

## 폐기물 열분해 합성가스를 이용한 발전용 엔진구동에 대한 실험적 연구

정효재\* · 이정우\*\* · 이재욱\*\*\* · 문지홍\*\*\* · 최인수\*\*\* · 박상신\* · 황정호\* · 류태우\*\*\* · 이은도\*\*\*\*†

### An Experimental Study on the Operation of a Power Generation Engine with Syngas from RPF

Hyo Jae Jeong, Jeong Woo Lee, Jae Wook Lee, Ji Hong Moon, In Soo Choi,  
Sang Shin Park, Jung Ho Hwang, Tae U Yu and Uen Do Lee

#### ABSTRACT

Performances of power generation engine were investigated with syngas from RPF. A stoker type, multi-staged pyrolysis-gasification system, was employed for syngas generation and the syngas was refined with the sequential cleaning processes composed of a gas cooler, a bag filter and a wet scrubber. 20 kW commercial syngas power generation engine was adopted to burn the cleaned syngas which is mainly composed of hydrogen, carbon monoxide, carbon dioxide and methane. The performance of the engine was tested with various syngas compositions and the results were compared to LNG case. Electric power output, exhaust gas temperature, and emission characteristics were measured, and the efficiency of engine generation was investigated as a function of load of power generation.

**Key Words** : Pyrolysis, Gasification, Syngas, Power generation engine, Combustible waste, RPF(Refused Plastic Fuel)

#### 1. 서론

전 세계적으로 산업화가 가속되고 생활수준이 향상됨에 따라 발생된 에너지 수요의 급격한 증가와 각종 산업·생활 폐기물의 발생 증가는 세계 각국에서 에너지의 안정적인 수급과 폐기물의 친환경적 처리라는 당면 과제로 나타나고 있다. 특히 좁은 국토에 많은 인구가 밀집해 있고, 부존자원이 없는 국내의 경우 이 두 가지 문제는 국가 경쟁력과 산업에 막대한 영향을 주는 주요 현안이다. 이를 해결하기 위해 다양한 노력이 진행되고 있는데 화석연료를 사용하는 기존 발전 인프라에서는 발전 시스템의 고효율화에 대한 요구가 증가하고 있고 폐기물 처리 분야에서는 친환경적인 처리와 동시에 폐기물의 청정에너지화를 통한 에너지문제 해결에 대한 요구도 증가하고 있다. 국내의 경우 1980년대 후반부터 스토커, 로터리 킬른, 유동층 등을 이용한 직접 연소방식의

폐기물 소각시설을 통해 폐자원의 에너지화를 수행해 왔다. 하지만 화석연료 가격이 가파르게 상승하고, 폐기물 소각에 의한 자원 회수 기술이 한계에 다다른 시점에서 소각에 비해 보다 친 환경적이며 에너지 효율이 높은 새로운 처리 기술에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다[1].

최근 이러한 요구에 부응할 수 있는 기술로 폐기물 가스화를 통한 에너지 생산기술이 적합한 대안으로 제시되고 있다. 1990년대 후반부터 해외에서도 도입된 석탄 가스화 기술을 기반으로 폐기물 가스화 기술이 개발되기 시작하였으며, 초기 도입된 해외 공정의 요소기술 및 핵심부품에 대한 국산화 기술 개발을 추진하여 현재까지 다양한 형태의 파일럿 규모 연구가 주로 수행되어 왔으며 상용화를 위한 연구가 완성 단계에 진입해 있는 것으로 평가되고 있다. 현재 선진국 대비 폐기물 자원화 기술개발 현황을 살펴보면 소각열 회수 분야의 기술 수준이 73%로 가장 근접해 있으나, 고품연료화의 경우 66.8%, 열분해 유효의 경우 58.4%, 가스화 분야 55.5%로 폐기물을 가스화하여 자원화 하는 분야의 기술이 가장 취약한 실정으로 연구적인 측면에서도 가스화를

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 과학기술연합대학원대학교(UST)

\*\*\* 한국생산기술연구원

† 연락처, uendol@kitech.re.kr

통한 자원 회수기술개발에 대한 필요성이 매우 높다고 할 수 있다[2].

본 연구에서는 이러한 필요성을 견지하고 합성가스의 이용기술 개발을 위해 폐기물 유래 합성가스의 이용기술 개발을 위해 폐기물 유래 합성가스를 이용해 합성가스엔진을 구동하고 엔진에 연결된 발전기를 통해 전력을 생산하는 합성가스 발전 시스템의 운전 특성을 살펴보았다. 저급 고체 연료의 가스화를 통해 발생된 합성가스의 1차적 이용기술로 보일러 혼소, 가스 터빈, 가스 엔진 등 다양한 기술이 제시되고 있으나 가스 엔진의 경우 초기 투자비가 작고, 운전이 용이하며 중소규모 시스템에서 비교적 높은 효율을 가진다. 따라서 발생현황이나 이송 등의 제약에 의해 중소규모의 분산형 발전 기술에의 이용이 가장 현실적인 폐기물 연료의 특성상 가스화 및 엔진 발전 기술의 조합이 가장 상용화에 근접하다고 할 수 있다[3-5]. 일반적으로 합성가스는 LPG, LNG와 같은 고발열량 가스 연료에 비해 발열량이 낮고 반응성 및 화염속도도 낮아 실제 연소 현상이 기존 연료와 매우 상이한 특성을 지니게 된다[6]. 몇몇 기존 연구에서 Pilot 규모의 가스화 시스템과 가스엔진을 연동하여 함께 구동한 예를 보고하고 있는데 이들의 결과에 따르면 일반 상용 연료를 사용하였을 때 보다는 불안정하지만 최대 4,000 rpm 정도의 출력 발생도 가능하다고 보고된 바 있으며 각 시스템별 안정적 운전 영역에 대한 연구결과가 보고되

었다[7-11]. 엔진 제작사의 실험 결과나 기존 연구에 따르면 일반적으로 최소한 발열량이 1,000 kcal/Nm<sup>3</sup> 이상이어야 가스엔진의 안정적 운전이 가능한 것으로 보고된 바 있다[12].

본 연구에서는 RPF(Refused Plastic Fuel)를 주 연료로 하고, 국내에서 개발된 다단 열분해 가스화 시스템을 이용하여 합성가스를 생산하였다. 이 가스화 시스템은 1.5톤/일 규모의 Pilot 규모 실험 장치로 Stoker 가스화 방식을 채택하고 Tar 개질 시스템을 장착하여 합성가스의 발열량을 높인 시스템으로 가스화와 관련된 세부적인 사항은 참고문헌에 잘 나타나 있다[13,14]. 연구에 사용된 가스화기는 약 2,000 kcal/Nm<sup>3</sup> 정도의 비교적 높은 발열량을 가지는 합성가스 생산이 가능하며 엔진 전단에 LNG 공급 라인을 설치하여 엔진에서 합성가스와 LNG를 선택적으로 사용할 수 있도록 구성하였다[15]. 본 연구에서는 Pilot 규모의 가스화기와 함께 안정적인 연동 운전 구현을 목표로 실험을 진행하였으며 서로 다른 조성을 가지는 합성가스에 대해 엔진의 발전 효율, 배가스 온도, 배가스 내 주요 환경오염 물질인 NOx와 일산화탄소양의 변화를 관찰하였다.

## 2. 실험 장치의 구성

Fig. 1은 연구에 활용된 실험 장치의 개략도를 나타낸 그림이다. 주요 장치의 상세 설명은 아래와 같다.

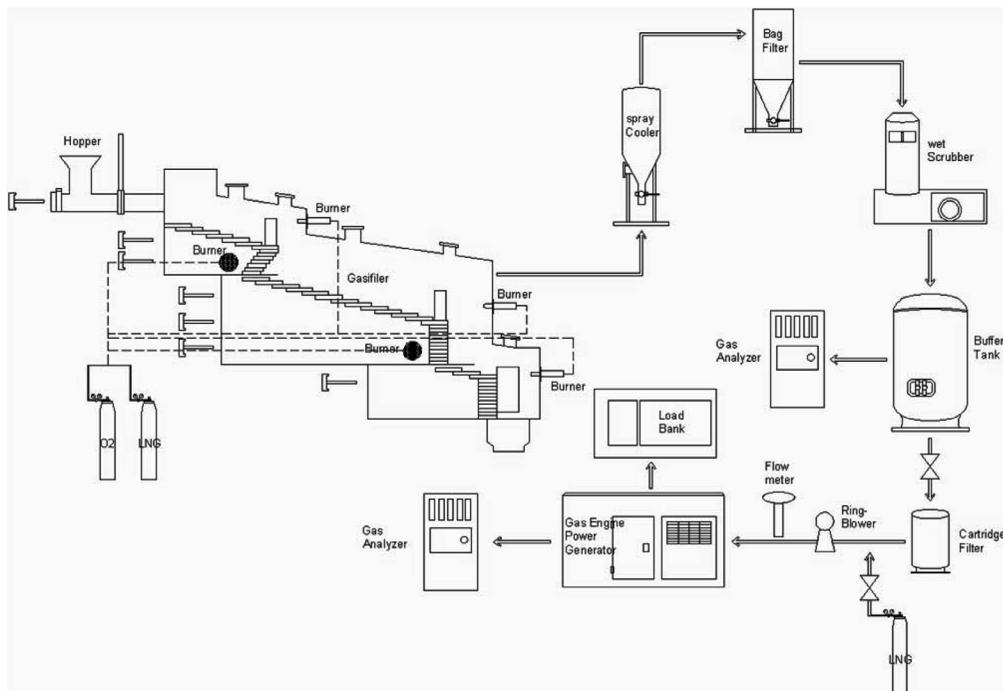


Fig. 1. Experimental setup.

## 2.1. 가스화기

본 연구에 적용된 열분해 가스화로 방식은 운전 및 유지보수의 편의성 측면, 대용량으로 scale-up할 경우 기존 연구 및 상용화된 요소기술을 통해 용이성을 가지는 상압 stoker 방식으로 채택하였다[13,14]. Stoker 방식의 소각로는 국내 대용량 생활폐기물 소각처리시설 대부분이 채택하고 있는 방식이지만, 열분해 및 가스화에 적용된 사례는 많지 않다[16,17]. 현재, 국내의 stoker 방식의 열분해용으로는 열분해 용융가스를 2차 연소로에서 모두 소각하는 형태로 운영되거나 연구되어 왔다[18,19]. 다만 열분해 가스화로에서 합성가스가 생성되는 공정은 다단으로 이루어진 열분해로에 RPF가 투입되면 350~400℃로 유지되는 1차 열분해로에서 1차 열분해가 일어나며 이 단계에서 염소, 황 등의 오염물질이 배출된다. 600~800℃로 유지되는 2차 열분해로에서는 1차 열분해로에서 가열된 폐기물이 투입되어 본격적으로 열분해가 진행된다. 이전 단계에서 급격하게 열분해 되어 감량화 된 폐기물이 3차 부분 산화조에 공급되어 하부에서 공급되는 산소에 의해 부분산화 되면서 대부분의 char가 반응된다. 이때 발생하는 고온의 가스는 2차 열분해에 필요한 열을 공급하면서 2차열분해 상부로 배출되고 온도는 900℃ 이상이 유지되며 남아있는 Ash는 다음 단계 Ash Tank로 배출된다. 1차 열분해로 상부에 배출구가 위치하고 있으며 열분해 된 염소는 Cl<sub>2</sub>, HCl 형태로, 황은 H<sub>2</sub>S, COS 형태로 외부로 배출되고 세정되어 다시 2차 열분해가스와 합류된다. 2차 열분해로 단계에서 생성되는 열분해 가스는 부분산화 가스와 같이 상부 배출구로 배출되고, 개질기를 통과하면서 함유된 tar 및 미연 물질이 반응하여 고발열량 가스를 생성한다. 이러한 구조는 각 개별 단에서 염소, 황 등을 효과적으로 제거하는 동시에 고발열량의 합성가스를 제조하는데 유리한 장점을 가진다[13,14].

## 2.2. 합성가스 발전용 엔진

본 연구에서는 국내 합성가스 발전 엔진 전문 제작 업체인 H사에서 개발한 합성가스 발전용 엔진을 사용하였다. 대상 엔진은 국내 K사에서 개발한 디젤 엔진을 바탕으로 합성가스용으로 개조하였다. 엔진은 수랭식 4기통으로 이루어져 있고 전기 접화 방식으로 배기량은 2,300 cc, 압축비는 15이다. 다음 Table 1은 본 연구에 사용된 발전기의 주요 제원이다. 본 연구의 목적은 RPF의 열분해를 통해 얻어진 합성가스의 엔진 적용을 통해 안정적인 전력을 생산하는 것으로 상용 발전용 엔진을 이용하였다. 대상 발전용 엔진은 디젤 엔진을 대상으로 합성 가스를 공기와 미리 혼합하여 공급하도록 혼합기 부분

**Table 1.** The specification of syngas engine

Engine Type	4 Cycle syngas Engine
Fuel	LNG or Syngas
Number of Cylinder	4
Intake System	Turbo Charger
Power	20kWe (Syngas)
RPM	1800RPM
Power generator	Induction motor type (유도발전기 형식)

이 추가되었으며 밸브를 통해 공기량을 조절하여 혼합비의 조정이 가능하도록 제작되었다. 대상 엔진은 기존의 CNG와 LPG 등의 연료를 통해서 구동되는 엔진에 도시가스와 혼합가스 그리고 바이오가스를 적용하기 위하여 연료 공급라인 및 레귤레이터를 설계 제작하였고 연료의 체적 효율을 높이기 위해 인터쿨러의 용적을 확대하는 동시에 천연가스와 비교해 발열량이 낮은 합성가스를 사용할 경우 주입량을 높이기 위해 혼합기의 용적 또한 확대 개조하였다. 발전기 부분은 가스엔진에서 발생한 출력으로 유도발전기를 돌려서 전력을 생산하는 시스템으로 발생된 전력은 전열기를 통해 소모되도록 구성하였다. 엔진 및 발전기는 방음장치가 된 캐노피 안에 장착 되어 있고 진동에 의한 영향을 줄이기 위하여 하단부에 고무로 된 댐퍼를 설치하였다.

## 2.3. 연료 공급 시스템

발전용 엔진은 열분해 가스화 장치에서 생산된 합성가스를 안정적으로 공급받기 위해 RPF 열분해 가스화 장치 후단부에 설치하였다. 생산된 합성가스는 열교환기, 가스쿨러(Gas Cooler), 백필터(Bag Filter), 스크리버(Scrubber)를 순차적으로 거쳐 버퍼탱크(Buffer Tank)에 저장되어 되고 배관을 통해서 버퍼탱크로부터 엔진까지 연료가 공급된다. 버퍼탱크에서 나온 합성가스는 다시 한 번 카트리지 필터(Cartridge Filter)를 통해 남아있는 불순물을 제거하게 되고 링블로어(Ring-Blower)를 통해 이송되어 엔진에 공급된다. 엔진의 위쪽에 위치한 버퍼 탱크에서 내려온 배관이 카트리지 필터를 통과하고 후단에 위치한 링블로어를 통해서 가압이 된다. 링블로어를 통해 이송되는 합성가스는 오리피스(Orifice) 유량계에 의해 유량이 측정되고 엔진의 전단에 위치한 레귤레이터(Regulator)에 의해 조정된 압력으로 엔진에 공급된다. 엔진을 안정적으로 가동시키고 연료의 특성에 따른 엔진의 거동 특성을 비교 분석하기 위해 본 연구에서는 LNG와 합성가스를 동시에 공급이 가능한 이중 연료 공급시스템(Bi-fuel System)을 채택하였다.

### 2.4. 계측 시스템

엔진의 배기가스는 실린더 후단의 배기관외의 별도 포트에서 이루어졌으며 온도와 CO, NOx 등을 실시간으로 분석할 수 있는 배가스 분석기(Greenline 9000)를 이용하여 측정하였다. LNG를 이용해 엔진을 가동하여 발전 특성과 배기가스 분석을 실행한 후 합성 가스를 이용하여 분석하였다. 다만 열분해 장치를 통해 생성되는 합성가스의 농도는 NDIR 장치(ABB A2020)를 이용해 계측하였다.

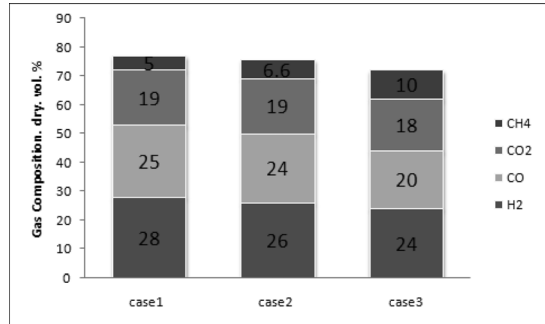
### 2.5. Syngas의 특성

Table 2, Fig. 2는 RPF의 다단열분해를 통해 얻어진 합성가스의 조성구분과 발열량을 나타낸 것이다. 공급되는 합성가스 발열량에 따른 엔진의 발전특성을 확인하기 위해 위 세 가지 경우에 대해 실험하였으며 각 조건은 열분해 가스화로의 운전특성에 따라 생성된 합성가스의 조성구분과 발열량이 일정시간 이상 지속되는 구간으로 나누었다. RPF는 시간당 40 kg 내외로 투입되었으며 이때 발생하는 합성가스의 양은 운전조건에 따라 다르나 시간당 100~200 Nm<sup>3</sup> 사이로 엔진 구동에 충분한 양으로 버퍼탱크에 저장시켜 사용되었고 남은 합성가스는 flare를 통해 연소시켜 소진하였다. Fig. 2에서 보듯와 같이 각 실험 조건에서 공히 합성가스의 대부분은 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>로 이루어져 있으며 Case 3의 경우 다른 조건에 비해 CH<sub>4</sub>의 농도가 높은 것을 확인할 수 있으며 Case 별로 조성의 차이에 따라 발열량에 차이가 나타남을 알 수 있다. Case 1보다 Case 2의 발열량이 높으며 메탄 농도가 높은 Case 3의 경우가 가장 높은 발열량을 가진다. 가스 농도 분석은 합성가스 내 수분을 제거한 습가스의 농도를 측정하였으며 합성가스 계측에 사용된 NDIR 분석기가 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄 및 산소의 농도만 측정할 수 있으므로 계측되지 않았지만 미량의 C<sub>2</sub> 이상의 탄화수소 연료와 가스화 및 이송과정에서 유입될 수 있는 질소가 포함되어 있다. 합성가스 내 수소농도가 비교적 높은 편이어서 연료와 산화제의 예혼합 이후 엔진에 공급하여 연소 시 역화(Flash back)가 발생할 수 있어 운전 조건에 따라 수소 농도의 최대 허용치가 존재한다.

본 연구에서는 역화가 발생하지 않는 범위에서 실험하였으며 가스 조성 변화에 따라 엔진 운전조건을 바꿔가면서 실험을 진행하였다.

**Table 2.** Caloric value of syngas

Case1	1905.4 kcal/Nm <sup>3</sup>
Case2	1960.6 kcal/Nm <sup>3</sup>
Case3	2079.2 kcal/Nm <sup>3</sup>



**Fig. 2.** Compositions of syngas.

### 2.6. 합성가스 엔진의 구동과 발전

실험에서 사용된 발전용 엔진은 한전 연결을 통한 매전이 가능한 시스템으로 엔진의 회전수(RPM)는 60 Hz의 전력을 생산하기 위해 고정되어 있다. 발전 용량에 맞추어 공급되는 합성가스는 혼합기에 의해 외부 공기와 혼합되고 공기와 혼합된 예혼합기(Premixture)는 인터쿨러(Inter Cooler)를 거쳐 엔진 내부의 스로틀(Throttle) 밸브에 의해 조절되어 실린더에 공급된다. 엔진의 효율을 증가시키기 위하여 터보차저(Turbo charger)와 인터쿨러가 장착되어 있으며 배출되는 배기가스의 압력을 이용하여 터보차저를 가동하고 인터쿨러는 혼합기의 체적 효율을 높이기 위해서 혼합기의 온도를 낮추는 역할을 한다. 엔진에 공급된 예혼합기는 설정된 점화 시간(Ignition timing)에 따라 스파크에 의해 점화되고 피스톤을 작동시킨다. 엔진에서 발생한 출력은 유도 모터 발전기를 구동시켜 전력을 생산한다. 유도 모터는 1,800 rpm으로 회전하도록 설정되어 있고 엔진에 의해서 발전기가 구동을 하면 60 Hz의 전력을 생산한다. 합성가스엔진 발전기는 실험가동시 5시간 이상 지속운전 하였다.

## 3. 실험결과

합성가스와 LNG의 실험결과를 비교하기 위하여 먼저 LNG를 이용하여 실험을 수행하였다. 합성가스 실험 결과의 경우 Pilot scale의 다단 열분해 장치 및 정제 시스템을 연동 운전하는데 많은 노력이 들기 때문에 앞서 제시된 3가지 조건에서 주로 실험하였으며 실험 결과는 각 출력에서 가스엔진 발전기가 안정화 된 후 5분 동안 측정된 값이다.

Fig. 3은 제어부의 설정 발전량에 대해 실제 발전 성능을 실험 결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 3을 보면 제어부의 설정을 5 kWe씩 늘여감에 따라 실제 발전량이 비교적 잘 일치하여 증가함을 보여주고 있다. 실제 발전량의 조절은 엔진에 공급되는 연료와 공기의 양에 의해 조절되는데 20 kWe

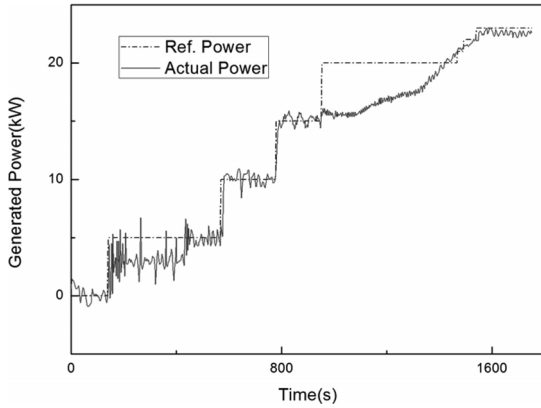


Fig. 3. Response of the engine with respect to the setting.

부분에서 설정치에 대한 응답에 차이가 나는 부분은 특정 위치에서 보조 밸브를 수동으로 조절하여 연료와 공기의 혼합비를 조절할 필요가 있는 부분이 있기 때문에 민감한 조절을 통해 설정치를 맞출 수 있다. 발전용 엔진의 경우 출력을 설정하면 위와 같이 변경할 필요 없이 한 조건에서 운전하게 되므로 위와 같은 테스트는 출력별 엔진의 기동 특성을 살펴보기 위해 수행하였다. 이처럼 발전 부하를 변경하며 테스트한 결과 최대 23 kW의 전력 생산이 가능함을 확인하였다.

Fig. 4는 LNG를 연료로 사용하였을 때 발전출력의 변화와 배기가스 온도의 변화를 나타낸 그림이다. 발전부하를 5 kW부터 20 kW까지 5 kW단위로 증가시키며 배기가스의 온도를 열전대를 이용하여 측정하였다. 대상 엔진이 합성가스를 사용하기 위해 개조한 엔진이기 때문에 LNG의 경우 공연비의 제어가 불가능하여 일반적인 엔진의 조건인 희박 연소 조건 보다 높은 공연비 1.02 정도로 맞추어 실험을 진행하였다. 공연비는 배가스에 포함되어 있는 산소농도를 측정하여 환산하였다. 그림에서 보는바와 같이 발전부하가 증가함에 따라 배기가스의 온도가 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 발전부하에 따른 합성가스 유량을 나타낸 그림이다. 발전용 엔진의 특성상 일반적으로 발전부하를 정하고 이에 필요한 연료와 공기의 혼합비를 맞추어 공급하게 되므로 위와 같이 도시하였다. 합성가스의 경우 발전기의 무부하에서 시작하여 3 kW, 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW로 발전부하를 높이며 실험을 수행하였다. 발전부하에 알맞은 출력을 내기위한 합성가스의 유량변화는 오리피스 유량계를 통해 측정하였다. 그림에서 보는바와 같이 발전부하가 증가함에 따라 엔진 구동에 필요한 합성가스의 유량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용된 합성가스의 조성 및 발열량의 변

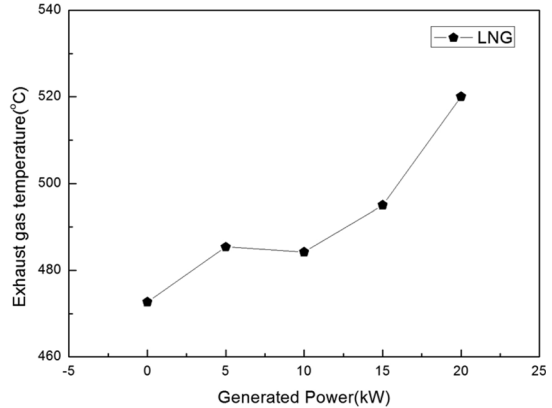


Fig. 4. Temperature of exhaust gas (Fuel: LNG).

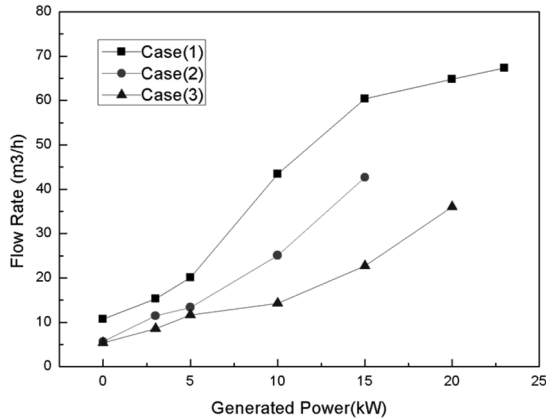


Fig. 5. Power output vs syngas flow rate.

화는 Fig. 2와 Table 1에 도시된 바와 같다. 그림에서 보는바와 같이 합성가스 조성의 변화에 따라 필요유량에 차이가 있음을 알 수 있다. 합성가스의 조성이외의 원인으로 합성가스의 공급온도도 언급할 필요가 있다.

각 Case별로 실제 Pilot 규모의 가스화기에서 서로 다른 조건의 가스화 공정을 거쳐 합성가스가 공급되므로 가스 발생량 및 조성에 변화가 생기게 된다. 가스화기 후단의 정제 및 열 교환 과정에서 이러한 변화를 완벽히 흡수하여 동일 온도를 가지는 합성가스를 생산할 수 없으므로 각 조건별로 합성가스의 공급온도에 약간의 차이가 발생하였다. 예를 들어 Case 1의 합성가스의 경우 공급 온도가 섭씨 52도이고, Case 3에서는 섭씨 25도로 공급되어 비교적 높은 온도의 합성가스가 공급되는 Case 1의 경우 인터쿨러로 공급되는 유량의 체적효율이 Case 3의 경우보다 작아지게 된다. 발열량에 비해 그 차이가 작지만 필요 유량에 영향을 주므로 언급할 필요가 있다. 각 조건별 발열량의 변화에 대한 영향을 살펴보면 합성가스의 발열량이 높을수록 같은 발전

부하를 유지하는데 필요한 합성가스의 유량이 작아짐을 알 수 있다. 앞의 Table 1에서 살펴본 바와 같이 Case 1에서 합성가스 내 메탄의 비율은 5%, Case 2에서는 6.6%, Case 3에서는 10%로 점점 높아지며 메탄의 비율이 증가하여 발열량이 높아질수록 같은 출력을 내는데 필요한 합성가스의 유량은 감소함을 알 수 있다. 그러므로 엔진 발전용 합성가스 이용 시스템에서는 가스화 시스템에서 허용하는 범위에서 정제에 필요한 부하를 줄이고 엔진에서 보다 효율적 운전을 위해 합성가스 내 메탄의 수율이 높아지도록 시스템을 설계하고 운전조건을 제어하는 것이 유리하다.

Fig. 6에 합성가스의 경우 발전량에 따른 배기가스 온도변화를 나타내었다. 발전용 엔진의 특성상 회전수(RPM)조절이 불가능하므로 출력은 실린더 내로 공급되는 연료의 양에 의해 조절 된다. 실린더로 공급되는 합성가스의 유량은 발전기의 출력에 비례하고 배기가스의 온도는 공연비에 직접적인 영향을 받는다. 한편 Fig. 4와 Fig. 6을 비교해 보면 발전기의 출력이 증가할수록 LNG와 합성가스의 경우 모두 배기가스의 온도가 상승한다. 모든 실험조건에서 엔진의 출력을 높이기 위해 실린더로 공급되는 연료의 양을 늘림과 동시에 공연비를 점차 감소시켜 연소 온도를 높이는 방향으로 실험을 진행하였으므로 출력의 증가와 함께 배기가스의 온도가 증가하는 경향을 보이게 된다. LNG와 합성가스의 배기가스의 온도를 살펴보면 LNG의 경우가 더 높다. 이는 LNG의 경우 발열량이 높기도 하지만 실험 조건에서 초기 공연비를 1 근처로 맞추어 실험하였으며 합성가스의 경우 대부분 연료 희박조건에서 실험을 수행하였기 때문이다. Fig. 6에서 각 조건별 배기가스 온도의 변화를 살펴보면 Case 2가 가장 높고, Case 1과 Case 3의 순서로 배기가스 온도가 낮아진다. 이는 각 조건의 공연비와 밀접한 관련이 있으며 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 온도가 가장 높았던 Case 2의 공연비가 1에 가장 가깝고, Case 1과 Case 3 순으로 공연비가 측정되었음을 알 수 있으며 이러한 공연비의 영향이 배기가스 온도 변화에 가장 큰 영향을 주고 있음을 확인 할 수 있다. 한편 배기가스의 온도는 합성가스의 초기 공급온도에는 크게 영향 받지 않는데 이는 합성가스의 공급온도가 증가하면 혼합기의 체적효율이 떨어지기도 하지만 전체적으로 연료에 비해 공기의 양이 많아 결과적으로 실린더에 공급되는 혼합기의 온도에 의미 있는 차이를 주기 힘들기 때문이다. Fig. 6의 Case 1의 경우 무부하 일 때 배기가스 온도가 높게 나타나는 이유는 최대 출력을 확인하기 위해 23 kW의 전력을 생산한 뒤에 바로 실험에 들어가서

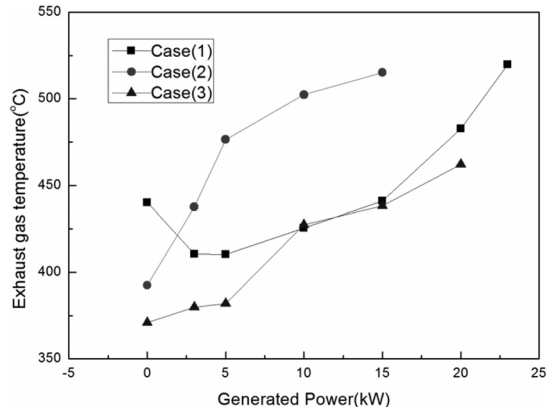


Fig. 6. Temperature of exhaust gas (Fuel: Syngas).

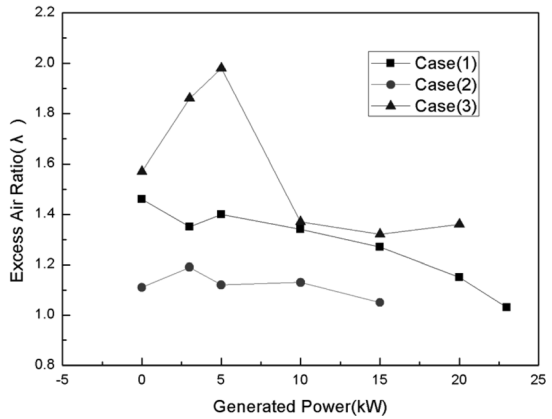


Fig. 7. Excess Air ratio(λ).

실린더 내의 온도가 높은 상태가 유지되어 실험할 때 배기가스의 온도에 영향을 주었기 때문이다. 배기가스의 온도는 공연비를 변화시켜 조절이 가능하다. 본 논문에서 다루지는 않았지만 엔진 배기가스의 폐열을 이용한 연구가 진행 중에 있으며 이때 엔진 배기가스의 온도가 열전달에 중요 인자가 되므로 이에 대한 조절이 매우 중요하게 된다. 현 실험장치에서 공연비의 능동적인 제어가 힘들어, 공연비는 엔진이 안정적으로 운전되는 조건에서 배기가스 농도 측정을 통해 수동적으로 측정하였으며 배기가스 온도 경향성을 확실히 하기 위해 공연비의 엄밀한 제어가 필요하다.

Fig. 8은 발전 출력에 따라 발생한 NOx의 농도를 나타낸 것이다. NOx는 실린더 내 온도가 높아질수록 발생량이 증가하는데 발전 출력이 높아질수록 그 발생량이 증가함을 확인할 수 있다. LNG의 경우도 마찬가지로 발전 출력이 올라갈수록 NOx의 양이 증가하였고 합성가스보다 더 높은 온도에서 운전하였기 때문에 합성가스의 경우보다 더 많은 NOx가 발생하였음을 유추해 볼 수 있다. 본 실험에서는 시

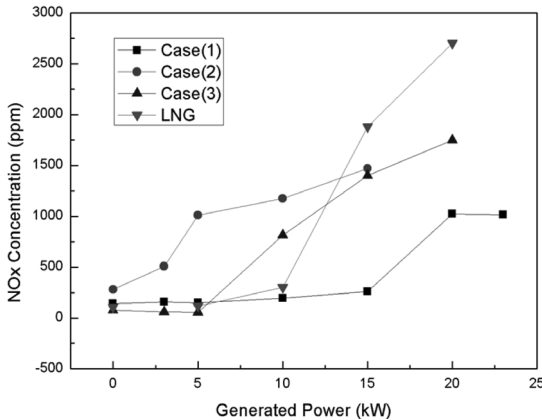


Fig. 8. NOx concentration in exhaust.

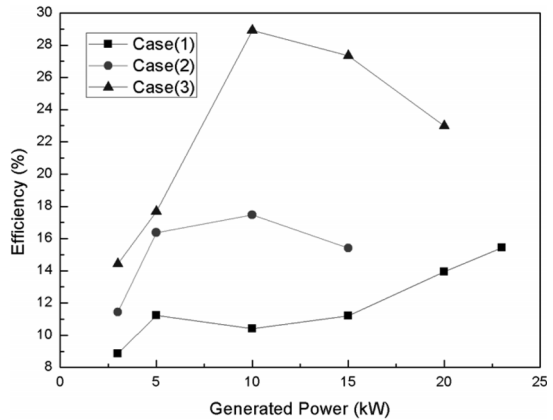


Fig. 10. The efficiency of power generator.

스텝 구성을 위한 기초 실험이기 때문에 NOx의 발생량에 제한을 두지 않고 실험을 진행하였다. 실제 발전 시스템을 구동 할 때에는 NOx 발생량 제어가 필요하며 경우에 따라 엔진의 삼원촉매와 같은 후단 시스템의 이용이 가능하다.

Fig. 9는 합성가스를 연료를 사용했을 경우 배기가스 내 CO의 농도를 측정 한 값이다. 전체적으로 발전 출력이 증가할수록 CO의 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 공연비가 1보다 낮을 경우 공연비가 증가하면 배기가스 내 CO가 감소하는 경향이 있지만 본 연구의 실험조건은 모든 조건에서 공연비가 1 이상이므로 불완전 연소에 의한 CO 발생 부분보다는 다른 영향이 있는 것으로 보인다. 출력 증가에 따른 실린더 내 압력 변화가 연소현상에 영향을 미치거나 밸브 오피레이션 과정에서 발생할 수 있는 미연 연료(합성가스 중 CO의 양이 많음을 감안)의 배출 등 다른 영향이 있을 것으로 예상된다.

CO 또한 규제되는 가스이기 때문에 실제 발전 플랜트에서는 CO의 발생을 최소화 하면서 전력을 생

산하는 조건으로 발전기의 운전이 필요하다. Fig. 9의 Case 1 그래프에서 전력 23 kWe를 생산할 때 배기가스 내 CO의 농도가 급격히 증가하는 구간이 있는데 이는 본 시스템에서 최대로 생산할 수 있는 전력을 확인하기 위해 연료량을 급격히 늘린 경우이며, 배기가스 내 CO 농도가 급격히 증가하였는데 이는 갑작스런 부하 증가에 따라 혼합기내 CO가 전부 연소되지 않고 일부가 배출된 것으로 판단된다. Fig. 9의 Case 3 그래프에서 CO의 농도가 초반에 급격히 증가하다 감소하는 부분은 합성가스 엔진 발전기가 갑자기 불안정한 운전을 하여 안정화시키는 과정에서 밸브의 작동으로 인해 합성가스의 공급량에 변화가 생겨 발생한 결과이다.

Fig. 10은 합성가스를 연료를 사용했을 경우 엔진의 효율을 나타낸 그래프이다. 생산된 전력을 엔진에 공급된 합성가스의 발열량으로 나눈 값을 효율로 나타내었다. Case 1에서 Case 3으로 갈수록 발전기의 효율이 증가하였다. 이는 발전기의 특성상 연료인 합성가스의 발열량이 높을수록 엔진의 효율이 증가한다는 것을 의미하고 공급되는 합성가스의 발열량이 전체 발전 효율에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Case 2와 Case 3의 경우에 10 kWe에서 가장 높은 효율을 보였다. 이것은 실험할 당시 본 시스템의 밸브의 조건이 10 kWe에 맞추어 최적화 되어 있다고 볼 수 있으며 실제 발전시스템을 구성할 때에는 최대 발전량에 맞추어 높은 효율을 가져올 수 있도록 엔진운전조건의 제어가 필요하다. 본 연구에서 구성한 시스템은 Pilot 규모로 구성되어 합성가스의 발열량에 따른 엔진의 동작특성을 엄밀한 조건하에서 수행하기에 어려운 점이 있었지만 실증 스케일의 가스화기의 운전을 통해 발생한 합성가스를 연속적인 정제 공정을 거쳐 발전용 엔진에 공급하고 안정적으로 운전할 수 있음을 확인하였다.

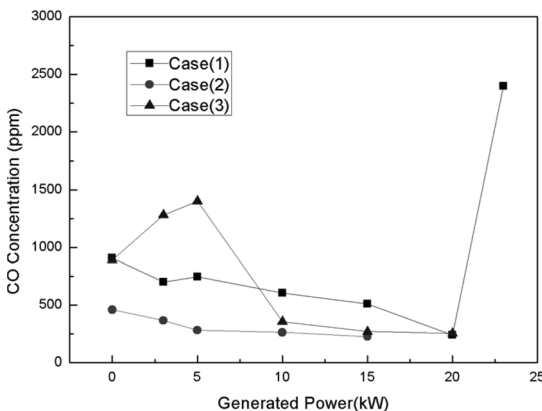


Fig. 9. CO concentration in exhaust using syngas.

## 4. 결론

본 연구는 합성가스를 이용한 발전시스템의 Pilot 규모 실험으로써 RPF를 이용한 열분해, 가스화를 통하여 생산한 합성가스를 이용하여 발전용 합성가스 엔진을 통해 전력을 생산할 수 있는 시스템을 구성하였고 이중연료 공급시스템을 적용하여 안정적인 발전을 위한 시스템을 완성하고 구동하였다. 먼저 LNG를 연료로 하여 발전시스템의 구동 특성을 살펴보고 이를 합성가스를 이용한 엔진 운전 결과와 비교를 통하여 LNG는 물론 약 2,000 kcal/Nm<sup>3</sup>의 발열량의 합성가스만을 이용해도 안정적인 엔진 구동과 발전 부하 유지가 가능함을 확인하여 저 발열량을 가진 합성가스를 이용해서 발전이 가능함을 제시하였다.

RPF를 스토커 형태 열분해 가스화 시스템에서 반응시켜 3가지 서로 다른 조성과 발열량을 가지는 합성가스를 생산하고 각각의 경우에 대해 발전부하를 유지하는데 필요한 합성가스의 유량을 확인하였다. 공연비 조건에 다소 차이를 두었지만 각각의 합성가스에 대해 안정적인 운전이 가능한 영역을 확인하였고 이때 배기가스의 온도 및 환경오염물질의 발생량, 발전효율 등을 측정하였다. 투입된 합성가스의 발열량 대비 발전량의 비교를 통해 각 조건에서 발전효율을 측정하였으며 10 kWe의 발전량에서 최대 29% 발전효율을 보임을 확인하여 향후 실제 발전 시스템 구성에 필요한 기초 자료를 제시하였다.

이번 연구에서는 구축된 시스템의 초기 테스트로 안정적 발전가능성과 최대 발전량을 알아보는 것을 목표로 하여 엔진 내 공급되는 혼합기 양과 공연비에 대해 세밀한 조정이 어려웠고 가스화기, 정제기 등 가스 발생 시스템의 규모가 커 연동 운전 중 다양한 조건에서 실험수행에 제약이 있었으나 실증 스케일의 가스화기의 운전을 통해 발생한 합성가스를 연속적인 정제 공정을 거쳐 발전용 엔진에 공급하고 안정적으로 운전할 수 있는 가능성을 제시한 것은 큰 의미가 있다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 신재생에너지 기술개발사업으로 수행된 연구결과의 일부임을 알려드립니다. 실험에 도움을 주신 H사 임직원 여러분들과 실험에 많은 도움을 주신 연세대 송순호 교수님 연구실 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

[1] 허일상, “폐기물 열분해가스화용융 기술”, 유체

기계공업학회, 유체기계연구개발 발표회 논문집, 2005, pp. 133-138

- [2] 나정걸, “폐기물에너지 분야”, 한국태양에너지학회, 한국태양에너지학회지, 제7권, 제3호, 2008, pp. 34-37
- [3] 이종준, 차규상, 손정락, 김동섭, 주용진, “Syngas를 연료로 사용하는 발전용 가스터빈의 성능 해석”, 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제1호, 2008, pp. 54-61
- [4] M. Baratieri, P. Baggio, B. Bosio, M. Grigiante, G.A. Longo, “The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis”, Applied Thermal Engineering, 2009, 3309-3318
- [5] 이찬, 조상목, “저 발열량 합성가스의 가스엔진 내 연소 특성에 대한 해석”, Clean Technology, Vol. 12, No. 2, 2006, pp. 78-86
- [6] Cook, C. S., Corman, J.C. and Todd, D.M., “System Evaluation and LBTU Fuel Consumption Studies for IGCC Power Generation”, ASME J. Gas Turb. Power, Vol. 117, 1995, pp. 673-680
- [7] 김태권, 장준영, 심성훈, 김정배, 김병하, “합성고분자류 폐기물의 화염열분해 가스화에 의한 발생가스의 연소특성 및 가스엔진시스템에의 적용연구”, Journal of the Korean Hydrogen Energy Society, Vol. 10, No. 4, 1999, pp.233-243
- [8] 장준영, 김태권, 유영돈, 윤용승, “석탄가스화기 기로부터 발생된 저 발열량 합성가스의 엔진 연료 적용”, 한국에너지공학회, 춘계 학술발표회 논문집, 2003, pp. 595-600
- [9] 김태권, 김성훈, 장준영, “저 발열량 석탄가스화연료의 가스엔진 및 소형발전기 적용연구”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 10, No. 3, 2006, pp. 1-6
- [10] Quakk, P., Knoef, H., and Stassen, H., “Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technology”, World Bank Technical Paper, NO. 422, 1999
- [11] 윤용승 외, “가스화 복합 시스템 연계 실증 및 모사기술 개발”, 고등기술연구원 연구보고서, 2000-N-CO02-P-01, Vol. 1, 2002
- [12] 이찬, 조상목, 유영돈, 윤용승, “석탄 가스화 합성가스를 이용한 가스 엔진의 연소 특성 해석”, 한국에너지공학회, 추계 학술발표 논문집, 2005, pp. 143-148
- [13] 류태우 외, “폐기물 다단열분해 청정가스 생산 기술 개발”, 한국생산기술연구원 연구보고서, 2006-N-WA02P-02-0-000, 2009
- [14] 이정우, 류태우, 방병렬, 문지홍, 이재욱, 박상



- 신, 김낙주, “파일럿 규모의 폐기물 다단열분해 가스화시스템의 운전특성”, 한국신재생에너지학회, 추계학술대회 논문집, 2009
- [15] 정효재, 이정우, 이재욱, 문지홍, 최인수, 박상신, 황정호, 류태우, 이은도, “폐기물 열분해 합성가스를 이용한 발전용 엔진의 실험적 연구”, 한국연소학회, 추계 학술대회 논문집, 2009, pp. 145-150
- [16] Whitty, K., Eddings, E. G. and Morrow, R. S., “Biomass Gasification in a Stoker Gasifier, AIChE The 2008 Annual Meeting, 2008
- [17] Yang, Y. B., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J., “Converting moving-grate incineration from combustion to gasification-Numerical simulation of the burning characteristics”, Waste Management, 27, 2007, pp. 645-655
- [18] 김석준, 길상인, 윤진한, 최항석, 김우현, 박영수, 곽연호, 정상순, 박세영, 허일상, 이협희, 동종인, 배성근, 서용칠, “생활폐기물 열분해가스화 용융 파일럿 플랜트의 운전 실험”, 한국폐기물학회 2007년도 춘계학술대회 논문집, 2007
- [19] 홍영기, “열분해 가스화 및 플라즈마 용융기술-고온열분해가스화호와 직렬로 연결된 용융로에서 이송형 플라즈마 토치를 이용한 폐기물 처리기술”, 한국폐기물학회 2007년도 춘계학술대회 논문집, 2007

접수일 : 2010. 03. 18

심사완료일 : 2010. 06. 25