

실험실 규모의 가압 순산소 연소 시스템을 이용한 저열량 합성가스의 연소특성 분석 연구

김동희*** · 이영재* · 양원***†

Investigation of Combustion Characteristics of Low Calorific Value Syn-gas Using Lab-scale Pressurized Oxy-Combustion System

Donghee Kim***, Youngjae Lee*, Won Yang***†

ABSTRACT

Agreeable to the latest enviromental problem, CCS(Carbon Capture&Storage) technology is more significant. As these issues, Oxy-Combustion is one of the technology that realize the CCS technology and large scale field test proceeding at other places. The aims of this research were to evaluate the combustion characteristics of pressurized oxy-combustion that is attract attention as the next generation power plant. The experiments were conducted using a laboratory-scale pressuized oxy-combustor. The fuel used was low calorific value syn-gas that is mainly composed of CO(60%), H₂(27%). The burner was used co-axial burner, to investigate combustion characteristics, temperature in the reactor and the flue gas compositions were measured.

Key Words : Pressurized Oxy-Combsution, Low calorific value syn-gas, CO₂ Concentration

전 세계적으로 새로운 곳에서 탄소 배출권 거래제가 대두되면서 탄소 시장 발전이 더욱 중요한 시기에 접어들었다. 한국은 국가 수준의 배출권 거래제도가 수립된 첫 아시아 국가이며 배출권 거래제를 실행하는 첫 국가들 중의 한 나라가 될 것이다. 이에 따라 CCS(Carbon Capture and Storage)와 CCU(Carbon Capture and Utilization) 기술의 중요성은 더욱 높아졌으며, 이를 해결할 수 있는 방법 중의 하나인 순산소 연소기술 또한 최근 주목받고 있는 추세이다. 순산소 연소 기술은 산화제로 공기가 아닌 산소를 사용하여 고순도 CO₂로 이루어진 배기가스를 생성하며, 생성된 고순도 CO₂는 쉽게 분리되고 CO₂ 포집에 유리하다는 장점을 가지고 있다.

순산소 연소 기술의 경우 현재 30MW 급의 설비에서 실증이 완료된 상황이며, 상용화에도 기술적인 장벽은 없는 것으로 인정되고 있다. 그러나 ASU(Air Separation Unit)를 통한 순산소 생산과 CCS를 위한 CO₂ 압축 과정으로 인해 최소 8% 이상의 발전 효율 감소가 불가피한

상황이며, 이는 발전소에서 생산된 전기의 약 20%에 해당하는 매우 큰 전력량이다.[1] 그럼에도 불구하고 탄소 배출권 거래제가 시행됨에 따라 CCS 기술을 위한 가압 순산소 연소 기술은 반드시 상용화되어야 한다. 순산소 연소에 대한 연구는 영국의 White Rose Oxy Power Plant 실증 프로젝트와 호주의 Callide Oxyfuel Project를 통해 대규모 실증이 이루어지고 있다.

이와 더불어 가압 순산소 연소 기술은 시스템의 소형화, 연소 가스의 열 에너지 회수, CO₂ 압축에 소비되는 에너지 감소의 측면에서 새롭게 대두되고 있는 기술로, 각국에서 공정해석을 통해 연구가 이루어지고 있다.[2,3,4,5] 그러나 공정 해석 연구에 비해 가압 순산소 연소의 실험적인 연구는 상당히 부족한 상황이다.[6,7] 따라서 본 실험은 연소로의 높은 내부 압력으로 인한 온도 분포 변화와 배기가스 조성 변화를 파악하고자 수행되었다.

본 실험에서는 기존의 순산소 연소 연구와 같이 CO₂ 재순환을 하지 않았는데, 연료로 사용한 저열량 합성가스에 이미 CO₂가 포함되어 있고, 순산소를 산화제로 사용했을 경우의 내부 온도, 배기가스 조성을 알아보기 위해 CO₂ 재순환은 고려하지 않았다.

* 한국생산기술연구원

** 과학기술연합대학원대학교 청정공정 및 시스템공학

† 연락처자, yangwon@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8265 FAX : (041)-589-8323

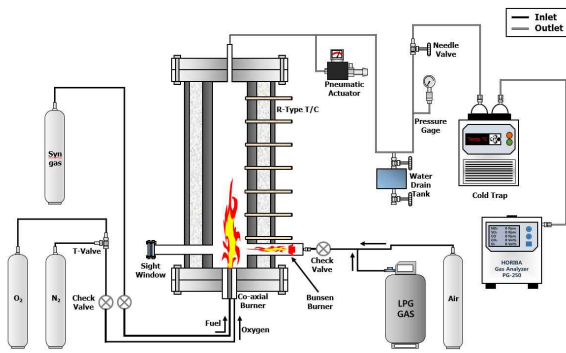


Fig. 1 Schematic diagram of pressurized oxy-combustion experiment

본 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응기는 높은 압력을 견디기 위해 20mm의 두께의 플랜지를 사용하였고 화염을 관측할 수 있는 가시화창을 설치하였다. 주 버너로 사용된 동축 버너, 주 버너의 점화를 위해서 분젠 버너를 보조 버너로 사용하였다. 주 버너로 주입되는 산소, 질소와 저열량 합성가스는 MFC를 통해 유량을 제어하였고, 보조 버너로 주입되는 LPG와 공기는 유량 조절기를 통해 유량을 제어하였다. 또한 모든 주입부에는 역류방지를 위하여 체크 밸브와 역화방지기를 설치하였다. 후단에 위치한 연소가스 배관에는 압력이 지나치게 높아지는 것을 방지하기 위한 공압 작동기를 설치하였고, 배기가스의 온도 하강으로 인해 생기는 응축수를 제거하기 위해 압력을 유지하면서 물을 제거할 수 있는 탱크를 설치하였다. 압력을 제어하기 위한 니들 밸브, 배기가스의 수분 제거와 냉각을 위한 냉각기, 분석기로는 HORIBA Portable Gas Analyzer PG-250이 사용되었다.

주 버너로 사용된 동축 버너의 1차 라인의 직경은 7mm이고 연료로 사용된 저열량 합성 가스가 주입된다. 또한, 동축 버너를 구성하는 두 개의 관은 모두 3mm의 두께를 가지고 있고, 산소가 주입되는 2차 라인의 내부 직경은 14mm이다.

메인 버너의 점화를 위해서 보조 버너로 사용되는 분젠 버너는 LPG와 공기를 히팅 코일을 통과시켜 화염을 형성하고, 이 화염을 이용하여 메인 버너가 점화되면 LPG와 공기를 차단하고 밸브를 통해 주입구를 차단했다.

반응기의 압력은 니들 밸브를 통해 조절하며 내부 압력은 압력계로 확인했다. 반응기 내부 온도를 측정하기 위한 thermocouple은 B-type을 사용하였고 반응기 내벽으로부터 10mm만큼 삽입되어 있다. 가장 하단에 위치한 thermocouple은 반응기 하부로부터 150mm 떨어져있고, 모든 thermocouple은 반응기 축 방향으로 100mm

간격으로 설치되었다. 반응기 후단의 배기관을 통해 흐르는 배기가스는 냉각되어 배기관에 응축수가 생기게 되는데, 배기라인을 U자 모양으로 제작하여 물이 고일 수 있는 밑에 부분에 응축수 탱크를 설치하여 응축수를 제거하였다. 최종적으로 니들 밸브를 빠져나온 배기가스는 콜드트랩을 지나며 저온으로 냉각되며 수분을 제거한 후, 가스분석기로 들어가게 된다. 추가로 가압 실험의 특성상 안전을 위해 설정된 압력 이상으로 높아지면 자동으로 압력을 조절해주는 공압 작동기를 설치하였다. 화염의 가시화를 위해 가시창을 설치하였는데, 가시창은 열처리된 강화유리를 사용하였으며 고온에서 생길 수 있는 문제점들을 방지하기 위해 냉각 시스템이 적용된 20cm 관을 사용하여 외부로 돌출시켜 놓았다.

Table 1 Syngas composition and properties

	Volume fractions(%)	Mass fractions(%)
CO	60	72.61
H ₂	27	2.57
CH ₄	0.1	0.07
CO ₂	9.9	20.77
N ₂	3	3.98
HHV(kJ/mol)	399.58	
LHV(kJ/mol)	390.28	
Adiabatic Temperature (K)	4101	

연료는 Uhde 사의 가스화기에서 나온 저열량 합성가스를 기준으로 사용하였으며 가스 조성은 Table 1과 같다. 실험조건은 SR(Stoichiometric Ratio)로 설정하였고, 연료의 양은 발열량 4kW를 기준으로 설정되었다. 실험 조건에 대한 자세한 내용은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental condition

	Flow rate(LPM)	Velocity(m/s)
Fuel	9.47	9.38
Oxygen	21.67	7.44

반응기는 내부 직경 80mm, 높이 800mm 크기를 사용하였으며, 8bar까지 가압되었다. 또한 압력 상승에 따른 온도 변화와 배기가스 조성의 변화를 측정하였고, 가시화 창을 통해 화염의 안정성을 보았다.

Fig. 2는 압력 상승에 따른 반응기 내부 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 1번은 반응기 가

장 하단 있는 thermocouple이고 2번부터 7번까지 차례대로 위에 있는 thermocouple를 나타낸다. 반응기 하부에서는 압력 상승에 따라서 온도가 하강하는 것을 볼 수 있고, 상부에서는 5bar 조

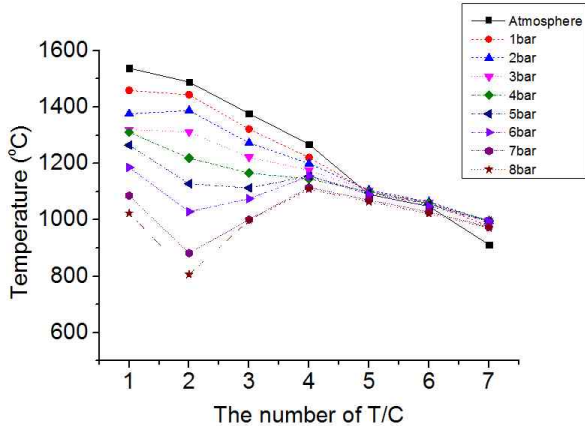


Fig. 2 Temperature in the reactor

건까지는 상압 조건보다 온도가 소폭 상승하지만 그 이상으로 압력을 높이면 온도가 하강하는 현상을 확인하였다. 온도가 하강하는 현상은 압력 상승으로 인한 화염 크기의 축소로 인한 것으로 판단된다. 가시화 창을 통하여 상압 상태의 화염을 관측하였을 때는 화염이 직선으로 길게 뻗어나가는 형상을 볼 수 있었지만, 압력이 높아짐에 따라 화염이 불안정해지고 화염의 끝단이 가시화 창을 통해 관측될 정도로 화염의 크기가 작아졌다. 화염의 크기가 작아진 것은 반응기 내의 CO₂ 농도 증가를 원인으로 생각할 수 있다. 반응기를 가압할 때 후단의 니들 밸브를 이용하여 압력조절을 했기 때문에, CO₂가 대부분인 연소 가스가 반응기 내부의 압력을 상승시켰다. 반응기 내부에 높아진 CO₂ 농도가 화염 불안정과 화염 크기 감소를 유발하여 반응기 전단의 온도가 크게 하강한 것으로 볼 수 있다.[8] 또한 압력이 상승할수록 열전달계수가 높아져 외부 열 손실이 증가하고, 질량유량이 증가하여 반응기의 온도를 상승시키기 위해 더 많은 열량이 필요하게 된다. 하지만 실험 조건은 일정한 열량을 유지하고 있어, 온도는 하강하게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 배기가스의 CO와 NO_x를 분석한 결과이다. 연료의 대부분을 차지하고 있는 CO는 상압 연소에서 뿐만 아니라, 가압 조건에서도 5~6ppm 수준으로 완전 연소되는 것을 확인하였다. 동축 버너를 이용한 비예혼합연소에서 층류 확산 화염의 크기는 연료나 산화제의 압력, 속도와 버너 직경에 영향을 받지 않고,

연료의 유량의 크기에 따라 증감한다. 또 압력이 상승할수록 비예혼합연소의 연소성을 결정하는 확산계수(diffusion coefficient) 또한 증가한다.[9] 연료와 산화제는 15 bar의 압력으로 동축 버너로 주입되고 있는 상태에서, 반응기의 압력이 상승할수록 상대압력은 작아져 확산계수가 낮아지고

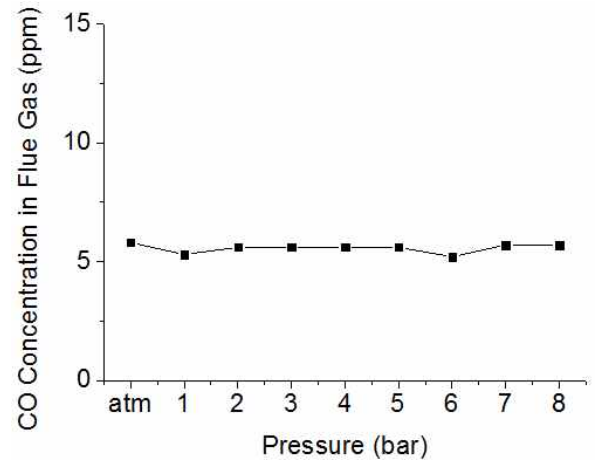


Fig. 3 CO and O₂ Concentration in flue gas

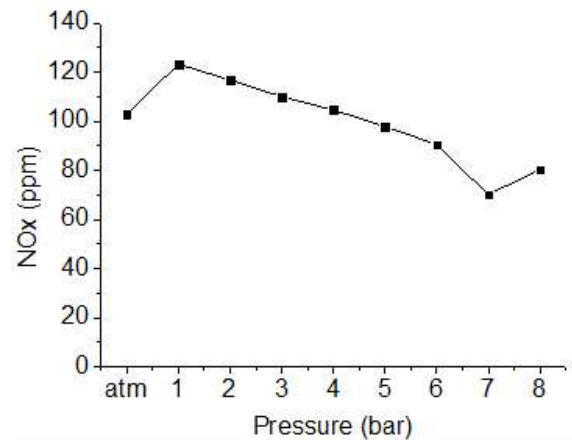


Fig. 4 NO_x Concentration in Flue gas

반응기 전단에서의 연소성에 영향을 미쳐 반응기 전단에서 온도가 하강하고 미연분이 반응기 후단에 영향을 미쳐 후단의 온도가 소폭 상승하였다.

NO_x는 1 bar의 가압 조건에서 반응기의 상부 온도가 상승함에 따라 증가하게 되고, 압력이 상승할수록 반응기의 전체적인 온도 하강에 따라 Thermal NO_x는 감소하게 된다.

이와 같이 배기가스를 이용하여 가압된 반응기의 가스 연소 실험을 통해 반응기 내부 온도와 배기가스의 조성을 분석해본 결과, 압력 상승은 CO의 연소성에 영향이 없었고, CO₂ 농도

상승으로 인한 화염 크기 감소와 불안정성 증가에 영향을 미쳤다. 또한 화염 크기 감소와 불안정성은 반응기 내부 압력에 영향을 미쳐 Thermal NO_x가 감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 반응기 내 연소가스의 길어진 체류시간으로 인해, NO가 감소하여 전체적으로 NO_x가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] S.C. Kim, “순산소 연소기술”, Journal of the KSME, Vol. 50(9), 2010, pp. 34-38
- [2] J.S. Hong, G. Chaudhry, J.G. Brisson, R. Field, M. Gazzino and A.F. Ghoniem, “Analysis of oxy-fuel combustion power cycle utilizing a pressurized coal combustor”, Energy, Vol. 34, 2009, pp.1332-1340
- [3] R. Soundararajan and T. Gundersen, “Coal Based Power Plants Using Oxy-Combustion for CO₂ Capture: Pressurized Coal Combustion to Reduce Capture Penalty”, Chemical Engineering Transactions, Vol. 29, 2012, pp. 187-192
- [4] H. Zebian, M. Gazzino and A. Mitsos, “Multi-variable optimization of pressurized oxy-coal combustion”, Energy, Vol. 38, 2012, pp. 37-57
- [5] J.S. Hong, R. Field, M. Gazzino and A.F. Ghoniem, “Operating pressure dependence of the pressuized oxy-fuel combustion power cycle”, Energy, Vol. 35, 2010, pp. 5391-5399
- [6] J.A. Lasek, M. Janusz, J. Zuwala, K. Glod and A. Iluk, “Oxy-fuel combustion of selected solid fuels under atmospheric and elevated pressures”, Energy, Vol. 62, 2013, pp. 105-112
- [7] J.A. Lasek, , K. Glod, M. Janusz, K. Kazalski and J. Zuwala, “Pressurized Oxy-fuel Combustion: A Study of Selected Parameters”, Energy Fuels, Vol. 26, 2012, pp. 6492-6500
- [8] S.M. Lee, W.S. Choi and K.Y. Ahn, “Experimental Study on the Combustion Characteristics of Syngas-Oxyfuel Diffusion Flames”, The Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, 2010, pp. 553-560
- [9] <http://arrow.utias.utoronto.ca/~ogulder/ClassNotes8.pdf>