

## 저열량 바이오매스 합성가스의 혼소특성

윤상준\* · 김용구\* · 전창준\*\* · 이재구\*<sup>†</sup>

\*한국에너지기술연구원 청정연료연구단  
305-343 대전 유성구 장동 71-2  
\*\*(주)한별산업  
305-343 대전 유성구 장동 71-2  
(2012년 5월 31일 접수, 2012년 7월 16일 채택)

## The Duel Fuel Combustion of Low Calorific Biomass Syngas with Fuel Oil

SangJun Yoon\*, YoungKu Kim\*, ChangJoon Jeon\*\* and JaeGoo Lee\*<sup>†</sup>

\*Clean Fuel Research Department, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea  
\*\*Han Byeol Industry Co. Ltd, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea  
(Received 31 May 2012; accepted 16 July 2012)

### 요 약

바이오매스 합성가스는 저열량 가스이지만 유류를 대체하기 위한 목적으로 공업로, 보일러 등에서 혼소방법으로 이용되고 있다. 혼소버너의 기본구조는 오일버너를 중심부로 하고 저열량 가스 연료를 그 주위로 공급하는 형태로 설계되었다. 본 연구에서는 가스의 균일분산 방법과 가스노즐 각도를 변화시키는 방법을 적용하여 세 종류의 버너를 설계하였다. 연소공기량 증가에 따라 CO 발생량이 감소하였으며, 혼소조건에서 화염으로부터 잔염 발생 원인은 오일버너로부터 미립화 불량인 것으로 나타났다. 혼소조건에서는 가스 및 오일연료에 대한 과잉공기 요구량이 서로 다르기 때문에 적절하게 연소공기량을 맞추기가 어려웠지만, 과잉산소 4.7~8.2% 범위에서 안정적인 연소조건 유지가 가능하였다. 본 연구를 통하여 합성가스와 유류의 혼소 이용은 합성가스 성분이 오일보다 연소속도가 빠르게 이루어져 오일버너 미립화를 촉진시켜주고, 오일 단독연소조건보다 CO 배출 농도를 낮게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

**Abstract** – Although biomass syngas is very low calorific gas, it is utilized by means of dual fuel combustion technology in the fields of industrial furnace and boiler as a substitute oil technology. The basic structure of duel fuel combustion burner is designed so that low caloric gas fuel is supplied around an oil burner in the middle. In the present study, three types of mixing burners were manufactured to conduct performance experiment. Low caloric gas was evenly distributed around the oil burner and the method of changing the angle of gas nozzle was applied. CO generation decreased according to the increase of the amount of air for combustion. In addition, the shapes and colors of flame changed according to the proportions of gas and oil used. Remained flame after combustion was from the lack of atomization at the exit of oil burner. Although it was difficult to maintain the optimum air ratio due to different required air ratio for oil and syngas, stable combustion was able to maintained within excess oxygen concentration of 4.7~8.2%. From this study, it was shown that the oil atomization at the exit of fuel oil nozzle was promoted by the increased rate of syngas combustion and the CO concentration in flue gas lower than only fuel oil combustion.

Key words: Low Calorific Syngas, Biomass, Combustion, Burner

### 1. 서 론

최근 유가상승과 석유, 천연가스의 가채 매장량의 한계 등과 함께 온실가스에 의한 지구온난화 방지를 위하여 미국, EU, 중국, 캐나다 등에서는 바이오매스를 이용한 에너지 회수 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다[1]. 바이오매스는 수집 장소와 종류에 따라 물성이 달

라지만 수분함량은 비교적 높은 편이며, 탄소, 수소, 산소, 질소, 황, 무기원소 등의 성분으로 이루어져 있다. 화석 연료와 비교했을 때 바이오매스는 탄소함량이 적은 대신 산소함량이 많으며 2,800~4,000 kcal/kg 수준의 저위발열량을 갖는다. 현재 일반적으로 바이오매스로부터 에너지 회수 이용을 위한 방법으로는 연소나 가스화에 의해 열 및 전력을 생산하고 있으며, 향후에는 다양한 열화학전환 기술에 의하여 고품위 연료생산이 가능할 것으로 보여진다[2]. 그러나, 바이오매스는 에너지 밀도 대비 존재하는 지역이 광범위하여 발생, 수집, 수송에 따른 비용이 많이 소요되는 특성이 있기 때문에, 산지

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jaegoo@kier.re.kr

\*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

에서 직접처리하거나 또는 수집하여 대규모로 처리하는 등 현장상황에 따라 적절하게 플랜트 운영에 대한 유연성을 갖추고 있어야만 한다.

저열량 바이오매스 합성가스의 연소 이용 기술은 공업로나 건조로에서 유류대체 이용 목적으로 사용되고 있는데, 바이오매스 탄화 및 가스화에 의한 부생가스 이용기술은 최근 중국 산둥 양주신천지 개발공사, 캐나다 Nextra 사 등에서 개발되어 석회소성로, 세라믹 소성, 주물 용해로 등에 유류 및 천연가스를 대체하여 활용되고 있다. Nexterra 사는 목재 폐기물로부터 가스를 생산하여 이를 연소 이용하는 기술을 실용화하였는데, 2004년에 Kamloops에 10 MMBtu/h의 파일럿 플랜트를 건설 운전하였고, Tolko 사 등에 상업용 플랜트를 판매하였다[3].

합성가스를 연소하여 열에너지로 회수 이용하는 방법은 주연료인 화석연료 사용량 절감에 따른 연료비 절감과 이산화탄소 발생을 저감시킬 수 있는 유효한 방법이다. 저열량 합성가스를 공업로나 보일러용 연료로 효과적으로 활용하기 위해서는 우선적으로 합성가스 조성 및 발열량에 따른 안정적인 연소조건 확보를 위한 연소시스템 및 버너 설계가 매우 중요하다. 실제로 바이오매스 합성가스는 저열량 일뿐만 아니라, 수분함량이 높고, 타르성분이 일부 유입되며, 시간에 따라 가스조성이 변화된다는 단점을 지니고 있다. 따라서, 화염의 안정성을 확보하기 어렵고, 오염물질 배출을 제어하기에도 어려운 특징을 지니고 있다. 바이오매스 합성가스 연소기에 대해서는 상당한 경험적인 요소의 반영이 필수적이어서 개발결과에 대한 구체적인 발표자료는 많지 않은 실정이다. 저열량 가스이용을 위한 연소 기술은 독일 GWI, 스웨덴 VTT 등에서 공기주입 다단식 연소기, 축열식, 고온공기 및 사이클론형 연소기가 개발된 바 있다[4].

일반적으로 혼소방법은 유류단독 또는 가스단독으로 사용하는 전용버너 방식보다는 연소효율 측면에서는 불리한 점이 있지만, 합성가스 생산량 부족, 부하량 증가, 급격한 합성가스 조성변화, 합성가

스 시스템의 운전 중지 등의 경우를 감안한다면 공정운영 효율성 측면에서는 혼소이용 방식은 불가피하다고 할 수 있다. 즉, 열이용 설비에서 유류대체로 저열량 가스를 사용하는 경우 가스가 충분히 안정연소가 가능한 발열량을 지니고 공급량도 충분한 경우에는 단독으로 주연료로 사용해도 좋으나, 공급량 또는 조성변화로 안정적인 연소유지가 어려운 경우에는 안정적인 열공급을 위하여 주연료와 같이 연소시키는 방법을 사용하게 된다. 가스와 오일을 조합하여 연소하는 방식에서 버너성능은 복수연료의 연소조건을 동시에 만족시켜야 하므로 가스, 오일 등 전용연료 버너방식보다는 일반적으로 저조하다고 할 수 있다[5-9]. 저열량 가스 연소시 특히 어려운 점은 사용하는 혼합연료들의 유량이나 품질이 변화됨으로 인하여 전체적인 공연비 및 연소성능을 제어하는 것이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 유류를 사용하는 보일러, 공업로에서 가스화기로부터 실제 생산되는 합성가스를 혼합 이용하는 방식으로 유류사용을 절감하고자 수행되었다. 합성가스와 오일을 가변적으로 변화하더라도 안정적인 화염특성을 유지할 수 있는 혼소용 연소기를 설계하고 연소조건에 따른 배출가스 생성특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 실험재료 및 장치

실험용 가스는 바이오매스 가스화 공정에서 생산된 합성가스를 사용하였다. 사용된 바이오매스 연료로는 우드칩을 사용하였으며, 연료분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Woodchip analysis data for syngas production

Sample	Moist. (wt%)	VM (wt%)	Ash (wt%)	FC (wt%)	HHV (kcal/kg)
Woodchip	8.78	75.07	0.26	15.89	4,660

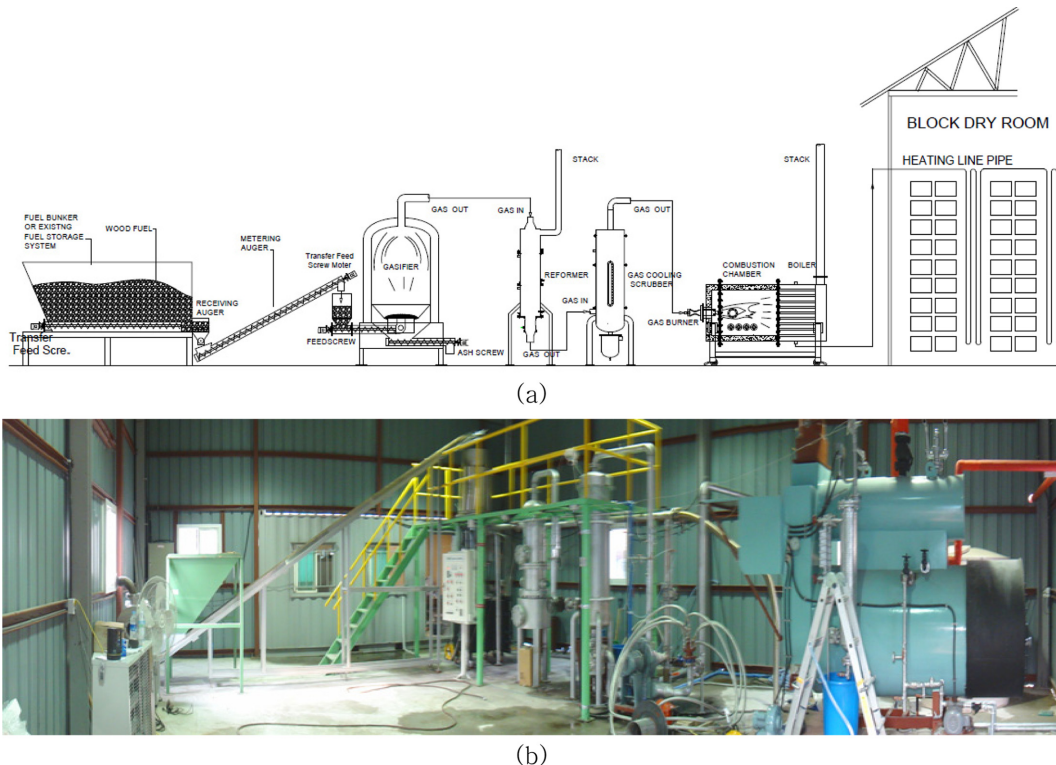


Fig. 1. Syngas co-combustion system integrated with woodchip gasifier ((a) schematic process diagram, (b) overview of syngas combustion system).

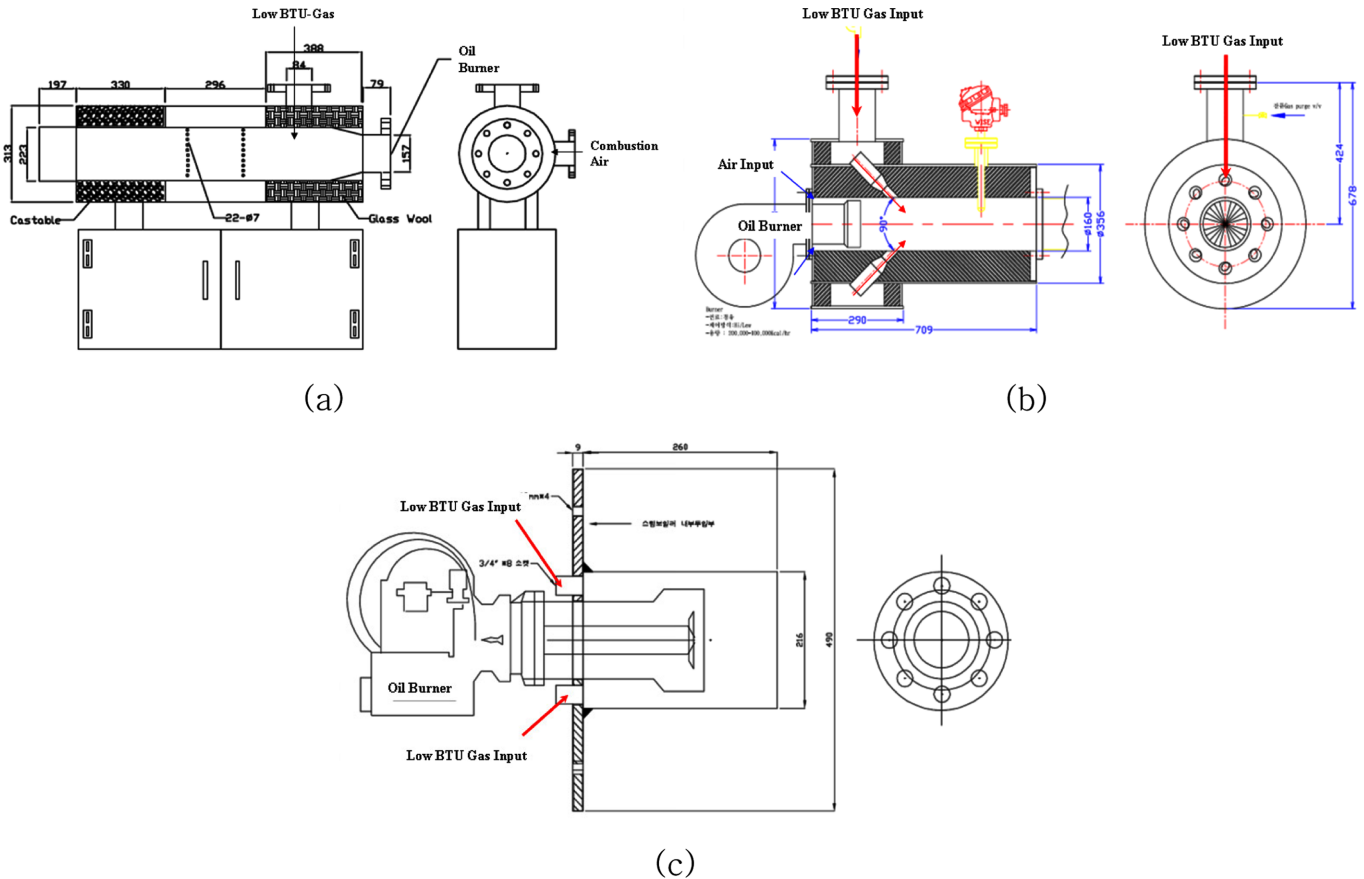


Fig. 2. Co-combustion test burner ((a) ver.1, (b) ver.2, (c) ver.3).

가스화 장치와 연계된 저열량 가스 연소이용 시스템은 합성가스 발생장치, 사이클론, 개질기, 습식정제장치를 거쳐 부생가스 연소기 및 연소로의 순서로 구성되었다. 연소로는 증발량이 1.5 ton/h 규모의 연관식보일러(HSM-150)를 사용하였다.

혼소실험을 위하여 세종류의 버너(ver.1, 2, 3)를 설계, 제작하였다. 기본적으로 오일버너(수국 GPM32, 올림피아 PO2B-T)를 중심축에 위치하도록 하고, 부생가스를 원주방향으로 분사하는 방식을 사용하였다. 오일 버너는 고압노즐 분사식 버너로 노즐 교체에 의해 열량 7만~25만 kcal/h에서 조절하여 사용하였다. Ver.1 버너는 Fig. 2(a)와 같이 1차 연소영역에서는 캐스터블로 시공하고, 2차 공기 유입이후, 경유를 사용할 수 있도록 추가적인 섹션을 포함하였다. 연소제어를 위하여 부생가스 공급온도 감지 및 점화장치를 설치하고 연소용 공기는 공급용 fan과 유량조절장치에 의해 공급되고 가스연료와 균일한 혼합을 위하여 다공성 분사판을 경유하여 공급되도록 하였다. Ver.2 버너는 그림 Fig. 2(b)와 같이 중심부에 오일 버너를 부착하고, 가스연료는 캐스터블로 시공된 통로로 주입되어 8개로 분산된 노즐을 통하여 공급하도록 되어 있다. 가스 투입부는 가스화염의 역화방지를 위하여 공급관이 축소된 reducer 형태로 하였고, 화염 진행방향으로 경사각을 두어 공급되도록 하였다. 가스연소용 공기는 오일버너와 가스 투입부 사이로 차압에 의해 fan 시설 없이 공급되도록 하였다. Ver.3 버너는 Fig. 2(c)와 같이 ver.2와 유사한 형태로 혼합 표면적을 증가시키기 위하여 8개의 노즐로 가스연료가 분산되게 공급하는 식으로 제작하였다. 공급된 가스연료는 오일버너와 격리되는 판을 통하여 예열된 다음, 오일버너 끝부분에서 공기와 혼합되어 연소

하는 구조로 되어 있다.

2-2. 실험방법

가스화기 연소층 온도 기준으로 800 °C 이상을 유지하여 합성가스를 생산하였는데, 실험용 가스조성을 유지하기 위하여 공기량 및 온도를 조절하였다. 가스화기로부터 생성된 합성가스는 ID fan을 사용하여 배출하며, 이때 가스화기 및 정제 시스템은 대기압 조건보다 낮은 상태를 유지하므로 외부 공기가 유입되지 않도록 하였다. 우드칩의 공급량은 62 kg/h이었으며, 이때의 공기량은 80 Nm<sup>3</sup>/h 조건으로 유지하였다. 우드칩 상태나 가스화기 내부 층높이에 따라 온도가 변화하였는데, 반응부 온도는 700~800 °C, 정제공정으로 공급되는 가스온도는 300~400 °C 수준이었다. 혼합연소 실험용으로 가스화기로부터 얻어진 합성가스는 IR 분석기(Hermann and Braun, Advance Optima)로 실시간 분석하였으며, 이때의 조성변화는 Fig. 3과 같다. 이때, 합성가스의 유량 및 발열량 변화 경향을 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Ver.1 버너

가스 중에는 상당량의 수분이 함유되어 있으므로 혼소버너 팁 부분이 800 °C 정도를 유지할 수 있도록 전기히터를 설치하였는데, 화염의 안정적인 유지에는 상당히 효과적인 역할을 하는 것으로 파악되었다. Fig. 5와 같이 예열된 분산 공기로 인하여 연소화염은 비교

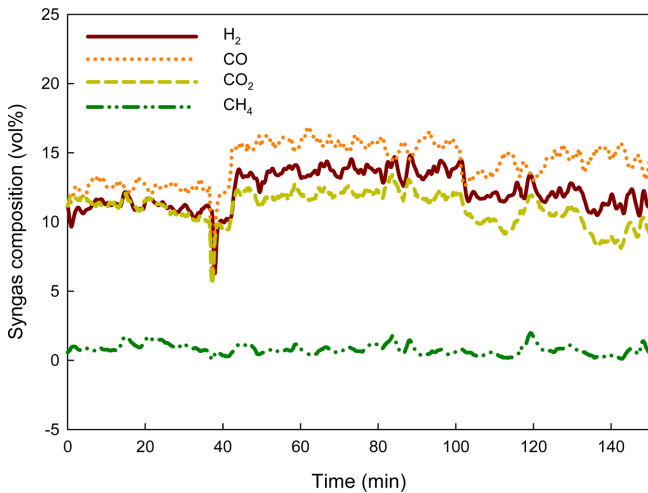


Fig. 3. Syngas production profiles for syngas combustion.

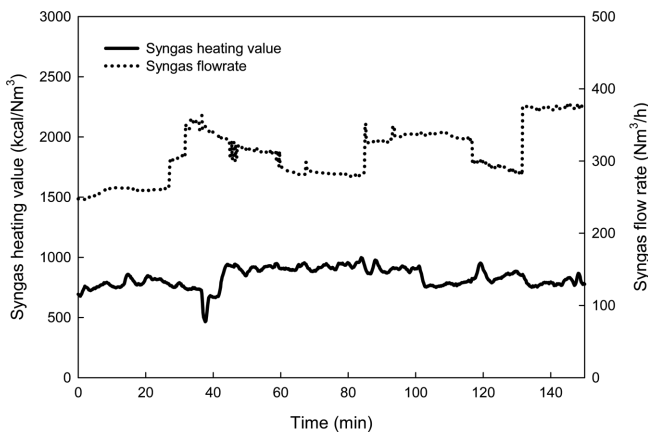


Fig. 4. Syngas heating value and flow rate variation profiles.

적 안정성을 유지하였다. 오일버너 15만 kcal/h 수준에서 저열량 가스량을 증가함에 따라 화염이 길게 형성되면서 유적에 의한 잠염 현상은 나타나지 않았다. 즉, 연소성이 좋은 가스연료는 짧은 화염을 형성하면서, 오일의 혼합 및 연소상태에 긍정적인 영향을 주는 것으로 파악되었다.

본 버너는 충분한 혼합을 염두해 두고 가스 연소실을 길게 설계하였으나, 실제로 스팀 연관식 보일러에서는 화염이 열교환 튜브까지 영향을 미치는 것이 복사열교환 및 전열에 부정적인 영향으로 작용하는 것으로 나타났다. 다른 단점 중 하나로는 가스투입부위가 오일버너와 수직방향으로 만나게 되어 가스의 역화 현상이 발생하게 되었고, 그 결과 가스 연결부위가 지나치게 가열되었으며, 혼소버너에서도 튜브 부분이 고온화염의 영향으로 국부가열 현상이 나타나게 되었다. 따라서, 전체적인 연소특성은 우수하게 나타났지만, 장기적인 혼소버너의 운전은 곤란한 것으로 분석되었다.

3-2. Ver.2 버너

Ver.2 버너의 경우 가스분산을 위해 캐스터를 시공된 가스노즐을 통하여 오일화염 주위로 분사되도록 하였다. Fig. 6(a)와 같이 오일 연소용량 7만 kcal/h에서 저열량 가스량을 100~150 Nm<sup>3</sup>/h로 증가하는 경우, 화염의 길이가 증가하고 미반응 유적에 의한 lifting 현상은 점차 감소함을 알 수 있었다. 이는 ver.1의 경우와 동일하다고 할 수 있다. 오일버너 부하량은 15만 kcal/h로 하였을 때에도 혼소에 의해 미반응 유적의 날림현상이 감소하는 특성을 보였으며, Fig. 6(b)와 같이 가스량을 150 Nm<sup>3</sup>/h로 유지하였을 경우에는 중심부 화염이 백색, 주위에는 황색 화염이 형성됨을 보였다. 저열량 가스만을 연료로 하는 경우, 가스 공급량 증가에 따라 화염 길이가 증가하였고 청백색 화염이 점차 황색 화염형태로 길어짐을 알 수 있었다. 오일 단독으로 연소하는 경우 보다 저열량 가스와 혼합하는 경우 훨씬 화염의 농도가 진해지는 것을 알 수 있으며, ver.2와 같은 버너에서는 캐스터

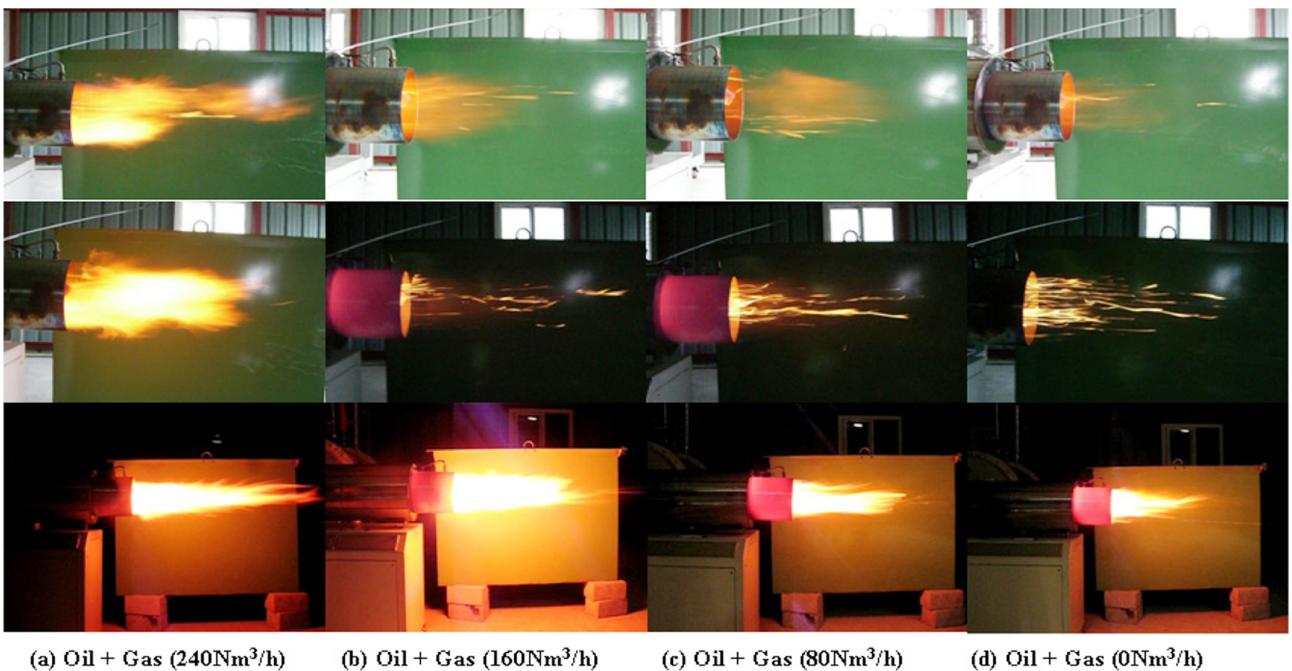


Fig. 5. Syngas combustion test with and without fuel oil (ver.1).

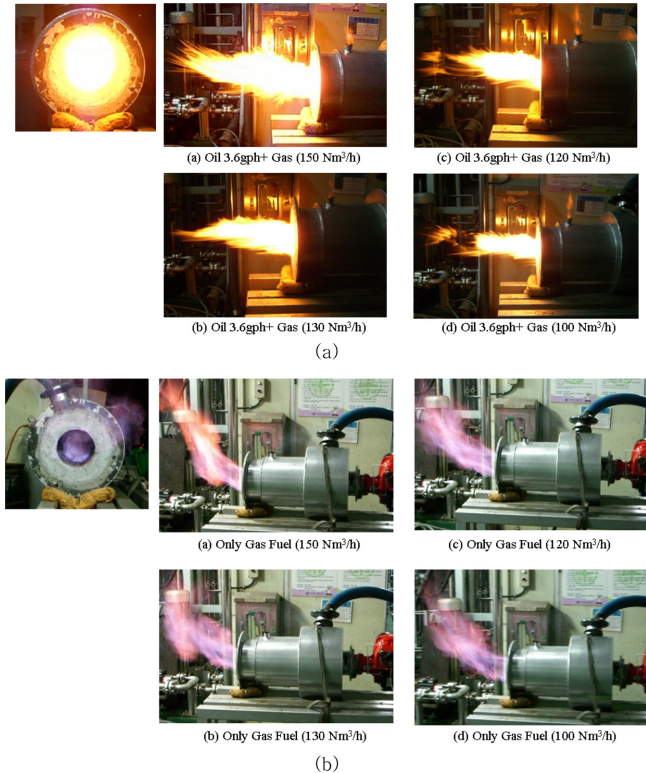


Fig. 6. Syngas combustion test with and without fuel oil (ver.2, (a)co-combustion, (b) only syngas combustion).

블로 부터 축열기능이 유지되어 저열량 가스 단독으로 연소 유지도 충분히 가능함을 알 수 있었다.

3-3. Ver.3 버너

Ver.1 버너와 ver.2 버너의 경우 가스분산과 화염 형성은 원활하게 유지되지만 혼소버너 자체에서 연소화염의 혼합 구간이 길어져서 연관식 스팀 보일러의 경우에는 화염에 의한 복사열전달 효과가 부족한 것으로 분석되었다. 따라서, 혼소버너에서 화염의 분사를 최대로 확보하는 구조로 설계하여, 보일러 외부에서 화염 특성을 실험한 결과를 Fig. 7에 보였다. 오일버너의 연소용량 10만 kcal/h (2gph)를 사용한 저연소 보다는 25만 kcal/h (5gph)를 사용한 고연소에서 더욱 화염색이 농후해지고, 혼소에 의해 화염형성은 더욱 길어지는 것으로 나타났다. 이러한 화염이 길어지는 현상은 보일러 외부에서 연소 시에는 공기와의 충분한 혼합이 이루어지지 못하여 나타난 것으로 파악된다. 그러나 Fig. 8에서와 같이 보일러 내부에서 연소 시 공기 조절기를 통하여 2차공기가 투입되는 경우에는 화염이 전체적으로 선화를 일으키면서 균일하게 분산되는 현상을 보이고 있는데, 이는 Cornforth 등이 제시한 선화화염의 경우 화염길이 짧아지고, 안정 연소범위가 확대되어 고부하연소가 가능하다는 결과와 같은 경향을 보이고 있다[9,10]. 저열량 합성가스만을 공급하여 연소실험을 수행한 경우, 공기가 부족한 경우에는 황색화염이 약하게 확산되는 현상을 보이지만, 2차공기를 조절기를 통하여 공급하는 경우에는 청색화염이 강하게 형성됨을 알 수 있었다.

3-4. 연소배출 가스 특성

일반적으로 배기가스 중 CO 검출량은 불완전 연소의 전구 지표라

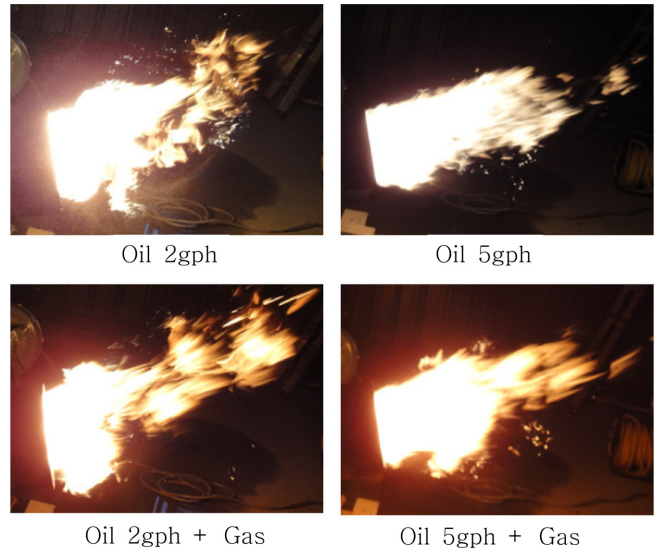


Fig. 7. Combustion test with fuel ratio (ver.3).

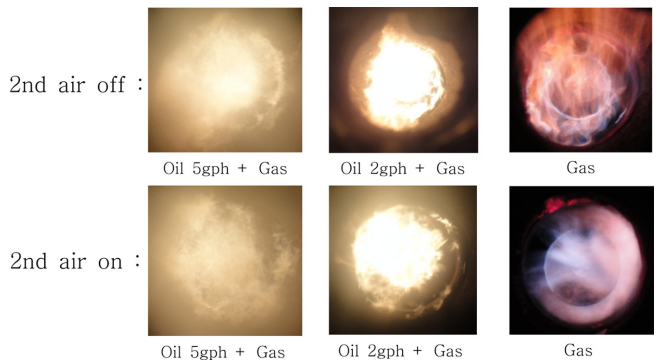


Fig. 8. Effect of secondary air injection in steam boiler (ver.3).

고 할 수 있다. 연소 배기가스 중 과잉산소량이 3~5% 범위에서 어느 수치 이하로 낮아지게 되면 CO 발생량은 급격하게 증가하는 것으로 알려지고 있다. 대체로 산업용 수관보일러에서 과잉공기는 2.5~10% 수준이다. 일반적으로 혼소의 경우에는 가스와 오일연료에 대한 과잉공기 요구량이 서로 다르기 때문에 적절하게 연소공기량을 맞추는 데는 운전상 어려움이 있다. Ver.2 버너의 경우 과잉공기는 4.7%~8.2% 범위에서 안정적인 연소조건 유지가 가능하였다.

Ver.3 혼소버너에서 오일버너를 각각 10만 kcal/h(저연소), 25만 kcal/h(고연소)로 단독 사용할 때와 혼소 및 가스 단독으로 연소하는 경우에 대하여 연소 배기가스 농도 및 온도를 측정하였다. 측정 시 혼소버너 및 공기 투입상태는 Table 2에 나타내었다. 대체로 고연소 조건보다는 저연소에서 많은 공기량이 소요되었고, CO 검출 농도도 높게 나타났다. 이는 본 실험에서 적용된 오일버너가 압력분사식으로, 저부하 조건에서 미립화가 잘 이루어지지 않아서 연소성이 고연소시보다 저하되는 것으로 보여진다. 오일단독 연소 보다는 혼소조건에서 과잉산소가 적게 검출되고 CO 농도도 적게 검출되었는데, Cornforth 등의 발표와 같이 가스연료의 연소가 빠르게 이루어져 오일화염 영역에서 오일 미립화를 더욱 촉진시키고, 그 결과 연소배가스 중 CO 농도가 낮아진 것으로 해석된다[11].

고연소의 경우 혼소조건에서 조건8과 조건7을 비교해보면 조건7

Table 2. Flue gas analysis from boiler stack with operating condition (ver.3)

Test No.	Without 2nd air			With 2nd air	CO <sub>2</sub> (%)	Pollutants (O <sub>2</sub> Ref. 4%)	
	Low oil feed	High oil feed	With syngas			CO (ppm)	NO (ppm)
1	○				4.1	443	53
2	○			○	3.2	518	53
3	○		○		5.7	3	52
4	○		○	○	4.1	133	59
5		○			5.8	0	105
6		○		○	4.4	90	110
7		○	○		7.3	0	77
8		○	○	○	4.8	76	82

에서 적은 공기량으로 CO 농도가 더욱 낮아지는 결과를 보였는데, 이는 2차공기가 연료연소과정에 균일하게 투입되지 못하여 연소에 관여하지 못하고 배기가스로 배출된 것으로 보여진다. 본 실험을 통하여 혼소조건이 오일 단독 연소보다 배기가스 중 산소농도를 감소시킬 수 있으며, CO 농도도 적게 유지할 수 있음을 알 수 있었다. NO<sub>x</sub> 발생량도 오일과 가스를 혼소하는 경우가 오일 단독 연소의 경우보다 적게 생성되는 결과를 보였는데, 특히 7, 8과 같은 고연소 조건은 다단연소와 같은 특성을 보여 저감효과가 더 큰 것으로 분석되었다[12].

#### 4. 결 론

저열량 가스인 바이오매스 합성가스의 혼소기술은 공업로, 보일러 등에서 합성가스로 유류를 대체하기 위한 목적으로 개발되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세 종류 혼소버너의 기본구조는 오일버너를 중심부로 하고 저열량 가스 연료를 그 주위로 공급하는 형태로 제작되었으며, 연료성상에 따라 가스와 공기의 혼합, 주위 위치 및 가스 분배방법, 화염안정성 유지방법 등이 중요한 것으로 나타났다.

(2) 연소공기량 증가에 따라 CO 발생량이 감소하였으며, 가스와 오일 사용량 비율에 따라 화염의 모양과 색상이 달라짐을 보였다. 혼소조건에서 화염으로부터 잔염이 발생하는 원인은 팽기지화된 버너로부터 미립화 불량이 원인인 것으로 보이며, 화염이 길어지고 농후해지는 현상은 합성가스 성분이 오일보다 연소속도가 빠르게 이루어져 오일버너 미립화를 촉진시켜주는 것으로 파악되었다.

(3) 혼소조건에서는 가스와 오일연료에 대한 과잉공기 요구량이 서로 다르기 때문에 적절하게 연소공기량을 맞추는 데에 어려움으로 작용하였다. 과잉공기는 4.7~8.2% 범위에서 안정적인 연소조건 유지가 가능하였다.

(4) 본 실험을 통하여 혼소조건이 오일 단독 연소보다 연소 공기량을 감소시킬 수 있었으며, CO 및 NO<sub>x</sub> 배출 농도도 낮게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감 사

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업(과제번호-201130300900020) 및 한국에너지기술연구원 주요사업(과제번호-GP20110010)의 지원을 받아 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- Boocock, eds., "Developments in Thermochemical Biomass Conversion," 2, Blackie, London(1997).
- Higman, C. and Burgt, M., "Gasification," New York, Elsevier (2003).
- Mike, S., "A New Standard for Distributed Biomass CHP," Nexterra Presentation for EPA CHP Partnership, June(2009).
- Al-Halbouni, A., Rahms, H., Grner, K. and Fredriksson, C., "New Burner Technology for Low Grade Biofuels," GWI Report (2007).
- Kim, T. K., Park, J. and Cho, H. C., "Study on Combustion Characteristics of H<sub>2</sub>/CO Synthetic Gas," *J. of the Environmental Sciences*, **17**, 689-698(2008).
- Al-Halbouni, A., Rahms, H. and Grner, K., "An Efficient Combustion Concept for Low Calorific Gases," ICREPQ'07, Sevilla (2007).
- Heating Equipment Management, "Fuel Diversification and Burner System," 62-73(2006).
- IHEA, "Combustion Technology Manual," (1988).
- Kim, J. J., Kim, C. Y., Park, I. S., Kim, H. J., Sung, D. Y. and Seo, Y. S., "An Experimental Study on the Diffusion Flame with Swirling Flow," KE-91006B, KIER Report(1991).
- Colson, G., Peeters, F. and De Ruyck, J., "Experimental In-flame Study of a 15MW Dual Fuel Gas/Oil Burner," *Fuel* **78**, 1253-1261(1999).
- Cornforth, J. R., "Combustion Engineering and Gas Utilization," British Gas, 95-114(1992).
- Francisco Jr., R. W., Rusa, F., Costa, M., Catapan, R. C. and Oliveira, A. A. M., "Combustion Characteristics of Gaseous Fuels with Low Calorific Value in a Porous Burner," Proceedings of the European Combustion Meeting, Vienna(2009).