



바이오매스 합성가스를 이용한 혼소식 디젤엔진 발전기의 적용성 평가 Assessment of Dual Fuel Engine Performance Using Biomass Syngas

윤여성* · 서도현* · 강 구** · 최선화*** · 홍성구*,†

Yoon, Yeo Seong · Seo, Do Hyun · Kang, ku · Choi, Sun Hwa · Hong, Seong Gu

Abstract

Biomass gasification produces syngas or producer gas as low calorific fuel gas that can be used as a fuel for combustion or prime movers as well as chemical synthesis. Internal combustion engines are readily available with lower costs and easily used for producing distributed power using biomass syngas. In this study, a dual fuel diesel engine was used to evaluate its performance when biomass syngas is used for fuel. The engine was originally developed for biogas application with a diesel engine with a 2,607 cc displacement. Both diesel fuel and syngas consumptions were observed at the different load conditions. The results indicate that the dual fuel engine showed a reasonably good performance and up to 63 % of diesel fuel saving.

Keywords: biomass; gasification; syngas; diesel engine; dual fuel; diesel fuel saving

1. 서 론

최근 석유, 천연가스의 가체 매장량의 한계 등과 함께 온실 가스에 의한 지구온난화 방지를 위하여 바이오매스를 이용한 에너지 생산기술개발에 많은 관심과 연구를 수행하고 있다. 국내의 경우 2012년부터 RPS (Renewable Portfolio Standard: 신재생에너지 발전 의무비율할당제) 제도를 실시하여 신재생 에너지의 사용을 강화하고 있으며, 특히 바이오매스의 활용을 적극 추진하고 있는 실정이다 (Kang et al., 2014). 바이오매스는 에너지밀도 대비 존재하는 지역이 광범위하여 발생, 수집, 수송에 따른 비용이 많이 소요되는 특성이 있어 산지에서 직접 처리하거나 수집하여 여러 가지 현장상황에 따라 적절한 플랜트 운용의 유연성을 갖추고 있어야 한다 (Yoon et al., 2011).

바이오매스를 이용한 에너지활용 기술 가운데 가스화 기술은 고체연료를 산소가 충분하지 않은 조건에서 연소하여 CO와 H₂가 주성분인 합성가스를 생산하는 열화학적 변환기술로, 반응시간이 매우 짧고 단위 부피당 처리량이 높으며 공

정폐기물의 발생량이 매우 적은 장점을 지니고 있다 (Hong, 2006; Lee and Cho, 2005). 가스화공정은 크게 고정상 (Fixed bed)과 유동상 (Fluidized bed)으로 나눌 수 있는데, 고정상 가스화 공정 가운데 하향식 가스화는 연료의 흐름과 공기 및 가스의 흐름이 아래쪽으로 향하는 방식이다. 이러한 하향식 가스화장치에서 생산되는 합성가스는 타르의 함량이 상대적으로 가장 적기 때문에 엔진과 같은 내연기관에 적용하기 용이하다 (Hong, 2006).

합성가스를 연료로 사용하는 엔진의 형태는 크게 전소형 엔진과 혼소형 엔진으로 구분할 수 있다. 전소형 가스엔진은 화석연료를 일절 사용하지 않고 합성가스만을 연료로 사용한다는 장점이 있으나, 안정적인 연소를 위해서는 발열량이 높고 가스성분이 균질해야 한다는 점에서 가스 성분의 변동이 심한 곳에서는 가동이 어려운 단점이 있다. 반면 혼소형 가스엔진은 점화원으로 소량의 경유를 사용하기 때문에 연료성분의 변화와 저에너지밀도를 가진 영역에서도 안정적인 운전이 가능하다 (Park et al., 2011).

바이오매스 가스화를 통한 몇 밀 전기 에너지 생산은 플랜트 출력이 우수하며, 특히 열병합발전은 하나의 에너지원로부터 열과 전력을 동시에 회수함으로써 종합 에너지 효율을 향상시키는 방법으로 각광받고 있다 (Manaitas, 2002; Paisley and Anson, 1999; Sim et al., 2015). 또한 수입유류 소비량의 22 %가 발전에 소요되고 있는 우리의 실정과 발전효율이 30 % 정도에 머물고 있다는 점 등을 고려할 때 열병합발전의 필요성이 충분하다 (Chae and Sung, 1982). 국내 시설재배 농가의 경영비 중 난방비가 차지하는 비중은 약 30~50 % 수준으로 시설농가 경영에 큰 영향을 미치고 있으며, 가온시

* Department of Bioresource and Rural Systems Engineering, Hankyong National University

** Research Institute of Agricultural and Environmental Science, Hankyong National University

*** Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

† Corresponding author

Tel.: +82-31-670-5134 Fax: +82-31-670-5139

E-mail: bb9@hknu.ac.kr

Received: October 26, 2016

Revised: December 14, 2016

Accepted: December 21, 2016

설 14,000 ha 중 8,454 ha가 경유를 이용하여 시설난방을 하고 있다(MAFRA, 2014). 현재 적지 않은 발작물 부산물 및 가수원 전지목과 같은 농업 부산물 바이오매스는 대부분 주변에 방치되고 있는 실정인데(Hong, 2015), 이러한 농가주변에 방치되고 있는 미활용 바이오매스를 이용하여 합성가스의 생산과 열병합발전 시스템의 운전을 통해 전기 및 열을 생산한다면 시설농업에서 소요되는 화석연료 및 난방에너지를 대체하여 시설농가의 경영여건 개선효과를 기대할 수 있을 것이다.

하지만 국내에서는 이러한 바이오매스 합성가스를 이용한 열병합발전 시스템에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 20 kW급 열병합발전 시스템에 연료로 바이오

매스 합성가스와 경유를 혼소하여 엔진 출력부하조건과 합성가스 유량 및 열량 변화에 따른 경유 대체율과 열병합발전 시스템의 에너지효율을 비교하여, 연료로서 합성가스의 적용가능성을 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용한 하향식 가스화 시스템(Liaoning intuition of energy resources, China)의 모식도는 Fig. 1과 같으며, 가

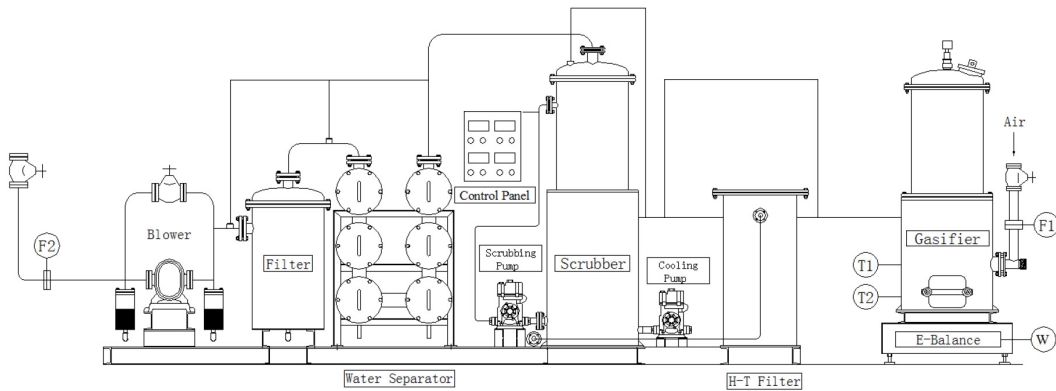


Fig. 1 Schematic diagram of downdraft gasification system (Wang et al., 2015)

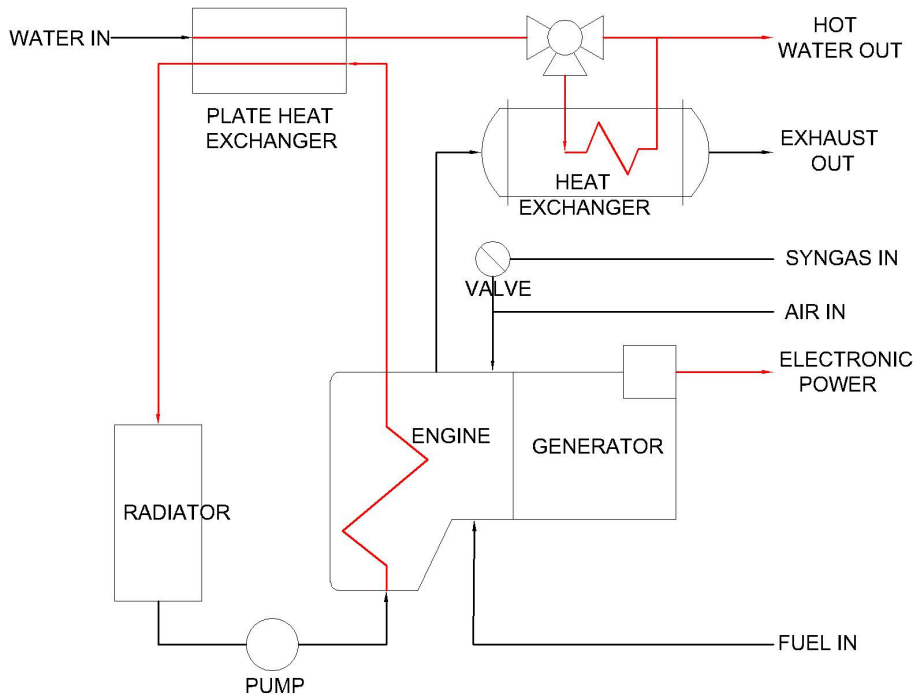


Fig. 2 Schematic diagram of Combined heat and power generation system

Table 1 Specification of diesel engine

Contents	
Type	4 cycle natural aspiration diesel engine
Bore (mm)	91.1
Stroke (mm)	100
Total piston displacement (cc)	2,607
Compression ratio	22
Rated output	45 Ps at 1,800 rpm (26 kW)
Fuel oil	Diesel

스화 반응조, 핫 필터, 습식 스크러버, 수분 분리기, 활성탄 필터, 블로워로 구성되어있다. 하향식 가스화 시스템으로 생산한 합성가스는 Biogas Analyzer (GSR-310, Sensoronic, Korea)를 이용하여 CO, CO₂, CH₄, H₂, O₂를 측정하였다.

본 연구에 사용된 열병합발전 시스템은 경기도 안산에 소재한 ㈜케이이씨시스템에서 제작된 것으로서, Fig. 2에 개략도로 나타내었다. 열병합발전 시스템의 엔진 (D4BB-G2, Hyundai motors, Korea)은 경유 기반의 배기량 2,607 cc, 4기통으로 제원을 Table 1에 나타내었다.

2. 실험방법

열병합발전 시스템의 출력을 유도하기 위한 장치로 전기 히터봉을 사용하였는데, 5 kW 용량의 히터봉 2개와 10 kW 용량의 히터봉 1개를 설치하여 총 20 kW의 출력이 가능하도록 하였다. 본 실험에서 사용한 열병합발전 시스템은 경유-바이오가스 혼소형 시스템으로 출력부하에 따라 가스 투입관의 개도율을 조절할 수 있다. 이에 따라 개도율 변화에 따른 합성가스의 투입 유량을 정량적으로 측정하기 위하여 측정범위 5~50 Nm³/h를 갖는 디지털 유량계 (DPE-S, Korea Flowmeter IND Co. Ltd., Korea)를 설치하였고, 저위발열량은 Biogas Analyzer로 측정된 조성을 식(1)로 계산하였다. 열병합발전 시스템의 출력부하에 따른 가스 투입관 개도율을 0~80 % 범위에서 조절하여 실험을 진행하였으며 (Table 2), 또한 출력부하와 개도율 변화에 따른 경유소비량을 측정하기 위하여 디지털 저울 (CUW6200H, CAS, Korea)을 설치한 후 시간에 따른 무게 변화로 경유 소비량을 측정하였다. 측정된 경유소비량에 대한 합성가스의 영향을 파악하기 위해 SAS 9.4를 이용하여 경유소비량의 차이를 유의수준 0.05에서 t-test로 유의성 분석을 진행하였다.

$$LHV(MJ/Nm^3) = (CO \times 12.622 + CH_4 \times 35.86 + H_2 \times 10.788) \times 0.01 \quad (1)$$

Table 2 Engine test condition

Engine load (kW)	Opening percentage with valve (%)
0	0
5	0, 10, 50, 70
10	0, 40, 50, 80
15	0, 40, 60, 80
20	0

열병합발전 시스템의 혼소 운전 시 출력부하별 합성가스의 경유 대체율은 식(2)로 산출하였고, 엔진효율은 출력에너지 대비 투입에너지로 식(3)과 같이 계산하였다. 열병합발전 시스템의 열 교환능력을 파악하기 위해 열병합발전 시스템 내부로 투입되는 냉수와 유출되는 온수의 온도를 K타입 열전대를 이용하여 측정하여 식(4)로 열효율을 계산하였으며, 엔진 및 열효율을 더해 열병합발전 시스템의 총 에너지효율을 계산하였다.

$$\text{Substitution rate}(\%) = \left[1 - \frac{\text{Consumption (Dual fuel)}}{\text{Consumption (Diesel only)}} \right] \times 100(\%) \quad (2)$$

$$\text{Engine efficiency}(\%) = \frac{\text{Output energy(MJ)}}{\text{Input energy(MJ)}} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$\text{Thermo efficiency}(\%) = \frac{\Delta \text{Temp} \times \text{Specific heat} \times \text{Time} \times \text{Flow rate}}{\text{Input energy}} \times 100(\%) \quad (4)$$

III. 결과 및 고찰

1. 경유 전소조건에서의 연료소비 특성

열병합발전 시스템의 기본 경유소비량을 파악하기 위해 경유 전소조건에서 출력부하를 0 kW, 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW로 유도하였고, 그에 따른 경유소비량과 엔진효율을 Fig. 3에 제시하였다. 출력부하를 0 kW로 유도한 경우 즉, 부하를 주지 않았을 때의 경유소비량은 1.8 L/h로 열병합발전 시스템의 기본적인 운전에 따른 소비량으로 판단된다. 출력부하 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW로 유도한 경우 각 조건에서 2.89 L/h, 3.98 L/h, 5.14 L/h, 6.62 L/h의 경유를 소비하였으며, 엔진의 효율은 17.59 %, 25.58 %, 29.68 %, 30.07 %로 출력부하가 증가함에 따라 엔진의 경유소비량과 효율이 증가하는 경향이 나타났다.

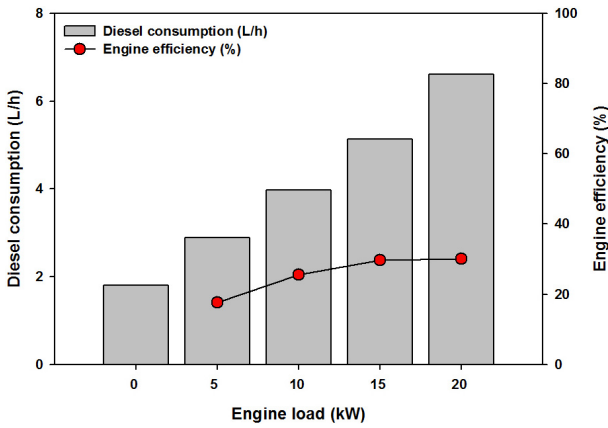


Fig. 3 Diesel consumption and engine efficiency for different to engine load

2. 합성가스 혼소 유량에 따른 연료소비 특성

합성가스 혼소에 따른 열병합발전 시스템 운전에서 앞서 본 실험을 위해 생산한 합성가스의 조성 및 열량을 분석하였다. 생산

Table 3 Input syngas flow rate to combined heat and power system

Engine load (kW)	Valve opening percentage (%)	Syngas flow rate (Nm ³ /h)
5	10	-
	50	6.88
	70	18.47
10	40	22.10
	50	24.17
	80	24.66
15	40	22.30
	60	24.21
	80	24.05

한 합성가스의 조성은 CO₂ 11.00~11.80 %, CH₄ 2.90~3.90 %, CO 22.20~30.00 %, H₂ 13.90~15.60 %로 측정되었고, 이에 따른 합성가스의 평균 저위발열량은 5.52 MJ/Nm³로 나타났다. 이는 선행연구(Uma et al., 2004; Kang et al., 2014; Wang et al., 2015)의 합성가스 조성 및 열량과 큰 차이가 나타나지 않았기 때문에 적절한 합성가스로 판단하였고, 열병합발전 시스템에 연료로서 적용하였다.

열병합발전 시스템으로 투입되는 합성가스의 유량을 Table 3에 정리하여 제시하였다. 출력부하 5 kW에서는 합성가스 밸브 개도율을 10 %, 50 %, 70 %로 설정하였으며, 10 %에서는 유량이 매우 적어 측정하지 못하였다. 50 %와 70 %개도율에서의 유량은 각각 6.88 Nm³/h, 18.47 Nm³/h로 개도율이 증가할수록 합성가스의 유량이 증가하였다. 출력부하 10 kW에서의 밸브 개도율 조건은 40 %, 50 %, 80 %로 설정하여 진행하였으며, 그에 따른 투입유량은 각각 22.10 Nm³/h, 24.17 Nm³/h, 24.66 Nm³/h로 나타났다. 출력부하 15 kW에서는 밸브 개도율을 40 %, 60 %, 80 %로 설정하여 22.30 Nm³/h, 24.21 Nm³/h, 24.05 Nm³/h의 합성가스를 투입하였다. 출력부하 10 kW와 15 kW조건에서는 5 kW와는 상이하게 개도율 변화에 따른 합성가스 유량의 큰 변화가 없었다. 이는 가스화 시스템에서 생산되는 합성가스의 양이 25.00 Nm³/h급으로 이로 인해 10 kW이상 조건에서는 밸브 개도율에 상관없이 비슷한 합성가스 유량이 나타난 것으로 판단된다.

앞선 결과에 의해 계산한 합성가스의 열량과 투입유량을 토대로 열병합발전 시스템의 출력부하 및 합성가스 밸브 개도율에 따른 투입연료의 열량과 경유 대체율을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 출력부하 5 kW에서는 10 %, 50 %, 70 %의 개도율 변화에 따라 각각 2.88 L/h, 2.91 L/h, 2.29 L/h의 경유를 소비하였으며, 경유 대체율은 0 %, 0 %, 20.76 %로 나타났다 (Fig. 4)

출력부하 10 kW에서는 40 %, 50 %, 80 %의 개도율 변화

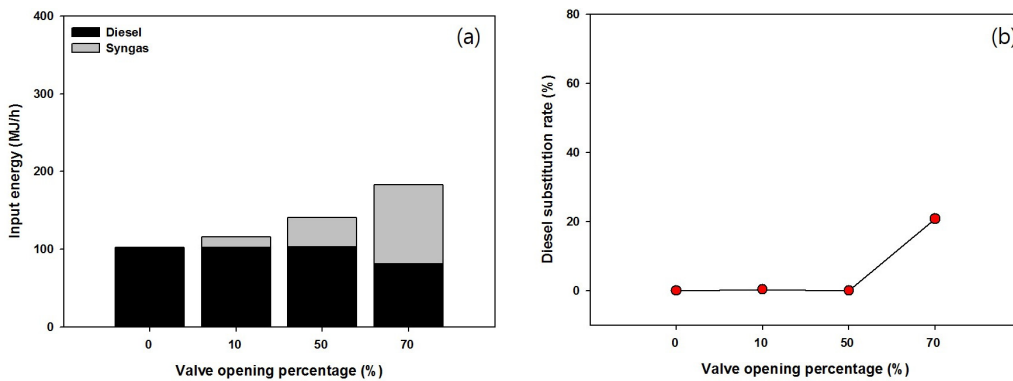


Fig. 4 Input energy [a] and diesel substitution rate [b] according to valve opening percentage at 5 kW engine load

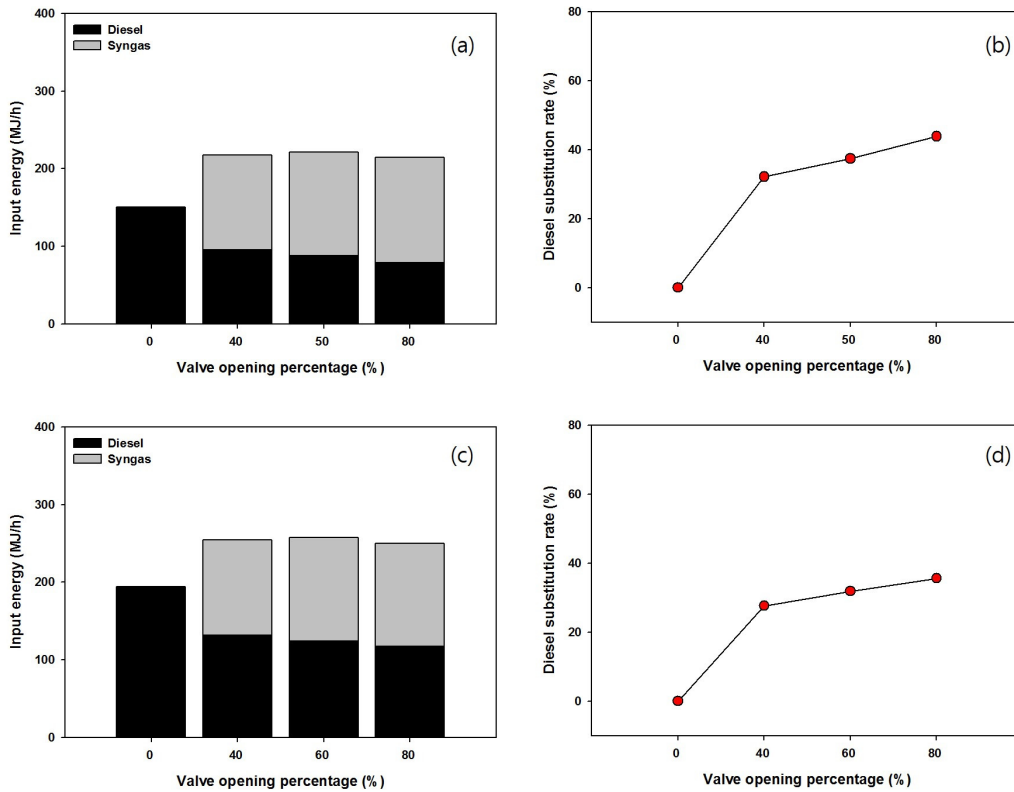


Fig. 5 Input energy [a: 10 kW; c: 15 kW] and diesel substitution rate [b: 10 kW; d: 15 kW] according to valve opening percentage

에 따라 경유소비량이 각각 2.70 L/h, 2.91 L/h, 2.23 L/h, 경유 대체율이 각각 32.16 %, 37.44 %, 43.97 %로 나타났다. 마지막으로 출력부하 15 kW 조건에서 설정한 개도율 40 %, 60 %, 80 %에 따라 각각 3.72 L/h, 3.50 L/h, 3.31 L/h의 경유 소비량과, 27.63 %, 31.91 %, 35.60 %의 경유 대체율이 나타났다 (Fig. 5 (c); Fig. 5 (d)). 출력부하 10 kW에 비해 15 kW에서 경유 대체율이 소폭 감소하는 결과가 나타났는데, Park et al. (2011)에 따르면 합성가스의 열량이 낮고, 부하조건이 증가하면 엔진의 흡기량이 증가하여 발전기 내 질소비율이 높아지며, 높아진 질소비율에 의해 화염전파속도가 느려진다. 화염전파속도가 느려지면 연소효율의 저하가 발생하는데, 그로 인해 15 kW 조건에서 10 kW에 비해 낮은 경유소비량이 나타난 것으로 판단된다.

출력부하 5 kW, 10 kW, 15 kW에 대해 유의수준 0.05에서 유의성 분석을 한 결과 p-value가 각각 0.67, 0.03, 0.02로 나타났으며, 이는 10 kW와 15 kW에서 경유소비량의 감소가 합성가스에 의한 것으로 판단된다.

합성가스 혼소 열병합발전 시 부하 및 개도율 변화에 따른 엔진효율을 Table 4에 제시하였다. 출력부하 5 kW 조건에서 합성가스 밸브 개도율을 10 %, 50 %, 70 %로 설정하였을 때

Table 4 Engine efficiency according to engine load condition

Engine load (kW)	Valve opening percentage (%)	Engine efficiency (%)
5	10	15.55
	50	12.77
	70	9.83
10	40	16.55
	50	16.25
	80	16.74
15	40	21.19
	60	20.97
	80	21.61

엔진효율이 각각 15.55 %, 12.77 %, 9.83 %로 나타났으며, 개도율이 증가함에 따라 엔진의 효율이 감소하는 경향이 나타났다. 출력부하 10 kW 조건의 개도율 40 %, 50 %, 80 %에 따른 엔진효율은 각각 16.55 %, 16.25 %, 16.74 %로 나타났으며, 출력부하 15 kW에서는 개도율 40 %, 60 %, 80 %의 엔진효율이 각각 21.19 %, 20.97 %, 21.61 %로 나타났다. 출력부하 10 kW와 15 kW 조건에서는 5 kW 조건과는 달리 개도율

에 따른 엔진효율이 일정한 값으로 나타났는데, 이는 10 kW와 15 kW 조건에서는 엔진 내부에서 합성가스의 연소가 상대적으로 안정적이기 때문으로 판단된다. Sahoo et al. (2012)은 낮은 출력부하에서 불충분한 산소 가용성으로 인해 합성가스의 불완전연소가 발생하기 때문에 낮은 경유 대체율과 엔진 효율이 나타난다고 한 바 있다.

3. 합성가스 열량에 따른 엔진의 연료소비 특성

합성가스를 생산할 때 연료특성 및 장치의 특성 등 다양한 변수에 따라 합성가스의 열량 차이가 발생하는데, 특히 건조 상태가 양호하고 균질한 연료를 이용하면 가스조성이 개선되어 열량이 상승한다. 이러한 열량조건의 변화를 주기 위하여 우드칩과 펠릿을 각각 이용한 열병합발전 시스템의 운전특성 파악하였다. 본 실험의 운전조건은 출력부하 10 kW와 15 kW이며, 경유소비량 및 대체율을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 실험에 사용한 합성가스의 열량은 5.52 MJ/Nm³ (저열량 합성가스)과 6.68 MJ/Nm³ (고열량 합성가스)이며, 유량은 출력부하 10 kW에서 22.10 Nm³/h, 15 kW에서 24.21 Nm³/h를 갖는다.

출력부하 10 kW에서 저열량 합성가스의 경우 2.70 L/h의 경유를 소비하였으며, 경유 대체율은 32.16 %로 나타났다. 동일한 조건에서 고열량 합성가스 투입의 경우 1.92 L/h의 경유를 소비하였으며, 경유 대체율은 51.76 %로 나타났다. 출력부하 15 kW에서 저열량 합성가스의 경우 경유소비량과 대체율이 각각 3.50 L/h, 31.91 %로 나타났으며, 동일조건 고열량 합성가스의 경우 1.86 L/h, 63.81 %가 나타났다. 모든 조건에서 합성가스의 열량이 증가함에 따라 경유 소비량이 감소하고, 경유 대체율이 크게 증가하는 경향이 나타났다. Jung et

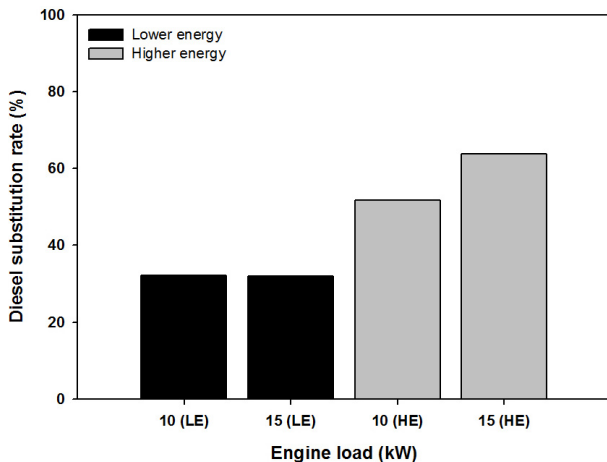


Fig. 6 Comparison of diesel substitution rate according to syngas calories [LE: Lower energy; HE: Higher energy]

al. (2010)에 따르면 합성가스의 열량이 증가할 경우 동일한 출력부하를 유지하는 요구되는 합성가스의 유량 및 경유의 양이 감소한다.

4. 열병합발전 시스템의 운전조건 별 에너지효율 비교

열병합발전 시스템에서 연료투입에 의한 열량과 발전 및 온수에 의한 열 회수량을 이용하여 열효율을 분석하였다(Fig. 7). 열병합발전 시스템의 운전 간 투입된 합성가스의 열량은 6.68 MJ/Nm³이며, 출력부하당 18.47 Nm³/h, 22.10 Nm³/h, 24.21 Nm³/h의 합성가스가 공급되었다. 열병합발전 시스템으로 투입되는 냉수의 유량은 15 L/min이며, 냉수의 온도는 25.0 °C로 일정한 수온을 유지했다. 열병합발전 시스템을 통해 열 회수를 위한 온수의 온도는 출력부하 5 kW 조건에서 43.9 °C로 상승하였으며, 44.05 MJ/h의 열이 회수되었다. 출력부하 10 kW에서는 46.5 °C로 온도가 상승하였으며, 80.92 MJ/h의 열량이 회수되었다. 출력부하 15 kW 조건에서는 50.5 °C까지 상승하였으며, 96.01 MJ/h의 열량이 회수되어 엔진 부하가 증가함에 따라 온수 온도와 회수하는 열량이 증가하는 경향이 나타났다. 배기가스 온도는 무부하조건에서 15 kW까지 79.3~200.3 °C로 안정적으로 상승하였지만, 출력부하 20 kW에서 207.1 °C~183.2 °C~236.5 °C의 불안정한 변화가 나타났다. 이는 출력부하 15 kW까지는 안정적인 운전이 진행하며, 20 kW에서는 불안한 연료공급으로 인해 다소 불안정한 운전이 나타난 것으로 판단된다.

전력부하조건별 연료투입량을 이용하여 경유 전소 및 합성가스 혼소 열병합발전 시스템의 엔진효율과 열효율을 Table 5에 정리하였다. 경유 전소에서는 각 출력부하에 따른 엔진효율이 17.59 %, 25.58 %, 29.68 %로 나타났으며, 합성가스 혼소에서는 각 출력부하에서 8.80 %, 16.70 %, 23.73 %의 엔진

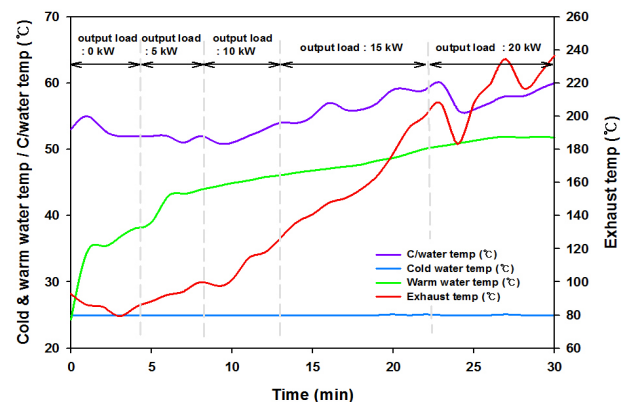


Fig. 7 Operation characteristic of combined heat and power generation system at dual mode

Table 5 Comparison of energy efficiency according to operating conditions

Load (kW)	Energy efficiency		
	Diesel only	Dual mode	
	Engine efficiency (%)	Engine efficiency (%)	CHP efficiency (%)
5 kW	17.59	8.80	43.61
10 kW	25.58	16.70	54.25
15 kW	29.68	23.73	65.92

효율이 나타났다. 출력부하당 경유 전소와 합성가스 혼소의 엔진효율 차이는 각각 8.79%p, 8.88%p, 5.95%p로 출력부하가 증가할수록 경유 전소와 합성가스 혼소에서의 엔진효율 차이는 감소하는 경향이 나타났다. 또한 출력부하당 경유 소비량의 차이는 각각 0.6 L/h, 2.06 L/h, 3.28 L/h로 출력부하를 추가할수록 경유 소비량의 차이는 증가하는 경향이 나타났다. 열교환기에 의한 열효율은 부하조건에서 34.81%, 37.55%, 42.19%로 나타났고, 열병합발전 시스템에서의 전체 효율은 부하조건에서 43.61%, 54.25%, 65.92%로 나타났다.

선행연구 Kim et al. (2000)은 음식물류 폐기물 바이오가스를 이용하여 출력부하 60 kW에서 85%의 경유를 대체하였으며, Uma et al. (2004)은 우드칩 합성가스를 이용하여 출력부하 30 kW에서 경유를 87% 대체하였다. 본 연구에서는 우드펠릿 합성가스를 이용하여 출력부하 15 kW에서 경유를 63% 대체하였는데, 선행연구에 비해 낮은 대체율을 보인다. 이는 본 연구에서는 선행연구에 비해 낮은 출력부하에서 열병합발전 시스템의 운전을 진행하였기 때문이며, 열병합발전 시스템의 효율을 증가시키기 위해서는 연료의 열량을 증가시키거나 최대출력에서 운전하는 경우 적용에 유리한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 합성가스 혼소엔진 (D4BB-G2, Hyundai motors, Korea)의 연료로서 바이오매스 합성가스의 유량과 열량을 달리하여 실험을 진행하였고, 그에 따른 경유 소비량과 엔진효율 변화를 관찰하여 합성가스의 적용 가능성을 검토하였다.

열병합발전 시스템에 투입되는 합성가스의 열량을 5.52 MJ/Nm³과 6.68 MJ/Nm³으로 달리하여 실험을 진행하였을 때, 각각 출력부하 10 kW에서 43.97%, 출력부하 15 kW에서 63.81%의 경유를 대체하였으며, 그에 따른 엔진효율은 각각 16.55%, 23.73%로 나타났다.

합성가스 혼소 열병합발전 시 출력부하 5 kW, 10 kW, 15

kW에서 열효율은 각각 34.81%, 37.55%, 42.19%로 나타났으며, 열병합발전 시스템의 총 에너지효율은 43.61%, 54.25%, 65.92%로 나타났다.

열병합발전 시스템의 운전 시 경유 전소에 비해 합성가스 혼소의 경우 에너지효율이 낮지만 출력부하가 증가할수록 그 차이는 감소하고, 경유 대체율은 증가하는 경향이 나타난다. 이러한 열병합발전 시스템의 혼소 연료로서 합성가스의 적용은 적절하며, 시설난방을 사용하는 농가에 적용한다면 전기 및 난방비용 절약에 따른 경영여건 개선에 효과적일 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원받은 연구비로 수행한 과제입니다.

REFERENCES

- Ahn, S. Y., G. M. Choi, and D. J. Kim, 2007. The effect on the components variation of syngas by changing temperature and steam addition in biomass gasification process. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineerings* 1391-1396 (in Korean).
- Cha, H. S., K. B. Hur, and S. H. Song, 2015. Study on the Performance of a Spark Ignition Gas Engine for Power Generation fueled by the Methane/Syngas Mixture. *Journal of the Korean Institute of Gas* 19(5): 7-12 (in Korean).
- Chae, J. O. and J. S. Sung, 1982. Feasibility Study of District Heating Combined Heat and Power in Seoul. *The Korea Society of Mechanical Engineers* 22(3): 223-232 (in Korean).
- Heywood, J. B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Hong, S. G., 2006. Effect of Biomass Fuel Conditions on Biomass Gasification. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(3): 63-71 (in Korean).

6. Hong, S. G., 2015. Strategies for Increasing Biomass Energy Utilization in Rural Areas - Focusing on heating for greenhouse cultivation -. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(6): 9-20 (in Korean).
7. Jang, J. Y., T. K. Kim, Y. D. Yoo, and Y. S. Yun, 2003. Applicability to Engine Fuel of Low Caloric Synthetic Gas from Coal Gasification. *Journal of the Korean Society for Energy Engineering* 595-600 (in Korean).
8. Ji, C. W., S. Wang, and B. Zhang, 2010. Effect of spark timing on the performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at lean condition. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(5): 2203-2212.
9. Jung, H. J., J. W. Lee, J. W. Lee, J. H. Moon, I. S. Choi, S. S. Park, J. H. Hwang, T. U. Yu, and U. E. Lee, 2010. An Experimental Study on the Operation of a Power Generation Engine with Syngas from RPF. *Journal of the Korean society of combustion* 15(3): 48-56 (in Korean).
10. Kang, K., L. Wang, and S. H. Hong, 2014. The Characterization of Woodchip Torrefaction and Byproduct Gas. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 55-62 (in Korean).
11. Kim, Y. M., J. H. Lee, and S. H. Joo, 2000. Development of a Biogas Engine for Cogeneration System. *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* 30: 33-42 (In Korean).
12. Lee, C. and S. M. Cho, 2006. Analysis on the Combustion Characteristics of Low-Btu Synthetic Gases in Gas Engine. *Clean Technology* 12(2): 78-86 (in Korean).
13. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs), 2014. *Survey on Vegetable Production and Greenhouses 2013* (in Korean).
14. Manitas, K., 2002. Progress in Biomass Gasification: An Overview. *Journal of Progress In Thermochemical Biomass Conversion*. 1.
15. Paisley, M. A. and D. Anson, 1999. Biomass Gasification for Gas Turbine based power Generation. *Journal of engineering for gas turbine and power* 120(2): 284-288.
16. Parikh, P. P., A. G. Bhave, and D. V. Kapse, 1989. Study of thermal and emission performance of small gasifier-dual-fuel engine systems. *Journal of Biomass*. 19(1-2): 75-97.
17. Park, C. W., S. Y. Lee, C. G. Kim, S. Y. Won, and J. H. Lee, 2010. A Study on Applicability to Dual-Fuel Engine of Low Caloric Gas. *Journal of the Korean Institute of Gas* 14(1): 15-20 (in Korean).
18. Park, S. H., C. W. Park, S. Y. Lee, and C. G. Kim, 2011. A Study on the Combustion Characteristics of a Generator Engine Running on a Mixture of Syngas and Hydrogen, *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineering* 35(7): 693-699 (in Korean).
19. Park, S. N., Y. S. Yoon, N. R. Kim, J. H. Gu, and H. J. Sung, 2011. The study on energy utilization through rice husk gasification. *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy* (in Korean).
20. Sahoo, B. B., N. Sahoo, and U. K. Saha, 2012. Effect of H₂:CO ratio in syngas on the performance of a dual fuel diesel engine operation. *Journal of Applied Thermal Engineering* 49: 139-146.
21. Shin, C. H. and D. H. Park, 2014. Estimation of Greenhouse Gas and Environmental Assessment in Co-generation Palnt. *Journal of Environmental Science International* 23(12): 2035-2044 (in Korean).
22. Sim, K. H., M. G. Kim, Y. P. Lee, and S. J. Jang, 2015. Performance Measurements of A Stirling Engine for Household Micro Combined Heat and Power with Heat Source Temperatures and Cooling Flow Rates. *The Journal of Fluid Machinery* 18(1): 37-43.
23. Sridharm, G., P. J. Paul, and H. S. Mukunda, 2001. Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel-an experimental analysis. *Journal of Biomass and Bioenergy* 21(1): 61-72.
24. Uma, R., T. C. Kandpal, and V. V. N. Kishore, 2004. Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes. *Journal of Biomass and Bioenergy* 27: 195-203.
25. Wang, L., K. Kang, T. H. Lee, S. H. Choi, and S. G. Hong, 2015. Characteristics of the Gasification from Mixed Fuel of Charcoal and Undried Woodchip. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 57(5): 81-88.
26. Yoon, S. J., Y. K. Kim, J. G. Lee, K. S. Kim, and B. C. Kang, 2011. A Study on Cogeneration System Using 5ton/day Scale Downdraft Waste Wood Gasifier. *Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy* (in Korean).