

발전용 합성가스 엔진의 수소 혼합 비율에 따른 연소 특성 연구[§]

박승현* · 박철웅**† · 이선엽** · 김창기**

* 과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과, ** 한국기계연구원 그린동력연구실

A Study on the Combustion Characteristics of a Generator Engine Running on a Mixture of Syngas and Hydrogen

Seung Hyun Park*, Cheolwoong Park**†, Sunyoup Lee** and Changgi Kim**

* Dept. of Environmental System Engineering, University of Science and Technology,

** Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received December 15, 2010 ; Revised April 8, 2011 ; Accepted April 8, 2011)

Key Words: Syngas(합성가스), Hydrogen(수소), LHV(저위발열량), Generator(발전기), Combustion stability(연소안정성)

초록: 바이오매스나 기타 유기성 폐기물로부터 가스화공정을 거쳐 얻을 수 있는 합성가스는 환경보호와 화석연료고갈 방지 측면에서 유망한 대체연료 중 하나로 여겨지고 있다. 그러나 가스화로부터 얻어지는 합성가스는 일반적인 천연가스와 같은 가스연료에 비해 발열량이 낮고 연료조성이 불균일하여 내연기관에 적용시 안정적이고 지속적인 운전이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 저발열량과 불균일한 가스 조성의 특징을 가진 합성가스가 연소에 미치는 영향을 파악하여 고효율의 엔진을 개발하고자 연구를 수행하였다. 저발열량의 합성가스를 모사하기 위하여 천연가스에 질소를 희석한 연료를 사용하였다. 또한 체적당 발열량을 유지하면서 동일유량조건으로 합성가스에 수소 혼합비율을 10 ~ 30%로 변화시키면서 연소 특성 변화를 살펴보았다.

Abstract: Internal combustion engines running on syngas, which can be obtained from biomass or organic wastes, are expected to be one of the suitable alternatives for power generation, because they are environment-friendly and do not contribute to the depletion of fossil fuels. However, syngas has variable compositions and a lower heating value than pure natural gas, owing to which the combustion conditions need to be adjusted in order to achieve stable combustion. In this study, a gas that has the same characteristics as syngas, such as low heating value (LHV), was produced by mixing N₂ with compressed natural gas (CNG). In addition, this study investigates the combustion characteristics of syngas when it is mixed with hydrogen in a ratio ranging from 10% to 30% with a constant LHV of total gas.

1. 서론

전 세계적으로 대기오염에 대한 염려가 심각해지고 있으며 또한 급격하게 고갈되어 가고 있는 화석연료 매장량은 공해와 자원에 대한 사람들의 인식의 변화를 가져오게 되었다. 이러한 인식의 변화는 에너지의 효과적인 활용 및 환경 보전이 가능한 친 환경적인 기술개발의 발전을 촉진하였으며 이러한 추세에 발맞추어 현재 세계적으로

에너지 이용에 대한 화두는 지속가능한 발전으로 요약될 수 있다. 특히, 자동차 배기가스 규제와 교토 의정서 발효에 따른 CO₂ 배출 규제 강화에 대한 효과적인 대응방안으로서 폐기물과 바이오매스와 같은 버려지고 있는 고형 연료의 열분해 과정에서 발생하는 합성가스를 전처리 과정을 거쳐 내연기관의 에너지원으로 이용하여 동력 및 전기 에너지를 생산하는 방법이 각광받고 있다.⁽¹⁾ 특히 연료의 가스화를 통한 에너지 생산은 출력 효율 측면에서 재래식 연소 보일러에 비해 우수할 뿐만 아니라, Sulfur oxides (SO_x;황산화물) 또는 Nitrogen oxides (NO_x;질소산화물) 배출량도 상대적으로 작기 때문에 환경오염문제 해결과 자원

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, cwpark@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 재활용 측면에서 지속가능한 발전의 적극적인 대응기술 이라고 할 수 있다. 가스연료를 연료로 사용하는 엔진의 형태는 크게 전소형 엔진과 혼소형 엔진으로 구분할 수 있다. 혼소형 가스엔진은 점화원으로 소량의 경유를 사용하기 때문에 연료성분의 변화와 저에너지밀도를 가진 영역에서도 안정적인 운행이 가능하다는 장점이 있지만, 경유 사용에 따른 배기 오염성분의 증가와 여전히 화석연료를 사용한다는 단점이 있다.⁽²⁻⁴⁾ 반면에 전소형 엔진은 합성가스만을 연료로 사용한다는 장점이 있으나 안정적인 연소를 위해서는 발열량이 어느정도 높고 가스성분이 균일해야 한다는 점에서 가스 성분의 변동이 심한 곳에서는 가동이 어려운 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 저발열량 합성가스를 연료로 사용하는 전소형 엔진 개발의 일환으로 연료 조성이 연소에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 본 연구에서 목표로 하고 있는 합성가스를 이용한 발전용 엔진의 목표출력인 60 kW 부하조건에서 연료의 발열량에 따른 연소특성과 배기배출의 변화를 살펴보았다. 합성가스의 총 공급유량과 모사가스연료의 체적당 발열량이 일정할 때 수소의 혼합 비율에 따른 특성을 파악하고 전소형 발전용 엔진의 운전성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 저발열량 합성가스를 연료로 사용하여 60 kW의 목표출력성능을 확보하기 위하여, 과급기와 인터쿨러를 장착한 8,071cc의 충분한 배기량을 가진 6기통 압축천연가스 엔진을 설치하여 기본적인 성능 실험을 수행하였으며 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타낸다. 실제 합성가스를 가스화 장소에서 수송해 오거나 실험실 환경에서 합성하는 작업은 큰 어려움이 따르기 때문에 본 연구에서는 실제 합성가스 대신 수소와 Compressed Natural Gas (CNG; 압축천연가스) 그리고 질소를 혼합하는 방식으로 합성가스 모사가스를 제작하여 연료로 공급하였다.

합성가스 모사를 위한 수소/CNG/질소 혼합비의 제어를 위해 수소의 유량은 MFC(Brooks Instruments)를

Table 1 Specification 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 / 2300 rpm

Table 2 Engine test conditions

Experimental condition	Description
Nitrogen dilution ratio with respect to CNG (Vol%)	0, 20, 40, 60, 80
Engine speed (rpm)	1800
Power (kW)	60
Hydrogen mixture ratio with respect to syngas (%)	0, 10, 20, 30
Excess air ratio	1.0

이용하여 제어하였으며, CNG는 전자식 스톱밸브를 설치하여 공급하였다. 질소의 경우는 상당히 많은 양을 공급해야 하기 때문에 액화질소를 강제기화기를 통해 기화시킨 후 MFC (Bronkhost High-Tech B.V.)를 이용하여 그 유량을 제어하였다. 엔진의 운전에 의한 가스의 맥동 방지를 위해 엔진 연료입구 전단에 Surge Tank를 설치하였으며 Surge Tank의 입구에는 질소, 천연가스와 수소의 충분한 혼합을 위하여 믹서를 장착하였다. 엔진의 모터링 및 엔진 회전수 제어를 위하여 DC 동력계를 사용하였다. 엔진 크랭크 축에 엔코더(Autronics, E40S8)를 장착하였으며, 연소압력을 측정하기 위하여 1번 실린더에 스파크 플러그 타입 압력센서(KISTLER, Type6117BCD17)를 설치하고 이로부터 취득한 엔코더 신호와 압력 신호를 연소해석기(DEWETRON)를 이용하여 연소특성 분석을 수행하였다. 또한, 배기구에 광역산소센서

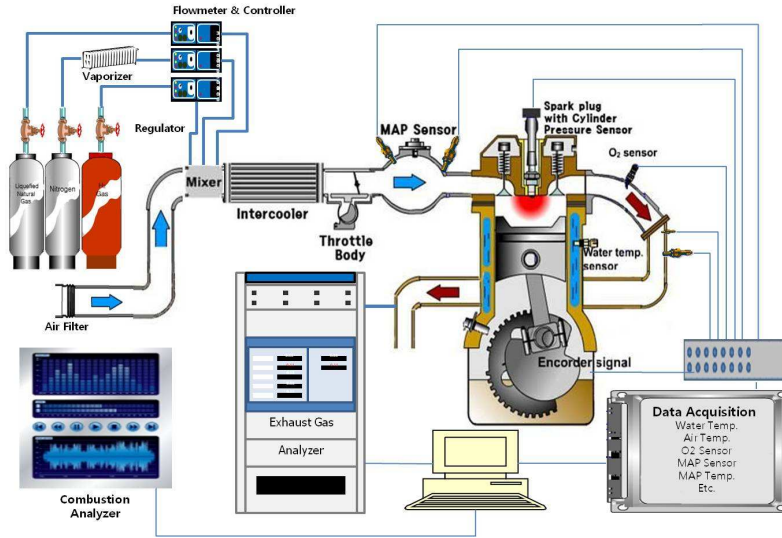


Fig. 1 Schematic of experimental setup

를 장착하여 공연비를 모니터링 하였고 배기가스 분석기(HORIBA, MEXA-8120) 및 421-HL, 600-HFID를 이용하여 운전조건 변화에 따라 달라지는 배기가스 성분을 측정하였다.

2.2 실험방법

시험 시 운전조건은 목표출력인 60 kW 부하조건을 설정하고, 일반적인 왕복동엔진 발전기의 주파수인 60 Hz와 일치시키기 위하여 엔진회전수를 1800 rpm으로 고정하였다. 또한 질소희석으로 인하여 발생하는 희박연소를 막고 연료의 원활한 연소를 위하여 공연비를 이론공연비로 설정하였으며 실험조건을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

엔진의 제어장치는 기존의 엔진에서 사용되는 상용 ECU를 사용하였고, 점화시기는 Before Top Dead Center (BTDC) 22.5 Crank Angle Degree (CAD)로 고정하여 실험하였다. 천연가스의 발열량이 약 9,393 kcal/Nm³ 임을 고려할 때, 질소 희석비 80% 비율로 합성가스가 희석이 되어야 본 연구에서 목표로 하고 있는 저발열량 합성가스의 발열량과 유사하게 되며 이때의 체적당 발열량은 1,878 kcal/Nm³ 이다. 일반적으로 개질 또는 합성가스화 반응에 의해 생성되는 합성가스 내의 수소 비율은 체적을 기준으로 적게는 10% 수준에서 많게는 40% 정도에 이르는 것으로 알려져 있으며 대부분의 합성가스 이용기술에 관한 연구는 10~30%의 수소를 함유하고 있는 합성가스를 대상으로 하고 있다.^(5,6) 본 연구에서는 천연가스에 질소가 80% 희석된 모사가스가 60 kW의 목표출

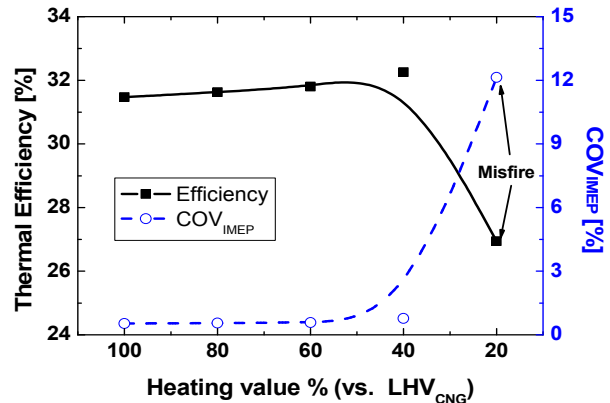


Fig. 2 Comparisons of combustion efficiency and coefficient of variation with different heating values compared to the LHV_{CNG}

력을 달성할 때 투입된 합성가스의 총 유량을 확인하여 가스연료의 체적당 발열량을 일정하게 하고, 동일유량에서 수소가 차지하는 비율을 10% ~ 30%로 변화시키며 저발열량 합성가스를 사용하는 전소엔진에서 수소 혼합에 따른 연소특성을 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 체적당 발열량 변화에 따른 연소특성

Fig. 2는 합성가스의 체적당 발열량의 변화에 따른 연소 및 배기특성을 살펴보기 위해 수소를 혼합하지 않고 천연가스에 질소를 혼합하여 엔진에 공급 했을 때의 효율과 연소안정성의 변화를 나타낸 것이다. 질소의 혼합비율이 높아지면서

발열량이 낮아질수록 효율과 연소안정성에서 미세한 변화를 보이다가 질소 희석비 80% 비율의 발열량 조건에 도달하여서는 실화를 동반하고 COV_{IMEP} 값이 12.14% 수준의 급격한 연소의 불안정성을 보이면서 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 질소 혼합비율이 증가하여 체적당 발열량이 감소함을 고려할 때 천연가스만을 사용하는 고발열량 연료를 사용하였을 때보다 저발열량의 합성가스를 사용할 때에는 BTDC 22.5 CAD 의 점화시기는 너무 이른 편이며 체적 당 발열량이 감소될수록 연소속도의 감소로 점화시기가 지각되어야 함을 알 수 있다.⁽⁷⁾

이러한 결과의 원인은 연소실 내부의 압력선도와 열방출률 선도를 나타낸 Fig. 3을 통해서 확인할 수 있다. 높은 질소 희석비로 인한 발열량의 저하와 합성가스 내에 존재하는 다량의 불활성가스로 인하여 연소실 내 혼합기의 산소농도가 저

하되어 질소 혼합비가 늘어날수록 보다 긴 점화 지연이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 질소의 증가로 화염전과면적이 감소하여 화염전과 속도가 느려졌기 때문에 연소효율의 저하 및 연소의 불안정을 가져오게 된 것으로 판단된다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 질소희석비 80% 비율의 발열량 조건의 경우 질소의 유량이 약 1300 LPM에 이르며, 공급되는 질소는 Exhaust Gas Recirculation (EGR; 배기가스재순환) 가스와 유사하게 혼합기를 희석하는 역할을 하게 된다. 이는 천연가스만으로 운전되는 이론공연비 조건과 비교할 때 약 28% ($EGR\ rate = \frac{\text{희석가스}(N_2)}{\text{흡입공기} + \text{희석가스}(N_2)} * 100$)의 EGR가스가 공급되는 조건과 유사함을 고려하면 급격한 연소안정성 및 효율 악화는 당연한 결과이며, 저발열량 합성가스를 이용한 엔진의 운전은 점화시기의 제어를 이용한 최적화를 통해 연소안정성의 확보 및 효율개선이 가능할 것으로 보인다.

Fig. 4는 체적당 발열량의 변화에 따른 흡기 매니폴드 압력과 배기온도 결과를 나타낸 것이다. 목표출력인 60 kW에 도달하기 위한 가스연료의 발열량이 일정하기 때문에, 이론공연비 연소를 위한 공기의 양은 체적당 발열량에 관계없이 일정하다. 그러나 목표출력 달성을 위한 가스연료의 양이 증가함에 따라 전체 혼합기의 유량이 증가하여 흡기 매니폴드의 압력이 증가함을 알 수 있다. 체적당 발열량이 감소될수록 느려진 연소속도로 인해 점화시기가 진각되어야 하나, 고정된 점화시기의 실험장치로 운전되었음에도 불구하고 배기가스 온도가 감소되는 것은 질소 희석에 의한 열용량의 증대 효과가 보다 지배적으로

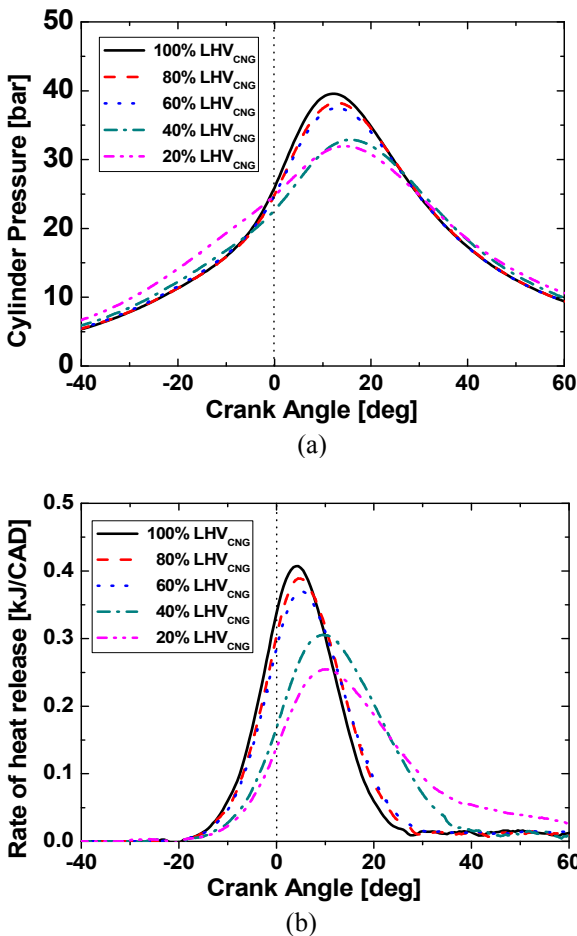


Fig. 3 Comparisons of (a) cylinder pressure trace and (b) heat release rate with different heating values compared to the LHV_{CNG}

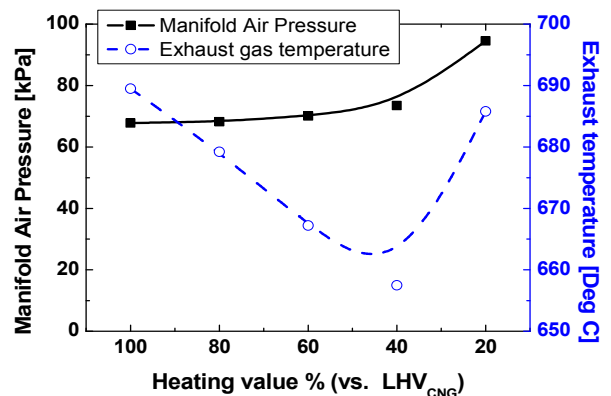


Fig. 4 Comparisons of manifold air pressure and exhaust temperature with different heating values compared to the LHV_{CNG}

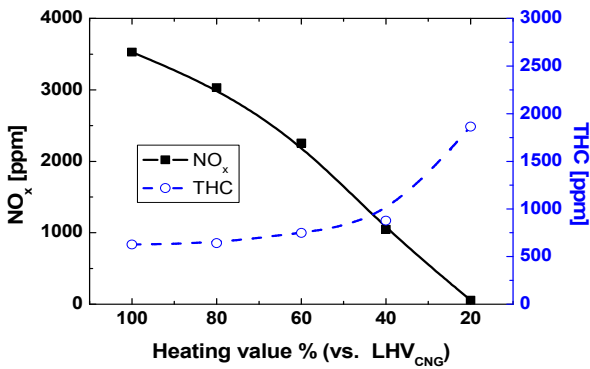


Fig. 5 Comparisons of THC and NO_x emissions with different heating values compared to the LHV_{CNG}

나타났음을 보여주는 결과이다. 질소회석비 80% 발열량 조건의 경우 연소안정성의 악화로 연소에 이용되지 못한 연료의 후연소로 배기온도의 상승에 기여하여 급격한 배기온도 상승의 결과를 보였다.

앞선 결과와 같은 연소효율의 저하 및 연소안정성의 악화는 배기배출물의 생성에 영향을 미치게 된다. Fig. 5는 발열량 변화에 따른 NO_x와 Total hydrocarbon (THC;총탄화수소)의 배출 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 질소혼합비가 증가하여 발열량이 낮아질수록 THC 배출은 증가하게 되지만 NO_x의 배출은 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 앞서 살펴본 열방출을 그래프에서 확인할 수 있듯이 발열량이 낮아질수록 Top Dead Center (TDC;상사점) 이후 팽창과정에서 더 많은 열방출이 이루어져 연소실 내의 연소최고온도 및 연소최고압력을 낮추기 때문에 NO_x의 배출은 줄어드는 것으로 판단된다. 하지만 고정된 점화시기 때문에 THC 배출은 연소안정성의 경향을 따른 것으로 판단된다.

3.2 H₂ 혼합비에 따른 연소특성

앞선 실험의 경우 단순히 합성가스의 체적당 발열량을 모사하기 위해 천연가스에 질소를 희석하여 실험을 수행하였으나, 개질 반응을 통해 생성되는 합성가스의 대부분은 수소, 일산화탄소 및 질소를 주성분으로 한다.

이때 개질기의 종류 및 상태에 따라 합성가스내의 수소의 함량이 달라질 수 있기 때문에 질소 회석비 80% 비율의 발열량 조건(20% Heating value of LHV_{CNG})에서 수소의 혼합비에 대한 특성을 비교하

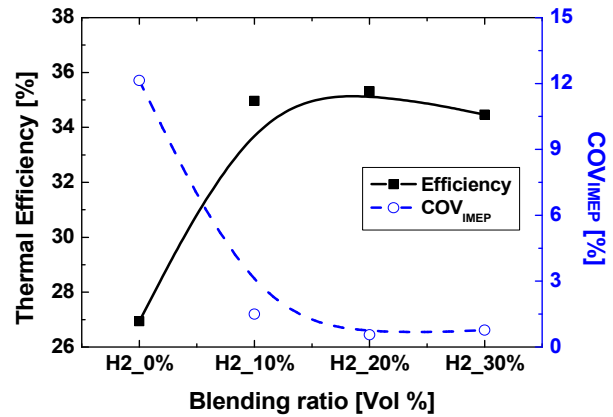


Fig. 6 Comparisons of combustion efficiency and coefficient of variation with the blending ratio of H₂/syngas

였다. 널리 알려진 바와 같이 수소는 넓은 연소범위와 높은 단열화염온도를 지닌 우수한 연소력을 가진 가스로 연소의 진행을 촉진시킨다.⁽⁸⁾

Fig. 6은 수소 혼합에 따른 효율과 연소안정성 변화를 나타낸 그래프이다. 이를 통해 알 수 있듯이 위의 원리와 같이 천연가스에 질소를 희석하여 모사된 저발열량 합성가스는 낮은 연소효율과 불안정한 연소상태를 보이는데 반해 수소를 10%만 혼합하더라도 연소안정성이 눈에 띄게 향상되는 것을 볼 수 있다.

Minimum advance for Best Torque (MBT) 점화시기 면에서 수소 혼합비가 증가할수록 효율이 증가되는 것이 일반적이나, 본 연구에서와 같이 고정된 점화시기 조건에서는 수소혼합 비율이 30%로 가장 높은 조건에서 오히려 효율이 감소하였다. 수소의 연소속도가 빠르기 때문에 수소가 첨가되지 않은 연료에 비해 점화시기가 지각되어야 함을 고려하면 수소혼합 비율이 20%일 때 MBT 점화시기가 본 연구의 운전조건인 BTDC 22.5 CAD에 가까움을 알 수 있으며, 수소혼합비율이 이보다 더 증가되면 점화시기가 지각되어야 함을 알 수 있다.⁽⁹⁾

Fig. 7은 수소혼합 비율에 따른 THC와 NO_x의 배출을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 수소 혼합비율이 증가할수록 THC의 배출은 줄어드는 반면에 NO_x의 배출은 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 현상의 원인은 수소 혼합 비율이 증가할수록 연소효율이 증가하고 연료내의 탄화수소계 연료인 천연가스의 비율이 감소되기 때문에 THC의 배출이 감소한 것이라고 판단된다. 그리고 공급

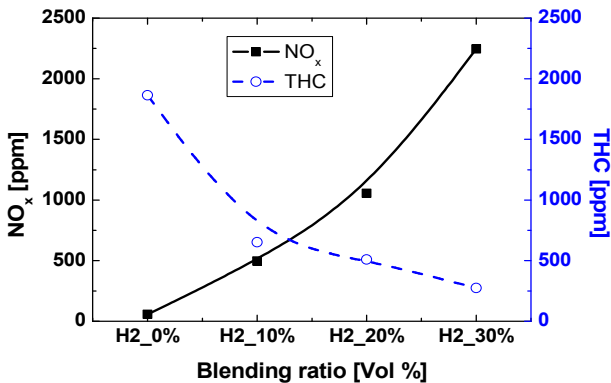


Fig. 7 Comparisons of THC and NOx emission with the blending ratio of H₂/syngas

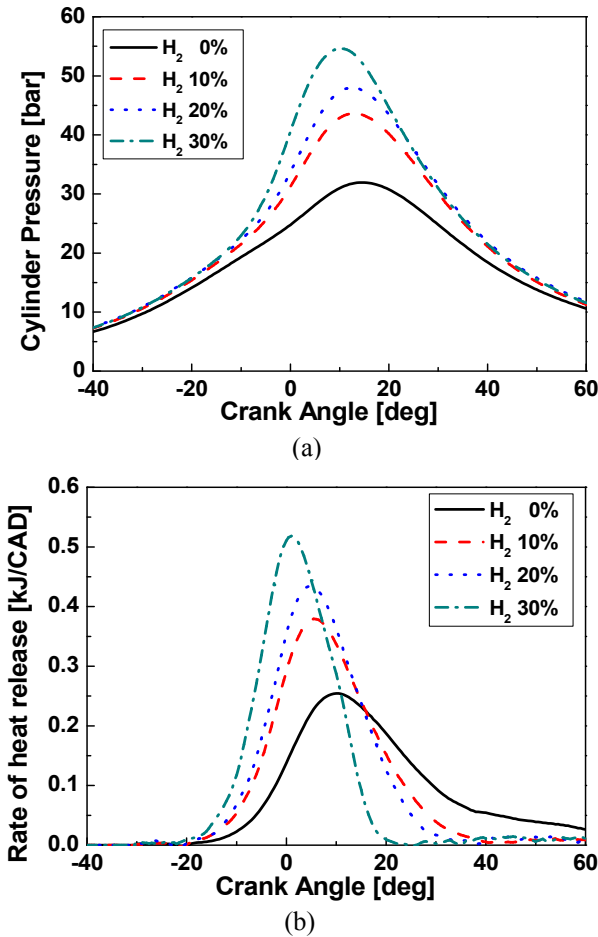


Fig. 8 Comparisons of (a) cylinder pressure trace and (b) heat release rate with the blending ratio of H₂/syngas

되는 가스연료의 전체 유량이 일정함을 고려할 때 수소혼합 비율이 증가할수록 연료내의 질소 비율이 감소되었음에도 불구하고 NO_x의 배출이 급격하게 증가하는 것은 앞서 기술한 바와 같이 수소의 급속 연소에 의한 영향과 점화시기의 고

정에 따른 점화시기 진각효과에 따른 결과로 볼 수 있다.

이러한 결과의 원인은 Fig. 8의 수소 혼합비율에 따른 연소실 압력과 열방출률을 나타낸 그래프를 확인할 수 있다. 수소 혼합량을 증가시킬수록 빠른 수소 연소 속도의 영향으로 각각의 최고점의 위치가 TDC 쪽으로 진각되었다. 체적당 발열량을 일정하게 유지하면서 천연가스와 질소의 공급량을 제어하여 공급되는 가스연료의 전체유량을 일정하게 하였기 때문에, 흡기매니폴드의 압력값은 거의 변하지 않았으나 수소의 영향으로 압력과 열방출률이 급격하게 상승하였다.

4. 결론

(1) 천연가스에 질소 희석을 통해 저발열량 합성가스를 모사하였고, 질소 혼합비율의 증가로 체적당 발열량이 감소될수록 펌핑손실의 감소로 효율이 증가하였으나, 천연가스 대비 20% 수준의 발열량을 갖는 저발열량 합성가스를 이용해 전소 운전할 경우는 연소의 불안정성을 보이면서 효율이 감소하였다.

(2) 천연가스 발열량 대비 20% 수준의 저발열량 합성가스를 사용하더라도 10% 수소 혼합을 통해 연소안정성의 확보가 가능하였고, 이에 따른 효율의 증가를 확인할 수 있었다.

(3) 저발열량 합성가스 내의 수소 함유율이 증가할수록 수소의 빠른 연소 속도로 인해 열방출 구간이 짧아지고 전체적인 열방출 시기가 TDC 쪽으로 진각되며 효율이 증가되었으나, 수소 함유율이 30%인 조건에서는 과도하게 이른 열방출로 인해 20%인 조건에 비해 오히려 효율이 감소하였다.

참고문헌

- (1) Manitas, K., 2002, "Progress in Biomass Gasification: An Overview," *Progress In Thermochemical Biomass Conversion*, Vol. 1, pp. 1~31.
- (2) Paisley, M. A. and Anson, D., 1999, "Biomass Gasification for Gas Turbine based Power Generation," *J. of Gas Turbine&Power*, Vol. 120, pp. 284~288.
- (3) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill

- (4) Park, C. W., Lee, S. Y., Kim, C. G., Won, S. Y. and Lee, J. H., 2010, "A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas," *Trans. of KIGAS*, Vol. 14, No. 1, pp. 15~20.
- (5) He, M., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S., Guo, X. and Luo, S., 2009, "Syngas Production from Catalytic Gasification of Waste Polyethylene: Influence of Temperature on Gas Yield and Composition," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 3, pp. 1342~1348.
- (6) Roy, M. M., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y. and Sakane, A., 2009, "Performance and Emission Comparison of a Supercharged Dual-Fuel Engine Fueled by Producer Gases with Varying Hydrogen Content," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 18, pp. 7811~7822.
- (7) Huang, J. and Crookes. R. J., 1998, "Assessment of Simulated Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine," *Fuel*, Vol. 77, pp. 1793~1801.
- (8) Ji, C., Wang, S. and Zhang, B., 2010, "Effect of Spark Timing on the Performance of a Hybrid Hydrogen-Gasoline Engine at Lean Conditions," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, Issue 5, pp. 2203~2212,
- (9) Narayanan G. and Bade Shrestha, S. O., 2008, "Hydrogen as a Combustion Enhancer to Landfill Gas Utilization in Spark Ignition Engine," SAE Technical Paper, No. 2008-01-1040.