

중유 싱글 버너 수관식 보일러에서의 합성가스 혼합연소 특성 연구

최신영*, 양동진*, 방병열*, 양 원[†]

*한국생산기술연구원 고온생산기술연구부

A Study on Syngas Co-Combustion Characteristics in a 0.7 MWth Water-Tube Boiler with Single Heavy Oil Burner

SINYEONG CHOI*, DONGJIN YANG*, BYOUNGYEOL BANG*, WON YANG[†]

*Korea Institute of Industrial Technology, 35-3, Hongcheon-ri, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungam 331-825, Korea

ABSTRACT

This study is aimed to investigate changes of combustion characteristics and heat efficiency when syngas from gasification process using low-rank fuel such as waste and/or biomass is applied partially to an industrial boiler. An experimental study on syngas co-combustion was performed in a 0.7 MW (1 ton steam/hr) water tube boiler using heavy oil as a main fuel. Three kinds of syngas were used as an alternative fuel: mixture gas of pure carbon monoxide and hydrogen, syngas of low calorific value generated from an air-blown gasification process, and syngas of high calorific value produced from an oxygen-blown gasification process. Effects of co-combustion ratio (0~20%) for each syngas on flue gas composition were investigated through syngas injection through the nozzles installed in the side wall of the boiler and measuring O₂, CO₂, CO and NO_x concentrations in the flue gas. When syngas co-combustion was applied, injected syngas was observed to be burned completely and NO_x concentration was decreased because nitrogen-containing-heavy oil was partially replaced by the syngas. However, heat efficiency of the boiler was observed to be decreased due to inert compounds in the syngas and the more significant decrease was found when syngas of lower calorific value was used. However, the decrease of the efficiency was under 10% of the heat replacement by syngas.

KEY WORDS : Co-combustion(혼합연소), Synthesis gas(합성가스), Heavy oil,(중유), Gasification(가스화), Industrial boiler(산업용 보일러)

1. 서 론

[†]Corresponding author : yangwon@kitech.re.kr

[접수일 : 2010.8.17 수정일 : 2010.9.16 게재확정일 : 2010.10.20]

최근 들어 주 화석연료인 석유 및 석탄의 가격이 급격히 높아지거나 불안정해지면서, 이를 대체할

경제적이고 친환경적인 연료 및 이들의 연소 기술 개발이 시급한 상황이다. 특히 이들 연료를 거의 수입에 의존하고 있는 우리 나라와 같은 상황에서는 이러한 기술 개발이 더욱 시급한 가운데 있으며, 폐기물 또는 바이오매스와 같은 신재생 에너지 연료를 사용하여 혼합 연소하는 방법도 연료비 절감 외에도 온실가스 저감과 관련하여 중요하게 다루어져야 할 기술 개발 내용 중 하나이다.

기존 보일러에 이러한 신재생 에너지 연료의 적용을 위한 방법으로는 이들 연료를 (1) 직접 보일러에 투입하는 방법(직접 혼소법)과 (2) 가스화 및 정제 후에 투입하는 방법(가스화 후 혼소법)이 있다. 직접 혼소법은 효율 측면에서는 유리하나 보일러 전열면에서의 슬래깅(slugging)/파울링(fouling)/부식 등의 문제가 추가 발생할 우려가 있어 혼소율에 한계가 존재한다. 반면에 가스화 후 혼소법은 효율 측면에서 다소 불리하지만(약 30~40%의 에너지 손실), 환경 규제 만족 및 연료 다양성/시스템 적용성 측면에서 유리하며, 전열면에서의 운전 장애 문제도 해결이 가능하다¹⁾.

고유황탄, Petcoke, 폐기물, 바이오매스 등 저급 고체 연료를 가스화하여 나오는 합성 가스는 적게는 800kcal/Nm³~4,000kcal/Nm³의 발열량을 가지는 저발열량 가스로서, 주로 H₂, CO로 구성되며 연료원에 따라 CH₄, CO₂, N₂을 포함하기도 한다. 이렇게 생성되는 합성가스는 천연 가스 발열량의 10~30% 가량에 불과하므로(천연가스 발열량은 약 11,000kcal/Nm³), 이를 안정적으로 혼소하고 그 비중을 극대화하기 위해서는 기존 보일러의 연소장 제어 기술을 포함한 혼소 기술 개발 연구가 매우 중요하다.

합성가스를 사용함으로써 인해 주 연료에 질소가 함유되어 있는 경우 혼소율 만큼의 NO_x 저감을 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 재연소(reburning)의 연료로 사용하는 경우 추가적인 NO_x 저감도 기대할 수 있다. 일반 화석 연료를 혼소 또는 재연소의 연료로 사용한 경우는 Spliethoff²⁾, Mcilveen-Wright³⁾, Shneider⁴⁾ 등 여러 결과가 보고되고 있고 최근에는 쌀겨(rice husk) 등을 이용한 연구도 Casaca⁵⁾등에 의해 발표되고 있다. 합성가스를 혼소 또는 재연소

로 사용한 연구는 Wu⁶⁾의 연구처럼 시뮬레이션 연구처럼 매우 제한되어 있다. 게다가, 특히 저열량 합성가스를 사용할 경우 발생할 수 있는 연소 특성 변화 및 열전달 효율 변화 등을 고찰한 연구 결과는 거의 발표된 것이 없는 상황이다. 중유 멀티버너 연소로에서 합성가스 혼소 실험을 수행한 내용이 최근에 발표되었으나⁷⁾, 상업용 보일러가 아닌 내화벽이 처진 연소로에 대한 것으로서 연소 효율 및 열전달 효율을 평가하기에는 현실적으로 어려움이 있고, 합성가스 역시 한 가지 조성과 발열량만을 사용하여 합성가스의 종류 변화 및 발열량 변화에 대한 특성을 고찰하지 못하였다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 모사 합성가스를 사용하여 상업용 0.7MW 급 수관식 보일러(스팀 생산량 1톤/시간)에 합성가스를 투입하여 혼소율에 따른 연소 특성 및 열전달 특성의 변화를 조사하고 이들의 특성을 고찰하였다. 수관식 보일러의 특성상 내부 특성을 측정할 수 있는 방법이 매우 제한되어 있으므로, 이를 감안한 세부 해석도 함께 수행하여 합성가스 혼소를 상업용 보일러에 적용할 수 있는 방안을 검토하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 사용된 합성가스

혼합연소를 위해 중유를 대체할 합성가스는 현 상황에서 실제 폐기물이나 바이오매스의 가스화 공정의 안정적인 운전이 어렵기 때문에 모사 합성가스를 사용하였다. 이는 실제 상업용에 적용하기 위해 폐기

Table 1 Composition of the syngas and lower heating values

		Syngas #1	Syngas #2
Composition (Vol. %)	H ₂	7	27
	CO	15	23
	CH ₄	3	10
	N ₂	75	22
	CO ₂	0	18
LHV (kcal/Nm ³)		890	2247

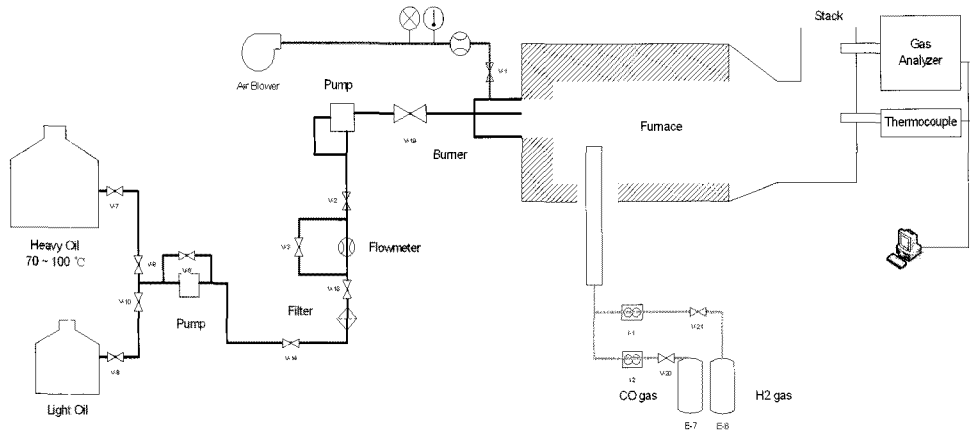


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

물이나 바이오매스를 가스화한 후에 정제가 끝난 합성 가스에 해당되는 것이다. 사용된 모사 합성가스의 종류는 (1) 공기 가스화(air-blown gasification)를 통해 나온 합성가스 조성과 비슷한 모사 합성가스(Syngas #1), (2) 산소 가스화(oxygen-blown gasification)를 통해 나온 합성 가스 조성과 비슷한 모사 합성가스(Syngas #2)를 사용하였다. 이들의 조성은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Syngas #1은 공기 가스화에서 생산되는 합성가스를 모사한 것으로 가정할, 890kcal/Nm³의 발열량을 가지고 있고, 특수 가스 제조업체에 의뢰하여 제작, 사용하였다. 원래는 15% 가량의 이산화탄소가 합성가스에 포함되어 있어야 하나, 그 비중이 산소 가스화에 비해 작은 편이고 비등점의 차이 등으로 인해 다른 가스화 혼합이 쉽지 않은 관계로 여기에 해당되는 부분은 질소로 대체하여 사용하였다. 산소 가스화에서 생산되는 것으로 가정할, 2300kcal/Nm³의 발열량을 가지고 있는 Syngas #2는 실험상 제약 조건 등을 고려하여 이전 연구 결과⁸⁾를 기초로 LNG를 순산소로 부분 산화하여 얻은 것을 사용하였다.

위 세 종류의 합성가스를 0.7MW 급 수관식 보일러(스팀 생산량 1톤/시간)에 열량 기준으로 혼소율 10%, 20%로 하며 실험을 수행하였으며, 혼소율 변화에 따른 배가스 조성변화도 관찰하였다.

2.2 실험 장치 및 케이스 설정

실험 장치의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치는 Fig. 3에 사진으로 나타낸 0.7MW 급 싱글 버너 수관식 보일러를 기본으로 하고 있으며, 버너는 같은 용량에 해당되는 유류 버너를 사용하였다. 주 연료로는 중유를 사용하였고, 37.85l/hr(10 gallons/hr) 노즐을 경유로 점화를 하여 점차 이를 중유로 교체하였다. 버너에 공기 유량 조절이 가능한 F.D fan을 연결하여 버너 에어 포트에 전자식 댐퍼로 개폐하여 배가스의 산소농도를 역산하여 공기비를 조절할 수 있도록 설계되어 있다. 연료량과 공기량은 설치된 유량계를 통하여 측정하고, 배가스의 농도를 측정하

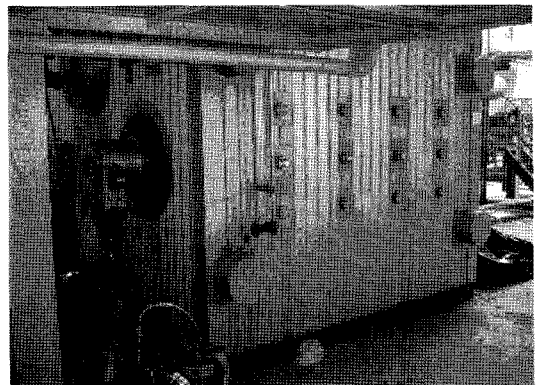


Fig. 3 A water-tube boiler (0.7 MW_{th}) with single burner for the experiment⁹⁾.

Table 2 Experimental cases

		Heavy oil	Syngas		Air	
		Heat input (kW)	Heat input (kW)	Flow rate (Nm ³ /hr)	Flow rate (Nm ³ /hr)	Stoichiometric ratio
Case	Ref. case	698	-	-	730	1.20
	1-1	698*0.9	69.66	135	730	1.21
	1-2	698*0.8	139.32	67	730	1.23
	2-1	698*0.9	69.65	53	730	1.21
	2-2	698*0.8	139.30	27	730	1.21

기 위해 후단에 가스 분석기를 설치하였다. 열전달 효율을 추정하기 위해 후단에 열전대를 함께 설치하였다. 일반적으로 중유를 연료로 연소 시 중유예열 온도에 따라 화염이 민감하게 작용하는데 본 실험에는 90℃로 설정하여 모든 실험에 적용하였다.

Table 2에는 실험 케이스들을 나타내었다. 기준 조건에 해당되는 케이스(reference case)는 열입력 0.7MW에 해당되는 중유 100% 연소를 의미한다. Case 1-1 및 Case 1-2의 경우에는 열량 기준으로 열입력 0.7MW의 10%, 20%에 해당하는 70kW, 140kW에 준하는 저열량 합성가스(Syngas #1)을 보일러 우측면에 있는 포트를 사용하여 투입하였다. 투입포트 면적이 좁아 12개 포트 중 중간에 있는 포트들에는 T/C를 설치하고 나머지 포트에 짝을 맞추어 합성가스를 투입하였다. Case 2-1 과 Case 2-2의 경우에는 고열량 합성가스(Syngas #2)를 역시 동일한 열량에 대해 동일하게 설치된 포트에 주입하였다.

본 실험에서 진행한 혼소율은 저위발열량 기준으로 10%, 20%이고 각각 가스 별로 동일한 조건을 가지고 진행하였다. 오일버너에 유량계를 설치하여 열부하를 혼합가스 대체율에 따라 0.63MW, 0.56MW로 설정하여 진행하였다. 즉, 총 연료에 의한 입열량은 모두 저위발열량 기준, 0.7MW로 맞추어서 진행하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 Air-blown 가스화 합성가스 혼소 특성

Fig. 4에는 reference case 결과를 나타내었다. 전체적으로 시간에 대해 비교적 안정적인 결과가 나

타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 근거하여 나머지 실험 결과들을 비교할 때는 시간 평균된 값을 사용하여 비교를 수행할 수 있다.

이에 따라 Fig. 5에는 공기 가스화에 의해 생성된 것으로 본 저열량 합성가스에 대하여 시간평균된 CO 및 NOx의 농도를 나타내었다. 모든 경우에 대하여 CO 농도는 20ppm 이하로 나오고 있으며 이는 합성가스가 들어가서도 보일러 내에서 모두 연소되고 있음을 보여주는 것이다. 그러나, 합성가스의 투입량이 많을수록 CO 농도가 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 20% 이상 합성가스가 주입되는 경우에는 불완전 연소의 가능성이 많이 높아지는 것도 확인할 수 있었다. NOx 농도의 경우 중유만 연소했을 때 O₂ 농도 4% 환산 기준으로 NOx 농도가 평균

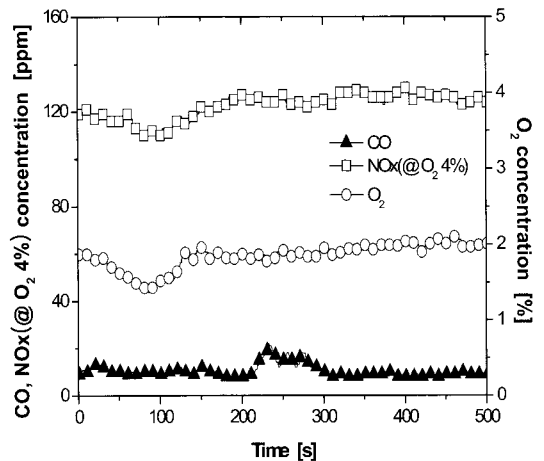


Fig. 4 Flue gas compositions for the reference case by time.

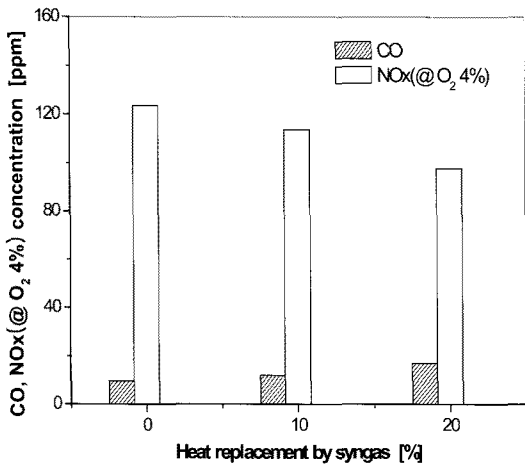


Fig. 5 Time-averaged CO, NOx concentrations for various ratios of syngas co-combustion (Syngas #1).

123ppm을 보인다. 반면에 10%, 20% 혼합연소를 했을 경우 100ppm 밑으로 떨어지면서 최대 20.9% 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 두 가지 관점에서 해석이 가능하다. 하나는 질소를 함유하고 있는 중유가 합성가스 혼소시 적게 투입되면서 그만큼 연료 NOx(fuel NOx)가 감소하기 때문에 NOx 농도 저감이 가능하다는 것이다. 두 번째로는 저열량 합성가스가 들어가면서 화염의 온도가 낮아져 열적 NOx(Thermal NOx)의 생성이 감소했다는 것을 들 수 있다.

Fig. 6에는 Syngas #1에 대하여 열량 기준으로 10% 및 20%를 주입했을 때의 가스 온도 분포를 나타내었다. 해당 온도는 화염 중심면에서 버너 축방향을 따라가면서 측정한 온도로서, Fig. 6에 표시된 숫자는 온도가 측정된 포트 번호를 의미한다. 화염과 직접 닿는 부분인 T_{#5}의 온도는 합성가스의 투입과 함께 온도가 1000°C에서 700°C로 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 합성가스의 열량 비율이 20%가 될 때에는 온도가 600°C까지 떨어지게 된다. 그리고, 화염과 약간 떨어지는 곳 또는 화염 후류 쪽으로 보이는 T_{#6}의 온도는 합성가스 투입과 함께 온도가 떨어지지만 온도의 하락 폭은 약 150°C 정도로서 T_{#5}에 비해 훨씬 작은 것도 확인

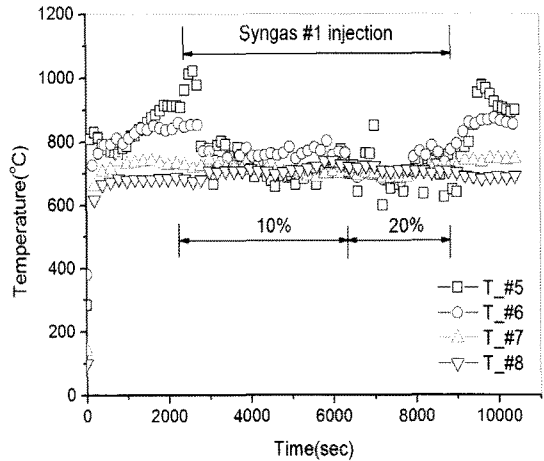


Fig. 6 Axial temperature distributions for Case 1-1 and Case 1-2 by time.

할 수 있다. 합성가스의 비중이 늘어나면 온도의 하락 폭도 더 커지는 특성을 보여주고 있다. 그러나, T_{#7}으로 넘어가서 더 후류쪽으로 가게 되면 합성가스 투입시 온도가 약간 하락하나 그 폭은 거의 무시할만한 수준이다. T_{#8}로 넘어가면 합성가스 투입시 온도가 오히려 약간 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 투입된 합성가스가 후류쪽에서 더 연소가 이루어지기 때문이며, 좀 더 대형 보일러로 갈 경우로 이로 인한 부분별 열부하 변동이 일어날 수 있음을 보여주는 것이다. 이 결과를 통해 합성가스 혼소시 NOx의 감소는 전체적인 화염온도가 떨어지면서 축방향 온도 분포가 더 평평해짐으로 인해 열적 NOx가 감소하는 것 역시 무시할 수 없는 요인임을 확인할 수 있다.

3.2 Oxy-blown 가스화 합성가스의 혼소 특성

폐기물을 순산소로 가스화한 뒤 정제하여 얻은 Syngas #2은 앞서 밝힌 바와 같이 저위 발열량 기준으로 약 2,250kcal/Nm³의 발열량을 가지고 있으며, Syngas #1보다 약 2.5배 높은 열량을 가지고 있다. 본 연구에서는 해당 합성가스 투입 실험 구간을 10분 내외로 설정하여 진행하였다.

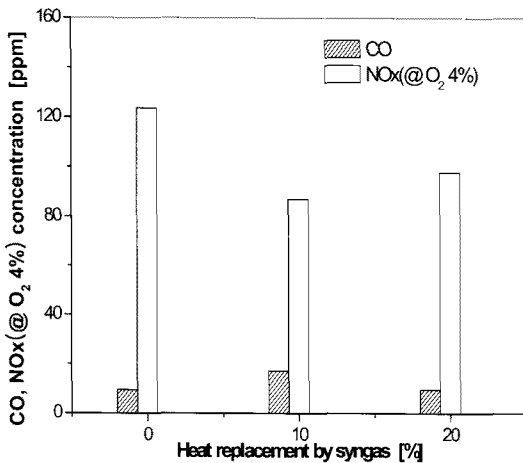


Fig. 7 Time-averaged CO, NOx concentrations for various ratios of syngas co-combustion (Syngas #2).

Fig. 7에는 고열량 합성가스의 혼소율에 따른 CO와 NOx의 농도변화를 나타내었다. CO 농도의 경우 합성가스 혼소율에 무관하게 20ppm 이하를 나타내고 있으며, 혼소율이 늘어날 때에도 CO 농도가 크게 줄어드는 경향을 찾아볼 수 없었다. 이는 고발열량 합성가스의 경우에는 좀 더 완전 연소가 가능하고 혼소율도 더 높일 수 있음을 의미하는 것이다. NOx 농도의 경우에도 합성가스를 넣지 않은 경우보다 더 낮은 농도를 나타내고 있다. 특이한 점은 이 경우에는 저열량 합성가스 혼소에 비해 NOx 농도가 더 낮게 나오고 있다는 것이다. 고발열량 합성가스이므로 화염 온도가 저발열량 혼소에 비해 더 높을 것임에도 불구하고 NOx 농도가 더 낮게 나오는 이유를 밝혀내기 위해서는 화염 내 환원 조건 생성 여부를 확인해봐야 할 것으로 보여진다. 이 경우에는 재연소(reburning)에 의한 효과가 개입되었을 가능성이 높다. 다만, 본 실험 결과로 이러한 사실을 유추하기에는 무리가 따르며, 추후 수치 해석 등을 포함한 상세한 분석이 이루어져야 할 것으로 보인다.

3.3 합성가스 혼소에 따른 보일러 열효율 평가

보일러 출구에서의 가스 온도를 측정하고 연소 계산을 통해 보일러 출구의 가스 조성을 구하면 출

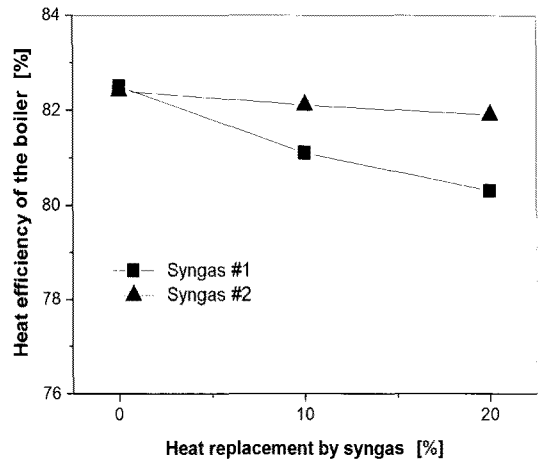


Fig. 8 Heat efficiency of the boiler for various calorific values and heat replacements of the syngas.

구 배가스가 가지는 엔탈피를 구할 수 있다. 따라서 중유와 합성가스로 구성된 연료의 발열량을 입열로 고려하면 입열량과 출열량의 차이가 보일러에서 물을 끓이는데 사용된 열량이므로, 여기에서 보일러의 열효율을 추산할 수 있다. 이를 식으로 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\eta(\%) = \frac{\dot{H}_{in} - \dot{m}_{gas} C_{p, gas} T_{gas}}{\dot{H}_{in}} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 η 는 보일러의 열효율을 의미하고, \dot{H}_{in} 은 보일러의 총 입열량으로서 연료의 발열량과 연료의 유량을 곱한 것이다. 실제 입열로는 연료의 현열도 포함되어야 하나, 그 수치가 발열량에 비해 매우 낮으므로 본 계산에서는 무시하였다. $C_{p, gas}$ 는 배가스의 비열을 의미하고 T_{gas} 는 배가스의 온도로서 측정된 값을 사용하였다. 본 연구에서는 이 방법을 사용하여 합성가스 혼소에 따른 보일러의 열효율을 계산하고 이를 평가하였다.

Fig. 8에는 혼소율의 변화에 따라 보일러의 열효율을 계산한 결과를 저열량 합성가스(Syngas #1)와 고열량 합성가스(Syngas #2)에 대하여 나타내었다. 모든 합성가스에 대하여 공통으로 합성가스 혼소시 보일러의 열효율이 감소하며, 혼소율이 증

가할수록 감소 폭이 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 혼소율이 증가시 중유보다 더 낮은 발열량의 연료가 들어오면서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 화염 온도가 감소하면서 수관으로의 열전달량이 떨어졌기 때문으로 보여진다. 이는 고발열량 합성가스인 Syngas #2의 경우 혼소율의 증가에도 불구하고 보일러 효율 감소가 Syngas #1에 비해 훨씬 작게 나타나는 결과로 나타나고 있다. 합성가스 혼소율 20%인 경우 나타나는 보일러의 효율 저감은 Syngas #1의 경우 약 2% 이내이고 Syngas #2의 경우는 1% 이내로 낮게 나타나고 있다.

결과적으로, 합성가스의 혼소에 의해 NOx 농도의 저감과 경제적으로는 연료비의 절감을 달성할 수 있다, 그러나 그 반대급부로서 보일러 열효율의 저감이 예상되며, 이는 추후 보일러 운영 및 운전에서 있어 중요한 기초자료로서 활용이 가능할 것으로 보인다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

저급 연료의 가스화로부터 만들어질 수 있는 합성가스를 기존 보일러에 혼소할 경우 발생할 수 있는 연소 특성의 변화 및 열효율 변화를 파악하기 위해, 공기 가스화시 생산될 수 있는 저열량 합성가스와 순산소 가스화시 생산될 수 있는 고열량 합성가스에 대해 혼소율을 바꾸어가면서 0.7MW 급 상업용 수관식 보일러에 대해 실험을 수행하였다. 이 결과 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

1) 합성가스는 기존의 가스연료 또는 액체연료보다 더 낮은 발열량을 가지고 있으므로, 이를 혼소할 때에는 화염의 온도가 떨어지게 되지만, 본 연구에서 사용한 시스템에서는 20% 까지 혼소율을 바꾸어가며 실험을 수행한 경우 완전 연소에는 별다른 문제가 발생하지 않았다. 다만, 1000kcal/Nm³ 이하의 저열량 합성가스에서는 조금이나마 배가스의 CO 농도가 혼소율의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이는 혼소율의 증가에 제약 요인으로 작용할 수 있다.

- 2) NOx 농도의 경우 합성가스 혼소시 화염 온도가 감소하여 열적 NOx의 소폭 감소가 가능하며, 중유와 같이 연료 내 질소 성분이 있는 경우 중유를 합성가스로 대체하면 추가적인 NOx 저감 효과를 도모할 수 있다. 재연소 효과를 위해 연소대 내에 환원 분위기 영역을 늘리면 더 많은 NOx 저감 효과를 기대할 수 있으나 본 실험에서 재연소 영역이 형성되었는지 여부는 확인이 어려우며, 추후 수치 해석 등을 통한 확인이 필요하다.
- 3) 합성가스의 혼소율이 높아지면 보일러 효율의 저감이 관찰되었으며, 이는 저열량 합성가스의 경우 더 두드러지게 나타났다. 본 연구에서 사용한 시스템에서는 혼소율의 10% 이내에서 효율 저감이 나타났으며, 이는 화염 온도의 저하로 인한 수관벽으로의 열전달 감소에 기인하는 것으로 보인다.

본 연구 결과는 실제 산업용 보일러 또는 발전용 보일러에서 합성가스 혼소를 수행할 경우 운전 및 운영에 있어 기초자료로 활용이 가능할 것으로 보이며, 좀더 자세한 물리적 현상 파악을 위해 다양한 조건에서의 실험 및 해석이 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 최신영, 양동진, 채태영, 양 원, 송병호, 박주원, "Basic Study on co-combustion of low class fuel and mixed gas in boiler", 한국연소학회 추계학술대회 논문집, 2008, pp. 134-139.
- 2) Spliethoff, H. and Hein, K. R. G., "Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces", Fuel, Vol. 54, 1998, pp. 189-205.
- 3) Mcilveen-Wright, D. R., Huang, Y., Rezvani, S.

- and Wang, Y., "A Technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidized bed technologies", *Fuel*, Vol. 86, 2007, pp. 2032-2042.
- 4) Shneider, Daniel R. and Bogdan, Zeljko, "Effect of heavy oil/natural gas co-combustion on pollutant generation in retrofitted power plant", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, 2007, pp. 1944-1950.
- 5) Casaca, C. and Costa, M., "NOx control through reburning using biomass in a laboratory furnace: Effect of particle size", *Combustion Institute* Vol. 32, 2009, pp. 2641-2648.
- 6) Wu, K. T., Lee, H. T., Juch, C. I., Wan, H. P., Adams, B. R. and Chen, S. L., "Study of syngas co-firing and reburning in a coal fired boiler", *Fuel* Vol. 83, 2004, pp. 1991-2000.
- 7) 양동진, 최신영, 양 원, "멀티 버너 중유 연소 로에서의 합성가스 혼합 연소 특성 연구", *한국연소학회지*, Vol. 15, 2010, pp. 43-49.
- 8) 나익환, 양동진, 최신영, 채태영, 방병열, 양 원, "메탄의 무촉매 부분산화를 통한 합성가스 제조 연구", *한국수소 및 신에너지학회 논문집* Vol. 20, 2009, pp. 337-343.
- 9) 최신영, 양동진, 방병열, 양 원, "1 ton steam/hr 수관식 보일러에서의 합성가스 혼합 연소 특성 연구", *한국연소학회 추계학술대회 논문집*, 2009, pp. 57-61.