



CNG 발열량 변화가 Diesel-천연가스 혼소엔진 배기 특성에 미치는 영향

장형준*,** · 윤준규** · 이선엽* · †김용래* · 김정환* · 김창기*

*한국기계연구원, **가천대학교 대학원 기계공학과

(2016년 7월 4일 접수, 2016년 11월 1일 수정, 2016년 11월 25일 채택)

Effect of CNG Heating Value Variations on Emissions Characteristics in a Diesel-CNG Dual-Fuel Engine

Hyongjun Jang*,** · Junkyu Yoon** · Sunyoup Lee*

†Yongrae Kim* · Junghwan Kim* · Changgi Kim*

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

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

(Received July 4, 2016; Revised November 1, 2016; Accepted November 25, 2016)

요약

전 세계적인 천연가스 저열량화 추세에 따라 우리나라 천연가스 열량 기준이 기존의 표준 열량제에서 보다 유연한 열량범위제로 개선되었다. 이 같은 변화는 가정이나 산업체 전반에 걸쳐 가스기기 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이를 규명하고자 하는 연구가 필요하다. 특히 열병합 발전용 엔진으로 사용되는 디젤-CNG 혼소엔진의 경우 도시가스를 주 연료로 사용하기 때문에 발열량 변화는 발전 사업자의 수익성 확보와 연관되는 중요한 사안이다. 따라서 본 연구에서는 열량범위제 내에서 허용하는 CNG 발열량 변화가 디젤-CNG 혼소엔진의 배기특성에 주는 영향에 대해 조사하였다. 도시가스 발열량 변화를 모사하기 위해 열량 범위 상한선인 10,400 kcal/Nm³의 CNG 연료에 질소를 희석시켜 발열량을 10,400 kcal/Nm³에서 9,400 kcal/Nm³까지 변경하였다. 혼소율 80% 조건에서 디젤 연료 분사 시기는 16 CAD BTDC, 분사압력은 110 MPa로 고정하고 엔진회전수 및 토크는 1800 rpm/500 Nm으로 설정하여 시험을 수행하였다. 엔진시험 결과 발열량이 감소할수록 불안전연소가 증가하여 THC, CH₄ 및 CO 배출량은 증가하는 반면 NO_x 배출량은 감소함을 확인하였다. 그리고 이 같은 결과를 바탕으로 배기 특성 변화에 대해 대응할 수 있는 방안에 대해 고찰하였다.

Abstract - In this paper, purpose of study is emissions characteristics according to effects of heating value variations of CNG fuel in a dual-fuel engine fueled by diesel and natural gas. For heating value variation of CNG fuel, nitrogen gas was mixed with pure CNG fuel. So the higher heating value was changed from 10,400 kcal/Nm³ to 9,400 kcal/Nm³. Under one condition of CNG substitution rate was fixed at 80%, diesel fuel was injected at a fixed injection timing of 16 CAD BTDC and fuel pressure was also fixed at 110 MPa. The condition of tested engine was 1800 rpm and 500Nm. Emissions were sampled in exhaust pipe was located at downstream turbocharger. As a result, emissions characteristics were checked in heating value variations of CNG fuel with mixed nitrogen gas THC, CH₄ and CO emissions decreased and NO_x and CO₂ increased.

Key words : Dual Fuel Engine, Heating Value Variations, Emissions, CNG Engine, NO_x

†Corresponding author: yrkim@kimm.re.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

국제시장에서 천연가스의 저열량화 추세에 따라 국내로 도입되는 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 열량도 2001년부터 2011년까지 꾸준히 감소되는 것으로 나타났다. 이 같은 추세에 맞춰 우리나라 천연가스 열량 기준은 2012년 7월부터 기존의 표준 열량제에서 열량범위제로 개편되었다[1]. 표준 열량제에서는 높은 열량의 천연가스를 선택하여 구입하거나 낮은 발열량의 천연가스에 높은 열량의 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG)를 소량 혼합하여 열량을 유지하였지만, 열량범위제에서는 표준열량을 유지해야하는 과정을 줄여 소비자의 요금 부담 감소와 같은 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

하지만 이 같은 열량 기준 변화로 인해 가정이나 산업체에서 사용하는 가스기기의 성능이 영향을 받을 수 있는데, 그 중 도시가스를 주 연료로 사용하는 열병합 발전 시스템의 경우 도시가스의 열량 변화는 출력과 효율 및 배출가스 등 엔진 성능 전반에 걸쳐 영향을 줄 것으로 예상되며 이는 발전사업자의 수익성 확보와 직접적인 연관이 있다. 따라서 천연가스의 열량 변화에 따른 열병합 발전용 엔진 성능 변화를 규명하는 것은 기술적, 경제적으로도 매우 중요한 의미를 갖는다[2].

현재 현장에서 사용되고 있는 열병합 발전용 가스 엔진은 크게 전소엔진(Dedicated Engine)과 혼소엔진(Dual-Fuel Engine)으로 나눌 수 있다[2,3]. 전소엔진은 경우 한 가지 가스 연료만을 사용하는 엔진으로 스파크 플러그를 이용한 스파크 점화 방식(Spark Ignition, SI)을 사용하기 때문에 LPG와 CNG(Compressed Natural Gas)와 같이 옥탄가가 높은 가스연료를 이용하기에 유리하며, 희박 연소 운전을 통해 효율을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다[4]. 반면 혼소엔진은 소량의 디젤 연료를 점화원으로 하여 도시가스, LPG 등을 연소시키는 압축 착화 방식(Compression Ignition, CI)으로, 디젤 사용으로 인해 전소 엔진에 비해 배기가스 배출량이 증가할 수 있다는 단점에도 불구하고, 발열량 변화가 심하거나 낮은 발열량의 가스연료를 사용하여도 안정적으로 운전이 가능하다는 장점이 있다.[5]

일반적으로 혼소엔진의 주 연료인 천연가스는 옥탄가가 높기 때문에 공기와 함께 압축되어도 착화가 어렵다. 또한 연소방식 측면에서 볼 때 가스 연료를 예혼합한 후 연소시키는 SI 엔진의 특징과 분사된 디젤 연료의 압축을 통해 연소시키는 CI 엔진의 특징을 모두 가지고 있고, 강력한 점화원으로 인한 빠른

연소 과정으로 높은 열효율을 나타낸다고 알려져 있다[6-8]. Ha 등의 연구에 의하면 현재 상용화된 CNG 전소엔진에서는 천연가스 조성이 변하여 발열량이 감소하는 경우 출력과 열효율이 감소하고, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x)의 배출농도 역시 모두 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한 Park 등은 질소를 0~80% 까지 희석시키면서 혼소엔진의 성능 변화를 관찰한 연구를 통해 혼소엔진에서도 발열량이 감소할 경우 전소엔진과 유사한 결과를 나타냄을 보고하였다[9,10]. 하지만 열량범위제에서 허용하는 좁은 범위의 천연가스 발열량 변화가 미치는 영향 및 이에 따른 대응방안에 관한 연구는 아직 이루어진 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 열량범위제 내에서 허용하는 천연가스 열량 변화가 디젤-CNG 혼소엔진의 배기 특성에 주는 영향을 살펴보았다. 천연가스의 발열량 변화를 모사하기 위해 열량범위제 상한선인 고위발열량 10,400 kcal/Nm³의 CNG에 질소를 희석시켜 공급하였으며, 디젤 연료는 인젝터 드라이버와 혼소엔진용 범용 ECU(Electronic Control Unit)를 이용해 분사압과 분사시기, 분사량을 제어해 점화원으로 사용하였다. 엔진의 배기 특성을 분석하기 위해 터보차저 후단에서 배기가스를 샘플링하여 열량 변화에 따른 THC, CO, NO_x, CH₄ 및 CO₂ 변화를 살펴보았다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에서 사용한 엔진은 5.9리터급 직렬 6기통 디젤 엔진이며 세부 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 엔진은 Common Rail Direct Injection(CRDI) 시

Table 1. Specifications of the base engine

Item	Specification
Engine type	Diesel
Displacement volume	5,899 cm ³
Bore	103 mm
Stroke	118 mm
Number of cylinders	6
Compression ratio	17.0
Maximum power	187.5 kW / 2,500 rpm
Maximum torque	932 Nm / 1,400 rpm

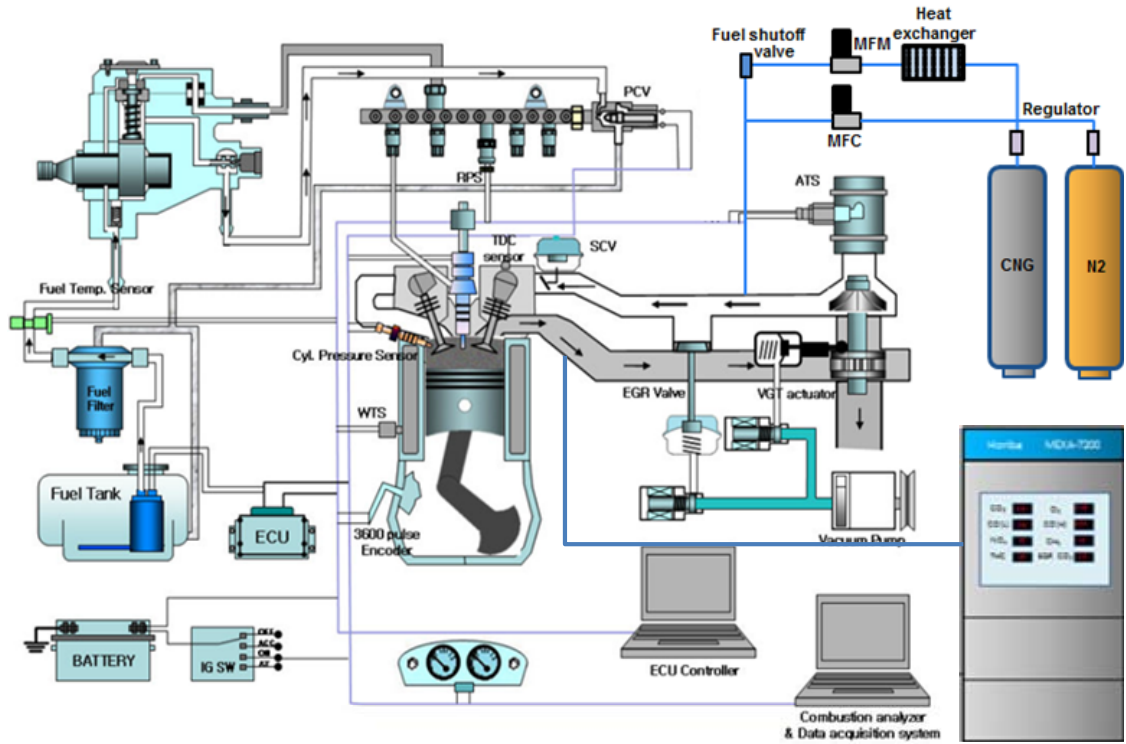


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

시스템을 갖추고 있어 디젤 연료를 연소실 내로 직접 고압 분사하므로 연료 조건이 변화하더라도 안정적으로 착화가 이루어지는 장점이 있어 혼소엔진 개조를 위한 기본 엔진으로 채택하였다.[2]

디젤-CNG 혼소엔진 실험에 필요한 전반적인 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Throttle 밸브를 지나 흡입된 공기는 터보차저의 압축기를 통해 가압된 후 인터쿨러를 지나 연소실 내부로 공급된다. 혼소 운전 시 점화원인 디젤 연료는 연료 탱크의 저압펌프를 통해 토출된 후 연료유량계(Onosoki, FM-257)를 지나 고압 펌프에서 가압되어 커먼레일로 공급되고 인젝터를 통하여 실린더 내부로 고압 분사된다. CNG 연료의 발열량을 변화시키기 위해 CNG 연료에 불활성 가스인 질소를 희석시켜 공급하였는데, 각각의 가스 공급 라인에 MFC(Mass Flow Controller)를 설치하여 정밀한 제어가 가능하도록 하였다. 이때 CNG 탱크의 공급압력은 10 MPa 이상으로 도시가스 공급압력보다 높기 때문에 이를 0.8 MPa로 감압시키기 위해 CNG 탱크 후단에 정압기를 설치하였다. 그리고 정압기에서의 급격한 부피 팽창으로 인한 온도 강하를 보상하기 위해 정압기

후단에 열교환기를 설치하여 가스 연료의 온도를 상승시켰다[2]. 이렇게 각각의 MFC를 거쳐 조성된 가스 CNG 연료는 인터쿨러 후단에서 흡입 공기와 만나고, 흡기매니폴드를 거쳐 각각의 실린더로 공급하였다.

혼소 엔진의 원활한 제어를 위해 디젤 연료 분사 압력과 분사 기간 및 시기가 제어 가능한 혼소 엔진용 범용 ECU와 인젝터 드라이버를 설계 및 제작하였다[2]. 엔진 운전 시 연소 특성과 연소 안정성을 가시적으로 확인하기 위해 엔코더(Autonics)와 함께 1번 실린더에 압력 센서(6052C31, Kistler Co.)를 설치하였으며 전달된 신호는 연소해석기(Dewetron, DEWE-800)를 이용해 모니터링 하였다. 또한 배기가스는 터보차저 후단에 샘플링 프로브를 설치해 샘플링하고 배기가스 분석장치(AMA I-60, AVL)를 통해 THC, CH₄, NO_x, CO₂ 및 CO 등을 측정하였다. 배기가스 온도는 배기매니폴드 후단에 열전대를 설치하여 측정하였다.

2.2. 실험 조건 및 방법

혼소 엔진 실험 조건을 Table 2에 정리하여 나타

내었다. 본 연구에서는 혼소율 80%(CNG 80%, 디젤 20%)를 사용하였는데, 이때 혼소율은 일정한 출력 조건을 달성하기 위해 공급한 연료의 총 에너지 대비 디젤 연료를 대체하는 CNG 연료의 에너지의 비율로 나타내었다.

CNG 공급 유량의 경우 1,800 rpm/500Nm 조건에서 질소를 희석시키지 않은 고위발열량 10,400 kcal/Nm³ 가스 공급 유량을 실험을 통해 얻은 후 모든 발열량 조건에 대해 이를 동일하게 사용하였다. 이때 질소 희석량은 원하는 발열량을 맞출 수 있도록 CNG와 질소를 부피 기준으로 계산하여 사용하였다. 그리고 발열량은 10,400 kcal/Nm³부터 9,400 kcal/Nm³까지 200 kcal/Nm³ 간격으로 감소시켜 공급하였다[2,10].

또한 점화시기 변화에 따른 영향을 최소화 할 수 있도록 모든 발열량 조건에 대해 디젤 연료 분사시기를 천연가스의 고위발열량이 10,400 kcal/Nm³ 일때의 MBT(Maximum Brake Torque)인 16CAD BTDC로 고정하였으며, 분사 압력은 110 MPa로 고정하였다. 또한 1800 rpm/500 Nm의 엔진 운전 조건에서 혼소율 80%에 만족하도록 디젤 분사량을 고정하였다.

모든 조건에서 냉각수 온도는 70℃, Throttle은 WOT(Wide Open Throttle)로 제어하였고, 인터쿨러(Intercooler) 후단 온도는 40℃를 유지할 수 있도록 설정하였다. 그리고 엔진은 충분히 Warm-up 된 상태에서 실험을 진행하였다.

Table 2. Dual-fuel engine test conditions

Experimental condition	Description
Substitution rate (%)	80
Engine speed (rpm)	1,800
Torque (Nm)	500
Diesel injection pressure (MPa)	110
Diesel injection timing (BTDC , CAD)	16
Lower heating value of Diesel (kcal/Nm ³)	10,300
Higher heating value of CNG (kcal/Nm ³)	10,400 ~ 9,400 at 200 intervals

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 발열량 변화에 따른 THC와 CH₄의 배출 특성 변화를 각각 나타낸 것이다. THC와 CH₄ 모두 발열량이 감소할수록 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이러한 원인은 가스 연료의 발열량 감소를 위하여 추가로 공급되는 질소 가스로 인하여 전체 연료가 불완전연소되어 발생하였을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 THC 배출량 중 CH₄가 차지하는 비중을 CH₄/THC로 계산하여 발열량 변화에 따라 나타낸 것이다. THC 배출량 중 CH₄의 배출량이 약 87~92%를 차지하였으며, 발열량이 감소할수록 CH₄의 비율이 높음을 볼 수 있다. 이는 발열량이 감소할수록 불완전연소가 증가하여 산화되지 않고 배출되는 CH₄의 양이 더 많아짐을 의미한다.

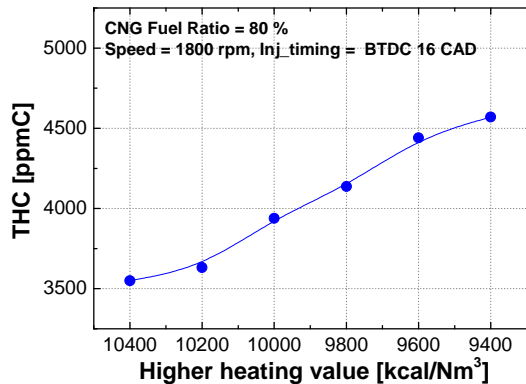


Fig. 2. Effect of CNG heating value on THC emissions in a dual fuel engine.

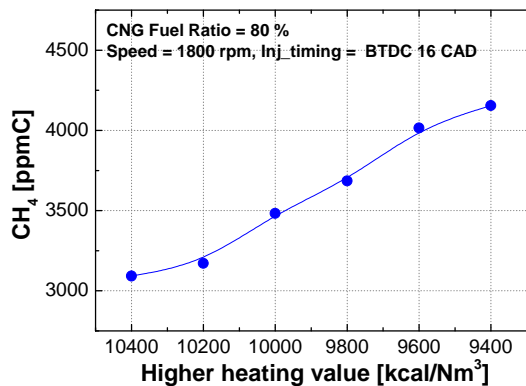


Fig. 3. Effect of CNG heating value on CH₄ emission in a dual fuel engine.

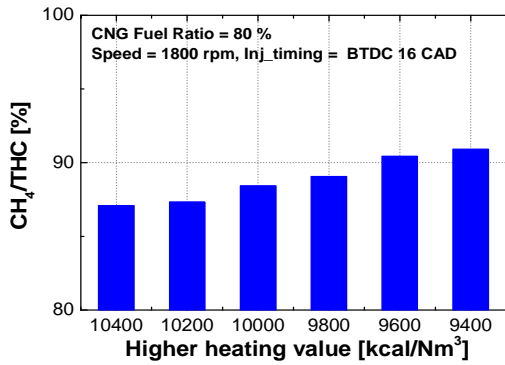


Fig. 4. Effect of CNG heating value on CH₄/THC ratio in a dual fuel engine.

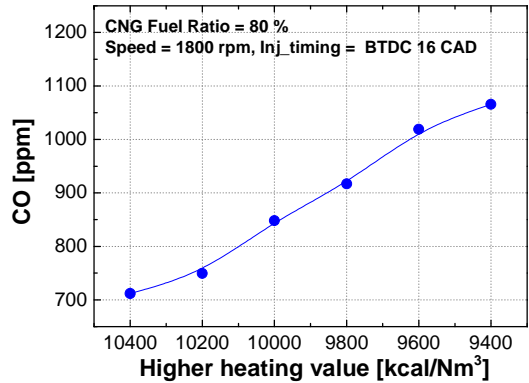


Fig. 6. Effect of CNG heating value on CO emission in a dual fuel engine.

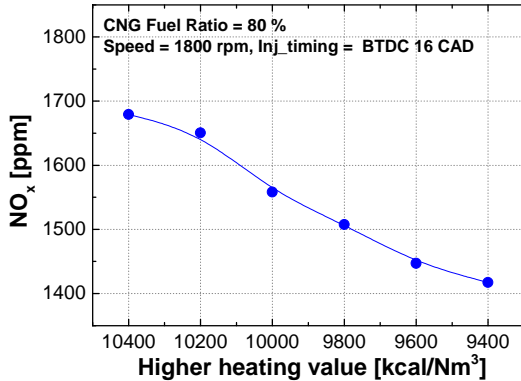


Fig. 5. Effect of CNG heating value on NO_x emissions in a dual fuel engine.

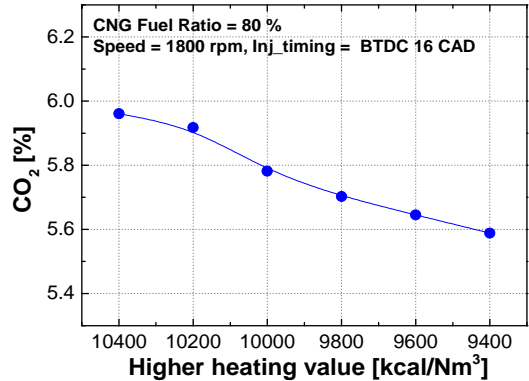


Fig. 7. Effect of CNG heating value on CO₂ emission in a dual fuel engine.

Fig. 5는 가스 연료 발열량과 질소산화물(NO_x) 배출량의 관계를 나타낸 것이다. 질소산화물의 경우 연소 최고 온도에 비례하여 기하급수적으로 증가하여 생성된다. 따라서 발열량이 증가할수록 공급되는 열량이 많아져 실린더 내의 연소온도가 증가하기 때문에 NO_x의 배출량이 증가하게 된다. 따라서 최고 발열량 조건에 비해 최저 발열량 조건의 NO_x 배출량이 약 16%정도 감소하였음을 확인할 수 있다.

Figs. 6과 7은 발열량 변화에 따른 CO와 CO₂의 관계를 나타낸 것이다. CNG 연료의 발열량이 감소할수록 CO는 증가하며, CO₂는 감소한다. 즉 발열량이 감소할수록 연소온도가 낮아 CO가 CO₂로 산화가 원활히 이루어지지 않아 CO의 배출량이 증가하고 CO₂는 감소하게 된다. 한편 CO₂의 경우 가스 연료에 포함된 탄화수소의 비율과도 관련이 있는데,

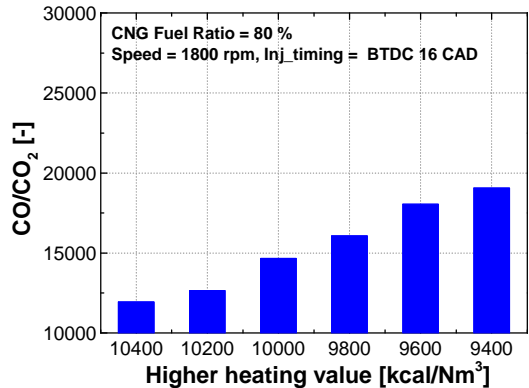


Fig. 8. Effect of CNG heating value on CO/CO₂ ratio in a dual fuel engine.

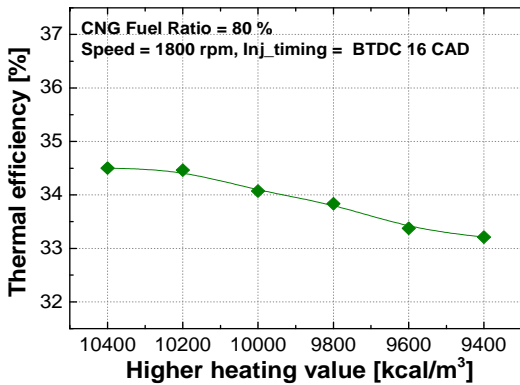


Fig. 9. Effect of CNG heating value on thermal efficiency in a dual fuel engine.

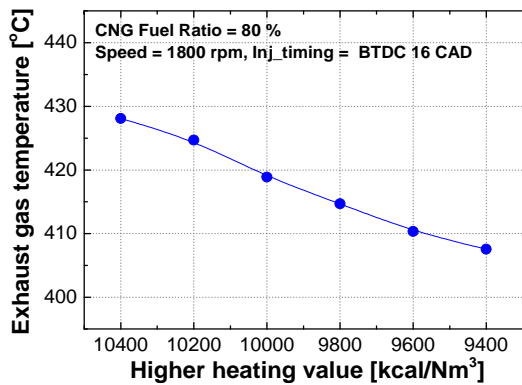


Fig. 11. Effect of CNG heating value on exhaust gas temperature in a dual fuel engine.

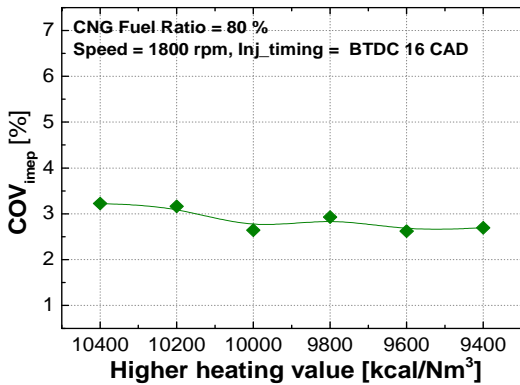


Fig. 10. Effect of CNG heating value on COV_{insep} in a dual fuel engine.

발열량이 낮아질수록 가스연료 내의 CH₄의 농도가 감소하여 공급되는 탄소(C)의 절대량이 감소하기 때문에 CO₂ 배출량이 감소하게 된다.

Fig. 8은 CO/CO₂의 비를 나타낸 것이다. CO/CO₂의 비는 불완전연소 정도를 알 수 있는 수치로, 발열량이 감소할수록 CO/CO₂의 비는 증가하며 이는 불완전연소가 증가함을 의미한다. 이 같은 결과는 Fig. 9에 나타난 열효율과도 관련이 있는데, 발열량이 감소할수록 불완전연소 정도가 증가하고 CO/CO₂ 비가 증가하여 열효율 역시 감소하게 된다[2]. 본 연구에서는 디젤 연료 분사시기를 최적화하지 않고 고정한 상태에서 실험을 수행하였으나 기존 논문[2]에 따르면 발열량 감소에 따른 열효율의 저하는 디젤 연료 분사시기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 엔진의 연소 안정성을 판별하기 위한 척

도인 COV_{imep}(Coefficient of Variation in Indicated Mean Effective Pressure)의 경우 Fig. 10에서와 같이 모든 실험조건에서 3%대의 값으로 안정적인 연소 상태를 보이는 것을 고려했을 때, 열량범위제 내의 발열량 변화범위에서 발열량이 감소함에 따라 불완전연소의 정도는 증가하지만 엔진의 연소 안정성에는 큰 영향을 끼칠 정도는 아니며 단지 CO와 THC 배출에만 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 11은 CNG 연료의 발열량 변화에 따른 배기가스 온도를 나타내었다. CNG 연료의 발열량이 감소할수록 배기가스 온도 역시 감소함을 확인할 수 있다. 발열량이 낮은 가스를 연소시키게 되면 동일한 연료량을 사용하더라도 발생하는 열량이 감소하게 되어 배기가스 온도 역시 감소하게 된다.

상기 결과로부터, 열량 범위제 내의 최대 10%의 CNG 발열량 변화에 대하여 THC와 CO의 배출량은 각각 약 30%와 50% 가량 증가하는 반면 NO_x는 약 16% 감소한다. THC와 CO의 경우 현재 상용화된 산화촉매의 정화율을 고려할 때, 필요시 산화 촉매 장착을 통한 배출량 저감이 가능할 것으로 사료된다. 또한 발전용 엔진의 경우 NO_x만을 규제함을 고려해볼 때 약 15%의 NO_x 배출량 감소는 긍정적으로 작용할 수 있다. 또한 엔진 제어 측면에서는 발열량 변화에 맞춰 throttle 개도량 변화시켜 공연비를 제어하거나 디젤 연료 분사시기를 최적화 하는 것도 배기가스 배출량을 최소화 하기 위해 적용할 수 있는 효과적인 방법이라 판단된다[3].

IV. 결론

본 연구의 목적은 디젤-CNG 혼소엔진에서 CNG

연료의 열량범위제 내에서 허용하는 발열량 변화에 대한 배기가스 특성 변화를 분석하는 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발열량이 감소할수록 불완전연소 때문에 THC와 CH₄의 배출량은 증가한다. 또한 THC의 대부분을 CH₄가 차지하며, CH₄/THC 비율은 발열량이 감소할수록 증가하였다.

(2) 발열량이 낮을수록 연소 최고 온도가 낮아져 NO_x 배출량이 감소하였다.

(3) CO의 경우 발열량이 감소할수록 연소 온도가 낮아져서 산화가 원활히 이루어지지 않아 CO 배출량이 증가하였다.

(4) CO/CO₂로부터 발열량이 감소할수록 불완전연소 정도가 증가함을 확인하였다. 하지만 불완전연소가 증가하더라도 연소안정성(COV)에는 영향을 미치지 않는 것으로 보아, 단지 열량범위제 내에서의 발열량 변화는 배출가스 특성에만 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(5) 따라서 배기가스 배출량을 감소하기 위해 산화촉매를 장착하거나 발열량 변화에 따라 디젤 연료 분사시기를 최적화하는 등의 방안을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업원천기술개발사업(10053151, 800kPa급 고압·고정밀 NGV 연료시스템 국산화 개발)과 한국기계연구원의 기관고유사업(세일가스 지상플랜트 제로에미션 모듈화 원천기술 개발)의 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] <http://www.kogas.or.kr/>
- [2] Kim, Y. R., Jang, H. J., Lee, J. H., and Kim, C. G., "Effects of CNG Heating Value on Combustion Characteristics of a Diesel-CNG Dual-Fuel Engine", *KIGAS*, 19(6), 28-33, (2015)
- [3] Park, C. W., Park, S., Lee, Y. G., Kim, C. G., Lee, S. W., and Moriyoshi, Y., "Performance and Emission Characteristics of a SI Engine Fueled by Low Calorific Biogas Blended with Hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16), 10080-10088, (2011)
- [4] Ashok, B., Denis, A., S., and Ramesh, K. C., "LPG Diesel Dual Fuel Engine - A Critical Review", *Alexandria Engineering Journal*, 54, 105-126, (2015)
- [5] Papagiannakis, R. G., Rakopoulos, C. D., Hountalas, D. T., and Rakopoulos, D. C., "Emission Characteristics of High Speed, Dual Fuel, Compression Ignition Engine Operating in a Wide Range of Natural Gas/Diesel Fuel Proportions", *Fuel*, 89, 1397-1406, (2010)
- [6] Ganesan, S., and Ramesh, A., "Investigation on the Use of Water-Diesel Emulsion in a LPG-Diesel Dual Fuel Engine", SAE 2001-28-0032, (2001)
- [7] Wagemakers, A. M., and Leermakers, C. A., "Review on the Effects of Dual-Fuel Operation Using Diesel and Gaseous Fuels on Emissions and Performance," SAE 2012-01-0869, (2012)
- [8] Wattanavichien, K., "Spray and Combustion Visualization of LPG-PME Dual Fuelling and IDI Compression Ignition Engine", *3rd Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, (2011)
- [9] Ha, T. W., Lee, S. C., Kim, B. J., and Lee, C. S., "Performance and Emission Characteristics of a CNG Engine Under Different Natural Gas Compositions", *KSME*, 35(7), 749-755, (2011)
- [10] Park, C. W., Lee, S. W., Kim, C. G., Won, S. H., and Lee, J. H., "A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas", *KIGAS*, 14(1), 15-20, (2010)
- [11] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, (1988)