한국에너지공학회(2000년도)
춘계 학술발표회 논문집 P303~306

산소부화연소의 질소산화물 발생저감을 위한 실험적 연구

조 길 원, 한 건 우, 이 용 국
포항산업과학연구원

An Experimental Study for the Reduction of Nitrogen Oxides in Oxygen Enriched Combustion

Kil Won Cho, Kunwoo Han and Yong Kuk Lee
Research Institute of Industrial Science and Technology

1. 서 론

최근 기후변화협약과 관련된 온실가스로서 가장 큰 관심사가 되고 있는 CO_2는 연료의 연소시에 필연적으로 발생되는 연소생성물로서 CO_2의 배출량 저감을 위해서는 고효율 연소기술의 개발이 최우선 과제로 인식되고 있다.

산소부화연소는 연소용공기에 산소를 혼합하여 공기중의 산소농도를 높여 연소용 공기중의 질소분율을 감소시킴으로서 연소온도의 상승, 전열효율의 증대 및 연소 배가스의 현열손실 저감등을 목표로 하는 연소기술이다. 산소부화 연소기술은 부화율에 따라 열효율 향상 효과가 변화되지만 공업용 가열로의 경우 산소부화율 1%당 약 1.2%의 연료절감이 가능하여 산소부화율을 높일 경우 대폭적인 열효율 향상이 가능한 기술이다. 산소부화연소는 열효율 향상에 유효한 것으로 인정되어 일부 공정에는 상용적으로 이용되고 있으나 연소성의 향상에 따른 단염화에 의한 연소로내 온도 불균일과 고온연소에 따른 NOx의 과다발생 등의 이유로 사용에 제약이 되고 있는 실정이다[1].

산소부화연소에서는 단위열량당 연소가스량이 공기연소시보다 감소하므로 연소온도가 증가하게 되며 따라서 일반적으로 NOx 발생량이 증가하게 된다. 저NOx 연소법에는 다단연소법, 농담연소법, 배가스 재순환법, 화염분할법 등 많은 방법이 있으나 이들 방법의 요체는 연소온도와 산소농도의 영향도를 억제하는 것이라 할 수 있다. 최근 고온공기 연소나 순산소연소와 같은 고온연소 공정에서 NOx 저감을 위하여 산화제의 고속분사법이 주목을 받고 있다. 고속분사법은 통상의 연소보다 공기 혹은 산소의 분사속도를 매우 빠르게 함으로서 노내의 연소가스를 산화제 분류내에 흡인시켜 산화제중의 산소농도를 저하시켜 연소온도를 낮추고 NOx 저감을 도모하는 기술로서 기존의 외부 배가스 재순환기술을 버너 자체에 부여한 노내 배가스 재순환기술(in furnace recirculation)이다[2,3].

본 연구는 산소부화연소시 노내 온도의 균일화와 저NOx화를 연소기술을 개발하기 위하여 수행한 것으로서 본 논문에서는 중형규모 가열로용 버너의 산소부화연소시 공기 분사속도 등의 버너 설계조건 변화에 따른 NOx 발생특성을 평가하고 NOx 저감을 위한 방안을 도출하기 위해 수행한 연구결과를 중심으로 기술하고자 한다.

2. 실 험

실험을 위하여 연소실험로, 연료, 공기 및 산소 공급장치를 설계제작하였다. 실험로의 유효제원은 1.2m(H)×1.2m(W)×2.5m(L)이며 길이방향의 한쪽면에 버너가 부착되고 반대면의 연도를 통하여 연소가스가 배출된다. 실험로의 한쪽 벽면에는 화염관찰창을 구비하고 반대쪽 벽면에는 길이방향으로 10개의 온도측정구를 설치하였다. 공기와 산소의 혼합은 벤튜리

형 혼합기를 이용하였고 혼합기 출구에 산소센서를 설치하여 산소농도를 모니터링 하면서 공기, 산소의 유량을 조절하였다. 온도측정에는 sheathed R-type 열전대를 사용하였고, 연소가스의 농도는 연도의 시료채취구에 배가스분석기(Madur)의 probe를 삽입하여 측정하였다. 연료로는 상용 LPG를 사용하였으며 연소용량은 10만 kcal/hr로 고정하였다. 연소공기중 산소농도는 21%에서 40%까지를 실험범위로 하였고 정해진 부화율에서 공기비는 1.1에서 1.4까지 변화시켰다. 산소부화율과 공기비별로 미리 계산된 유량설정표를 이용하여 각 실험조건별 연료량, 공기량, 산소량을 조절하여 버너에 공급하였고 파일럿 버너를 이용하여 점화시켰다. 노온이 1,000℃에 도달하면 실험로 길이방향 중심부의 온도분포와 연소가스 분석을 개시하여 노온이 1,300℃에 도달할 때까지 연속적으로 측정하였다.

실험용 버너로는 종래의 기준버너로서 대표적인 상용 1단연소식 버너(공기기준 상온 분사속도 10m/s) 1종과 2단연소식 버너 3종(공기의 분사속도 15-20m/s)을 이용하여 산소부화시의 영향을 파악하였고, 고속분사의 효과 확인 및 버너 구조의 NOx 생성에의 영향을 파악하기 위하여 공기(산소)의 분사속도(산소농도 30% 기준 20, 40, 60m/s, 2차공기 분사구수 8개), 2차공기 분사구의 수(4, 6, 8개, 공기 분사속도 40m/s), 2차공기 분사구의 위치가 다른 2단연소식 버너(2차공기 분사구수 8개, 분사속도 40m/s)를 제작하여 실험하였다. 자체제작한 2단연소식 버너는 버너타일의 중심부에 화염점검구가 위치하고 그 외주의 환상공간을 통하여 연료가 공급된다. 1차공기는 연료노즐 외주의 환상공간을 통하여 공급되고, 2차공기는 연료노즐과 동심원상의 1차공기 노즐 외주의 타일에서 다수개의 원형 노즐을 통하여 분사된다. 1차공기와 2차공기의 비율은 20:80으로 설계하였다(Fig. 1 참조)

3. 결과 및 고찰

모든 실험용 버너 공히 공기중 산소농도의 증가에 따라 화염의 휘도가 증가하여 백색화염화되고 화염의 안정성이 향상되었다. 상용 1단연소식 버너는 화염의 최고온부가 버너 토출구 부근에서 형성되었으며, 동일 산소농도에서 2단연소식 버너 대비 화염의 휘도가 높았다. 이러한 결과로서 1단연소식 버너는 노온 1,050℃ 기준으로 공기 단독연소시 NOx 발생량이 50ppm 수준이었으나 공기중 산소농도 30%시 600~800 ppm, 산소농도 40%시 1,000 ppm 수준으로 증가하였다. 종래의 저속분사형 2단연소식 버너에 산소부화 연소시 노온 1,050℃에서 공기중 산소농도 30% 까지는 200ppm 이하의 NOx가 발생되었으나 산소농도 40%에서는 모두 200ppm을 초과하였다. 노내 온도분포는 저속 2단연소식 버너는 버너 토출구 부근에서 최고 화염온도가 나타난 후 온도가 급격히 감소하여 노내 온도편차가 크게 나타났다. 본 연구에서 제작한 고속분사형 2단연소식 버너들에서는 버너 토출구 부근의 온도는 낮고 후류부로 갈수록 온도가 증가하면서 균일화되었다.

고속분사 버너에서 공기 분사속도의 변화에 따른 NOx 발생량은 분사속도 20m/s의 경우가 가장 높고, 40m/s와 60m/s의 경우가 유사하였으며, 온도분포의 균일성은 60m/s의 경우가 가장 양호하였다. NOx 발생량은 노온 1,050℃에서는 20, 40, 60m/s의 경우 공히 산소농도 30%에서 50ppm 이하, 40%에서는 100ppm 이하였다. 노온 1,300℃에서는 산소농도 30%의 경우 공히 100ppm 이하, 40%의 경우는 20m/s가 400ppm, 40m/s가 300ppm, 60m/s가 250ppm 수준으로 분사속도의 증가에 따라 NOx 발생량이 감소하였다. 실험용 버너들은 산소농도 30% 기준으로 설계된 바 산소농도 40%에서는 공기의 분사속도 감소로 고속분사의 효과가 감소하여 NOx 발생량이 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 공기중 산소농도 40%의 경우는 30%에 비하여 전체 공기량이 75% 수준으로 감소된다. 이는 산소부화율별로 공기의 분사유속을 적절히 변화시켜야 함을 시사하는 결과라고 할 수 있겠다. 노내 온도분포의 균일성은 분사속도의 증가에 따라 향상됨을 알 수 있었다. 고속분사에 의하면 높은 모멘텀을 갖는 연소용공기가 고속으로 분사됨에 의해 노내의 연소가스를 흡인하여 연소용 공기중 산

소농도의 희석에 따라 버너 토출구 부근의 최고 연소온도가 저하되며 이 결과로서 NOx 발생량이 저감되는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 산소부화 연소시 고속분사의 효과를 확인해 주는 것으로서 고온공기 연소에서 적용되는 원리가 산소부화 연소시에도 동일하게 적용되며 고온연소에 있어 고속분사의 효과를 확인해 주고 있다고 할 수 있겠다[3].

공기의 고속분사가 NOx 저감과 노내온도 균일화에 유효한 것으로 확인된 바 NOx 발생에 미치는 버너 구조의 영향을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 공기분류에의 노내가스 흡인율은 공기의 분사속도(노즐면적), 분사구의 수, 분사구의 위치에 따라 변화할 것으로 예상되므로 이들 변수의 영향을 파악하고자 하였다(Fig.'s 2 & 3).

Fig. 2는 NOx 발생량을 종합적으로 나타낸 것으로서 분사구 수의 영향으로서는 2차공기 분사구 4개의 경우가 NOx 발생량이 가장 높고 8개, 6개 순으로 감소한다. 2차공기 분사구의 수가 8개이지만 2차공기 분사구를 버너 중심에서 멀리(직경 0.2m 동심원상) 배치한 경우가 다른 경우들(직경 0.15m 동심원상)에 비하여 NOx 발생량이 가장 낮게 나타났다. 특히 산소농도 40%의 경우에도 100 ppm 이하의 저NOx 연소가 가능한 것으로 나타나 공기의 분사속도 및 분사구의 수 이외에도 분사구의 배치에 따라 NOx 발생량이 크게 변화됨을 알 수 있었다. 공기 분사구의 구경(분사속도)에 따라 NOx 발생량이 변화하는 것은 분사구경의 크기에 따라 분사 모멘텀이 변화하는 것과 인접한 분사구의 영향도가 변화하여 노내 가스의 흡인율이 변화하기 때문인 것으로 해석된다. 공기 분사구의 위치가 영향을 미치는 것은 노내 가스의 흡인에 분사구의 반경방향 위치가 큰 영향을 미치기 때문이라고 볼 수 있겠다. 이상의 결과를 종합해 보면 공기의 분사속도가 빠를수록 NOx 저감에 유리하며 2차공기 분사구의 수와 배치가 중요하다는 결론을 얻을 수 있겠다. 본 연구에 부가하여 향후 추가적인 실험과 시뮬레이션 등을 통한 버너의 최적화 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 2차공기 분사구 수와 위치변화에 따른 노내 온도분포를 도시한 것으로서 노온의 분포는 앞에서 설명한 NOx 발생과 동일한 경향을 보인다. 즉 온도가 높고 peak 온도를 보이는 경우가 NOx 발생량이 높다. 노온의 불균일성은 산소농도가 높을수록 증대되는 것을 확인하였다. 버너의 설계인자 변화에 따른 온도분포 변화 현상도 앞에서 설명한 노내 가스의 흡인율로서 설명가능할 것으로 판단된다. 즉 노내 연소가스의 흡인율이 적은 경우에는 주 연소영역이 노의 상류부에서 형성되고 흡인율이 큰 경우는 상대적으로 후류부에서 균일한 연소가 일어나는 것으로 유추할 수 있겠다. 공기 분류중에 노내 연소가스를 최대로 흡인하여 노내에 분사된 산화제중의 산소농도를 저하시킬 수 있도록 공기 분사방법을 최적화하는 것이 노내 온도 균일화와 NOx 저감의 요체인 것으로 판단되며, 이는 가능한 한 well mixed reactor에 근접할 수 있도록 설계하는 것일 것이다.

4. 결 론

산소부화 연소시는 연소성의 향상으로 화염길이가 감소하고 고휘염화되며 NOx 발생량이 증가되는 현상을 보인다. 산소부화율의 증가에 대응하여 공기/산소 혼합기의 분사속도를 증가시킴에 의해 NOx 저감과 노온의 균일화가 가능함을 확인하였으며, 공기 분사구의 수와 배치 등의 공기 분사방법에 따라 NOx 발생량과 온도분포가 변화함을 확인하였다. 앞으로 산소부화율별, 연소용량별, 그리고 연료별 공기 분사방법의 최적화를 위한 연구를 통하여 저NOx 산소부화 연소의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 중점국가연구개발사업으로 수행중인 온실가스저감기술개발사업단의 세부과제 중 "축열식 산소부화 연소시스템 개발" 연구의 1, 2차년도 연구결과 중 일부임.

참고문헌

1. 日本鐵鋼協會共同研究會, "最近の實用燃燒技術",pp.79-93(1994)
2. Kobayashi, H. and Prasad, R,, "A Review of Oxygen Combustion and Oxygen Production Systems", Proc. of Forum on High Performance Industrial Furnace and Boiler -sponsored by NEDO, March 8-9, Tokyo, Japan, pp.74-1~74-8(1999)
3. Kobayashi, H., U.S. Patent 5,076,779(1991)

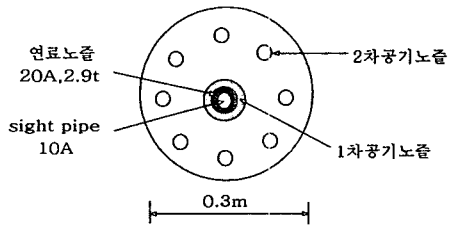

Fig. 1. Typical front view of experimental burners

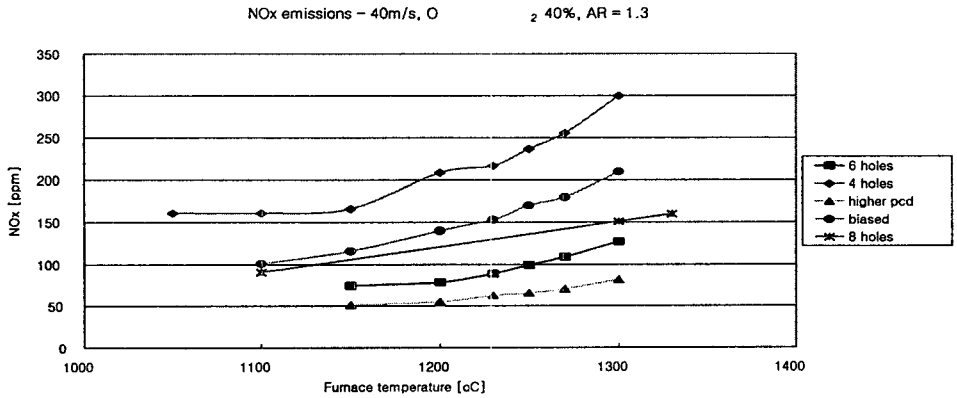

Fig. 2. Comparison of NOx emissions for various experimental burners

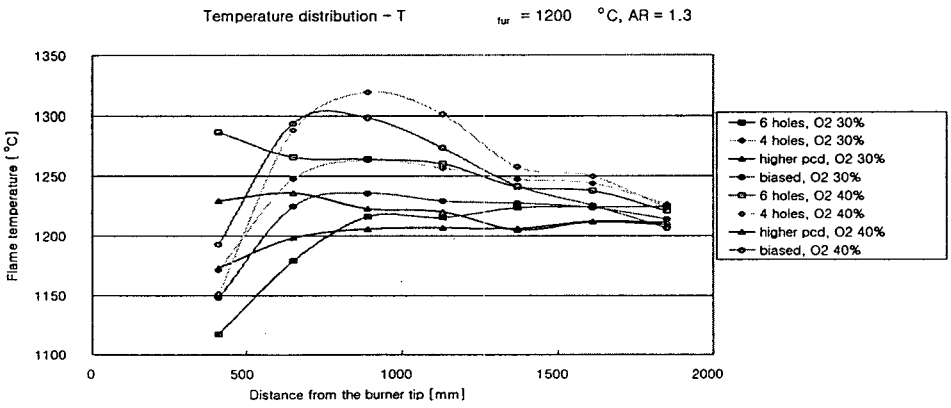

Fig. 3. Temperature distributions along the furnace length