

가스보일러용 세미 분젠형 버어너의 배기 특성 연구

An Experimental Study on Emission Characteristics of a Semi-Bunsen Type Gas Burner

정 증 수*, 박 은 성**
J. S. Jurng, E. S. Park

Key words : Bunsen Type Burner(분젠식 버어너), Partial Premixed Jet Flame(부분 예혼합 제트 화염), Combustion Load(연소부하율), Air Excess Ratio(공기과잉률), Emission Characteristics(배출가스 특성)

Abstract

The emission characteristics of a semi-Bunsen type burner for gas boilers were studied experimentally. The experimental results reveal that nitric oxide emission increases with fuel flow rate. It is linearly proportional to total fuel flow rate at a small amount of fuel up to 0.4 liters per minute. It does not change significantly within the range of fuel flow rate from 0.4 to 1.2 liters per minute per nozzle and increases at large fuel flow rate. The carbon monoxide emission reveals to be dependent upon the fuel flow rate per each nozzle and the number of fuel injection nozzles. Diameter of an injection nozzle could have an effect on the emission characteristics of this type of burners. However, there is no marked change in the nitric oxide emission if the total fuel flow rate is same with different nozzle sizes.

1. 서 론

본 연구의 대상인 세미-분젠(semi-Bunsen)형 가스 버어너(gas burner)는 분젠형(Bunsen type) 버어너의 일종이다. 분젠형 버어너는 연료 노즐로부터 고속으로 분출되는 연료 제트(fuel jet)의 흡인력에 의하여 연소에 필요한 공기의 일부(1차 공기)를 흡입하여 연소 기기의 혼합관 내에서 연료-공기의 혼합기를 형성시켜서 염공으로부터 분출하면서 부분 예혼합 화염(partial-pre-

mixed flame)을 형성하고 화염 주위의 공기(2차 공기, secondary air)를 이용하여 가스를 완전히 연소시키는 방식의 버어너이다. 분젠식 버어너는 확산 연소 방식의 적화식(赤火式) 버어너에 비해 비교적 좁은 연소실에서도 완전 연소가 가능하고 고온을 얻기 쉬우며 열효율이 높은 등의 장점을 가지고 있어서 일반 가정용의 연소 기기 들은 이 방식을 채용하고 있다. 세미 분젠형이라고 하면 연료 제트에 의하여 유인되는 1차 공기(primary air)량을 총 소요 공기량의 50% 미만으로 설거하여 역화(flashback)의 발생을 줄인 방식으로 예전부터 가정용의 순간 온수기, 가스 보일러 등에 널리 사용되고 있다.)

* 정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

** 한국과학기술연구원 기전연구부

환경 문제에 대한 관심의 고조에 따라 최근의 가

스 연소 기기의 세계적인 개발 경향은 저공해형, 특히 저 NO_x형의 연소 기기를 표방하고 있으며 가스 연소 기기 설계의 주안점도 저 NO_x형에 맞추어 가고 있는 추세이다. 일본의 경우 동경도에서는 배출 가스 중의 NO_x 농도 50ppm을 저공해형 연소기기의 배출 기준으로 설정하여 이러한 저공해형 연소 기기의 개발과 보급을 적극적으로 장려하고 있다.²⁾ 국내에서의 연소기로부터의 질소 산화물 배출량에 대한 규제는 아직까지는 대형 보일러 등에만 한정되어 있고 가스 연소 기기 분야에서는 시행되지 않고 있으나 멀지 않은 장래에 이러한 규제가 시작될 것으로 전망된다. 국내의 가스 연소 기기 업체 들의 최근의 개발 동향으로 볼 때 앞으로 이러한 저공해형 연소기로의 전환이 이루어 질 것으로 예상된다.³⁾

본 연구에서는 기존의 가스 보일러에 사용되고 있는 세미-분젠형 가스 연소기를 대상으로 저공해형 연소기로의 기술 개발을 위한 설계 자료를 축적하기 위한 목적에서 가스 버어너와 관련된 여러 가지 연소 조건을 변화시켜 가면서 이에 따른 배기가스 배출 특성에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig.1은 본 실험에서 사용한 가스 보일러를 개략적으로 나타낸 그림이다. 이 가스 보일러는 연료 및 공기 공급계통, 버어너 어셈블리, 연소실(combustion chamber), 열교환기 및 배출 유로계 등으로 구성되어 있다. 실제 사용 상의 조건에서는 1차 및 2차 공기의 공급량은 설계치에 따라 거의 일정한 값으로 결정되지만 본 연구에서는 1차 및 2차 공기량이 배출가스 특성 등에 대해 미치는 영향을 분석하기 위하여 보일러를 감싸는 공기 공급용 챔버를 설치하여 각각 1차 및 2차 공기를 강제로 공급하는 방식을 선택하였다.

Fig.2는 세미-분젠형 가스 버어너 연소 노즐의 개략적인 구조를 나타내는 그림이다. 본 실험에 사용된 가스 버어너는 D사에서 생산 중인 버어너인데 사용 연료는 상용LP가스(commercial grade liquified petroleum gas)이다. 연료 노즐의 직경은 0.82mm이고 가스 압력조정기(gas governer)의

1차측 가스압력은 280mmH₂O, 2차측의 압력은 204mmH₂O이다. 연소 노즐의 갯수는 11개로, 설계 용량은 13,000kcal/h인 버어너이다.

연료인 LP 가스는 옥외에 설치된 LP 가스 봄베로부터 on-off 밸브를 거쳐 유로 상에 설치된 압력 조정기(line pressure regulator)를 통하여 가스 공급 압력을 일정하게 유지되도록 조절한다. 가스의 실제 공급 유량은 상용의 로타메타 유량계(rotameter, Dwyer Instruments, Inc.)를 사용하여 측정하였는데, 차체 제작한 버블 미터 유량계(bubble meter)를 이용하여 이 로타메타 유량계를 검정(calibration)하여 검정 곡선(calibration curve) 구하여 실험 시에 사용하였다.

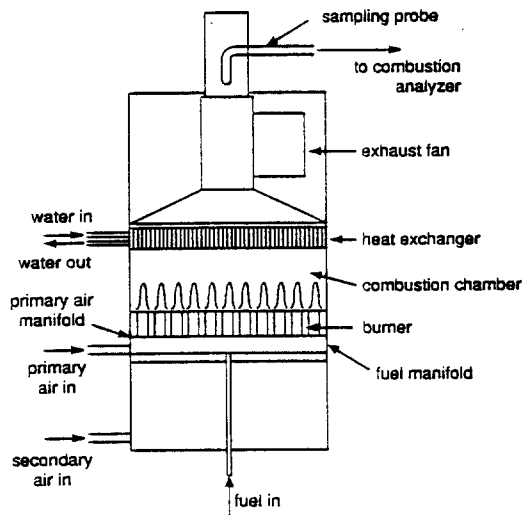


Fig.1 Schematic diagram of a gas boiler

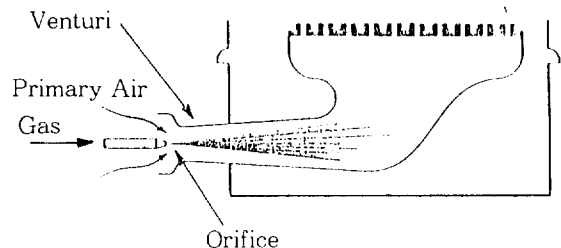


Fig.2 Schematic diagram of a semi-Bunsen type burner

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 공급되는 연소용 공기량을 정확히 결정하기 위하여 버어너 주위의 공기 공급구 부근을 둘러싼 챔버를 제작하여 로타미터로 유량이 측정된 공기를 각각 1차 및 2차 공기 흡입구로 공급하는 방식을 채택하였다.

배기 가스의 포집 및 측정은 Combustion Analyzer(Kane May Co., Model KM 9006)를 이용하였으며 연소실 상단의 연소 가스 배출구에 가스 포집용 프루브(probe)를 삽입하여 배기 가스 성분을 분석하였다. 이 장비에 의하여 측정이 가능한 배기 가스 성분은 CO, NO_x, SO_x 및 O₂, CO₂등이며 배기 가스 성분의 측정과 동시에 배기 가스의 온도 측정이 가능하다.

배출 가스의 포집은 Fig.1에 나타난 것처럼 연소실 상부의 배기용 연돌부에 연소가스 포집용 프로브(sampling probe)를 삽입하여 포집하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 노즐 부하의 변화에 따른 배기 가스 특성

세미-분전형 버어너에서는 연료 노즐에서의 연료 분출량을 변화시키면 육안으로도 관찰할 수 있을 정도의 변화가 발생한다. 즉, 연료 분출량이 증가하면 화염의 길이가 거의 선형적으로(linearly) 길어지고 어느 정도 이상 화염의 길이가 길어지면 화염의 선단부에 황색 화염(yellow flame)이 관찰된다. 본 연구에서는 우선 이러한 화염 상태의 변화와 배기 가스 특성 간의 관계를 알아 보기 위한 실험을 수행하였다.

우선 버어너의 연료 유량에 따른 배출가스 특성을 조사하기 위하여 연료 유량을 2~13 lpm으로 변화시키면서 염공 부하에 따른 배기 가스 특성을 분석하였다. 노즐 1개 당의 연료 유량 Q(Nm³/h)는 분사 압력(P, mmH₂O)과 노즐의 직경(D, mm), 연료의 비중(d)에 따라 다음 식에 의해 결정된다.¹⁾

$$Q = 0.0107kD^2 \sqrt{\frac{P}{d}} \quad (1)$$

이 식에서 k는 연료 노즐의 유량 계수(0.6~0.8), 이고 연료의 비중 d는 공기의 경우 d=0.1로 할 때의 상대적인 비중을 나타낸다.

Fig.3은 연료의 유량 변화, 즉 염공 부하의 변화

에 따른 배기 가스 측정 결과 및 배기 가스 온도를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 배출 가스 온도와 NO_x 배출량은 연료 유량이 증가하는데 따라서 계속적으로 증가하는 반면 CO 배출량은 연료 유량이 증가하면 감소하였다가 연료 유량 9 lpm일때 최저치를 나타내고 다시 약간 증가하고 있다.

연소량 혹은 연소부하율이 증가하면 화염의 평균 온도가 상승하게 되며, 이에 따라 NO_x 생성이 증가하게 된다. 본 실험에서도 실험 연료 유량 범위 중 최대인 13lpm에서 NO_x 배출량이 최대치인 110ppm을 나타내고 있다. 한편 연료 유량이 작아지면 NO_x의 배출농도는 급격하게 감소하여, 최대 연료 유량의 약 1/2인 7 lpm에서의 NO_x의 농도는 약 30ppm으로 1/4 수준으로 감소되는 것이 관찰된다. 본 실험 대상 버어너에서 측정된 NO_x의 배출농도는 유사한 종류의 현재 시판 중인 가정용 연소기의 농도로서는 높은 편은 아니지만, 50ppm 이하의 NO_x 배출을 목표로 하는 저공해형의 연소기로서는 충분하지 못하다.

한편 CO 배출농도는 연료 유량 약 9 lpm정도에서 5ppm 정도의 최소치를 보이고 있으며 4-12 lpm 정도까지의 상당히 넓은 연료 유량 범위에 걸쳐 20ppm 미만의 배출 농도를 나타내므로 양호한 편이라고 할 수 있다. 그러나 연료 유량 4 lpm미만인 경우와 12 lpm 이상에서는 CO 배출농도가 증가하는 현상이 관찰된다. 일반적으로 CO농도는

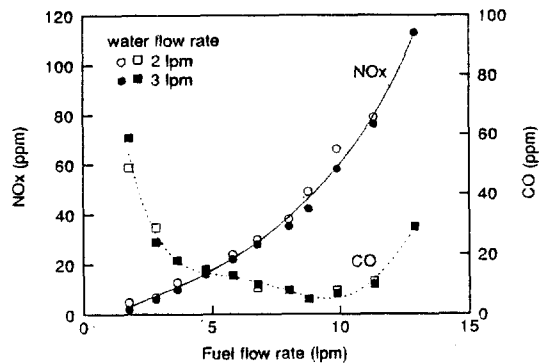


Fig.3 Carbon monoxide, nitric oxides emission and exhaust gas temperature of a gas boiler

공기과잉률이 약 110% 정도에서 최소가 되고 공기 과잉 상태이거나 부족한 상태일 때 화염에서 배출되는 CO 농도가 증가하는 것이 알려져 있다. 본 연구의 시험 대상 연소기는 1차 공기량이 거의 연료 공급량에 비례하므로 연료 분출량의 차이에 따른 일차 화염의 당량비의 변화가 크지 않으므로, 상당히 넓은 유량 범위에 걸쳐 CO의 농도 변동이 없는 실험 결과를 설명할 수 있을 것이다. 따라서 양 끝 부분에서 관찰되는 CO 농도의 증가 현상은 당량비의 변화에 따른 것은 아닐 것이라고 생각된다. 즉, 연소 부하량이 커지는 경우는 주어진 열공면적에서 공급되는 연료 유량을 완전 연소시키기 어려워져 부분적으로 발생하는 불완전 연소에 의해 CO의 농도가 상승하는 것으로 생각되나, 한편으로는 연소 부하량이 아주 커지는 경우 화염의 길이가 지나치게 길어져서 열교환기 부근에 접촉할 정도가 된다. 화염이 비교적 저온의 열교환기 벽면에 접촉하는 이러한 상태에서 화염의 급속 냉각(quenching) 현상이 발생하게 되므로 일단 생성된 CO가 완전 연소되어 CO₂로 2차 반응하지 못하고 그대로 반응이 정지된 채로 방출되기 때문일 것으로 추측된다. 연소 부하량이 적은 경우에는 전체 연소실 체적에 비해 화염이 지나치게 작으므로 연소실 벽면, 열교환기 등으로의 과도한 열손실 등에 의해 화염의 온도가 저하됨에 따라 불완전 연소에 의한 CO 농도의 상승이 일어나는 것으로 생각된다.

3.2 냉각수 유량의 변화에 따른 배출 가스 특성

앞서의 실험에 이어서 냉각수 유량 변화에 따라

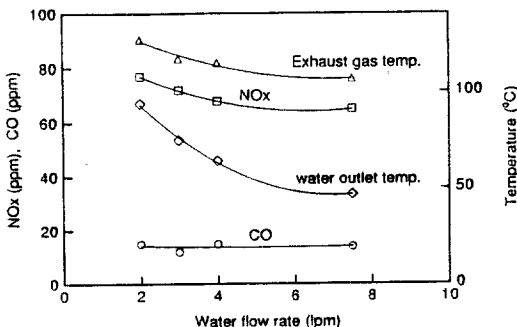


Fig.4 Changes in gas, water temperature, CO and NOx emission with water flowrate

배출가스 온도와 배출가스 성분들이 어떻게 변하는지 알아보기 위해 냉각수 유량을 조절하면서 배기가스 성분을 측정하여 Fig.4에 그 결과를 나타냈다. 냉각수로는 상온의 공급수를 그대로 사용하였으며 평균 수온은 약 20°C 정도이다. 냉각수 유량을 2 lpm으로 부터 7.5 lpm으로 증가시킬 때 배출가스 온도는 130°C에서 110°C로 약 20°C, 온수의 출구온도는 95°C에서 45°C로 약 50°C 정도 감소하는 것이 관찰되었다. 그러나 NOx 및 CO 배출 농도는 냉각수량이 작은 경우를 제외하고는 큰 변화가 없으며, 이러한 현상은 이미 생성된 NOx 및 CO의 농도가 냉각수 유량에는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 배출 특성은 난방용 순환 펌프 등을 사용하는 가정용 난방기로 우수한 특성이라고 할 수 있다.

3.3 노즐 수의 변화에 따른 배기 가스 특성

본 연구의 대상인 버너는 노즐의 총수가 11개로 앞서의 실험에서는 11개의 노즐 전부를 사용하여 실험을 수행하였다. 전체 시스템의 용량이 결정되면 실제의 설계에서 용량에 따라 사용 노즐의 수를 변경하게 된다. 따라서 본 연구에서는 노즐의 수를 2개에서부터 11개까지 변경시키면서 배기 가스 특성에 대한 노즐 갯수의 영향에 대한 실험을 수행하였다. 각각의 경우 CO나 NOx의 배출 농도 측정결과를 연료 유량을 기준으로 하여 그려 보면 상당히 유사한 경향을 나타낸다. Fig.5는 전체 연료 유량의 변화에 따른 배출 가스 온도와 NOx 배출 농도의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서

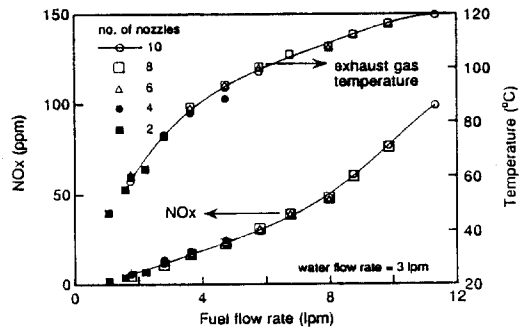


Fig.5 Changes in NOx concentration and gas temperature with fuel flowrate

의 조건은 연료 노즐의 수를 2~10개의 상당히 넓은 범위에 걸쳐 변경한 결과인데, 배출 가스 온도와 NOx 농도는 총 연료 유량이 동일한 경우 거의 완전히 일치하고 있다. 배출가스 온도의 경우 버너의 총 발생 열량과 열교환기에서의 전달량이 동일하다는 것을 생각하면 동일한 연료 유량에 대하여 동일한 온도를 나타내는 것이 당연하다고 할 수 있다. 그러나 NOx 농도가 버너의 총 발생 열량에만 비례한다는 결과는 매우 흥미있는 결과로 가스 버너의 NOx 배출 특성을 보여준다는 면에서 주목된다. 이러한 현상은 또 하나의 중요한 배출가스 특성을 나타내는 CO 농도의 경우 이와는 전혀 다른 특성을 나타내는 것과 대비되어 더욱 흥미롭다.

CO 농도의 경우 전체 연료 유량을 기준으로 나타내 보면 노즐 수의 변화에 따라 실험 결과의 분산이 매우 심하며 상관 관계를 거의 찾을 수 없다. 그런데 Fig.6에 나타난 바와 같이 총 연료 유량을 사용 노즐 수로 나눈 노즐 1개 당의 연료 유량을 기준으로 CO 배출농도를 나타내 보면 매우 흥미있는 결과를 얻었을 수 있었다. 이 그림에서 관찰되는 CO의 배출 특성은 Fig.5에서 관찰되는 총 연료 유량에 대한 NOx의 배출 특성만큼의 완전한 상관 관계는 아니지만, 앞서의 Fig.3에서 관찰된 CO의 배출 특성과 유사한 특성이 발견된다. 즉, CO의 배출 농도는 연료 유량이 증가하면 감소하다가 노즐당 연료 유량 0.8 lpm 정도에서 최소가 되며 다시 증가하는 특성이 관찰된다. 전체적으로는 0.4~1.2 lpm 정도까지의 상당히 넓은 노즐당 연료 유량

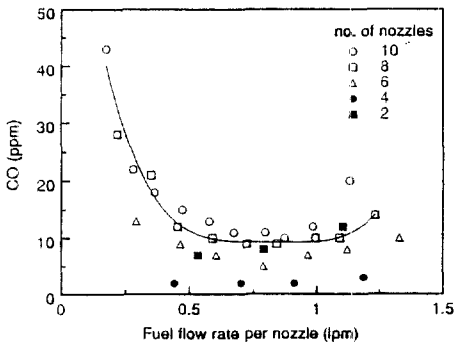
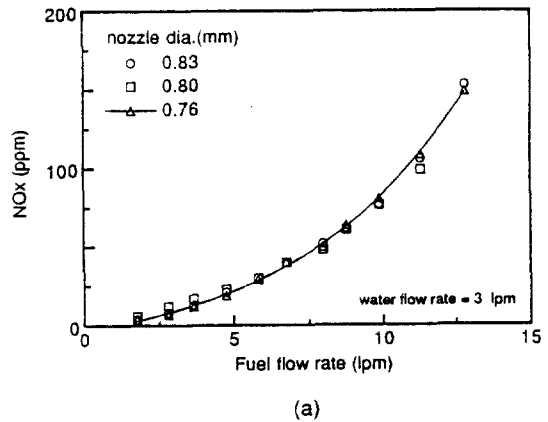


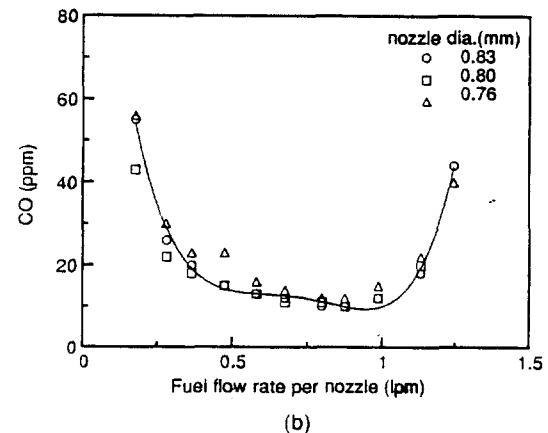
Fig.6 Carbon monoxide emission with fuel flowrate per nozzle

범위에 걸쳐 큰 변화가 없다. 앞에서 설명한 바와 같이 CO의 배출 특성은 공기과잉률과 염공부하율에 의해 각각 영향을 받는다. 즉 공기과잉률 1.1을 기준으로 하여 이보다 공기가 과잉되거나 부족하면 불완전 연소로 인해 CO의 배출이 증가하고 염공부하율 측면에서 본다면 적절한 부하율을 초과하거나 그보다 훨씬 낮은 부하율에서는 CO의 배출이 급격하게 증가한다. 그러나 본 실험의 결과 만으로는 2가지의 CO 배출 원인 중에서 어느 것이 더욱 결정적인 역할을 하는지 아직 분명하게 밝히기는 어렵다.

따라서 향후의 연구에서는 1차와 2차 공기를 나누어 제어한 상태에서의 실험을 수행하여 1차공기의 과잉률에 따른 배출 가스 특성을 연구할 필요가 있다. 지금까지 얻은 결과에 의하면 본 연구의 대



(a)



(b)

Fig.7 Emission characteristics of gas burner with various fuel nozzle diameters

상이 된 버어너 및 노즐 형상을 사용하는 경우 CO 배출의 측면에서 노즐당 1 lpm 이상의 연료 유량을 사용하지 않는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

3.4 연료 분출 노즐 직경의 변화에 따른 실험

본 연구에서는 연료 분출 노즐 직경(nozzle diameter)의 차이가 가스 버어너의 연소 특성 및 배기 가스 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 0.76mm, 0.80mm 및 0.83mm의 3종류의 연료분사 노즐에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig.7은 실험 결과 측정된 NOx 및 CO의 배출 농도를 각각 나타낸 그림이다. 이 그림에서 NOx 및 CO의 배출 농도는 노즐의 직경에는 거의 무관하다는 결론을 얻을 수 있다. 역시 NOx의 배출 농도는 총 연료 유량에만, CO의 배출 농도는 노즐당 연료 유량에만 관련된다는 것을 관찰할 수 있다. 각 노즐에서의 분사압력이 일정한 경우(예를 들면 이 경우 204mmH₂O) 노즐 직경이 증가하면, 식(1)에서 나타낸 바와 같이 노즐의 직경의 제곱, 즉 노즐 단면적에 비례하여 연료 분출량이 증가한다. 따라서 노즐 직경이 0.76mm로부터 0.83mm로 약 10% 정도 증가하는 경우 연료 분출량은 약 20% 정도 증가하게 되고 따라서 화염 길이도 약 20% 증가하며 NOx의 농도도 급격히 증가하는 결과를 가져오게 된다. 그러나 총 연료 유량이 동일하다면 NOx의 배출 농도는 노즐의 직경에는 무관하다.

한편 CO 농도의 경우 노즐 1개 당의 연료 분출량과 밀접한 상관 관계가 있다. 노즐에서의 분사압력이 204mmH₂O이라면 노즐 직경이 0.80mm인 경우 연료 분출량은 약 1.1lpm 정도이나 0.83mm의 경우 동일한 분사 압력에 대해 연료 분출량이 1.2lpm 정도로 약 10% 정도 증가하게 된다. 따라서, 분사압력이 고정되어 있는 경우 분출 노즐의 직경을 증가시키면 CO배출 농도가 적정한 배출 허용 범위를 넘어설 가능성이 있으므로 이에 대한 고려가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 가스 보일러 등에 널리 사용되고 있는 세미-분체형 가스 연소기를 대상으로

저공해형 연소기로의 기술 개발을 위한 설계 자료를 축적하려는 목적에서 가스 버어너와 관련된 여러가지 연소 조건을 변화시켜 이에 따른 배출 가스 특성에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

- 1) NOx 배출량은 연료 유량이 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하며, 연료 노즐 수에는 무관하게 총 연료 유량이 동일한 경우 배출 가스 온도와 NOx 배출 농도는 거의 동일한 값을 나타낸다.
- 2) CO 농도는 노즐당 연료 유량이 약 0.8 lpm 정도에서 최소가 되며 노즐당 연료 유량이 0.4~1.2lpm 정도까지의 상당히 넓은 범위에서 걸쳐 큰 변화가 없으며 연료 유량이 아주 크거나 작은 경우 CO농도가 급격히 증가하는 특성이 관찰된다.
- 3) NOx 및 CO의 배출 농도는 노즐의 직경에는 거의 무관하며, NOx의 배출 농도는 총 연료 유량에, CO의 배출 농도는 노즐 당 연료 유량에만 관련된다. 노즐 직경이 증가하면 연료 분출량이 증가하고, 화염 길이도 증가하므로 NOx의 농도도 급격히 증가한다. 그러나 총 연료 유량이 동일하다면 NOx의 배출 농도는 노즐의 직경에는 무관하게 일정하였다.

본 실험 대상이 되었던 D사의 가스 버어너의 NOx 및 CO의 배출 농도는 현재 시판 중인 유사한 급의 가정용 연소기의 배출 농도와 비교해 볼 때 높은 편이라고는 할 수 없다. 그러나, 향후 국내의 수요의 전망과 세계적인 추세가 저공해형의 연소기를 선호할 것이 전망되므로 저공해형의 연소기의 개발을 위한 계속적인 노력이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 김동우, 나경찬, 1986, 최신 가스設備工學, 도서출판 청암, 서울.
2. 日本機械學會 編, 1990, “燃焼の設計—理論と實際”, オーム社.
3. 정종수, 이춘식, 박은성, 김진국, 1993, “예혼합 연소기의 회박 가연 한계 확장에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 1993년 추계 학술대회 발표 논문집(Ⅱ), pp. 465~468.