무산화 직화로 버너의 연소특성이 강재표면의 산화에 미치는 영향

박 흥 수* · 유 갑 종**
(1998년 6월 8일 접수)

Effects of Combustion Characteristics of the Burners for Non-Oxidizing Direct Fired Furnaces on the Oxidization of the Surface of Steel Plate

Heung Soo Park and Kap Jong Riu

Key Words: Direct Fired Furnace(직화로), Nozzle Mixing Burner(노즐혼합형 버너), Pre - mixing Burner(예혼합형 버너), Heat Treatment(열처리), Combustion(연소), Recirculating Zone(재순환 영역)

Abstract

An experimental study for the two types of burners used in the non - oxidizing direct fired furnaces of the heat treatment process for the cold rolled plate has been carried out to investigate the combustion characteristics and the oxidization of the surface of steel plate. A steep temperature gradient and entrainment of residual oxygen were found near the heating surface in the flame of the nozzle mixing burner which has strong swirl velocity component. It was concluded that the elimination of the residual oxygen and the increase of the temperature of combustion gas on the heating surface are needed to enhance the performance of the burners for application to the non-oxidizing direct fired furnaces.

기호설명

A_0	: 이론공기량
L	: 버너-피가열면간의 거리
H	: 저위발열량
Q	: 연소량
X, Y, Z	: 좌표계
ϕ	: 당량비

1. 서 론

무산화 직화로는 냉연강판의 열처리 공정에서 표면 산화를 방지함과 동시에 소정의 온도로 강재를 연속적으로 가열하는 설비로서 화염에 의한 직접가열을 특징으로 하고 있다. 이러한 방식은 종래 복사관(radiant tube)을 이용한 간접 가열방식에 비하여 고부하 연소가 가능하기 때문에 노의 크기를 1/5수준까지 축소할 수 있어 소재 가열 에너지의 절감과 노의 콤팩트화 차원에서 유리하며 점차 적용이 확대되고 있다. 또한 직접가열에 의한 전열성능의 향상으로 가열온도와 속도의 증대가 가능하여 후속공정에서의 소둔 사이클 조절범위가 확대되기 때문에 full hard재에서 deep drawing재까지의 생산을 가능하게 하는 가장 진보된 형태의 가열방식이다.

냉연강판의 열처리 공정에 적용되고 있는 무산화 직화로는 1100℃~1300℃의 분위기 온도를 유지하면서 일정한 라인속도로 이동하고 있는 강재에 대하여 표면의 과도한 산화를 방지함과 동시에 700℃~760℃까지 가열하는 것을 주요 기능으로 한다. 이 과정을 거치면서 소재는 소둔을

* (재)포항산업과학연구원
** 회원, 경북대학교 기계공학과

위한 온도로 예열됨과 동시에 표면에 부착된 이물질이 소거되어 활성화됨으로서 후속 소둔 공정에서 산화피막의 환원이 가능하게 된다. 무산화로에서 소재의 과도한 산화가 이루어지게 되면, 소둔 공정을 거치고 난 소재표면에 산화피막이 잔존하게 됨으로서 도금 등과 같은 표면처리가 불가능해 지거나 불량하게 되어 손실을 초래하게 된다.

무산화로에서는 복사관을 이용한 간접 가열방식과는 달리 화염에 의한 소재의 직접가열이 이루어지기 때문에 버너의 연소특성과 연소조건에 따라 소재의 승온은 물론 표면의 산화와 환원특성이 직접적인 영향을 받게 된다. 특히 소재표면 부근에서의 연소가스의 온도와 조성분포는 소재의 산화 및 환원 거동과 밀접한 관계가 있으며 이는 버너의 연소특성에 의하여 지배되는 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 무산화로에서 사용되고 있는 노즐혼합형 버너와 예혼합형 버너에 대한 실규모 연소실험을 통하여 버너의 연소특성과 함께 소재표면에 대한 산화 특성을 파악함으로서, 버너의 연소특성이 무산화 직화로의 성능에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 강재의 산화와 환원 이론

복사관을 이용한 간접 가열방식에서는 강재 표면의 산화를 방지하기 위하여 수소와 질소로 이루어진 환원성 혼합가스를 인위적으로 형성해 주는 반면, 직화 가열방식에서는 연소반응에 의한 생성가스가 분위기 가스로 작용하게 된다. 일반적으로는 연료를 공기과잉 상태에서 연소시켜 잔류산소가 존재하는 상태를 산화성 분위기라고 하며 부족 공기조건에서 생성된 연소가스를 환원성 분위기라고 하지만, 연소가스에 존재하는 H_2O와 CO_2가 강재표면을 산화시키는 작용을 하기 때문에 연소생성가스 중에 산소가 존재하지 않더라도 강재표면의 산화는 발생되며 엄밀하게는 H_2/H_2O, CO/CO_2의 값으로서 산화성과 환원성 분위기를 구별하게 된다[(1),(2)].

화학 평형론적인 관점에서 보면 강재의 표면온고은 분위기 하에서 H_2O와 CO_2에 의해서 산화되며 H_2와 CO에 의해서 환원된다. 즉,

$$Fe + H_2O \leftrightarrow FeO + H_2 \qquad (1)$$
$$Fe + CO_2 \leftrightarrow FeO + CO \qquad (2)$$

직화로에서는 이러한 강재표면에서의 산화/환원 반응 외에도 표면탄소의 석출과 소실반응이 동시에 이루어지고 있다.

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO \qquad (3)$$
$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \qquad (4)$$

그러나 소재가 직화로 출측에 도달하여 온도가 높아지게 되면 잔류탄소의 양이 급격히 저하되기 때문에 석출과 소실반응은 산화/환원 반응에 비하여 미약하게 이루어진다. 식(1)과 (2)에 나타낸 반응에는 평형 반응상수가 관여하게 되며 반응상수는 온도의 함수로 나타내어진다. 일반적으로는 강재의 표면온도와 함께 H_2/H_2O 및 CO/CO_2의 값으로 산화와 환원이 이루어지는 범위를 표현하게 되는데, 강재의 온도가 높아질수록 환원이 가능한 CO/CO_2의 값은 증대되는 반면 H_2/H_2O의 값은 저하된다.

Fig. 1은 연소가스의 평형조성과 소재의 온도에 따른 산화 및 환원 영역을 나타내고 있다[(3)]. 강재를 약 760℃ 까지 산화시키지 않고 가열하기 위해서는 H_2/H_2O의 값을 4.0 이상으로 하고 CO/CO_2의 값은 1.5이상으로 하여야 하는 것으로 나타나고 있지만 연소가스에 있어서 이러한 평형조성의 비율을 얻기 위해서는 당량비가 2 이상인 연료과잉 상태에서 연소가 이루어 져야만 한다[(4)].

무산화 직화로에서는 당량비를 1.05~1.25의 범위로 하여 연료를 연소시키고 있기 때문에 평형론적인 관점에서 보면 분위기 가스는 산화성 분위기가 된다. Katsuki등[(5)]은 직화가열 방식에 있어서 무산화 가열의 가능성을 확인하기 위하여 메탄을 연료로 한 층류 및 난류화염 내에서 산화/환원 실험을 행한 바 있다. 화염 내에 잔존하는 산소의 체적농도가 0.1% 이하일 때 CO/CO_2와 H_2/H_2O의 값이 각각 0.4와 0.09 이하가 되면 산화막의 두께를 10 nm이하로 할 수 있음을 밝혔으며 이는 급속 연소를 통한 연소중간 생성물의 환원 작용에 의한 결과로 추정하였다. 이러한 관점에서 볼 때, 현재의 무산화 직화로는 약산화성 분위기 하에서 반응 양론적으로 산화를 극소화시

키면서 소재를 가열하는 것이라고 볼 수 있으며 연소가스의 온도분포와 더불어 소재표면에서의 연소 생성물의 거동이 산화/환원 반응에 주요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

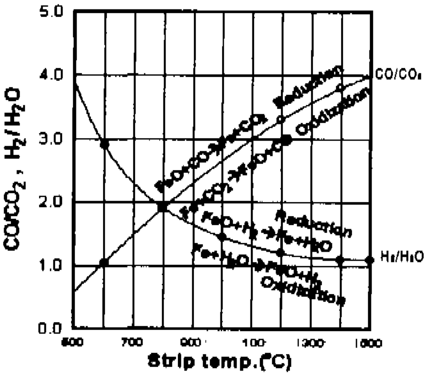


Fig. 1 Oxidization and reduction of steel with concentration of gases and surface temperature[3].

3. 실 험

3.1 실험장치

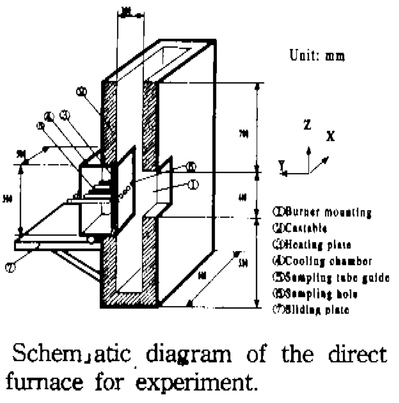


Fig. 2 Schematic diagram of the direct fired furnace for experiment.

Fig. 2는 본 실험을 위하여 제작된 실험로의 형태와 장치의 구성을 나타낸 것으로 실제 설비에서의 현상을 재현할 수 있도록 구조와 형태를 고려하였다. 버너와 피가열면간의 거리를 실제 설비의 버너와 소재간의 거리와 동일한 30cm로 하고 실제로 사용되고 있는 버너를 이용하여 연소실험을 할 수 있도록 하였다. 생성된 연소가스는 노의 상부를 통하여 배출되도록 하였으며 피가열면에 온도와 연소가스의 농도 측정을 위한 측정용 홀을 가공하였다. 피가열면의 후면은 일정한 유량의 공기에 의하여 냉각될 수 있도록 하였다. 연료가스로는 실설비와 동일한 코크스로 가스(COG, Coke Oven Gas)를 사용하였으며 버너에 공급되기 전에 직독식 유량계를 통하여 유량이 파악될 수 있도록 하였다. 연소용 공기는 송풍기를 이용하여 공급하였으며 직독식 유량계를 이용하여 계량하였다

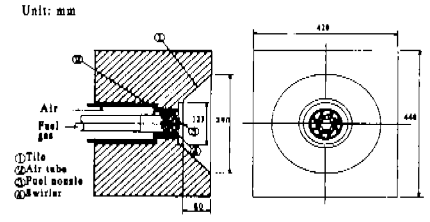


Fig. 3 Schematic diagram of the nozzle mixing burner for direct fired furnace.

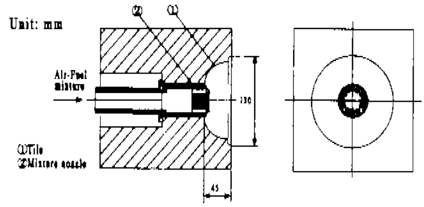


Fig. 4 Schematic diagram of the pre-mixing burner for direct fired furnace.

Fig. 3과 Fig. 4는 본 실험에서 사용된 버너의 형태와 구조를 나타낸 그림이다. 노즐 혼합형 버너는 중심부에 8개의 연료분출공이 가공되어 있으며 연소공기는 연료노즐의 외부 환상공간을 통하여 분사된다. 연소용 공기는 각도가 45° 인 선회익을 통과하게 되어 있다. 노즐 혼합형 버너의 선회도 S는 선회익의 각도 θ로 부터 근사적으로 $S = \tan\theta$에 의하여 구할 수 있으며 이 경우에 선회도는 약 1이 되어 강선회형 버너에 속한다[6]. 노즐혼합형 버너에서는 연료와 공기가 버너의 타일면을 따라 흐르면서 혼합되어 연소 반응을 일으키게 되며 가열된 타일면의 복사열에 의하여 소재가 가열된다. 이러한 복사가열의 목적 때문에 버너 타일의 각도가 일반적인 버너에 비하여 큰 형태를 하고 있다.

예혼합형 버너는 노즐혼합형 버너와는 달리 미

리 혼합되어진 연료와 공기가 버너 타일의 중심부에 설치된 분사공을 통하여 분사되며 버너 타일이 컵과 같은 형태로 되어 있어 연소가스가 버너와 수직한 방향으로 분출될 수 있다. 예혼합형 버너는 노즐혼합형 버너에 비하여 크기가 작으며 최대 연소용량이 노즐혼합형 버너의 25% 수준이다. 노즐혼합형 버너는 최대용량에서 연료와 공기의 분사속도가 각각 40 m/sec 수준이며 예혼합형 버너는 혼합기가 최대 110 m/sec 수준으로 분사되도록 설계되어 있다.

3.2 실험방법

3.2.1 온도 및 가스조성 분포의 측정

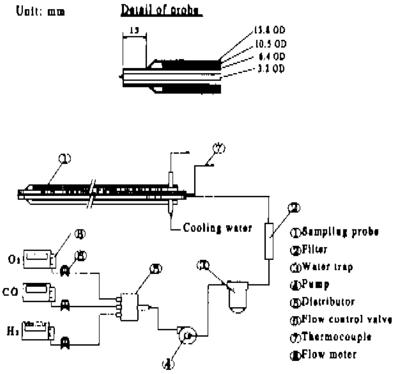


Fig. 5 Measuring system for concentration and temperature of combustion gas.

버너와 피가열면 사이의 공간에 대한 연소가스의 온도분포와 조성분포를 파악하기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같은 측정장치를 구성하였다. 가스 probe의 중심부에는 외경 3.2 mm의 열전대용 스테인리스 강 튜브를 두고 그 외부에 직경 6.4 mm(1t)의 튜브를 두어 그 사이로 시료가스가 흡입될 수 있도록 하였다. 외경 6.4 mm 튜브의 외부에는 냉각수가 흐를 수 있도록 하였다. Probe의 전체길이는 65 cm이며 tip부의 길이는 15 cm이다. 연소가스의 온도는 수냉식 probe의 중심에 삽입되어 있는 직경 0.3 mm의 Pt/Pt-13%Rd 타입의 열전대를 이용하여 측정하였으며 조성측정을 위해서는 흡인펌프를 이용하여 연소가스를 흡입한 다음 O_2, CO 그리고 H_2 분석기로 분배하였다. 각각의 분석기에는 시료가스의 양이 최적상태로 유지될 수 있도록 유량계가 부착되어 있으며 수냉식 스테인리스 probe를 사용함으로서 흡인중에 발생할 수 있는 가스조성의 변화가 최소화 될 수 있도록 하였다. 그림에서 보여진 probe는 Fig. 2의 guide tube를 통하여 노내에 삽입되어 진다. 다음의 Table 1에는 가스조성의 측정에 사용된 분석기의 종류와 측정가능범위를 나타내었다. 분석기의 오차범위는 ±1.5% 이내 이며 시료가스의 흡인유량은 3개의 분석기를 합하여 최대 2 ℓ/min 이내이다.

Table 1 Analyzers for measuring the gas concentrations.

Gas	Model	Range	Error
O_2	NGK O_2 analyzer	0~25%	±1%
CO	Riken infrared gas analyzer	0~10%	±1.5%
H_2	Fuji electric thermometer	0~100%	±1%

버너의 중심을 포함하는 수평면상에 3cm x 4cm의 가상 그리드를 만들고 총 140개 지점에 대한 온도를 측정하였으며, 가열면과 버너의 중심선상의 각 지점에 대하여 연소가스의 조성을 측정하였다. Fig. 2에 보인 가열판(heating plate)에 16개의 hole을 가공하고, 온도측정시에는 5개의 probe를 3개 hole 간격(12cm)으로 동시에 삽입하여 측정하였다. 5개의 probe는 노의 바깥쪽 끝 부분을 서로 연결하여 probe tip 과 버너와의 거리가 서로 같아지도록 하였고 probe가 삽입되지 않는 hole은 glass wool과 같은 내화재료로 막아 두었다. 버너와 가열면 사이의 측정위치가 11개 지점이고 동시에 삽입되는 probe의 수를 고려하면 가열면의 수평방향(X-방향)으로는 3개 지점이므로 총 30여번 probe를 이동시켰으며 측정단면에 대하여 약 1.5시간이 소요되었다. 농도 측정시에는 1개의 probe를 사용하였다. 노내의 1개 지점에서 측정에 소요된 시간은 probe의 이동시간과 잔여가스의 배출시간 그리고 분석기의 반응시간 등을 포함하여 약 3분~5분이었다. 가스분석기의 반응시간은 약 30초이다. 가스농도의 측정지점은 버너중심선 상에서 11개, 가열면상에서 7개로 하였고 소요된 시간은 약 1.5시간이다.

버너 점화 후 연료가스와 연소용 공기의 유량을 설정치로 일정하게 유지한 상태에서 노의 외피에 부착된 열전대를 이용하여 외피의 온도 변화 추이를 관찰하면서 온도가 일정하게 유지되는

것으로 판단되었을 때 측정을 시작하였다. 외피의 온도는 노의 내부와는 달리 노내 상태의 변화가 가장 늦게 나타나는 부분이므로 이와 같은 방법을 택하였으며 정상적인 상태에 도달하기까지 2~3시간이 소요되었다. 노의 상태가 이와 같이 하여 정상적인 상태에 도달하면 연소화염과 유동장은 정상상태에 도달된 것으로 간주하였다.

농도 측정시 probe를 통하여 흡입되는 시료가스의 양은 최대 2ℓ/min 이내로서 발생되는 연소가스의 양을 고려할 때 가스의 흡입에 의한 유동장의 교란현상은 무시할 수 있는 것으로 판단된다. 온도 측정시에는 유동장의 교란을 최소화하고 측정 시간을 단축하기 위하여 5개의 probe를 12cm 간격으로 배치하였다.

3.2.2 소재의 산화 실험

노즐 혼합형 버너와 예혼합형 버너의 강재에 대한 산화특성을 파악하기 위하여 두께가 1.5mm인 CQ(commercial quality)재의 냉연강판을 10cm × 40 cm 크기로 제작하고 그 후면에 열전대를 부착하여 연소가 이루어지고 있는 실험로의 피가열면상에 위치시킨 다음 시편의 온도가 목표온도에 도달하면 인출하는 방법으로 실험을 진행하였다. 노내 연소상태가 전술한 바와 같은 방법으로 정상 상태에 도달한 것으로 판단되면 먼저 온도 분포와 연소가스의 조성 분포를 측정해 둔 다음 길이 150 cm의 강봉에 시편을 부착하여 노의 상부에서 투입하여 시편이 가열면의 중심부분에 오도록 하였다. 시편의 온도가 목표 가열온도에 도달하면 다시 노의 상부로 끌어 올려 대기 중에서 산화가 진행되지 않도록 질소로 냉각하였다. 냉각된 시편은 1cm × 1 cm의 크기로 절단하여 수지로 mounting 한 후 주사전자 현미경이나 광학 현미경으로 1000배에서 3000배로 확대하여 표면에 부착된 산화층의 두께를 측정하였다. 필요시에는 산화층의 확인을 위하여 절단면에 대한 산소의 분포를 측정하였다.

3.3 실험조건

2종류의 대상버너에 대하여 연소량과 당량비를 변화시켜 가면서 실험을 행하였다. 노즐 혼합형 버너에 대하여는 연소량을 64410 kcal/hr, 107350 kcal/hr 그리고 169613 kcal/hr의 3가지 조건에서 행하였으며 예혼합형 버너에 대하여는 36499 kcal/hr의 조건에 한정하여 실험을 행하였다. 노즐혼합형 버너와 예혼합형 버너에 대한 최대 연소조건은 각 버너의 최대 연소용량의 80% 수준에 해당된다. 다음의 Table 2에는 노즐혼합형 버너와 예혼합형 버너에 대한 연료가스의 유량과 공기비를 정리하여 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions for measuring temperature distributions and gas concentration(H_{COG}=4294kcal/Nm^3, A_0=4.36).

Burner type	Fuel amount (Nm^3/hr)	Air Flow (Nm^3/hr)	Equivalence ratio	Heat input (kcal/hr)
Nozzle mixing	15	66	0.99	64410
	25	122.9	0.9	107350
		117.9	0.93	
		111.7	0.99	
		110.6	0.985	
		105	1.04	
		100	1.1	
	39.5	188.2	0.92	169613
		184.3	0.95	
		176	0.98	
		167.9	1.03	
		156.4	1.12	
Pre-mixing	8.5	46.9	0.74	36499
		35.2	0.98	
		33.5	1.11	
		27.2	1.27	

*Fuel gas; CO_2 1.341%, O_2 0.819%, CO 5.76%, H_2 58.27%, CH_4 25.661%, CmHn 3.02%, N_2 5.13%

본 실험에서는 측정에 앞서 연료가스인 코크스로 가스의 조성을 가스크로마토 그래프를 이용하여 측정하였으며 당량비는 측정된 가스조성을 근거로 하여 이론적으로 계산하였다. 코크스로 가스의 조성(체적비율)을 Table 2의 하부에 나타내었으며 C_mH_n은 coal 건류가스의 처리 후 잔존하는 고분자물질이다. 코크스로 가스의 발열량은 4294 kcal/Nm^3 이었으며 이론 공기량은 4.36 Nm^3/ (Nm^3 fuel) 인 것으로 계산되었다.

4.결과 및 고찰

4.1 온도분포 특성

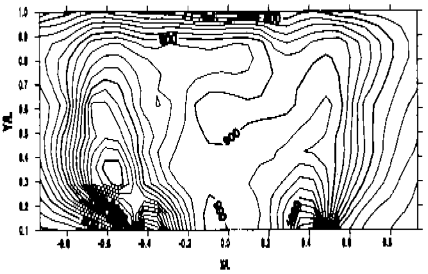
4.1.1 노즐혼합형 버너

이론 공기량 연소에 해당되는 당량비 1.0 부근에서 연소량에 따른 버너화염의 온도분포를 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 횡축은 버너의 중심선을 기준으로 한 양측방향으로의 위치를 나타내며 종축은 버너와 피가열면간의 거리를 나타낸다. 화염은 타일면과 그 연장선상에서 형성되며 화염사이의 공간에 넓은 동온영역이 존재하는 형태를 보이고 있다. 피가열면 부근의 연소가스 온도는 수직방향으로는 큰 온도구배를 보이지만 가열면을 따라서는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타나고 있다. 온도분포에 있어서 이러한 특징은 연소량이 증대될 수록 보다 명확하게 나타나고 있다. 타일의 확대각이 크고 선회속도가 강한 버너에서는 일반적으로 버너의 전면에서 재순환영역이 나타나는 것으로 알려져 있다[(7),(8)]. 본 실험의 경우에는 비교적 짧은 거리내에 버너와 마주보는 피가열면이 있기 때문에 이러한 재순환영역의 형태가 보다 명확하게 보여지는 것으로 생각된다.

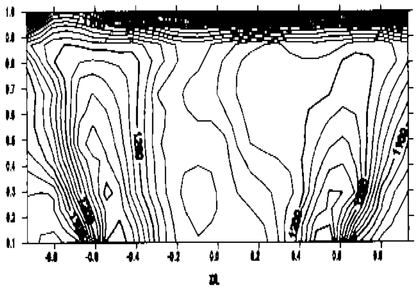
확대각이 45°인 버너의 타일면을 따라서 연료가스와 연소공기가 분출되면서 혼합과 연소반응이 이루어지게 되고 이렇게 하여 형성된 화염사이에는 고온의 연소가스가 역류하게 되는 재순환영역이 발생되었기 때문에 이와 같은 온도분포가 얻어진 것으로 보여진다.

그림의 온도분포로부터 노즐혼합형 버너에서는 버너와 피가열면간의 거리가 30cm임에도 불구하고 화염은 피가열면에 직접 충돌하지 않으며 연소가스가 피가열면을 따라서 흐르게 됨을 알 수 있고 실제적으로 소재의 산화 또는 환원반응에 참여하는 연소가스의 온도는 노의 중심부에 비하여 낮음을 알 수 있다. 연소량이 증대된 경우를 보면 노의 대부분의 공간에 있어서 연소가스의 온도는 1200℃~1300℃ 범위에 들고 있지만 피가열면에서의 온도는 1100℃ 수준이 되는 것으로 나타나고 있어 온도가 낮은 피가열면을 따라 흐르면서 냉각된 연소가스가 존재하게 되는 것으로 추정할 수 있다.

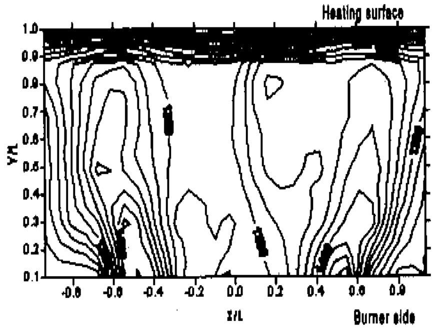
Fig. 7은 연소량이 169613 kcal/hr인 경우에 있어서 당량비 변화에 따른 연소가스의 온도분포 변화를 보이고 있다. 낮은 당량비에서는 온도의 경계가 보다 명확해 지면서 동온영역 즉 재순환영역의 범위가 넓어지는 것으로 나타나고 있는데,



(a) Q=64410kcal/hr



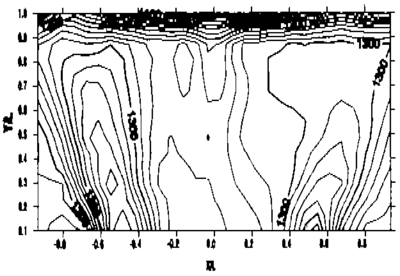
(b) Q=107350kcal/hr



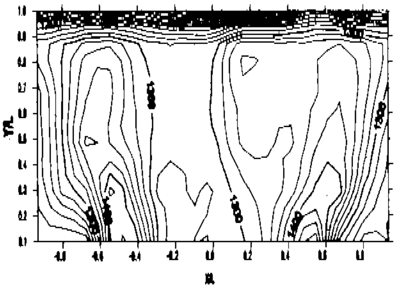
(c) Q=169613kcal/hr

Fig. 6 Temperature contour of the nozzle mixing burner(ϕ =0.99~1.03).

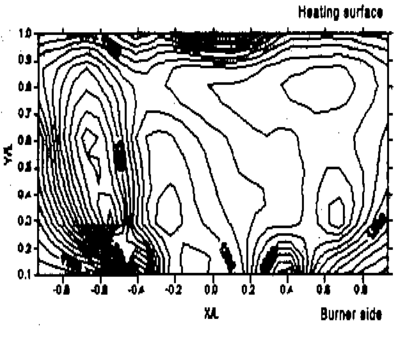
이는 동일한 연소량에서 공기량의 증대에 따라 분출속도가 상대적으로 증대되었기 때문이다. 당량비가 증대되면 연소공기의 분출속도가 저하되고 이에 따라 연료와 공기의 혼합이 지연되어 연소반응이 상대적으로 늦어지기 때문에 그림에서 보듯이 온도의 경계는 불명확해 지게 된다. 당량비의 변화는 노의 중심부 온도분포에는 영향을 주는 것으로 나타나고 있지만 피가열면 부근의 온도분포에는 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.



(a) ϕ =0.92



(b) ϕ =0.98



(c) ϕ =1.03

Fig. 7 Temperature contour of the nozzle mixing burner(Q=169613kcal/hr).

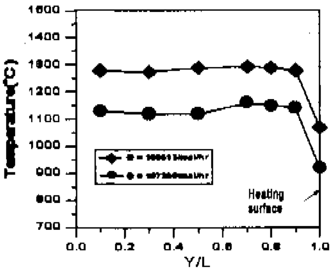


Fig. 8 Temperature distribution along the center line of the nozzle mixing burner (ϕ =0.98).

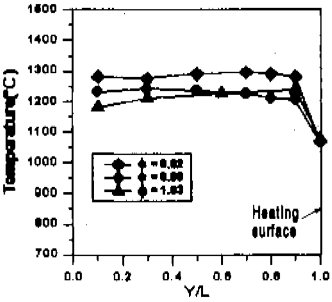


Fig. 9 Temperature distribution along the center line of the nozzle mixing burner (Q=169613kcal/hr).

Fig. 8 과 Fig. 9는 버너의 중심선을 따른 연소가스의 온도변화를 연소량과 당량비의 변화에 따라 나타낸 것이다. 연소가스의 온도는 연소조건에 관계없이 피가열면 부근을 제외하고는 거의 일정한 것으로 나타나고 있지만 피가열면 부근에 이르면 연소가스의 온도는 급격히 저하되어 온도의 경계층이 형성되고 있음을 추정할 수 있다. 또한 동일한 연소량에서는 당량비가 피가열면 부근에서의 연소가스 온도에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

노즐혼합형 버너에서는 전술한 바와같이 중간에 형성되는 넓은 재순환 영역으로 인하여 타일면의 연장선을 따라서 생성된 연소가스가 피가열면을 따라서 흐른 후 재순환 영역으로 유입되기 때문에 피가열면 부근에서는 냉각되어 온도가 상대적으로 낮은 연소가스가 존재하게 되며 또한 당량비와 같은 연소조건의 변화에 직접적인 영향을 받지 않는 것으로 보여진다.

4.1.2 예혼합형 버너

Fig. 10과 Fig. 11에는 예혼합형 버너에 있어서의 전형적인 온도분포와 당량비에 따른 버너 중심선상에서의 연소가스 온도변화를 나타내었다. 예혼합형 버너화염의 온도분포는 노즐혼합형 버너화염의 온도분포와 근본적인 차이가 있음을 알 수 있다. 예혼합형 버너에서는 연료와 공기의 혼합기에 선회류 성분이 주어지지 않을 뿐만 아니라 버너 타일의 형태에 의하여 피가열면에 수직으로 분출이 되기 때문에 이러한 온도분포의 특성이 나타나게 된다. 즉 연소공기와 연료의 혼합

기에 반경방향으로의 속도성분이 주어지지 않으므로 혼합기는 직진하면서 연소반응을 일으키게 되고 버너와 피가열면 사이에 재순환 영역이 생성되지 않기 때문에 연소가스가 피가열면에 직접 충돌하게 된다. 예혼합 연소는 확산연소에 비하여 연소반응이 빠르게 이루어지므로 최고온부는 버너타일의 내부에서 보여진다. 연소가스가 피가열면에 충돌함으로서 노즐혼합형 버너에서 볼 수 있었던 피가열면 부근에서의 온도 경계층은 보여지지 않는다. 그림에서 연소가스의 온도가 노즐혼합형 버너에 비하여 전반적으로 낮게 나타나는 것은 버너의 연소용량이 감소되었기 때문이다. 당량비의 영향은 노즐혼합형 버너에 비하여 보다 명확하게 나타나고 있으며 특히 피가열면에서의 연소가스의 온도변화가 노즐혼합형 버너와는 다른 형태를 보여주고 있는데 이 또한 연소가스의 직접충돌에 의한 결과이다.

CO와 H_2의 함유량이 4%~6% 범위에 있고 산소가 존재하지 않는 연소가스의 경우 소재와 반응하는 연소가스의 온도가 1150℃ 이하가 되면 환원가열이 이루어지지 않는 것으로 알려져 있다[9]. 소재에 대한 산화 또는 환원반응의 측면에서 볼 때, 예혼합형 버너는 연소생성물이 직접 피가열면에 충돌하게 되므로 Katsuki[6] 등이 제시한 바와 같은 연소가스 중의 중간생성물에 의한 영향이 노즐혼합형 버너에 비하여 보다 크게 작용할 것으로 추정되며 연소가스의 온도를 높게 할 수 있어 무산화 가열에 있어서 유리한 연소특성을 지니고 있는 것으로 생각된다.

4.2 가스조성분포

연소량이 버너 최대용량의 80% 수준인 경우에 있어서 노즐혼합형 버너와 예혼합형 버너에 대한 가스조성 분포의 측정결과를 Fig. 12~Fig. 13에 나타내었다. 노즐혼합형 버너에 있어서는 버너에서 피가열면에 이르는 공간에서의 가스조성의 변화가 크지 않은 것이 특징적으로 보여지고 있다.

노즐 혼합형 버너에서는 버너와 피간열면 사이에 재순환 영역이 존재하게 되고 이 영역에서는 연소가스가 순환되고 있기 때문에 온도분포와 함께 가스조성에 있어서도 같은 결과가 보여 진 것으로 생각된다. 이론 당량비 이상의 연소조건에서는 산소가 검출되지 않았으며 가연 성분이며 환원성 분위기를 형성하게 되는 CO와 H_2의 비율

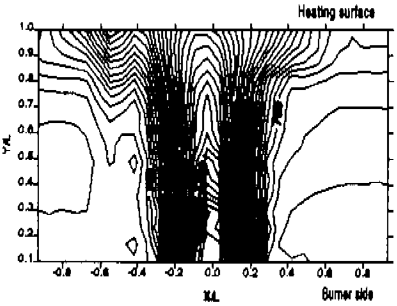


Fig. 10 Typical temperature contour of the pre-mixing burner(Q=36499kcal/hr, ϕ =1.11).

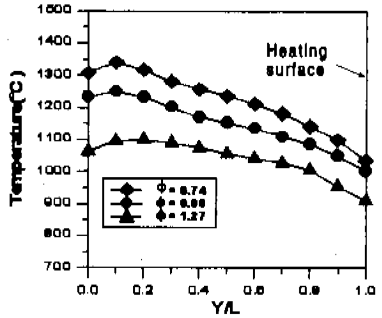


Fig. 11 Temperature distribution along the center line of the pre-mixing burner(Q=36499kcal/hr).

이 증가됨을 알 수 있다. 산소의 농도는 피가열면 측에서 높은 수치를 보여주고 있는 것으로 나타나 연소반응에 참여하지 않은 잔류산소가 피가열면을 따라 재순환 영역으로 유입되고 있음을 추정할 수 있다. 당량비가 0.9수준일 때 노즐혼합형 버너화염의 중심부에서는 CO와 H_2의 비율이 각각 4% 및 6%에 달하는 것으로 나타나고 있다. 높은 당량비 조건에서 미연분중 H_2의 농도가 CO에 비하여 높게 나타나는 것은 연료가스인 코크스로 가스중 H_2가 60%를 차지하고 있기 때문인 것으로 생각된다.

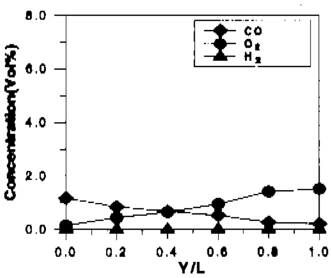
예혼합형 버너에 있어서 당량비에 따른 버너 중심선상에서의 가스조성 변화를 측정한 결과인 Fig. 13을 보면, 버너에서 피가열면에 이르는 동안의 가스조성 변화가 노즐혼합형 버너의 경우에 비하여 보다 크게 나타나고 있으며 전반적으로 볼 때 미연분인 일산화 탄소와 수소의 농도가 버

너노즐 부근에서 높은 것으로 나타난 반면 산소의 농도는 피가열면 부근에서 높게 나타나고 있다. 버너의 중심부에서는 노즐 혼합형 버너의 경우에는 연소가스가 버너측으로 흐르는 반면 예혼합형 버너에서는 피가열면측으로 흐르게 되므로 연소가 진행되는 과정에서의 가스조성의 변화가 직접적으로 나타난 결과로 보여진다. 산소의 농도는 노즐혼합형 버너와 같이 피가열면 부근에서 증대되는 현상을 보이고 있지만 이는 잔류산소의 혼입에 의한 것은 아니다. 노즐혼합형 버너에서는 유동특성으로 인하여 피가열면 부근의 잔류산소가 혼입 되지만 예혼합형 버너에서는 당량비에 따른 연소조건의 변화가 직접적으로 나타난 결과이다.

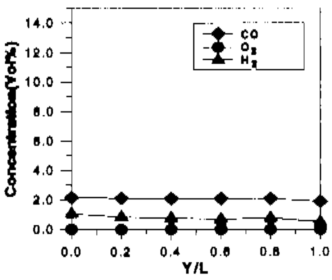
Fig. 14와 Fig. 15에는 당량비에 따른 피가열면에서의 잔류 O_2와 미연분에 대한 평균농도치를 나타내었다. 당량비가 1.0 이상이 되면 예혼합형 버너에 있어서는 산소가 검출이 되지 않는 반면 노즐혼합형 버너에서는 잔류산소가 존재하게 되는 것으로 나타나고 있다. 예혼합형 버너는 연료와 공기가 혼합된 상태에서 버너노즐을 통하여 분출되지만 노즐혼합형 버너의 경우에는 버너의 타일면을 따라 흐르는 과정에서 연료와 공기의 혼합이 이루어지므로 연소조건에 따라 혼합의 정도는 변화되고 연소에 참여하지 못한 잔류산소가 연료과잉 상태에서도 존재할 가능성이 높은 것으로 판단이 된다. 당량비의 증가에 따른 미연분의 농도변화는 두 버너에 있어서 비슷한 경향을 보이고 있다.

4.3 소재에 대한 산화특성

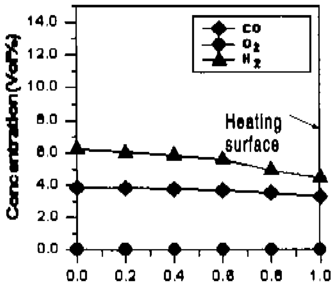
소재의 가열온도를 750℃로 동일하게 하고 당량비의 변화에 따라 형성된 소재표면의 산화층 두께를 측정하였다. Photo. 1은 산화실험을 실시한 시편의 단면을 주사전자 현미경으로 3000배 확대해 본 일례를 보인 것이며 Photo. 2는 이러한 경우에 있어서 산소의 분포를 측정한 결과로서 Photo. 1에서 보여진 중앙부의 띠가 산화층임을 확인할 수 있었다. Photo. 1에서 흰점은 산소의 분포를 나타낸다. Fig. 16은 당량비를 변화시켜 가면서 측정한 산화층의 두께를 나타낸 것으로 산화층의 형성이 당량비에 직접적으로 영향을 받고 있으며 당량비가 1.0 이상인 연료과잉 상태에서도 표면산화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 동일한 당량비 조건에서 예혼합형 버너의 경우가 노즐 혼합형 버너에 비하여 산화층의 두께가 두껍게 형성된 것으로 나타나고 있는데 이는 예혼합형 버너의 경우 연소량이 노즐혼합형 버너의 연소량에 비해 20%~35% 수준으로서 노내 온도의 저하에 따른 시편의 체류시간 증대에 의한 결과로 보여진다.노즐 혼합형 버너의 경우 당량비를 1.0 이상으로 할 경우 산화층의 두께는 약 3㎛ 수준이 되는 것으로 나타나고 있다.



(a) ϕ =0.95

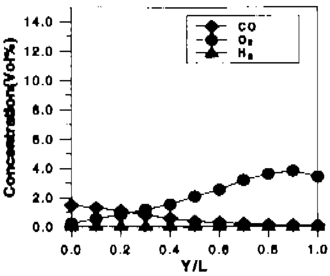


(b) ϕ =1.03

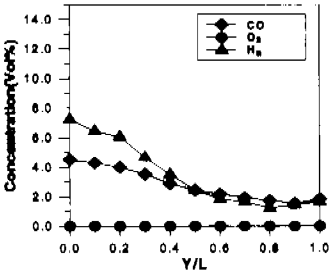


(c) ϕ =1.12

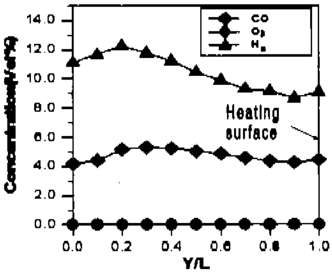
Fig. 12 Variation of gas concentration along the center line of the nozzle mixing burner(Q=169613kcal/hr).



(a) ϕ =0.74



(b) ϕ =0.98



(c) ϕ =1.27

Fig. 13 Variation of gas concentration along the center line of the pre-mixing burner(Q=36499 kcal/hr).

Katsuki 등[5]은 난류화염내에서 당량비가 1.0을 상회하는 약한 연료과잉 연소조건에서 두께 0.8 mm의 시편을 700℃~800℃로 가열할 때 약 0.5μm~1.0μm의 산화층이 형성됨을 측정한 바 있으며 본 실험에 사용된 시편의 두께를 고려해 볼 때 본 실험결과와 정성적으로 일치됨을 알 수 있다. Fig. 17은 노즐혼합형 버너에 대하여 연소량이 최고용량의 80% 인 경우에 당량비를 고정하고 체류시간을 변화 시켜가면서 산화층의 두께 변화를 비교해 본 결과이다. 산화층의 두께는 당량비와 함께 체류시간에 따라서 변화됨을 알 수 있다. 당량비가 1.12인 경우 체류시간이 7초에서 16초로 길어지면 산화층의 두께는 0.5μm에서 약 6배인 3μm 까지 증대되는 것으로 나타났다. 체류시간이 7초인 경우에 있어서 시편의 온도는 약 500℃에 도달하였으며 16초인 경우에는 1000℃를 초과하는 것으로 측정되었다. 따라서 Fig. 17의 결과는 체류시간의 증가와 함께 시편온도 증가에 의한 영향이 복합적으로 나타난 것이라고 볼 수 있다.

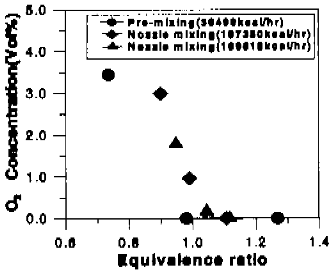


Fig. 14 Averaged O_2 concentration on the surface of strip.

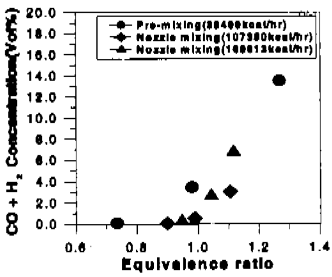


Fig. 15 Averaged CO+H_2 concentration on the surface of strip.

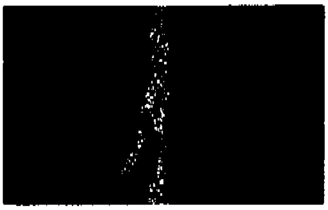


Photo. 1 Cross-sectional view of the specimen after oxidization test.

Photo. 2 Mapping of the oxygen distribution on the cross-section of the specimen.

실제의 직화로 운전은, 직화로 출측의 소재온도를 700℃~760℃로 설정해 놓고 버너의 연소량과 소재의 두께 또는 폭에 따라 소재 이송속도를 제어하는 방법으로 운전되고 있다. 즉, 직화로에서 소재의 가열 온도는 700℃~760℃로 일정한 것으로 볼 수 있기 때문에 이러한 가열조건에서는 가능한 한 연소량을 증대시켜 고온 분위기를 유지함으로서 체류시간 단축에 의한 산화층 형성 억제효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

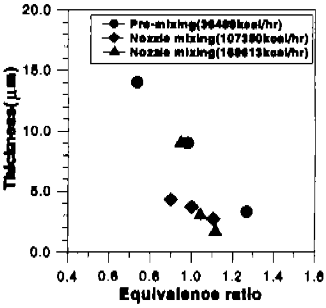


Fig. 16 Variation of the thickness of oxidized layer with equivalence ratio(strip temp. = 750℃).

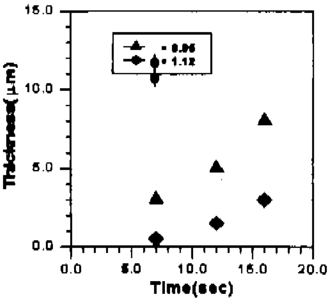


Fig. 17 Variation of the thickness of oxidized layer with resident time(nozzle mixing burner, Q=169613kcal/hr, strip temp.= 500℃~1000℃).

5. 결 론

선회류 속도성분이 주어지는 노즐혼합형 버너의 경우에는 버너와 피가열면 사이에서 넓은 재순환 영역이 형성되며 이로 인하여 피가열면 부근에서 연소가스의 온도저하와 잔류산소의 혼입이 이루어지는 것으로 나타났다. 이에 비해 예혼합형 버너화염은 피가열면에 직접 충돌하는 형태를 보였으며 피가열면에서의 연소가스 온도저하를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 소재의 출구온도를 정해 놓고 버너의 연소량과 소재의 형태에 따라 이송속도를 달리하는 직화로 조업 방식에서는 소재 표면에서의 적정 가스조성의 유지와 함께 연소가스의 온도 상승을 통한 소재의 가열시간 단축이 표면산화를 극소화 할 수 있는 주요 방안인 것으로 판단된다.

6.참고문헌

(1) Otsuka, N. and Otsuka, T., 1993, "鐵の酸化について," 熱處理, Vol .33, No. 2, pp. 124~130.

(2) Otsuka, N. and Otsuka, T., 1993, "鐵の酸化について," 熱處理, Vol. 33, No. 2, pp. 251~255.

(3) 岡本謙三 etc, 1972, 日本鋼管技報, No. 56, pp.63~72.

(4) 이용국,박홍수,조길원,민병현, 1988, "고효율 가스 연소기기 개발," RIST 연구 보고서 8A-027, p. 46.

(5) Katsuki, M., Mizutani, Y., Ogawa, T. and Hatta, K., 1992, "The oxidization behavior of metal surface in a flame," JSME Int. Jr., Series II, Vol. 35, No.1, pp. 110~115.

(6) Milosavljevic, V. D., Taylor, A. M. K. P. and Whitelaw, J. H. ,1990, "The influence of burner geometry and flow rate on the stability and symmetry of swirl-stabilized non-premixed flame," Combustion and flame, Vol. 80, pp. 196~208.

(7) Leuckel, W. and Fricker, N., 1976, "The characteristics of swirl-stabilized natural gas

flame(part 1)," Jr. of the Institute of Fuel, June, pp. 103~112.
(8) 남경먹, 한용운, 1994, "소용돌이 성분이 있는 축대칭 유동의 중심난류 특성," 대한기계학회논문집, 제18권 제10호, pp. 2724~2737.
(9) 廣瀨祐輔, 1983, "Stripの 連續燒鈍技術の進步," 제88, 89回 西山記念技術講座, p. 248.