value (kcal/Nm <sup>3</sup> )	10,400, 10,200, 10,000, 9,800, 9,600, 9,400
Fuel injection timing (ATDC CAD)	-16

된다. 실제 엔진의 점화원으로 작용하는 디젤연료의 분사압력은 110 MPa로 고정되었으며, 분사량의 경우에는 기준 조건인 10,400 kcal/Nm<sup>3</sup>의 CNG 연료가 80%의 혼소율로 공급될 때 500Nm의 토크를 만족하는 조건으로 일정하게 분사하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

디젤-CNG의 혼소엔진에서는 CNG 연료가 주로 사용되지만 일반적인 CNG 엔진이 가솔린 엔진과 같이 점화플러그에 의하여 착화가 일어나는 것과는 달리 디젤엔진을 기반으로 디젤 연료가 자착화하는

디젤-CNG 혼소엔진에서 CNG 발열량 변화가 연소 특성에 미치는 영향

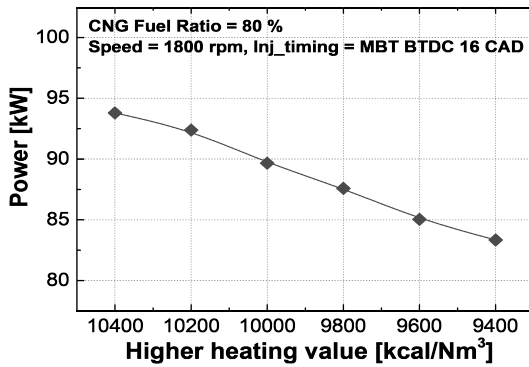


Fig. 2. Effect of CNG heating value on power in dual fuel engine.

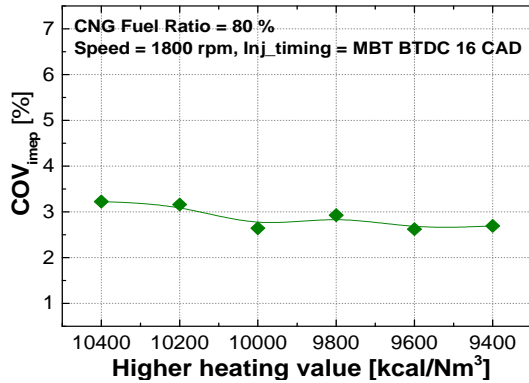


Fig. 3. Effect of CNG heating value on COV in dual fuel engine.

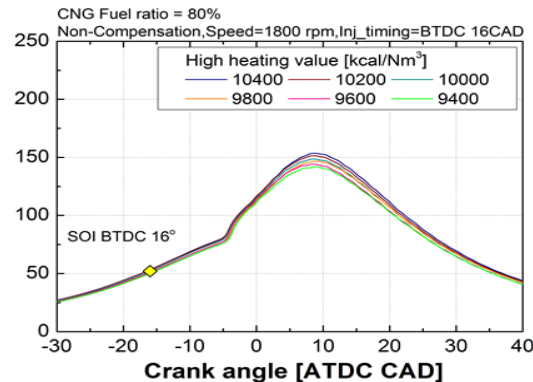


Fig. 4. Effect of CNG heating value on cylinder pressure in dual fuel engine.

것을 점화원으로 사용되므로 디젤 연료의 분사시점이 연소의 시작을 결정짓는다. 본 연구에서 사용된 혼소엔진에서는 -16 CAD ATDC 가 MBT(Maximum Brake Torque) 조건인 것으로 파악이 되었으며, 발열량이 다른 CNG 연료를 적용하는 모든 조건에서 점화시기에 의한 영향을 배제하기 위하여 위와 같은 디젤연료 분사시기를 고정하여 적용하였다.

CNG 연료의 발열량 변경을 통하여 확인해야 할 첫 번째 결과는 출력 특성이며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 예상되는 것과 같이 연료의 발열량이 감소할수록 출력 또한 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 발열량이 약 10% 안쪽으로 감소하는 것에 비하여 출력은 약 12% 정도 감소폭이 약간 더 큰 것을 확인할 수 있으며 이에 대한 원인을 좀 더 고찰할 필요가 있다.

구체적인 혼소엔진의 연소 현상을 살펴보기 위하여 Fig. 3에는 CNG 연료의 발열량 변화에 따른 엔진의 연소 안정성을 판별하기 위한 COV(Coefficient of Variation)을 나타내었고, Fig. 4에는 각각의 조건에서의 연소압력 곡선을 표기하였다. COV의 경우에는 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure)를 기준으로 계산되었으며, 모든 조건에서 3% 대의 값을 보이고 있는데 이 정도의 범위는 일반적인 엔진에서 안정적인 연소가 이루어지고 있다고 판단되는 수준에 해당되므로 본 실험에서 수행한 CNG 연료의 발열량 변경 범위 내에서는 특별히 엔진 운전의 불안정성이 발생하지 않는다는 결론을 내릴 수 있다. 연소 압력의 경우에는 동일한 디젤 연료 분사시기를 적용하였기 때문에 연소의 시작점은 거의 유사하지만 앞에서 보았던 출력 차이에서와 같은 이유로 발열량이 낮은 연료 조건일수록 최대 연소 압력은 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

연료의 연소가 시작되어 발달하는 시점인 MFB (Mass Fraction Burned) 10와 중간 단계인 MFB 50, 그리고 마무리 단계에 근접한 MFB 90에 해당하는 시점을 크랭크 각도 단위로 Fig. 5에 표기하였다. 또한, 디젤 연료의 분사 시점으로부터 실제 착화가 발생하는 시점까지의 길이를 의미하는 점화지연기간(Ignition delay)와 전체 연소 기간을 대표할 MFB 10와 90 사이의 기간을 Fig. 6에 나타내었다.

MFB10과 MFB50의 시점이 연료 발열량 변화에 무관하게 거의 비슷하게 발생하고 있고, MFB90도 특정한 경향을 보이지는 않았고 크랭크 각도 2도 내의 변동이므로 엔진의 연소 특성에 큰 영향을 미칠 만큼의 변화는 아닌 것으로 판단된다. 연소의 시작과 종료 시점에 큰 변동이 없었기 때문에 점화지연기간 및 연소 기간의 경우에도 발열량이 감소하더라도 일정한 수준을 보이고 있다.

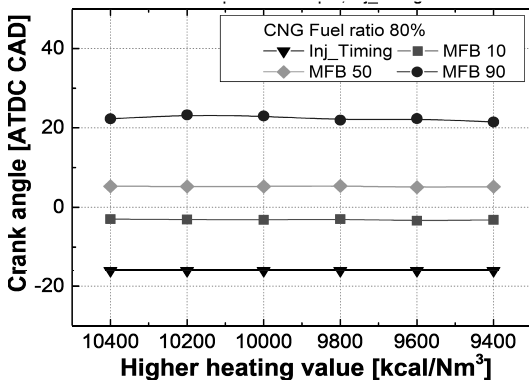


Fig. 5. Effect of CNG heating value on combustion start and end timing in dual fuel engine.

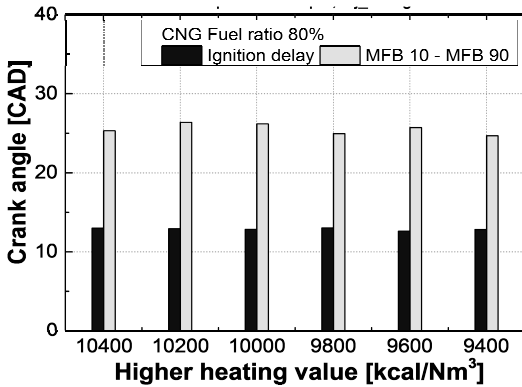


Fig. 6. Effect of CNG heating value on ignition delay time and combustion duration in dual fuel engine.

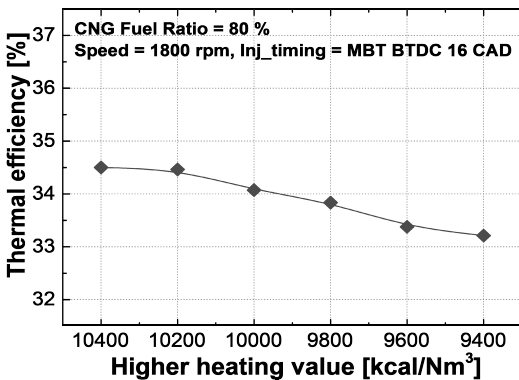


Fig. 7. Effect of CNG heating value on thermal efficiency in dual fuel engine.

마지막으로 Fig. 7은 발열량 변화에 따른 열효율을 계산하여 나타낸 것이다. CNG 연료의 발열량이 감소할수록 전체적으로 열효율이 약 1.4% 가량 감소한 것을 볼 수 있으며, 앞서 설명하였던 출력의 추가 감소는 이에 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 이에 대한 원인을 고찰해 보면, 디젤 연료의 점화시기를 모든 경우에 일정하게 고정시킨 점을 생각해 볼 수 있는데 CNG 연료의 발열량 변경 조건에 따라서 공연비 조건이 동시에 변경이 되므로 실제 MBT 조건에 해당되는 디젤 연료의 점화 시기를 탐색하여 적용하게 되면 다른 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

이에 대한 또 다른 원인을 분석해 보자면 본 실험에서 CNG 연료의 발열량을 감소시키기 위하여 인위적으로 공급한 질소 가스의 영향을 들 수 있다. 질소를 희석시킴으로서 발열량이 낮아지도록 의도하였으나 실제 저발열량 가스의 경우에는 그 성분이 다른 가스로 되어 있는 경우가 일반적이고, 특히 질소는 연소 현상에 있어서는 도움이 되지 않고 열을 흡수하는 성질이 있기 때문에 발열량이 감소할수록 더 많이 투입되는 질소로 인하여 열효율이 감소하였을 가능성이 크다. 물론 실제 저발열량 가스 연료는 너무 다양한 종류로 존재하기 때문에 질소 가스가 아닌 다른 가스로써 대표할 수 있는 실험이 어려운 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 이를 적용한 것이다.

결론적으로 이상의 결과들을 종합하면 CNG 연료의 발열량이 본 연구에서 적용한 범위 내에서 변경이 되더라도 엔진의 연소 현상에는 큰 영향이 없을 것으로 보이며 발열량 감소에 따른 일부 출력의 감소는 발생할 수 있지만, 이는 디젤 연료의 분사시기 최적화를 통한 제어를 통하여 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 디젤엔진을 기반으로 하는 혼소엔진에서 CNG 연료의 발열량 변화에 따른 영향 분석 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 질소를 사용하여 CNG 연료의 발열량을 감소시키는 조건에서는 동일한 디젤 연료 분사시기 적용시에 효율과 출력이 일부 줄어드는 경향이 있다.
- (2) 발열량이 감소할수록 실린더 압력의 최대값은 감소하였으며, 이는 출력과 같은 경향을 보이지만 디젤 연료의 분사시기를 고정한 상태에서의 결과이므로 발열량 조건에 맞는 최적화 제어가 필요하다.

(3) 연소의 안정성과 점화 지연시간 및 연소기간 등의 인자들은 발열량 변경에도 일정한 수준에서 영향을 받지 않는다.

### 후 기

본 연구는 한국가스공사와 산업자원통신부의 에너지기술평가원(과제번호 20132010102080)으로부터 연구비 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### REFERENCES

[1] <http://www.kogas.or.kr/>

[2] Park C, Park S, Lee Y, Kim C, Lee S, Moriyoshi Y, "Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen," *International Jour-*

*nal of Hydrogen Energy*, 36(16); 10080-10088, (2011)

- [3] Lee S., Kim Y., Lee, J., "60kW Biogas-Diesel Dual Fuel Engine for Power Generation", ILASS-Korea, (2010)
- [4] Park, C., Lee, S., Kim, C., Won, S., Lee, J., "A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas", KIGAS, 14(1), 15-20, (2010)
- [5] Ryu, K., Park, J., Choi, K., "Performance and Emission Characteristics of Dual-fuel(Diesel-CNG) Combustion in a Diesel Engine", KSAE, 18(4), 132-139, (2010)
- [6] Kim, C., Oh, S., "A Study on the Characteristics of Dual Fuel Engine Fueled by Natural Gas and Diesel", KIGAS, 17(6), 20-26, (2013)
- [7] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, (1988)