

응축 가스보일러용 다공 원통형 연소기의 개발에 관한 연구

정오근*, 금성민**, 이창언***, 오수철***

The study on the development of perforated can-type burner for condensing gas boiler

O. G. Chung*, S. M. Kum**, C. E. Lee***, S. C. Ohu***

Key Words : can-type burner, condensing gas boiler, blow off, turn down ratio

Abstract

This study was carried out to develop the burner for condensing gas boiler which can save energy by utilizing latent heat of combustion gas. A perforated can-type burner adopting premixed flame was chosen to reduce NOx emission and to simplify the manufacturing process. Basic experiments using unit cell combustor have been conducted to obtain data about the design parameters of perforated burner surface which can make stable flame for a wide operating conditions. Can-type burners designed on the basis of above data shows that flames are stable and also CO and NOx emission are low for a wide operating range

1. 서론

가스보일러는 생활수준의 향상과 정부의 에너지 및 환경정책 등에 힘입어 대표적인 가정용 온수·난방 장치로 사용되고 있고, 도시가스 배관망이 계속 확산되고 있어 그 수요는 계속 증가하리라 예상된다. 현재까지도 가스보일러에 대한 연구개발이 지속되어 왔으나, 사용되는 가스보일러의 대부분은 분젠버너형으로 그 구조상 수증기의 잠열을 버려야 하기 때문에 효율이 낮다. 금후의 시급한 연구과제는 응축열교환이 가능하여 에너지가 절약되며 또한 NOx도 동시에 저감 가능한 가스보일러의 개발이라 할 수 있다. 본 연구는 이와같은 배경하에 응축형 가스보일러의 개발의 일환으로 수행된 것이다.

Fig. 1은 분젠버너식 보일러의 개요를 나타낸 그림이다. 이와같은 보일러에서는 열교환기와 연소기가 상하로 배치되어 있어, 열교환시 수증기가 응축

되면 버너위로 낙하하므로 응축열교환이 부적합하며⁽¹⁾⁽⁶⁾, 보일러 효율은 대부분 고발열량 기준으로 약 80%정도이다. 또 분젠버너의 화염은 완전 예혼합화염에 비하여 화염길이가 길기 때문에 연소가스의 고온영역내 체류시간이 길어 NOx 배출량이 비교적 많다⁽²⁾⁻⁽⁴⁾. 그리고 분젠버너 및 편형 열교환기는 그 구조 및 제조공정이 복잡하고, 보일러의 용량변화에 따라서 부품을 따로 제작해야 하기 때문에 제조원가가 비교적 높다고 할 수 있다.

Fig. 2는 개발하고자 하는 응축형 가스보일러의 구상도이고, 오른쪽이 본 연구에서 중점적으로 개발하고자 하는 “버너 내장형 응축열교환기”를 나타낸다. 연소기 및 열교환기는 원통형이며, 열교환기의 내부 위쪽에 연소기가 설치되어 있다. 연소기 표면은 다수의 화염구가 천공되어 있는 얇은 다공판이며, 다공판 내부 둘레에는 메쉬(mesh)가 설치되어 있다. 열교환기는 내통과 외통으로 구성되어 그 사이에 온수 및 난방수가 흐르도록 온수관이 코일형으로 설치되어 있으며, 내통의 내부에는 연소기 측면에 1차 열교환기와 연소기 하부에 2차 열교환기가 설치되어 있다. 가스연료는 비례제어 가버

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 한라공대 기계공학과

*** 인하대학교 기계공학과

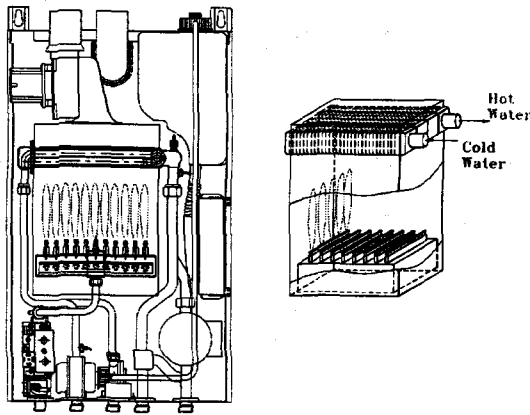


Fig. 1 Schematic of conventional gas boiler

너를 지나 송풍기에서 공기와 혼합된 후, 역화방지 및 유량분배를 위해 설치된 메쉬를 지나 다공표면에서 연소되며, 연소가스는 측면에 설치된 1차 열교환기에서 열교환을 한 뒤, 연소기 하부에 설치된 2차 열교환기에서 응축열교환을 하게 된다. 응축열교환을 통해 발생한 수분은 보일러 하단에서 배수된다. 본 보일러는 예혼합 표면연소방식을 채택하고 짧은 화염면 직후에 열교환기를 설치하여 연소가스의 온도를 낮춤으로써 NO_x 발생을 저감시킴과 동시에 응축열교환이 용이하도록 설계된 것이다.

본 연구의 목적은 위 응축형 가스보일러에 부합하는 다공 원통형 연소기를 개발하기 위해, 우선 기초연구용 단순 연소기를 사용하여 최적화물질이 및 넓은 안정연소범위를 달성할 수 있는 다공 연소기의 제원(화염구 직경, 배열, 간격 등)을 결정하는 것이다. 또 이 결과를 토대로 제작된 원통형 연소기를 대상으로 당량비 및 부하변동에 따른 안정연소영역, NO_x 배출 등의 연소특성을 검토하여, 원통

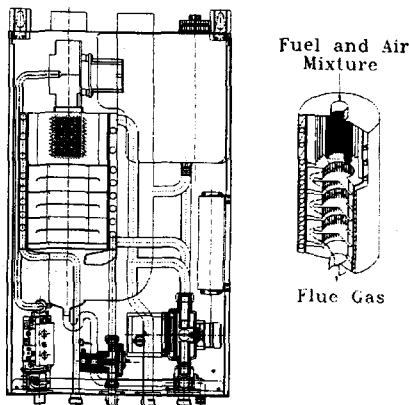


Fig. 2 Schematic of condensing gas boiler

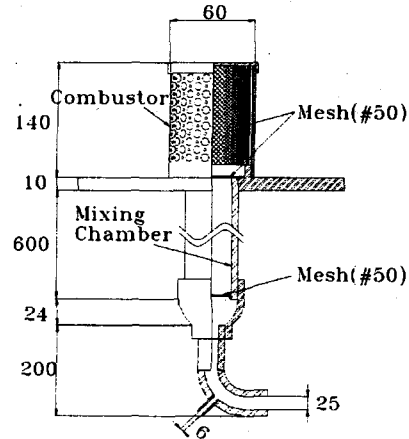


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for Can-type burner

형 연소기의 제원 및 운전범위를 결정하는데 필요한 기초자료를 얻는 것이다. 본 논문에는 그 개발 과정에서 얻어진 중요 사항 및 현상에 대하여 기술하나, 현상에 대한 자세한 논의는 본 논문의 목적과 다르므로 차후의 연구과제로 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 기초실험에서 얻은 결과를 바탕으로 설계된 원통형 연소기의 연소특성을 실험하기 위한 장치이다. 혼합실로 공급되는 유로방향이 90도 꺾이기 때문에 발생하는 유속분포의 불균형을 방지하기 위해 연소기로 들어가는 도입부(혼합실 겸용)를 충분히 길게 하였으며, 유로중에 메쉬(mesh)를 설치하여 연료인 LPG와 공기와 혼합을 균등히 하였다. 원통형 연소기의 내부둘레에는 역화를 방지하고, 혼합기 분출유속을 균일하게 하기 위해 5장의 메쉬를 설치하였다. 또 메쉬와 연소기간의 간격을 적절하게 유지하기 위하여 이것들 사이에 적정 두께의 링을 설치하여 메쉬를 고정시켰다. 오염물질의 농도를 측정할 경우에는 상부가 노즐형으로 축소된 내경 200mm, 높이 800mm인 외통을 연소기 외부에 설치하여 샘플가스를 채취하였다.

Fig. 4는 기초실험에 사용한 연소기표면을 도시한 것으로, 이것은 원통형 연소기의 단위셀(cell)이라 할 수 있는 한개의 메인홀과 그 주변에 천공된

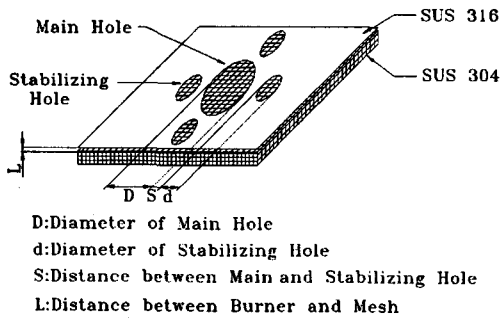


Fig. 4 Schematic of perforated burner surface

보조홀로 구성되어 있으며, 연소기의 두께는 원통형 연소기와 같은 0.5mm로 하였다. 이후 이 연소기를 원통형 연소기와 구별하기 위해 단위셀 연소기라 부르겠다. 본 기초실험은 원통형 연소기의 기본제원인 메인홀의 직경, 보조홀의 직경, 메인과 보조홀간의 간격, 역화방지 및 균일 유량분배를 위해 설치된 메쉬와 연소기간의 간격을 결정하기 위해 수행된 것이다. 실험시에는 Fig. 3과 동일 형태의 소형 혼합실의 상부에 단위셀 연소기를 수평하게 설치하여 위에서 언급한 각 제원에 따른 안정연소 영역의 변화를 관찰하였다.

측정항목중 안정연소영역은 육안관측에 의해 측정하였으며, 단위셀 연소기의 안정영역은 blow-off와 역화를 기준으로 정의하였으며, 원통형 연소기에서는 실용상의 안정성을 고려하여 위 기준에 추가적으로 너울거리는 불안정한 부상화염, 연소기의 표면적열이 없고, 연소기 상하에서의 화염길이가 비교적 균일한 상태를 안정영역으로 정의하였다.

연소기 표면온도의 측정은 R-type(Pt-Pt/13%Rh, 소선직경 = 0.1mm) 열전대를 사용하였다. 온도 측정시 열전도에 의한 측정오차를 줄이기 위해, 화염면에 접촉한 부분과 열전대접점 간의 길이를 충분히 길게 하였으며, 접촉부분의 떨림을 방지하기 위해 열전대 접점을 극미량의 세라믹내화본드를 이용하여 연소기표면에 접촉시켰다. 얻어진 신호는 디지털온도계를 통해 컴퓨터로 받아 평균 처리했다.

NOx 및 CO의 시료가스 채취는 반응성이 적은 석영 프루브를 이용하였으며 반응동결을 위하여 흡입직경을 0.1mm에서 12mm로 확대시켰다⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 채취된 샘플가스는 테프론호스를 통하여 cooler(1℃로

유지)에서 수분이 제거된 뒤 화학발광법을 이용하는 NOx Analyzer(스텐레스 및 몰리브덴 컨버터, Teledyne Co., model 911)와 CO측정기(ENERGY EFFICIENCY SYSTEMS INC., ENERAC model 2000E)로 각각 분석하였다. NOx Analyzer의 보정은 한국표준연구소에서 제작된 NO 912ppm표준가스와 NO 43ppm 및 NOx 182ppm의 혼합표준가스로 행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3-1 단위셀 연소기를 이용한 기초연구

박판을 연소기로 사용하는 경우의 안정연소범위를 검토하기 위해, Fig. 5는 예혼합화염의 분출구가 박판(D=5, t=0.5[mm])에 천공된 경우와 파이프(D=5, l=100[mm])에 의해 만들어진 경우의 안정연소영역을 나타낸 그림이다. 횡축의 혼합기유속은 공급 혼합기유량을 개구면적으로 나눈 단순평균속도이다. 파이프 화염의 경우 당량비가 1에 가까울수록 안정범위는 넓어지고, 반대로 당량비가 작을수록 안정범위는 좁아짐을 알 수 있다. 그러나 박판 화염의 안정범위는 전당량비 영역에서 파이프의 그것보다 매우 작음을 알 수 있다. 그 원인으로는 화염 분출구에서의 속도분포, 연소기로의 열손실 및 림(rim)후면에 형성되는 재순환영역 등의 상의 점을 들 수 있으나, 그 상세에 대해서는 본 연구목적과 다르므로 생략한다. 위의 결과로 알 수 있듯이 박판을 연소기로 사용하려면 안정범위를 확장시

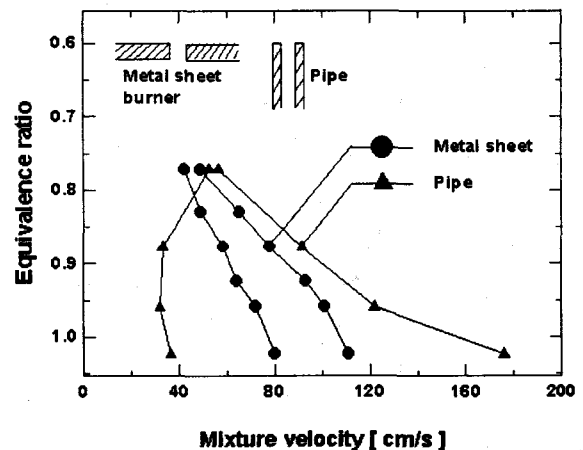


Fig. 5 Comparison of stable combustion region for two flames

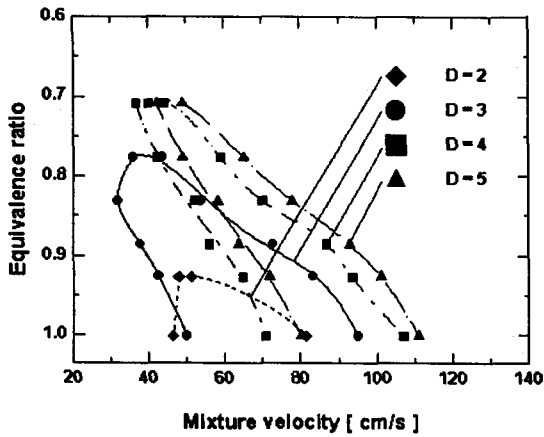


Fig. 6 Stable combustion region with the variation of main hole diameter

킬수 있는 메카니즘이 요구되는데, 본 연구에서는 메인홀 주위에 화염을 안정시키기 위한 보조홀을 설치하여 박판 연소기에서의 안정범위를 넓히고자 한다.

박판 연소기의 메인홀 직경은 연소기 표면적당의 부하율, 화염길이, 안정연소범위에 매우 중요한 인자이다. Fig. 6은 최적인 메인홀의 직경을 결정하기 위해, 보조홀이 없는 단위셀 연소기에서 메인홀의 직경에 따른 안정연소영역을 당량비와 혼합기유속에 대해서 도시한 그림이다. 그림에서 안정범위는 메인홀 직경이 클수록 혼합기유속이 큰 쪽으로 이동하며, 또 회박한 쪽으로 확장됨을 알 수 있다. 메인홀 직경이 2mm인 경우 화염은 켄칭(quenching) 효과가 크기 때문에 혼합기유속이 낮고 당량비가 큰 영역에만 존재하며 그 범위도 매우 작다. 그리고 이 경우 직경 2mm가 켄칭거리(quenching

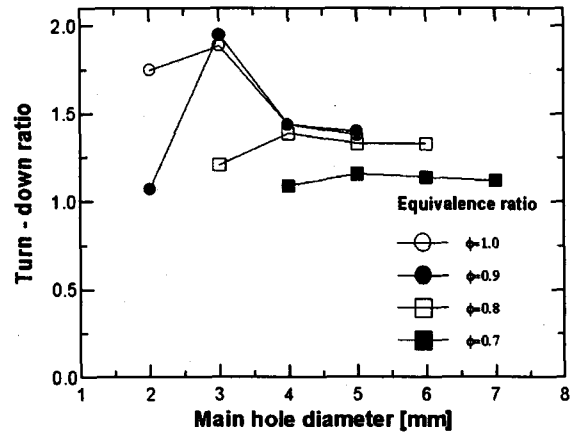


Fig. 7 Turn-down ratio with the variation of main hole diameter

distance)에 가깝기 때문에 역화현상은 거의 일어나지 않고 안정범위는 blow off에 의해서만 결정되었다. 메인홀의 직경이 3mm인 경우 안정범위는 넓게 나타나지만, 당량비가 낮은 영역에서는 화염이 존재하지 않는다. 직경이 4mm인 경우에는 연료농도가 희박하고 혼합기유속이 큰 쪽으로 안정영역이 이동하여 고부하연소가 가능함을 알 수 있으며, 이 이상에서는 직경이 클수록 안정영역은 혼합기유속이 다소 큰 쪽으로 이동하나 그 증가폭은 작다.

Fig. 7은 메인홀의 직경에 따른 turn-down ratio를 나타낸다. 여기서 turn-down ratio란 안정하게 연소시킬 수 있는 최대 열부하와 최소 열부하의 비로서, 연료분출면적이 동일한 경우는 혼합기 유속의 상하한의 비와 동일하며, turn-down ratio가 크다는 것은 비례제어 가스보일러의 제어가능범위가 넓다는 것을 의미한다. 그림을 보면 당량비가 클

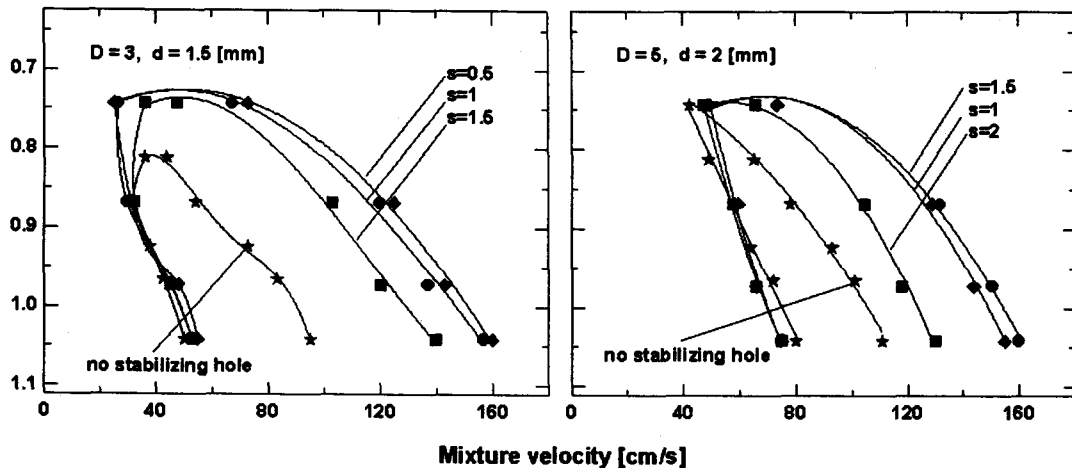


Fig. 8 Stable combustion region with the hole separation

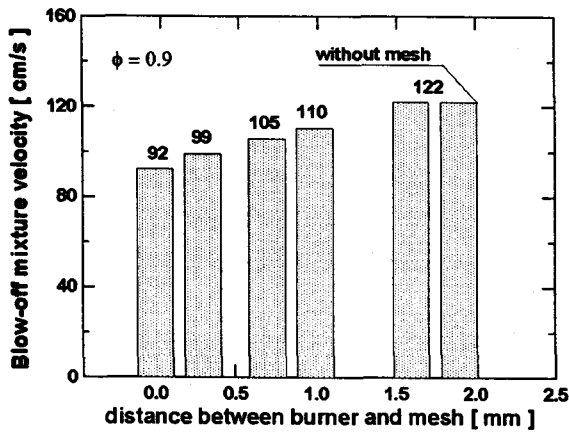


Fig. 9 Limit of blow-off with the distance between burner surface and mesh

경우(1~0.9)에는 직경이 3mm근방에서 최대가 되지만, 당량비가 작을수록 그 최대치는 직경이 큰 쪽으로 이동하여 당량비 0.7에서는 5mm인 경우가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

위 Fig. 6, 7의 결과를 근거로 본 연구에서는 turn-down ratio 가장 높게 나타나는 직경 3mm인 경우와 희박한 상태에서도 비교적 안정범위가 넓게 나타나 가스보일러의 NOx 저감대책으로 유용하리라 사료되는 직경 5mm인 경우를 대상으로, 보조홀의 직경, 메인홀과 보조홀간의 간격, 메쉬의 설치위치에 따른 안정연소영역의 변화에 대하여 검토하였다. 논문에는 도시하지 않았으나 메인홀과 보조홀간의 간격이 일정하면, 보조홀 직경에 따른 역화 및 blowoff 한계에는 큰 차이가 없어, 본 연구에서는 메인홀 직경이 5mm인 경우는 보조홀 직경을 2mm, 메인홀의 직경이 3mm인 경우는 보조홀 직경을 1.5mm로 선정했다.

Fig. 8은 위에서 선정한 바와같이 메인홀과 보조홀 직경이 각각 3mm, 1.5mm인 경우(왼쪽)와 각각 5mm, 2mm인 경우(오른쪽)에 대해서 홀간의 간격 변화에 따른 안정연소영역을 나타낸 것이다. 단 화염구의 배치형태는 Fig. 4와 같다. 그림에는 보조홀의 효과를 검토하기 위해 보조홀이 없는 경우도 도시하였다. 우선 보조홀의 효과를 살펴보면, 보조홀은 역화한계에는 영향을 미치지 않으면서 blow-off 한계를 높게 하여 안정연소영역을 확장시킴을 알 수 있으며, 특히 메인홀의 직경이 3mm인 경우에는 희박한 영역으로도 안정영역을 확장시키고 있음을

알 수 있다. 메인홀과 보조홀간의 간격변화에 따른 영향을 살펴보면, 메인홀 직경이 5mm인 경우 안정범위가 가장 커지는 간격은 1mm~1.5mm사이이며, 메인홀 직경이 3mm인 경우 안정범위가 가장 커지는 간격은 1mm이내임을 알 수 있으며 이 위치를 벗어나면 보조홀의 효과는 약해짐을 알 수 있다. 위 결과를 근거로 본 연구에서는 메인홀이 5mm인 경우 그 간격은 1mm로 하였으며, 메인홀이 3mm인 경우 그 간격은 1mm 이내가 좋지만 가공문제상 1mm로 하였다.

본 연구에서는 역화방지 및 균일한 혼합기 분배를 위해 원통형 연소기의 표면 아래에 메쉬를 설치하였다. Fig. 9는 그 설치위치를 결정하기 위한 것으로, 당량비 0.9에서 메인홀 직경이 5mm(보조홀 2mm, 홀간 간격 1mm)인 경우에 대하여 메쉬와 연소기표면간의 간격에 따른 blow off 한계를 나타낸 그림이다. 그림에서 메쉬를 연소기 아래쪽에 밀착시키면 분출되는 혼합기 속도분포가 화염구전체에서 균일하게 되어 화염지지점에서의 혼합기유속이 커지므로 blow off한계가 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 이 간격이 클수록 blow off한계가 높아지며, 그 간격이 1.5mm이상이면 메쉬는 blow off한계에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 메쉬와 연소기표면간의 적정간격으로 1.5mm를 채택하였다.

3-2 원통형 연소기에 관한 기초연구

지금까지 서술한 단위셀 연소기를 이용한 기초연구를 근거로 하여 Fig. 10과 같은 4 종류의 배열형태를 갖는 원통형 연소기를 제작하였다. Type 1과 Type 2는 메인홀 3mm, 보조홀 1.5mm, 홀간 간격 1mm이며, 이들의 차이점은 Type 2에는 Type 1의 4개 메인홀 중심에 메인홀 하나가 더 들어가 있어

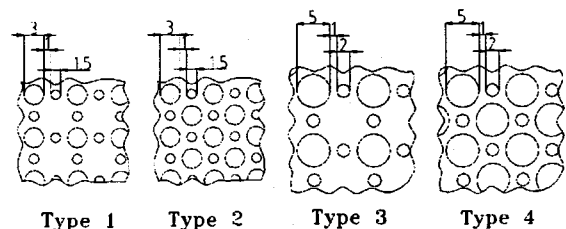


Fig. 10 Schematic of the perforated burner surfaces

형태로 되어 있다. Type 3과 Type 4는 메인홀 5mm, 보조홀 2mm, 홀간 간격 1mm이며, 이들의 차이점은 Type 1, 2의 경우와 같다.

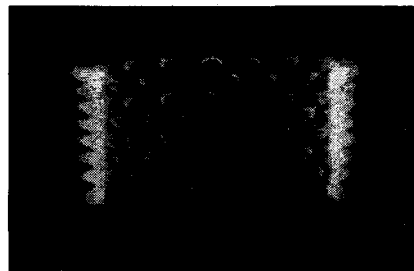
원통형 연소기의 부하변동에 따른 화염형상의 한 예로서, Photo. 1은 위에 언급한 Type 4의 연소기에서 당량비는 0.7로 일정하며, 혼합기유속을 증기시킨 경우의 화염형상을 나타낸다. 화염길이는 당량비가 1에 가깝고 혼합기유속이 증가할수록 길어지나, 메인홀 직경이 5mm인 경우 그 길이는 약 10mm에서 20mm정도였다. 그리고 부하가 증가할수록 연소기 위부분의 화염길이가 아랫부분보다 다소 길어지나 이 문제는 금후 유량분배 성능을 개선하여 해결하려고 하고 있다.

Fig. 11은 위 4 종류의 원통형 연소기 및 그에 대응하는 단위셀 연소기의 안정영역을 나타낸 그림이다. 단 앞에서 언급하였듯이 단위셀 연소기의 안정영역은 blow-off 및 역화점을 기준으로, 원통형 연소기에서는 그 외에도 불안정한 부상화염, 연소

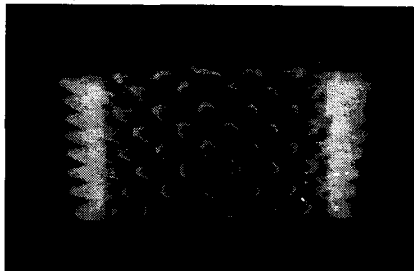
기 표면적열이 발생하지 않는 화염을 안정영역으로 정의하였고, 표면적열이 발생한 후 그로 인해 연소기 표면과 매쉬 사이에 존재하는 혼합기에 역화가 발생하는 경우가 있어 역화와 표면적열의 한계를 명확히 구분하기는 어려웠다. 이와같이 정의된 원통형 연소기의 안정영역은 대체로 Photo. 1과 일치한다. Fig. 11을 보면 두 경우 모두 원통형 연소기의 안정영역은 단위셀 연소기에 비해 혼합기가 희박한 쪽으로 확장되면서 blow-off 한계가 증가하고 있는데, 그 이유는 원통형 연소기에서는 이웃하는 화염들간의 간섭현상에 의해 화염안정성이 높아졌기 때문이라 생각된다. 그리고 연소기 표면온도의 상승 혹은 표면적열에 의해 역화한계도 증가함을 알 수 있다. 메인홀이 3mm인 Type 1, 2의 경우 안정범위는 단위셀 연소기에 비해 당량비가 희박한 쪽으로 이동했으나 turn-down ratio는 거의 증가하지 않고, 특히 혼합기유속이 저속인 경우 화염면과 연소기 표면간의 거리가 짧아 열전달량이



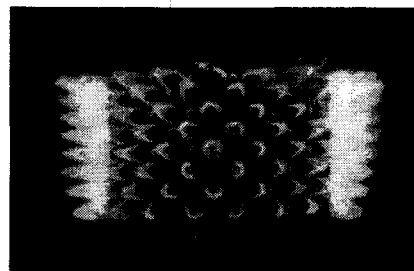
A. 5,543 [kcal/h]($V_m=73\text{cm}$)



B. 8,166 [kcal/h]($V_m=106\text{cm}$)



C. 10,684 [kcal/h]($V_m=140\text{cm}$)



D. 13,150 [kcal/h]($V_m=173\text{cm}$)

Photo. 1 Photograph of flames with burner loading

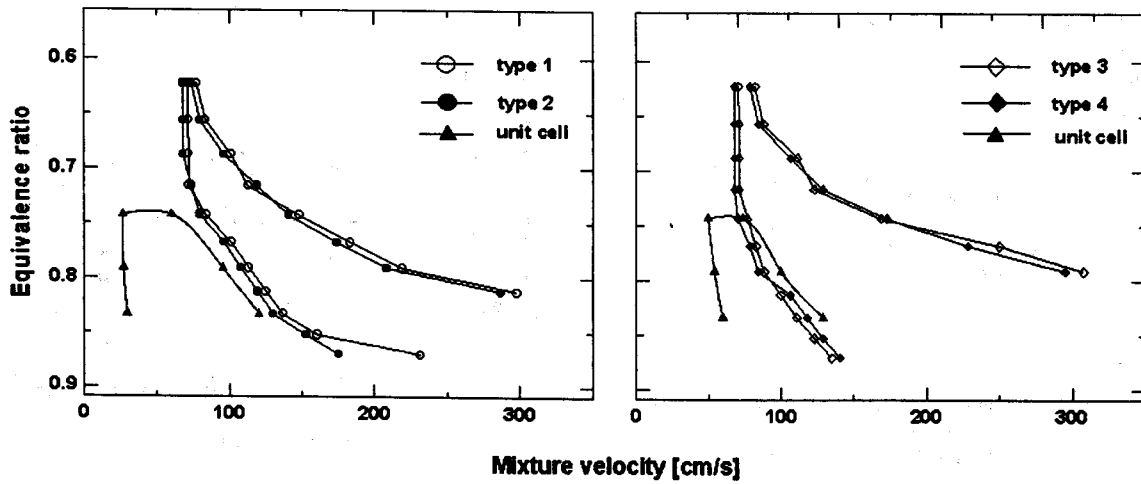


Fig. 11 Stable combustion region of various Can-type burners

많기 때문에 표면적열이 발생하여 역화한계가 높아지는 경향이 있다. 메인홀이 5mm인 경우는 안정연소범위가 넓으며 운전예정영역인 당량비 0.7근방에서 Turn-down ratio가 약 3 : 1정도로 비례제어에 적합하리라 여겨진다. 또 3mm인 경우보다 연소기 표면과 화염면사이의 간격이 멀어서 연소기표면이 덜 과열되어 역화한계도 작기 때문에 다공 원통형 연소기로서 적합하리라 생각된다. 그리고 Type 1과 2 혹은 Type 3과 4의 안정연소영역은 서로 비슷하게 나타나고 있다. 이 결과는 동일부하의 연소기를 설계할 때에 메인홀의 배치에 따라 연소기의 길이를 달리 할 수 있음을 보여주며, 연소기 설계시에 고려해야 할 열교환 면적, 보일러 전체용적 등의 제약에도 다소 여유가 있음을 보여준다.

다음은 원통형 연소기의 배기가스특성에 관한 실

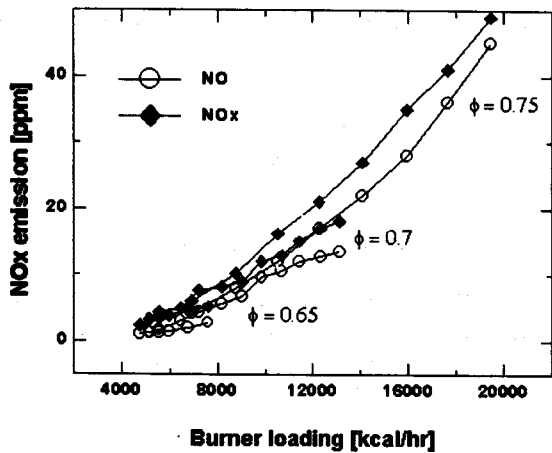


Fig. 12 NOx emission with burner loading and equivalence ratio

험으로, 대상으로한 연소기는 Type 4로 Photo. 1과 동일한 것이며, 이 원통형 연소기의 직경은 60mm, 연소기 길이는 40mm이다. 단 연소기 길이는 연소특성을 손상시키지 않는 범위에서 실험 편의상 임의로 선정한 것이다.

Fig. 12는 배출가스중의 NO 및 NOx의 건농도를 연소기 부하(연소열량)와 당량비에 대해서 나타낸 그림이다. 여기서 당량비의 변화는 운전예정영역인 0.65에서 0.75까지만 변화시켰다. NOx의 배출량은 당량비가 커지고 부하가 증가할수록 많이 발생하지만 운전예정영역에서 최대농도가 50ppm이하로 일반적인 분젠형 연소기에 비해 매우 적다⁽²⁾. 그리고 개발 연소기의 최종형태인 Fig. 2와 같이 화염면 후류에 열교환기를 근접시킨다면 이 NOx농도는 더욱 저감되리라 예상된다.

Fig. 13은 Fig. 12와 동일 연소조건에서의 CO 배출특성을 나타낸 그림이다. CO 농도는 대부분의 연소영역에서 부하변화에는 무관하게 당량비가 증가할수록 높게 나타나고 있고 그 값도 화학평형농도치와 유사하여, 불안전연소에 의해 발생하는 CO는 거의 없는 것으로 생각된다. 단 당량비가 작고 저부하시에는 $\phi = 0.65$ 에서 보이듯이 켄칭에 의해 불완전 연소가 일어나 CO농도가 다소 높아짐을 알 수 있다. 그러나 현 연소범위 내에서의 CO농도는 30ppm 이하로 매우 양호하다고 할 수 있다.

Fig. 14는 원통형 연소기의 표면온도를 당량비

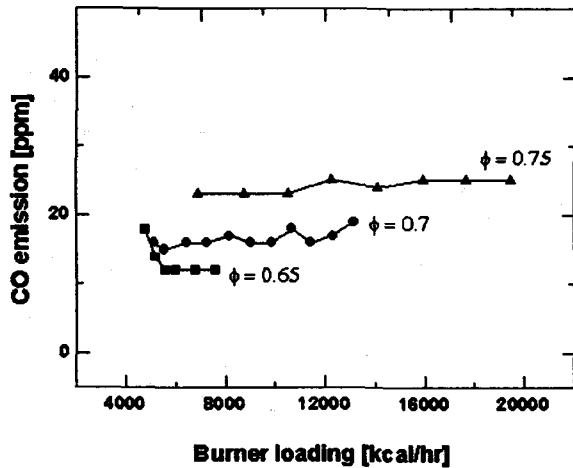


Fig. 13 CO emission with burner loading and equivalence ratio

및 부하의 변화에 대해서 도시한 것이다. 그림에서 표면온도가 당량비가 증가할수록 높아지는 것은 당연하지만, 동일 당량비에서는 부하가 커질수록 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 동일 당량비에서 혼합기속도가 빨라지면 발열하는 열량은 많아지지만 화염면과 연소기표면과의 거리가 멀어지기 때문에 표면온도가 낮아졌다고 사료된다. 연소기의 재질로는 비교적 내구성이 높은 스텐레스 계통의 316(Cr 13% - Ni 8%)을 썼다. 316의 용점은 1400~1454°C이며, 600°C까지는 거의 산화가 진행되지 않기 때문에 이 온도이하에서는 내구성이 충분히 유지되리라 여겨진다⁹⁾. 본 연소기의 안정연소 영역내에서는 대부분 600°C이하의 온도 분포를 갖고 있고, 더욱이 Fig. 2와 같이 연소기 외부에 열교환기를 설치한다면 표면온도는 더 낮아지리라 예상되기 때문에, 연소기표면의 온도에 대한 재질의 내구성에는 별 문제가 없으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 기초실험을 통해서 응축 가스보일러에 적용될 다공 원통형 연소기의 재원을 결정하였고, 이를 근거로 설계된 원통형 연소기의 안정연소범위 및 NO_x 배출 등의 연소특성을 당량비 및 부하를 변화시키면서 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

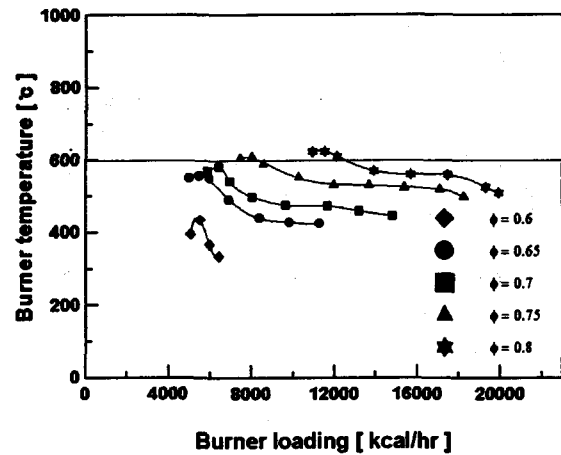


Fig. 14 Burner surface temperature with burner loading and equivalence ratio

1. 다공 원통형 연소기에서 안정연소범위를 크게 하기 위해서는 최적인 설계제원(메인과 보조홀의 직경, 홀간 간격, 메쉬위치)이 존재하며, 기초실험을 통하여 그 설계제원을 찾을 수 있었다.
2. 본 연구에서 설계한 다공 원통형 연소기는 당량비 0.7근방(운전예정영역)에서 Turn-down ratio가 약 3 : 1 정도로 비례제어에 적합한 연소기라 여겨진다
3. 위 연소기의 NO_x농도는 당량비 0.7근방에서 최대 50ppm으로 매우 양호하며 (ϕ=0.75에서 50ppm, ϕ=0.7에서 20ppm이하), 또 CO농도도 30ppm이하로 매우 양호하였다.
4. 위 연소기의 최대 표면온도는 당량비 0.7근방에서 600°C 정도로 연소기 재질로서 316을 사용하면 연소기의 내구성에는 별 문제가 없으리라 사료된다.

후기

본 연구는 1995년도 한국과학재단 산학협력 연구 지원(과제번호 95-22-09-07-01-2)으로 수행되었고 일부는 1996년도 인하대학교 교내연구비 지원을 받아 수행되었기에 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. J.A. Harris, R. South, "*Flame stability-principles and practice*", Gas Engineering and Management, 18, pp. 153, 1978
2. 정중수, 박은성, "가스보일러용 세미 분젠형 버어너의 배기 특성 연구", 空氣調和·冷凍工學 論文集 第7卷 第3號, pp. 353~358, 1995
3. J. Warnatz, U. Mass and R. W. Dibble, "*Combustion-Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*", Springer-Verlag, 1996
4. Stephen R. Turns, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, 1996
5. Horie-cho, Matsuyama, "*Reduction of NOx Emission By Combined Arrangement of Burner and Water Tubes*", Proceeding of the 2nd JSME-KSME, pp. 2-177~2-180, (1992)
6. H.R.N. Jones, DOMESTIC GAS BURNER DESIGN, British Gas, 1989
7. Christopher England et al., "*Sampling Nitric Oxide from Combustion Gases*", Combustion and Flame, Vol 20, pp. 439~442, 1973
8. Martin F. Zablelski et al., "*Influence of Mass Transport and Quenching on Nitric Oxide Chemiluminescent Analysis*", Environ. Sci. Technol. Vol 18, No 2, pp. 88~92, 1984
9. 이동녕, "재료강도학", 문운당, p. 427, 1995