

## 합성가스 재연소 특성에 관한 실험적 연구

이재욱\* · 채태영\* · 정경석\*\* · 양원\*†

### An Experimental Study on Characteristics of Syngas Co-combustion

Jaewook Lee\*, Taeyoung Chae\*, Kyeongseok Jeong\*\*, Won Yang\*†

화석연료를 기반으로 하는 모든 연소방식의 기술에서 대기환경 문제는 세계 각국의 끊임없는 과제로 남아있다. 세계적 수요에 따른 화석연료의 폭발적인 소비량 증가와 이에 따른 대기오염의 심각성은 이미 국제적인 문제로 대두되면서 선진국과 일부 개발도상국의 주도로 “기후변화협약”이라는 결과물을 만들게 되었다. 이 협약으로 당사국간의 온실가스 배출량을 감축하는 목표를 설정하여 시행령에 해당하는 의정서를 통해 의무적인 배출량 제한을 규정하고 있다.[1] 하지만 산업 및 경제의 개발이 절실히 필요한 개발도상국들이 이러한 제한기준을 충족하기에는 기술과 비용의 문제에서 큰 걸림돌이 될 수밖에 없다. 자국의 경제성장에 부정적인 영향을 감수하면서 협약의 기준을 충족하기엔 위험부담이 따른다. 그래서 환경오염에 대한 문제를 타개할 수 있는 방법들이 적극적으로 연구되고 있으며, 전력 생산 방식이 자연 친화적인 태양, 풍력, 지열, 바이오매스 등 신재생에너지로 전환되고 있다. 최근 국내 신·재생에너지 정책의 일환으로 RPS제도(Renewable Portfolio Standard, 신·재생에너지공급의무화제도)가 시행되고 있다. 이는 일정규모(500MW) 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자(공급의무자)에게 총 발전량의 일정비율 이상을 신·재생에너지를 이용하여 공급토록 의무화한 제도로써 2022년 까지 의무공급량 비율을 총 10%까지 단계적으로 확대하는 계획을 가지고 시행되고 있다. 그러나 발전량 대비 건설비용 및 유지비용을 고려했을 경우 가장 안정적으로 전력을 얻어낼 수 있는 화력발전이 전기 생산에 주를 이루고 있는 상황이다. 특히 2011년 일본 동부해안의 쓰나미에 의한 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 발전에 대한 인식이 달라지면서 원전 감축을 목표로 하는 국가들이 늘어나고 있는 상황이며 이러한 추세에 맞물려 안정적인 전력공급의 중요성이 대두되고 있다.

화력발전은 안정적인 전력을 공급할 수 있지만 화석연료를 연소하는 과정에서 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 그리고 불완전 연소 과정에는 일산화탄소(CO) 등의 물질들이 생성된다. 이러한 물질들은 인류가 화석연료를 사용하기 시작하면서 꾸준히 증가하고 있고 대기오염을 유발하며 특히 배출된 질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 산성비와 광화학 스모그의 원인으로 지목되고 있다. 그 뿐만 아니라 동식물의 생태에도 심각한 영향을 초래[2]하여 화석연료의 사용에 대한 부정적인 인식에도 한몫을 하고 있다.

NO<sub>x</sub>를 저감하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 연소로 내 연소과정에서 산소의 농도 및 온도 등을 조절하여 저감하는 연소조절에 의한 NO<sub>x</sub> 저감법과 연소 후 발생된 NO<sub>x</sub>를 연소설비 후단에서 제거하는 NO<sub>x</sub> 제거 처리기술 방식이다.

본 연구에서는 연소조절에 의한 NO<sub>x</sub> 저감법에 해당하는 재연소 기술을 사용한다. 이 기술은 폐기물과 바이오매스 등을 사용하여 기존의 연료를 일부 대체할 수 있으며 가스화 등을 통하여 대기오염을 감소시킬 수 있는 친환경적인 기술이다. 또한 신규설비 투자가 필요 없고 기존의 연소 시스템을 그대로 사용하기 때문에 설비에 바로 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 재연소는 물질이 생성되는 반응단계에서 사전에 제어하는 방식으로 탄화수소 계열의 재연소 연료(Reburn fuel)를 분사하여 재연소 영역(Reburn zone)을 조성하여 NO<sub>x</sub>를 환원시키는 기술이다. 재연소 기술은 NO<sub>x</sub>의 저감률이 40-60%에 달하며, SO<sub>x</sub>의 저감에도 일부 효과가 있는 것으로 알려져 있다. [3,4,5]

진행되는 연구의 목적은 폐기물이나 바이오매스 가스화 공정에서 생산되는 합성가스의 주요 성분인 CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>의 가스를 사용하여 재연소하는 방법으로 연소로 내부의 온도와 가스분포를 측정하여 각각 투입되는 가스의 연소특성을 알아보고 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 저감에 어떠한 영향을 미치는지 판단할 수 있는 근거를 찾는 것이다. 또한 투입되는 가스의 혼소비율을 달리하는 방법으로 실험을 진행하여 연소로 내 연소특성의 차이를

\* 한국생산기술연구원

고온에너지시스템 연구실용화그룹

\*\* 한국기술교육대학교 기계공학부

† 연락처, [yangwon@kitech.re.kr](mailto:yangwon@kitech.re.kr)

TEL : (041)559-8265 FAX : (041)589-8323

분석함과 동시에 가장 효율적인 합성가스 재연소 조건을 찾는 것이다.

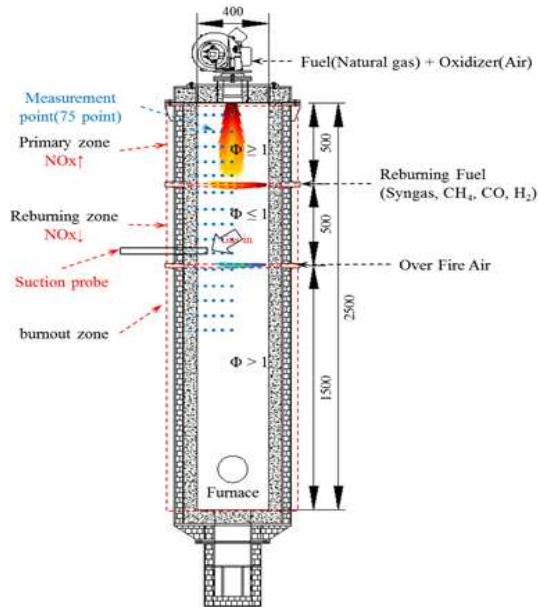


Fig. 1 본 실험에서의 재연소 개념도

실험에 사용되는 주연료(LNG)의 발열량은 100%연소를 기준으로 95, 90, 85, 80% 비율로 감소되며 산화제도 같은 비율로 감소된다. 반대로 합성가스는 동일한 발열량의 재연소 연료를 투입한다. 이때 동일유량을 투입하기 위해 N<sub>2</sub>를 혼합한다. 재연소율이 증가 할수록 재연소 영역에서 연료의 체류시간이 증가하는데, 투입되는 주연료와 산화제 양의 비율에 따라 감소하기 때문에 재연소 영역을 통과하는 산화제의 총 양이 감소하면서 발생하는 현상이다. 부족한 산화제는 OFA를 주입하여 양을 보충한다.

Table 1 CH<sub>4</sub> 및 OFA 투입량(LPM)

Case	Reference	5%	10%	15%	20%
CH <sub>4</sub>	0	5.41	10.83	16.24	21.66
N <sub>2</sub>	70	64.59	59.17	53.76	48.34
OFA	0	57.73	115.47	173.2	230.93
체류(s)	0.57	0.6	0.63	0.67	0.71

Table 2 CO 및 OFA 투입량(LPM)

Case	Reference	5%	10%	15%	20%
CH <sub>4</sub>	0	5.41	10.83	16.24	21.66
N <sub>2</sub>	70	64.59	59.17	53.76	48.34
OFA	0	57.73	115.47	173.2	230.93
체류(s)	0.57	0.6	0.63	0.67	0.71

Table 3 H<sub>2</sub> 및 OFA 투입량(LPM)

Case	Reference	5%	10%	15%	20%
CH <sub>4</sub>	0	5.41	10.83	16.24	21.66
N <sub>2</sub>	70	64.59	59.17	53.76	48.34
OFA	0	57.73	115.47	173.2	230.93
체류(s)	0.57	0.6	0.63	0.67	0.71

재연소 실험의 결과는 다음과 같다. 기본 연소 조건에서 고온 분포가 가장 넓게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 주연료의 투입량이 가장 많기 때문에 연소온도가 높은 결과를 보이게 되는 것이다. 반면 단일 가스 재연소의 결과를 보면 상대적으로 낮은 온도 분포를 확인할 수 있으며 CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>의 순서로 온도 분포가 넓게 형성되는 현상을 확인할 수 있었다. 재연소 연료의 발열량이 낮은 경우 비열적으로 많은 부피를 투입하게 된다. 그래서 연소로 내부에 넓은 범위로 연소 반응이 발생하여 온도 분포가 넓게 형성되는 현상이 발생하는 것이다. 재연소 연료의 투입비율이 증가할수록 상대적으로 주연료 버너의 선회류가 감소하고 연소로 내 상부의 온도는 감소하게 된다. 하지만 재연소 연료가 투입되는 위치의 온도는 높고 기본 연소와는 다르게 OFA가 투입되는 재연소의 경우 분사 위치 이후의 온도는 감소하게 된다. 그러나 재연소 비율이 증가할수록 연소로 내 하단의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 재연소 영역에서 연소반응이 증가하여 발생하는 결과이다. CH<sub>4</sub>의 경우 높은 발열량에 의해 투입되는 양이 크지 않아 연소로 내 온도 분포가 높게 형성되지 않는다. 재연소 투입비율에 따라 점차 비율이 증가할수록 연소로 내부의 온도는 낮아지는 결과를 확인할 수 있다. 위에서 언급한 주연료의 투입량이 감소되면서 발생하는 현상이다. 고온에서 공기 중의 질소가 산화하여 발생하는 thermal NO<sub>x</sub>와 연료 중 질소 성분과 산화제내의 산소가 반응하여 발생하는 fuel NO<sub>x</sub>의 생성조건은 모두 고온의 영역에서 나타난다. 온도가 낮은 재연소 조건에서의 NO<sub>x</sub> 분포는 전체적으로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 연료에 따라 CH<sub>4</sub>의 경우 NO<sub>x</sub>가 가장 낮은 생성반응을 보였고, H<sub>2</sub>를 사용 하였을 때 가장 높은 생성반응을 보였다. 재연소 연료의 NO<sub>x</sub> 분포를 보게 되면 재연소 연료의 종류와 무관하게 비율이 증가할수록 NO<sub>x</sub>가 저감되는 것을 볼 수 있다. 이러한 반응은 부족한 주연료의 투입에 의한 온도 감소와 재연소 영역에서 NO<sub>x</sub>가 환원되어 나타나는 결과로 보여진다.

재연소 비율의 증가와 주연료 투입량의 감소에 의해 주연소 영역의 온도가 감소하여 thermal NO<sub>x</sub>와 fuel NO<sub>x</sub>가 감소하고 NO<sub>x</sub>와 반응을 하는 재연료 연료의 비율이 증가하기 때문에 환원

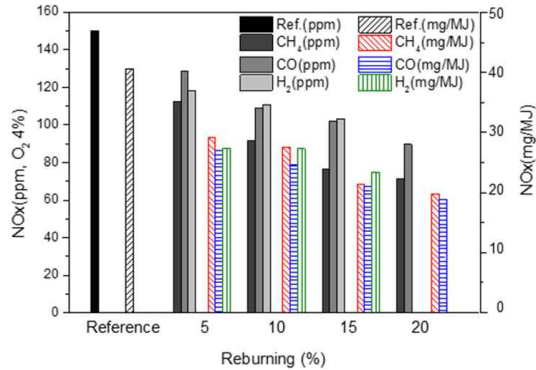


Fig. 2 재연소 비율에 따른 NO<sub>x</sub>농도

되는 NO<sub>x</sub>의 양이 증가하여 나타나는 결과이다. 재연소 연료로 CH<sub>4</sub>를 사용한 경우 NO<sub>x</sub> 저감 효과가 가장 높으며 CO와 H<sub>2</sub>의 경우 CH<sub>4</sub>보다는 NO<sub>x</sub>의 저감의 효과가 작지만 차이는 확인 할 수 있었다. 본 연구는 폐기물이나 바이오매스 가스화 공정에서 생산되는 합성가스의 주요 성분인 CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>를 사용하여 재연소 실험을 진행하였다. 연소로 내부의 온도와 가스분포를 측정하여 재연소 가스가 NO<sub>x</sub> 저감에 어떠한 영향을 미치는지 판단할 수 있었으며, 비율에 따른 연소특성을 확인할 수 있었다. 특히 합성가스 재연소에 의한 NO<sub>x</sub> 저감이 단순한 온도저하 및 주연료 저감에 의한 결과보다 효과가 높게 나타났다. 이러한 결과는 재연소 가스의 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 증명하였다.

## 참고 문헌

- [1] 조원일, 이승호, 모용기, 신동근, 백영순 (2004), 합성가스 제조를 위한 CO<sub>2</sub>/수증기에 의한 메탄 개질반응 연구, 『한국수소 및 신에너지 학회논문집』, 제15권, 제4호, pp.301-308.
- [2] Sheng S, Jun X, Lushi S, Zhongxiao Z, Xuexin S, Chuguang Z, "Numerical simulation of nitric oxide destruction by gaseous fuel reburning in a single-burner furnace", Proceedings of the Combustion Institute 31, 2795 - 2803(2007)
- [3] Takahashi, Y., Sakai, M., Kunimoto, T., Ohme, S., Haneda, H., Kawamura, T. and Kaneko, S., Proc. of the 1982 Joint Symposium on Stationary NO<sub>x</sub> Control, EPRI Report No. CS-3182, July, 1983.

[4] Folsom, B. A., Sommer, T. M., Ritz, H., Pratapas, J., Bautista, P. and Facchiano, T., "Three Gas Reburning Field Evaluations - Final Results and Long Term Performance," EPRI/EPA 1995 Joint Symposium on Stationary Combustion NO<sub>x</sub> Control, Kansas City, MO, May 19, 1995.

[5] Lee, C. Y. and Baek, S. W., "Effects of Reburning on Heat Transfer Characteristics and NO<sub>x</sub> Reduction," Trans. of the KOSCO, Vol. 10, No. 2, 2006, pp.18-25.