

## 고온공기 연소시 복사관 버너의 질소산화물 발생특성

조길원, 조한창, 이용국  
포항산업과학연구원

NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Radiant Tube Burner with Highly Preheated Air

Kil Won Cho, Han Chang Cho and Yong Kuk Lee

Energy and Chemical Process Research Team, RIST, Pohang, 790-330, Korea

## 서론

복사관을 이용한 가열방식은 복사관내에서 연료를 연소시킬 때 얻어지는 열이 관을 통하여 복사됨으로서 피가열물을 가열하는 방식으로써 분위기 제어가 필요한 열처리로 등에 널리 이용되고 있다. 이러한 가열방식에서는 기본적으로 복사관의 방사열량이 높아야 하며, 이는 고부하연소가 가능한 버너의 채용에 의해 가능하게 된다. 고부하 복사관 버너는 복사관에 국부 고온부가 없고 길이 및 원주방향의 온도분포가 균일해야 하며 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 발생량이 작아야 한다[1]. 최근 연소설비의 에너지절약기술로서 연소가스의 현열을 회수하여 연소용공기를 고온으로 예열하는 축열연소가 각광을 받고 있으며 이의 적용을 위한 노력이 활발하게 진행되고 있다. 축열연소 버너는 버너 2대가 1쌍으로 교대로 운전되면서 각각 연소(재생)모드와 축열모드가 교대로 반복되므로 연소용공기의 고온 예열(800℃ 이상)에 따른 연료사용량 절감 이외에도 온도분포의 균일화 측면에서 유리한 면이 많다. 축열연소의 경우 고온공기의 사용에 따른 연소온도의 고온화로 인한 NO<sub>x</sub> 발생량의 증가가 실용화의 장애요인으로 작용하여 왔으나, 그간의 많은 노력으로 직화식 버너에 대하여는 고속공기 분사에 의한 노내가스의 흡인으로 연소공기중의 산소농도를 희박하게 함으로서 첨두온도와 NO<sub>x</sub> 발생을 억제하는 기술을 중심으로 한 저NO<sub>x</sub> 축열연소기술이 정립된 상태이다. 그러나 복사관 버너에 고온공기 연소기술을 적용시에는 직화식 버너가 사용되는 가열로 등의 설비보다 복사관의 연소공간이 좁고 상대적으로 고부하연소가 이루어지기 때문에 저NO<sub>x</sub> 연소가 상대적으로 곤란하다. 아직까지 만족할 만한 저NO<sub>x</sub> 연소가 가능한 고온공기 복사관 버너는 개발되지 않은 실정이며 저NO<sub>x</sub> 축열식 복사관 버너의 개발은 실용연소 분야에서 현재까지 미해결 과제중의 하나이다[2, 3].

본 연구는 고온공기 축열식 복사관 버너에 있어서 저NO<sub>x</sub> 연소기술을 개발하기 위한 기초단계로서 각종 저NO<sub>x</sub> 원리를 적용한 소형 실험용 버너에 대한 연소실험을 통하여 저NO<sub>x</sub> 연소가 가능한 버너의 기본모델을 도출하는데 목표가 있다.

## 실험

실기규모 버너에 대한 실험의 전단계로서 저NO<sub>x</sub> 버너의 설계방안 도출을 위한 소형 연소실험을 수행하였으며 각종 NO<sub>x</sub> 저감원리와 특히 등의 분석결과를 기반으로 저NO<sub>x</sub> 연소방안을 도출하고 저NO<sub>x</sub> 버너의 기본모델을 결정하는 것을 목표로 하였다. 연소실험을 위하여 연소용량 2만kcal/hr급 연소실험장치를 설계 제작하였다. Fig. 1은 연소실험장치의 구성도이다. 고온공기 축열연소시는 일정시간 간격으로 연소가 절환되며 시간대별로 연소공기온도 및 NO<sub>x</sub> 발생량 등이 변동되나 본 실험에서는 버너의 설계조건별 NO<sub>x</sub> 발생특성을 파악하는 데 목적이 있으므로 연소를 절환하지 않고 전기식 공기가열기에 의해 연소용 공기를 고온으로 예열하여 버너에 공급 하였다. 본 장치는 공기공급계통, 연료공급계통, 실험로 등으로 구성된다. 연료로는 상용 LPG를 사용하였으며 실험로내에는 직경 80A, 길이 1.5m의 내열튜브를 내장하여 내열튜브 내에서 연소가 이루어진다. 내열튜브의 외주공간에는 희석용 공기를 주입하여 노온을 조절할 수 있도록 하였으며 열전대

를 설치하여 노온을 측정할 수 있도록 하였다. 송풍기에서 공급된 연소용 공기는 전기식 공기예열기를 통하여 약 900°C까지 가열되어 버너에 공급된다.

실험용 버너로는 각종 저NO<sub>x</sub> 원리를 도입한 다양한 형태의 버너를 설계제작하여 버너별 NO<sub>x</sub> 발생량을 측정하였다. 일차적으로는 중앙 공기분사를 기본으로 하는 버너들을 대상으로 실험하였고, 실험결과를 바탕으로 혼합지연형 버너를 설계제작하여 실험하였다. 버너의 제작에서는 연료와 공기노즐의 배치, 형태 및 수량, 분사속도 등을 주된 변수로 하였다. Fig. 2는 실험에 사용한 버너의 노즐부 형태를 보여준다. 실험은 연소용량 1만 kcal/hr에서 2만kcal/hr까지 수행하였으며 공기예열기에서의 공기예열온도가 800°C에 도달할 때까지 노를 예열한 후 연소가스중 산소농도(공기비)를 변화시키면서 버너별 NO<sub>x</sub> 발생이력을 측정하였다.

### 결과 및 고찰

일차적으로 다양한 종류의 공기 중앙분사형 버너에 대하여 성능실험을 수행하였다. 기존의 저NO<sub>x</sub> 연소기술 및 버너에 대한 조사, 분석 결과 중앙공기분사형이 여러가지 버너 형태 중 저NO<sub>x</sub> 효과가 가장 우수한 것으로 판단했기 때문에[4] 복사관버너에 적용시에도 저NO<sub>x</sub> 연소가 가능할 것으로 기대하였으나, 약 200 ppm 정도로 많은 양의 NO<sub>x</sub>가 발생하였다. 특히 농담연소를 위한 연료노즐 구경의 대공(大孔), 소공(小孔) 배치나 연료의 축방향 분사위치를 다르게 한 연료 2단연소 등도 NO<sub>x</sub> 저감에 효과가 없는 것으로 나타났다. 따라서 복사관버너에는 직화식 버너의 저NO<sub>x</sub> 원리가 그대로 적용되지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이는 좁은 공간인 복사관 내에서 연소시 고부하 연소와 공기/연료간 혼합촉진에 따른 급속연소에 기인하는 것으로 판단되었으며 노온 측정결과에서도 이와같은 사실을 유추할 수 있었다.

공기 중앙분사형 버너에 대한 실험 결과 복사관내에서 고온공기 연소시 NO<sub>x</sub> 저감을 위해서는 연료와 공기의 혼합지연으로 급속연소를 방지하는 것이 유효할 것으로 판단하였다. 또한 복사관내의 피크 부하를 줄이고 복사관내 온도분포를 가능한 한 균일하게 하기 위해서는 화염의 장염화가 유리하므로 가능한 한 연료가 복사관의 길이방향으로 멀리까지 도달하게 하는 것도 유효할 것으로 판단하였다. 따라서 연료 단공(單孔) 분사 및 공기/연료 편심분사의 개념을 도입한 버너 구조로 개발방향을 수정하여 가능한 한 공기와 연료 노즐간의 거리가 멀리 배치되도록 설계한 혼합지연형 버너를 제작하여 실험을 실시하였다. 혼합지연형 버너에 대한 실험에서는 공기노즐의 형태(원형, 슬릿형)와 공기분사속도, 연료노즐의 위치가 NO<sub>x</sub> 발생량에 미치는 영향을 파악하였다. 실험 결과 공기노즐을 연료노즐에서 이격된 위치에 배치하여 공기를 편심분사하는 혼합지연형의 경우 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소되며 특히 연소용공기의 분사유속 증대시 NO<sub>x</sub> 저감효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 원형 공기노즐보다 슬릿형 공기노즐의 NO<sub>x</sub> 발생량이 작게 나타났다.

이하에 실험결과를 상세히 비교 분석한다.

직화식 버너에서는 공기가 중앙에서 분사되고 연료가 외주에서 분사되는 연료직접분사에 근접한 버너의 저NO<sub>x</sub> 성능이 가장 우수한 것으로 알려져 있으나, 본 실험결과 공기 중앙 분사식의 버너는 구조의 변화에 관계없이 혼합지연형 버너보다 상당히 많은 양의 NO<sub>x</sub>가 발생하였다. 공기 중앙분사형 버너에서는 서로 마주보는 연료노즐 중심간의 거리가 60mm로서 80A 연소통내에서 최대한 중심에서 먼 위치에서 분사되나, 직화식 버너에 적용시 대비 공기와 연료의 상대적인 혼합거리가 짧아서 급속혼합이 이루어지기 때문인 것으로 사료된다. 즉 상대적으로 구경이 작은 좁은 연소공간인 복사관내에서는 공기 및 연료노즐의 배치상의 제약으로 인하여 종래 직화식 버너에 적용되던 저NO<sub>x</sub> 기구의 효과가 미약하거나 효과가 없다는 것을 보여주는 결과라고 하겠다. 특히 연료를 대공노즐과 소공노즐로 나누어서 분사하는 경우와 연료를 2단 분사하는 경우 NO<sub>x</sub>의 저감을 기대하였으나, 연료 2단분사의 경우는 더 많은 NO<sub>x</sub>가 발생되었다. 연료유속을 증대 내지는 연

료노즐을 극단적으로 편심하는 경우도 NO<sub>x</sub> 저감 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 공기 중앙분사에 연료를 단공노즐에서 분사하는 경우도 연료와 공기가 동일단면에서 분사되는 경우는 215-315 ppm, 연료가 공기 전단부에서 분사되는 경우는 200-270 ppm의 NO<sub>x</sub>가 발생하였다.

공기 중앙분사형 버너에 대한 실험결과 공기 중앙분사시는 공기와 연료의 초기혼합 증대 내지는 연료분류의 미세화에 의한 혼합촉진으로 급속연소가 유발되는 것으로 보인다. 따라서 가능한 한 공기와 연료의 초기혼합을 억제할 수 있도록 버너를 설계해야 할 것으로 판단되었다. 공기와 연료의 초기혼합을 최대로 지연시키기 위해서는 기본적으로 공기와 연료 분사구를 멀리 떨어지도록 배치하여야 한다. 또한 동일한 양의 공기나 연료를 분사시 다수개의 노즐을 통하여 분사하는 것보다는 노즐의 개수가 적은 경우가 공기나 연료의 도달거리가 멀어지므로 화염의 장염화가 가능하여 연소실내 농도 균일화 및 열부하 경감에 의한 NO<sub>x</sub> 저감을 기대할 수 있을 것이다. 따라서 연료와 공기는 기본적으로 각각 하나의 분사구에서 공급하되 혼합이 지연될 수 있도록 개발방향을 수정한 혼합지연형 버너를 제작하여 실험한 것이다.

Fig. 3은 대표적인 실험대상 버너들의 NO<sub>x</sub> 발생량을 비교하여 나타낸 것이다. 공기 중앙분사형 버너와 비교할 때 혼합지연형 버너는 100 ppm 이하의 저NO<sub>x</sub>가 가능할 정도로 NO<sub>x</sub> 발생량을 감소시킬 수 있음을 보이고 있다. 공기노즐의 형태는 슬릿형의 경우가 원형의 경우보다 NO<sub>x</sub> 발생량이 작게 나타났다. 이는 두가지 이유에 기인하는 것으로 생각되는 데 첫째는 동일면적의 경우 슬릿형이 원형보다 노즐주위 둘레(wetted perimeter)가 커서 연소가스의 흡인율이 높아지는 것과 원형노즐의 경우가 연료노즐과의 거리가 짧아져서 혼합이 촉진되기 때문인 것으로 판단된다[5].

혼합지연형 버너는 당초 생각했던 의도대로 초기 공기와 연료의 혼합지연과 공기분류의 통달거리 증대로 인한 장염화와 노즐이 방향의 열분포 균일화 효과가 발휘되는 것으로 생각된다. 또한 공기의 고속분사시는 버너 토출구 부근에 강한 부압이 형성되는 것으로 미루어 직화식 버너에 비하여는 소량이지만 상당한 양의 연소가스가 공기중으로 흡인되는 것으로 판단된다. 통상 고속분사는 산소희박연소를 지향하는데 공기가 노내가스와 섞이게 되면 연소용공기중의 산소농도가 낮아지고, 따라서 급속연소가 방지되며 침두온도를 생성하지 않으므로 NO<sub>x</sub> 저감이 가능한 것이라고 설명할 수 있겠다[2, 4]. 연료노즐의 분사위치와 관련하여서는 연료와 공기노즐의 간격을 멀리하는 것이 NO<sub>x</sub> 저감에 유리하였으며 이는 공기와 연료의 초기혼합 지연효과에 기인되는 것으로 판단된다. 소형 버너에 대한 실험에서는 연소통의 직경이 매우 작아서 버너 구조의 변화에 따른 미세한 영향은 파악하기 곤란하였으나 가능하면 혼합을 지연시키는 구조로 나가는 것이 NO<sub>x</sub> 저감에 유용할 것으로 판단된다.

## 결론

연소가스의 현열을 회수하여 연소용공기를 고온으로 예열하여 연소시키는 에너지절약형 축열연소기술을 복사관 버너에 적용시의 문제점인 NO<sub>x</sub>의 다량발생 문제점을 해결하기 위하여 소형버너에 대한 성능실험을 수행하였다. 고부하연소가 이루어지는 복사관 버너는 직화식 버너의 NO<sub>x</sub> 발생특성과 상이한 현상을 보이며 직화식 버너에서 가장 우수한 저NO<sub>x</sub> 성능을 보이는 공기 중앙분사형 버너는 연료분류의 미세화 및 공기와의 혼합촉진에 의한 급속연소로 다량의 NO<sub>x</sub>가 발생된다. NO<sub>x</sub>의 저감을 위해서는 공기와 연료의 혼합지연과 공기 고속분사 개념의 조합이 필요하다. 공기를 버너의 하부에서 분사시키고 연료는 버너의 중앙 또는 버너의 상부에서 편심분사하는 버너의 경우 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소하며 특히 연소용 공기의 분사유속 증대시 추가적인 NO<sub>x</sub> 저감이 가능하다.

참고문헌

- 1) Cho, K.W., Park, H.S. and Lee, Y.K., Korean J. of Chem. Eng., 10(3), p.141 (1993)
- 2) Milani, A. and Saponaro, A., IFRF Combustion Journal, Article No. 200101 (2001)
- 3) Sato, J., "Combustion in high temperature air," The first asia-pacific conference on combustion, pp.286-289 (1997)
- 4) Weber, R., On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and drastic reductions in CO<sub>2</sub>, CO and NO<sub>x</sub> emissions, Preprints of 5th INFUB (2000)
- 5) Tomczek, J., Goral, J. and Gradon, B., Combust. Sci. Tech., vol. 105, p.55(1995)

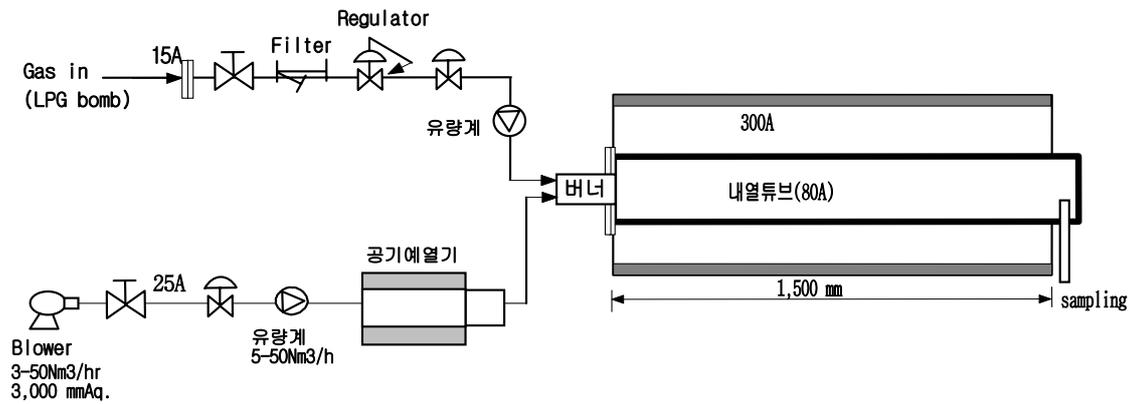


Fig. 1. 연소실험장치의 구성도

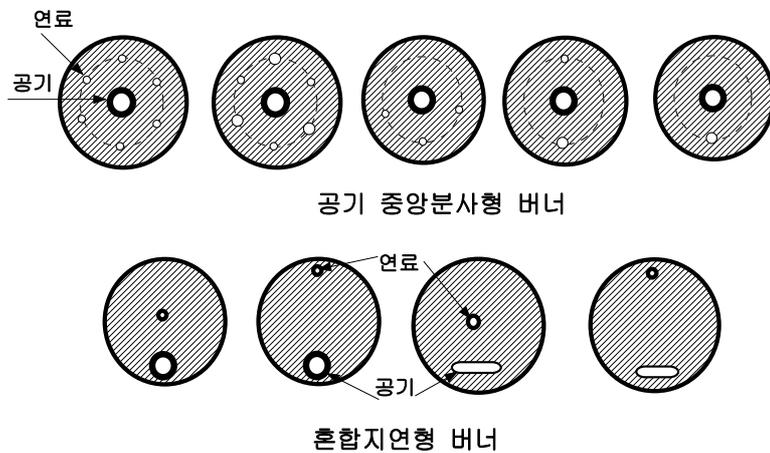


Fig. 2. 실험용 버너의 노즐부 구조

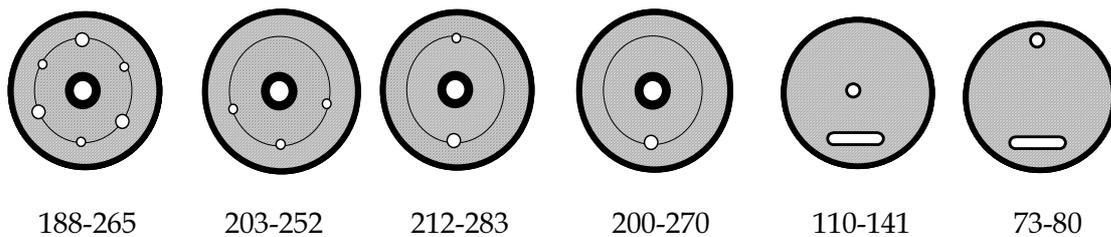


Fig. 3. 버너별 NO<sub>x</sub> 발생량 비교 (단위:ppm)