

열처리로 직화버너에서 연료-공기 혼합에 따른 화염 영향

이철우* · 김영호* · 김인수* · 홍정구**

Flame characteristics of direct fired burner in fuel-air mixing conditions

Cheolwoo Lee*, Youngho Kim*, Insu Kim*, Junggoo Hong**

ABSTRACT

Experiments have been performed for the burners used in the non-oxidizing direct fired furnaces for the cold rolled plate to investigate the effect of fuel/air mixing patterns of the burner nozzle on flame shape, temperature and combustion gas concentration. CFD simulation has also been performed to investigate the mixing state of air-fuel for a nozzle mixing burner and a partially pre-mixing burner. A partially pre-mixing burner showed that flame temperature increased up to 26°C on average compared than that of the nozzle mixing. It also showed that the mixing distance is important at the partially pre-mixing burner. Test results for a partially pre-mixing burner showed that the residual oxygen concentration and the volume ratio of CO/CO₂ of the flame were applicable to be used in field furnaces.

Key Words : Non-oxidizing direct fired, Heat treatment, Nozzle mixing burner, Pre-mixing burner

1. 서론

제철산업의 냉연 공정에서는 일반 냉연강판, 자동차 강판 등을 생산하기 위하여 강제 표면의 산화를 최대한 억제함과 동시에 제품별 요구되는 온도로 강재를 연속적으로 가열하는 열처리 공정이 있다. 이 열처리 공정에서 가열하는 방식은 복사관을 이용한 간접 가열방식과 화염에 의한 직접 가열방식으로 구분한다. 이 중 직접 가열방식은 간접 가열방식에 비해 노의 크기를 1/5 수준까지 축소할 수 있어 가열 에너지 절감과 설비 최소화가 가능하여 경제적인 측면에서는 유리하다.

그러나, 강제 표면의 산화 방지 차원에서는 간접 가열방식에 비해 직접 가열방식에서는 연료 과잉 조건인 당량비(Φ) 1.05 ~ 1.25로 연소시킨 연소가스로 환원 조건을 유지시켜야 하기 때문에 연료 및 연소공기 공급계통의 미세한 제어불량 및 버너 노즐의 열화로 인한 국부적인 산화성 분위기 발생으로 직접적인 제품 불량을 초래하여 막대한 경제적 손실의 원인이 되고 있다.[1][2]

직접 가열방식에서는 일반적으로 예혼합형 버

너와 노즐혼합형 버너의 두 가지 형태를 사용하고 있으며, 예혼합형이 품질확보 측면에서 노즐 혼합형 보다는 유리하나 역화 및 버너 크기가 소형인 관계로 설치 대수가 증가한다는 경제적 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 노즐혼합형 버너와 연료-공기를 버너 내부에서 미리 혼합시킨 부분 예혼합 버너와의 연료-공기 혼합성, 이들 혼합가스와 주위 가스와의 혼합성, 화염온도, 연소가스에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 Fig.1의 버너(a)는 노즐혼합형으로 연료는 중심부에 있는 8개의 연료 분출공(9.5mm)을 통하여 분사되도록 되어 있고, 연소공기는 각도가 45°인 선회유로를 통과하여 최종적으로 15°의 분사각도를 가지는 노즐을 통해 분사된다. 이 때 선회각도 S는 선회유로의 각도 θ 로부터 근사적으로 $S = \tan\theta$ 에 의하여 구할 수 있으며, 본 연구에 사용된 노즐혼합형 버너의 선회각도는 약 1로 강선회형 버너에 속한다.[3] 버너(b)는 버너 내부에서 연료 및 연소공기를 미리 혼합시키는 부분 예혼합 형태로, 분사각도 및 선회각도는 노즐혼합형과 동일하며 선단 노즐은 두 가지 형태 (Dia.8.5mm x 10개, Dia.9.5mm x 8개)로 제작하였다. 한편, 버너 내부의 연료-공기

* 현대제철 기술연구소

** 경북대학교 기계공학부

† 연락저자, kaeru07@hyundai-steel.com

TEL : (041)680-8395 FAX : (041)680-8591

의 혼합 개시부터 분사 노즐 사이의 거리를 조정하여 혼합 거리가 화염에 미치는 영향도 조사하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 연료와 연소공기의 유량은 차압식 유량계를 이용하여 측정하였고 밸브에 설치된 포지셔너에 의해 제어되도록 하였다. 버너의

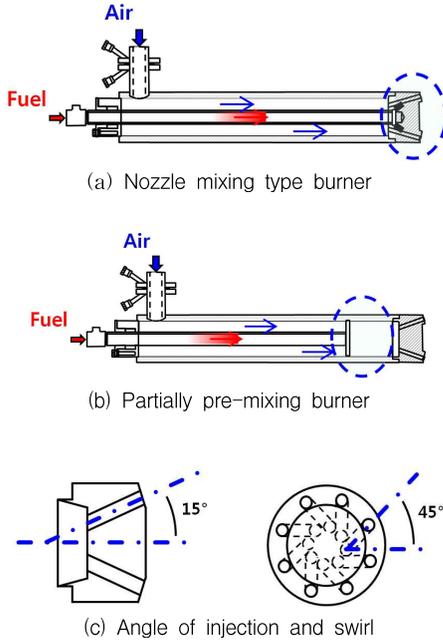


Fig. 1 Schematic diagrams of burners

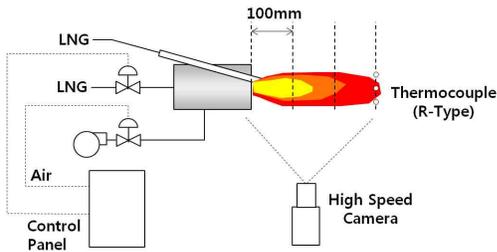


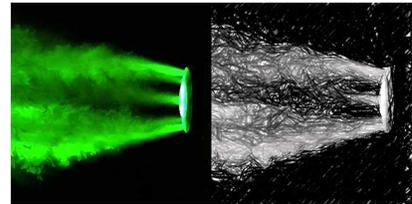
Fig. 2 Schematic diagrams of experimental apparatus

화염형상은 고속카메라 (Photron사 FASTCAM SA3모델, 1/500 프레임)를 이용하여 기록 하였으며, 화염온도는 6(3×2)개의 R-Type 온도센서로 구성된 지그를 버너의 출구로부터 100, 200 그리고 300mm 떨어진 위치로 이동시켜 각각 측정하였다. 화염 내의 O₂, CO, CO₂ 농도 측정은 연소가스 분석기 (Testo사 350K)를 사용하였으며 비연소장에서 레이저 (Optical system사, 532nm, 2 W) 및 스모크 발생기 (Antari사, Z-1500 II)를 이

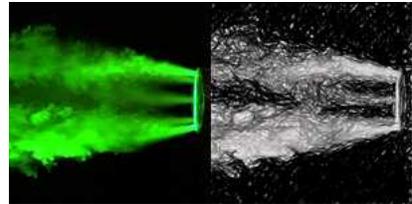
용하여 연료 및 공기의 혼합정도에 대한 가시화 실험도 수행하였다. 또한 버너형태에 따른 혼합 특성을 비교하기 위해 열유동장 해석에 많이 활용되고 있는 상용 코드인 Star-CCM을 이용하여 워크스테이션 컴퓨터 (처리속도 3.33GHz)로 연소장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Table. 1 Test conditions

Mixing type	노즐 형태 Dia.x개수	당량비 Φ	LNG [Nm ³ /h]	혼합거리 [mm]
Nozzle mixing	"a" 9.5 x 8	1.25	6	-
		1.11		
		1.00		
Partially pre-mixing	"b" 9.5 x 8 "c" 8.5 x 10	1.25		80,
		1.11		160,
		1.00		240



(a) Nozzle mixing



(b) Partially pre-mixing ("b" 혼합거리 80)

Fig. 3 Visualized images for non-combustion field

실험 및 시뮬레이션을 위한 조건은 Table. 1에 서 나타난 것과 같이 혼합형태, 당량비, 혼합거리를 변수로 하여 각각에 대한 실험과 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 연소 실험에 앞서 비연소장에서 연료와 공기의 혼합정도를 알아보기 위해 스모크 발생기와 레이저를 이용하여 노즐로부터 이들 혼합기를 분사시켜 고속카메라로 촬영한 화상 및 혼합의 농도를 명암치리한 이미지를 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 (a)의 노즐혼합형 버너가 혼합거리가 80mm일 때의 (b)의 부분예혼합형 버너에 비해 고속카메라로 촬영한 사진에서는 혼합성이 더 양호함을 알 수 있는데 이는 연료-

공기 혼합기를 명암처리한 이미지에서도 동일한 효과가 나타났다. 이는 부분예혼합형 버너라 하더라도 충분한 혼합에 필요한 거리를 확보하지 못한 경우에는 오히려 노즐혼합형 버너에 비해 연료-공기가 혼합이 되지 않은 것을 의미하며 이로 인해 화염내 온도불균일을 야기할 수 있음을 의미한다. 이에 비해 연료-공기 혼합을 촉진하기 위해 Fig.4와 같이 혼합길이를 160mm, 240mm로 한 경우에는 연료-공기의 혼합기가 노즐 전단에서 보다 상대적으로 미리 혼합되기 때문에 균일도는 더 높아지고 특히, 혼합거리가 240mm인 경우에는 기존의 노즐혼합형 버너에 비해 전체적으로 연료-공기의 혼합농도가 우수한 결과를 나타내었다.

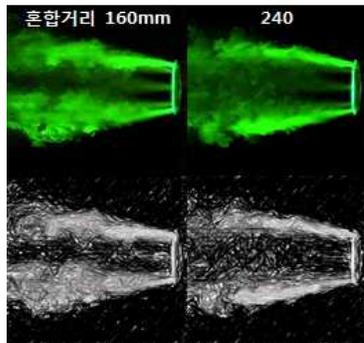


Fig. 4 Comparison of the visualized images for the different mixing distance ("b" nozzle)

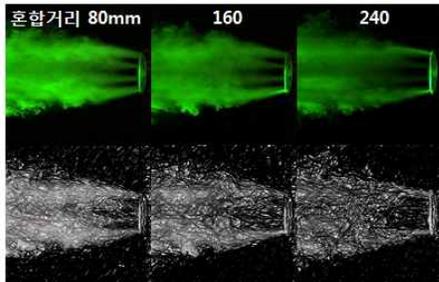


Fig. 5 Comparison of the visualized images for the various mixing distance ("c" nozzle)

한편, 연료-공기의 혼합과 분위기 가스와의 혼합을 더 촉진하기 위하여 노즐구멍 수를 10개로 하고 직경을 8.5mm로 한 "c" 노즐에서 혼합거리 별 사진을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 사진에서 알 수 있듯이 노즐출구 바로 앞에서는 혼합거리에 관계없이 연료-공기의 약간 진한 부분이 남아 있으나 그 이후로는 균일화가 상당히 진행된 것을 알 수 있다. 이는 연료-공기 혼합기의 유속은 같더라도 노즐구멍 수를 늘려서 공간적으로 보다 균일하게 연료-공기가 분출되었고 이로 인해 분위기 가스의 엔트레인먼트가 활발히 진행

되었기 때문에 생긴 결과로 판단된다. 그러나, 이 경우에는 연료-공기 혼합기와 분위기가스와의 혼합은 우수하나 분위기가스가 기연가스여서 화염속으로 베기가스 재순환이 일어나서 화염온도는 오히려 낮아질 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 본 연구에서 실험한 3가지 노즐형태의 연료-공기 혼합거리가 240mm인 경우에 대해 Star-CCM을 이용하여 연소장에서의 화염의 단면별 최고 온도를 나타내었다. "a" 는 노즐혼합형 버너, "b" 는 부분예혼합형 버너의 노즐구멍 수 8개, "c" 는 부분예혼합형의 버너의 노즐구멍 수 10개의 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 z=100mm지점에서의 화염형태를 살펴보면 노즐혼합형 보다는 부분예혼합형 버너가 화염형상이 더 둥글게 나타나고 특히, 노즐구멍수를 10개로 한 부분예혼합형 버너는 화염형상이 거의 원에 가까움을 알 수 있다. 이는 앞에서 서술한 바와 같이 연료-공기 혼합이 보다 더 활발히 진행되었기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

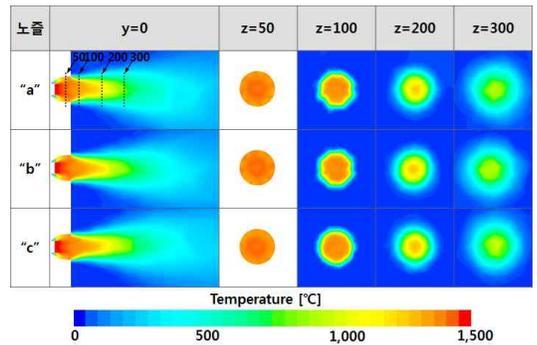


Fig. 6 Comparison of the simulation in combustion ($\Phi=1.11$)

마지막으로 실제조업에서는 강관에 대해 화염온도가 균일하게 전달되어야 제품의 불량발생을 줄일 수 있기 때문에 앞에서 실험한 버너 형태별로 z=300mm 지점에 대해 6개의 측정개소를 선정하여 통상적으로 냉연 조업에서 가장 많이 사용되는 당량비 조건인 $\Phi=1.11$ 에 대해 개방조건인 화염온도를 측정하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig.7에서 나타났듯이 대기 중에서 화염이 부상되는 현상 때문에 #1, #2, #3 위치의 열전대에서 버너형태에 관계 없이 #4, #5, #6 위치 보다 높은 온도를 보였다. 또한, 노즐혼합형 대비 부분예혼합형 버너 "b" 의 경우가 평균 26°C가 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 버너 내부에서 연료와 공기가 미리 혼합된 혼합기가 전체적으로 연소반응을 활발히 일으켜 나타난 현상이라 생각된다. 그러나 부분예혼합형 버너 "c" 의 경우는 화염온도가 오히려 노즐혼합형 버너인 "a" 보다

도 더 낮게 나타났다. 이는 앞에서 서술한 바와 같이 연료-공기의 혼합기와 분위기 가스의 혼합이 급속이 이루어져서 연소가스의 화염내로의 유입으로 인해 화학반응이 오히려 방해되었기 때문으로 판단된다.

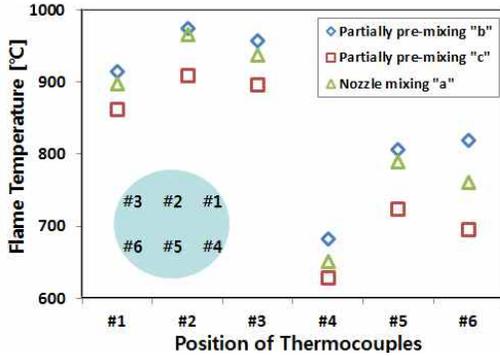


Fig. 7 Comparison of the flame temperature ($\Phi=1.11, z=300$)

한편, 냉연 열처리 공정 중 무산화 직화로에서는 당량비를 일반적으로 1.05 ~ 1.25의 범위로 연료를 연소시킴에 따라 화학평형론적으로는 노내 분위기 가스는 산화성 분위기가 된다. Katsuki 등은 직화가열 방식에 있어서 무산화 가열의 가능성을 확인하기 위하여 메탄을 연료로 한 층류 및 난류화염 내에서 잔존하는 산소의 체적농도가 0.1% 이하일 때 CO/CO₂의 값이 0.4 이하가 되면 강관의 산화막 두께를 10mm이하로 할 수 있음을 밝혔다. [2][4] 이러한 관점에서 본 연구에서는 냉연조업 조건을 모사한 실험로 (가로 1.5m x 세로 1.5m x 높이 1.5m)를 Fig.8과 같이 제작하여 노즐혼합형 버너 "a" 와 비교적 온도가 높았던 부분예혼합 버너 "b" 에 대해 연소 실험 및 연소가스 분석을 실시하고 그 결과를 Table 2.에 나타내었다. Table 2.에서 알 수 있듯이 두 가지



Fig. 8 Schematic of experimental test furnace

혼합형태의 버너에서 선행 연구결과에서의 기준치에 만족하는 결과를 나타내어 부분예혼합 형태

의 버너를 실제 공정에 적용함에 있어 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table.2 Comparison of O₂[%] and CO/CO₂

Type	당량비 Φ	O ₂ [%]	CO/CO ₂
Nozzle mixing	1.25	0.12	0.36
	1.11	0.10	0.28
	1.00	0.01	0.25
Partially pre-mixing	1.25	0.05	0.31
	1.11	0.02	0.25
	1.00	0.01	0.23

또한, 당량비에 따른 O₂ 농도 및 CO/CO₂ 값은 일반적인 연소이론에 부합되는 결과를 나타내었기 때문에 실제 냉연 조업에 본 연구에서 개발한 버너를 적용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

열처리 공정의 직화버너에 대하여 연료-공기 혼합 형태의 변화에 따른 연소특성에 대해 실험 및 시뮬레이션을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부분예혼합형 버너 "b" 가 노즐혼합형 버너 "a" 에 대해 가시화 및 시뮬레이션을 수행한 결과, 일정한 혼합거리만 확보되면 혼합성 및 화염온도가 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 개발한 부분예혼합 버너 "b" 의 CO/CO₂의 값이 0.31이하로 산화막을 크게 형성하지 않고 현장에 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] H.S. Park, K.J. Riu, Effects of Combustion Characteristics of the Burner for Non-Oxidizing Direct Fired Furnaces on the Oxidization of the Surface of Steel Plate, KSME-B 23(3) (1999) 330-341

[2] Katsuki, M, et al., The Oxidation and Reduction Behavior of Metal Surface in a Flame, JSME Int. Jr., Series II, Vol.35, No.1, pp.110~115, 1992

[3] Milosavljevic, V. D, et al., 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, 1990

[4] Trinks, et al., Industrial Furnace, 6th edition, Wiley, 2003