

Rotary Kiln식석회소성로에서의분코크스연소기술

김장규* · 조한창* · 김영우**

Development of Coke Breeze Combustion Technology in the Calcining Rotary Kiln

J. G. Kim, H. C. Cho, and Y. W. Kim

ABSTRACT

A dust injection system was developed for the lime calcining rotary kiln for the coke dust from the coke dry quenching(CDQ) facility to be used as a fuel. The CDQ dust was injected with the gaseous fuel through the hole in the burner. In order to prevent the spot heating large particles should be removed from dust and dust should be injected as fast as possible so that particle combustion lasts as long as possible without precipitation. This is especially necessary when dust is burned together with gaseous fuel because the gaseous fuel can not go so far and in addition dust combustion aggravates hot spot heating. In this research a rotation drum screen was used to remove particles with diameter larger than 4mm and dust injection speed was 40m/sec. And the burner was adjusted not to use swirl that hinders flame go far away. With these measures scale generation inside the kiln could be reduced to be negligible and in addition NOx emission could be reduced from 150ppm to 20ppm. The fuel reduction was about 85Mcal/T-lime.

Key Words : Rotary Kiln, CDQ, coke breeze, COG, calcine

기 호 설 명

약어

CDQ : coke dry quenching

COG : coke oven gas

기호

d_p : particle diameter

r : 공기비

t : time[s]

* 포항산업과학연구원 환경에너지연구센터

† kimjg@rist.re.kr

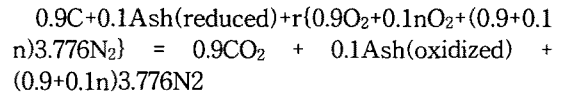
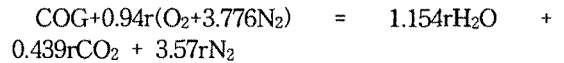
** 포항산업과학연구원 부품신소재연구센터

1. 서론

석회석 소성 반응에 의해 생성된 생석회는 소결 공정에서는 조립용 binder로, 제강 공정에서는 슬래그 조재제로 사용되는 주요 부원료 중의 하나이다. Rotary kiln에서는 10-40 mm 입도의 원석(CaCO₃)을 원료로 사용하며, 회전체 내에서 COG(Coke Oven Gas) 연소열을 이용하여 1000-1200℃의 분위기 온도에서 소성된다. 소성된 생석회는 별도의 냉각기내에서 흡입된 공기에 의하여 100℃ 이하로 냉각되어 제품으로 배출된다. 냉각에 필요한 2차 공기의 양은 생산속도 및 대기 온도에 따라 차이가 있으나, 약 12000-18000 Nm³/h의 공기가 kiln 내로 흡입된다. 흡입된 공기는 냉각기내에서는 생석회를 냉각시키는 역할을 하지만 kiln내부에서는 COG의 연소 공기로 사용된다. 즉 COG 연소를 위해 공연비를 일정하게 유지하는 조건에서 계절적 요인이나 생산성 증가에 따라 냉각공기의 흡입량이 증가할 경우 COG 사용량도 증가해야 하는 단점이 있으며, 또한 배가스 배출장치인 IDF(Induced Draft Fan) 용량을 무한정 증가시킬 수 없으므로 kiln 내부에 압력 조절에도 문제가 발생할 수 있다.[1] Fig. 1에 나타낸 바와 같이 코크스 공장 건식소화설비(coke dry quenching, CDQ) dust를 취입하는 장치를 설치하여 조업하고 있으며 이로 인한 연료의 효율 향상 및 공해물질 저감 등의 효과를 보고 있다. 이와 같은 설비의 구성에서 문제점은 dust로 인한 곡관부의 마모이며 이를 방지하기 위해서는 곡관부를 최소한의 개수로 구성하여야 한다.

2. 연소제어

rotary kiln reactor의 제원은 다음과 같다. 킬른 직경 3.6m, 길이 40m 이고 코크스 가스(coke oven gas, COG) 사용량 3200Nm³/h (14Gcal/h), 공기 사용량 15000Nm³/hr(200mmAq) 이며 500-600oC로 예열 공급 한다. COG 발열량은 4400kcal/Nm³ 로 가정했으며 CDQ dust 발열량은 7100kcal/kg로 가정하여 항상 전체 필요발열량이 유지되도록 COG와 dust의 양을 결정하게 된다. CDQ dust 를 취입하면서 COG의 일부를 대체하기 때문에 공기사용량의 계산이 달라지게 된다. 공기사용량에 사용된 반응식은 다음과 같다. 여기서 회분의 산화반응을 고려한 이유는 코크스가 제조될 때 환원 분위기에서 제조되기 때문에 모든 회분은 환원된 상태로 존재한다고 가정했기 때문이다.



여기서 r은 공기비이며 CDG dust는 90% 탄소, 10% 회분으로 이루어진 것으로 보았다. 위의 화학 반응식과 회분의 조성으로부터 공기 필요량을 계산할 수 있게 된다. 회분의 조성은 대략적으로 다음과 같다: SiO₂ 46.56%, Al₂O₃ 27.75%, Fe₂O₃ 13.71%, CaO 3.36%, MgO 0.033%, Na₂O 1.44%, K₂O 1.65%. 이를 참고로 CDQ dust 연소

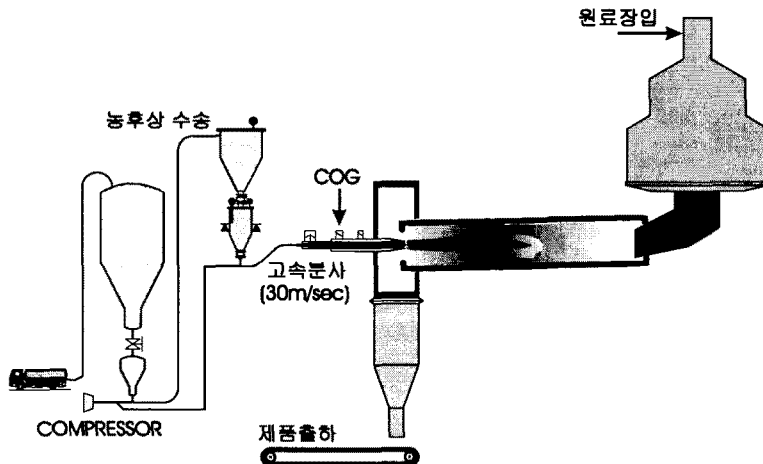


Fig. 1 Rotary Kiln CDQ dust 취입 시스템

시 필요한 공기량은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{총 공기량(CDQ dust kg 당)} = 1.785r(O_2 + 3.776N_2)(Nm^3) = 1.785 \times 4.776r$$

누풍발생개소는 냉각대와 킬른과의 연결부위 예열대와 킬른과의 연결부위 장입구 등이며 대부분의 누풍이 예열대와 킬른과의 연결부위 및 장입구에서 주로 일어난다고 보고 킬른출구의 산소 및 일산화탄소의 함량과 배기 duct의 산소 및 일산화탄소 함량을 비교하여 누풍량을 계산하였다. 1) 킬른 출구: O₂ 0.3%, CO 16000ppm, 2) 배기 duct: O₂ 4%, CO 0ppm, 3) 생산량: 350T/d, 4) 공기비: 0.85 인 조건에서 계산된 누풍량은 3500Nm³/h이었다.

CDQ dust 를 COG와 혼합 연소시키면서 발생하는 문제점으로는 로의 하단부 온도가 약 100℃ 정도 상승하는 것과 그에 따른 회분의 용융으로 로벽에 scale이 부착하는 현상이 발생하는 것이었다. 부착된 scale 을 분석한 결과 Ca 54.78%, Al 0.4%, Si 1.09%, Fe 5.59%, C 0.006%, S 0.004% 이었고 두드러진 것은 회분에 때문에 기인한 철분이 높게 나타난다는 것이었다. 또한 XRD 분석결과는 Fe 가 이차상으로 2CaOFe₂O₃의 화합물의 형태로 포함되어 있다는 것이다. 이와 같은 형태의 화합물은 용융점이 1200oC 정도 밖에 되지 않기 때문에 kiln 내부에서 쉽게 용융되어 scale 발생의 주원인으로 작용하게 된다. 그러므로 dust 로부터 철분을 제거하여 주는 것이 필요한데 CDQ dust 중에는 분석결과 철분이 1% 가량 포함되어 있고 자석을 이용하여 철분을 제거한 결과 0.5% 까지 감소 시킬 수 있었다. 킬른 하부의 온도가 높게 나타나는 이유로는 무거운 입자가 멀리 날아가지 못하고 침강되어 킬른 하부쪽으로 내려오면서 연소하기 때문이며 이를 방지하기 위하여는 입자 크기별 또는 분사속도별 입자의 비산 가능거리를 알 필요가 있는데 그 계산은 다음과 같이 수행하였다. 입자의 진행속도는 입자의 운동에너지와 stokes 저항을 고려하여 계산하였으며 입자의 침강속도는 입자의 비중과 stokes 저항을 고려하여 계산하였다. 여기서 사용된 입자의 비중은 1000kg/m³ 이었고 킬른 내부의 가스 비중은 0.236kg/m³ 이었으며 점도는 0.00004kg/ms 이었다. 입자가 연소되면서 직경이 감소되는 속도는 연소반응 속도를 고려하여 다음과 같은 연산식을 사용하였다.

$$d_p = d_{p0} \exp(-0.3t)$$

계산결과는 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 보면 입자크기가 240m 이상이 되면 비산거리가 20m 미만이 되어 kiln 내부의 일정 부위에 연료

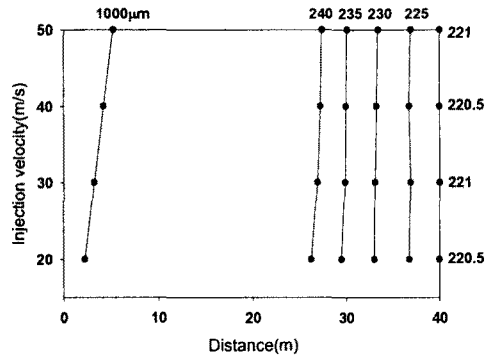


Fig. 2 입자 비산거리 계산 결과

가 집중될 가능성을 보인다. 이것은 석회석이 흘러 내려오면서 멀리 날아가지 못한 입자들을 같이 동반하여 내려게되고 입자들은 내려오면서 동시에 연소가 일어나기 때문에 kiln 하부쪽으로 열이 집중될 위험성이 있기 때문이다. 또한 큰 입자일수록 분사속도가 빨라지는 것에 거의 비례하여 멀리 날아가기 때문에 가능한 분사속도를 높이는 것이 유리하다.[2]

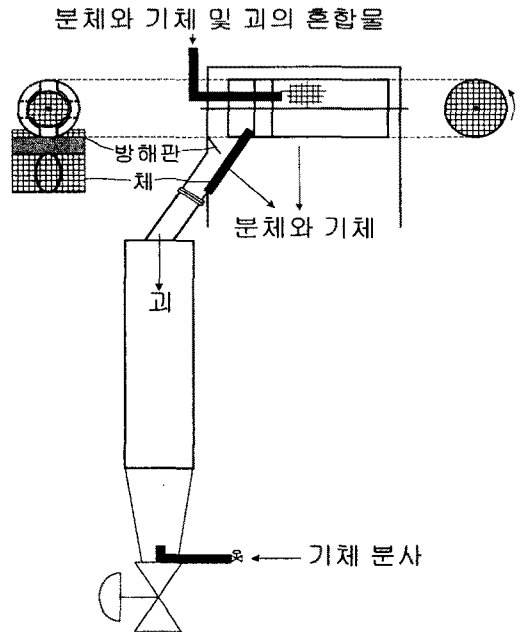


Fig. 3 원통 회전형 스크린

Scale 생성을 방지하는 가장 기본적인 기술은 kiln 내부의 온도를 가능한 균일하면서도 낮

게 유지하는 것이며 이를 위해서는 dust 분사속도와 큰 입자를 걸러내어 입자의 연소가 로 전체에서 균일하게 이루어지도록 하는 것이 해결 방안이 될 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 기술의 실현을 위해서 원통 회전형 연속식 스크린을 이용하여 CDQ dust 중의 큰 입자를 걸러내었다. 원통 회전형 스크린의 구조는 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다. 또한 dust 입자의 분산을 줄이고 멀리까지 분사될 수 있도록 버너의 공기 주입 방식을 개선하였다. Fig 4 에는 석회소성로(Rotary Kiln)에 사용된 버너의 구조를 나타낸다. 버너의 중심부에 dust 취입 노즐을 부착하고 CDQ dust를 취입하도록 설계하였으며 바로 바깥에는 swirl 있는 공기(1차공기라 부르기로 한다.) 그 바깥에는 swirl 이 없는 공기(2차공기라 부르기로 한다.) 그 바깥에는 연료가 통과하고 제일 바깥 쪽으로는 3차 공기가 주입되도록 되어있다. swirl 의 각도는 45° 이상으로 swirl 강도가 매우 높도록 설계되어 있다. 1차 및 2차공기 주입구의 단면적은 각각 0.0024m² 씩으로 추산되며 연료주입구의 단면적은 0.027m² 로 추산된다. 3차공기 주입구는 단면적이 0.003m² 정도로 추산된다 공기 유량 및 연료유량으로부터 유속을 계산해보면 연료 유속은 30m/sec, 1차 및 2차 공기유속은 48m/sec, 3차 공기유속은 40m/sec 정도이다.

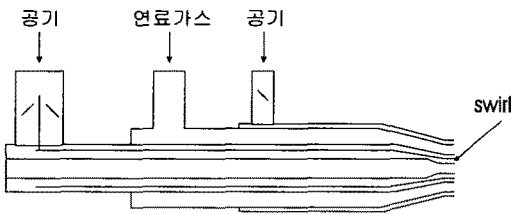


Fig. 4 기존의 버너구조

이와 같은 형태의 버너에서 분체를 중심부에 분사시켜 연소시킬 때의 문제점은 swirl 을 통과하여 나가는 공기는 dust 의 흐름에 강한 회전력을 주어 dust 화염을 짧게 만드는 효과를 가지기

때문에 이로 인한 국부적인 온도상승을 촉진시켜 scale 생성 및 로효율을 떨어뜨리는 효과를 가지는 것으로 보인다. 이와 같은 단점을 개선하기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 공기량을 하향 조정하여 swirl 쪽의 공기를 차단함으로써 dust 흐름이 방해받지 않도록 하였고 dust 분사속도 증대를 실시하였다. 처음 설치할 당시에는 착화의 문제점이 있을 것으로 예상하여 COG 유속과 거의 비슷하게 dust 분사속도를 30m/sec 정도로 설계하였으나 개선 후에는 dust 분사속도를 40m/sec로 하여 더 멀리 뻗어나갈 수 있게 하였다. 이렇게 함으로써 kiln 하부의 국부적 가열을 해소시킬 수 있었다.

3. 적용결과 및 고찰

Table 1 에는 CDQ dust 취입 전후의 몇 가지 지수 변화를 측정한 결과를 나타내었다. 여기서 보면 NOx 발생량은 현저히 감소한 것을 알 수 있고 CO 나 SOx는 약간씩 증가한 것을 알 수 있다. 연료 사용량은 감소하고 생석회 품질은 좋아지는 현상을 보여준다.

코크스 입자의 연소시에는 복사열의 발생으로 인한 로전체의 균일 가열이 예상된다. 또한 입자 자체의 무게 때문에 로 하부로 이동하는 석회석에 더 많은 열을 줄 수가 있어서 열 효율을 더욱 상승시키는 역할을 할 것으로 기대된다. 복사열의 발생 이외에도 입자 연소시에는 연소 특성상 입자 내부까지 산소가 쉽게 침투하지 못하기 때문에 입자 내부에서의 연소는 환원분위기 하에서 이루어지며 이 때문에 입자에 포함되어 있는 질소나 황은 산화되지 못하고 그대로 원소의 형태로 남아서 연료에 의해서 발생하는 NOx 나 SOx 를 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 입자연소의 개념도는 Fig. 6과 같이 모식적으로 나타낼 수 있다.

연료의 질소 함량은 COG 0.045mg/kcal, CDQ dust 1.4mg/kcal로서 질소 함량은 CDQ

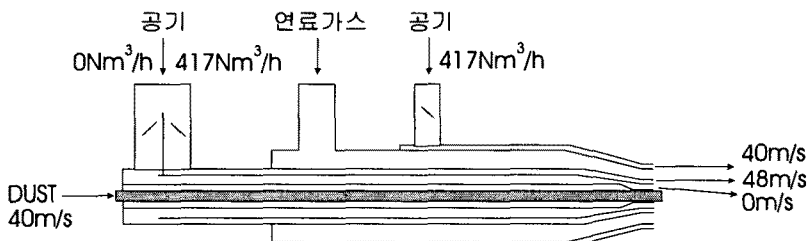


Fig. 5 CDQ dust 연소시 버너 운전

Table 1 CDQ dust 취입 효과

항 목	COG	COG+Dust
연료원단위(Mcal/T)	1,250	1165
생석회 CaO(%)	94	96
배가스중 O2 (%)	5.4	3.4
CO (ppm)	0	10
NOx (ppm)	155	10
SOx (ppm)	50	83

dust 가 30배 가량 높다. 그러나 입자 연소시 산소 부족상태에서 연소되며 입자가 CO로 가스화된 후에 산소와 만나 완전 연소되기 때문에 fuel NOx의 발생은 거의 없다고 볼 수 있다. Thermal NOx 의 경우에도 CDQ dust 를 연소시키면서 화염의 범위가 넓어지기 때문에 국부적인 온도 상승은 더 작고 또한 배가스의 온도도 낮기 때문에 고온 범위도 COG 전소할 경우보다 작아서 NOx 발생이 더 적어지는 것으로 해석된다. 그러나 CDQ dust 에 황 성분이 더 많이 포함되어 있고 이 것은 모두 SOx로 전환된다고 볼 수 있기 때문에 SOx는 증가하게 된다.

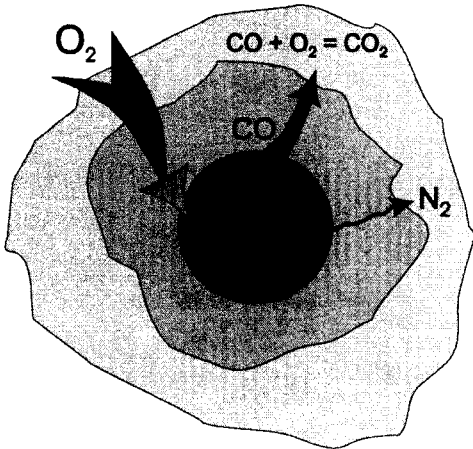


Fig. 5 입자 연소의 개념도

4. 결론

입자 비산 거리를 감안하여 큰 입자를 걸러내고 분사속도를 높임과 동시에 swirl 을 차단함으로써 kiln 내부의 국부적인 가열을 방지할 수 있었고 그에 따라 전체적인 열손실 감소 및 NOx 발생을 저감할 수 있었다. 입자가 주로 연소되는 지점을 COG 의 연소가 끝나는 점으로 맞출 때 화염을 kiln 길이 방향으로 균일하게 분

포시킬 수 있기 때문에 COG 화염 내에서는 입자의 연소를 최대한 억제할 필요성이 있으며 이를 위해 COG 버너와 분리하여 dust 만 단독으로 취입하는 방안이 더 효율적일 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) S.H. Lee, W.W. Huh : POSCO Teschnical Report, 1998P703(1998)
- 2) J.G. Kim, Y.K. Lee : RISTTeschnical Report, 2002A335(2003)