



## 합성가스 연료의 수소 함량 변화가 SI 엔진의 연소특성에 주는 영향

박승현\* · †이선엽\*\* · 박철웅\*\* · 이장희\*\*

\*과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과, \*\*한국기계연구원  
(2011년 11월 19일 접수, 2011년 4월 4일 수정, 2011년 4월 4일 채택)

### Performance and Emission Comparisons of a SI Engine Fueled by Syngas with Varying Hydrogen Content

Seunghyun Park\* · †Sunyoup Lee\*\* · Cheolwoong Park\*\* · Jang Hee Lee\*\*

\*Dept. of Environmental System Eng., Univ. of Sci. and Tech., Daejeon 305-333, Korea

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

(Received November 19, 2011; Revised April 4, 2011; Accepted April 4, 2011)

#### 요 약

합성가스는 Biomass, 석탄, 폐기물 등의 가스화 공정을 통해 얻을 수 있는 대표적인 대체연료로 저발열량에도 불구하고 수소가 포함되어 있기 때문에 이를 엔진에 적용하여 에너지를 생산하고자 하는 노력이 계속되어 왔다. 하지만 연료 조성 측면에서 합성가스는 가스화 원료의 종류에 따라 합성가스 내의 수소 함유량이 달라지는데, 이러한 함량 변화는 수소의 좋은 연소특성으로 인해 엔진 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 다양한 수소 분율을 갖는 합성가스를 동일 발열량 및 유량 조건에서 모사하고 이를 이용하여 연료 내 수소 비율(vol %)이 연소특성에 주는 영향을 파악하였다. 실험 결과로 각 수소 함량에 따른 최적 점화시기를 결정하였으며, 수소 비율의 변화가 연소특성, 엔진 출력, 효율, 배기 성능에 미치는 영향을 제시하였다.

**Abstract** - As an effective utilization of biomass, organic wastes and coal, attention has been made to use syngas to a reciprocating engine to generate power. However, significant component variation of syngas depending upon origin and gasification conditions, and its lower heating value than that of LPG and CNG can create difficulties in stable engine operation. Thus it is necessary to address these issues in order to successfully develop power generation engines. As a primary step to resolve these problems, effects of H<sub>2</sub> content variation in syngas on engine performance and emission characteristics were discussed in this study. The results show that as H<sub>2</sub> % in syngas increases, more stable combustion was achieved with retarded MBT spark timing and engine efficiency becomes maximum with syngas of 10% H<sub>2</sub>. In addition, NO<sub>x</sub> emission increased while THC emission decreased as H<sub>2</sub> % rises in the syngas.

**Key words** : syngas power generation engine, hydrogen content, alternative fuel

#### I. 서 론

가스화 열병합 시스템 (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)은 석탄이나 Biomass, 유기성 폐기물을 이용하여 합성가스 (Syngas; Synthetic gas)를

생산하고 이를 연료로 열 및 전기에너지를 생산하여 지역에 공급하는 중소형 규모의 에너지 시스템으로 현재 유럽 및 미국을 중심으로 크게 주목받고 있다. 이 시스템은 특히 Biomass나 유기성 폐기물 등 에너지 밀도가 낮아 활용되지 못하는 원료들을 전기에너지와 같은 양질의 에너지로 변환시키는 장점이 있기 때문에 이산화탄소로 대표되는 온실가스를 크게 저

†주저자:sunylee@kimm.re.kr

감하는 동시에 미래 에너지 고갈에 대응할 수 있는 기술로서의 가능성을 높이 평가받고 있다.

일반적으로 가스화 공정을 통해 생성된 합성가스는 수소(H<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO) 및 약간의 메탄(CH<sub>4</sub>)으로 이루어진 약 40% 정도의 가연성 가스성분과 질소(N<sub>2</sub>) 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 이루어진 약 60% 정도의 불활성 가스성분으로 구성된다. 이때 합성가스 주성분의 구성 비율은 원료 및 가스화 공정 조건 등에 의해 달라지며, 상당히 많은 양의 불활성 가스성분이 포함되어 있기 때문에 합성가스의 발열량역시 매우 낮은 특징이 있다.

합성가스를 연료로 전기에너지를 생산할 때 대형 플랜트의 경우 가스터빈, 소형인 경우 가스엔진이나 스텔링 엔진을 이용하는 것이 효율 측면에서 유리하다고 알려져 있다 [1]. 이중 합성가스 전소 엔진의 경우 합성가스 연료의 낮은 발열량과 불균일한 가스 성분으로 인해 지속적이고 안정적인 엔진 가동이 어렵다는 단점이 있다 [2,3]. 따라서 합성가스 엔진에서 안정적인 연소를 확보하기 위한 노력의 일환으로 이번 연구에서는 저발열량 (1,878 kcal/Nm<sup>3</sup>)의 합성가스 연료에서 수소함유량 변화가 합성가스 전소 SI (Spark Ignition) 엔진의 효율 및 배기성능에 미치는 영향을 알아보았다. 저발열량 합성가스를 모사하기 위해 수소/CNG (Copressed Natural Gas)/질소를 수소 부피비 및 단위 부피당 발열량을 기준으로 혼합하여 연료로 사용하였으며, 점화시기를 제어하기 위한 점화 제어장치 (ICM; Ignition Control Module) 및 엔진 제어장치 (ECU; Engine Control Unit)를 개발, 적용하였다.

실험결과로부터 모사 합성가스 내의 수소 함유량이 증가함에 따라 점화 지연 시간의 감소 및 화염 전파속도 상승으로 인해 MBT (Minimum advance for Best Torque) 점화시기가 지각됨을 알 수 있었으며, 엔진 효율은 합성가스 내 수소함량이 10%일 때 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 수소함량이 높아질수록 연소온도가 상승하여 NO<sub>x</sub> (Nitrogen Oxides) emission의 배출은 늘어나지만 THC (Total Hydrocarbon) emission 배출은 감소함을 알 수 있었다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 기본 엔진

본 연구에서는 과급기와 인터쿨러를 장착한 8,071cc, 6기통 CNG 엔진 (GE08TI)을 선정하고 연료 공급장치, ICM, ECU, 과급기 등을 수정, 합성가스 전소용 SI 엔진을 개발하였다. 이때 발열량이 낮은 합성가스에서 충분한 출력 성능을 구현하기 위해 엔진

의 높은 배기량은 필수적이며 그 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 합성가스 전소엔진과 실험 장치의 대략적인 구성을 나타낸다. 먼저 합성가스 전소엔진의 성능을 향상시키고 최적화하기 위해 이번 연구에서는 ICM과 ECU로 구성되는 전소용 엔진 제어 시스템을 개발하였다[4,5]. 이때 ICM은 점화 시기의 정밀한 제어를 수행하고 ECU는 엔진회전속도, 공연비, 연료량 등 전반적인 엔진의 거동을 정밀하게 제어하는 역할을 하도록 설계하였다.

실제 합성가스를 가스화 플랜트에서 수송해 오거나 실험실 환경에서 합성하는 것은 큰 어려움이 따르기 때문에 여기서는 실제 합성가스 대신 수소와 CNG 그리고 질소를 혼합하는 방식으로 합성가스 모사가스를 제작하여 연료로 공급하였다. 이때 각 가스성분의 혼합비는 수소 함유량 변화를 기준으로 동일한 발열량을 갖도록 하는 CNG 및 질소 비율로 결정하였다.

합성가스 모사를 위한 수소/CNG/질소 혼합비의 제어를 위해 수소의 유량은 MFC (Mass Flow Controller; Brooks Instruments)를 이용하여 제어하였으

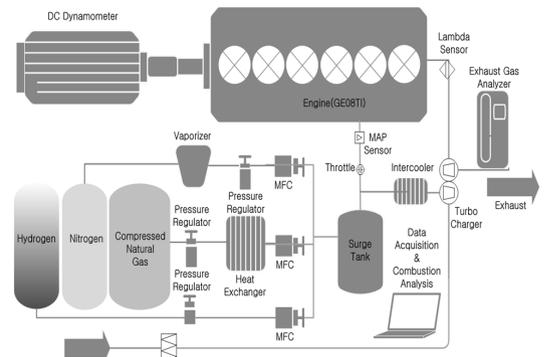


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

Table 1. Specification of base engine

Type	Description
Number of cylinder	6
Bore (mm)	111
Stroke (mm)	139
Displacement volume (cc)	8,071
Max. power	176.5kW/2,300rpm

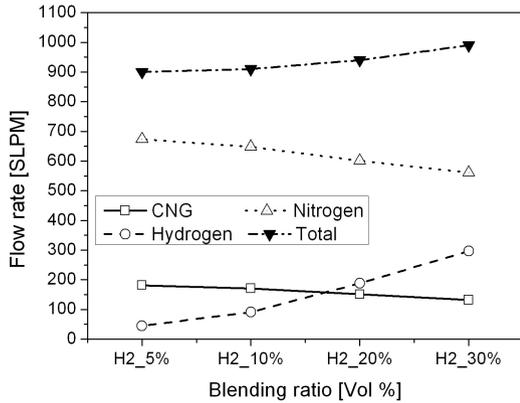


Fig. 2. Flow rate of each gas component for various hydrogen blending ratios in simulated syngas in order to achieve power output of 30 kW.

며 메탄은 고압의 CNG를 정압기 및 열교환기를 통하여 압력과 온도를 0.8 MPa, 40°C로 일정하게 유지시킨 후 MFC (Brooks Instruments)를 통해 공급하였다. 또, 질소의 경우 상당히 많은 양을 공급해야하기 때문에 액화질소를 강제기화기를 통해 기화시킨 후 MFC (Bronkhost High-Tech B.V.)를 이용하여 그 유량을 제어하였다. 엔진의 운전에 의한 가스의 맥동방지를 위해 엔진 연료입구 전단에 Surge Tank를 설치하였으며 Surge Tank 입구 상류 측에서 모든 가스 성분들이 만나게 함으로써 충분한 혼합이 이루어지도록 하였다.

엔진의 모터링 및 엔진 회전수 제어를 위하여 DC 동력계를 사용하였다. 엔진 크랭크 측에 엔코더(Autronics, E40S8)를 장착하였으며, 연소압력을 측정하기 위하여 1번 실린더에 스파크 플러그 타입 압력센서(KISTLER, Type 6117BCD17)를 설치하고 이로부터 취득한 엔코더 신호와 압력 신호를 연소해석기(DEWETRON)를 이용하여 연소특성 분석을 수행하였다. 또한, 배기구에 광역산소센서를 장착하여 공연비를 모니터링 하였고 배기가스 분석기(HORIBA, MEXA-8120)를 이용하여 운전조건 변화에 따라 달라지는 배기가스 성분을 측정하였다.

## 2.2. 엔진 실험 조건

이번 연구에서는 CNG 저위발열량(LHV<sub>CNG</sub>; Lower Heating Value of CNG; 9,393 kcal/Nm<sup>3</sup>)의 20% 정도인 1,878 kcal/Nm<sup>3</sup>의 합성가스를 연료로 사용하였다. 이때 합성가스 내의 수소 함유량은 0, 5, 10, 20, 30%로 변화시켰으며 각각의 수소 함유량에 대해 동일한

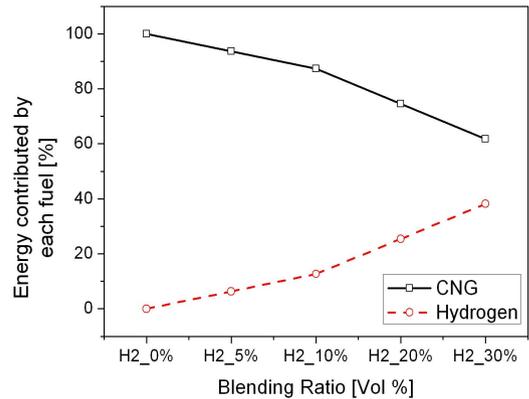


Fig. 3. Energy contributed by each fuel.

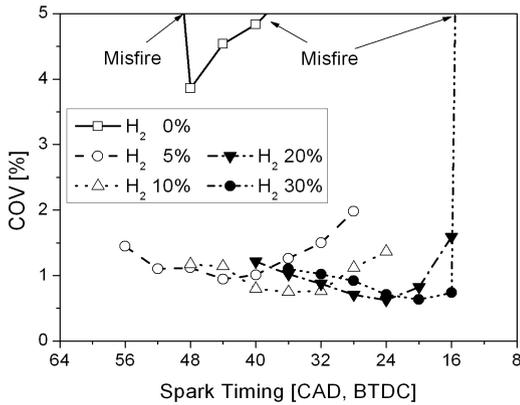
단위 부피당 발열량을 유지하도록 CNG와 질소의 비율을 결정하였다. 엔진은 이론공연비로 고정하여 운전함으로써 공연비 변화가 엔진 성능에 줄 수 있는 영향을 최소화 하였는데, 이러한 이론공연비 운전에서는 합성가스 내 수소 비율이 증가하면 요구되는 공기량은 감소하게 된다. Figs. 2와 3은 이번 연구에서 30kW 목표출력을 얻기 위해 사용된 수소 비율 별 합성가스 모사가스 각 성분의 공급 유량과 각 가연 가스성분이 전체 연료에너지에서 차지하는 비율을 나타낸 것이다. Fig. 2에서처럼 수소(LHV<sub>H2</sub>=2,568 kcal/Nm<sup>3</sup>)와 CNG의 발열량 차이 때문에 수소 공급량 증가에 비해 CNG 공급량 감소는 완만하게 일어나며 유량의 70%이상을 차지하는 질소 공급량 또한 서서히 감소함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 3에서는 수소의 비율이 합성가스 유량에 30%에 도달하더라도 (CNG는 약 15%) 수소가 차지하는 연료 내에서의 에너지는 40% 미만임을 알 수 있다.

일반적인 왕복동 엔진 발전기의 주파수는 60 Hz 이기 때문에 이와 동기시키기 위하여 엔진회전수를 1,800rpm으로 고정하였으며, 30 kW 출력조건 하에서 수소 함유량 변화에 따른 최적 점화시기를 결정하였다. 동시에 수소 함량 변화에 따른 엔진 효율, 연소 특성 그리고 배기 특성 변화를 확인함으로써 수소가 엔진 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서 사용한 엔진 실험 조건은 Table 2와 같다.

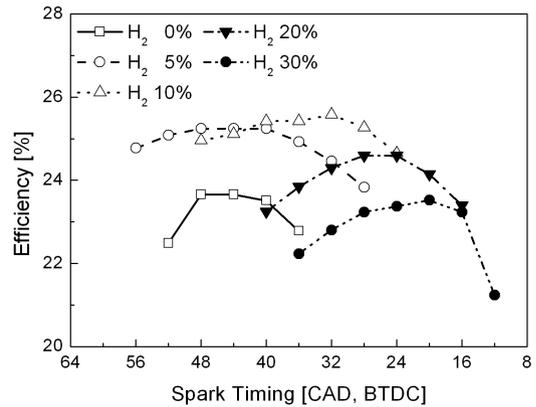
## III. 실험 결과

### 3.1. 수소 함유량 변화에 따른 연소 특성

Fig. 4는 수소 함유량 변화에 따른 합성가스 엔진의 연소안정성 (COV<sub>IMEP</sub>; Coefficient Of Variation in IMEP)을 점화시기를 바꿔가며 측정 한 결과이다. 수



**Fig. 4.** COVIMEP comparison of syngas engine operations in various hydrogen blending ratios for spark timing sweeps.



**Fig. 5.** Efficiency comparison of syngas engine operations in various hydrogen blending ratios for spark timing sweeps.

**Table 2.** Syngas engine test conditions

Experimental condition	Description
Hydrogen blending ratio (vol %)	0, 5, 10, 20, 30
Engine speed (rpm)	1,800
Power (kW)	30
Equivalence ratio	1
Syngas LHV (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1,878

소가 첨가되지 않았을 경우 COV<sub>IMEP</sub>는 3% 이상으로 상당히 불안정한 연소가 발생함을 볼 수 있지만 수소가 첨가되는 즉시 (H<sub>2</sub> 5%) COV<sub>IMEP</sub>=2% 이하의 안정적인 연소가 이루어짐을 알 수 있다. 그림에서는 또한 수소가 첨가되면 넓은 범위의 점화시기(약 30 Crank Angle Degree (CAD) 이상)에 걸쳐 연소 안정성이 확보됨을 볼 수 있었으나 H<sub>2</sub> 30%의 경우 16 CAD, BTDC (Before Top Dead Center) 이하로 지각시키면 실화가 발생함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5는 수소 함유량 변화에 따른 엔진 효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 수소 함유량이 0%에서 10% 까지 증가할수록 효율이 상승하지만, 수소 비율이 10% 이상으로 높아지면 효율은 오히려 감소함을 알 수 있다. 이 같은 현상을 설명하기 위해 먼저 합성가스 내의 수소가 엔진 효율에 미치는 영향을 분석해보면 다음과 같다. 일반적으로 이론공연비 운전에서 연료에 수소 함유량이 증가하고 불활성 가스량이 감소하면 (Fig. 2) 수소의 좋은 연소특성으로 인해 연소최고온도 및 연소압력

이 상승하고 연소효율이 증가하기 때문에 엔진효율이 좋아지는 효과가 생기지만 높은 연소온도로 인해 외부로의 열손실이 증가하고 요구되는 공기량 감소에 의해 충전효율이 감소하기 때문에 엔진효율이 저하되는 효과 역시 동시에 발생하게 된다 [1-3, 6]. 따라서 Fig. 5의 경향은 수소 함량 10%까지는 효율 상승 요인들(특히 연소효율 증가)이 효율에 더 많은 영향을 주다가 그 이상이 되면 열손실 증가 등으로 인한 효율의 감소가 더 커지기 때문에 나타나는 것으로 판단되며, 이는 H<sub>2</sub>/CNG 혼합연료의 수소 함량이 늘어나는 경우 최대 효율을 얻을 수 있는 공연비의 위치가 열손실을 억제하고 충전효율을 높일 수 있는 희박 영역으로 이동하는 것을 보여준 원상연 등의 연구 결과와 일치한다고 할 수 있다 [7].

Fig. 5에서는 또한 합성가스 내 수소비율 증가에 따라 MBT timing을 얻을 수 있는 점화시기가 BTDC 48 CAD에서 BTDC 20 CAD까지 지각되는 것을 볼 수 있는데, 이는 수소가 많아질수록 수소의 낮은 점화 에너지의 영향으로 점화지연이 짧아지기 때문이다.

Figs. 6과 7은 수소 함유량 별 MBT 점화시기에서의 열방출율 및 압력선도를 나타내는 것이다. 먼저 Fig. 6을 살펴보면 수소 함량이 증가할수록 합성가스의 연소속도 역시 증가하여 더 급격한 열방출이 일어남을 볼 수 있다. 또한 5~30%의 수소가 포함된 경우 서로 유사한 위치에서 최대 열방출율에 도달하는데 반해 0% 수소의 경우 최대 열방출율 위치가 더 지각된 것을 볼 수 있는데, 이는 넓은 범위의 점화시기 변경을 통해 최대 토크 지점을 찾을 수 있는 수소 함유 연료와는 달리 수소가 포함되지 않은 연료 사용 시의 MBT 시기는 연소 안정성이 확보되는 제한

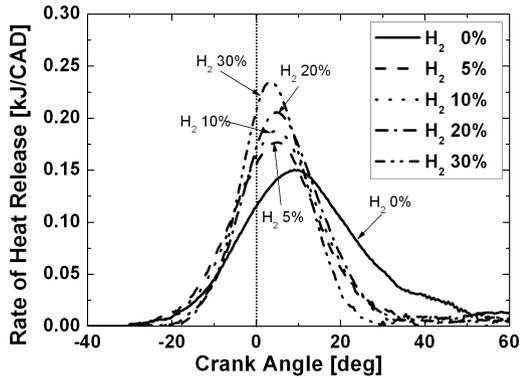


Fig. 6. Heat release rates for syngas engine operations in various hydrogen blending ratios in the MBT timing.

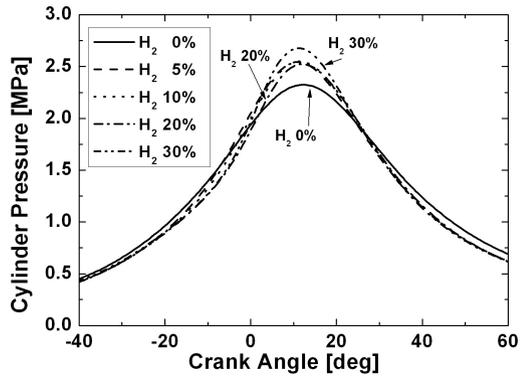


Fig. 7. Cylinder pressure traces for syngas engine operations in various hydrogen blending ratios in the MBT timing.

적인 점화시기 내에서 결정되었기 때문이다. Fig. 7에서는 수소가 함유된 경우 더 높은 연소압력이 나타남을 알 수 있는데 수소 함량이 5~20% 구간에서는 수소 첨가로 인한 화염전파속도 증가와 열손실 증가가 서로 상쇄되어 최대연소압력의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다

### 3.2. 수소 함량 변화에 따른 배기 특성

Fig. 8은 합성가스 내 수소 함량별 점화시기에 따른 NO<sub>x</sub> 배출량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수소의 함유량이 늘어날수록 NO<sub>x</sub>의 배출 역시 증가함을 알 수 있는데, 이는 1) 목표출력 30 kW, 이론공연비 조건 하에서 공급되는 연료의 단위

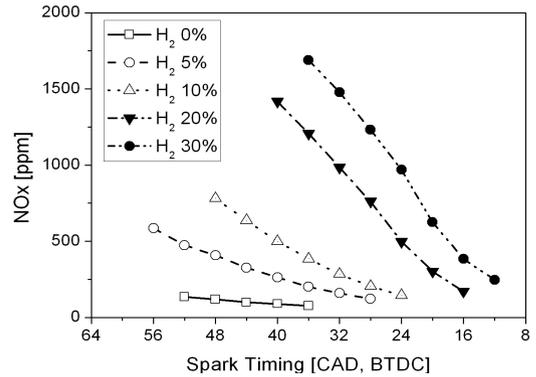


Fig. 8. NO<sub>x</sub> emissions for syngas engine operations in various hydrogen blending ratios for spark timing sweeps.

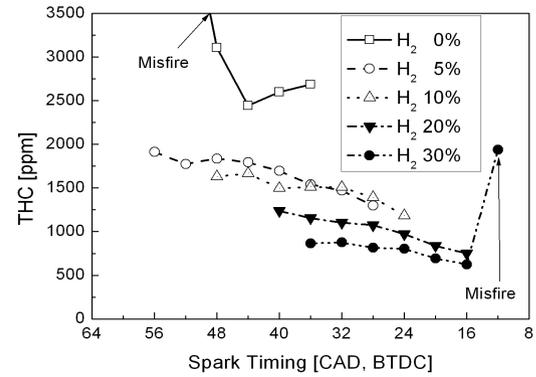


Fig. 9. THC emissions for syngas engine operations in various hydrogen blending ratios for spark timing sweeps.

부피당 발열량을 동일하게 유지하기 위해서는 연료 내 수소 함량이 증가할수록 질소 비율이 감소하고 (Fig. 2) 그 결과 연소실 내 희석효과가 감소하고 2) 수소 함량이 커질수록 수소의 높은 단열화염온도 및 빠른 연소속도의 영향이 커지기 때문에 연소최고온도 역시 높아지기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

Fig. 8에서는 또한 모든 수소함유량 조건에 대해 점화시기가 지각할수록 NO<sub>x</sub> 발생이 억제되는 경향이 나타난다. 이러한 NO<sub>x</sub> 감소에 대한 원인은 20% H<sub>2</sub> 합성가스 연소 시 점화시기 변화에 대한 열방출선도를 나타내는 Fig. 10으로부터 알 수 있는데, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 점화시기가 지각하면 TDC 이

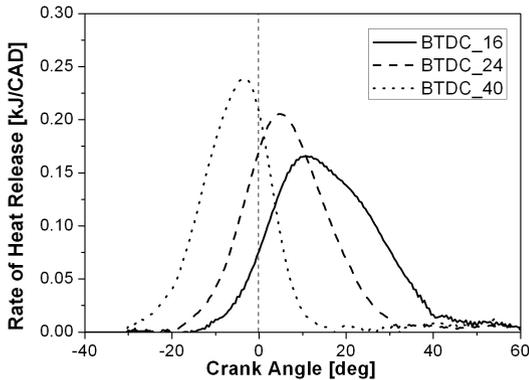


Fig. 10. Heat release rates in combustion of syngas with 20% H<sup>2</sup> for different spark timings.

후의 열방출이 증가하고 그 결과 연소최고온도가 감소하기 때문으로 판단된다.

각각의 합성가스 내 수소 함량 변화에 대해 점화 시기에 따른 THC 배출량 변화는 Fig. 9에서 볼 수 있다. 수소가 첨가되지 않은 경우 불완전 연소의 증가로 인해 (Fig. 4) 많은 THC가 배출되지만 수소 함량이 높아질수록 연소효율이 좋아지고 연소온도가 증가하며 연료에 포함되는 탄소의 비율이 작아지기 때문에 (Fig. 2) THC emission의 배출이 감소한다. 뿐만 아니라 Fig. 9에서는 각 수소 비율 조건에 대해 점화시기가 지각하면 THC emission이 감소하는 모습을 볼 수 있다. 이는 Fig. 10에서 볼 수 있는 것처럼 점화시기가 지각할수록 TDC 이후의 후연소 비율이 증가하여 미연 탄화수소의 산화가 촉진되기 때문이다.

#### IV. 결론

이번 연구에서는 합성가스에 포함된 수소의 함량이 엔진 연소특성 및 배기성능에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 수소의 좋은 연소특성으로 인해 합성가스 전소 엔진에서는 넓은 안정 운전영역을 확보할 수 있다.
- 2) 합성가스 엔진의 효율은 수소 함유량 10%에서 최대가 되는데 이는 수소 비율이 늘어나면 연소효율이 증가하여 엔진 효율이 높아지지만 수소 비율이 일정값을 넘어서는 경우 열손실 및 충전효율 감소로

출력의 저하가 더 커지기 때문이다.

3) 수소 함량이 많아질수록 수소의 낮은 점화에너지로 인해 점화지연 시간이 감소하여 MBT 점화시기는 지각하며 수소의 빠른 연소속도로 인해 급격한 열방출이 발생하여 연소기간도 감소한다.

4) 합성가스 내 수소비율이 증가할수록 수소의 높은 단열화염온도 및 질소 비율의 감소로 연소온도가 올라가기 때문에 NO<sub>x</sub>의 배출은 증가하고 THC의 배출은 감소한다. 또한 일정한 수소 함유량 조건에서는 점화시기가 지각하면 NO<sub>x</sub>와 THC 둘 다 감소한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 기관고유사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Roy, M.M., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y., Sakane, A., "Performance and Emission Comparison of a Supercharged Dual-Fuel Engine Fueled by Producer Gases with Varying Hydrogen Content", *Hydrogen energy*, 34, 7811-7822, (2009)
- [2] Ando Y., Yoshikawa K., Beck M., Endo H., "Research and Development of a Low-Btu Gas-Driven Engine for Waste Gasification and Power Generation", *Energy*, 30, 2206-2218, (2005)
- [3] Sridhar G, Dasappa S, Sridhar HV, Paul PJ, Rajan NKS., "Gaseous Emission Using Producer Gas As Fuels.", SAE paper 2007-01-2026, (2007)
- [4] Lee, S., Park, C., Kim, C., Won S., Lee J., "Development of 60kW Biogas-Diesel Dual Fuel Engine", *Proceedings of KSAE*, 307-312, KSAE09-A0054, (2009)
- [5] Kim, C., "Development of 60kW Class Engine Using syngas", 3rd report, KIMM, (2010)
- [6] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, (1988)
- [7] Park, C., Kim, C., Choi, Y. and Won, S., "A Study on Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a Heavy Duty Natural Gas Engine", *KIGAS* 14(4), 12-17, (2010)