

〈技術論文〉

## 흡수식 냉온수기용 저NOx 가스버너 개발

최정환\* · 오신규\*\*

(1994년 3월 16일 접수)

### Development of Low NOx Gas Burner for Absorption Chiller/Heater Unit

J. H. Choi and S. K. Oh

**Key Words :** Low NOx Gas Burner(저NOx 가스버너), Absorption Chiller/Heater Unit(흡수식 냉온수기), Step-by-Step Air Injection(공기다단 주입)

#### Abstract

For the development of low NOx gas burners aimed for absorption chiller/heater unit, three proto type burners of different capacity(265000, 498000, and 664000 kcal/h) have been manufactured through a combustion method of step-by-step air injection. In order to characterize the overall features of the flame and the properties of the emission gas, the temperature of the flame and the concentration of NOx and CO were determined. The main factors in the design of burners (the area of primary air injection, the diameter of secondary air injection hole, fuel nozzle diameter) were observed to increase linearly with the scale-up of burner capacity. The flame temperature profiles of the burners were observed to be almost similar, irrespective of their capacity. However, as their capacity increased, the flame temperature slightly increased and the hot region of the flames moved toward the flame tip along with the expansion to the direction of radius. From the proto type units, the amount of their NOx emission was determined to be around 25~30 vppm(3% O<sub>2</sub>) and the CO emission was less than 19 vppm (3% O<sub>2</sub>).

#### 기 호 설 명

- |   |                        |
|---|------------------------|
| $AR$ : 연소용 공기입구 면적비(=1차 공기주입구 면적/2차 공기주입구 면적) | $t_r$ : 체류시간           |
| $D_0$ : 버너직경                                  | $X$ : 물분율              |
| $k$ : 반응상수                                    | $\lambda_1$ : 1차 과잉공기율 |
| $L$ : 축방향거리                                   | $\lambda_r$ : 총 과잉공기율  |
| $n$ : 실험치(0.3~1)                              |                        |
| $P$ : 압력                                      |                        |
| $R$ : 가스정수                                    |                        |
| $Ro$ : 버너반경                                   |                        |
| $r$ : 반경방향거리                                  |                        |
| $T$ : 온도                                      |                        |

#### 1. 서 론

흡수식 냉온수기는 하절기에는 냉방용으로, 동절기에는 난방용으로 사용되기 때문에 냉방기와 난방기를 동시에 설치해야 하는 업무용 빌딩에는 설치 공간의 축소, 설치비 용자 등의 이점이 있고, 국가적으로는 하절기 전력수요 감소 및 가스수급 조절의 효과가 있다. 국내에서 생산되는 흡수식 냉온수

\*한국가스공사 연구개발원

\*\*정회원, 한국가스공사 연구개발원

기는 일본과 기술제휴에 의해 생산되는 것으로 고온재생기의 연소실이 일반 보일러에 비해 직경이 크고 길이가 짧아 여기에 장착되는 버너의 화염형태도 길이는 짧고 폭이 커야 한다. 현재 흡수식 냉온수기용 버너는 일본, 유럽 등에서 수입하거나 외국과 기술제휴하여 생산되는 보일러용 버너가 사용된다. 그러나 일반 가스보일러용 버너를 사용함에 따라 전열특성의 부적합, 국부가열에 의한 고온재생기의 피가열 파이프의 손상 및 흡수용액의 결정석출 등의 문제를 초래하는 일이 있어 흡수식 냉온수기에 적합한 가스버너의 국산화가 요구된다. 한편 흡수식 냉온수기의 연료는 오일이나 가스가 사용되나, 환경오염문제로 인하여 대도시에서는 가스연료를 사용하도록 되어 있다. 가스연료중 천연가스는 타연료에 비해 공해물질 배출이 매우 적은 청정연료이나 연소시 연료 종류에 상관없이 생성되는 대기오염 물질인 질소산화물(NOx) 문제는 해결 되어야 할 과제이며 국내에서 시판 중인 일반 보일러용의 가스버너에서 배출되는 NOx의 농도는 국산이 120~200 ppm, 외국산이 60~110 ppm으로 보고<sup>(1)</sup>되어 있다.

NOx는 그 생성원인에 따라 thermal NOx, fuel nOx, prompt NOx<sup>(2~4)</sup>로 나뉘는데, 천연가스의 경우 thermal NOx가 거의 대부분이므로 저NOx 연소법<sup>(5~10)</sup>을 이용하여 thermal NOx 생성원인을 제거함으로써 NOx생성을 최소화할 수 있다.

따라서 본 연구는 천연가스를 연료로 사용하는 흡수식 냉온수기용 가스버너의 국산화 및 저NOx형 버너를 개발하기 위해 기초 실험결과<sup>(11)</sup>를 이용하여 확산화염을 형성하고 연소용 공기의 단계적 주입방법(2단 연소법)을 적용한 시작품 버너(265,000 kcal/h급)를 제작하고, 연소실내 온도, 연소실 출구에서의 NOx, CO 및 O<sub>2</sub>농도를 측정하여 기초실험에서의 NOx 저감효과가 실제 연소기에서도 적용될 수 있는지의 여부를 확인하고 그 결과를 기준으로 용량을 확장시킨 2개 용량(498,000 kcal/h, 664,000 kcal/h급)의 시작품 버너를 추가로 설계, 제작하여 저NOx 가스버너의 설계기준을 설정하고자 수행되었다.

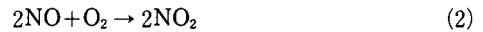
## 2. 이론적 배경

Thermal NO는 공기 중의 산소와 질소가 반응하여 생성되는 NO를 말한다. 공기 중의 산소와

질소는 상온에서의 반응성은 매우 낮으나 1300 K 이상의 고온에서는 반응성이 매우 높아 NO 생성이 활발하여 진다. 대부분의 연소로는 운전 중에는 1300 K 이상의 온도에 도달되기 때문에 NO 생성은 불가피하다.



NO가 생성되면 분해반응 속도가 느려 산소와 질소로 분해 되지 않고 산소와 반응하여 NO<sub>2</sub>를 생성한다.



그러므로 NO의 생성은 다음과 같은 형태의 식으로 표현된다.

$$X_{NO} = \frac{k(T)}{RT} X_{N_2} X_{O_2} P^n t_r \quad (3)$$

따라서 NO 생성을 억제하기 위해서는 (1) 화염온도, (2) 산소농도, (3) 질소농도, (4) 체류시간 및 (5) 연소로내 압력의 제어가 필요하다. 그러나 연소로내 압력은 임의로 조절하기가 어렵고 질소농도는 연료의 산화제로 공급되는 연소공기 중의 산소농도와 유관하기 때문에 NO생성을 억제하기 위하여 (1), (2) 및 (4)의 제어에 의한 방법이 주로 사용되고 있다.

본 연구에 사용된 2단 연소법은 연소에 필요한 공기를 2단계로 나누어 공급하여 연소가 완만하게 진행되도록 하는 방법이다. 1차 연소영역에서는 연료과잉 상태로 불완전연소를 일으킴으로써 화염온도의 저하와 산소농도의 부족으로 인하여 NO 생성이 억제되며, 2차 연소영역에서는 불완전 연소 생성물인 CO와 탄화수소 계통이, 공급되는 2차 공기에 의해 완전연소하게 되며 이 연소상태는 공기과잉의 상태로 이루어지기 때문에 화염온도가 저하되어 NO 생성이 억제된다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위해 사용된 실험장치의 개략도이다. 시험용 연소로<sup>⑤</sup>에 시작품 버너<sup>①</sup>를 부착하고 온도 측정장치<sup>⑦</sup> 및 배기가스 측정장치<sup>②</sup>로 로내온도 및 배출구에서의 NOx, CO 및 O<sub>2</sub> 농도를 측정하였다.

시험용 연소로는 2가지를 사용하였는데, 가로 6 m×세로 2.4 m×높이 2.7 m의 연소로 내부에 0.25 m 두께의 단열재를 부착하여 외부와의 열 이동을 차단시킨, 연소로내 압력 조절용 댐퍼의 개폐 및 가스 인입 조작을 퍼스널컴퓨터로 제어하는 건식 표준 시험로와, 버너 제작 현장에서 화염 관찰과 온도 및 배기가스 측정을 할 수 있도록 외경 1.3 m 두께 4.5 mm인 강관에 내경 0.9 m인 강관으로 밀폐시켜 내부에 물을 순환시킴으로써 일정 온도를 유지토록 하고, 외부에 관찰창을 부착한 습식 간이 시험로를 사용하였다.

표준 시험로의 측벽에는 온도 측정구가 설치된, 원주각 90도로 회전 가능한 장치가 부착되어 있으며 시험로 상단에 7자 형태의 온도 프로브 지지대가 측벽 온도 측정구와 일치되게 설치되어 있어 온도 측정구에 온도 프로브를 삽입하고 프로브 지지대로 고정된 후 온도를 측정하며 거리는 지지대를 기준으로 하여 스케일로 측정할 수 있게 되어 있다.

3.1.1 버너부

버너부는 가스트레인과 버너로 구성되어 있다. 연료가스는 가스내 이물질 제거를 위한 가스필터⑩를 통과하고, 가스 공급압이 허용압력 이상 또는 이하일 때 연료를 차단하는 압력스위치⑫ 및 운전 중 위험요인 발생시 가스를 차단하는 솔레노이드

밸브⑬를 지나, 일정 가스압이 공급되도록 하는 가스압력 조절기⑭를 통해 버너 가스노즐로 주입된다. 버너 점화시에는 송풍기⑤가 먼저 가동되어 연소로내 잔류 폐가스를 배출시킨 후 착화를 위해 공기량이 감소되며 점화기(ignitor)가 작동되고, 적은량의 연료가스가 공급된다. 2초 내에 UV센서에 의해 화염검출신호가 발생되지 않으면 가스공급이 차단되며, 화염이 안정되게 착화된 후에는 가스량 및 공기량이 적정수준으로 공급되어 화염이 유지된다. 부하변동시에는 콘트롤러에서 신호가 오면 댐퍼피조절기④에서 신호를 받아 공기댐퍼를 작동시키며, 공기량 변화는 윈드박스(wind box)내 정압을 변화시키므로 그 압력 변화량이 가스압력 조절기⑭로 보내져 그에 맞는 가스유량을 조절토록 하여 연료가스와 연소용 공기가 비례 제어되도록 되어있다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 시작품 버너의 구조도이다. 이 시작품 버너는 연료를 공급하는 노즐부(φ3.5 mm hole, 24개)와 NOx를 저감시키기 위해 연소용 공기를 2단으로 주입할 수 있는 구조인 스테인레스 강관으로 제작된 배플판(Baffle plate)으로 구성 되어있다. 연소용 공기 공급부에서 1차 연소용 공기는 화염을 안정화시키고, 연료가스와 공기의 혼합을 촉진시키기 위해 선회강도 0.8인 베인(Vane) 형태의 선회기(swirler)를 통하여 유입되며, 2차 공기는 연료 노즐 중심으로부터 외곽 반경방향에 위치한 φ10 mm인 구멍으로 유입된다.

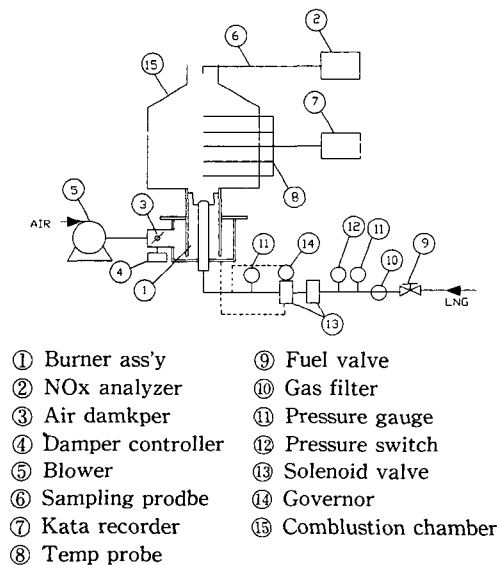


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

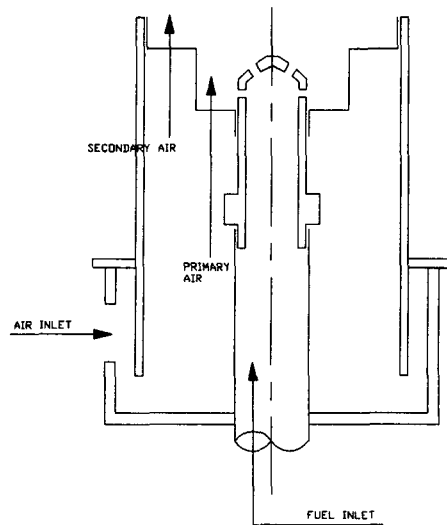


Fig. 2 Schematic diagram of burner

### 3.1.2 온도 측정장치

본 실험에서 사용된 온도측정 장치는 열전대와 열전대 지지부 및 열전대에서 발생하는 기전력을 감지하여 온도로 기록하는 기록기(LR 4110, Yokogawa 일본)로 구성되어 있다. 온도 프로브(probe)는 3중관 구조로서  $\phi 9.5$ ,  $\phi 5.8$  및  $\phi 6.6$  mm 스테인레스 강관으로 냉각수 유로를 구성하고  $\phi 3.6$  mm관 안에 2개의 구멍을 가진 애자관을 넣고 이 2개의 구멍에  $\phi 0.3$  mm인 백금선과 백금/로듐 13% 선을 넣어 서로 절연시키고 선 끝을 접합시킨 형태이다. 열전대는 높은 온도의 화염안에서 심한 산화와 부식을 일으키기 때문에 측정부에는 연소가스에 의한 촉매반응을 방지하기 위하여 산화 마그네슘(MgO) 피막을 입혔다.

### 3.1.3 배기가스 측정장치

배기가스 채취기는 공간 분해능을 높이기 위하여 측정 선단 내경이 1 mm인 수냉식 채취기를 사용하였다. 배기가스 채취기로 가스를 흡입할 경우, 채취기 내의 가스 조성이 변화되지 않도록 흡입가스를 급냉하여 반응을 동결시키고자 채취기 선단을 20도 이상으로 확대시킨 형상을 갖도록 하고 또한 80°C 로 수냉하며, 촉매작용을 방지하고자 스테인레스 강관을 사용하였다. 배기가스 채취기로 흡입된 연소가스는 soot 필터를 통과하면서 불순물이 제거되고, 응축수 트랩을 거치면서 배기중에 포함된 수분이 응축, 제거된 후 NOx 및 CO 측정을 위한 화학발광 분석기(Chemiluminescent NOx Analyzer Series 440, Analysis Automation Limited, 영국)와 CO 분석기(Enerac-2000E)로 유입된다.

### 3.2 실험방법

기초실험을 통하여 얻은 결과<sup>(11)</sup>를 이용하여 연소공기를 2단으로 주입할 수 있는 콤팩트하면서도 유로형태가 단순한 배플판을 제작하였다. 연소용 공기의 배분비는 버너의 1차 공기(primary air) 유입부와 2차 공기(secondary air) 유입부가 동일한 압력을 받는다고 가정하면 공기 유로 면적비( $AR = A_{1st}/A_{2nd}$ )에 따라 결정된다.

따라서 본 연구에서는 기준 버너 용량을 265,000 kcal/h급으로 하고, 1차 과잉공기를  $\lambda_1=0.6$ 을 기준으로하여 배플판의 1, 2차 공기주입부의 면적 및 구조, 연료 노즐의 위치 및 면적 등을 변화시키면서 배기가스 농도 및 온도를 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 기준 버너 설계 및 제작

화염의 안정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 배플판의 구조이다. 배플판은 공기를 배분하기 위하여 컵형태로 제작하였으며 컵의 바닥을 1차 공기주입부로, 컵 상단부를 2차 공기주입부로 하였다. 1, 2차 공기주입부를 모두 원형 구멍으로 제작하여 대기 중에서 실험하였을 때에는 화염상태가 양호하였으나 시험로에서 실험하였을 때에는 화염이 배플판으로부터 0.3 m 정도 떨어져 형성되었다. 따라서 공기주입부 형태를 여러가지로 변화시켜 실험해 본 결과 1차측은 선회를 줄 수 있는 베인 형태이고, 2차측은 원형구멍인 구조가 화염 안정면에서 양호하여 이 구조를 기준으로 하여 NOx 저감을 위한 실험을 실시하였다. 또 기준으로 설정한  $\lambda_1=0.6$ 일 때의 실험에서는 배기가스 중의 산소농도를 낮출 경우 CO 발생이 심하고 미연분이 많았다. 그 원인은 2차공기의 주입면적 및 위치에 영향을 받은 것으로 사료되어  $\lambda_1$ 을 변화시켜 실험을 한 결과  $\lambda_1=0.4$ , 즉  $AR=0.7$ 일 때 최적의 연소상태를 유지하였으며 화염상태도 매우 양호하였고 NOx 및 CO 배출농도도 적었다. 따라서  $\lambda_1$ 은 0.4로 수정하였다.

한편 버너 제작 도중 최적의 상태는 아니나 부하 변동에 따른 NOx 배출특성을 살펴 보았다. Fig. 3은 그 결과를 나타낸 것으로 부하가 클수록 NOx 배출농도는 감소하는 경향이거나 큰 차이는 보이지 않고 있다. 제작된 버너의 턴 다운비(turn down

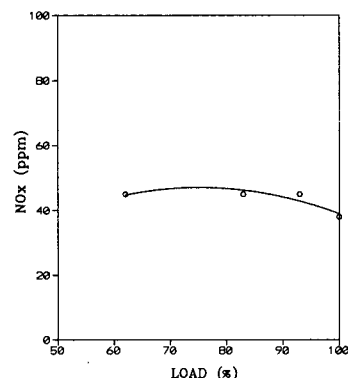


Fig. 3 Nox concentration with burner load (265,000 kcal/h,  $\lambda_T=1.3$ ,  $\lambda_1=0.4$ )

ratio)는 4 : 1이다.

4.2 버너의 용량 확장

저NOx 가스버너의 용량 확장은 최적화된 기준 버너의 치수를 기준으로 하여 정속도 스케일링(constant velocity scaling) 기법<sup>(12)</sup>을 이용하였다. 기준 버너와 마찬가지로 498,000 kcal/h, 664,000 kcal/h급의 시작품 버너를 설계, 제작하여 실험해 본 결과 연소상태가 양호하고 화염이 안정되면서 NOx 배출량이 최저가 되는 설계 중요치수(1차 공기 주입 면적, 연료노즐 직경, 2차 공기주입구 직경)는 기준 버너에서 도출된 이론 설계치수와 비슷한 값을 나타내었으며, 거의 선형적으로 변화되었다.

4.3 온도 분포

가스 노즐을 통하여 배플판의 1차공기 주입부 하류에서 연소로 내려 투입된 연료와 배플판의 1차 및 2차 주입부를 통하여 연소로 내려 투입된 공기가 상호 혼합되어 가장 연소하기 쉬운 혼합비의 영역에서 화염면이 형성되고, 그 연소반응에 의해 온도분포가 형성된다. 온도의 측정은 벽면의 단열상태가 양호한 표준 시험로에서 수행하였다.

Fig. 4는 기준 버너에서 중심축과 직각을 이루는 방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 기준 버너의 배플판은 금형을 사용하여 제작하였기 때문에 측정된 온도분포는 거의 대칭을 이루고 있다.

Fig. 5부터 Fig. 7까지는 버너 용량과 총 과잉공기율 변화 및 축방향 거리에 따른 화염온도를 나타낸 것이다. 여기에서 축방향 거리는 버너 직경과의 비로 무차원화 하여 표시하였다. 그림에서 보듯이 총 과잉공기율  $\lambda_T$ 가 1.1일 때가 1.4일 때 보다 높은 온도를 나타내고 있다. 한편, 버너 용량이 증가

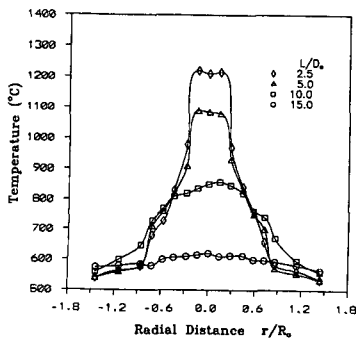


Fig. 4 Temperature profile (265,000 kcal/h,  $\lambda_1=0.4$ )

할 수록 화염온도가 약간씩 증가되고, 최고점의 온도가 점차 화염면 후류로 이동된다. 이와같은 현상으로부터 버너용량이 커짐에 따라 연소반응 영역이 축방향으로 더 확장되고 있음을 알 수 있다.

4.4 NOx 농도

NOx 농도는 배기가스 배출구로부터 측정하였

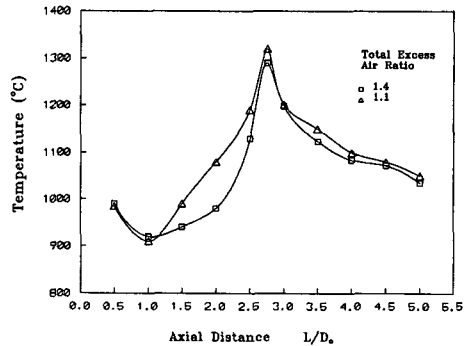


Fig. 5 Temperature profile along axial distance (265,000 kcal/h,  $\lambda_1=0.4$ )

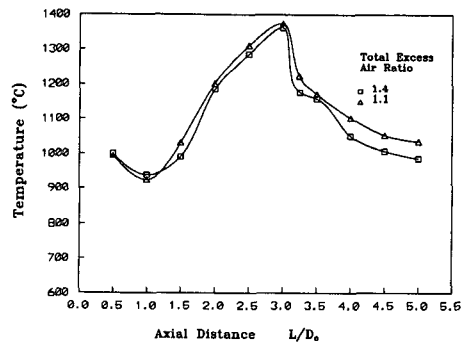


Fig. 6 Temperature profile along axial distance (498,000 kcal/h,  $\lambda_1=0.4$ )

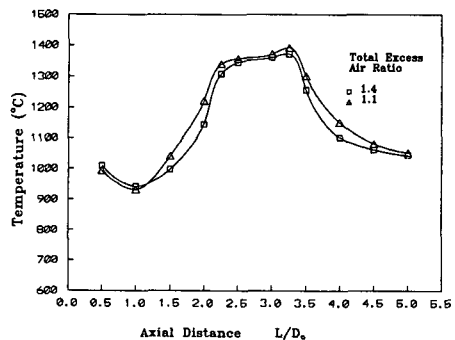


Fig. 7 Temperature profile along axial distance (664,000 kcal/h,  $\lambda_1=0.4$ )

다. Fig. 8은 버너 용량과 총 과잉공기율 변화에 따른 NOx농도 분포를 나타낸 것으로 총 과잉공기율 1.1 부근이 1.4보다 높은 NOx 농도분포를 나타내고 있다. 이것은 연소용 공기량이 증가됨에 따라 공기 중의 산소량이 많아져 연소는 활발하게 진행될 수 있지만, N<sub>2</sub>성분이 화염온도를 저하시켜 Thermal NOx가 감소된 것으로 사료된다. NOx 저감측면에서는 어느정도의 과잉공기의 공급이 효과적이지만 과잉공기량이 많을 수록 배기가스에 의한 열손실이 증가하므로 버너 실용화 측면에서는 NOx생성에 크게 영향을 받지 않는 범위에서 이론 공기비에 가깝게 조절하는 것이 효율적이다. 한편 버너 용량이 증가됨에 따라 NOx 농도가 다소 증가됨을 보여주고 있으나, 배출 농도는 O<sub>2</sub> 3% 기준시 30 ppm 이하이고 총 과잉공기율 변화에 따른 변화는 3모델이 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

4.5 CO 농도

CO 농도도 배기가스 배출구로부터 측정하였다.

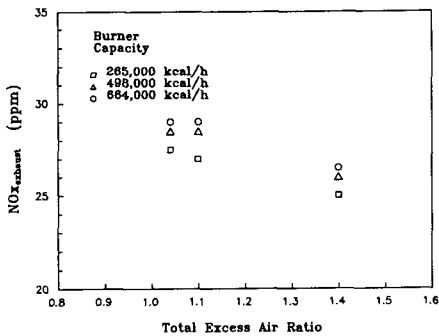


Fig. 8 NOx concentration with total excess air ratio ( $\lambda_1=0.4$ )

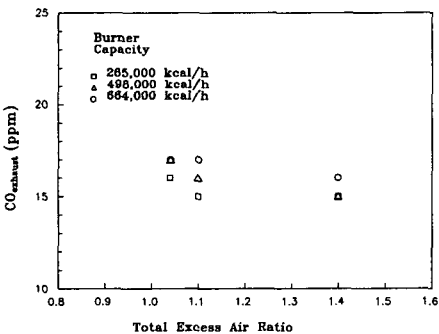


Fig. 9 CO concentration with total excess air ratio ( $\lambda_1=0.4$ )

Fig. 9는 버너 용량과 총 과잉공기율 변화에 따른 CO농도 분포를 나타낸 것으로 O<sub>2</sub> 3% 기준시 19 ppm 이하이다. 또 총 과잉공기율이 감소하면 CO 농도가 증가됨을 보여 주고 있다. 이는 약간의 불완전 연소에 의해 미연성분이 존재하고 있음을 보여준다.

또 NO와 CO가 O<sub>2</sub> 3% 기준일 때의 결과와 거의 비슷한 결과를 보이는 최소 과잉공기율은 1.04(배기가스 중 산소농도 0.8%)이었다. 이 이하로 과잉공기율을 내리면 CO의 배출이 급격히 증가하였다.

4.6 실증실험

흡수식 냉온수기 전문 제작업체(G중공업)에서 현재 생산중인 664,000 kcal/h급 흡수식 냉온수기에 시작품 버너를 부착하여 실증실험을 실시하였다.

시작품 버너의 화염형태를 냉온수기의 투시창을 통해 관찰한 결과 표준 시험로 및 간이 시험로 실험에서와 같은 안정된 형태를 보였으며, 폭이 넓고 화염길이가 짧은 형태를 나타내었다. 화염폭은 표준 시험로에서 측정된 것보다 약간 증가된, 버너 직경의 약 2.2배가 되었는데 이것은 버너 출구면으로의 배기가스 재순환에 의한 효과로 사료된다. 배기가스 분석결과 O<sub>2</sub> 3% 기준시 NOx 23 ppm, CO 13 ppm이었다.

Fig. 10은 표준 시험로에서의 화염 사진(265,000 kcal/h급)이며, Fig. 11은 실증 실험시의 화염사진(664,000 kcal/h급)이다. Fig. 10에서 가운데 작은 원이 버너 출구면이며, 밖의 큰원은 버너 주위의 단열재가 적열되어 나타난 것으로 화염은 큰 원의 절반 정도의 크기로 형성되어 있다. 또한 좌측의

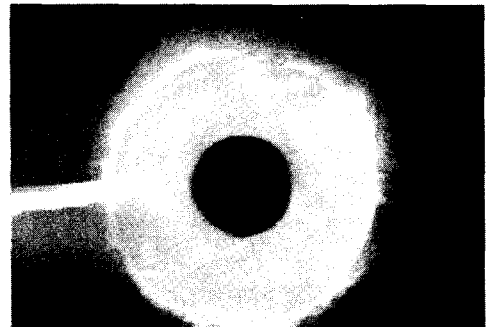


Fig. 10 Flame of 265,000 kcal/h grade burner in standard combustor

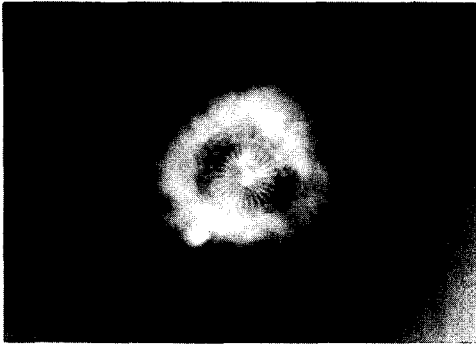


Fig. 11 Flame of 664,000 kcal/h grade burner in combustor of absorption chiller/heater unit

막대는 온도측정을 위한 열전대이다. Fig. 10과 Fig. 11을 비교해 보면 화염형태의 변화가 거의 없음을 확인 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 흡수식 냉온수기용 저NOx 가스 버너를 개발하기 위하여 확산화염을 형성하고 공기를 단계적으로 주입하는 연소방법을 채택한 3개 모델 (265,000 kcal/h, 498,000 kcal/h, 664,000 kcal/h)의 가스 버너 시작품을 제작하여 화염의 온도, CO 및 NOx 농도를 측정하였다. 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 시작품 가스버너는 NOx 배출농도가 O<sub>2</sub> 3% 기준시 30 ppm 이하로 나타났다.
- (2) 시작품 버너의 CO 배출농도가 19 ppm(O<sub>2</sub> 3%기준) 이하로 나타났다.
- (3) 부하변동에 따른 NOx 배출특성은 큰 변화가 없었다.
- (4) 기준으로 설정된 가스버너를 이용하여 용량이 더 큰 버너를 제작할 때 주요 설계 참고치수(1차공기 주입부 단면적, 2차공기 주입 hole 직경 및 노즐 직경)들은 거의 선형적으로 증가하였다.

### 참고문헌

(1) 이창룡 등, 1991, "고효율 천연가스 보일러 기술개발 연구," 한국가스공사 연구개발원 연구보고서, D-GU-005-89069112, pp. 182.  
 (2) Caretto, L. S., 1976, "Mathematical Modeling of Pollutant Formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 1, pp. 47~71.

(3) Miyauchi, T., et. al., 1976, "A Study of Nitric Oxides Formation in Fuel Rich Hydrocarbon Flames: Role of Cyanide Species, H, OH, and O," *16th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1073~1082.  
 (4) Miller J. A. and Bowman, C. T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, pp. 287~338.  
 (5) Yamagishi, K., et. al., 1974, "A Study of NOx Emission Characteristics in Two Stage Combustion," *15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1157~1166.  
 (6) Gerhold, B. W., et. al., 1978, "Two-Stage Combustor of Plain and Doped Oil," *17th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 703~713.  
 (7) Sadakata, M., et. al., 1980, "Effect of Air Preheating on Emissions of NO, HCN and NH<sub>3</sub> from A Two-Stage Combustion," *18th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 65~72.  
 (8) Miyauchi, T., et. al., 1980, "Effect of Steam Addition on NO Formation," *18th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 43~51.  
 (9) Bowman, C. T., 1992, "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation," *24th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 859~878.  
 (10) Nathan, G. T., et. al., 1992, "Reduced NOx Emissions and Enhanced Large Scale Turbulence from A Precessing Jet Burner," *24th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1399~1405.  
 (11) 오신규 등, 1993, "천연가스 연소특성 연구," 한국가스공사 연구개발원 연구보고서, KB-GC-018-91049309, pp. 81.  
 (12) Toqan, M. A., et. al., 1992, "Low NOx Emission from Radially Stratified Natural Gas-Air Turbulent Diffusion Flames," *24th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1391~1397.