

다단연소 기술 적용 전후 시멘트 소성설비의 NOx 배출 사례 연구

Case Study on NOx Emissions from Cement Kiln before and after Applying Multi-stage Combustion Technology

최재원^{1*} · 백주익¹ · 김장중¹ · 원필성²

Jae-Won Choi^{1*} · Ju-Ik Back¹ · Jang-Jung Kim¹ · Phil-Sung Won²

(Received September 11, 2023 / Revised September 14, 2023 / Accepted September 14, 2023)

The cement industry has been contributing to solve the wastes problem by using various combustible wastes as alternative fuel to replace natural coal. To use more alternative fuels such as waste plastics, in the cement manufacturing process, it is necessary to stably burn alternative fuels and reduce air emissions such as NOx. This study is a case study on the multi-stage combustion calciner process, which is a technology that decreases the amount of NOx while increasing the use of alternative fuels. This study is a case study on the multi-stage combustion process, a technology that reduces the amount of harmful air emissions such as NOx while increasing the use of alternative fuels. Along results of comparing before and after applying the technology to actual cement manufacturing facilities, the amount of coal consumption decreased by 38 %, waste plastics consumption increased by 122 %, and NOx emissions decreased by 17 %. Results show that increasing the use of alternative fuels and reducing NOx emissions by multi-stage combustion is effective.

키워드 : 시멘트 제조공정, 다단연소, 폐합성수지, 대체연료, 대기배출물질

Keywords : Cement manufacturing, Multi-stage combustion, Waste plastics, Alternative fuel, Air pollutants emission

1. 서론

시멘트 산업은 다양한 생활 및 산업에서 발생한 폐비닐류, 폐플라스틱류, 폐고무류 등 가연성 폐기물을 천연 화석연료인 유연탄을 대체하는 대체연료로 활용함으로써 폐기물 처리 문제 해결과 동시에 자원순환을 통한 지구 환경 보전에 기여하고 있다. 특히 코로나19 이후로 생활폐기물의 발생량이 크게 증가하면서(Yoon et al. 2021; Kim and Jung 2023) 시멘트 제조공정에서의 대체연료 사용을 증대할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있는 상황이다.

하지만 이와 동시에 시멘트 산업에서의 폐기물 재활용에 따라 시멘트의 품질 혹은 안전상 문제를 유발하거나, NOx 등 대기 오염 물질을 배출할 수 있다는 우려도 커지고 있다. 최근에는 탄소중립 기술 개발이 시급한 이유로 부각되면서 폐기물의 대체연료의 중요성이 더욱 증가함에 따라, 대체연료 사용량을 증가시키면서도 동시에 오염물질 배출을 저감할 수 있는 다양한 기술의 연구개발이

시도되고 있다(Choi et al. 2020). 본 연구에서는 대체연료 사용을 증가시키면서 대기배출 오염물질을 저감하는 기술 중 하나인 다단연소형 calciner 기술의 실증화 사례 연구로서, 기존 시멘트 소성설비에 다단연소형 Calciner 기술을 적용하여 기술 적용 전후 연료사용량과 NOx 배출농도를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 대기배출가스중 유해물질 생성 메커니즘

시멘트 소성공정은 연료를 고온으로 연소시키는 공정으로 공정의 설계사양, 연료의 품질 등에 따라 연료가 연소되는 과정에서 여러 유해물질이 생성될 가능성이 있지만, 그중에서도 NOx는 가장 대표적인 유해물질로 여겨지고 있다(Walter et al. 2004).

연소 공정에서 NOx는 연소공기로 유입된 N₂ 분자가 고온에서 산화되어 발생하는 Thermal NOx(Zel'dovich 1946)와 연료로부터

* Corresponding author E-mail: cjw@asiacement.co.kr

¹아세아시멘트 기술연구소 선임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Chungbook, 27125, Korea)

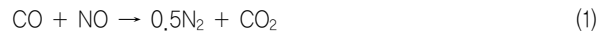
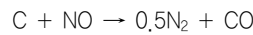
²아세아시멘트 기술연구소 책임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Chungbook, 27125, Korea)

유입된 질소화합물로부터 유래하는 Fuel NOx(Beychok 1973)로 구분된다. 시멘트 제조과정에서는 Thermal NOx와 Fuel NOx 외에도 시멘트 원료로부터 유입된 질소화합물에 의한 Feed NOx, 고온의 화염 주변에서 발생하는 prompt NOx도 발생할 수는 있으나, 이들의 기여도가 상대적으로 매우 작고(Gartner 1983), 시멘트 제조과정 특성상 Thermal NOx의 비율이 Fuel NOx보다 높다고 여겨진다(Shreve and Brink 1977; Hilovsky 1977).

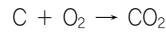
한편, CO는 불완전연소에 의해 생성되는 배출물질로서, 연료에 함유된 유기 및 무기 탄소(C)의 연소 과정에서 충분한 산소와 결합하지 못함으로써 발생한다. 산소가 충분히 공급된 완전연소 환경에서는 CO 대신 CO₂가 생성된다. CO₂는 연료의 연소에 인해서도 발생되지만, 원료로 사용된 석회석(CaCO₃)의 탈탄산 반응(CaCO₃ → CaO+CO₂)에 의해서도 발생한다. 하지만 탈탄산 반응에서는 CO가 발생하지 않기 때문에 CO는 오직 연료의 불완전연소에 의해서만 발생한다.

일반적으로 연료의 연소 과정 발생하는 NOx와 CO의 배출은 서로 반비례를 갖는다(Lefebvre 2000). 특히 연소 온도와 산소 농도는 두 물질의 배출에 지대한 영향을 미치는데, 연소온도가 낮고 산소가 부족한 환경에서는 불완전연소(환원분위기)에 의해 CO 배출은 증가하는 반면 NOx 배출은 감소하며, 반대로 연소온도가 높고 산소가 풍부한 환경에서는 완전연소(산화분위기)에 의해 CO 배출은 감소하지만 NOx 배출은 증가한다. 아래 식은 이러한 관계를 화학식으로 나타낸 것이다(FLSmdith 2003).

[In the case of incomplete combustion]



[In the case of complete combustion]



시멘트 소성공정은 클링커 합성반응에 필요한 1,450 °C의 고온을 얻기 위해 kiln에서 연료를 연소시켜 최고온도 2,000 °C의 가스를 발생하며, 이 과정에서 필연적으로 다량의 Thermal NOx가 생성된다. 이렇게 발생한 NOx를 최소화하기 위하여 시멘트 소성공정은 약한 환원분위기를 유지하는 것이 일반적이며, 충분히 제거하지 못한 NOx는 후속 공정에서 비선택적 NOx 환원(SNCR, Selective non-catalytic reduction) 장치를 이용해 NOx의 일부를 다시 제거할 수 있다. 다만, 환원분위기 조성을 통해 NOx는 제거할 수 있지만, CO의 배출이 증가하므로 연소환경을 제어하는 기술만으로는 두 배출물질을 모두 제거하기가 어려운 문제가 있다.

2.2 다단연소 Calciner 공정

다단연소 calciner 공정은 산소 농도 등 연소환경 제어를 통한 오염물질 배출의 상관관계를 이용해 1차적으로 산소가 부족한 불완전연소 환경(환원분위기)을 통해 kiln에서 발생한 NOx를 제거하고, 2차적으로 산소가 풍부한 완전연소 환경(산화분위기)를 조성함으로써 불완전연소에서 발생한 CO 등 배출물질을 제거하는 것을 핵심으로 한다. 이를 화학식으로 나타내면 아래 식과 같다.

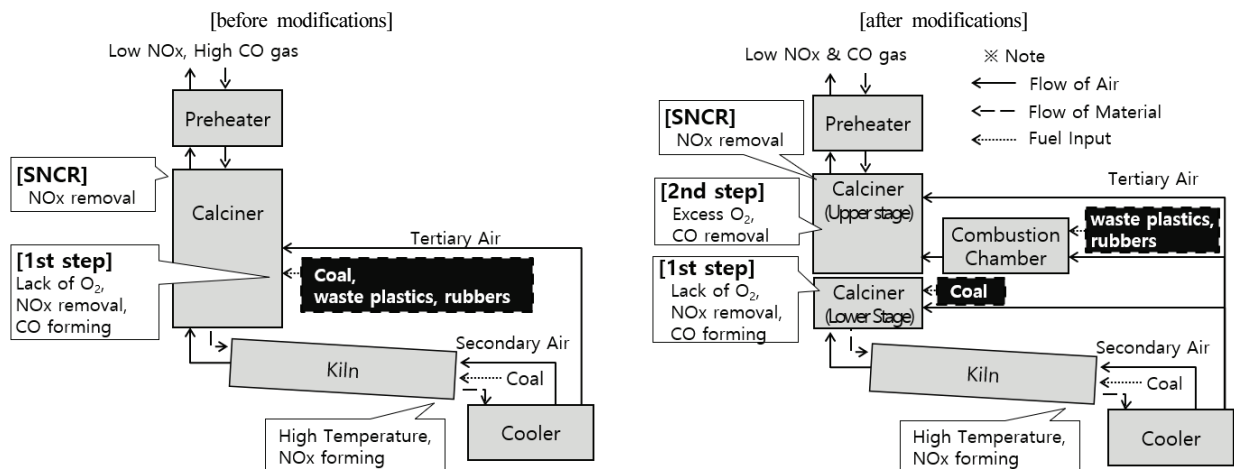


Fig. 1. Comparison of process concept diagram before and after modifying multi-combustion calciner

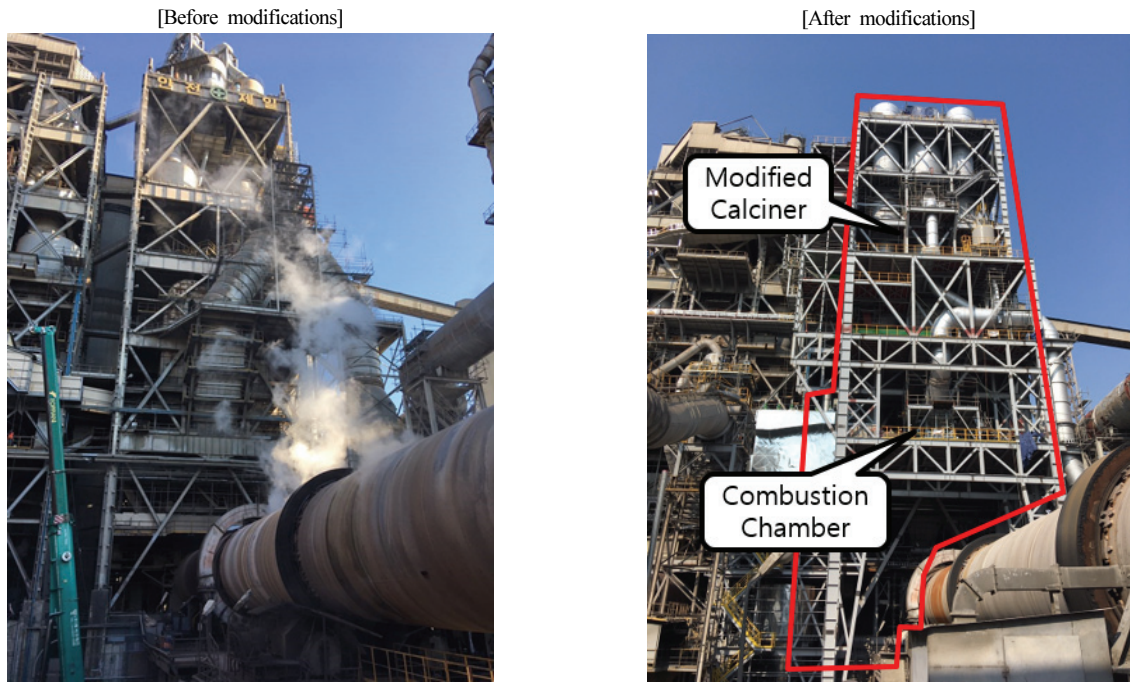
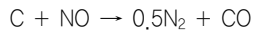


Fig. 2. Comparison of picture of calciner before and after modifying multi-combustion calciner

[1st step, incomplete combustion]



[2nd step, complete combustion]



또한, 폐플라스틱 등 대체연료의 경우 연료 성상에 따라 완전연소 상태에 도달하기까지 상당한 시간이 필요한 경우가 많다. 이들 대체연료를 충분한 시간(최대 10분) 연소시킨 후 Calciner에 투입함으로써 대기오염물질의 발생 뿐 아니라, Calciner 설비내 산소 농도를 보다 안정적으로 관리할 수 있다. 이를 위해 기존 방식대로 대체연료를 Calciner에 직접 투입하는 대신 보조연소로(Combustion chamber)에 투입해 완전히 연소시킨 후 연소가스를 Calciner에 투입하는 방식을 적용함으로써 대체연료의 사용량을 증대하면서도 대기 배출물질을 효과적으로 관리할 수 있다.

Fig. 10에 다단연소 기술 적용전 일반적인 기존 단연소 calciner 공정과 다단연소와 보조연소 기술이 적용된 calciner 공정의 흐름도를 비교하였으며, Fig. 2는 각각의 사진이다.

3. 데이터의 수집 및 분석방법

3.1 데이터의 수집

본 연구에서는 다단연소 기술 적용 전후 시멘트 소성설비의 연료사용량과 NOx 배출농도를 비교하고자 하였다. 다단연소 기술 적용을 위한 설비 개조 공사는 2020년 11월부터 2021년 3월까지 실시되었으며, 기술 적용 전으로는 2020년 5-7월의 3개월간의 데이터를, 적용 후로는 2021년 5-7월의 동일한 기간의 데이터를 사용하였다. 비교를 위한 데이터로서 원료 투입량(feeding)과, 연료 사용량으로는 유연탄(kiln coal, calciner coal), 폐합성수지 및 폐고무류(plastics), 재생유(reclaimed oils) 사용량과 SNCR 환원제로 요소수(30 % 희석) 투입량(이하 urea) 데이터를 사용하였다. 각 데이터는 1시간 간격으로 기록된 공정 데이터의 평균값을 사용하였으며, 설비 정체 전후와 같은 특이값은 분석에서 제외하였다.

분석기간 사용된 연료 중 유연탄은 러시아산을 사용하였고, 품질은 휘발분 32-43 wt.%, SO₃ 함량 1.0 - 2.1 wt.%, 고위발열량 5,860-7,260 kcal/kg으로 비교적 일정한 것으로 분석되었다. 사용된 화석연료는 유연탄이 유일하며, 무연탄, petcoke 등은 사용하지 않았다. 대체연료로는 폐합성수지로서 폐플라스틱류, 폐비닐류, 폐고무류 등을 혼합하여 50 mm 이하로 파쇄하여 사용하였으

Table 1. Specification of kiln referred in this paper

Facilities	Specification	Before modification	After modification
Preheater	Type	2 string 5 stage cyclones	
	Gas flow capacity	800,000 m ³ /h, 775 mmAq	
	CBS (Chloride Bypass System) capacity	620 m ³ /min	1,170 m ³ /min
Calciner	Size	7.85 mD x 26.5 mL	5.4 mD x 74 mL with sub-combustion chamber
	Fuel	Coal, soft waste plastics, hard waste plastics, reclaimed oil	
	Gas retention time	4.8 sec.	7.0 sec.
Kiln	Capacity	4,000 t-clinker/day	
	Size	4.572 mD x 70.0 mL	
	Burner capacity	59.4 Gcal/h (69.1MW)	
	Fuel	Coal & reclaimed oil	

며, 고위발열량은 3,500~4,500 kcal/kg으로 분석되었다. 고체 상의 폐합성수지 외에도 액체 상 대체연료로 재생유가 사용되었다. 폐합성수지와 재생유는 kiln에는 사용하지 않았으며, calciner에만 사용되었다. 다단연소 기술 적용 후 공정의 경우 폐합성수지는 대부분 보조연소소에 투입되었으며, 일부 calciner에 직접 투입되었으나 매우 소량이어서 합산하여 분석하였다.

Kiln 및 calciner에서 배출되는 NOx의 농도는 kiln 가스가 최종적으로 배출되는 stack에 비분산 적외선법(NDIR, Non-Dispersive Infrared adsorption)을 이용한 측정기를 이용해 분석하였다. 배출 가스에 함유된 각 성분의 농도는 stack에 설치된 측정기에서 측정되는 즉시 TMS(Tele Monitoring System)로 연동되어 한국환경공단 굴뚝자동측정기기(<https://cleansys.or.kr/>) 서버에 측정결과가 실시간으로 표시되며, 5분 간격으로 측정값과 5분간 측정된 데이터의 평균값이 서버에 자동 저장되고 있다. 본 분석에서는 1시간 평균값을 사용하였다. 관련 법에서는 HCl, SOx, TSP와 같은 물질의 배출농도에 관해서도 배출허용기준을 규정하고 있으나 데이터의 사전 분석결과 이들 물질의 배출농도는 배출허용기준을 만족할 뿐 아니라 극히 적은 수준으로 나타나 본 분석에서는 주요 배출 물질인 NOx에 대해서만 연구범위를 한정하였다. Table 1에 본 사례연구에서 사용된 시멘트 소성설비의 기술 적용 전후의 주요 제원을 정리하였다.

3.2 분석 방법

수집된 데이터를 통계프로그램 미니탭[®] 프로그램을 사용해 2-sample t-검정 기법으로 분석하였다. 2-sample t-검정, 혹은 독립 표본 t-검정은 독립적인 두 그룹의 모집단 평균이 서로 다른지 여부를 확인하는 데 사용되는 방법으로, p값이 유의수준(α , 일

반적으로 95 %(0.05)를 사용)보다 작다면 두 그룹의 평균 차이가 있다고 판단한다.

본 분석에 앞서 수집된 모든 데이터가 정규성을 갖는 것을 확인하였으며, 개선전후 분석에 사용한 대부분 데이터의 분산이 다른 것으로 확인되어 이분산 검정을 적용하였다. 또한 분석을 위한 데이터 전처리로 결측치 및 비정상 데이터가 있는 경우 해당 레코드를 삭제하였으며, 또한 설비가 가동되지 않은 시기나, 보수시, 돌발적인 정체시 발생한 이상치 데이터도 제거하였다. 다만 각 데이터의 실제 수치는 자료 제공자의 대외비로 분류되어 있어, 개선전 데이터의 평균값을 100으로 하고 상대값을 구하여 분석을 실시하였다.

4. 분석결과

Fig. 3은 다단연소 기술 적용 전후 kiln과 calciner에 사용된 유연탄 투입량 변화를 나타낸 것이다. 선술한 것처럼 데이터의 실제 수치를 공개할 수 없어 개선전 데이터의 평균값을 100으로 하고 실제값을 평균값으로 나눈 비율(%)을 나타내었다. Kiln에는 유연탄이 전량 연료로 사용되고, 대체연료가 사용되지 않고 있기 때문에 다단연소 기술 적용으로 인한 평균의 변화를 확인하기 어렵다. 다만, 다단연소 기술 적용 전에 비해 적용 후 표준편차가 13.3 % 감소한 것으로 나타나 연료 사용량이 보다 균일해진 것으로 분석되었다. Kiln에 사용된 유연탄의 양은 기온과 같은 외부 환경에서부터 조합원료의 품질, 원료의 탈탄산율, cooler의 열 회수율과 같은 다양한 영향을 받기 때문에 편차가 감소한 결정적인 원인을 규명하기는 어렵다. 다만, 기술 적용 전후로 cooler나 kiln hood, burner 등 calciner를 제외한 주요 설비 및 부대 설비에 특별한

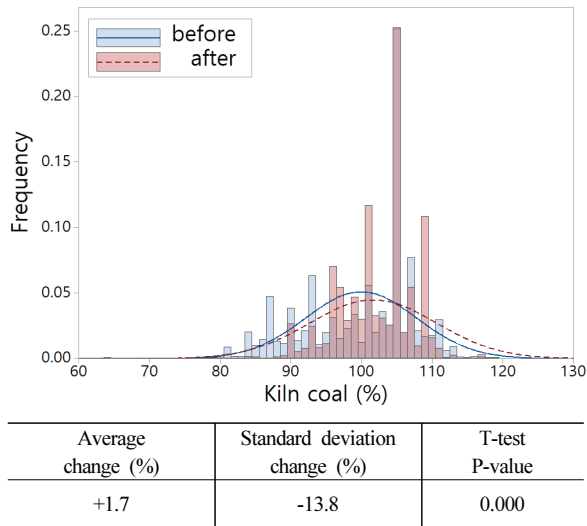


Fig. 3. Comparison of kiln coal consumption before and after modifying multi-combustion calciner

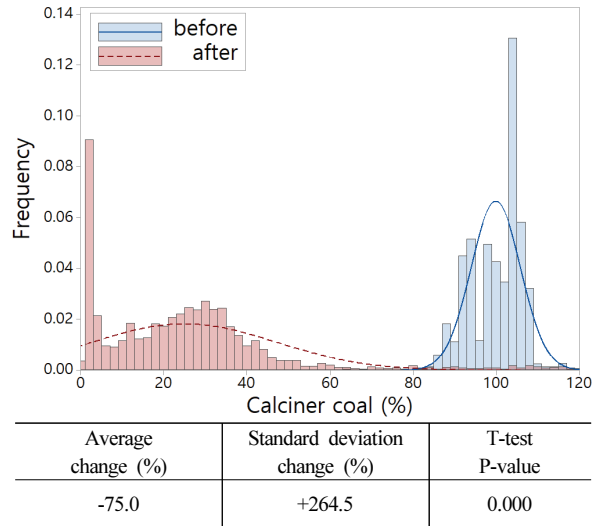


Fig. 4. Comparison of calciner coal consumption before and after modifying multi-combustion calciner

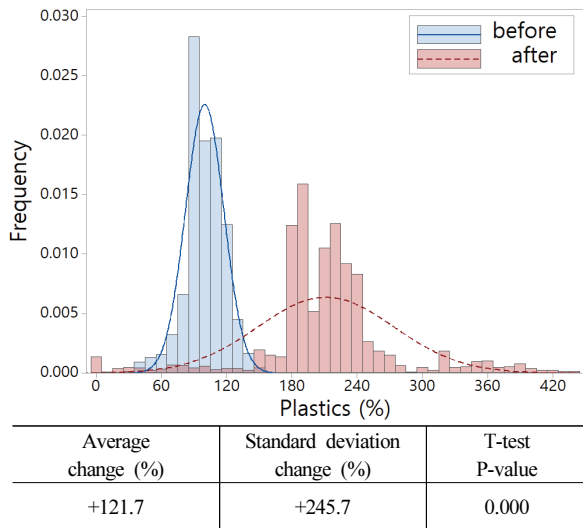


Fig. 5. Comparison of plastics consumption before and after modifying multi-combustion calciner

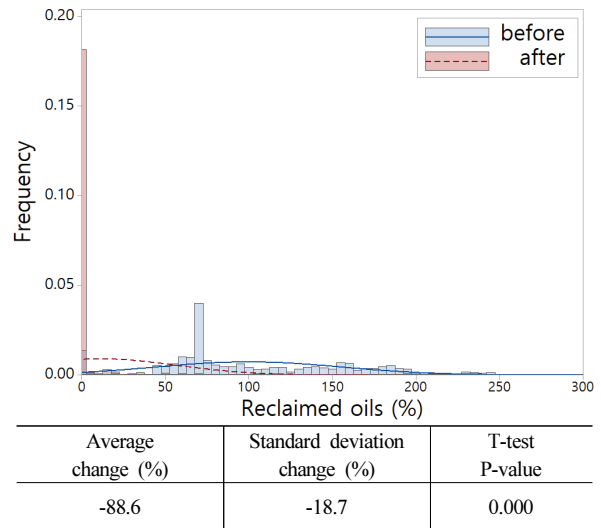


Fig. 6. Comparison of reclaimed oils consumption before and after modifying multi-combustion calciner

설계 변화가 없었던 점을 감안하면 선행공정인 calciner에서의 공정 변화가 kiln으로 유입되는 원료의 품질에 긍정적인 영향, 즉, 편차가 감소하는 영향을 미쳐 kiln에서의 연료 사용량도 기술 적용 전에 비해 균일해진 것으로 판단된다.

한편, calciner에 사용된 유연탄 투입량에는 현저한 변화가 있음을 쉽게 확인할 수 있다(Fig. 4). 유연탄의 사용량이 크게 저감되었는데, 다단연소 기술 적용으로 인해 폐합성수지의 안정적인 사용이 가능해지면서 폐합성수지의 사용량이 크게 증가(Fig. 5)하면서 유연탄의 사용량이 감소한 것으로 판단된다. 다만, 다단연소

기술이 적용된 이후에도 폐합성수지 대체연료의 품질, 특히 발열량 및 수분 함량 관리가 어려운 특성상 폐합성수지 사용량의 편차는 기술 전에 비해 증가하였으며, 폐합성수지의 사용량의 변동이 커지면서 유연탄 투입량의 변동도 증가한 것으로 판단된다. 동시에 다단연소 기술 적용 후 재생유 사용량은 큰 폭으로 감소하였는데(Fig. 6), 이는 폐합성수지를 안정적으로 연료로 사용할 수 있게 되면서 회사의 정책 측면(예 : 경제성)에 따라 조정된 결과다.

결과적으로 kiln과 calciner를 합한 총 유연탄 사용량은 기술 적용 전에 비해 38.0 % 저감되었다.

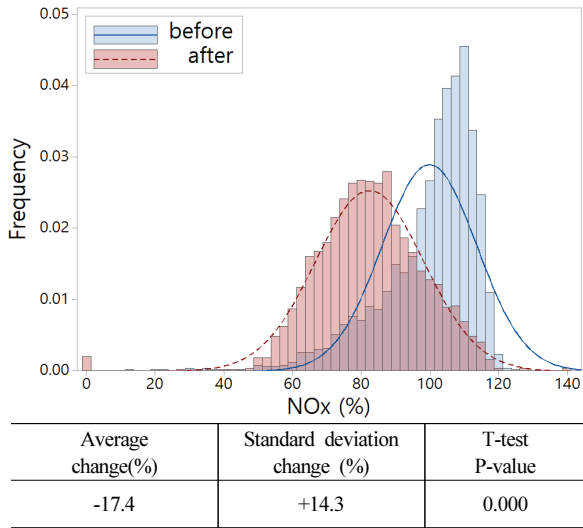


Fig. 7. Comparison of NOx emission before and after modifying multi-combustion calciner

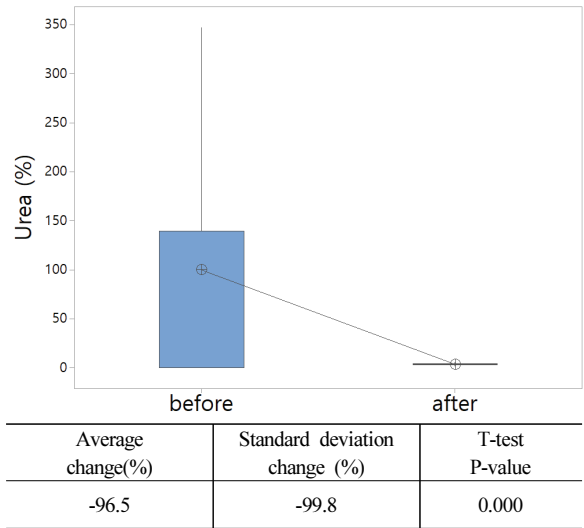


Fig. 8. Comparison of use of urea for SNCR before and after modifying multi-combustion calciner

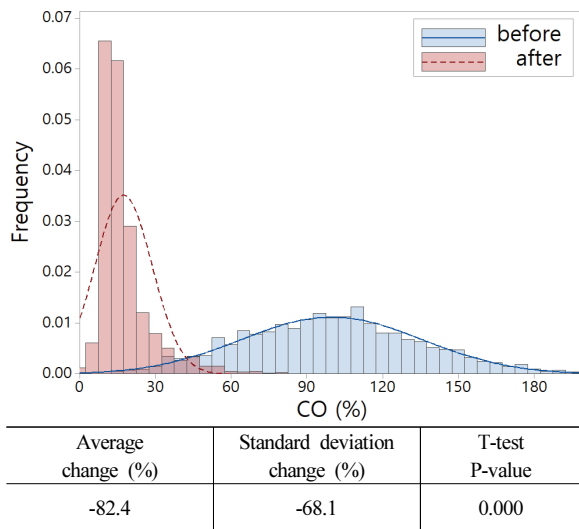


Fig. 9. Comparison of CO emission before and after modifying multi-combustion calciner

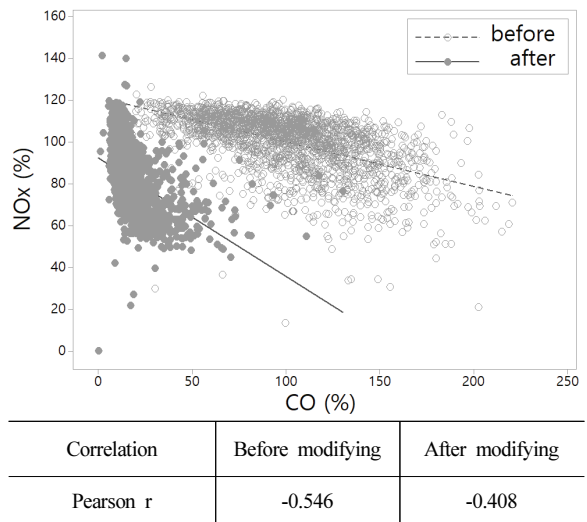


Fig. 10. Comparison of trends of CO vs NOx before and after modifying multi-combustion calciner

NOx 배출농도 측면에서는 다단연소 기술 적용후 평균 17.4 %가 저감되어 NOx 배출 저감 효과가 있음을 확인할 수 있다(Fig. 7). 특히 개선전 NOx 배출 추세를 살펴보면 데이터가 표준 정규분포 형태가 아닌 왼쪽으로 치우친 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 7 before). 이러한 현상은 시멘트 소성공정 NOx 배출농도에 관한 환경 기준을 준수하기 위해 NOx 배출농도가 일정 수준을 초과할 경우 원료의 투입량 감소, SNCR의 가동과 같은 대응을 실시하기 때문에 나타난다. 특히, NOx 배출 농도가 규제치에 가깝게 상승할 경우 설비 운전자들은 SNCR의 가동률을 급격하게 상승

시켜 NOx 배출을 저하시키며, 이런 일련의 버퍼(buffer) 공정으로 인해 NOx 배출농도가 일정 수준(대부분 규제치보다 낮은 자체 관리수준)을 넘어서는 경우의 빈도가 급격히 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 SNCR 설비를 활용해 NOx 배출을 저감하고자 할 경우 요소수 등 환원제의 투입이 불가피한데, 환원제 사용으로 인한 제조비용 상승 뿐 아니라, 온도 조건의 변동이나 환원제의 투입량 과다 등 조건에 따라서는 NOx의 제거가 원활하지 않고, 암모니아의 배출(ammonia slip), 푸르스름한 연기 발생(blue haze)와 같은 문제가 발생할 수 있어 가능하다면 SNCR을 사용하지 않고 연료

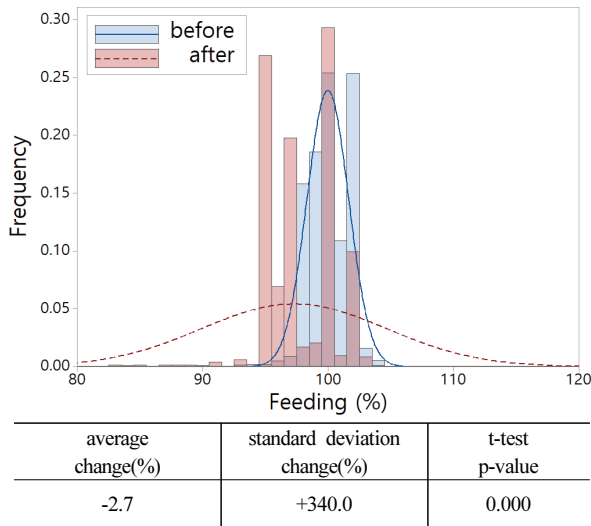


Fig. 11. Comparison of kiln productivity before and after modifying multi-combustion calciner

사용량을 제어하여 NOx의 발생을 저감 혹은 제거하는 것이 바람직하다.

반면, 다단연소 기술이 적용된 후에는 NOx 배출 추세가 완전한 정규분포 곡선의 형태를 만족하고 있으며, 이는 NOx 배출이 증가함에 따라 NOx를 제거하기 위해 실시되던 인위적인 설비의 조작이 감소하고, 또한 SNCR 설비의 가동률도 저감되었음을 의미한다 (Fig. 8). 이와 같이 본 설비에 다단연소 기술을 적용함으로써 폐합성수지 대체연료의 사용량이 크게 증가하였음에도 불구하고, 이에 따라 오염물질 배출이 증가할 것이라는 일련의 우려와 반대로 NOx 배출은 오히려 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Fig. 9는 CO의 배출농도 변화를 비교한 것으로 기술 적용전에 비해 CO 배출이 크게 저감되었음을 쉽게 확인할 수 있다. 선술한 것처럼 연소 과정 발생하는 NOx와 CO의 배출은 서로 반비례 관계 (Lefebvre 2000)를 갖는 것이 일반적이며, NOx와 CO의 관계를 산점도로 나타낸 Fig. 10에서 이런 관계를 확인할 수 있다. NOx와 CO의 상관관계는 다단연소 기술 적용전에는 Pearson 상관계수 $r = -0.546$ 으로 뚜렷한 음의 상관관계를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. NOx 배출농도가 환경 기준을 초과하면 SNCR을 이용해 NOx 배출량을 추가적으로 저감하는 공정 특성을 고려하면, SNCR을 적용하지 않았을 경우 상관계수는 음의 방향으로 더욱 증가하였을 것으로 예상된다. 하지만 다단연소 기술 적용후에는 SNCR이 거의 사용되지 않았음에도(Fig. 8) CO와 NOx의 상관계수가 상대적으로 감소(-0.408)한 것으로 분석된다. 이러한 결과로부터 기존 공정에서 NOx 제거를 위해 불완전연소를 유도하는 과정에서 불가

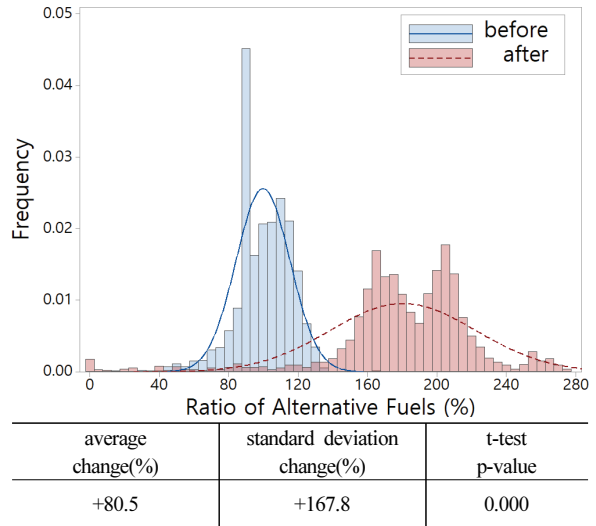


Fig. 12. Comparison of ratio of alternative fuels before and after modifying multi-combustion calciner

피하게 CO가 발생해 배출되던 것과는 달리, 다단연소 공정에서는 우선적으로 불완전연소에 의해 NOx를 제거후, 후속공정에서 다시 완전연소를 통해 CO를 제거함으로써 NOx와 CO를 동시에 관리할 수 있음을 실제 공정 사례를 통해 확인하였다고 판단된다.

Fig. 11은 다단연소 기술 적용 전후 원료투입량(Feeding, kiln 생산성)을 나타낸 것이다. 개선전에 비해 원료 투입량은 2.7 % 감소한 것으로 분석되었으며, 특히 표준편차가 44 % 증가하여 생산성의 변동도 다소 증가하였다. 다단연소 기술의 적용은 생산성 증대보다는 대체연료의 사용량 증대와 오염물질 배출 저감을 위한 것으로, 기술 적용후 대체연료 사용량과 오염물질 배출을 우선적으로 고려함에 따라 생산성은 소폭 하향된 것으로 분석된다.

Fig. 12는 다단연소 기술 적용 전후 연료 대체율(AF, Ratio of Alternative fuel)을 비교한 것이다. 연료 대체율이란 유연탄과 대체연료로 소성공정에 투입된 총 열량 중 대체연료로 공급된 열량의 비율을 말하며, 다음과 같이 정의된다.

$$AF(\%) = \frac{E_{AF} \times 100 (\%)}{E} \quad (1)$$

여기서 E_{AF} 는 대체연료로 공급된 열량을 의미하며, E_{Coal} 은 유연탄으로 공급된 열량을 의미하고, E_{total} 은 이 두 값을 합친 것으로 각 E의 단위는 kcal/kg-clinker가 주로 사용된다.

연료 대체율은 기술 적용 전 24.0 %에서 기술 적용 후 43.3 %로 크게 증가하였다. 다만, 표준편차가 증가하여 변동이 커진 것으로

분석되는데, 이는 선술한 바와 같이 품질의 변동이 큰 폐합성수지의 사용량의 변동이 커지면서 연료 사용량의 조정 범위가 넓어지면서 발생한 현상으로 이해된다.

5. 결론

대체연료 사용량을 증가시키면서도 동시에 오염물질 배출을 저감할 수 있는 다양한 기술 중 하나로 다단연소형 Calciner 기술을 실제 시멘트 소성설비에 적용하여 그 효과를 파악하였다. 주요 비교 항목으로 다단연소 기술의 적용 전후 연료사용량과 NOx 배출 농도를 비교를 통해 기술의 효과에 대해 분석하였으며, 주요 분석 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 다단연소가 적용된 Calciner의 연료사용량을 분석한 결과 유연탄 사용은 38.0 % 감소하고, 폐합성수지 사용량은 121.7 % 증가하여 유연탄 사용저감 효과 및 폐합성수지의 처리 효과가 매우 뛰어남을 확인하였다.
2. 이와 동시에 NOx 배출량은 17.4 % 감소하여 다단연소 기술을 활용해 폐합성수지 대체연료의 사용량 증가에도 불구하고 대기 오염물질의 배출을 저감할 수 있음을 확인하였다.
3. 다단연소 기술 적용 후 유연탄과 폐합성수지의 사용량, 원료 투입량의 변동이 증가한 경향을 나타내었다. 발열량과 같은 품질이 일정하지 못한 폐합성수지 연료 특성으로 인해 사용량의 변동이 커지면서 유연탄 투입량의 변동도 증가함에 따른 현상으로 판단되어 추후 대응기술 개발이 필요하다.
4. 본 기술의 적용으로 인해 소성설비의 연료 대체율은 적용 전에 비해 80.5 % 향상되어 유연탄의 저감 및 폐합성수지 재활용 효과가 매우 뛰어난 것으로 평가되었다.

최근에는 시멘트산업 탄소중립 달성을 위한 중요한 핵심 기술로 다양한 폐합성수지 대체연료 사용량 증가를 위한 설비 기술이 연구되고 있어, 본 기술의 탄소배출 저감 성능에 대해서도 추후 계속된 연구 평가가 필요하다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

이 연구는 한국산업기술평가관리원의 2023년도 연구비 지원 (과제번호 : RS-2023-00261157)에 의해 수행되었습니다.

References

- Beychok, M.R. (1973). NOx emission from fuel combustion controlled, *Oil & Gas Journal*, **3**, 53-56.
- Choi, J.W., Baek, J.I., Kwon, S.J., Won, P.S., Kang, B.H. (2020). Study on the correlation between air emission gas and alternative fuels used in cement sintering process, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(3)**, 286-293 [in Korean].
- FLSmith (2003). Emission from Cement Kilns of SO₂ and NO_x, *The International Cement Production Seminar 2003, Lecture: 05-12*.
- Gartner, E.M. (1983). Nitrogenous Emissions from Cement Kiln Feeds, in: *Rule 1112 Ad Hoc Committee Meeting South Coast Air Quality Management District, El Monte, CA, June 7*.
- Hilovsky, R.J. (1977). NOx Reductions in the Portland Cement Industry With Conversion to Coal-Firing, 1977 U.S. EPA Emission Inventory/Factor Workshop, Raleigh, NC.
- Kim, H.S., Jhung, J.K. (2023). A study on the analysis of changes in generation and characteristics of domestic waste according to COVID-19, *Korean Public Health Research*, **49(3)**, 43-48 [in Korean].
- Lefebvre, A.H. (2000). *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis.
- Shreve, R.N., Brink, J.A., (1977). *Chemical Process Industries*, New York, NY, Fourth Edition, McGraw Hill, Inc.
- Walter, L., Greer, G.J.H., (2004). *A Qualitative Examination of the Control of Major Gaseous Pollutants Generated in Portland Cement Kilns*, Indiana, USA, Portland Cement Association, 33.
- Yoon, J.Y., Yoon, Y.H., Yun, S.L., Lee, W.T. (2021). The current state of management and disposal of wastes related to COVID-19 : a review, *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*, **43(12)**, 739-746 [in Korean].
- Zel'dovich, Y.B. (1946). The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions, *Acta Physicochimica U.S.S.R.*, **21**, 577-628.

다단연소 기술 적용 전후 시멘트 소성설비의 NOx 배출 사례 연구

시멘트 산업은 다양한 가연성 폐기물을 천연자원인 유연탄을 대체하는 연료로 사용함으로써 폐기물 처리 문제 해결에 기여하고 있다. 시멘트 제조공정에서 더 많은 폐합성수지 등 대체연료를 사용하기 위해서는 대체연료를 안정적으로 연소시키고, 특히 NOx와 같은 유해물질의 대기배출을 저감할 필요가 있다. 본 연구는 폐합성수지 등 대체연료의 사용량을 증대시키면서 NOx와 같은 대기배출 유해물질의 발생량을 저감하는 기술의 하나인 다단연소 공정에 대한 사례연구다. 실제 시멘트 제조설비에의 기술 적용 전후 연료 사용량, NOx 배출 등을 비교하여 효과를 평가한 결과, 유연탄의 사용량은 38 % 감소, 폐합성수지 사용량은 122 % 증가하면서 동시에 NOx 배출량은 17 % 저감된 것으로 평가되어 다단연소에 의한 폐합성수지 사용 증대 및 NOx 배출 저감 효과가 유효함을 확인하였다.