

연료 및 공기의 혼합구조가 로타리 킬른 용 버너 화염에 미치는 영향

김영호* · 이철우* · 김인수* · 임영빈*

Mixed Structure Effect of Fuel and Air on Rotary Kiln Burner Flame

Youngho Kim^{*†}, Cheolwoo Lee^{*}, Insu Kim^{*}, Youngbin Lim^{*}

ABSTRACT

Rotary kiln produces lime from limestone through thermal decomposition. Ring formation in kiln internal wall is known issue that decreases productivity. The cause of ring formation is temperature imbalance as flame leans toward upper wall. Therefore, burner nozzle geometry was changed to improve air-fuel mixing state which leads to prevention of ring formation. CFD simulation and experimental test were performed in this study to investigate the effect of air-fuel mixing on flame structure, temperature and NO_x concentration. It is shown that combustion efficiency has been enhanced and NO_x concentration has been decreased by using swirl flow for secondary combustion air. It's also shown that flame has been straightened by using straight flow for secondary combustion air.

Key Words : Rotaty Kiln, Ring Formation, Stage combustion, CFD

제철소 내 소성공정 중 로타리 킬른은 석회석(CaCO₃)을 고온으로 가열하여 약 1,000~1,200℃의 온도에서 열분해하여 생석회(CaO)를 생성한다. 이 과정에서 화염의 상승 편향으로 직접적인 영향을 받는 노 상부 벽면에 국부적인 고온영역이 발생하게 된다. 일반적으로, 생석회의 용점은 2,570℃로 소성로의 정상적인 노온에서는 용융이 발생하기 어려우나, 노 상부벽면의 국부적인 고온영역에서는 SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃와 같은 불순물과 혼합되어 있는 경우 용융이 발생할 수 있다. 이렇게 불순물과 용융된 생석회는 로타리 킬른의 회전으로 상대적 저온영역인 노 하부에서 냉각이 일어나서 노벽에 고착된다. 로타리 킬른의 회전은 약 분당 1회전의 속도로 지속되므로 부착물은 용융-고착의 반복을 통해 환형으로 성장하게 된다. 이 부착물은 석회석과 생석회의 흐름을 방해하여 생산성을 감소시키는 문제를 야기시킬뿐만 아니라 로타리 킬른에 투입되는 에너지 원단위를 증가시키는 원인이 된다.

이러한 문제는 로타리 킬른을 사용하는 제철소 소성공정 및 시멘트 공장의 일반적으로 알려진 문제로서, 화염의 상승 편향을 원인으로 볼 수

있다. 화염의 상승은 중력에 의한 밀도 차로 발생하는 것으로 본질적인 제어는 불가능하나, 화염 패턴을 개선하면 노 내의 불균일한 온도 분포를 개선시켜 부착물을 감소시킬 수 있는 여지가 있다. 따라서 본 연구에서는 1차 공기와 2차 공기의 유로 및 선회각도를 변경하여 연료와 공기의 혼합을 개선시킴으로써 화염의 직진성 및 노온의 불균일에 관한 영향을 조사하고자 한다. 또한, 연료와 공기의 혼합구조가 대기오염물질인 NO_x의 발생에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치를 나타내었다. 2.4x2.4x7.6[m] 크기의 실험로에 설치된 버너에 연료와 연소공기를 공급하여 연소 실험을 수행하였다. 실제 로타리 킬른의 기울기를 반영하여 설치된 R-type 열전대를 통해 노 상부 온도를 측정하였으며, 노 출구에서의 배가스 분석은 Fuji ZKJ-3 배기가스 분석기를 이용하여 O₂, CO, NO_x의 농도를 측정하였다.

한편, 본 연구에서는 버너 노즐의 성능 평가를 위해 연소 실험과 함께 전산유동해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 병행하였다. 시뮬레이션은 상용 열유동해석 프로그램인 Star-CCM+ 7.06으로 3.33GHz x 6CPU의 병렬 연산으로 수행되었다. 연소 실험조건을 동일하게 로타리 킬른 형상으로 모델링 된 계산 영역에 적용하여, 연속방정식, 모멘텀 방정식, 에너지

* 현대제철 기술연구소

† 연락처, youngho.kim@hyundai-steel.com

TEL : (041)680-8406 FAX : (041)-680-8591

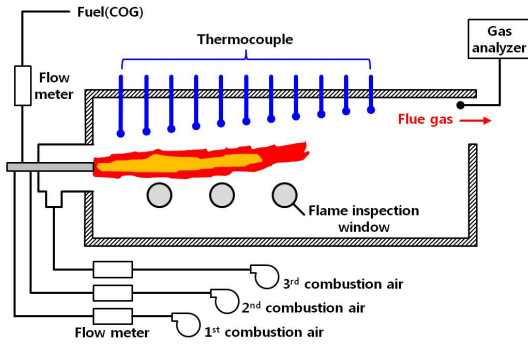
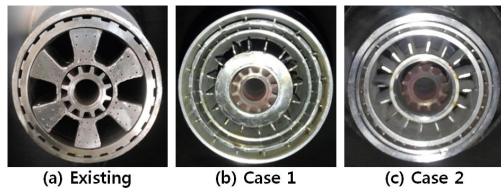
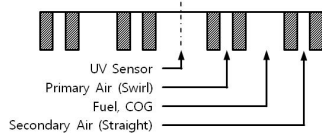


Fig. 1 Schematic diagram of burner test furnace



(a) Existing (b) Case 1 (c) Case 2

- Existing



- Case 1, 2

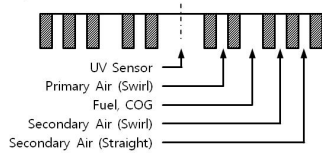


Fig. 2 Test nozzle

방정식을 계산하였으며, 난류모델은 K-ε 모델을 사용하였다. 연소 모델은 EBU(Eddy Break-up) 모델, 복사모델은 Participating Media Radiation을 사용하여 킬른 내 노온 분포 결과의 신뢰도를 높였다. 또한, 실험 및 해석에 사용한 연료는 제철소 부생가스인 COG(Coke Oven Gas)로 공기비는 1.1로 설정하였다.

한편, 현재 사용되고 있는 버너 노즐은 Fig. 2의 (a)와 같이 노즐 중심부터 선회 1차 공기(Primary air), 연료(COG), 직진 2차 공기(Secondary air) 순으로 배열되어 선회 1차 공기와 연료가 주 연소 반응을 일으키고 2차 공기가 유입되어 화염을 냉각시킴으로써 NO_x의 발생을 감소시키는 다단 연소 방식을 택하고 있다. 그러나, 실제 소성 공정에서는 노즐에서 분사되는 1, 2차 연소 공기 외에 고온의 생석회를 냉각시키고 소성대로 유입되어 연소 반응에 참여하는 3차

Table 1 Nozzle swirl information

Swirl Number	Existing	Case 1	Case 2
Primary Air	0.47	0.47	0.29
Secondary Air	No Swirl	0.26	0.26

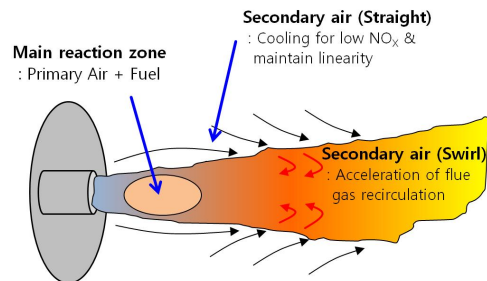


Fig. 3 Concept image of improved flame structure

공기가 존재하기 때문에, 실제 실험 및 해석에서도 3차 공기를 반영하여 수행하였다. 본 연구에서는 Fig. 2의 Case 1에 나타난 바와 같이 기존 버너 노즐에서 연료와 연소공기의 혼합을 개선하기 위해 2차 공기를 선회공기와 직진공기로 분리하였다. 연료에 인접한 노즐에 선회력을 주고 최외곽 노즐에 직진노즐을 배치하여 선회 2차 공기는 1차 공기와 연료의 주 연소 영역 이후에 연소가스의 재순환을 촉진하고 직진 2차 공기는 화염의 직진성 향상에 기여하여 화염의 상승을 억제하도록 하였다. Case 2 노즐은 Case 1 노즐의 실험결과를 바탕으로 화염의 안정성을 개선하기 위해 1차 선회공기의 선회력을 감소시키고 직진성을 극대화하기 위해 2차 직진 공기의 토출 속도를 Case 1 대비 50% 상승시켰다. 노즐의 선회 강도는 Table 1에, 개선 노즐의 화염 구조에 대한 개념도는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1에서 선회 강도는 식 (1)과 같이 점선방향 운동량(G_ϕ)과 축방향의 운동량(G)으로 표현되거나 선회기의 내경 (R_h), 외경(R)과 날개각도(α)로 표현되는 식 (2)로 정의하였다[7].

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (1)$$

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (R_h/R)^2}{1 - (R_h/R)^2} \right] \tan \alpha \quad (2)$$

전산유동해석을 통해 연소에 의한 온도 분포를 예측한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Case 1 (Fig. 4 (b))은 기존 노즐(Fig. 4 (a)) 대비 연료와 1차

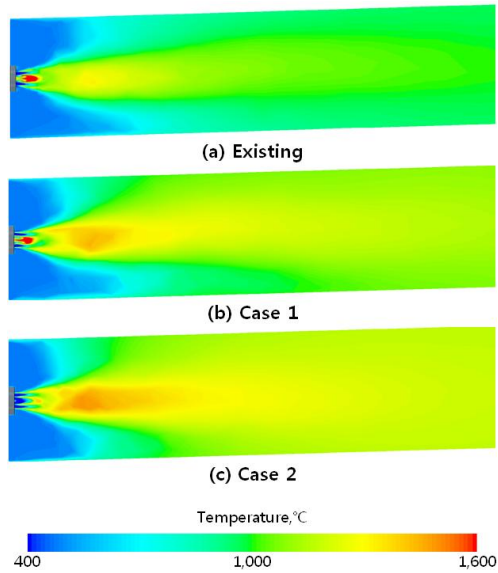


Fig. 4 Temperature contour calculated by CFD

공기가 반응하는 토출부 근처의 주 연소영역의 고온 범위가 축소된 것을 확인할 수 있다. 이는 연소 반응에서 생성되는 NO_x 중 대부분을 차지하는 화염의 고온영역에서 기인한 Thermal NO의 감소가 가능하다는 것을 의미한다. 또한 화염 후류 및 킬른 내 온도가 기존 노즐 대비 상승한 것을 확인할 수 있는데, 이는 선회력을 가진 2차 공기가 연료와 공기의 혼합을 향상시켜 화염 내 전반적인 연소 효율이 상승했기 때문이라고 판단된다. 노내 온도는 전반적으로 증가하였다 하더라도 앞에서 서술한 바와 같이 국소적인 고온이 줄어들었기 때문에 1,500K 이상의 온도에서 지수함수로 증가하는 Thermal NO가 급격히 감소할 것으로 기대된다. 이러한 Case 1의 해석 결과는 실험room에서의 연소실험 결과와 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에 기존 노즐과 Case 1 및 Case 2의 화염 사진을 나타낸다. 기존 노즐의 경우 주 연소 영역에서의 화염의 휘도가 높고, 후류로 갈수록 황염의 증가가 미미하나, Case 1의 화염은 주 연소영역보다 후류로 가면서 황염 및 화염의 휘도가 증가되는 양상을 보인다. 특히 토출부 근처에서의 화염의 토출방향이 기존화염 보다 확산이 적고 직진성이 우수함을 알 수 있다. 그러나, Case 1의 경우 점화 후 실험 조건 유량을 제어하는 구간에서 Fig. 6에서처럼 간헐적인 화염 부상이 발생하였다. 이 화염 부상은 1차 공기의 선회력이 강해 선회/직진 2차 공기의 토출속도를 가속시켜 발생하는 유동의 불안정이 원인으로 판단된다. 따라서 유동 불안정에 의한 화염 부상을 개선시키기

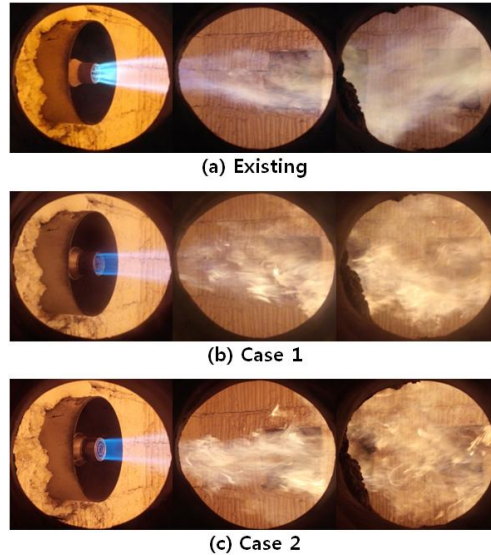


Fig. 5 Flame images in a test furnace

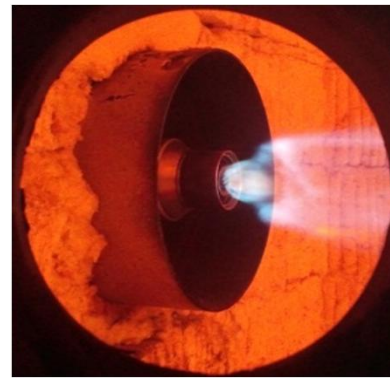


Fig. 6 Flame instability of Case 1 nozzle

위해 Case 2는 Case 1 대비 1차 공기의 선회력을 약 40% 감소시키고, 추가적인 화염의 직진성 개선을 위해 직진 2차 공기의 토출 속도를 50% 상승시켰다.

Case 2의 해석 결과인 Fig. 4 (c)를 보면 Case 1에 비해 노즐 근처의 주 연소영역의 온도가 낮아진 것을 확인할 수 있다. 이는 추가적인 NO_x 저감 가능성을 의미하며, 본 연구에서 해석을 수행한 3 Case 중에 가장 노온이 높고 균일하여 연소 상태가 우수하다고 판단된다. Fig. 5 (c)의 실제 연소 화염을 보면 Case 1의 결과인 Fig. 5 (b)의 결과와 매우 유사한 패턴의 화염을 확인할 수 있다. 노즐 근처의 화염 직진성은 Case 1과 유사하며 버너로부터 약 1.5m 거리 이후로 미세하게 황염이 증가되었음을 알 수 있다.

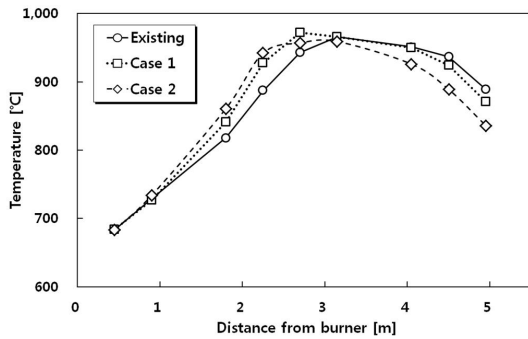


Fig. 7 Temperature distribution on kiln upper wall

Table 2 NO_x emission and kiln upper wall maximum temperature

Nozzle	NO _x [ppm]	Max. Temp. [°C]
Existing	70	966
Case 1	63	972
Case 2	58	959

노 상부 열전대로부터 측정된 온도 분포를 Fig. 7에, 노 상부 최고온도와 배기가스 중 NO_x 농도를 Table 2에 각각 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 화염 내 고온영역의 감소에 따라 Case 2가 기존 노즐 대비 약 17% 감소된 가장 낮은 NO_x 농도를 나타내었다. 버너로부터의 거리가 3m이내의 영역에서는 Case 2가 가장 온도가 높고, 기존 버너가 가장 낮는데, 이는 Case 2가 화염을 통한 복사 열전달이 가장 우수하다는 의미이며 반면에 최고 온도가 가장 낮은 것은 화염의 직진성이 개선되어 노 상부로 화염이 상승되지 않았기 때문이라고 판단된다.

노 상부 최고 온도가 낮아졌다는 것은 킬른 내에 생석회와 불순물들과 반응하여 용융이 일어날 가능성이 낮아졌다는 것을 의미하는 것으로서 실제 킬른에 Case 2 버너를 적용할 경우 생산성 향상 및 에너지 원단위 절감이 기대된다.

로타리 킬른 용 버너에 대해 화염 상승을 방지할 목적으로 노즐을 변경하여 연료와 공기의 혼합 구조를 향상시켜 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다단연소 버너에서 주 연소반응을 위한 연료와 연소공기 노즐 이외에 선회력을 갖는 2차 연소 공기 노즐을 외곽에 배치함으로써 화염 내 연소가스의 재순환을 촉진하고 혼합성을 향상시켜 연소 효율을 개선할 수 있었다.
- 2) 직진 2차 공기의 도입을 통해 화염 상승을 방지할 수 있었다.

3) 선회/직진 2차 공기 노즐을 통해 형성된 연료와 공기의 혼합 구조는 화염 내 고온 영역을 축소시켜 NO_x발생을 17% 저감시키는 효과를 얻었다.

참고 문헌

- [1] Kurt E. Peray, "The Rotary Cement Kiln, 2nd Edition", Chemical Publishing, 1986
- [2] A. A. Boateng, "Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes", Elsevier, 2008
- [3] Abdelmonem H. Alyaser, "Fluid Flow and Combustion in Rotary Kilns", The University of British Columbia, 1998
- [4] T. P. Bhad, S. Sarker, A. Kaushik, S. V. Herwadkar, "CFD Modeling of a Cement Kiln with Multi Channel Burner for Optimization of Flame Profile", 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 2009, pp. 1-7.
- [5] M. Pisaroni, "Counteracting Ring Formation in Rotary Kilns", Star Global Conference, 2012
- [6] M. Pisaroni, "Optimal Combustion to Counteract Ring Formation in Rotary Kilns", Delft Univ. of Technology, 2012
- [7] Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., "Swirl Flows," Abacus Press, Tuhbridge Wells, England, 1984