

폐열회수겸용 버너의 설계 기술 개발에 관한 연구 (I)

박병식, 김원배, 정대현*, 김유**

A Study on the Development of a Recuperative Burner (I)

Byung-Sik Park, Won-Bae Kim, Dae-Hun Chung*, Yoo Kim**

Key Words : recuperative burner, combustor, design technology

Abstract

A recuperative burner in the capacity of 400kW was designed using the design data from the experimental results. Performance tests on this burner were made. The exhaust gas analysis, including NOx, the measurement of the flame temperature and velocity in the recuperative burner were the main topics of hot combustion tests.

Design data from the experimental results are the gas velocity, air velocity, the tip location of gas nozzle and the dimension of furnace. In view of uniform temperature distribution and thermal efficiency, it is appropriate to maintain the furnace pressure at 2-3mmAq.

1. 서론

일반적으로 산업용 연소로에서는 노내의 분위기 온도가 높게 유지되며, 피가열물과의 열교환을 마친 후 대기 중으로 방출되는 배기가스 현열량이 전체 입열량의 약 50% 이상을 차지한다. 그 때문에 연소로 설비 전체에 대한 열효율은 10~40% 정도로 매우 낮으며 이러한 연소로 들에 대한 에너지 절약대책이 매우 긴요하게 된다. 연소로에 대한 에너지 절약 대책에는 연소개선, 설비관리, 전열개선과 배열회수 등 여러 가지 항목들이 있지만 어떤 종류의 연소로에 대해서도 공통적으로 쉽게 적용할 수 있는 에너지 절약대책은 배열회수 기술이다.

그러나 배열회수 기술로 많이 이용되어 온 종래의 열교환기와 버너가 별개로 조합되는 시스템의 경우는 공기배관을 따로 해야 함은 물론, 열손실을 줄이기 위한 배관의 보온재 시공을 해야 하는 등

경제적 및 공간적인 문제점 들이 야기되기 때문에 이를 개선할 필요가 있어 왔다.

한편, 국내에서도 최근 들어 환경문제가 심각하게 대두되면서 천연 가스 사용이 많이 늘어나고 있으며, 가격 면에서 상대적으로 비싼 연료인 가스를 효과적으로 사용하는 방안으로 폐열회수겸용 버너가 주목을 받고 있다. 본 연구의 대상인 폐열회수겸용 버너는 재생가열기(recuperator)와 연돌이 필요 없고 한 버너몸체에 폐열회수기인 재생가열기와 연소기기인 버너 그리고 연돌을 일체화한 구조로서 매우 콤팩트화한 연소기기이며 시공이 간단해지고 열풍배관이 필요하지 않게 되는 큰 장점을 가지고 있다.

이 버너는 1960년대에 이미 연구 개발되어 1970년대 중반이후 산업 현장에 적용하여 왔으며 독일, 영국 및 일본 등에서는 지금도 연구가 꾸준히 수행되어 Schmidt 등^[1]에 의해 열교환부의 형태에 관한 연구가 이루어졌으며 山本 博^[2], A. Tabata 등^[3,4,5] 및 A. Akiyama^[6] 등에 의한 연구는 저 NOx 및 예열공기의 온도 즉, 폐열회수율 등에 초

*한국에너지기술연구소

**충남대학교 기계공학과

점이 맞추어져 있다.

이처럼 폐열회수겸용 버너의 열교환기에 대한 연구는 많이 있으나 노즐의 설계방법이나 노즐의 성능에 관한 연구결과는 찾기가 용이하지 않아 금번 연구에서는 400 kW 급 용량의 버너 시제품을 설계하기 위한 가장 핵심적인 노즐의 설계방법, 성능을 최대로 하기 위한 노즐의 위치를 찾고자 하였으며 노내압의 변화에 따른 속도장과 온도장의 변화를 통하여 폐열회수겸용 버너의 성능을 검토하고 열전달 효과를 증대시키기 위한 방안으로 버너내부에 분배기 및 십자형 전열촉진체를 삽입하여 열교환기의 성능 향상을 실험 및 수치해석을 통하여 최적의 형태를 찾고자 하였다.

2. 버너노즐의 설계 및 실험방법

Fig. 1에 본 실험에서 사용된 버너의 조립도를 나타내었다. 가스노즐부는 내열강으로 제작하고 화염을 안정시키는 버너타일은 내열 캐스터블(castable)로 제작했으며 그 외는 일반 탄소강으로 만들었다.

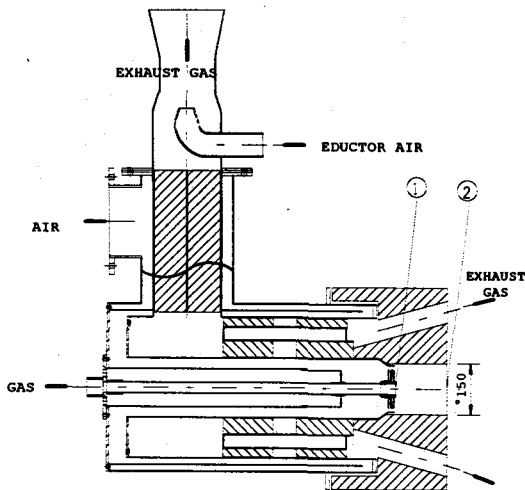


Fig. 1 Schematic of recuperative burner

가스노즐부의 설계는 혼합성과 안정성을 강조하였다. 노즐의 형태는 가스노즐과 보임판을 일체형으로 하여 노즐부 전체를 가공하는 방식을 취하였으며 그 주위로 가스분출 링을 열간 박음으로 제작하였다. 가스는 링 주위의 바깥쪽 24개와 안쪽 8개

의 직경 4 mm 인 구멍을 통해 반경방향으로 분출되며 공기는 그 주위로 흘러 서로 혼합된다.

Fig. 2에 개념 설계된 노즐에 대하여 가스의 혼합과정과 치수 등이 도시되어 있다.

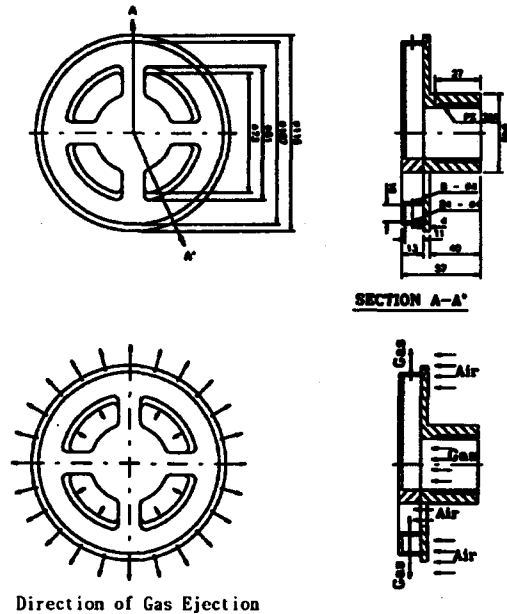


Fig. 2 Test gas nozzle

공기는 가스노즐 주위에서 분출되는데 예열공기 온도 300℃ 기준으로 유속은 약 15~20 m/s가 되고 가스의 분출속도는 20~25 m/s로 하였다. 가스 분출 속도는 사용되는 버너의 종류에 따라 결정되는데 폐열회수겸용 버너의 경우 가스분출속도를 크게 하여 생기는 축방향의 큰 운동량을 이용하면 배기가스가 노의 끝 벽까지 도달하도록 할 수 있으며 결과적으로 긴 유로를 형성시켜 대류전열효과를 극대화할 수 있다. 노즐에서 분출된 가스의 일부는 공기와 예혼합되어 노즐의 전면에서 화염이 생성되고 일부는 안정된 확산화염의 형태로 하류 쪽에서 연소가 이루어진다. 버너타일 형태는 노내 배기가스의 원활한 배출과 노내온도 균일화를 위해서 배기가스 방출통로를 가스노즐을 중심으로 30° 만큼 기울여 설계하였다.

설계 제작된 버너의 성능을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같은 성능 실험로를 이용하였다.

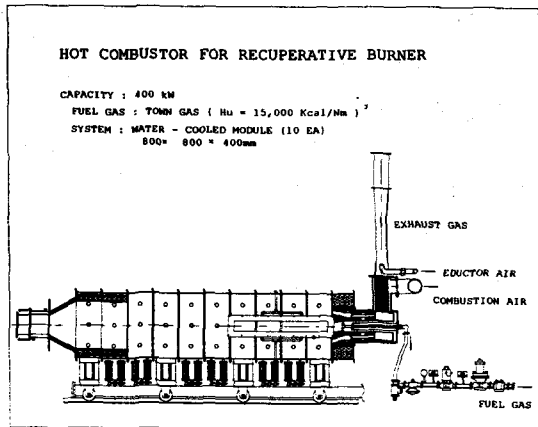


Fig. 3 Experimental furnace

사용연료는 도시가스 (LPG+Air, HL=15,000 kcal/Nm³)이고 화염온도는 복사전열효과로 인한 온도 오차를 감소시킬 수 있는 흡입고온계 (Suction Pyrometer, Land Combustion Co. LTD, England)를 이용하여 측정하였으며 노내의 유동장 분포를 알아 보기 위하여 고온에서도 사용 가능한 피토크관(Pitot tube)을 이용하였다. 배기가스의 성분 중 O₂ 는 Para-magnetic (Servomex, England), CO 는 Infrared (Servomex, England) 그리고 NOx 값은 Chemiluminescent 형태(Thermo technik, USA)의 분석기를 이용하여 노출의 변화에 따른 각 성분의 생성정도를 알아 보았다.

3. 성능실험 및 결과분석

폐열회수겸용 버너의 경우 가스분출속도는 20~25 m/s로 하였다. 이 경우 연소가스가 버너타일을 지나 노내로 토출될 때의 유속은 약 80~100 m/s가 되어 원하는 축방향의 운동량을 얻을 수 있었다.

만약 가스분출속도가 25 m/s 이상인 경우 화염의 부상(lift) 및 화염의 불안정을 초래하였고 이보다 작은 경우 축방향의 운동량이 작아져 연소가스가 원하는 영역까지 도달하지 못하여 전열에 있어서 문제가 발생하였다.

화염구조를 파악하기 위하여 노내의 연소가스 속도와 온도를 측정하였다. Fig. 4에는 연소용량 P =

400 kW 에 대하여 속도장 및 온도장을 나타내었다.

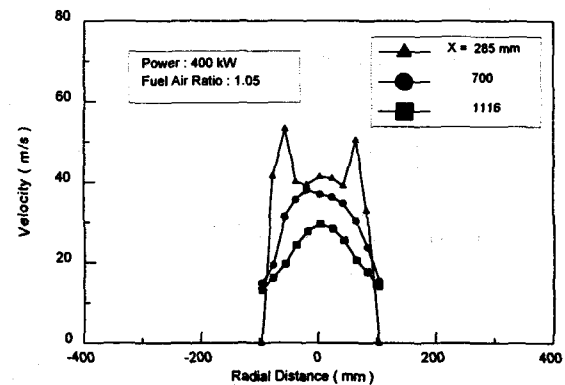
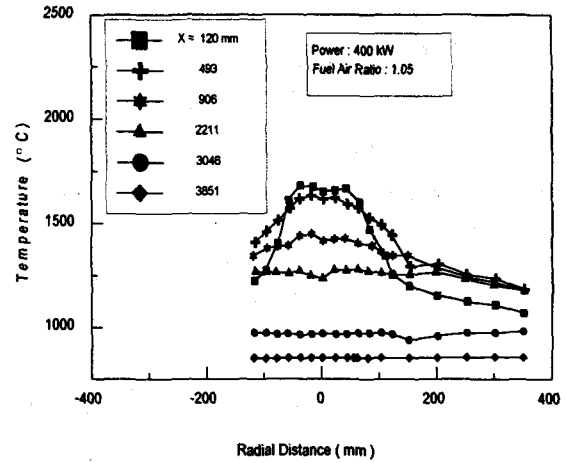


Fig. 4 Temperature and velocity field in furnace

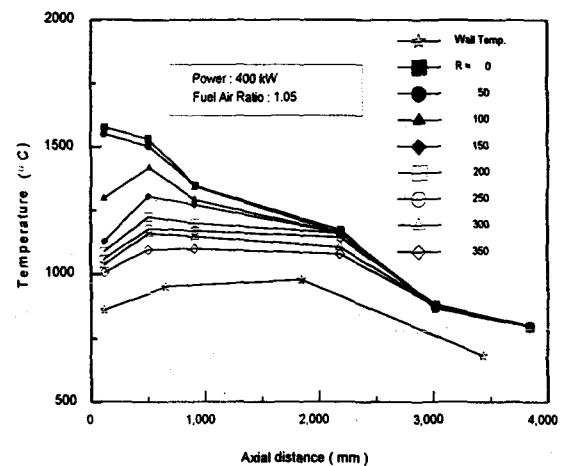


Fig.5 Temperature variation with axial distance

측정된 위치중 최고온도는 1650°C로 노 내부의

버너타일면(Fig.1-⑨)을 기준으로 하여 노 길이 방향 $x = 120\text{mm}$ 부근에서 나타났다. 유속은 3점 $x = 285, 700, 1115\text{mm}$ 에서 동시에 측정하였으며 $x = 285\text{mm}$ 에서 최고속도 $50\sim 55\text{ m/s}$ 를 나타내었다.

Fig. 5는 축방향에 따른 노내의 온도분포를 나타내고 있다. 노벽면온도는 $x = 120, 655, 1850, 3450\text{ mm}$ 4군데에서 동시에 측정하여 나타내었다. 노벽면 온도분포는 약 $x = 2500\text{ mm}$ 까지 벽면에서의 높은 대류속도에 기인하여 $1,100\sim 1,300^\circ\text{C}$ 정도로 비교적 넓은 영역에 걸쳐 고르게 나타났으며 본 논문에 나타내지 않았지만 노 후미 부위는 정체영역이 약 1.2m 정도 존재하는 것으로 예측되었다. 이는 실험로의 단면 ($800\times 800\text{ mm}$)에 비해 노의 길이가 길어 연소가스가 노 후미까지 도달하지 못하여 발생하는 것으로 분석된다. 이 영역은 벽면복사의 영향으로 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 의 온도가 유지되었다.

벽면에서 측정된 온도는 벽주위의 온도에 비례하나 벽에서 약 50 mm 떨어진 지점의 온도에 비해 약 80°C 정도의 차이를 나타내었다. 온도의 분포를 보면 버너타일에서 약 2500 mm 까지는 비교적 균일한 온도분포를 나타내나 그 이후는 서서히 감소하는 특성을 보여 400 kW 에 적합한 노의 크기는 $800\times 800\times 2500\text{ mm}$ 가 적당한 것으로 평가되었다.

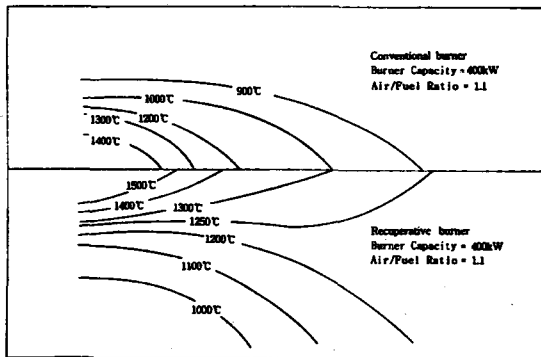
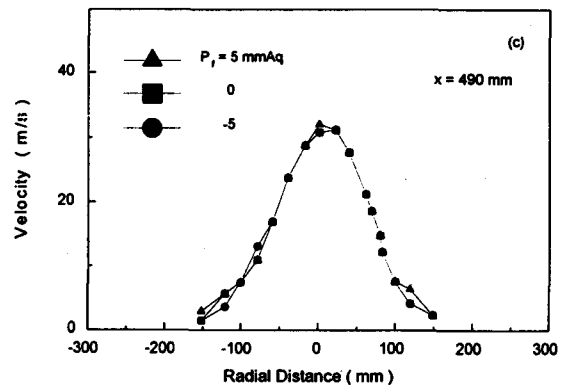
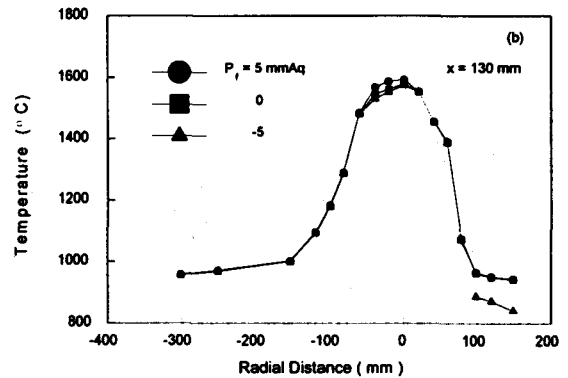
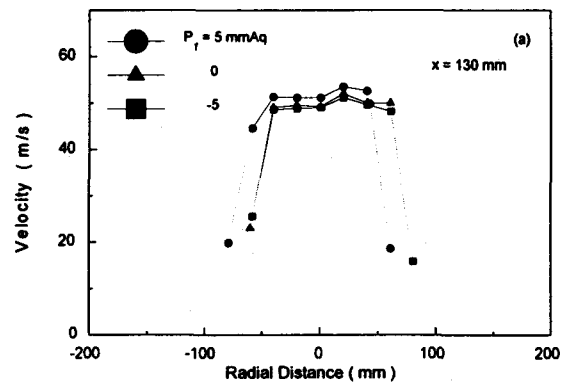


Fig. 6 Comparison of temperature fields between recuperative burner and conventional gas burner

Fig. 6에는 기존 가스버너(Klöckner사 제품, 400 kW)와의 온도분포 비교를 나타내었다. 그림의 온도분포 곡선의 왼쪽 시작위치에 비교대상 버너의 출구가 바로 붙어 있고, 우측 외곽선의 중심부에

연소가스 출구가 존재하며 상하 외곽선은 노 길이 방향의 벽면을 나타내는 것으로 스케일은 임의로 하였다. 폐열회수겸용 버너의 경우는 배기가스 출구온도가 거의 1000°C 를 유지하며 벽을 따라서 노 내온도분포가 균일한 반면에 기존버너에서는 연돌 쪽으로 온도의 기울기가 커져 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 를 나타내어 전반적인 온도분포가 심한 차이를 보였다.



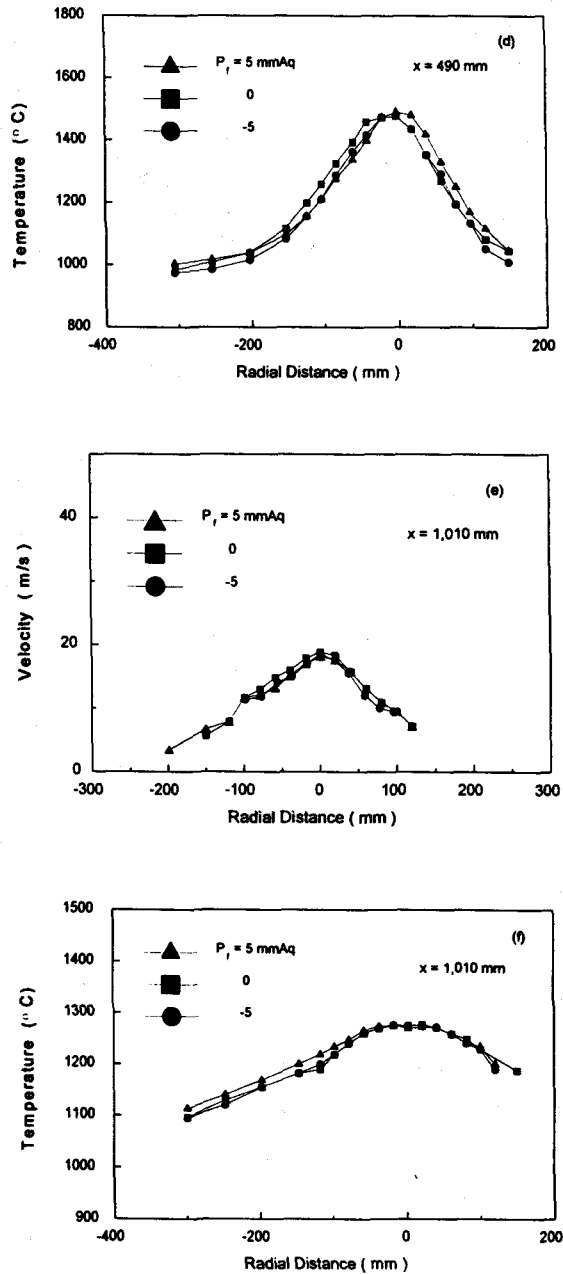


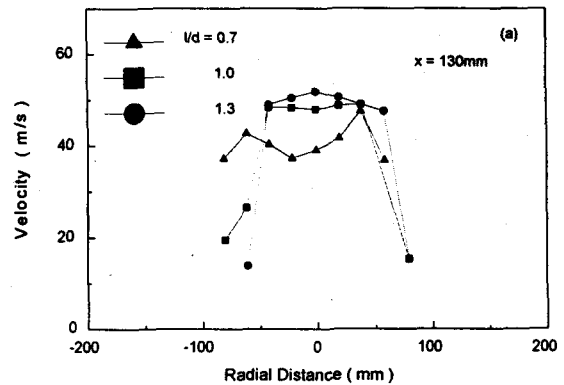
Fig. 7 The variation of temperature and velocity field with furnace pressure

따라서 툰디쉬나 래들과 같이 노내 균일한 가열이 요구되는 경우 폐열회수겸용 버너는 적합한 온도분포를 나타내었다.

Fig. 7에는 노내압을 변화시키며 화염의 특성을 알아보았다. 노내압이 음인 경우 화염의 온도와 속도는 노내압이 양인 경우에 비하여 약간 감소된 경향을 보인다. 이는 노내압이 음압인 경우 외부공기

의 침입에 의한 유동장의 교란을 의미하며 특히 배기가스 출구 쪽의 O_2 양의 증가를 통하여도 확인이 된다. 이 경우 노내의 온도분포에 영향을 주어 균일한 가열이 요구되는 피가열물에 나쁜 영향을 줄 것으로 사료된다. 노내압이 높은 경우는 노내의 뜨거운 연소가스가 노벽사이로 빠져 나와 열손실을 초래하게 된다. 따라서 노내압은 2~3 mmAq가 적당하다.

화염토출구경(d)(Fig. 1 ② 참조, $d = 150 \text{ mm}$)과 노내의 버너타일(Fig. 1 ②) 벽면으로부터 가스노즐(Fig. 1 ①)까지의 거리(l)와의 관계를 알기 위하여 l/d 를 변화시키며 Fig. 8에서 화염의 특성을 알아보았다. $l/d = 0.7$ 인 경우 연소가 버너타일 내에서 조금밖에 이루어지지 않아 반응이 불완전하였으며 속도장의 대칭성이 불량하여 화염안정성이 문제가 되었다. $l/d > 1$ 인 경우 노즐에서 분출된 제트의 반경방향 성분은 버너타일벽에 충돌하여 축방향성분으로 변환되어 진행하지만 $l/d = 1.3$ 의 경우는 연소가 버너타일 내에서 충분히 이루어졌으나 유동장이 버너입구로 많이 이동하여 연소가 예혼합화염의 경우와 같이 빨리 진행되어 연소후의 가스가 노내 깊숙히 까지 침투하지 못하여 노내 체류시간이 짧아졌으며 이로 인하여 단축유로(short path) 현상이 나타나기도 하였다. 따라서 l/d 는 1.0 정도의 값을 갖게 하여 연소의 일부는 버너타일 내에서 이루어지고 나머지 부분은 확산화염의 형태로 버너타일을 지나며 이루어지는 것이 바람직한 것으로 평가된다.



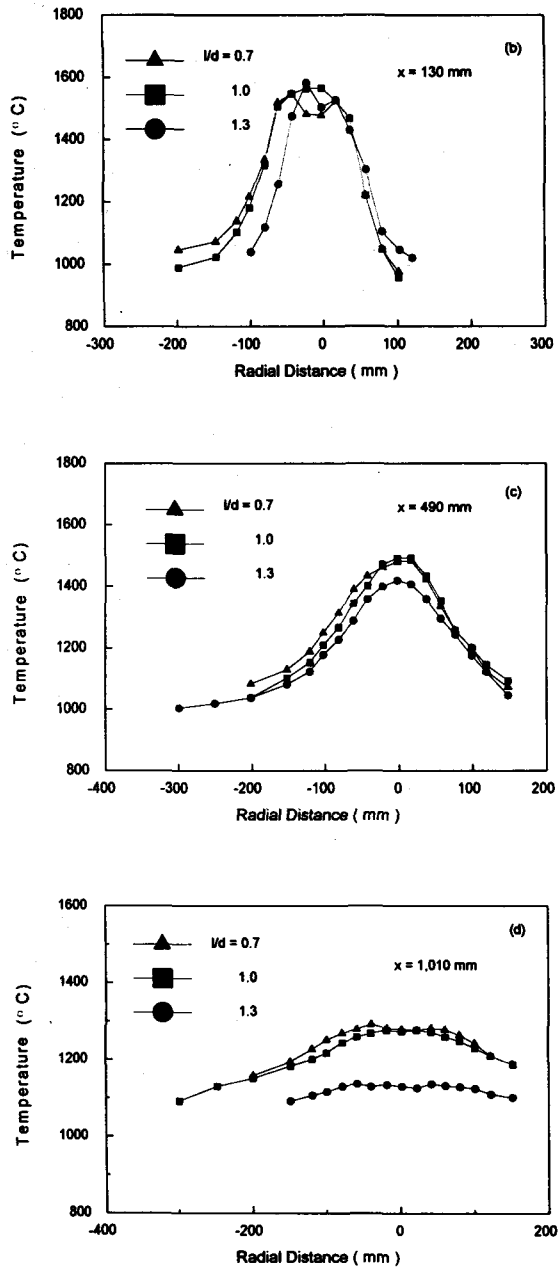


Fig. 8 The variation of temperature and velocity field with l/d

Fig. 9는 예열공기온도의 증가와 버너용량의 증가에 따라 NO_x 의 값이 증가되는 경향을 나타낸다.

일반적인 재래의 기존 가스버너에서는 연소용 공기를 상온상태로 공급하는데 비해 본 폐열회수겸용 버너는 사용목적상 고온의 연소용공기를 사용하는 관계로 노내 분위기 가스 온도 수준이 전체적으로 높게 유지될 수 밖에 없어 NO_x 의 측면에서는 기존

의 가스버너에 비해 상당히 불리한 입장이다.

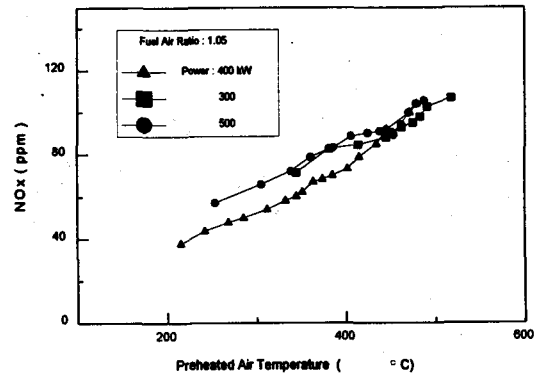


Fig. 9 NO_x variations with preheated air temperature

그럼에도 불구하고 본 연구에 채용된 폐열회수겸용 버너의 경우 예열공기온도 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 NO_x 의 값이 약 100 ppm(11% O_2 기준)으로 상당히 양호한 상태를 나타내고 있는데 이는 노즐의 구조가 연소가 일어나는 지점에서 부분적으로 예혼합화염인 상태에서 혼합이 촉진되고 또한 버너타일의 작용에 의해서 온도의 균일화를 이루어서 국부적으로 높은 영역이 감소하여 화염이 안정화된 것에 그 이유가 있다.

그림에서는 대체로 버너의 연소용량이 커질수록 NO_x 발생량이 높아지나 일부 구간에서 400kW 경우보다 300kW 경우가 NO_x 값이 높게 나타나는데 이는 버너의 설계가 400kW에서는 gas와 공기의 혼합이 잘 이루어지나 300kW의 경우는 혼합이 불량해 나타나는 현상으로 해석된다.

국내의 경우 대기환경보전법에 의해 기체연료를 사용하는 공해물질 배출 시설은 용도에 따라 NO_x 치는 400, 300 및 200ppm의 3가지로 규제되며 연소로의 경우 일정규모 이상에서 NO_2 기준 200 ppm 이하로 규정되어 있다.

4. 결론

버너용량 400 kW 급의 노즐설계 도출자료로 가스분출속도는 반경방향으로 20~25 m/s, 공기분출속도는 축방향으로 15~20 m/s를 유지하고 화염의

일부는 예혼합화염의 형태로 일부는 확산화염의 형태를 이루는 것이 연소의 혼합성을 양호하게 하는 것으로 나타났다. 이때 최대 예열공기온도는 500℃이였으며 공해배출물인 NOx의 값이 약 100 ppm(11% O₂ 기준)으로 나타났다.

버너용량 400 kW에 적합한 노의 제원은 800×800×2500mm로 평가되었으며 버너타일 앞의 연소 가스 토출속도는 약 80~100 m/s로 설계하고 가스 노즐의 위치는 버너타일 앞의 토출지름과 같은 거리만큼 버너타일의 선단에서 떨어지는 곳이 적당하였다.

노내의 균일한 온도분포와 열효율의 관점에서 노내압은 2~3 mmAq가 적당하였다.

5. 앞으로의 연구과제

향후 보다 양호한 특성을 갖는 폐열회수겸용버너를 제작하기 위해서 연구되어야 할 과제는 다음과 같다.

첫째. 폐열회수겸용 버너의 재질 문제이다. 래들 등의 급속가열을 위해서는 예열공기 온도(400℃ 이상)를 이용한 높은 노내 분위기 온도(1200℃ 이상)가 필요함에 따라 현재 사용중인 SUS304 보다 내열성이 우수한 세라믹 종류 등의 재질 선정이 요구된다.

둘째. 요즘 사회문제가 되고 있는 환경관련 공해물질 배출이다. 특히 NOx의 배출을 억제하기 위한 방법이 요구되며 이는 다단계연소 등의 방법을 통해 가능하다.

셋째. 연소기기의 콤팩트화 및 경제성의 문제이다. 폐열회수겸용 버너는 기존의 버너, 열교환기 및 에덕터를 붙여 놓아 그 형태가 커질 가능성이 있다. 따라서 좁은 공간에서도 사용가능한 콤팩트화 및 이에 따른 경제성 문제의 해결이 요구된다.

후기 : 본 연구내용은 과학기술처 특정연구개발사업으로 수행된 연구결과와 일부입니다.

참고문헌

1. Th. Schmidt and S.S. Laiquddin, "Burner with high momentum flow of the combustion products" Gaswärme Nr.8, 1966. 8, pp 271-279
2. 山本 博, "低 NOx型 recuperator 内藏 Gas burner의 開發" 技術報告書 30号, 大阪GAS 株式會社, pp25-42
3. A. Tabata, K. Hosoi and H. Tanaka, "Development of Self-Recuperative burner(X)" 技術報告書 27号, 東京GAS株式會社, 昭和 58年 3月, pp183-190
4. A. Tabata, K. Hosoi and H. Tanaka, "Development of Self-Recuperative burner(XIII)" 技術報告書 29号, 東京GAS株式會社, 昭和 60年 3月, pp133-140
5. A. Tabata, K. Hosoi and H. Tanaka, "Development of Self-Recuperative burner(IX)," 技術報告書 30号, 東京GAS株式會社, 昭和 61年 3月, pp71-79
6. T. Akiyama, "Recuperative burner 의 特性 및 適用," 中外爐 燃燒講座(40), Vol. 22, No. 6, pp70-75