

메탄/합성가스 혼합물에 의한 발전용 SI 가스엔진의 성능에 관한 연구

차호석* · 허광범** · †송순호*

*연세대학교 기계공학과 청정에너지연구소, **한국전력공사 전력연구원
(2015년 5월 7일 접수, 2015년 9월 16일 수정, 2015년 9월 17일 채택)

Study on the Performance of a Spark Ignition Gas Engine for Power Generation fueled by the Methane/Syngas Mixture

Hyoseok Cha* · Kwang Beom Hur** · †Soonho Song*

*Clean energy Lab., Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

**KEPRI, Korea Electric Power Corporation, Daejeon 306-760, Korea

(Received May 7, 2015; Revised September 16, 2015; Accepted September 17, 2015)

요약

현재까지 수소는 주로 천연가스의 연료 개질에 의해 발생된 합성가스를 이용해 생산된다. 합성가스 내의 수소 수율을 높이기 위해선 추가적인 공정이 필요하다. 하지만, 수소의 수율 향상을 위한 공정에는 별도의 에너지원과 경제적 비용이 수반된다. 그러므로 보다 효율적으로 합성가스를 활용하기 위해 그 자체로 혼합물로 이용하는 방법에 관한 관련 연구들이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 30kW급 발전용 스파크 점화 가스엔진에서 메탄/합성가스 혼합물이 엔진의 주요 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 메탄/합성가스 혼합물에 의해서 최대 실린더 내부 압력과 그때의 크랭크 각도와 같은 엔진 내 연소 현상은 개선되는 것으로 나타났다. 이를 통해 메탄-합성가스 혼합물의 연료 전환 효율은 메탄-수소 혼합물의 약 98% 수준으로 향상시킬 수 있고 질소산화물 배출량은 메탄-수소 혼합물의 약 12%만큼 감소시킬 수 있다.

Abstract - Hydrogen is usually produced by using syngas generated by the fuel reforming for natural gas so far. The further process is needed for increasing the hydrogen yield of syngas. However, the process for upgrading the hydrogen yield is accompanied by additional energy sources and economic costs. Thus related studies on the method for using as a mixture in itself have been conducted in order to utilize more efficiently syngas. The effect on the engine performance for methane/syngas mixture of 30kW spark ignition gas engine for power generation has been investigated in this study. As a result, it was found that the combustion phenomena such as the maximum in-cylinder pressure and crank angle at that time have been improved by methane/syngas mixture. Through these, fuel conversion efficiency could be enhanced by about 98% of methane/hydrogen mixture and NO_x emissions could be reduced by about 12% of methane-hydrogen mixture.

Key words : gas engine, methane, syngas, fuel conversion efficiency, NO_x emissions

1. 서 론

천연가스는 기존 석유 자원과 비교하여 상대적으로 풍부한 매장량과 저렴하고 안정적인 공급 가격의 측면에서 장점이 있다. 이러한 천연가스는 연료 개질

(fuel reforming)의 원료, 가정용 연료, 수송 및 발전용 연료 등 여러 분야에서 이용되고 있다. 이 중 수송 및 발전 분야에서 천연가스는 주로 내연기관(internal combustion engine)과 가스 터빈(gas turbine)의 연료로 공급된다. 특히, 차량용 연료와 중·소형 발전용 연료로 천연가스를 공급하는 경우에는 현재까지 내연기관인 엔진(engine)을 주로 이용하고 있다. 최근에는 엔진에서 보다 더 효율적으로 천연가스를

†Corresponding author:soonhosong@yonsei.ac.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

이용하기 위한 목적으로 발열량 및 연소 특성의 개선을 위해 다른 연료들과 혼합하는 경우가 증가하고 있는 추세이다. 천연가스와 혼합하는 연료들로는 기존의 가솔린(gasoline)과 디젤(diesel) 그리고 LPG뿐만 아니라 신·재생 연료(new and renewable fuel)인 수소(H₂), 합성가스(syngas), 바이오가스(biogas) 등이 있다. 이 중 합성가스는 현재까지 주로 수소를 생산하기 위한 목적으로 앞서 언급한 천연가스의 이용 분야들 중 하나인 연료 개질 과정을 통해서 발생한다. 연료 개질에 의해서 생성된 합성가스의 주성분은 수소와 일산화탄소(CO)이며 이 중 일산화탄소는 수소의 수율을 높이기 위한 추가 공정을 거쳐서 제거된다. 그러나 Table 1과 같이 일산화탄소는 단위 질량당 저위발열량(LHV)은 수소와 큰 차이가 있지만 단위 부피당 저위발열량은 수소와 별 차이가 없는 특성이 있다[1]. 그러므로 별도로 에너지와 경제적 비용이 수반되는 수소의 수율(yield) 향상을 위한 추가공정 없이 일산화탄소를 포함하는 합성가스를 그 자체로 혼합물로 이용하는 경우 또한 고려할 필요가 있다.

이처럼 합성가스를 혼합물로 이용하는 경우 증가솔린과 디젤 연료에 혼합할 때의 엔진의 성능 및 배출 특성에 관한 연구들이 진행되고 있다. 기존의 가솔린과 디젤 엔진에 합성가스를 혼소하면 전반적으로 엔진의 효율이 개선되는 것으로 나타난다. 특히, 합성가스 내의 수소의 비율이 증가하면 상대적으로 실린더 내의 화염 전파 속도(flame propagation speed)가 빨라져 점화가 용이해지는 것으로 알려져 있다. 반면에 질소산화물 배출량(NO_x emissions)의 경우 연소실 내의 온도가 증가함에 따라서 증가하는 경향이 있다[2-6].

하지만 이와 같은 가솔린과 디젤에 합성가스를 혼합하는 경우에 비하여 메탄(CH₄)이 주성분인 천연가스에 합성가스를 혼합하는 경우는 상대적으로

관련 연구들이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 메탄과 합성가스의 주요 성분인 수소와 일산화탄소로 이루어진 혼합물을 연료로 하는 엔진의 주요 운전특성을 살펴보고자 한다. 대상 엔진은 30kW급 발전용 스파크 점화(spark ignition) 가스엔진(gas engine)을 이용하였다. 엔진의 주요 운전특성은 공급된 연료가 최종적인 발전 출력으로 전환되는 연료 전환 효율(fuel conversion efficiency)과 질소산화물 배출량을 중심으로 조사하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구의 전체적인 실험장치 구성도는 Fig. 1과 같다. 합성가스의 성분에는 불활성 성분인 질소(N₂) 및 이산화탄소(CO₂)가 있다. 하지만, 이 중에서 발열량을 가진 수소와 일산화탄소만으로 합성가스를 모사하여 전체 연료 혼합물의 발열량에 미치는 영향을 조사하였다. 메탄 및 수소와 일산화탄소로 이루어진 전체 연료는 가스 실린더로부터 가스엔진에 공급된다. 공급되는 연료와 공기의 유량은 질량 유량계(mass flow

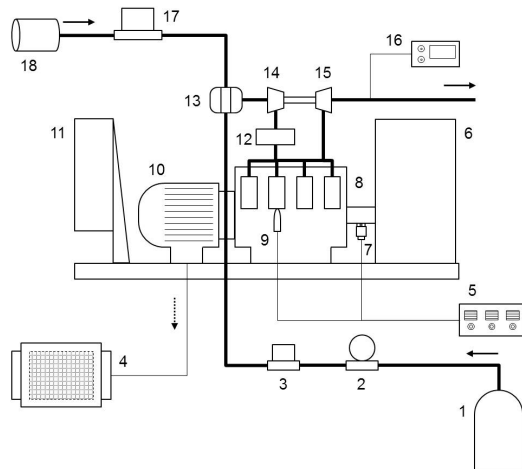


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup. (1. gas tank; 2. pressure regulator; 3. mass flow meter for fuel; 4. load resistor; 5. combustion analyzer; 6. radiator; 7. crank angle encoder; 8. gas engine; 9. pressure sensor; 10. generator; 11. control panel; 12. intercooler; 13. fuel/air mixer; 14. compressor of turbocharger; 15. turbine of turbocharger; 16. gas analyzer; 17. mass flow meter for air; 18. air filter).

Table 1. Properties of CH₄, H₂ and CO

	CH ₄	H ₂	CO
Molecular weight (g/mole)	16.04	2.015	28.01
Density (kg/m ³ at 0°C, 1atm)	0.72	0.090	1.25
LHV (MJ/kg)	50.0	120.0	10.1
LHV (MJ/m ³ at 0°C, 1atm)	36.0	10.8	12.63

Table 2. Engine specifications

Engine type	Vertical water-cooled four-stroke engine
Number of cylinders	4
Bore (mm)	88
Stroke (mm)	94
Displacement (Liter)	2.286
Intake system	Turbo charger
Ignition method	Spark ignition
Engine speed (RPM)	1800
Compression ratio	13:1

meter)를 통해 측정된다.

해당 가스엔진은 디젤 엔진을 기반으로 개조하여 상용화한 것으로 주요 제원은 Table 2와 같다. 총 배기량이 2.286리터인 4기통 엔진으로 기존의 연료 분사기(fuel injector)를 제거하고 그 자리에 설치한 스파크 플러그(spark plug)에 의해서 점화되는 스파크 점화 방식이며 압축비는 13:1이다. 공기와 연료의 혼합기는 과급 장치(turbocharger)를 거쳐서 1.5bar의 압력으로 과급된다. 가스엔진에 연결된 발전기의 발전 출력은 엔진 회전수 1,800RPM에서 발생된 전력은 부하 저항기(load resistor)에 의해서 소비된다. 실린더 내부 압력은 엔진의 기준 실린더에 설치된 스파크 플러그 일체형 압력센서(Kistler, 6117BFD17)에 의해 측정된다. 크랭크 각도(crank angle)는 인코더(Dewetron, DEWE-RIE)를 이용해 측정하며 압력 신호와 함께 연소 분석기(Kistler, Kibox)로 보내진다. 배기가스 성분은 과급장치 후단부분에 설치된 휴대가 용이한 가스 분석기(Eurotron, Greenline MK2)를 이용하여 측정하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서 수행한 실험 조건은 Table 3과 같다. 수소와 일산화탄소로 이루어진 모사 합성가스(model syngas)뿐만 아니라 각각의 수소와 일산화탄소를 전체 연료 혼합물의 저위발열량 5%만큼 식 (1)에 따라서 메탄과 혼합하였다. i 는 전체 연료 혼합물의 화학종을 의미하며 메탄과 수소 그리고 일산화탄소를

Table 3. Experimental conditions

Fuel	CH ₄ CH ₄ + 5% CO CH ₄ + 5% H ₂ /CO CH ₄ + 5% H ₂
Relative air/fuel ratio (λ)	1.2
Spark timing (°, BTDC)	24, 20
Power output (kW)	15
Engine speed (RPM)	1800

의미한다. j 는 혼합된 화학종을 의미하고 수소 및 일산화탄소를 의미한다. 연료혼합물과 공기의 상대 공연비(relative air/fuel ratio)는 당량비(equivalence ratio)의 역수로 식 (2)에 의해서 1.2로 유지하였다. 식 (2)에서 a와 b 그리고 c와 d는 각각 메탄과 수소 그리고 일산화탄소와 산소의 몰(mole) 수를 의미한다. 연료 혼합물의 전체 몰수의 합을 의미하는 a와 b 그리고 c의 합은 1이다. MW_{CH_4} 와 MW_{H_2} 그리고 MW_{CO} 와 MW_{O_2} , MW_{N_2} 는 각각의 화학종의 분자량을 의미한다. 3.76은 이론 공기(theoretical air)에서 산소(O₂) 1몰에 대한 질소(N₂)의 비율이다. \dot{m}_{CH_4} 와 \dot{m}_{H_2} 그리고 \dot{m}_{CO} 와 \dot{m}_{Air} 는 메탄과 수소 그리고 일산화탄소와 공기의 단위 시간당 질량 유량을 의미한다.

점화시기는 대상 엔진의 기준 점화시기인 BTDC 20. 와 진각(advance)된 BTDC 24. 를 비교하여 점화시기에 따른 영향을 조사하였다. 발전출력은 실험 도중에 엔진의 기계적 손상을 방지하기 위하여 최대 발전출력의 50%인 15kW로 유지하였다. 연료 전환 효율은 전체 발전출력을 시간당 공급된 연료 혼합물의 저위 발열량으로 나눈 식 (3)을 이용하여 계산하였다. 측정된 연료 혼합물 유량의 오차는 메탄의 경우 $\pm 5\%$ 내외이고 수소와 일산화탄소의 경우 $\pm 2\%$ 내외이다. 최대 실린더 압력에서의 크랭크 각도와 최대 실린더 압력은 연소 분석기에서 계산된 기준 실린더에서의 100 주기(cycle)의 평균값이다. 모든 실험 결과들은 각 실험 조건 별로 20회에 걸쳐 측정된 값들의 평균값들이다.

$$Mixingratio(\%) = \frac{\sum \dot{m}_j \cdot Q_{LHV,j}}{\sum \dot{m}_i \cdot Q_{LHV,i}} \times 100 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{(Air/Fuel)_{actual}}{(Air/Fuel)_{stoichiometric}} \quad (2)$$

$$= \frac{\frac{m_{Air}}{m_{CH_4} + m_{H_2} + m_{CO}}}{\frac{d \times (MW_{O_2} + 3.76 MW_{N_2})}{a \times MW_{CH_4} + b \times MW_{H_2} + c \times MW_{CO}}}$$

$$\eta_f(\%) = \frac{Power\ output}{\sum m_i \cdot Q_{LHV,i}} \times 100 \quad (3)$$

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 각각의 연료에 대한 최대 실린더 내부 압력에서의 크랭크 각도에 대한 결과를 보여준다. 동일한 점화시기에서 합성가스의 주요 성분 중 수소뿐만 아니라 일산화탄소만을 혼합하는 경우에도 최대 실린더 압력이 나타나는 시점은 순수한 메탄보다 빨라지는 것으로 나타났다. 또한 수소와 일산화탄소로 이루어진 합성가스를 혼합하면 수소에 비해 다소 느리지만 단일 메탄과 비교하여 최대 실린더 압력이 발생하는 시점이 빨라졌다. 이러한 현상은 실린더 내부의 연소 과정에서 화염 전파 속도와 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

메탄/수소 혼합물의 화염 전파 속도는 수소의 작은 점화 에너지(ignition energy)로 인하여 같은 당량비에서 순수한 메탄에 비해 빨라진다. 또한 일산화탄소를 메탄과 혼합하는 경우에도 일산화탄소가 메탄의 연소 반응을 촉진시켜 화염 속도가 빨라지게 된다. 수소와 일산화탄소를 동시에 메탄과 혼합하는 경우에는 수소의 비율이 증가할수록 화염 속도는 빨라지고 일산화탄소의 비율이 증가할수록 화염 속도는 느려지는 경향이 있다[7-9]. 점화시기를 진각하면 동일한 연료 혼합물에서 최대 실린더 압력이 나타나는 시점은 전체적으로 빨라졌다. 이는 점화시기의 변경만으로 실린더 내부의 연소 현상의 개선을 가져올 수 있음을 의미한다. 이와 관련하여 추가적으로 점화시기의 진각에 따른 영향을 살펴볼 필요가 있다.

전체 연료에 대한 최대 실린더 내부 압력 결과는 Fig. 3과 같다. 기준 점화시기인 BTDC 20.에서의 실린더 내부의 최대 압력은 순수한 메탄의 39.9bar와 비교하여 메탄/수소 혼합물에서 42.6bar로 가장 높았고 메탄/합성가스 혼합물에서 41.8bar, 메탄/일산화탄소 혼합물에서 40.6bar 순으로 나타났다. 즉, 수소뿐만 아니라 일산화탄소를 포함하는 합성가스를 메탄과 혼합하는 경우에도 실린더 내부의 최대

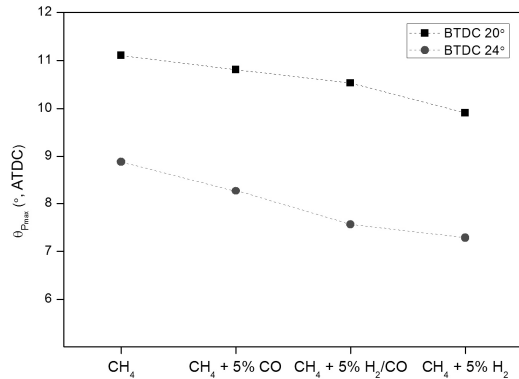


Fig. 2. Crank angle at the maximum in-cylinder pressure for CH₄, CH₄ + 5% CO, CH₄ + 5% H₂/CO and CH₄ + 5% H₂.

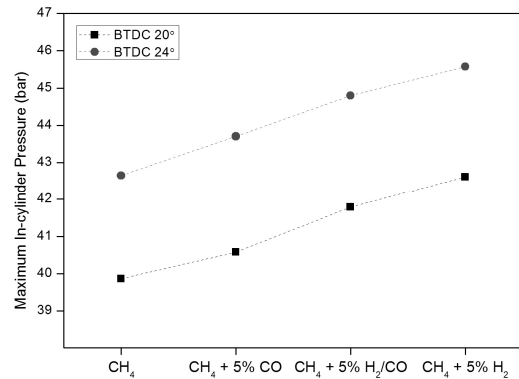


Fig. 3. Maximum in-cylinder pressure for CH₄, CH₄ + 5% CO, CH₄ + 5% H₂/CO and CH₄ + 5% H₂.

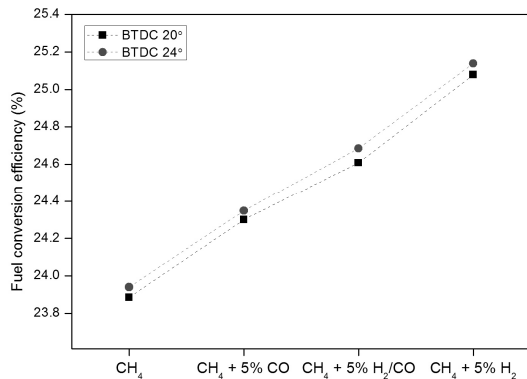


Fig. 4. Fuel conversion efficiency for CH₄, CH₄ + 5% CO, CH₄ + 5% H₂/CO and CH₄ + 5% H₂.

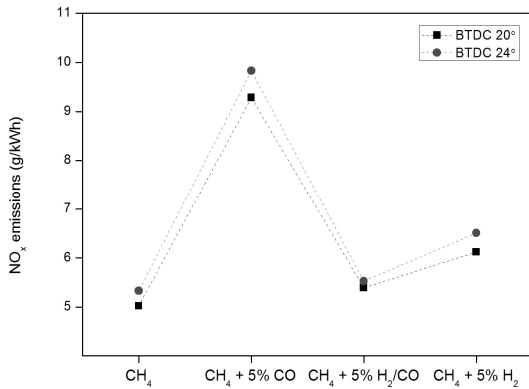


Fig. 5. NO_x emissions for CH₄, CH₄ + 5% CO, CH₄ + 5% H₂/CO and CH₄ + 5% H₂.

실린더 압력은 단일 메탄과 비교하여 상승한 것이다. 최대 실린더 내부 압력은 엔진 성능과 연관성이 있다. 따라서 최대 실린더 내부 압력의 상승은 엔진에서 실린더 내부의 연소 현상이 개선되는 것을 의미한다. 이는 점화시기를 진각시켰을 때도 유사하게 나타났다. 즉, 동일한 연료 혼합물에서 점화시기를 진각하면 최대 실린더 내부 압력은 상승하였다.

Fig. 4는 각 연료 혼합물의 연료 전환 효율 결과이다. 앞서 언급한 엔진의 성능과 연관성이 있는 최대 실린더 내부 압력 결과와 마찬가지로 순수 메탄의 23.9%와 비교하여 메탄 혼합물의 연료 전환 효율은 전반적으로 상승한다. 기준 점화시기에서 연료 전환 효율은 메탄/수소 혼합물이 25.1%로 가장 높았으며 메탄/합성가스 혼합물에서 24.6%, 메탄/일산화탄소 혼합물에서 24.3% 순으로 나타났다. 메탄/합성가스 혼합물의 연료 전환 효율은 메탄/수소 혼합물과 비교하여 다소 낮지만 이는 약 98% 수준으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 서두에서 언급한 추가적인 에너지와 경제적 비용이 발생하는 수소의 수율 향상을 위한 별도의 공정 없이도 합성가스를 그 자체로 발전용 가스엔진의 혼합물로 이용하면 수소와 유사한 수준의 효율 향상을 기대할 수 있는 것을 의미한다. 연료 전환 효율의 경우에서도 마찬가지로 동일한 연료 혼합물에서 점화시기를 진각하면 상승하게 되는 경향이 있다.

각 연료 혼합물의 질소산화물 배출량 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 질소산화물 배출량은 연료 전환 효율과 마찬가지로 가스엔진에서 고려해야 하는 중요한 요소이다. BTDC 20°에서 질소산화물 배출량은 메탄/일산화탄소 혼합물이 9.3g/kWh로 가장 높았으며 메탄/수소 혼합물에서 6.1g/kWh, 메탄/모사 합성가스 혼합물에서 5.4g/kWh 순서로 나타났다. 이는

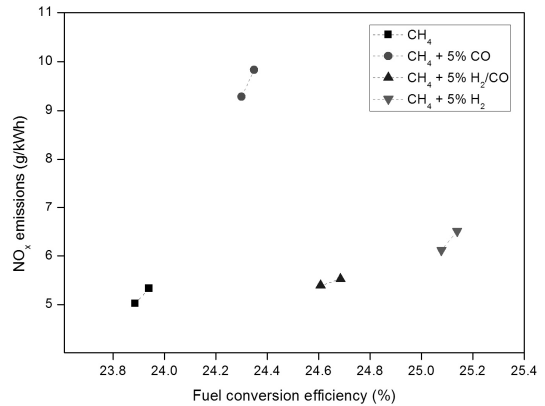


Fig. 6. Relationship between fuel conversion efficiency and NO_x emissions for CH₄, CH₄ + 5% CO, CH₄ + 5% H₂/CO and CH₄ + 5% H₂.

순수한 메탄의 5.0g/kWh와 비교하여 모두 높게 나타난 결과이다. 하지만, 메탄/합성가스 혼합물의 질소산화물 배출량은 메탄/수소 혼합물의 질소산화물 배출량과 비교하여 약 12%정도 감소한 것으로 나타난다. 즉, 질소산화물 배출량의 증가 비율이 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 엔진의 주요 성능들인 연료 전환 효율과 질소산화물 배출량의 상관관계를 보여준다. 연료 전환 효율과 질소산화물 배출량은 상호 비례관계에 있다. 다시 말해서 연료 전환 효율이 상승하면 질소산화물 배출량은 증가한다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 메탄/합성가스 혼합물은 순수한 메탄과 비교하여 질소산화물 배출량의 증가 비율은 낮으면서도 메탄/수소 혼합물 수준의 연료 전환 효율 개선 효과를 얻을 수 있다. 이러한 상대적인 이점이 향후 합성가스를 그 자체로 혼합물로 가스엔진에서 이용할 수 있는 부분이라고 여겨진다.

VI. 결론

수소와 일산화탄소로 이루어진 모사 합성가스를 전체 발열량의 5%만큼 메탄과 혼합할 때의 30kW급 발전용 스파크 점화 가스엔진의 주요 성능에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 메탄/합성가스 혼합물의 최대 실린더 내부 압력이 나타나는 시점은 빨라지며 이는 실린더 내의 화염 전파 속도와 연관이 있다.
- (2) 메탄/합성가스 혼합물은 최대 실린더 내부 압

력을 상승시키며 이는 엔진의 성능과 연관성이 있다.

(3) 메탄/합성가스 혼합물에 의한 실린더 내부의 연소 현상 개선으로 인하여 연료 전환 효율은 메탄/수소 혼합물의 약 98% 수준으로 향상되었으며 질소 산화물 배출량은 약 12% 정도 감소하는 특성을 보였다.

(4) 동일한 연료 혼합물에서 점화시기를 진각하면 연소 현상이 개선될 뿐만 아니라 연료 전환 효율 또한 향상된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131010176B)

사용기호

ATDC : after top dead center [°]
 BTDC : before top dead center [°]
 CO : carbon monoxide
 LHV : lower heating value
 LPG : liquified petroleum gas
 NO_x : nitrogen oxides
 RPM : revolutions per minute

그리스 문자

: relative air/fuel ratio
 : equivalence ratio

REFERENCES

[1] Holladay, J.D., Hu, J., King, D.L., and Wang, Y., "An overview of hydrogen production technologies", *Catal. Today*, 139, 244-260, (2009)

[2] Park, C., Lee, S., Kim, C., Won, S., and Lee, J., "A Study on Applicability to Dual-fuel Engine of Low Caloric Gas", *KIGAS*, 14(1), 15-20, (2010)

[3] Park, S., Lee, S., Park, C., and Lee, J., "Performance and Emission Comparisons of a SI Engine Fueled by Syngas with Varying Hydrogen Content", *KIGAS*, 15(2), 63-68, (2011)

[4] Dai, X., Ji, C., Wang, S., Liang, C., Liu, X., and Ju, B., "Effect of Syngas Addition on Performance of a Spark-ignited Gasoline Engine at Lean Conditions", *Int. J. Hydrog. Energy*, 37, 14624-14631, (2012)

[5] Ji, C., Dai, X., Ju, B., Wang, S., Zhang, B., Liang, C., and Liu, X., "Improving the Performance of a Spark-ignited Gasoline Engine with the Addition of Syngas Produced by Onboard Ethanol Steaming Reforming", *Int. J. Hydrog. Energy*, 37, 7860-7868, (2012)

[6] Sahoo, B.B., Sahoo, N., and Saha, U.K., "Effect of H₂:CO Ratio in Syngas on the Performance of a Dual Fuel Diesel Engine", *Appl. Therm. Eng.*, 49, 139-146, (2012)

[7] Ilbas, M., Crayford, A.P., Yilmaz, I., Bowen, P.J., and Syred, N., "Laminar-burning Velocities of Hydrogen-air and Hydrogen-methane-air Mixtures: an Experimental Study", *Int. J. Hydrog. Energy*, 31, 1768-1779, (2006)

[8] Wu, C.Y., Chao, Y.C., Cheng, T.S., Chen, C.P., and Ho, C.T., "Effect of CO Addition on the Characteristics of Laminar Premixed CH₄/air Opposed-jet Flames", *Combust. Flame*, 156, 362-373, (2009)

[9] Dong, C., Zhou, Q., Zhao, Q., Zhang, Y., Xu, T., and Hui, S., "Experimental Study on the Laminar Flame Speed of Hydrogen/carbon monoxide/air Flames", *Fuel*, 88, 1858-1863, (2009)