시멘트 제조공정의 환경적 취약 투입물/환경오염물 파악 및 최적종말처리 공정 선정

Identification of the Environmentally Problematic Input/Environmental Emissions and Selection of the Optimum End-of-pipe Treatment Technologies of the Cement Manufacturing Process

이주영 · 김윤하 · 이건모[†]

Joo-Young Lee · Yoon-Ha Kim · Kun-Mo Lee[†]

아주대학교 환경안전공학과

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

(Received June 19, 2017; Revised July 12, 2017; Accepted July 28, 2017)

Abstract : Process input data including material and energy, process output data including product, co-product and its environmental emissions of the reference and target processes were collected and analyzed to evaluate the process performance. Environmentally problematic input/environmental emissions of the manufacturing processes were identified using these data. Significant process inputs contributing to each of the environmental emissions were identified using multiple regression analysis between the process inputs and environmental emissions. Optimum combination of the end-of-pipe technologies for treating the environmental emissions considering economic aspects was made using the linear programming technique. The cement manufacturing processes in Korea and the EU producing same type of cement were chosen for the case study. Environmentally problematic input/environmental emissions of the domestic cement manufacturing processes include coal, dust, and SO_x. Multiple regression analysis among the process inputs and environmental emissions revealed that CO₂ emission was influenced most by coal, followed by the input raw materials and gypsum. SO_x emission was influenced by coal, and dust emission by gypsum followed by raw material. Optimization of the end-of-pipe technologies treating dust showed that a combination of 100% of the electro precipitator and 2.4% of the fiber filter gives the lowest cost. The SO_x case showed that a combination of 100% of the dry addition process and 25.88% of the wet scrubber gives the lowest cost. Salient feature of this research is that it proposed a method for identifying environmentally problematic input/environmental emissions of the manufacturing processes, in particular, cement manufacturing process. Another feature is that it showed a method for selecting the optimum combination of the end-of-pipe treatment technologies.

Key Words : Environmentally Problematic Input, Environmental Emission, Manufacturing Process, Multiple Regression Analysis, Optimum End-Of-Pipe Treatment Technology

요약 : 기준공정과 개선대상공정 간의 투입물(Input, Material and energy), 배출물(Output, Product, Co-product), 환경오염물(Environmental emission) 데이터를 수집하고 공정 성과를 분석하였다. 이를 통해 환경적으로 주요한 투입물과 환경오염물을 파악하였다. 제조공정의 투입물과 환경오염물 간의 상관관계 분석을 통해 각 환경오염물에 대한 기여도가 큰 투입물을 파악하였다. 주요 환경오염물 처리 시, 경제적 최적화를 통한 종말처리공정 조합을 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 규명하였다. 사례 연구로는 동일한 형태의 시멘트를 생산하는 EU와 국내 시멘트 제조공정을 선정하였다. 국내 시멘트 제조공정에서는 석탄이 주요 투입물로, 먼지, SO_x가 주요 환경오염물로 파악되었다. 제조공정의 투입물과 환경오염물 간의 다중회귀분석 결과 석탄>원자재>석고 순으로 CO₂발생량에 기여도가 큰 것으로 나타났다. SO_x발생량의 경우 석탄의 기여도가 가장 컸으며, Dust 발생량의 경우 석고>원자재 순으로 기여도가 큰 것으로 나타났다. Dust 종말처리공정 최적화에서 전기집진기술 100%, 섬유필터기술 2.4% 조합이 최적이었다. SO_x종말처리공정 최적화에서는 건식첨가공정기술 100% 습식세정기술 25.88% 조합이 최적이었다. 이 연구의 특징은 제조공정에서 문제가 되는 주요 투입물과 환경오염물을 파악하는 방법을 제시하였다는 점이다. 또한, 기술적·경제적으로 최적의 조합인 종말처리공정 선정 방법을 제시하였다는 점이다.

주제어 : 환경적 주요 투입물, 환경오염물, 제조 공정, 다중회귀분석, 최적종말처리공정

1. 서론

점점 진화하고 있는 청정생산의 미래는 ‘지속가능한 소비 생산을 기반으로 한 청정시스템’을 추구하게 될 것으로 전망되고 있다. 여기서 청정생산이란, 인간과 환경에 대한 위험을 최소화하고 환경·경제 효율성을 높이기 위하여 서비스, 공정, 제품에 대한 종합적이고 예방적인 환경전략을 지

속적으로 적용하는 활동을 말한다.

청정생산 분야 가운데 청정공정 분야는 기존 생산공정의 혁신적 개선을 통해 환경오염물 발생을 완전 제거 또는 획기적 저감을 기하는 분야로 정의된다. 특히, 제조시스템을 경제적·환경적으로 고효율화하는 분야가 주목받고 있다. 청정생산을 위한 제조공정의 청정화, 즉 오늘날 우리 사회는 제조공정의 최적화를 통한 청정생산공정이 필수불가결한 사

[†] Corresponding author E-mail: kunlee@ajou.ac.kr Tel: 031-219-2405 Fax: 031-215-5145

회로 변화하고 있다.^{1,2)}

청정생산공정을 위해 환경오염물이 다량 배출되는 제조공정의 주요 환경오염물에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. Deborah 등³⁾은 Portland cement 제조공정에서 전통적인 시멘트 제조방식과 Blended, Recycled Cement kiln dust (CKD), CO₂ sequestration 등 대안 제조공정들의 환경성을 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 통해 비교하였다. Razuana 등⁴⁾은 재활용 플라스틱을 통한 플라스틱 수지 생산 설비에서 청정 생산 전략 평가를 통해 연구 공장, 전기 사용, 고형 폐기물 배출, 경유 사용 등 네 가지 옵션에서의 이산화탄소 저감에 대해 연구하였다. 박 등⁵⁾은 원료투입물 대체방법으로써 용융슬래그를 시멘트 클링커 제조용 주원료로 사용하기 위해 전과정평가를 활용함으로써 시멘트소성로 내 탈탄산 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양을 저감하기 위한 청정기술 적용을 수행하였다. 또한, Karkoszka⁶⁾는 종말처리 공정 최적화를 통해 환경적인 위험성을 최소화하는 방법을 연구하였다.

주요 환경오염물 저감에 관한 연구 외에 그에 따른 경제적인 비용 절감에 대한 연구들도 수행되고 있다. Irina 등⁷⁾은 운송단계의 총 물류비용과 그 환경 영향 사이의 관계를 이산화탄소 배출량에 대한 새로운 모델링 기반을 통해 제시하였다. Till 등⁸⁾은 EU의 Industrial Emissions Directive (IED)에서 제시하는 사례 중 화력발전소에 탈질소산화물 시설을 새로 설치할 때 발생하는 환경적 이익을 비용-이익 분석(Cost-benefit analysis, CBA)을 통해 비교·분석하였다. 공 등⁹⁾은 국내 환경기술 수준과 EU BAT (Best Available Techniques) 도입 시 비용사례분석에 관한 연구에서 제조공정 간의 경제적인 분석을 시도하였다. 이 때, EU의 경우 평균개념의 배출기준을 사용하는데, 국내배출기준의 경우 피크치(Peak value) 개념을 사용하기 때문에 국내배출허용기준을 EU BAT 수준으로 관리하기 위해서는 많은 비용투자가 필요함을 들어 EU BAT의 경제적 도입을 연구하였다.

이처럼 종말처리공정 기술을 제조공정에 적용할 경우 발생하는 비용을 절감하기 위한 연구들도 선행되었다. 환경오염물을 처리하는 종말처리공정 도입 시 발생하는 환경적 비용을 산정하는 연구들도 수행되고 있다. 선행 연구들은 오염물 배출량이 많은 부분을 도출하여 개선하는 연구와 제조공정에 종말처리공정 기술을 도입할 때 발생하는 경제적 비용 절감에 관한 연구로 구분되어 수행되고 있다. 그러나 경제·기술적 문제를 동시에 고려하여 주요 환경오염물 처리와 경제적 비용을 동시에 최적화하는 연구는 활발히 수행되고 있지 못한 상태이다.

따라서 이 연구의 목적은 제조공정의 주요 투입물과 환경오염물을 체계적으로 파악하고, 기술적·경제적으로 최적화된 종말처리공정 조합 선정 방법을 제시하는 것이다. 구체적인 연구 목적으로는 첫째, 제조공정의 투입물과 배출물 간의 관계 분석을 통해 주요 투입물과 환경오염물 배출물을 파악하고, 둘째, 주요 환경오염물을 처리하는 종말처리 공정 간의 최적 조합 선정 방법을 제안하는 것이다.

2. 연구 방법

동일한 제품(동일한 기능을 수행하는 제품)을 생산하는 국내 소재 제조 사업장과 EU (European Union) 소재 제조 사업장을 각각 1개소를 선정하여 각 사업장의 투입물(Input, Material and energy), 배출물(Output, Product, co-product), 환경오염물(Environmental emission) 및 종말처리기술(End-of-pipe technologies) 데이터를 수집, 분석하였다. 국내 소재 공정을 개선대상공정(Target process)으로, EU 소재 공정은 기준공정(Reference process)으로 명명하였다. EU 사업장의 경우 직접적으로 데이터를 얻기가 불가능하여, 관련 문헌을 통해 얻은 평균 값을 1개 사업장의 데이터로 가정하여 진행하였다.

개선대상공정의 주요 환경오염물을 파악하기 위해 제조 공정(설비 포함)의 투입물, 배출물 및 환경오염물 데이터를 문헌연구를 통하여 수집하였다.¹⁰⁾ 대상 제품으로는 시멘트(Portland cement I)를 선정하였다. 시멘트 1 kg을 기능단위로 선정하였으며, 기준공정과 개선대상공정의 투입물, 배출물, 환경오염물 데이터를 기능단위 기준으로 정규화하였다.

시멘트(Portland cement I) 제조공정에 관한 정보는 수집 가능한 물질 정보 위주로 수집하였으며 그 외 수집이 불가능한 정보는 제외하였다. EU IED의 시멘트산업 BAT 연구를 참조하여¹¹⁾ 수집 대상 투입물 지표로는 원자재(Raw material*), 석고(Gypsum), 전기(Electricity), 석탄(Coal)을, 배출물 및 환경오염물 지표로는 시멘트(Portland cement I), CO₂, NO_x, SO_x, Dust를 각각 선정하였다.

시멘트 세부 제조공정인 채광 및 조쇄(Quarry and Crush)부터 시멘트 분쇄 및 출하(Finish grinding)까지 전 공정을 하나의 시멘트 제조공정으로 통합하여 데이터 수집 및 문헌 연구를 실시하였다. Ewan 등¹²⁾은 시멘트 제조공정을 대상으로 기존 EU LCI DB (Life Cycle Inventory Database)의 구축 현황을 조사, 비교 분석하였다. 이 자료를 토대로 시멘트 제조공정의 운전 및 배출 데이터를 수집하였다. 또한 Ecoinvent, ELCD (European reference Life Cycle Database) 등 유럽시멘트협회(CEMBUREAU)가 수행한 시멘트 제조공정 LCI DB를 추가로 수집하였다.¹³⁻¹⁵⁾ 이 문헌들에서 총 7개의 표본을 수집하였다. 수집된 표본들의 산술 평균값을 각 지표 별로 도출하였다. 이 값을 EU 소재 시멘트 1개 제조 사업장의 데이터로 가정하였다.

국내 시멘트 제조공정의 투입물 데이터의 경우, 한국환경산업기술원(KEITI)에서 LCI DB 구축 당시 Portland CEMENT I을 생산하는 국내 대표 기업인 S 기업의 데이터를 활용하였다. 배출량 데이터는 S 기업의 단일 데이터를 얻지 못하여, 강원도 강릉, 동해, 영월과 충북 단양 소재의 국내 시멘트 제조 공장들의 데이터 평균 값인(S 기업의 데이터 값 포함) 국내 시멘트 LCI DB 상의 단일 값을 활용하였다.¹⁶⁾ 실제 1개 사업장에 대한 이상적인 데이터를 활용하여 연구를 설

*Raw material: 석회석, 경석, 비산회, 슬러지 등을 투입하여 건조, 미분쇄과정 등의 공정을 거쳐 시멘트 반제품인 크링커를 만드는데 적합하도록 만든 원료

Fig. 1. Manufacturing process diagram.

제하고자 하였으나, 데이터 수집이 어려워 수집 가능한 데이터를 토대로 1개 제조공정의 데이터를 가정하였다. 개선대상 공정과 기준공정 간의 투입물, 배출물, 환경오염물의 투입 및 배출 효율 차이를 규명하기 위해 저자가 개발한 gap 분석 방법을 사용하였다.¹⁷⁾ gap 분석 방법은 아래 설명한 바와 같다.

Fig. 1에 나타난 제조공정의 투입물, 배출물, 및 환경오염물 간의 제조공정 모식도를 토대로 i^{th} 제조공정의 X (Input random variable)와 Y (Output random variable) 값을 도출하였다.

여기서,

m_{ij} = i 번째 제조공정으로의 투입물 j 의 무게
 m_{ik} = i 번째 제조공정에서의 배출물 k 의 무게

m_{ij} , m_{ik} 값을 i 번째 제조공정의 주요산물(Major product) 무게로 나누어 정규화 하였다. 나눈 값을 식 (1), (2)에 나타낸 바와 같이 a_{ij} , a_{ik} 로 정의하였다.

$$a_{ij} = \frac{m_{ij}}{\text{weight of the major product of the } i^{th} \text{ process}} \quad (1)$$

$$a_{ik} = \frac{m_{ik}}{\text{weight of the major product of the } i^{th} \text{ process}} \quad (2)$$

따라서 a_{ij} , a_{ik} 는 각각 i^{th} 공정 기준 j 번째 물질의 투입계수, k 번째 물질의 배출계수이다.

개선대상 공정과 기준공정 지표 모두 각 공정의 주요산물 단위 무게기준으로 정규화 되어 있기 때문에 각 공정별 투입계수, 배출계수를 이용하여 그 차이 ($\Delta i(gap)$)를 식 (3), (4)에 나타낸 바와 같이 산정하였다.

$$\Delta i(gap: \text{투입계수}) = a_{ij}(\text{기준공정}) - a_{ij}(\text{개선대상공정}) \quad (3)$$

$$\Delta i(gap: \text{배출계수}) = a_{ik}(\text{기준공정}) - a_{ik}(\text{개선대상공정}) \quad (4)$$

각 공정의 $\Delta i(gap)$ 값을 EU의 투입 및 배출계수로 각각 나누어 정규화된 $\Delta i(gap)$ 을 구하였다. 정규화된 $\Delta i(gap)$ 값이 큰 j , k 를 제조공정에 대한 주요 투입물과 환경오염물로 정의하고, 이를 개선대상으로 도출하였다.¹⁷⁾ 여기서 주요 투입물이란, 공정 내 투입량이 많거나 환경오염물 배출을 유발하는 주 원인이 되는 물질로, 환경적 개선 대상으로 분류할 수 있는 투입물을 말한다. Gap 분석 방법의 경우 기준 공

정과 개선대상공정간의 차이를 기준 공정 대비 정규화를 통해 그 차이를 분석하는 방법이다.

제조공정의 투입물과 환경오염물 간의 다중회귀분석을 통해 각 환경오염물에 대한 투입물의 기여도를 파악하였다. SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 소프트웨어를 통해 다중회귀분석을 실행하였다.^{18,19)} 식 (5)를 이용하여 산출된 회귀계수를 통해 각 환경오염물(종속변수)에 투입물(독립변수)들이 미치는 기여도를 파악하였다.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n + \epsilon \quad (5)$$

여기서,

B = 비표준화 회귀계수
 X = 독립변수
 Y = 종속변수
 ϵ = 회귀 오차

상수항(B_0)은 회귀식의 Y 절편 값이며 비표준화계수(B)는 회귀식에서의 회귀계수(B_n), 유의확률(p)은 해당 비표준화계수의 통계적인 유의성을 볼 수 있는 척도이다. 독립변수 각각의 단위가 다르기 때문에 표준화계수(Beta)를 기반으로 진행하였다. 표준화계수란 독립변수들의 회귀계수 단위(e.g. kg 또는 kwh)를 통일시킴으로써 각각의 계수의 크기나 부호 등의 비교를 할 수 있도록 만든 수치이다.²⁰⁻²²⁾

앞서 파악한 주요 환경오염물을 처리하기 위한 최적의 종말처리공정 조합 선정 방법에는 선형계획법(Linear programming)에 기초한 심플렉스 법(Simplex method)을 사용하였다. 이를 위하여 환경오염물의 처리요구량에 관한 데이터, 환경오염물을 처리하는 종말처리공정 기술 관련 데이터(연간 제거(처리)가능량, 처리 효율, 연간 총 유지 비용 등)를 수집하였다. 개선대상공정의 환경오염물 처리 결정변수($X_1, X_2, \dots, X_n$)와 기준공정의 연간 제거 가능량, 비용 정보 등을 활용하여 목적함수 Z 를 설정하였다. 설정한 목적함수 Z 와 제한조건들을 통해 기술적·경제적 최적 종말처리공정 조합을 선정하였다.²³⁾

3. 결과 및 토의

이 연구에서 제시한 방법을 적용하기 위한 사례 연구 대상으로 동일한 기능(유사 제품생산설비)을 수행하는 시멘트 제조공정을 선정하였다. 이 연구의 시멘트 제조공정 모식도를 Fig. 2에 제시하였다.

Fig. 2. CEMENT I manufacturing process diagram.

Table 1. CEMENT I manufacturing process input, output data

Input	EU (m_i)	a_i (EU)	Korea (m_i)	a_i (KOREA)
Raw material	1,463.5	1.4635	1,429.0	1.4290
Gypsum	47,700	0.047700	36,300	0.036300
Electricity	138.80	0.13880	99,590	0.099600
Coal	23.400	0.023400	105.30	0.10530
Output	EU (m_{ik})	a_{ik} (KOREA)	Korea (m_{ik})	a_{ik} (KOREA)
Cement	1,000.0	1.0000	1,000.0	1.0000
CO ₂	822.69	0.82269	1048.8	1.0488
SO _x	2.4354	0.0024354	1.4189	0.0014189
NO _x	0.6883	0.00069000	1.1737	0.0012000
Dust	1,2800	0.0012800	34,330	0.034300

Unit; m_i , m_{ik} = kg/ton cement a_i , a_{ik} =kg/kg cement for electricity use kwh instead of kg

시멘트(Portland cemen I)를 제조하는 기준공정과 개선대 상공정의 투입물, 배출물, 환경오염물 데이터를 수집, 분석 하였다. 수집한 EU와 국내 데이터를 바탕으로 1톤의 시멘 트를 생산하는데 필요한 투입물, 배출물, 환경오염물 양과 각 투입물, 배출물 및 환경오염물 양을 1톤의 시멘트를 기 준으로 산정한 투입 및 배출계수를 Table 1에 나타내었다.

국내의 경우 EU에 비해 석탄 사용량이 많고, 그 외 투입 물은 오히려 적은 것으로 나타났다. 그러나 CO₂, NO_x, Dust 등의 환경오염물은 EU에 비해 더 많이 발생하였다. 따라서 국내 시멘트 제조 공정은 개선이 필요한 공정이라고 판단 하였다.

기준공정인 EU의 투입계수를 분모로 하여 정규화한 $\Delta i(gap)/a_{ij}$ (EU) Raw material, Gypsum, Electricity, Coal 값은 0.024, 0.239, 0.282, -3.500이었다. 한편 EU의 배출계수를 분모로 하여 정규화한 $\Delta i(gap)/a_{ij}$ (EU) CO₂, SO_x, NO_x, Dust 값은 -0.275, 0.417, -0.705, -28.820이었다.

국내 시멘트 제조공정에서의 주요 투입물은 석탄(Coal), 주 요 환경오염물은 먼지(Dust), 황산화물(SO_x)로 파악되었다. 개선대상공정의 투입물 중 석탄을 제외한 기타 투입물 사 용량은 기준공정인 EU보다 적었으나, 황산화물을 제외한 환경오염물은 더 많이 발생하였다. 이는 국내 시멘트 제조 공정의 경우 동일한 양의 시멘트를 생산할 때, 환경오염물 발생 원인에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 석탄이 기준 공정 대비 약 4.5배 더 많이 사용하기 때문인 것으로 판 단된다.

Table 2. Standard coefficient of dependent variables

	X ₁ (Raw material)	X ₂ (Gypsum)	X ₃ (Electricity)	X ₄ (Coal)
Y ₁ (CO ₂)	0.386	0.139	-	0.892
Y ₂ (SO _x)	-0.360	-	-	0.592
Y ₃ (NO _x)	0.151	-	-	0.980
Y ₄ (Dust)	0.483	0.363	-	-

기준공정인 EU 시멘트 제조공정을 대상으로 수집된 투입 물, 환경오염물 간 상관관계 분석에 필요한 독립변수와 종 속변수를 정의하였다. 독립변수는 X₁ (Raw material), X₂ (Gypsum), X₃ (Electricity), X₄ (Coal)를, 종속변수는 Y₁ (CO₂), Y₂ (SO_x), Y₃ (NO_x), Y₄ (Dust)를 선정하였다. 종속변수 Y₁, Y₂, Y₃, Y₄ 와 4개의 독립변수들 간의 상관관계를 회귀식 식 (6)~(9)에 나타내었다.

$$Y_{CO_2} = 618.538 + 79.815X_1 + 526.810X_2 + 2642.047X_4 \quad (6)$$

$$Y_{SO_x} = 1.688 - 1.099X_1 + 25.884X_4 \quad (7)$$

$$Y_{NO_x} = -0.621 + 0.827X_1 + 77.048X_4 \quad (8)$$

$$Y_{Dust} = -14.250 + 7.850X_1 + 107.895X_2 - 48.569X_4 \quad (9)$$

각 종속변수에 대한 4개의 독립변수들의 표준화계수를 Table 2에 나타내었다.

Y₁(CO₂)의 경우 X₄(Coal)의 기여도가 가장 크게 나타났다. 시멘트 제조공정에서 석탄은 대부분 소성공정 연료(Fuel) 로 사용되며, 석탄 투입량이 증가할수록 CO₂배출량이 증가 한다. 이는 회귀분석 결과와 일치한다고 판단된다. X₁(Raw material)의 표준화계수 또한 0.386으로 기여도가 높게 나타 났다. 소성 공정에서 발생한 가스 등을 처리하는 하소공정에서 원자재 내 탄산칼슘(CaCO₃) 처리 시 물리·화학적 반응에 의해 CO₂가 발생되기 때문으로 판단된다.

Y₂(SO_x)의 경우 X₄(Coal)의 기여도가 가장 크게 나타났다. SO_x발생량은 황 화합물 총 투입량과 사용된 공정 유형에 좌우되게 된다. X₄(Coal) 내 황 성분 때문에 Y₂(SO_x)발생량 이 증가한 것으로 판단된다. BREF (Best Available Techniques reference document)의 ‘시멘트 클링커 생산 시 원료와 시멘 트 혼분의 화학분석’에 따르면 황 함량은 각 원료 별 최소

0.0부터 최대 1.5(질량%)로 낮은 비율을 보이고 있으므로,¹¹⁾ $Y_2(SO_x)$ 에 대한 $X_1(\text{Raw material})$ 의 기여도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

$Y_3(NO_x)$ 의 경우 $X_4(\text{Coal})$ 의 기여도가 가장 크게 나타났다. NO_x 는 연소공기 내 열 NO_x (Thermal NO_x)와 연료에 포함된 $NO_x(\text{Fuel } NO_x)$ 로 구분할 수 있다. 열 NO_x 는 1,050℃ 이상의 온도에서 형성되므로 연소 구역의 온도와 공기과잉 계수가 높아질수록 발생량이 증가한다.²⁴⁾ 시멘트 제조공정에서 열을 발생시키는 연료는 크게 재래식 화석연료 및 폐기물연료이다. $X_4(\text{Coal})$ 는 이 연료 중 하나로 $X_4(\text{Coal})$ 의 사용량은 $Y_3(NO_x)$ 발생량에 큰 기여도를 가지고 있을 것으로 판단할 수 있다.

$Y_4(\text{Dust})$ 의 경우 $X_1(\text{Raw material})$ 의 기여도가 가장 크게 나타났다. Dust는 소성(Kiln), 원료분쇄 및 혼합(Raw mill), 클링커 냉각(Clinker coolers), 시멘트분쇄 및 혼합(Cement mills) 등 다양한 공정에서 발생된다.⁹⁾ 원자재 투입량이 많아질수록 재료 저장 및 취급량이 상승하기 때문에 기여도가 큰 것으로 판단된다.

CO_2 에 대한 기여도는 석탄 > 원자재 > 석고 순이었다. SO_x 와 NO_x 에 대한 기여도는 석탄이 가장 컸으며, Dust에 대한 기여도는 석고 > 원자재 순이었다. 이들 상관관계 분석 결과는 개선대상 공정의 주요 환경오염물 처리 시 기여도가 큰 투입물을 파악할 때 필요한 정보로 활용될 수 있다.

파악된 주요 환경오염물을 처리하는 종말처리공정의 기술적·경제적 최적 조합 선정을 위하여 EU BREF에서 제시하는 BAT를 국내 시멘트 제조 공정에 도입할 시, 최적 조합을 선정하는 사례 연구를 수행하였다. 이를 위하여 EU 25개국 내 시멘트 제조 시설 1곳에 대한 종말처리공정을 선정하였다. 시설 1개 당 시멘트 생산량은 EU 25개국 평균값인 998,134.33 ton/year을 사용하였다.

시멘트 제조공정에서 주요 환경오염물로 판명된 Dust와 SO_x 의 종말처리공정기술을 선정하였다. Dust의 경우에는 전기집진기기술(공기 스트림에서 입자상물질의 경로에 정전계를 발생시켜 입자들이 음으로 대전되어 양으로 대전된 집진판 쪽으로 이동하게 하는 기술)과 섬유필터기술(가스는 통과하지만 먼지는 통과되지 않는 섬유 멤브레인을 사용하는 기술)을 선정하였다. SO_x 의 경우에는 건식첨가공정기술(석회 수화물을 원료 성분과 함께 원료 분쇄기에 넣거나 소성로 공급물에 직접 첨가하여 SO_x 를 포집하는 기술), 습식제정기기술(석탄 연료 발전소에서 배기가스 탈황에 가장 널리 사용되는 기술로 시멘트 제조공정에서는 SO_x 배출량을 저감하기 위한 습식 공정이 정착된 기술)을 선정하였다.

EU 시멘트 제조 시설 1개에서 시멘트를 생산하는 데 발생하는 Dust와 SO_x 의 양을 각각 구하였다. EU 시멘트 BREF 상의 BAT-AELs (Emission Levels Associated with the Best Available Techniques, mg/m^3)와 EU 시멘트 배출 가스의 평균 체적을 바탕으로 BAT 수준의 오염물질 처리 후 배출량을 구하였다. 발생량과 배출량의 차이를 처리 요구량으로 산정하였으며,¹⁹⁾ 그 결과 Dust의 경우 1256.95 ton/year, SO_x 의

Table 3. Treatment capacity of Dust and SO_x

Parameter	Technologies	Emissions (ton/y)	Treatment efficiency (%)	Treatment capacity (ton/y)
Dust	Electric precipitator	1279.9	96	1228.71
	Fiber filter		93	1190.31
SO_x	Dry addition process	687	60	412.21
	Wet scrubber		90	618.31

Table 4. Annual total cost of the pollutants treatment technologies

Parameter	Technology	Facility cost (EUR)	Operation cost (EUR/ton cement)	Annual total cost (EUR/y)
Dust treatment technologies	Electric precipitator	2.1×10^6	0.08	2.18×10^6
	Fiber filter	2.1×10^6	0.12	2.22×10^6
SO_x treatment technologies	Dry addition process	0.2×10^6	0.08	0.28×10^6
	Wet scrubber	5.8×10^6	0.4	6.19×10^6

경우 572.23 ton/year로 산정되었다.

Dust와 SO_x 종말처리공정 기술 별 연간 오염물질 처리 가능량은 Table 3에 나타난 바와 같이 EU 시멘트 공장 1개 설비 당 배출되는 Dust와 SO_x 의 양과 기술 별 오염물질 저감효율을 바탕으로 산정하였다.²⁰⁾

EU 시멘트 제조 시설 1개에서 시멘트를 생산하는 데 발생하는 Dust, SO_x 의 종말처리공정 기술 별 연간 총 유지 비용은 Table 4에 나타난 바와 같이 연간 평균 시멘트 생산량(998,134.33 t/y), 기술 별 평균 설비투자비(million EUR) 및 기술 별 평균 운전비용(EUR/ton cement)을 바탕으로 산정하였다.²¹⁾

Dust의 종말처리공정 기술의 결정 변수를 X_1 (전기집진기), X_2 (섬유 필터)로 설정하였고, 총 비용함수인 목적함수 Z를 식 (10)과 같이 설정하였다.

$$Z = 2.18 \times 10^6 \text{ EUR/y} * X_1 + 2.22 \times 10^6 \text{ EUR/y} * X_2 \quad (10)$$

목적함수 Z를 최소화하기 위한 제한 조건 설정을 위해 각 Dust 종말처리공정 기술의 연간 환경오염물 제거 가능량, Dust의 연간 처리 요구량을 도출하였다. 전자는 EU 시멘트 공장 1개 설비 당 배출되는 Dust의 양과 기술 별 환경오염물질 저감효율을 바탕으로 산정하였다. 후자는 EU 시멘트 제조 시설 1곳에서 시멘트를 생산하는 데 발생하는 Dust의 양과 EU 시멘트 BREF 상의 BAT-AELs, EU 시멘트 배출 가스의 평균 체적을 바탕으로 BAT 수준의 환경오염물 처리 후 배출량을 구하여 두 양의 차이를 제거 요구량으로 산정하였다. 산정 결과 식 (11)과 같은 제한조건을 산정하였다.

$$1,228.71 \text{ t/y } X_1 + 1,190.31 \text{ t/y } X_2 \geq 1,256.95 \text{ t/y} \quad (11)$$

$$X_j \geq 0, j = 1, 2$$

Dust 종말처리공정의 기술적·경제적 최적 조합 도출 결과, 결정 변수 X_1 (전기집진기)은 1, X_2 (섬유 필터)는 0.024로 도출되었으며, 이때 최소 비용 Z 는 2.23×10^5 EUR/y로 도출되었다. 즉, Dust 종말처리공정 조합의 경우 전기집진기 기술 100% 용량, 섬유필터 기술 2.4% 용량을 채택하여 1년 간 Dust를 처리했을 때 최소비용 2.23×10^5 EUR/y가 최적 조합으로 선정되었다.

같은 방법으로 SO_x 의 종말처리공정 기술의 결정 변수를 X_3 (건식첨가공정), X_4 (습식세정기)로 총 비용함수인 목적함수 Z 를 식 (12)로, 제한조건을 식 (13)으로 각각 설정하였다.

$$Z = 0.28 \times 10^6 \text{ EUR/y} \cdot X_3 + 6.19 \times 10^6 \text{ EUR/y} \cdot X_4 \quad (12)$$

$$412.21 \text{ t/y } X_3 + 618.31 \text{ t/y } X_4 \geq 572.23 \text{ t/y} \quad (13)$$

$$X_j \geq 0, j = 3, 4$$

SO_x 종말처리공정의 기술적·경제적 최적 조합 도출 결과 결정 변수 X_3 (건식첨가공정)은 1, X_4 (습식세정기)는 0.2588로 도출되었으며, 그 때 최소 비용 Z 는 1.88×10^6 EUR/y로 도출되었다. 즉, SO_x 종말처리공정 조합의 경우 건식첨가공정 기술 100% 용량, 습식세정기 기술 25.88% 용량을 채택하여 1년 간 SO_x 를 처리했을 때 최소비용 1.88×10^6 EUR/y가 최적 조합으로 선정되었다.

이처럼 EU BREFs 상의 BAT 등 기준공정에서 사용하는 종말처리기술을 개선대상 공정에 도입할 때, 경제성뿐만 아니라 환경성까지 고려하여 최적의 기술 활용 정도를 파악하여 경제적·환경적으로 최적화된 종말처리공정 조합을 선정할 수 있다. 이는 환경성뿐만 아니라 경제성까지 동시에 고려한 최적화 결과로써 의의가 있다고 판단된다.

이처럼 EU BREFs 상의 BAT 등 종말처리기술을 개선대상공정에 도입할 시, 최적의 기술 활용 정도를 파악하여 기술적·경제적으로 최적화된 종말처리공정 조합을 선정할 수 있다. Karkoszka⁶⁾의 연구에서는 환경오염물을 처리하는 새로운 기술을 도입하여 종말처리공정의 최적화를 통해 환경적인 위험성을 최소화하는 해결책을 제시하는 과정에서 경제성을 고려하지 않았지만, 이번 연구에서는 환경적인 기술적 문제뿐만 아니라 경제성 또한 고려하여 최적화 결과를 도출한 것이 진일보한 부분이라고 판단된다.

4. 결론

국내 시멘트 제조공정의 주요 투입물은 석탄(Coal), 주요 환경오염물은 먼지(Dust), 황산화물(SO_x)로 파악되었다. 시멘트 제조공정의 환경오염물에 대한 투입물들의 기여도를 파악한 결과, CO_2 의 경우 석탄 > 원자재 > 석고 순으로 기

여도가 큰 것으로 나타났다. SO_x 와 NO_x 는 석탄의 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다. Dust는 석고 > 원자재 순으로 기여도가 큰 것으로 나타났다.

Dust와 SO_x 의 기술적·경제적 최적화를 통한 종말처리공정 조합을 선정한 결과, Dust 종말처리공정 조합은 전기집진기 기술 100% 용량, 섬유필터 기술 2.4% 용량을 채택하여 1년 간 Dust를 처리했을 때 최소비용 2.23×10^5 EUR/y가 최적 조합으로 선정되었다. SO_x 종말처리공정 조합은 건식첨가공정 기술 100% 용량, 습식세정기 기술 25.88% 용량을 채택하여 1년 간 SO_x 를 처리했을 때 최소비용 1.88×10^6 EUR/y가 최적 조합으로 선정되었다.

이 연구의 특징은 제조공정의 주요 투입물과 환경오염물을 체계적으로 파악하였다는 점이다. 기준공정과 개선대상공정의 투입물, 배출물, 환경오염물 간의 비교를 통해 환경적으로 취약한 물질을 파악하였다. 투입물과 환경오염물의 상관관계 분석을 통해 각 오염물에 대한 기여도가 큰 투입물을 파악하여 제조공정을 분석하였다. 또한, 파악된 주요 환경오염물을 처리하기 위한 종말처리기술 도입 시 최적화 방법을 적용하여 기술적·경제적으로 최적화된 종말처리공정 조합을 선정하는 방법을 제시하였다는 점이다.

Acknowledgement

이 연구는 한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터의 ‘청정서비스 운영 및 보급 기반구축’ 사업의 정부 용역사업 ‘사업장 운전 및 배출정보 분석과 최적 방법론 도출 연구’ 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(사업기간: 2015.05.01~2016.02.29).

KSEE

References

1. Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, Cleaner Production 3.0, The future of developing cleaner production, KEIT PD Issue Report, Korea(2013).
2. Green Growth Korea, Green Growth National Strategy : Five-Year Plan, Green Growth committee, Korea(2009).
3. Deborah, N. H. and Thomas, D. E., “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies,” *J. Cleaner Production*, **17**, 668~675(2009).
4. Razuana, R. and Abdul, A. A. R., “Carbon dioxide emission reduction through cleaner production strategies in a recycled plastic resins producing plant,” *J. Cleaner Product.*, **141**, 1067~1073(2016).
5. Park, Y. G. and Kim, J.-I., “A study on the Reduction of CO_2 Emission by the Application of Clean Technology in the Cement Industry,” *Clean Technol.*, **16**(3), 182~190(2010).
6. Karkoszka, T., “Minimization of environmental risk by optimization of the end-of-pipe processes,” *J. Achievements in*

- Mater. and Manufacturing Eng.*, **49**(2), 499~506(2011).
7. Irina, H., Mohamed, N., Andrew, P., Andrew, P. and Christine, M., "Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modeling on CO₂ emissions," *Int. J. Product. Economics*, **131**, 313~321(2011).
 8. Till M. B. and Jonathan, V. D. K., "Environmental cost-benefit analysis and the EU Industrial Emissions Directive: Exploring the societal efficiency of a DeNO_x retrofit at a coal-fired power plant," *Energy*, **68**, 125~139(2014).
 9. Gong. S. Y. and Hong. S. P., Comparison of Korea Emission limit values with achievable emission levels in EU BREFs and Case study on Best Available Technique Introduction Cost, Korea Environment Institute, Korea(2013).
 10. Korea National Cleaner Production Center, Industrial technology innovation business [Cleaner service operating & Dissemination base build] annual report, Korea(2016).
 11. Frauke., I. K., Bianca, M. S., Serge, R. and Luis, D. S., Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and control, European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies, EU (2013).
 12. Alejandro, J., Antonio, A., Atte, H., Ewan, B. B. and Arnaldo, C., Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU, Cement and Concrete Research(2004).
 13. Pre' Consultants bv, SimaPro Software v. 4.0(1997).
 14. Intron, An Overview of Available LCI Data: Cement, Concrete and other Building Materials, Intron Report No. 97079 (1997).
 15. Swiss Federal Institute of Technology, Environmental Life-cycle Inventories of Energy Systems An Environmental Database for the Accounting of Energy Inputs in Product Life Cycle Assessment and the Comparative Assessment of Energy Systems, Institute of Energy Technology(1994).
 16. Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI), The webpage of LCI DB, http://www.epd.or.kr/lci/national_dbView.asp?category=7&idx=121(2002).
 17. Ajou University, A study on analysis of factory input output information and deriving optimization method, annual report, Eco-Product Research Institute, Korea(2016).
 18. Seo, H. S., Regression analysis with Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), SPSS academy, Korea(2003).
 19. Lee, T. S., Practical regression analysis using Minitab, Free academy, Korea(2011).
 20. Paul, M. and Patrick, B., Measuring Behaviour: An Introductory Guide: Third Edition, Cambridge University Press, United Kingdom(2007).
 21. Ott, R. L. and Longnecker, M., An Introduction to Statistical Methods & Data Analysis-Seventh edition, CENGAGE Learning, USA(2015).
 22. Samprit, C. and Hadi, A. S., Regression Analysis by Example, Wiley & Sons, USA(2012).
 23. Frederick, S. H. and Gerald, J. L., Introduction to Operation Research Ninth Edition, The Mac Graw Hill(2010).
 24. United States Environmental Protection Agency, "Technical Bullentin: Nitrogen oxides, Why and how they are controlled," Clean Air Technology Center, USA(1999).