

## 강재 가열로용 가스버너의 연소특성

조길원 · 박흥수 · 이용국

산업과학기술연구소 에너지연구실  
(1990년 11월 5일 접수, 1991년 2월 11일 채택)

## Combustion Characteristics of the Gas Burner for Reheating Furnace

Kil Won Cho, Heung Su Park and Yong Kuk Lee

*Energy Lab., Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea*

(Received 5 November 1990; accepted 11 February 1991)

### 요 약

강재가열로용 가스버너의 연소특성 파악을 위하여 1단연소식과 2단연소식의 두 종류 가스버너에 대한 중간시험 규모의 연소실험을 수행하였다. 실험용 연료로는 상용 프로판과 질소의 혼합기를 사용하였다. 가열로 버너의 주류를 이루고 있는 1단연소식 버너의 재반 연소조건에 따른 화염 안정성, 화염형상, 화염부 온도, 연소가스 조성 등을 측정·분석하였고, 두 종류 버너의 연소성능을 상호 비교하였다. 1단연소식 버너 대비 2단연소식 버너는  $\text{NO}_x$  발생량 저감과 열효율 향상에 효과적임을 알 수 있었다.

**Abstract**—Pilot scale combustion experiments for two types of gas burner, namely 1- and 2-staged firing burners, were carried out to examine the combustion characteristics of the burners for reheating furnace. The mixture of commercial propane and nitrogen was used as the experimental fuel. For the 1-staged burner prevailing in reheating furnaces, flame stability, flame shape, temperature and flue gas composition were measured and analyzed over various experimental conditions. Performance comparison of the two types of burner was done, also. Compared with the 1-staged burner, the 2-staged burner was found to be effective in reducing  $\text{NO}_x$  emission and in enhancing thermal efficiency.

### 1. 서 론

철강공정에서의 가열로(reheating furnace)는 분괴 압연과 연속주조 공정에서 생산되는 강재(slab, bloom, billet)를 압연가능한 소정의 온도로 재가열하는 설비이다. 가열로에는 각종의 버너가 설치되어 운용되고 있으며, 선강공정에서 자체 발생되는 저발열량의 부생 가스가 연료로 사용되고 있다. 가열로에서 연소의 양부는 가열로의 재반성능에 큰 영향을 미치는 바 연소기(버너) 및 연소기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. 가열로용 버너에 대표적으로 요구되는 사항은 다음의

세 가지로 요약할 수 있다. 1)  $\text{NO}_x$  발생량이 적을 것, 2) 부하조절범위(turn down ratio)가 넓을 것, 3) 균일가열이 가능할 것. 이 중 1)항은 환경보전의 관점에서 모든 연소설비에 해당하는 사항이며, 2)와 3)항은 가열능력(생산량), 제품품질, 연료원단위, 가열로수명, 제어성 등 거의 모든 가열로 성능과 직결되는 항목이다.

지금까지 연소와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔으나 실용연소기에 대한 연구는 대개 구조를 단순화한 모델연소기를 대상으로 하는 기초연구가 주류를 이루어왔으며 실용화를 목표로 한 개발연구는 미흡한 상태이다. 본 연구에서는 가열로용 저공해, 고효율 가스버

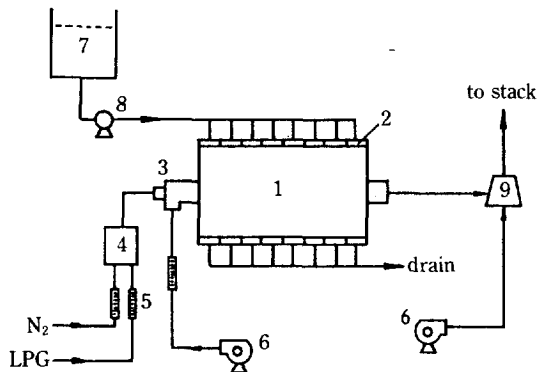


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| 1. Furnace    | 2. Water jacket |
| 3. Burner     | 4. Fuel mixer   |
| 5. Flow meter | 6. Blower       |
| 7. Water tank | 8. Pump         |
| 9. Ejector    |                 |

너의 개발을 위한 1차단계로서 가열로용 버너의 연소 특성 파악 및 설계자료 도출을 위하여 중간시험 규모의 연소실험을 수행하였다. 이를 위하여 수냉식 연소실험 장치를 이용하여 가열로용 버너의 주류를 이루고 있는 동축 노즐혼합형 1단연소식 버너의 제반 연소특성을 중점적으로 검토하였다. 아울러 최근 이용이 확대되고 있는 2단연소식 버너의 예비실험을 통하여  $\text{NO}_x$  발생량 저감과 열효율 향상 관점에서의 2단연소식 버너의 활용성을 제시하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

실험을 위하여 Fig. 1과 같은 구성으로 된 실험장치를 사용하였다. 본 실험장치는 대별하여 연소전열실험로, 공기 및 연료 공급계통, 냉각수 공급·배출계통, 연소 가스배출계통 등으로 구성되어 있다. 실험로의 최대 용량은 통상 가열로 버너의 1/10 정도 용량의 연소실험이 가능하도록 설정하여 이에 부합토록 실험로의 유효체적을 결정하였다[1]. 실험로의 유효체적은 0.6 m (H)×0.6 m (W)×2.4 m (L)이며 착탈이 가능한 길이 0.3 m의 8개 section으로 구성되어 있다. 실험로내의 조건을 가열로와 유사하게 하기 위하여 노하부에는 두께 7 mm의 강판을 설치하여 화염에 직접 노출되도록 하였고, 노벽 및 노천정은 내화단열 캐스터블로 라이닝 하였다. 각 section별 전열량 측정 및 노온조절을 목적으로 실험로 외벽은 water jacket으로 구성하였다. 노벽과 노천정을 포함하는 상부와 노하부로의 전열량을

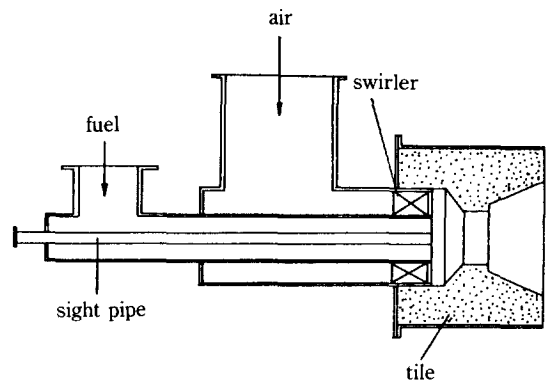


Fig. 2a. Schematic diagram of the 1-staged burner.

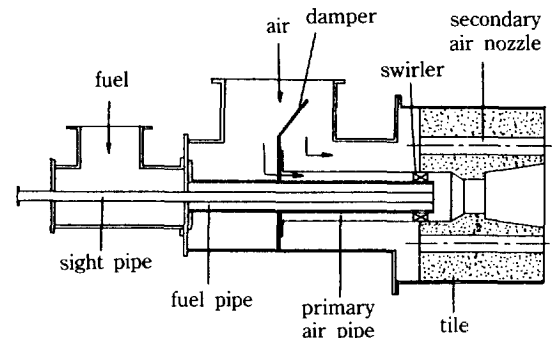


Fig. 2b. Schematic diagram of the 2-staged burner.

각각 측정하기 위하여 냉각수는 상, 하부 별도로 유통 되도록 하였다. 냉각수 입구에 section별로 유량계를 부착하여 유량을 알 수 있도록 하였고 출구에는 열전대를 설치하여 입출구의 온도차를 알 수 있도록 하였다. 실험로내 온도분포를 측정하기 위하여 section별 높이 방향으로 상·중·하 3부분에 측정공을 설치하였고, 중앙부 측정공은 화염형상의 관찰을 위한 관측구로도 사용된다. 연소용공기는 토출압 800 mmAq, 토출유량 7 Nm<sup>3</sup>/min 용량의 ring blower를 사용하여 공급하였으며, 연료공급계통에는 연료의 발열량을 조절하기 위하여 연료와 질소를 혼합시키는 연료 혼합기가 설치되어 있다. 배기계통에는 노압조절 및 통풍력 향상을 목적으로 이젝터를 설치하였으며 이젝터용 공기는 별도의 송풍기에서 공급된다.

### 2-2. 실험용 버너

실험용 버너로는 가열로용 버너를 대표하는 1단연소식 버너(Fig. 2a)와 근래 이용이 확대되고 있는 2단연소식 버너(Fig. 2b)를 설계제작하여 사용하였으며 공히 확산연소 방식이다. 1단연소식 버너에서 연료와 공기는

Table 1. Nozzle dimensions of the experimental burners

Burner type	1-staged	2-staged
$A_f(m^2)$	$2.66 \times 10^{-4}$	same as left
$A_p(m^2)$	$3.15 \times 10^{-3}$	$5.41 \times 10^{-4}$
$A_c(m^2)$	—	$1.69 \times 10^{-3}$

화염관측관 외주의 환상공간을 통하여 동축으로 분사되며, 2단연소식 버너에서는 연료와 1차공기는 동축으로 분사되고, 2차공기는 8개의 구멍을 통하여 분사된다. 2단연소식 버너는 연소공기공급부에 설치된 조절변의 개폐작용에 의해 1, 2차공기 분율의 조절이 가능하다. 양 버너 공히 공기 진행방향과  $45^\circ$ 의 각도를 갖는 선회익을 설치하였으며, 1단연소식 버너의 공기선회도 (swirl number, S)는 0.75, 2단연소식 버너의 1차공기 선회도는 0.86으로서 강선회 버너에 속한다[2]. 실험용 버너의 공기 및 연료노즐 제원을 Table 1에 나타내었다.

### 2-3. 실험방법

본 연구에 있어서 연소실험은 1단연소식 가스버너의 제반 연소특성 해석을 주실험대상으로 하였고, 2단연소식 버너는 가열로 조업에서 중요한 인자인  $NO_x$  발생량, 전열효율 등을 특정조건에서 측정하여 1단연소식 버너의 경우와 비교해 보았다. 실험용 연료로는 상용 프로판을 사용하였으며 회석제로서 질소를 사용하여 발열량을 조절하였다. 공기와 연료는 상온으로 공급하였다. 연소실험은 버너의 기본특성 파악을 위한 안정 연소범위 실험과 연소용량, 공기비, 질소분율(발열량) 등의 연소조건에 따른 화염형상, 노내 온도분포, 배가스 조성, 전열효율 변화 등을 포함하는 연소특성 실험을 수행하였다. 실험로내 온도측정에는 자체제작한 수냉식 열전대를 사용하였고, 배기가스 분석에는  $O_2$ ,  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ 의 동시분석이 가능한 정전위전해식 배가스 분석기(MRU 95/2D)를 사용하였다. 한편 전열실험에서는 냉각수 유량을 일정하게 유지하고 기록계에 기록되는 냉각수 온도의 변화가 없는 정상상태에 도달한 시점에서의 section별 입출구 냉각수 온도를 기준으로 전열효율을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 1단연소식 버너의 연소특성

#### 3-1-1. 안정연소범위

확산화염의 화염안정 방법으로는 1) 본 연구와 같이 선회류에 의해 생기는 환류 영역을 이용하는 방법, 2) 분류계면에서의 연소속도와 유속을 일치시키는 방법, 3) 버너 rim 후류에 형성되는 환류영역에 의해 안정시

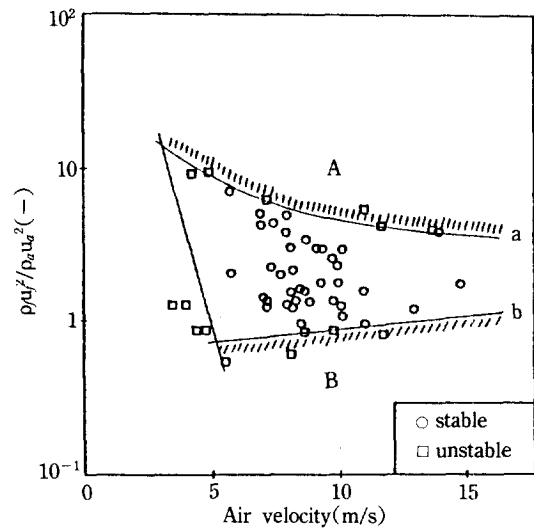


Fig. 3. Limits of stable combustion for the experimental fuel( $N_2=50\%$ ).

키는 방법, 4) 분류 후류의 급확대관내에 형성되는 환류영역에 의해 안정시키는 방법 등이 있다. 실용연소기는 대개 이들 방법의 조합에 의해 화염을 안정화시키는 경우가 많다.

연소실험의 기초단계로서 실험용 버너의 연소안정성을 검토해 보았으며 실험결과와 일례를 Fig.3에 도시하였다. 화염이 버너타일에 완전히 부착되는 상태를 안정연소로 보았고, 버너타일로부터 화염이 부상하거나 진동 혹은 화염이 형성되지 않는 경우를 불안정 상태로 보았다. 동일 공기유속에서 연료와 공기의 운동량 속(momentum flux)의 비가 커지면 전체 공기/연료 혼합기는 연료과농(fuel rich) 상태로 이행하며, 이 비가 작아지면 연료희박(fuel lean) 상태로 이행한다. 운동량 속의 비가 일정하면 연소용량 변화에 따라 공기비는 일정하게 유지되는 것을 의미한다. 운동량속의 비가 a선 부근에서는 화염의 진동이 발생하였고, b선 부근에서는 부상화염이 관찰되었다. 영역 A와 B에서는 공히 안정된 화염이 형성되지 않았다. a선을 안정연소 상한, b선을 안정연소 하한이라 볼 때 공기속도가 증가할수록 안정 연소 범위가 축소되는 것을 알 수 있다. 즉 동일버너에서 부하율이 증가하면 안정연소가 가능한 공기비 범위가 축소되며, 이는 공기속도가 커지면 난류전단력의 증가에 의해 소멸작용이 강하게 작용하는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 앞에서 제시한 1)과 3)의 방법에 대한 연구결과와 같은 경향을 보이고 있다[3].

안정연소 범위 실험결과로부터 기타 실험에서는 화염의 안정성을 고려하여 연소조건을 안정연소 범위내에

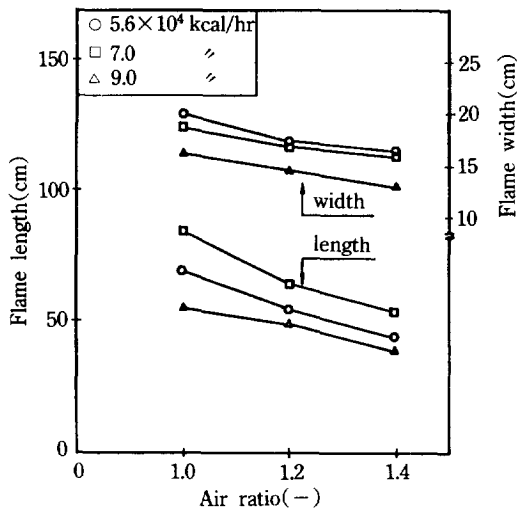


Fig. 4. Variation of flame dimension with air ratio ( $N_2 = 65\%$ ).

설정하였다.

### 3-1-2. 화염형상의 변화

Fig. 4는 실험용 버너의 공기비 및 연소용량 변화에 따른 화염형상 변화를 도시한 것이다. 전반적으로 동일 연소용량에서는 화염의 길이와 폭이 공기비 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 통상 알려져 있는, 난류화염에서의 화염길이는 공기유속에 무관하고 노즐구경에만 비례한다는 이론[4]은 비선형 분류화염에 대한 경우이므로 본 실험과 같은 강선화 연소의 경우에는 적용할 수 없다. 본 실험의 결과는 선화난류 연소시 공기속도가 증가함에 따라 화염길이가 짧아진다는 수치 계산에 등으로부터 설명가능하다[5]. 즉 동일 연소용량(연료량)에서 공기비가 증가하면 선화공기량이 증가하며, 이에 따라 재순환영역이 확대되고 선화강도가 증가하므로 공기/연료간 혼합과 연소반응이 촉진되어 화염치수가 감소하는 것으로 해석된다.

한편 공기비가 일정한 경우 연소용량 변화에 따른 화염형상 변화는 일관적인 경향을 찾아보기에는 어려움이 있다. 화염폭은 연소용량 증가에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있으나 화염길이는 7만 kcal/hr의 용량에서 가장 길게 나타나고 있다. 현재로서는 연소용량(부하율)의 변화에 따른 화염의 의존성을 이론적으로 설명하기에는 어려움이 있으며, 이와 같은 현상은 본 동축노즐혼합형 1단연소식 버너의 고유특성으로 이해된다.

### 3-1-3. 화염부 온도의 변화

Fig. 5는 연소용량 및 공기비에 따른 실험로내 화염부(버너 토출구에서 45 cm 지점 중앙부)의 온도변화를

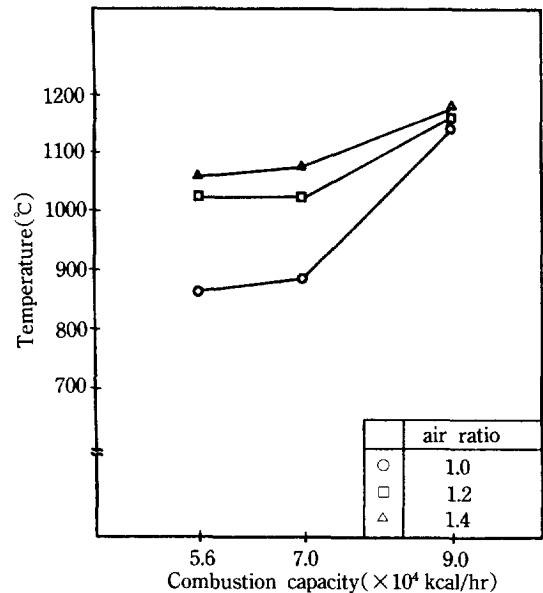


Fig. 5. Variation of combustion temperature with combustion capacity ( $N_2 = 65\%$ ).

도시한 것이다. 연소용량 증가에 따라 화염부 온도는 증가하는 경향을 나타내는데 5.6만 kcal/hr와 7만 kcal/hr 연소시의 온도는 큰 차이가 없으나, 9만 kcal/hr에서는 화염부 온도가 급격히 상승한다. 한편 동일 연소용량에서는 공기비가 증가함에 따라 화염부 온도가 높아진다. 단열화염온도 계산결과에 의하면 프로판의 경우 공기비 0.97 정도에서 최고 연소온도가 얻어지는 것으로 알려져 있으나[6, 7], 본 실험범위내에서 공기비 증가에 따라 화염부 온도가 상승하는 것은 선화공기량 증가에 따른 주연소영역의 고온화가 과잉공기량 증가에 따른 연소온도 저하효과보다 우월한 때문에 기인하는 것으로 사료된다.

### 3-1-4. $NO_x$ 및 CO 발생특성

가스 연소시 주공해물질인  $NO_x$ 와 CO의 발생에 미치는 연소조건의 영향을 검토해 보았다. Fig. 6은 연소용량별 공기비에 따른  $NO_x$  발생량 변화를 도시한 것이다. 연소용량 9만 kcal/hr의 경우를 제외하고는 공기비 1.2를 극대점으로 하여 공기비의 증가 및 감소에 따라  $NO_x$  발생량이 저하되며, 공기비 1.2를 기준하여 저공기비측의  $NO_x$  감소 기울기가 크게 나타난다. 이와 같은 결과는 공기와 연료의 완전혼합을 가정한 화학평형 계산에 의해 예측되는 평형  $NO_x$  농도의 공기비 의존성과 같은 경향을 보이는 바[7], 개략적인  $NO_x$  생성경향은 화학평형 계산만으로도 충분히 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 위 결과는  $NO_x$  저감을 위한 저

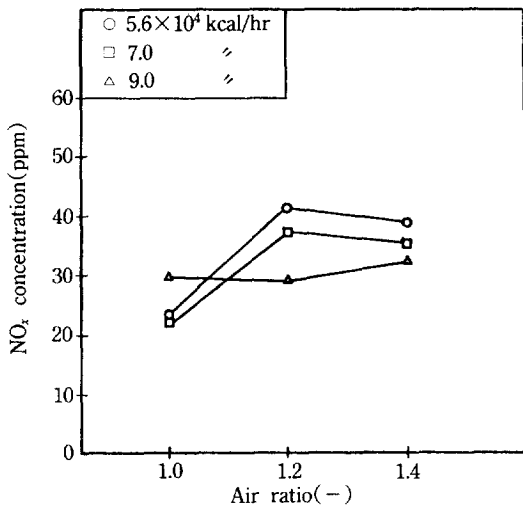


Fig. 6. Variation of NO<sub>x</sub> formation with air ratio (N<sub>2</sub> = 65 %).

공기비 연소의 중요성을 시사하고 있다.

한편 공기비가 일정한 경우 NO<sub>x</sub> 발생량은 연소용량의 증가에 따라 감소하는 경향(연소용량 9만 kcal/hr 시 공기비 1.0일 경우 제외)을 나타내고 있다. 일반적으로 NO<sub>x</sub>의 생성은 온도의 강한 함수로 온도증가에 따라 NO<sub>x</sub> 발생량은 증가하는 것으로 알려져 있다[8]. 따라서 온도의 영향만 고려하면 연소용량 증가에 따라 NO<sub>x</sub> 발생량도 증가할 것으로 예상할 수 있으나, 본 실험에서 연소용량 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 발생량 저하는 다음과 같은 이유 때문으로 사료된다. 즉, 본 실험에 사용한 프로판 연료의 경우 NO<sub>x</sub> 발생에 대한 온도 의존성이 낮고[9] 고연소용량에서는 저연소용량의 경우보다 노내 연소가스 유속이 빠르므로, 고온역중의 체류시간 감소에 의한 NO<sub>x</sub> 생성 저하효과가 온도상승에 의한 NO<sub>x</sub> 생성 증대효과보다 우월한 때문으로 판단된다.

연소용량 9만 kcal/hr 시의 공기비에 따른 NO<sub>x</sub> 발생 거동과 공기비 1.0 연소시 저연소용량의 경우보다 NO<sub>x</sub> 발생량이 많은 점 등은 이론적으로 설명하기 곤란하나, NO<sub>x</sub>의 발생에는 온도, 공기비(산소농도), 고온부 체류시간, 연료종, 화염형상, 노내 유동특성 등이 복합적으로 작용하고 이들 영향인자들도 상호간 영향을 미치는 바 어느 한 인자만의 독립적인 영향을 논의하기엔 무리가 있는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 연료중 질소분율이 NO<sub>x</sub> 발생에 미치는 영향을 검토한 것으로 질소분율이 증가하면 NO<sub>x</sub> 발생량은 감소한다. 즉 질소분율이 증가하면 가연분의 분율이 작아지며 이에 따라 연소온도가 저하되므로 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소하는 것으로 생각되며, NO<sub>x</sub> 저감측면에서는

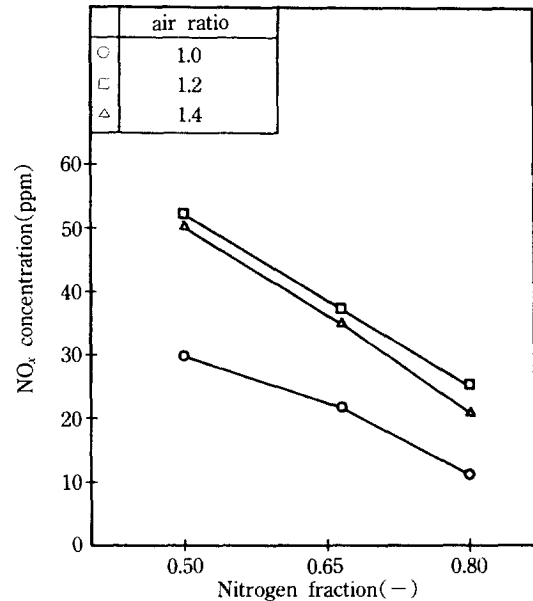


Fig. 7. Variation of NO<sub>x</sub> formation with N<sub>2</sub> content in the fuel (combustion capacity = 7.0 × 10<sup>4</sup> kcal/hr).

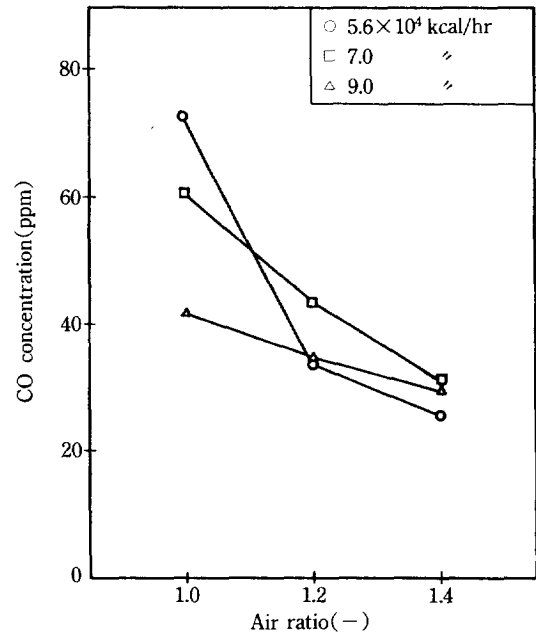


Fig. 8. Variation of CO formation with air ratio (N<sub>2</sub> = 65 %).

저발열량 가스의 사용이 유용할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 공기비 및 연소용량에 따른 CO 발생량 변화를 도시한 것으로서 일반적으로 예측되는 바와 같이

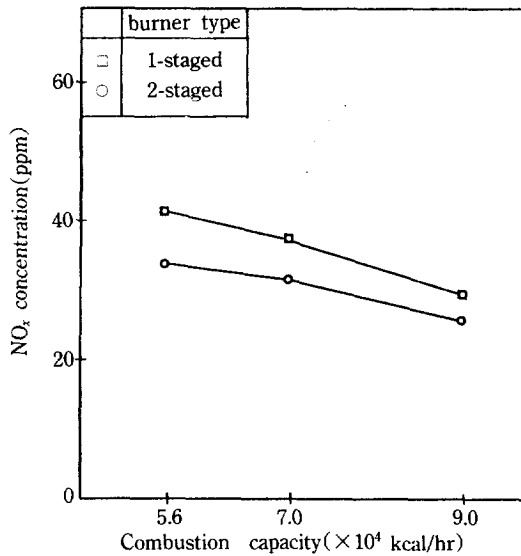


Fig. 9. Comparison of NO<sub>x</sub> formation between 1- and 2-staged burners(N<sub>2</sub>=65%, air ratio=1.2).

공기비가 증가하면 CO 발생량은 감소한다. 연소용량 증가에 따른 CO 발생가동은 어떤 일정한 경향은 나타 내지 않으나 실용연소기에서는 통상 CO 발생량 100 ppm 이하를 완전연소로 간주하는 바, 본 실험용 버너 에서 배출되는 CO 발생량은 무시가능한 것으로 판단 된다. 한편 질소분율이 증가함에 따라 CO 발생량도 증가하는 경향을 보였으며, 질소분율 증가는 연료중 불연분의 증가를 의미하므로 공기/가연분간 혼합의 저 항요인이 되어 혼합도가 저하되기 때문으로 생각된다.

### 3-2. 1,2단 연소식 버너의 비교

#### 3-2-1. NO<sub>x</sub> 발생특성

Fig. 9는 1단연소식 버너와 2단연소식 버너의 NO<sub>x</sub> 발생량을 비교한 일례로서 2단연소식 버너는 1차공기로 전체 연소용공기의 10%를 주입한 경우이다. 전 연소용 량에서 2단연소식 버너는 1단연소식 버너 대비 약 15 %의 NO<sub>x</sub> 저감효과를 나타내고 있다. 2단연소법은 1단 으로 소량의 공기를 공급하여 환원분위에서 연소시 킴으로서 NO<sub>x</sub> 생성의 주인자인 최고 화염온도와 산소 농도의 저하에 의해 NO<sub>x</sub> 생성반응을 억제하는 것이다 [8]. 본 실험의 2단연소식 버너가 1단연소식 버너 대비 최고 화염온도가 저하되며 화염길이가 확장되고 노온분 포가 균일해지는 것은 실험을 통하여 이미 확인된 바 있다[7]. 1단연소식 버너 대비 2단연소식 버너의 NO<sub>x</sub> 저감율은 1차공기 분율, 공기노즐의 배치방법, 전체 공 기비, 연료종류, 연소로 크기 등에 따라 상이하게 나타

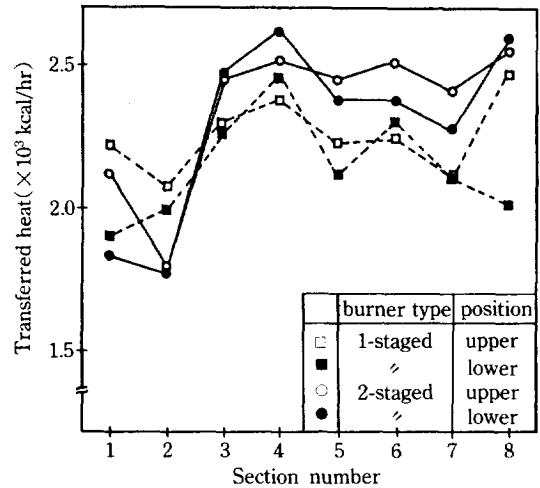


Fig. 10. Comparison of the transferred heats between 1- and 2-staged burners(combustion capacity=5.6 × 10<sup>4</sup> kcal/hr, N<sub>2</sub>=65%, air ratio=1.2).

Table 2. Comparison of heat transfer between 1- and 2-staged burners

Burner type	1-staged	2-staged
Heat input (kcal/hr)	56,100	55,500
Transferred heat to cooling water (kcal/hr)	upper	18,060
	lower	17,200
	total	35,260
Transferred heat to cooling water / Heat input × 100(%)	upper	32.2
	lower	30.7
	total	62.9

나나[10], 본 실험결과로부터 2단연소가 NO<sub>x</sub> 저감의 효율적인 수단이라는 것은 충분히 확인할 수 있다.

#### 3-2-2. 전열효율

Fig. 10은 1, 2단연소식 버너 연소시 각 section에 대한 냉각수로의 전열량을 비교한 예로서 이 때 냉각수량은 각 section별 상, 하부 공히 0.2 m<sup>3</sup>/hr로 일정하게 유지 하였다. 전열효율은 냉각수 유량변화에 당연히 영향을 받을 것으로 예측되는 바 본 결과는 상대적인 비교자 료로 볼 수 있다. 그림에서 section 번호가 증가할수록 버너에서 멀어지는 것을 의미하며, 전술한 바와 같이 section당 길이는 0.3 m이다. 실험로의 상부(노벽과 노 천정)와 하부로의 전열량 공히 버너에서 2번째 sec tion까지는 1단연소의 경우가 높고 3번째 section부터는 2단연소의 경우가 높게 나타난다. 전열량 계산결과 노의

전체 전열효율은 물론 가열로에서 중요한 사항인 노하부(강판)로의 전열효율도 2단연소식 버너가 우수한 것으로 나타났으며 Table 2에 계산결과를 요약하여 나타내었다. 이와 같은 전열효율 상승은 2단연소식 버너 연소시의 노내온도가 1단연소식 버너의 경우와 비교하여 버너 토출구 부근에서는 낮으나 노길이 방향의 온도강하율이 작은 것[7]이 주 이유로 생각되며, 화염길이 확장에 따른 화염복사 증대 효과도 작용하는 것으로 사료된다.

이상의 비교실험결과를 종합해 볼 때  $\text{NO}_x$  발생량 저감과 열효율 향상 측면에서 2단연소식 버너의 활용성이 기대된다.

#### 4. 결 론

강재가열로용 가스버너의 개발을 위한 기초단계 연구로서 프로판과 질소의 혼합기를 연료로 하여 중간시험 규모의 연소실험을 수행하였다.

현재 가열로용 버너의 주류를 이루고 있는 동축노즐 혼합형 1단연소식 버너의 실험결과 연소용량이 증가할수록 안정연소가 이루어지는 공기비 범위는 축소되는 것을 알 수 있었다. 공기비 증가에 따라 화염 치수는 감소하였고, 화염부 온도는 상승하였으며 저공기비 연소가  $\text{NO}_x$  발생량 저감에 효과적임을 확인하였다. 연소용량이 증가하면 화염부 온도는 상승하였으나  $\text{NO}_x$  발생량은 감소하였다. 연료중 질소분율이 증가함에 따라  $\text{NO}_x$  발생량은 감소하는 반면  $\text{CO}$ 의 발생량은 증가하였으나 실험범위내에서  $\text{CO}$ 의 발생은 무시가능한 것으로 판단되었다.

한편 2단연소식 버너는 1단연소식 버너 대비  $\text{NO}_x$  발생량 저감과 열효율 증대의 효과가 우수함을 알 수 있었다.

#### 감 사

본 연구는 포항종합제철주식회사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### NOMENCLATURE

A : area [ $\text{m}^2$ ]

R : radius [m]

S : swirl number,  $S = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (R_f/R_a)^3}{1 - (R_f/R_a)^2} \right] \tan \theta$

u : velocity [m/s]

$\theta$  : swirler angle with axis [deg]

$\rho$  : density [ $\text{kg/m}^3$ ]

#### Subscripts

a : air

f : fuel

p : primary air

s : secondary air

#### REFERENCES

1. German Institute for Standardization: DIN 4788 Part 2(1977).
2. Chigier, N. A. and Beer, J. M.: *J. Basic Eng.*, 797 (1964).
3. Mizutani, Y.: *Tetsu-to-Hagane*, 8, 774(1984).
4. Strehlow, R. A.: "Combustion Fundamentals", McGraw-Hill, New York(1984).
5. Gosman, A. D., Pun, W. M., Runchal, A. K., Spalding, D. B. and Wolfshtein, M.: "Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows", Academic Press, London(1969).
6. 小笠原光信, 高城敏美, 藤井健一: 日本機械學會論文集(第2部), 37, 3427(1973).
7. Lee, Y. K., Park, H. S. and Cho, K. W.: RIST Report, 8A-027(1988).
8. Sarofim, A. F. and Flagan, R. C.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2, 1(1976).
9. Takagi, T., Ogasawara, M., Fujii, K. and Daizo, M.: Fifteenth Symp.(Int'l) on Combustion, 1051(1975).
10. 日本機械學會: "燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法", 明善, 東京(1980).