

시멘트 소성공정에 사용된 대체연료와 대기배출가스간 상관관계 연구

Study on the Correlation between Air Emission Gas and Alternative Fuels Used in Cement Sintering Process

최재원¹ · 백주익¹ · 권상진² · 원필성² · 강봉희^{3*}

Jaewon Choi¹ · Ju-ik Baek¹ · Sang-Jin Kwon² · Pil-Sung Won² · Bong-Hee Kang^{3*}

(Received August 5, 2020 / Revised September 4, 2020 / Accepted September 7, 2020)

In this study, we tried to verify the correlation of the amount of combustible industrial by-products, household waste used as fuels on cement sintering process and the amount of NO_x, and CO, harmful components in the exhaust gas. The analysis uses coal as natural fuel, soft plastics (plastics with properties that tend to be scattered by wind, such as vinyls), hard plastics (plastics with properties that are not scattered by wind, such as PETs, wate rubbers), and reclaimed oils as alternative fuels. Utilizing the response surface analysis (RSM) technique using the process data of 2019, such as the fuel input and combustion temperature of a domestic A cement manufacturer's sintering facilities as independent variables, and the NO_x, and CO emissions to the stack as dependent variables. Correlation was analyzed. As a result, it was confirmed that the impact on the emission material differs for each waste. In particular, it was analyzed that the hard plastics increase the CO emission but have an excellent effect of reducing NO_x.

키워드 : 시멘트 제조, 배출가스, 폐기물 연소, 대체연료

Keywords : Manufacturing cement clinker, Emission gas, Combustion of wastes, Alternative fuel

1. 서론

시멘트 산업은 페비닐류, 페플라ستيك류, 폐고무류 등 다양한 산업부산물 및 생활폐기물을 시멘트 제조 공정에 필요한 열 에너지의 공급원, 이른바 대체연료로 사용함으로써 자원순환에 기여하고 있다. 하지만 이런 자원순환에 대해 일반 대중은 폐기물이 시멘트에 함유되어 품질 혹은 안전상 문제를 유발하거나, NO_x, CO와 같은 유해물질을 배출하는 원인이 될 수 있다는 불안감을 가지고 있는 것이 사실이다.

그러므로 본고에서는 국내 A시멘트 제조사 소성설비의 2019년 공정 데이터, 그중에서도 특히 연료로 사용된 가연성 산업부산물 및 생활폐기물의 사용량과 대기배출가스중 유해성분을 측정된 측정값을 비교함으로써 시멘트 제조공정에 사용된 폐기물의 양과 대기배출 유해물질 발생량의 상관관계를 확인하여 이들간의 인과

관계를 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 시멘트 소성공정

시멘트 제조공정은 크게 석회석 광산에서 원료인 석회석을 채굴하는 채광공정(quarry), 채광된 석회석에 소량의 SiO₂질, Al₂O₃질 원료를 혼합해 분말로 분쇄하는 원료분쇄공정(raw material grinding), 분쇄된 원료를 1,450℃로 가열하는 소성공정(sintering), 소성된 반제품에 석고를 혼합해 다시 분말화하는 시멘트분쇄공정(clinker grinding)의 4단계로 분류한다(Fig. 1).

이중에서도 시멘트 품질에 가장 지대한 역할을 미치는 것은 소성공정으로, 소성공정은 분쇄된 원료를 고온을 이용해 약 800℃까지 예열하는 예열기(preheater), 예열된 원료에 집중적으로 열을

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

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

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

³아세아시멘트 기술연구소 연구실장 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

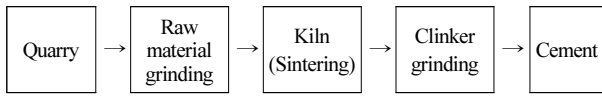


Fig. 1. Typical manufacturing process of cement (Winter 2009)

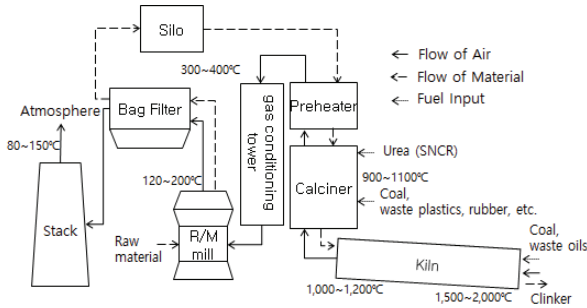


Fig. 2. Flow of Air, Materials, Fuels in sintering process

가해 석회석(CaCO₃)에서 CO₂를 분해하는 탈탄산기(Calciner), 탈탄산이 완료된 원료를 1450℃로 가열해 시멘트의 주성분인 alite(3CaO·SiO₂), belite(2CaO·SiO₂) 등을 합성하는 소성로(kiln), 소성이 완료된 반제품인 클링커를 급냉각하는 냉각기(cooler)로 구성된다(Fig. 2).

시멘트 소성공정에 사용되는 연료로는 주로 유연탄이 사용되며, 그밖에도 페플라스틱류, 폐고무류, 재생유(reclaimed oil), 등이 연료로 사용되고 있으며, 이들을 통칭하여 대체연료(alternative fuels)라 부른다. 대체연료로 사용되는 폐기물은 폐기물관리법에 따라 시멘트 공장에서의 사용이 허가된 물질만 사용되고 있다. 대체연료 중에서도 페플라스틱류 및 폐고무류와 같은 고체성 대체연료는 연소속도가 느려 미연소된 연료가 시멘트에 배출되는 것을 방지하기 위해 Calciner에 사용되는 경우가 많으며, 재생유와 같

Table 1. Specification of Kiln referred in this paper

Facilities	Specification
Preheater	2string 5state cyclones Gas flow capacity : 744,000m ³ /h, 695mmAq CBS(Chloride Bypass System) capacity : 480m ³ /min
Calciner	Size : 7.85mD x 26.5mL Fuel : Coal, Soft waste plastics, Hard waste plastics, Reclaimed oil SNCR(for NOx reduction) agent : urea(30%)
Kiln	Capacity : 4,500t-clinker/day Size : 4.572mD x 70.0mL Rotation spd : Max. 3.89rpm Burner capacity : 59.4Gcal/h (69.1MW) Fuel : Coal & Reclaimed oil

은 액체성 대체연료는 연소속도가 충분히 빠르기 때문에 Kiln에 사용되는 경우가 많다. 본 소성공정에는 폐기물 관리법에 따른 기준 외에도 자체기준에 따라 연료로 사용하기 적합한 품질의 대체연료(예를 들어 재생유의 경우 발열량 4,500kcal/kg 이상, 수분 35% 이하 등)를 사용하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 kiln의 주요 제원을 정리한 것이다.

2.2 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 NOx와 CO는 가장 대표적인 유해물질로 여겨지고 있다(Walter and Greer 2004).

NOx는 생성 메커니즘에 따라 고온에 의해 연소공기로 투입된 공기중 N₂ 분자가 산화되면서 발생하는 Thermal NOx(Zeldvich 1946)와 연료에 함유되어 있던 질소화합물로부터 유래하는 Fuel NOx(Beychok 1973)로 구분할 수 있다. 그 밖에도 시멘트 원료중에 함유되어있던 질소로부터 유래하는 Feed NOx, 화염주변에서 발생하는 prompt NOx가 발생할 수 있으나 이들이 차지하는 비중은 상대적으로 매우 작아 무시해도 무방하다고 평가되며,(Gartner 1983) 시멘트 소성공정은 최고온도 2,000℃에 달하는 고온환경이 조성되기 때문에 Fuel NOx보다는 Thermal NOx의 비율이 높다고 여겨지고 있다(Shreve and Brink 1977; Hilovsky 1977).

CO는 연료에 함유된 유기 및 무기질 탄소(C)가 산소와 결합하여 연소하는 과정에서 충분한 산소가 공급되지 못해 불완전연소가 진행되면서 발생한다. 연료의 연소과정에 산소가 충분히 공급되었다면 CO₂가 생성하며, CO₂의 경우 연료의 연소로 인해 발생하는 CO₂ 외에도 원료로 사용된 석회석(CaCO₃)의 탈탄산 반응(CaCO₃ → CaO+CO₂)에서도 발생한다. 하지만 탈탄산 반응에서 CO는 발생하지 않기 때문에 CO₂와 달리 CO는 오직 연료의 불완전연소에 의해서만 발생한다.

3. 데이터 및 분석방법

3.1 데이터의 수집

시멘트 소성공정에 사용된 연료와 배출물질간 상관관계 분석을 위해 국내 A시멘트사 소성설비 4기 중 1기의 2019년 공정 데이터와 대기배출가스 측정값을 비교하였다.

독립변수로서 공정데이터는 1시간 간격으로 측정된 값으로 소

성공정에 투입된 원료량(feed), kiln 및 calciner의 온도를 비롯해 유연탄(coal) 및 대체연료 투입량을 사용하였다. 분석기간 유연탄은 러시아산으로 휘발분 32~43%, SO₃ 함량 1.0~2.1%, 고위발열량 5,860~7,260kcal/kg의 것이 사용되었으며, 그밖의 무연탄, petcoke 등은 사용되지 않았다.

대체연료는 비닐류와 같은 풍력에 의해 비산되기 쉬운 경량의 연질 플라스틱류(soft plastics)와 폐고무나 PET 등 풍력에 비산되지 않는 성질을 가진 경질 플라스틱류(hard plastics), 액체 성상의 재생유(reclaimed oil)로 구분하여 각각의 투입량 데이터를 사용하였다. 이중 플라스틱류는 kiln에는 사용되지 않고, 오직 calciner에서만 연료로 사용되고 있었다. 또한 비선택적 NOx 환원법(SNCR, Selective non-catalytic reduction) 환원제로 요소수(urea) 투입량 데이터를 사용하였다.

종속변수인 대기배출가스중 유해물질 배출량은 stack에 비분산 적외선법(NDIR, Non-Dispersive Infrared adsorption)을 이용한 측정기를 설치하여 배출가스중 NOx와 CO의 농도를 측정하였다(Table 2). 각 배출가스중 농도 측정값은 stack에 설치된 측정기에서 즉각적으로 측정되어 TMS(Tele Monitoring System)로 연동되어 측정결과가 서버에 실시간으로 표시되며, 측정된 데이터는 5분 간격으로 평균값과 측정값이 서버에 자동 저장되도록 구성되어 있다. 본 분석에서는 5분간의 평균값을 NOx와 CO 배출값으로 사용하였다.

Table 2. Measurement technic for each emission components

Variable	Maker/Instrument	Principle
NOx	Siemens / Ultramat23	NDIR (Non-dispersive infrared absorption)
CO		

환경부 배출허용기준에는 HCl, SOx, TSP와 같은 물질의 배출량에 관해서도 규정하고 있으나 데이터의 사전 분석결과 이들 물질의 배출량은 배출허용기준을 만족할 뿐 아니라 극히 적은 수준으로 나타나 본 분석에서는 주요 물질인 NOx와 CO만을 분석 대상으로 한정하였다.

3.2 분석 방법

데이터의 분석은 통계프로그램 미니탭^① 반응표면분석(RSM, Response Surface Method)을 이용하였다. 반응표면분석이란 여러 실험 인자들의 수준이 변동할 때 어떤 요인이 반응에 유의한 영향을 주는지, 또 그 영향의 수준이 어떠한지를 확인할 수 있는

분석방법으로, 본 연구에서는 측정된 데이터중 원료량, 온도(kiln & calciner), 유연탄(kiln & calciner), 경질 플라스틱류(calciner), 연질 플라스틱류(calciner), 재생유(kiln & calciner), 요소수의 10개의 정량 요인과 Raw mill의 가동상태를 정성 요인으로 총 11개의 요인을 독립변수로 설정하였다. 또한 종속변수로는 대기배출가스중 NOx와 CO를 특정하여 각 독립변수가 NOx와 CO 배출량에 미치는 영향에 대해 파악하고자 하였다.

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. 단, NOx와 CO 배출량의 측정값은 데이터 제공자인 A시멘트사의 대외비로 분류되어 본 논문에서는 수치값을 제외하였다.

4. 분석결과

분석에 사용된 데이터의 수는 총 4,949개였으며, Fig. 3은 각 배출물질의 측정값을 히스토그램으로 나타낸 것이다. NOx의 경우에는 'a'로 표시한 측정값을 초과한 측정값의 counts가 크게 감소하는 경향을 나타내면서 데이터가 정규성을 나타내지 않았다. 이는 해당 설비의 경우 환경부에서 정한 배출허용기준을 준수하기 위해 NOx 배출값이 일정수준을 초과하면 환원제인 요소수를 분사해 NOx를 N₂로 환원하는 설비인 SNCR이 적용되어 있기 때문이다. 해당 설비에서 환원제인 요소수는 항상 일정량 투입되고 있는 않으며, 미리 정해둔 프로그램에 의해 NOx 배출수준이 설정된 수준을 초과하면 초과량에 연동하여 요소수가 분사되도록 설정되어 있다. NOx 배출수준이 'a'를 넘어서면 SNCR 프로그램이 가동되어 요소수를 분사해 NOx를 제거하도록 되어 있기 때문에 'a' 수준을 초과하는 경우의 수는 한단계 낮은 수준의 경우의 수에 비해 크게 감소하기 때문에 이런 현상이 나타난 것으로 판단된다.

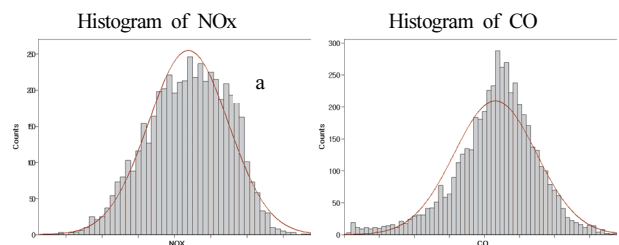


Fig. 3. Histogram of each emission components

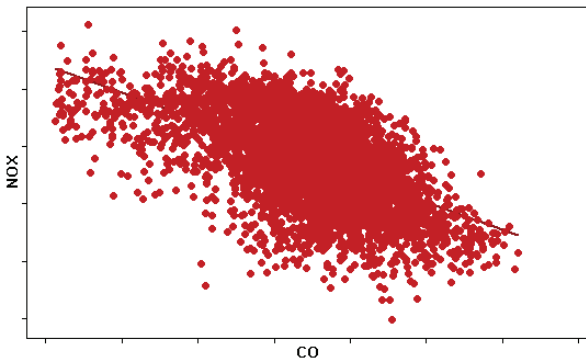


Fig. 4. Scatter plot between NOx and CO

반면, CO의 경우에는 이와 같은 저감 프로그램을 운용하지 않아도 배출허용기준을 충분히 만족하기 때문에 NOx 배출 제어장치인 SNCR과 같은 제어공정을 갖추고 있지 않다. 이런 차이로 인해 CO 배출 측정값은 상대적으로 정규분포에 가까운 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 산점도를 이용해 NOx와 CO간의 상관관계를 확인한 것으로 NOx와 CO간에 음의 상관관계가 있음을 한 눈에 짐작할 수 있으며, 상관분석결과 NOx와 CO간의 Pearson 상관계수는 -0.584, p=0.000로 매우 높은 수준의 상관관계가 나타남을 확인하였다.

Table 3은 각 독립변수가 종속변수인 NOx 및 CO에 미치는 영향을 파악하기 위해 RSM 분석을 실시한 결과 중 1차항의 F값과 p값을 정리한 것이다. F값이 클수록, 또한 p값이 작을수록 독립변수가 각 종속변수에 분명한 영향을 발휘할 가능성이 있음을 시사한다.

4.1 NOx

NOx는 원료량(p=0.056), kiln(p=0.048) 및 calciner (p=0.001) 온도, calciner 유연탄(p=0.030), 경질 플라스틱류(p=0.000)에 의해 강한 영향을 받으며, calcier 재생유(p=0.179) 및 요소수

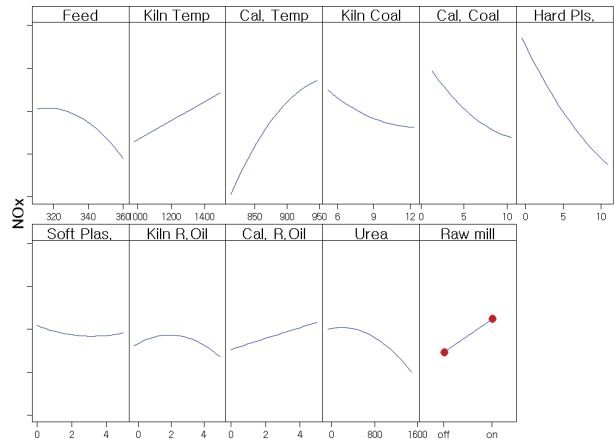


Fig. 5. Main effects plots for NOx

(p=0.174)에 의해서도 일정수준 영향을 받지만, kiln 재생유나 연질 플라스틱류에는 유의미한 직접적 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다(Table 3).

Fig. 5는 NOx에 영향을 미치는 독립변수의 주효과도를 나타낸 것이다. Kiln 및 calciner 온도가 증가할수록 NOx가 증가하는 것은 높은 온도에 의해 thermal NOx의 생성이 증가(EPA 2000)하기 때문으로 판단되며, Kiln 및 calciner 유연탄의 감소, 원료량의 감소는 각각의 온도 저하에 기여하기 때문에 음의 상관관계를 나타내는 것으로 판단된다.

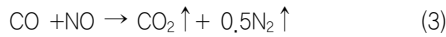
플라스틱류의 경우에는 성상(경질과 연질)에 따라 NOx 배출에 미치는 영향이 상이했다. 분석에 사용된 소성설비의 calciner에 투입되는 플라스틱류는 유동하는 가스에 노출시 가스의 유동에 합류하는지(연질), 혹은 중력의 영향을 더 크게 받아 가스 유동의 영향을 받지 않는지(경질)에 따라 구분하여 별도의 경로로 투입되고 있다. 이중 경질 플라스틱류는 크기가 큰 경우가 많아 완전히 연소되기까지 상대적으로 많은 시간이 필요하며, 이 과정에서 불 완전연소가 일어나기 쉬운 환경이 조성된다. 즉,



Table 3. Result of RSM analysis of the effect of process parameters on emission components(linear terms only)

Variable	Value	Model	Feed	Kiln Temp	Cal. Temp	Kiln Coal	Cal. Coal	Hard Plas.	Soft Plas.	Kiln R.Oil	Cal. R.Oil	Urea	Raw mill
NOx	F-value	12.63	3.65	3.90	10.30	1.38	4.73	14.92	0.18	0.22	1.81	1.85	21.15
	p-value	0.000	0.056	0.048	0.001	0.241	0.030	0.000	0.668	0.639	0.179	0.174	0.000
CO	F-value	11.45	0.82	5.08	3.79	2.97	0.94	8.97	5.87	0.03	0.01	2.83	24.46
	p-value	0.000	0.365	0.024	0.052	0.085	0.333	0.003	0.015	0.868	0.930	0.092	0.000

Calciner로의 경질 플라스틱류 투입량이 증가하면서 불완전연소가 발생하면 연소에 필요한 산소량이 부족한 환경이 조성되면서 플라스틱류에 함유된 탄소는 kiln에서 발생한 NOx로부터 산소를 빼앗아 연소를 진행한다. 즉,



상기 반응에 의해 NOx가 N₂로 환원되고, 결과적으로 stack으로 배출되는 NOx가 저감되는 것으로 이해되고 있다(FLSmidth 2003; EPA 2007). 연질 플라스틱류의 투입량 증가도 NOx를 저감하는데 효과를 발휘하기는 하였지만, 연질 플라스틱류는 가스에 유동되어 연소되는 성향으로 인해 연소속도가 빨라 불완전연소로 인해 NOx를 환원하는 성향이 강하지 않아 NOx 배출량을 소폭 저감하는 것으로 판단된다.

재생유는 폐 윤활유, 폐 엔진오일류 등을 정제한 액상의 대체연료로 원활한 연소를 위해 노즐을 통해 분사(spray) 방식으로 투입된다. 이 과정에서 액체의 대체연료는 에어로졸(aero sol) 상태로 전이되며 kiln이나 calciner와 같은 연소로 내에서 고온의 가스와 접촉하는 즉시 연소가 완료된다. 이러한 특성으로 인해 재생유는 플라스틱류와 달리 불완전연소에 의한 NOx 저감효과를 관찰할 수 없으며, 오히려 빠른 연소속도로 인해 분사된 연료 입자 주변으로 순간적으로 고온이 생성되면서 thermal NOx를 발생하며, 결과적으로 NOx 배출량을 증가시키는 데 기여할 수 있는 것으로 판단된다.

요소수는 NOx 배출 저감 공정(SNCR)에서 NOx를 N₂로 환원시키기 위해 사용되며, 시멘트 소성공정에서는 gas 흐름상 calciner의 상단에 투입되는 경우가 많다. Fig. 5에서 요소수는 사용량이 적은 수준에서는 NOx 제거에 미치는 영향이 적지만 사용량이 증가할수록 큰 효과를 나타내는 것으로 분석되었는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 요소수의 투입이 연속적이지 않고, NOx 수치가 증가하는 경우 선택적으로 사용되기 때문에 이러한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

또한 raw mill의 가동시 NOx 배출량이 증가하는 것으로 분석되었다. 미국 환경보호국의 조사(EPA 1994)에서도 일부 시멘트 소성 설비에서 유사한 사례가 보고된 바 있지만, 이에 대한 상세한 원인 분석은 실시되지 않았다. 본 사례의 경우에는 raw mill 가동시 gas conditioning tower에 사용하는 물의 양을 낮게 제어함에 따라 수분에 의해 제거되던 NOx의 일부가 stack으로 배출되는 것으로 추정되나 향후 구체적인 원인 파악이 필요하다.

4.2 CO

CO는 연료의 불완전연소에 의해 발생하며, 분석에 사용된 독립변수 중 kiln(p=0.024) 및 calciner(p=0.052) 온도와 플라스틱류(경질 플라스틱류 p=0.003, 연질 플라스틱류 p=0.015)에 의해 강한 영향을 받는 것으로 분석되었다(Table 3).

Fig. 6은 CO에 영향을 미치는 독립변수의 주효과도를 나타낸 것으로, CO는 kiln과 calciner의 온도가 낮을수록, kiln과 calciner에 투입된 유연탄량이 많을수록, calciner에 사용된 플라스틱류의 양이 많을수록 증가하는 특성을 나타내었으며, 또한 Raw mill이 가동되고 있을 경우 CO 배출량이 저감되는 것으로 분석되었다. 이는 각 요인이 NOx 배출량에 미치는 영향과는 반대되는 경향으로 나타났다. 즉, kiln 및 calciner 온도가 높을수록 NOx 배출량은 증가하는 반면, CO 배출량은 감소하며, 유연탄 뿐 아니라 플라스틱류와 재생유와 같은 대체연료의 투입량이 증가하면 NOx 배출량은 감소하지만 CO 배출량은 증가한다.

Fig. 7은 이런 관계를 등고선도로 나타낸 것으로 각 요인의 변화에 따라 CO가 높게 나타난 영역과 NOx가 높게 나타난 영역을 서로 비교해보면 서로 반대의 경향을 나타내는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 특히 유연탄과 플라스틱류의 경우 NOx와 CO 배출량에 상반된 영향을 미치는 것을 확인할 수 있는데, 예를 들어 경질 플라스틱류의 증가는 CO를 증가시키지만 NOx는 저감하며, 연질 플라스틱류의 증가는 CO를 증가시키지만 NOx와는 상관관계를 확인하기 어렵다. 또한 이는 Table 3에 제시한 p-value가 0에 가까울수록 설정된 독립변수가 각 종속변수에 분명한 영향을 발휘한다는 가설과도 일치하는 것이다.

이렇듯 연료의 사용량에 따라 NOx와 CO가 상반된 경향을 나타

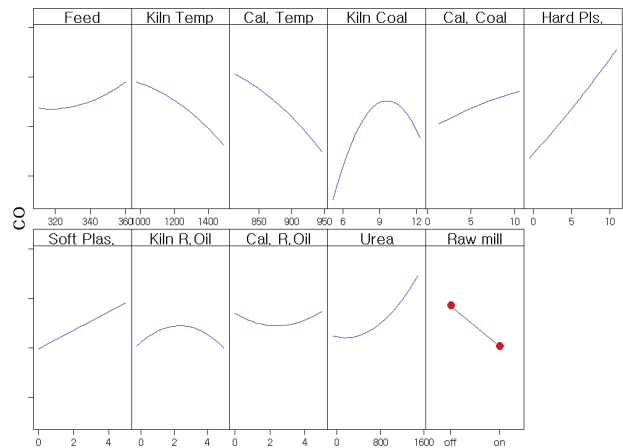


Fig. 6. Main effects plots for CO

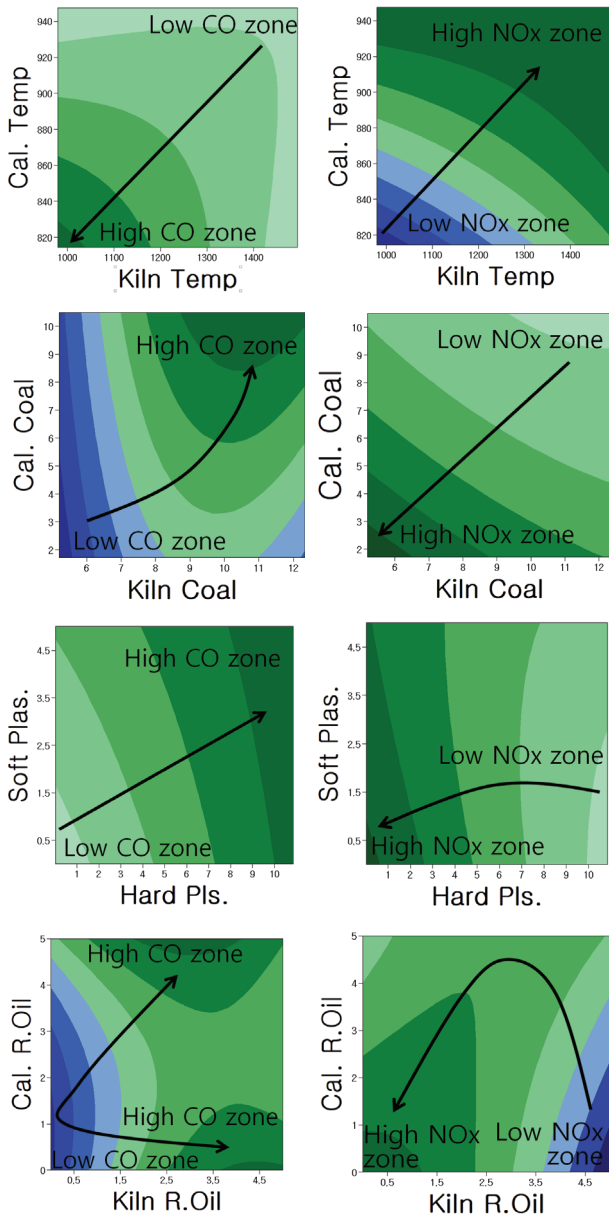


Fig. 7. Compare of factor affecting CO & NOx emission using contour plot (left : CO, right : NOx)

내는 것은 여러 요인이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 판단 되어 단편적으로 파악하기는 어렵다. 다만, 그중에서도 주요한 것으로 추정되는 요인으로는 첫째로 고온의 연소과정에서는 공기중 N₂ 분자가 산화되면서 발생하는 thermal NO_x (Zeldvich 1946)가 필연적으로 발생한다는 점이다. 이에 따라 연소 온도가 증가할수록 thermal NO_x 발생도 증가하고, 반대로 연소 온도가 낮아지면 thermal NO_x 발생은 감소하지만 연료가 완전히 연소되기가 어려워지면서 CO의 발생은 증가하는 반비례 관계가 성립한다(Fig. 8,

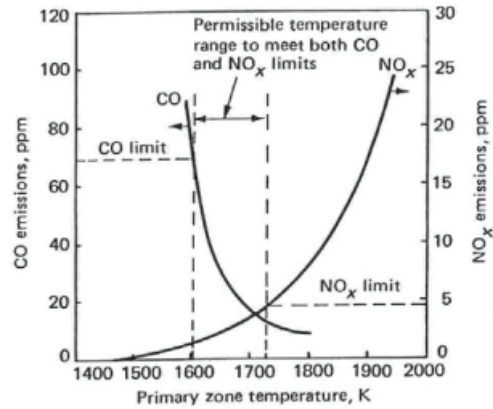


Fig. 8. Typical CO and NOx trends (Lefebvre, 2000)

Lefebvre 2000; Shimizu et al. 1992; Rozendaal et al. 1997). 둘째로 연료의 연소과정에서 생성되는 NO_x의 양은 연소 온도뿐 아니라 연료의 휘발분(volatile matters), 입자의 크기와 같은 연료의 상태에 의해서도 영향을 받으며(Liu et al. 2013a), 연료의 화학조성에 따라서도 연소에 필요한 산소량이 많을수록 NO_x 발생량이 증가한다(Groendyk and Rothamer 2015), 특히 대체연료는 화석연료에 비해 질소의 함량이 적고, 연소로 인해 생성되는 화염의 온도가 낮기 때문에 시멘트 소성설비에서 대체연료를 연소시킬 경우 유연탄이나 코크스(cokes)에 비해 NO_x 저감 효과가 큰 것으로 평가된다(Liu et al. 2013b).

살펴본 바와 같이 NO_x와 CO의 배출간에는 음의 상관관계가 성립하기 때문에 설비의 구조적 변경, 혹은 원료나 연료의 성질 변경과 같은 근본적인 개선 없이는 NO_x와 CO를 동시에 저감하는 것은 매우 어려운 기술로 여겨지고 있다. 특히 단순히 폐플라스틱류, 재생유 등 대체연료의 사용량을 제한하는 것은 배출물질 저감에 아무런 도움이 되지 못하며 오히려 NO_x 배출을 증가시킬 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구는 시멘트 소성공정에 연료로 사용된 가연성 산업부산물 및 생활폐기물의 사용량과 대기배출가스중 유해성분인 NO_x 및 CO 발생량을 비교함으로써 상관관계를 확인하기 위해 실시되었으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 배출물질인 NO_x와 CO간에는 NO_x가 증가하면 CO는 저감하는 매우 명확한 음의 상관관계가 있는 것으로 확인되었다.

- 2) NOx는 원료량, kiln 및 calciner 온도, 요소수 투입에 의한 SNCR 가동여부와 같은 공정요인을 비롯해 calciner에 투입된 경질 플라스틱류 대체연료의 투입량에 직접적인 영향을 받았다. 경질 플라스틱류의 투입량이 증가하면 NOx 배출이 저하하였는데, 이는 불완전연소가 발생하기 쉬운 연료 특성상 기발생한 NOx를 N₂로 환원하는 효과를 유발하기 때문으로 판단된다.
- 3) CO는 kiln 및 calciner 온도와 경질 및 연질 플라스틱류와 같은 대체연료의 투입량에 강한 영향을 받으며, 특히 NOx 배출량과는 정 반대의 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.
- 4) 본 분석에서 대체연료 사용이 대기배출가스중 유해성분 발생에 미치는 영향에 대해 간략히 정리하면 경질 플라스틱류의 사용량 증가는 NOx 저감, CO 증가를 유발하며, 연질 플라스틱류의 사용 증가는 CO 증가를 유발하는 것으로 분석되었으며, 재생유의 경우에는 NOx 및 CO 배출에 기여하는 바가 명확하지 않았다. 이러한 분석결과는 폐기물 대체연료의 사용이 NOx나 CO와 같은 유해성분 발생을 유발하지 않으며 오히려 긍정적으로 기여할 수 있음을 시사하며, 앞으로 SOx, VOCs(Volatile Organic Compounds)와 같은 오염물질에 대한 확장 분석도 필요하다고 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 생활폐기물 재활용 기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 2020002740001)으로 수행되었습니다.

References

- Beychok, M.R. (1973). NOx emission from fuel combustion controlled, *Oil & Gas Journal*, **3**, 53-56.
- EPA. (1994). Alternative Control Techniques Document Update – NOx Emissions from Cement Manufacturing, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sector Policies and Programs Division, Research Triangle Park, North Carolina.
- EPA. (2000). NOx Control Technologies for the Cement Industry – Final Report, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sector Policies and Programs Division, Research Triangle Park, North Carolina.
- EPA. (2007). Alternative Control Techniques Document Update – NOx Emissions from New Cement Kilns, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sector Policies and Programs Division, Research Triangle Park, North Carolina.
- FLSmith. (2003). Emission from Cement Kilns of SO₂ and NOx, 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.
- Groendyk, M.A., Rothamer, D. (2015). Effects of fuel physical properties on auto-ignition characteristics in a heavy duty compression ignition engine, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, **8(1)**, 200-213.
- 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.
- Lefebvre, A.H. (2000). Gas Turbine Combustion, Taylor & Francis.
- Liu, H., Xu, J., Zheng, Z., Li, S., Yao, M. (2013a). Effects of fuel properties on combustion and emissions under both conventional and low temperature combustion mode fueling 2,5-dimethylfuran/diesel blends, *Energy*, **62**, 215-223.
- Liu, H.B., Chen, X.D., Gu, J. (2013b). NOx Reduction Review on Fuel Alternative in Cement Kiln, *Advanced Materials Research*, **864**, 1626-1629.
- Rose, D., Brentrup, L. (1995). Effective Emission Reduction when Using Secondary Materials at the Siggenthal Cement Works in Switzerland, *Zement-Kalk-Gips*, **4**, 204-214.
- Rozendaal, C.M., Witcamp, J.G., Vliet, H.N., Vissers, A.M.C. (1997). Impact of coal quality and coal blending on NO emissions for two pulverized coal fired unit, *Proceedings of the Combined Utility Air Pollutant Control Symposium*, Pleasant Hill, CA, USA, 25-29.
- Shimizu, T., Sazawa, Y., Adschiri, T., Furusawa, T. (1992). Conversion of char bound nitrogen to nitric oxide during combustion, *Fuel*, **71**, 361-365.
- 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.

- Winter, N. (2009). Understanding Cement, WHD Microanalysis Consultants Ltd., Suffolk, 32.
- Zeldvich, Y.B. (1946). The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions, Acta Physicochimica U.S.S.R., **21**, 577-628.

시멘트 소성공정에 사용된 대체연료와 대기배출가스간 상관관계 연구

본 연구에서는 시멘트 소성공정에 연료로 사용된 가연성 산업부산물 및 생활폐기물의 사용량과 대기배출가스중 유해성분인 NO_x, CO 발생량을 비교함으로써 상관관계를 확인하고자 하였다. 분석은 천연연료로서 유연탄, 대체연료로서 연질 플라스틱류(비닐류 등 풍력에 의해 비산되기 쉬운 성질의 플라스틱류), 경질 플라스틱류(폐고무, PET 등 풍력에 비산되지 않는 성질의 플라스틱류), 재생유를 사용하는 국내 A시멘트 제조사 소성설비의 연료투입량 및 연소온도 등 2019년 공정 데이터를 독립변수로 하고, stack으로 배출되는 NO_x, CO량을 종속변수로 하여 반응표면분석(RSM) 기법을 활용해 상관관계를 분석하였다. 분석결과 폐기물마다 배출물질에 미치는 영향이 상이함을 확인하였고, 특히 경질 플라스틱류는 CO 배출은 증가시키지만 NO_x를 저감하는 효과가 뛰어난 것으로 분석되었다.