

염소 바이패스 분진 및 수세 잔류물의 특성분석

이선목* · 이대근* · 길준호** · 이태우** · 송 훈*** · §염우성***

*㈜정우소재, **쌍용C&E 기술연구소, ***한국세라믹기술원 탄소중립소재센터

Characteristics Analysis of Chlorine Bypass Dust and Water-washed Residue

Sun-Mok Lee*, Daekeun Lee*, Jun-Ho Kil**, Taewoo Lee**, Hun Song*** and §Woo Sung Yum***

*Jungwoo Materials. Co., Ltd., Buyeo 33171, Korea

**Ssangyong C&E Technology Research Center, Sejong 30078, Korea

***Carbon Neutral Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Jinju 52851, Korea

요 약

염소 바이패스 분진의 주성분은 칼슘, 알칼리 및 염소 성분이며, 시멘트 원료로 재활용하기 위하여 염소 성분 제거가 필요하다. 시멘트 업체에서는 염소 바이패스 분진의 시멘트 원료 사용과 KCl 회수를 위해서 수세 처리를 진행하고 있다. 본 연구에서는 염소 바이패스 분진 및 수세 잔류물의 재활용 가능성을 파악하기 위해서 35,000톤/년 규모 염소 바이패스 분진 수세 설비에서 사용한 염소 바이패스 분진과 수세 잔류물의 화학성분, 광물 특성 및 미세구조를 분석하였다. 염소 바이패스 분진의 염소 함량은 23.9%에서 수세 처리 후에 1.4%로 감소하여 수세 잔류물의 시멘트 원료 사용 가능성을 확인하였다. 수세 잔류물에서의 염소 성분은 대부분 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate 광물 형태로 존재하고 있음을 확인하였다. CaO 성분은 22.4%에서 49.8%로 증가하였으며, K₂O 성분은 25.2%에서 5.45% 감소하였다. 수세 잔류물의 평균입경은 22.72 μ m로 수세 전의 염소 바이패스 분진의 평균입경 12.13 μ m와 비교하여 크게 증가한 것을 알 수 있는데, 이것은 염소 바이패스 분진에 포함되어있는 1 μ m 이하의 염소화합물 입자가 수세 과정에서 용해되었기 때문인 것으로 판단되었다.

주제어 : 시멘트, 염소, 바이패스, 분진, 수세

Abstract

The main components of chlorine bypass dust are calcium, alkali, and chlorine. Chlorine components must be removed from chlorine bypass dust to enable its recycling as a cement raw material. Cement companies usually employ water-washing treatment to recover KCl from chlorine bypass dust. In this study, the chemical composition, mineral properties, and microstructure of the chlorine bypass dust and washed residues obtained from a 35,000 ton/year chlorine-bypass-dust-washing facility were analyzed to determine the feasibility of recycling the dust and its washed residues. The chlorine content of the dust decreased from 23.9% to 1.4% after washing, thus confirming the possibility of using the washed residues as a cement raw material. The CaO component increased from 22.4% to 49.8% whereas the K₂O component decreased from 25.2% to 5.45%. The average particle diameter of the water-washed residues was 22.72 μ m, which was significantly higher than that of the chlorine bypass dust before washing (12.13 μ m). This result was attributed to the dissolution of chlorine compound particles measuring less than 1 μ m in the chlorine bypass dust during washing.

Key words : Cement, chlorine, bypass, dust, water washing

Received : September 26, 2023 · Revised : October 11, 2023 · Accepted : October 13, 2023

§ Corresponding Author : Woo Sung Yum (E-mail : wsyum@kicet.re.kr)

Carbon Neutral Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

시멘트업계 폐합성수지 사용량은 2021년 기준 1,952천 톤이며, 종이류와 같은 가연성 연료를 모두 포함하면 2,245천 톤으로 시멘트업계에서의 대체 연료 사용량은 매년 증가하고 있다¹⁾. 폐합성수지는 기존 유연탄 대비 단위 열량 당 이산화탄소 배출량이 적고, 이산화탄소 배출량 규제에도 적용받지 않아 환경친화적 탄소 중립 연료로 활용 가능하다. 하지만 폐합성수지를 비롯한 대부분의 폐기물에는 시멘트 소성 공정에 악영향을 주는 염소 성분이 다량 함유되어 있어 안정적인 시멘트 킬른 운전 을 위해서 염소 바이패스 설비를 가동 중이다. 염소 바이패스 설비 가동 과정에서 다량의 염소 바이패스 분진이 발생하고 있으며, 시멘트 업체는 염소 바이패스 분진을 시멘트 원료, 콘크리트 첨가제, 염화칼륨 회수 및 고화제 등 다양한 분야의 재활용을 추진하고 있다²⁻⁵⁾. 염소 바이패스 분진의 주 성분은 칼슘, 알칼리 및 염소 성분으로 구성되어 있으며, 일부 미량의 중금속 성분이 포함되어 있다^{6,7)}.

염소 바이패스 분진의 재활용은 분진의 특성 및 환경 유해성과 환경규제에 따라 민감한 영향을 받는다. 특히 시멘트 산업에서 폐합성수지 및 일부 중금속이 함유되어 있는 폐기물 사용량이 증가할 경우에는 염소 바이패스 분진 성분 중에 염소 및 중금속 함량이 증가하게 되어 재활용을 위한 분진 전처리 기술이 발달하게 되었다^{8,9)}. 지금까지 상용화를 전제로 개발된 분진 전처리 기술은 크게 침출 기술과 열 처리기술로 구분할 수 있다. 침출 공정 외에 바이패스 분진을 재활용할 목적으로 미국 fuller사에서는 유동층 소성로를 활용하여 20톤/일 규모의 클링커 제조설비를 제작·운영한 실적이 있다. 2000년대에 들어 시멘트 산업에서 사용하는 폐기물 사용량이 증가함에 따른 염소 바이패스 분진 증가로 인하여, 일본과 유럽을 중심으로 분진에 함유된 염소, 알칼리 성분 및 중금속 성분 등을 분리하는 수세 기술이 다시금 개발되고 상용화되었다. 일본 태평양시멘트는 에코시멘트 제조공정에서 발생하는 분진으로부터 중금속, KCl 및 Ca(OH)₂를 분리하는 수세 공정을 적용하였다. 최근 유럽에서도 시멘트 산업에서 폐기물 사용량 증가 및 바이패스 분진 발생량이 증가함에 따라서 침출 공정을 적용하여 바이패스 분진에서 KCl을 회수하는 공정을 Redust사에서 개발하였다. 바이패스 분진 침출공정은 Rohoznik 공장 에서 5kg/batch 규모의 실험 실

적 개발을 토대로 100kg/batch 규모 파일럿 설비를 거쳐, 2013년도에 상업규모 분진 수세 설비를 제작하여 가동하였다. 개발된 수세 공정은 분진에 포함된 CaO 성분과 알칼리(KCl, NaCl) 성분이 물에 용해되는 정도의 차이를 이용한 것으로, 물질별 용해도곱(CaO= 9.17×10^{-6} , KCl= 26.7, NaCl= 37.6) 차이에 따른 용해 특성 차이를 이용하여 수세 공정에 적용한 것이다.

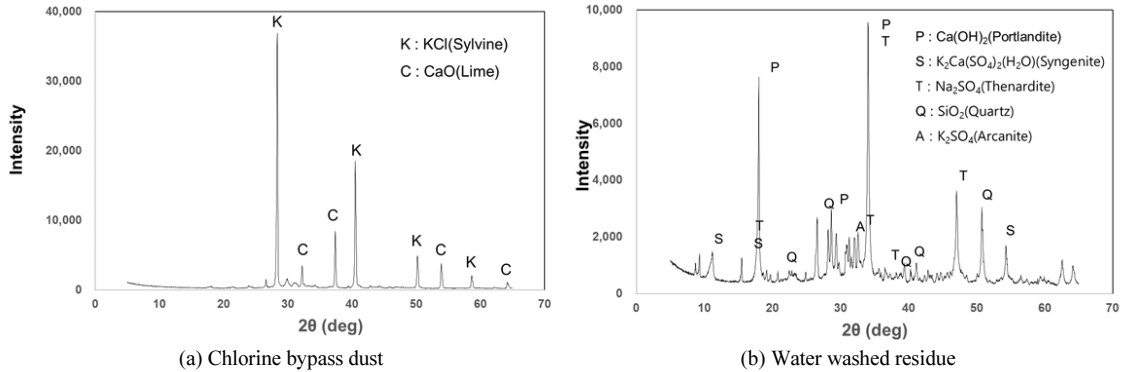
국내 시멘트 사에서도 소성 공정에서 발생하는 바이패스 분진의 안정적인 재활용을 위하여 연간 35,000톤 규모의 바이패스 분진 수세 설비를 도입하여 가동하고 있다. 수세 설비를 거치는 동안 바이패스 분진에 함유되어 있는 중금속 성분이 응집되고, 염소 성분은 염화칼륨(KCl)으로 분리되어 농업용 비료로 사용된다. 본 연구에서는 시멘트 소성 공정에서 발생하는 염소 바이패스 분진과 수세 공정에서 발생한 수세 잔류물의 재활용 용도를 파악하기 위하여 화학성분, 광물 특성 및 미세구조를 비교·분석하였다.

2. 실험방법

염소 바이패스 분진과 수세 잔류물의 특성 분석을 위하여 침출 공정을 사용 중인 국내 A사의 염소 바이패스 분진을 분석하였다. 아울러 염소 바이패스 분진 수세 과정에서 염화칼륨 회수 및 중금속 응집 과정을 거친 수세 잔류물을 입수하여 염소 바이패스 분진 특성과 비교하였다. 수세 잔류물은 수분이 함유된 상태로 입수하였으며, 분석을 위하여 100°C에서 24시간 건조한 후에 분석시료로 사용하였다. 건조과정에서 응집 및 경화 반응이 발생하였으며, 이에 따른 시료 특성 변화가 우려되었다. 따라서 입자 형상을 관찰하는 SEM 및 입도분포 분석은 별도의 건조과정 없이 입수 시료 그대로 분석을 진행하였다. 실험에 사용한 염소 바이패스 분진과 수세 잔류물의 화학성분은 유도결합플라즈마 방출분광기 ICP-OES(Perkin Elmer OPTIMA 8300) 및 강열감량(loss on ignition) 방법을 이용하였으며, 염소 함량은 Dionex 이온크로마토그래피(ICS-1000)를 이용하여 측정하였다. HORIBA 레이저 회절 입도 분석기(LA-950)를 이용하여 입도분포를 측정하였으며, X선 형광분석기(XRF, Supermini200)을 이용하여 재료의 화학적 조성을 측정하였고, 입자 형상 및 크기는 JEOL사 전계 방출형 주사전자현미경(FE-SEM, JSM- 7610F)을 이용하여 분석하였다. 광물 특성 변화는 X-회절 분석기

Table 1. Chemical composition of by-pass dust and washed residue (unit : wt%)

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Cl	LOI
Cl dust	6.6	1.85	25.3	1.33	0.94	25.2	0.56	2.61	0.12	23.9	35.4
Washed residue	14.0	3.95	49.8	2.95	1.93	5.45	0.22	7.52	0.17	1.4	19.7

**Fig. 1.** Results of XRD analysis of (a) Chlorine bypass dust and (b) Water washed residue.

(BRUKER사 D8 Advance)를 이용하였으며, 광물 정량은 XRD-Rietveld 법을 사용하여 구하였다. 온도변화에 따른 시차열-열중량 측정은 TGA/DSC(STA 449, NETSCH)를 이용하여 측정하였으며, 공기 분위기에서 1,400°C까지 10°C/min 조건으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 화학성분 및 광물특성 분석

시멘트 킬른 염소 바이패스 설비에서 발생하는 염소 바이패스 분진과 수세 설비에서 KCl 성분을 회수한 후 발생하는 수세 잔류물의 화학성분과 염소 함량을 분석하였으며 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 화학성분 분석 결과, 염소 바이패스 분진에서 염소 함량은 23.9%이었으나 수세 처리 과정을 거친 수세 잔류물에서는 1.4%로 감소함을 확인할 수 있었다. CaO 성분의 경우에는 염소 바이패스 분진에서 25.3%이지만 수세 잔류물에서는 49.8%로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 염소 바이패스 분진이 시멘트 공정 부산물이며 CaO 성분이 수세 과정에서 용해되지 않기 때문에 함량이 상대적으로 증가한 것으로 판단되었다.

K₂O 성분의 경우에는 염소 바이패스 분진에서 25.2%

이지만 수세 과정을 거친 수세 잔류물에서 5.45%로 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 칼륨(K) 성분의 경우에는 대부분 KCl로 존재하여 수세 과정에서 용해되기 때문인 것으로 판단되었다. 염소 바이패스 분진에서 K₂O 함량이 높은 것은 시멘트 킬른 내부의 고온 분위기에서 K₂O 성분이 염소 성분과 결합하여 휘발하면서 염소 바이패스 설비가 설치 되어있는 시멘트 킬른 입구 부분에서 농축되기 때문이다¹⁰⁾. 염소 바이패스 설비를 가동함으로써 시멘트 킬른 입구 부분에 농축되는 알칼리 염화물(KCl 등)을 효율적으로 제거할 수 있으며, 일반적으로 5%의 킬른 배가스 바이패스에 의해서 90% 이상의 알칼리 염화물을 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다¹¹⁾. SO₃ 성분의 경우에 염소 바이패스 분진에서 2.61%이지만 수세 잔류물에서 7.52%로 약 2.9배 증가한 것을 확인할 수 있다. 수세 잔류물의 SO₃ 함량이 증가하는 것은 염소 바이패스 분진 수세 과정 중에 중금속 응집 과정에 투입하는 응집제 성분과 관련이 있는 것으로 판단되었다. 염소 바이패스 분진에서 강열감량(LOI)이 35.4%로 많은 것을 알 수 있는데, 이것은 염소 바이패스 분진에 함유 되어있는 염화물 등 휘발성분의 상당량이 1,000°C 이하에서 휘발되어 강열감량으로 측정되기 때문으로 판단되었다. 수세 잔류물에서 강열감량이 19.7%로 많은 것은 수세 과정에서 생성된 Ca(OH)₂(Portlandite)와

Table 2. Rietveld analysis of by-pass dust and washed residue (unit : wt%)

Phase compositions	Chlorine bypass dust	Water washed residue
Sylvine(KCl)	56.0	-
Arcanite(K ₂ SO ₄)	12.3	6.3
Lime(CaO)	18.1	-
Portlandite(Ca(OH) ₂)	4.0	50.0
Lamite(Ca ₂ SiO ₂)	7.1	-
Quartz(SiO ₂)	2.6	7.6
Thenardite(Na ₂ SO ₄)	-	7.7
Syngenite(K ₂ Ca(SO ₄) ₂ (H ₂ O))	-	22.1
Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate((CaO) ₃ (Al ₂ O ₃)(CaCl ₂)(H ₂ O) ₁₀)	-	6.3

같은 수화물이 강열감량으로 측정되었기 때문이다.

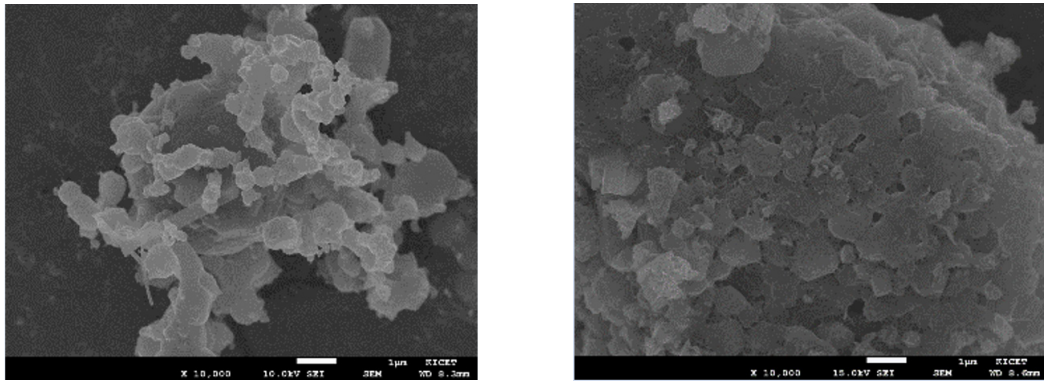
시멘트 킬른 염소 바이패스 설비에서 발생하는 염소 바이패스 분진과 수세 설비에서 발생하는 수세 잔류물의 광물 특성 및 함량변화를 살펴보고자 하였으며 Fig. 1과 Table 2에 분석 결과를 나타내었다. 광물 분석 결과에서와 같이 염소 바이패스 분진의 구성 광물은 KCl(Sylvine) 56%, CaO(Lime) 18.1% 및 K₂SO₄(Arcanite) 12.3%로써, 킬른 내부 순환 물질인 염소, 황 및 알칼리 화합물이 대부분인 것을 알 수 있다. 염소 바이패스 분진에 KCl(Sylvine) 외에 상당량의 C₂S(Belite)광물이 포함되어 있는 기존 연구결과⁶⁾와 비교할 때, 본 연구에서 사용한 염소 바이패스 분진은 비교적 효율적인 염소 바이패스 설비에서 채취한 것임을 추정할 수 있다. 일반적으로 염소 바이패스 분진에 염소, 황 및 알칼리 화합물 같은 킬른 내부 순환물질 외에 Lime(CaO) 및 C₂S(Belite)광물과 같은 분진이 다량 포함되어 있을 경우, 염소 바이패스 분진량이 증가할 뿐 아니라, 킬른 내부 순환물질 제거 효율 저하 등 킬른 공정에 좋지 않은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 수세 잔류물의 경우에는 Ca(OH)₂(Portlandite), K₂Ca(SO₄)₂(H₂O)(Syngenite), Na₂SO₄(Thenardite), SiO₂(Quartz), K₂SO₄(Arcanite) 및 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate((CaO)₃(Al₂O₃)(CaCl₂)(H₂O)₁₀)광물이 관찰되었지만, 염소 분진에서 다량 관찰되었던 KCl(Sylvine)광물은 전혀 관찰되지 않음을 확인하였다. 이 결과는 염소 바이패스분진에 함유되어있는 KCl(Sylvine)광물이 염소 바이패스 분진 수세 설비에서 물에 용해되었기 때문이다. 염소 바이패스 분진에서 4%였던 Ca(OH)₂(Portlandite) 광물 함량이 수세 잔류물에서 50%로 증가하였는데, 이것은 염소 바이패스 분진에

함유되어있던 CaO 성분이 수세 과정에서 수화물을 형성 하였기 때문으로 예상된다. 수세 잔류물에서 KCl(Sylvine) 광물이 전혀 관찰되지 않았음에도 불구하고, 염소함량이 1.4% 측정된 것은 불용성 염화수화물 광물인 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate ((CaO)₃(Al₂O₃)(CaCl₂)(H₂O)₁₀) 광물 형성과 관련이 있는 것으로 확인되었다. 따라서 향후 수세 잔류물에서 염소 함량 감소를 위한 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate 광물 생성량의 제어 가능성과 아울러 혼합재로 사용하였을 때의 품질영향 검토가 필요할 것으로 판단되었다.

3.2. 미세구조 및 입도분포 분석

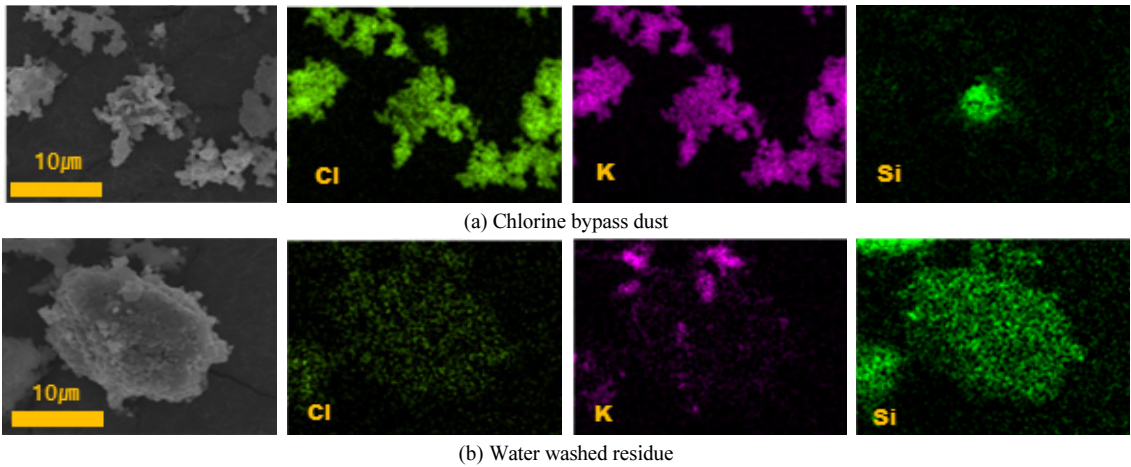
염소 바이패스 분진과 수세 과정을 거친 수세 잔류물의 SEM 측정 결과를 Fig. 2와 같이 나타내었다. SEM 측정 결과, 염소 바이패스 분진의 경우에 5~10µm 크기의 입자 표면에 1µm 이하의 미세입자가 응집되어 있음을 관찰할 수 있다. 반면에 수세 잔류물의 경우에는 1µm 이하의 미세입자가 전혀 관찰되지 않았다. 염소 바이패스 분진과 수세 잔류물을 구성하고 있는 미세입자의 성분을 파악하기 위해서 EDS를 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. EDS 측정 결과 미세한 입자에 Cl 성분과 K 성분이 다량 관찰되었지만, 수세 잔류물에서는 Cl 성분이 급격히 감소하고 아울러 K 성분도 감소하였음을 확인할 수 있었다. 이것은 염소 바이패스 분진 수세 과정에서 KCl 성분이 용해 및 회수되었기 때문인 것으로 판단되며, 화학성분 분석과 XRD 광물 특성 분석 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4에 염소 바이패스 분진과 수세 잔류물의 입도분포 측정 결과를 나타내었다. 입도분포 측정 결과, 염소 바



(a) Chlorine bypass dust (b) Water washed residue

Fig. 2. Microstructure of (a) Chlorine bypass dust and (b) Water washed residue.



(a) Chlorine bypass dust

(b) Water washed residue

Fig. 3. EDS elemental maps(Cl, K, Si) of (a) Chlorine bypass dust and (b) Water washed residue.

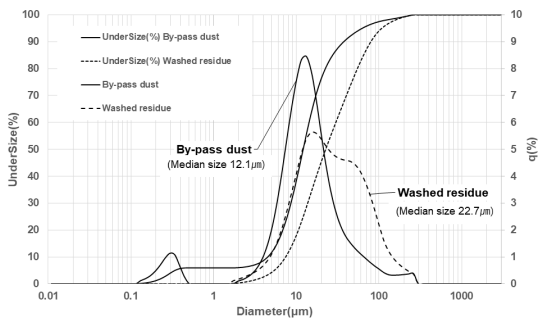


Fig. 4. Particle size distribution of by-pass dust and water washed residue.

이패스 분진의 평균입경(median size)은 12.13μm로 수세

잔류물의 평균입경 22.72μm와 비교하여 상대적으로 미세한 입도 특성을 보여주고 있다. 이렇게 염소 바이패스 분진의 평균입경이 수세 잔류물과 비교하여 작은 것은 염소 바이패스 분진에 포함되어있는 1μm 이하의 미세한 입자와 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다. 염소 바이패스 분진의 경우에는 1μm 이하의 미립입자가 약 6% 정도 포함되어있는 반면에 수세 잔류물의 경우에는 1μm 이하의 미립입자가 전혀 측정되지 않음을 확인하였다. 이 결과는 염소 바이패스 분진에는 1μm 이하의 미립입자가 관찰되는 반면에 수세 잔류물에서는 1μm 이하의 미립자가 관찰되지 않는 SEM 측정 결과와 일치함을 알 수 있었다. 염소 바이패스 분진에서 KCl 입자가 1μm 이하의 미립자를 형

성하는 것은 시멘트 킬른에서 KCl 입자의 휘발, 응축 및 결정화 과정과 밀접한 관련이 있으며, Kurdowski and Sobon(1999)이 제시한 KCl 입자가 가스화 및 액화 과정을 거쳐서 결정화하는 모델은 KCl 입자가 시멘트 킬른 내부에서 결정화되고 원료물질과 결합하는 과정을 잘 설명하고 있다¹²⁾. 본 연구 결과에서 염소 바이패스 분진이 수세 과정을 거친 후에 1 μ m 이하의 미립자가 관찰되지 않는 것으로 볼 때, 염소 바이패스 분진에 포함된 1 μ m 이하의 KCl 입자는 원료 입자와 결합하면서 결정화 된 것이 아니라, 고농도 KCl 함유 가스가 염소 바이패스 설비에 의해서 배출되고 급격히 냉각되는 과정에서 기화된 KCl 입자가 그대로 결정화되거나 미세한 KCl 입자끼리 응집된 것으로 판단되었다.

3.3. 시차열-열중량 분석

염소 바이패스 분진과 수세과정을 거친 수세 잔류물의 시차열-열중량(TG-DSC) 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 380 $^{\circ}$ C ~ 470 $^{\circ}$ C 부근에서 3~10%의 무게 감량과 함께 강한 흡열 피크가 발생함을 알 수 있다. Ca(OH)₂(Portlandite) 광물은 시멘트 수화 특성에 다양한 영향을 주므로 Ca(OH)₂(Portlandite) 광물의 시차열-열중량 특성에 대한 많은 연구가 진행되었다¹³⁾. 이러한 Ca(OH)₂(Portlandite) 광물에 대한 선행 연구결과와 아울러 본 연구에서 분석한 광물 특성 및 화학분석 결과와 연계해 볼 때, 380 $^{\circ}$ C ~ 470 $^{\circ}$ C 부근에서 발생한 무게 감량과 흡열 피크는 Ca(OH)₂(Portlandite) 광물에 의한 것임을 알 수 있었다. 염소 바이패스 분진의 경우에 600 $^{\circ}$ C~

720 $^{\circ}$ C 부근에 2개의 흡열 피크가 발생하지만 무게 감량은 거의 없는 것을 알 수 있다. 일반적으로 고상에서 액상으로 상변화가 발생할 때 무게변화 없이 열 반응이 발생하며, 액상에서 기상으로 변화할 때는 무게 변화를 수반하는 열 반응이 발생하는 것으로 알려져 있다. 알칼리 금속의 상변화에 대한 기존 시차열-열중량 분석 연구 결과¹⁴⁾와 본 분석 결과를 비교할 때, KCl(Sylvine) 및 K₂SO₄(Arcanite) 광물과 유사한 거동의 시차열-열중량 분석결과를 확인할 수 있었다. 따라서 앞서 분석한 광물 특성 분석 결과 및 알칼리 금속에 대한 기존 시차열-열중량 분석결과와 연계해 볼 때, 600 $^{\circ}$ C~720 $^{\circ}$ C 부근에 2개의 흡열피크는 염소 바이패스 분진에 포함되어있는 KCl(Sylvine) 및 K₂SO₄(Arcanite) 광물이 온도변화에 따라서 발생하는 상변화에 의한 것이며, 900 $^{\circ}$ C부터 발생하는 무게감량을 수반하는 흡열반응은 기화에 의한 것임을 알 수 있었다.

4. 결 론

시멘트 업체에서 발생하고 있는 염소 바이패스 분진의 특성평가 및 염소 바이패스 분진 수세설비에서 발생하는 수세 잔류물의 재활용 가능성을 파악하고자 하였다. 이를 위해서 시멘트 킬른 바이패스 설비에서 배출되고 있는 염소 바이패스 분진 및 연간 35,000톤 규모의 수세설비에서 수세처리 후에 배출되는 수세 잔류물의 특성을 분석하였다. 염소 바이패스 분진에서의 염소함량은 23.9%에서 수세처리를 거친 후에 1.4%로 급격히 감소하여 수세처리가 염소함량 감소에 효과적임을 확인할 수 있었다. 수세 잔류물의 광물특성 분석결과, KCl(Sylvine)광물이 전혀 관찰되지 않았음에도 불구하고 염소함량이 1.4% 측정된 것은 수세 잔류물에 포함된 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate 형성과 관련이 있다. 따라서 수세 잔류물에서 염소함량 감소를 위해서는 Calcium Aluminium Oxide Chloride Hydrate 제어가 필요할 것으로 예상된다. 아울러 염소성분 형태변화에 따른 시멘트 혼합재 품질변화 검토가 필요할 것으로 판단되었다. 염소 바이패스 분진을 수세 처리한 후에 CaO 성분은 22.4%에서 49.8%로 증가하였으며, K₂O 함량도 25.2%에서 5.45%로 크게 감소하여 수세 잔류물의 시멘트 원료 사용가능성을 확인하였다. SEM 및 입도 분석결과, 염소 바이패스 분진의 경우에는 1 μ m 이하의 미세입자를 다량 관찰할 수 있는 반면에 수세 잔류

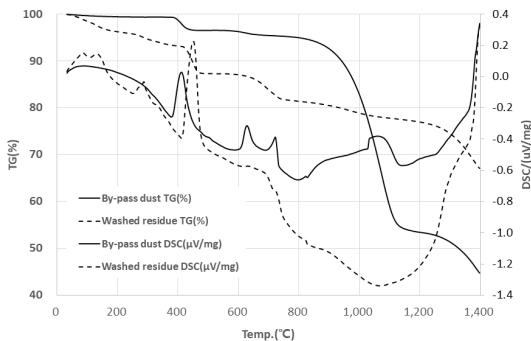


Fig. 5. TG-DSC results of by-pass dust and water washed residue.

물의 경우에는 1 μm 이하의 미세입자를 전혀 확인할 수 없었다. 이 결과는 1 μm 이하의 미세입자가 KCl 성분으로써, 염소 바이패스 분진 수세과정에서 KCl 성분이 용해되었기 때문인 것으로 분석되었다. 시차열-열중량 분석결과, 염소 바이패스 분진과 수세 잔류물에 있는 Portlandite 광물과 염소, 알칼리 및 황 화합물에 의한 무게감량과 흡열 피크를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 기획재정부 재원으로 탄소혁신스타즈프로젝트사업(1415184331) 및 산업통산자원부 탄소중립산업핵심기술개발사업(RS-2023-00265662)의 연구비지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Korea Cement Association, Recycling of Circular Resources in Cement Industry, http://recycling.cement.or.kr/contents/sub3_01.asp?sm=3_1_0, May 8, 2023.
2. Karolina Wojtacha-Rychter, Magdalena Krol, Małgorzata Golaszewska, et al., 2022 : Dust from chlorine bypass installation as cementitious materials replacement in concrete making, *J. Build. Eng.*, 51, pp.1-20.
3. Katarzyna Borek, Przemysław Czapiak, Ryszard Dachowski, 2023 : Cement Bypass Dust as an Ecological Binder Substitute in Autoclaved Silica-Lime Products, *Mater.*, 16(316), pp.1-13.
4. Youngmin Yun, Nari Yeom, Kabsoo Lee, et al., 2017 : Preparation of KCl through Removal of Heavy Metals from Chlorine By-Pass Dust, *Journal of Korean Institute of Resources and Recycling*, 26(2), pp.11-17.
5. Mahrous A. M. Ali, Hyung-Sik Yang, 2011 : Utilization of Cement Kiln Dust in Industry Cement Bricks, *Geosystem Eng.*, 14(1), pp.29-34.
6. Alicja Uliasz-Bocheńczyk, 2019 : Chemical characteristics of dust from cement kilns, *mineral resources management*, 35(2), pp.87-102.
7. Min-Cheol Han, Dong-Joo Lee, 2019 : Physical and Chemical Properties of Chlorine Bypass System-Dust from Cement Manufacturing, *Journal Recycled Construction Resources*, pp.310-315.
8. Lee, Churl-Kyoung, 2007 : Basic study and patent analysis of electrochemical denitrification from industrial wastewater, *Journal of Korean Institute of Resources and Recycling*, 16(6), pp.52-60.
9. Christof Lanzerstorfer, 2019 : Potential of industrial dedusting residues as a source of potassium for fertilizer production—A mini review, *Resource Conservation and Recycling*, 143, pp.68-76.
10. Taiheiyo Chlorine Bypass System, <https://www.taiheiyo-eng.co.jp/en/engineering/taiheiyo-chlorine-bypass-system.html>, May 27, 2023.
11. Christof Lanzerstorfer, 2016 : Residue from the chloride bypass de-dusting of cement kilns: Reduction of the chloride content by air classification for improved utilization, *Process Safety and Environmental Protection*, 104, pp.444-450.
12. Cortada Mut, M. D. M., Nørskov, L. K., Jappe Frandsen, et al., 2015 : Review : Circulation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants, *Energy and Fuels*, 29(7), pp.4076-4099.
13. Taehwan Kim, Jan Olek, 2012 : Effects of Sample Preparation and Interpretation of Thermogravimetric Curves on Calcium Hydroxide in Hydrated Pastes and Mortars, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2290, pp.10-18.
14. Agata Mlonka-Mędralaa, Aneta Magdziarza, Katarzyna Nowińska et al., 2020 : Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour, *Journal of Fuels*. 261, pp.1-17.

이 선 목

- 인하대학교 컴퓨터공학과 학사
 - 충남대학교 토목공학과 석사
 - 충남대학교 토목공학과 박사
 - 현재 ㈜정우소재 기술영업부
-

이 대 근

- 공주대학교 건축재료학 석사
 - 충남대학교 응용화학공학과 박사
 - 현재 ㈜정우소재 부장
-

길 준 호

- 한양대학교 화학공학 학사
 - 한양대학교 화학공학 석사
 - 한양대학교 화학공학 박사
 - 현재 쌍용씨앤이 부장이사
-

이 태 우

- 충남대학교 화학과 학사
 - 충남대학교 화학과 석사
 - 현재 쌍용씨앤이 선임연구원
-

송 훈

- 전북대학교 건축공학 학사
 - 전북대학교 건축공학 석사
 - University of Tokyo 박사
 - 현재 한국세라믹기술원 수석연구원
-

염 우 성

- 인하대학교 토목공학 학사
 - 인하대학교 토목공학 석사
 - 울산과학기술원 도시환경공학 박사
 - 현재 한국세라믹기술원 선임연구원
-