

## 시멘트 바이패스 분진 첨가에 따른 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트의 물리특성 연구

최재준\* · 이선목\*\* · 장주찬\*\*\* · 오양석\*\*\* · §김윤용\*

\*충남대학교, \*\*㈜정우소재, \*\*\*㈜삼표시멘트

### Study on the Physical Properties of Ordinary Portland Cement and Slag Cement with the Addition of Cement Bypass Dust

Jae Jun Choi\*, Sun Mok Lee\*\*, Ju Chan Jang\*\*\*, Yang Seok Oh\*\*\* and §Yun Yong Kim\*

\*Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*\*Jeongwoo Materials. Co., Ltd., Buyeo 33171, Korea

\*\*\*Sampyo Cement. Co., Ltd., Samcheok 25930, Korea

#### 요 약

시멘트 산업부산물로 발생하는 시멘트 바이패스 분진(CBPD)을 고화재 원료로써 활용 가능성 검토를 위하여, 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 및 슬래그 시멘트에 첨가하여 유동성 및 압축강도 등 물리특성 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. CBPD 첨가량을 25%, 50%, 75%로 증가함에 따라서 유동성과 압축강도가 감소하지만 슬래그 시멘트에서의 감소 폭이 OPC와 비교하여 상대적으로 작음을 확인하였다. CBPD 첨가량 25% 조건에서 7일 압축강도는 28.15MPa로 시중에서 유통되고 있는 고화재 압축강도 16.5MPa과 비교하여 약 70% 높은 강도 발현을 나타내고 있어 고화재 원료로의 사용 가능성을 확인하였다.

**주제어 :** 시멘트, 슬래그, 바이패스, 분진, 고화재

#### Abstract

This study examines the possibility of using cement bypass dust (CBPD), a by-product of the cement industry, as a raw material for hardening agents. To this end, the effect of adding CBPD to ordinary Portland cement (OPC) and slag cement on the physical properties, such as fluidity and compressive strength, was investigated. As the amount of CBPD added increased to 25%, 50%, and 75%, both the fluidity and compressive strength decreased. However, the decrease was smaller in slag cement than in OPC. When 25% CBPD was added, the 7-day compressive strength was 28.15 MPa, which is approximately 70% higher than that of the commercially available hardening agents (16.5 MPa). This confirms the potential of CBPD as a raw material for hardening agents.

**Key words :** cement, slag, bypass, dust, hardening agent

· Received : July 9, 2024 · Revised : July 30, 2024 · Accepted : July 31, 2024

§ Corresponding Author : Yun Yong Kim (E-mail : yunkim@cnu.ac.kr)

Civil Engineering, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, 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/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

시멘트 산업에서 폐합성수지 등 폐기물 사용량 증가와 이에 따른 시멘트 소성로의 안정적 운전을 위한 바이패스 설비 가동으로 인하여 시멘트 바이패스 분진(Cement by-pass dust, 이하 CBPD라 칭함)이 발생하고 있다<sup>1)</sup>. CBPD의 안정적인 재활용은 시멘트 산업에서 폐기물 사용량 증대 및 탄소중립 달성에 있어 매우 중요하다. 따라서 CBPD 특성을 고려한 콘크리트 혼화재, 수세에 의한 염화칼슘 회수, 시멘트 원료, 고화재 및 알칼리 자극제와 같이 CBPD 활용을 위한 다양한 연구가 진행되었다<sup>2-6)</sup>. 하지만 국내의 경우에 CBPD 재활용 연구는 거의 발표된 바 없으며, 대부분 CBPD는 시멘트 원료와 혼화재로 재활용하고 있다. 시멘트 원료로 재활용할 경우, CBPD에 함유된 다량의 염소(Cl) 성분은 시멘트 소성로 내부에서 휘발과 코팅 형성을 유발하므로 전처리 없이 그대로 활용하기에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수세 처리 과정을 거쳐 KCl 회수와 아울러 수세 잔류물을 시멘트 원료로 사용하는 기술이 개발되어 상용화되었으며, 국내 시멘트회사에서 연간 35,000톤 규모의 수세 설비를 도입하여 가동 중이다<sup>7)</sup>. 하지만 설비 가격이 고가이며 수세 잔류물의 Cl 함량도 1% 이상으로 원료배합 및 시멘트 소성 공정 안정화 측면에서 시멘트 원료 사용에 한계가 있다. 또 다른 용도인 시멘트 혼화재 활용을 위해서는 콘크리트 내 염소이온 함량  $0.3\text{kg/m}^3$  기준을 만족해야 하므로 혼화재로 사용할 수 있는 CBPD 사용량에 제한이 있어 새로운 재활용 기술개발이 필요하다.

CBPD는 평균입径  $15\mu\text{m}$  이하 미세한 분진으로 칼슘(Ca) 및 알칼리(Na, K)가 주성분으로 구성되어 있어, 알칼리 자극제 및 고화재 원료로의 사용이 가능한 것으로 알려져 있다<sup>5,8)</sup>. 고화재는 해안 연약지반개량뿐 아니라 도로 포장, 매립지 차수벽 및 공원 산책로 등 사용 분야가 다양하며<sup>9)</sup>, 1938년 서구에서 점토 그라우팅 공법에 고화재가 적용된 이래 토양과 폐기물 분야 위주로 다양한 분야에서 사용되고 있다. 국내에서는 국토 이용효과를 증대하기 위하여 연안 지역을 매립하여 도시개발 및 공단을 조성할 목적으로 고화재 필요성이 대두되었다. 이를 위하여 1970년대 국립건설연구소(현)한국건설기술연구원)에서 연약지반 처리공법이 연구되면서 해안과 도로포장 분야에 시멘트와 물유리계 고화재를 사용하기 시작하였다<sup>9)</sup>. 시멘트

와 물유리계 고화재를 사용하여 지반보강을 한 경우에 염류, 유기물 및 Cl 이온 등의 작용으로 시멘트 수화물이 팽창되어 지반 강도가 저하하는 것으로 알려져 있으며, 이를 해결하기 위해 Chun et al.<sup>10)</sup>은 염료에 대한 내화학성과 포졸란 반응에 의한 장기강도 발현을 증진하고자 석탄계 고화재를 적용하였다. 최근에는 고화재 성능향상 및 환경 친화성을 높이기 위하여 고로슬래그 및 석고 등 산업체에서 발생하는 부산물을 시멘트 대체재로 사용하는 다양한 기술개발이 진행되고 있다<sup>11,12)</sup>. 본 연구에서는 CBPD를 OPC와 슬래그 시멘트에 첨가하였을 때의 특성 평가를 진행하여 고화재 원료 활용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 시멘트 사에서 발생하는 CBPD를 입수하여 화학성분 및 입도 등 기본특성을 분석하였으며, OPC 및 슬래그 시멘트에 CBPD를 첨가하여 유동성 및 압축강도 등 물리특성 변화에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 사용원료 및 배합비

시중에 유통되는 A사 OPC를 입수하여 원료로 사용하였으며, 아울러 CBPD에 함유된 알칼리 성분이 포졸란 물질에 미치는 영향을 확인하고자 시중에 유통되는 B사 슬래그 미분말을 입수하였다. 슬래그 미분말과 OPC를 자체적으로 혼합하여 제조한 슬래그 시멘트를 실험에 사용하였으며, 고화재 원료로써 CBPD 사용 가능성을 확인하고자 시중에 유통되는 고화재를 입수하였다. CBPD 첨가량 변화에 따른 OPC 및 슬래그 시멘트의 특성 변화를 파악하기 위하여 OPC와 슬래그 시멘트에 CBPD 첨가량을 0%, 25%, 50% 및 75%로 변경하여 배합비를 조정하였다. OPC와 슬래그 시멘트는 25%, 50%, 75%, 100%로 변경하였고, 예비 실험에서 W/C 40%를 기준으로 작업성 및 flow를 측정하였으며 작업성 확보를 위하여 flow  $215\pm 15\text{mm}$  되는 배합비를 선정하였다. 실험에 사용한 세부 배합비를 Table 1에 나타내었고, CBPD가 혼합된 시멘트 페이스트 원료 무게는 2,000g으로 하였으며 실험 결과를 시중에 유통되고 있는 고화재 특성과 비교하였다.

### 2.2. 분석 및 실험방법

사용원료 화학성분은 M4 TORNADO(Bruker, 독일)를 이용하여 분석하였으며, 광물특성 변화는 X-회절분석

**Table 1.** Mix proportions of OPC, Slag cement and CBPD mixed cement paste (unit : %)

Specimen	Weight								Hardening agents (H.A)
	OPC base				Slag cement base				
	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	
OPC	100	75	50	25	0	0	0	0	100
Slag cement <sup>1)</sup>	0	0	0	0	100	75	50	25	
CBPD	0	25	50	75	0	25	50	75	
Sum	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Water	35	40	45	50	35	40	45	40	40

1) Slag cement : OPC 55%, Slag powder 45% mixture

**Table 2.** Chemical composition of CBPD, OPC, Slag powder and Hardening agent (unit : wt%)

Composition	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cl	LOI
CBPD	15.4	2.53	1.31	0.52	1.24	0.66	16.7	0.51	0.04	10.50	50.1
OPC	60.5	20.2	5.42	3.28	2.49	2.41	0.86	0.26	0.18	0.04	1.2
Slag powder	41.3	32.4	15.4	1.5	1.86	4.5	0.70	0.15	-	-	1.19
Hardening agent	44.6	22.5	11.6	2.42	8.97	3.15	0.55	0.14	0.22	0.04	4.66

기(BRUKER사 D8 Advance)를 이용하여 측정하였다. 입도분포 측정은 LA-950 Laser Scattering Size Distribution Analyzer (Horiba LA950)를 이용하였다. OPC와 슬래그 시멘트, CBPD 및 물의 혼합은 KS L 5109 “수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합방법”에 의한 용량 4.73l의 몰탈 전용 믹서를 사용하였으며, 시편 제조는 KS L 5220 “건조 시멘트 모르타르”에 준하여 준비하였다. 유동성(flow)은 KS L 5111 “시멘트 시험용 플로우 테이블”에 준하여 플로우 테이블을 사용하여 15초 동안 12.7mm의 높이에서 25회 상하 낙하 후 직경을 측정하였다. 길이 변화 시험은 BS 1191(Plaster extensometer)에 준하여 스테인리스 재질의 250×80×80mm V몰드에 0.001mm 정밀도의 다이얼게이지가 장착된 길이 변화 시험기를 이용하였다. 압축강도 측정용 시편은 KS L ISO “시멘트 강도 시험방법”에 준하여 40×40×160mm 몰드에 제작한 후 20±2°C, 습도 60% 조건에서 24시간 양생후 수증양생을 실시하였다. 압축강도 측정 속도는 2400N/s±200N/s로 하여 재령(1, 3, 7, 28일)에 따른 강도 변화를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 사용원료 특성분석

CBPD, OPC 및 슬래그 시멘트의 특성 평가를 위하여

화학성분, 입도분포 및 광물 특성 변화를 측정하였으며, 이에 대한 분석 결과를 Table 2, Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 화학성분 분석 결과 CBPD의 Cl 함량은 10.5%, K<sub>2</sub>O 함량은 16.7%로 나타났으며, 이 결과는 국내 시멘트 회사에서 발생한 CBPD를 분석한 기존 분석 결과인<sup>1)</sup> Cl 23.9%, K<sub>2</sub>O 25.2%와 비교하면 적지만, 일반적인 CBPD 분석값 범위에 포함되는 수준인 것을 알 수 있었다<sup>3)</sup>. OPC와 슬래그 분말에서의 CaO 및 SiO<sub>2</sub> 함량은 OPC에서 60.5%와 20.2%이며, 슬래그 분말은 42.3%와 33.9%로 측정되었다. XRD 분석결과 sylvine(KCl)광물 peak 및 portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) 광물이 관찰되었다. 이 결과로부터 CBPD의 Cl 및 K<sub>2</sub>O 성분은 대부분 sylvine 광물 형태로 존재하는 것을 알 수 있었으며, portlandite 광물이 관찰되는 것은 CBPD에 함유된 CaO 성분이 수분과 반응하였기 때문으로 판단된다. Portlandite 광물은 500°C 이하에서 결정수 증발에 의한 무게 감량이 발생하며<sup>1)</sup>, 이 결과는 CBPD 화학성분에서 LOI 함량이 50.1%로 다량 관찰되는 것과 관련이 있다. CBPD median size는 6.52μm로 OPC 10.58μm, 고화재 10.07μm 및 슬래그 미분말 16.59μm보다 작음을 알 수 있다. 특히 CBPD 특성에 관한 기존 연구 결과와<sup>1)</sup> 비교하면 CBPD median size가 6.52μm로 작음에도 불구하고 1μm 이하 미세입자와 30μm 이상의 초대입자가 관찰되지 않았다.

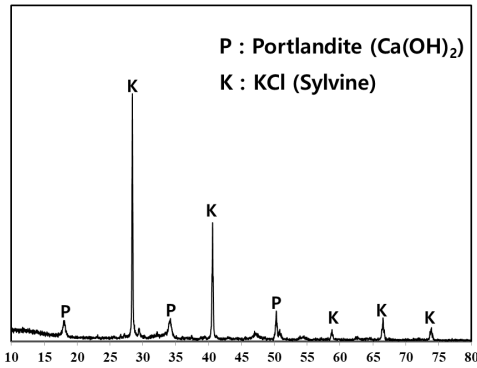


Fig. 1. XRD analysis results of CBPD.

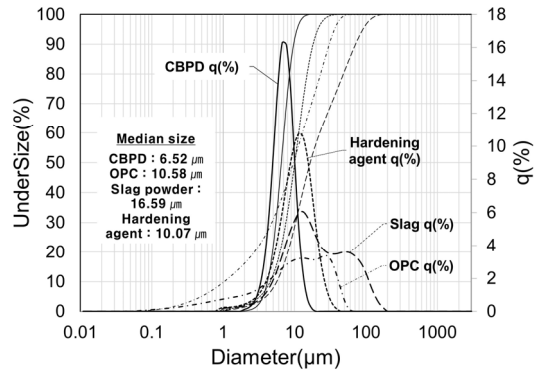


Fig. 2. Particle size distribution and median size of raw materials.

Table 3. Flow and W/C with CBPD added to OPC and slag cement

Items	OPC base				Slag cement base				Hardening agents (H.A)
	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	
Flow (mm)	230	220	220	200	230	225	225	215	220
W/C (%)	35	40	45	50	35	40	45	50	40

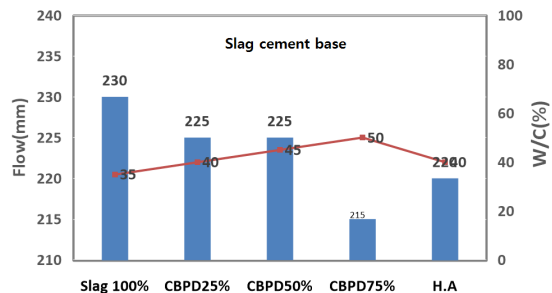
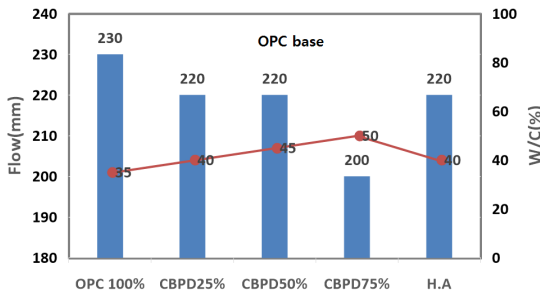


Fig. 3. Flow and W/C with CBPD added to OPC and slag cement.

### 3.2. CBPD 첨가량별 특성 변화

#### 3.2.1. 유동성(flow) 및 W/C

CBPD 첨가에 따른 OPC와 슬래그 시멘트에서 유동성 (flow) 및 물/시멘트비(W/C) 측정 결과를 Table 3와 Fig. 3에 나타내었다. OPC에 CBPD 첨가량을 25%, 50% 및 75%로 증가할수록 flow는 230mm, 220mm 및 200mm로 감소하였으며, 슬래그 시멘트에 CBPD를 첨가할 때, flow는 230mm, 225mm 및 215mm로 감소하였다. 슬래그 시멘트에 CBPD를 첨가하였을 때, OPC와 비교하여 flow 감소 폭은 크지 않았고 시중에서 유통되는 고화재의 flow는 220mm로 OPC와 슬래그 시멘트의 flow 값 230mm보다 적은 것을 알 수 있었다. CBPD 첨가량을 25%, 50% 및

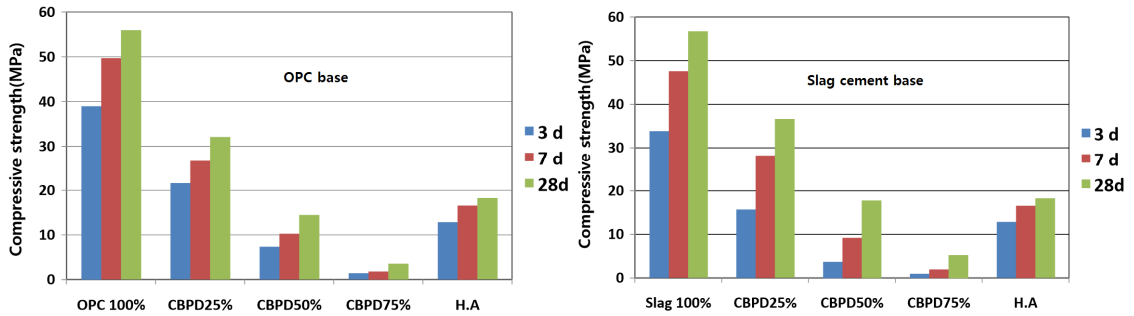
75%로 증가할 때, W/C는 35%, 40%, 45% 및 50%로 증가하여 CBPD 첨가가 유동성과 W/C 변화에 영향을 주는 것을 확인하였다. 알칼리 성분과 CBPD와 관련된 기존 연구에서 Strunge et al.<sup>14)</sup>은 알칼리(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)와 황(SO<sub>3</sub>) 성분이 OPC의 C<sub>3</sub>A 광물과 가장 먼저 결합하여 사방정계 (orthorhombic) 결정을 형성하기 때문에 응결과 압축강도에 영향을 준다고 하였다. CBPD와 같이 미립분을 첨가할 때, 비표면 증가로 인하여 동일한 유동성 유지를 위한 물(水) 소요량이 증가하는 것이 일반적이지만 Daous<sup>15)</sup>는 CBPD가 시멘트 수화반응에 참여하여 CBPD 첨가에 따른 W/C 변화가 크지 않다고 보고하였다. 이러한 선행연구 결과와 본 실험 결과의 비교로부터 CBPD에 함유된 알칼리

**Table 4.** Length change with CBPD added to OPC and slag cement (unit : mm)

Curing time	OPC base				Slag cement base				Hardening agent
	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	
3 day	0.002	0.039	0.008	0.004	0	0.008	0.005	0.004	0.140
7 day	0	0.011	0.009	0.018	0	0.005	0.002	-0.002	0.158
28 day	0	0.009	0.011	0.021	0	-0.001	0.010	0.020	0.050

**Table 5.** Compressive strength with CBPD added to OPC and slag cement (unit : MPa)

Curing time	OPC base				Slag cement base				Hardening agents
	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	CBPD 0%	CBPD 25%	CBPD 50%	CBPD 75%	
3 day	38.94	21.55	7.30	1.35	33.80	15.65	3.65	0.90	12.79
7 day	49.65	26.60	10.20	1.75	47.55	28.15	9.15	1.90	16.51
28 day	55.90	32.05	14.42	3.51	56.7	36.68	17.71	5.21	18.23



**Fig. 4.** Compressive strength with CBPD added to OPC and slag cement.

성분이 OPC와 슬래그 시멘트의 수화 과정에 영향을 주기 때문에 유동성과 W/C가 변화하는 것으로 판단되었다.

### 3.2.2. 길이 변화 및 압축강도

CBPD 첨가에 따른 시멘트 수화반응에 관한 기존 연구에 의하면, Czapiak et al.<sup>16)</sup>은 OPC와 CBPD 수화 특성 비교 연구에서 OPC는 클링커에 함유된 알라이트(C<sub>3</sub>S), 벨라이트(C<sub>2</sub>S)와 같은 칼슘실리케이트 광물에 의하여 수화 특성이 결정되는 반면에 CBPD는 CaO성분의 수화 특성에 좌우되므로 수화 초기에 Ca(OH)<sub>2</sub> 광물 생성 과정에서 급격한 발열반응과 아울러 부피팽창이 발생하며, Tkaczewska<sup>17)</sup>의 연구에서도 CBPD에 함유된 CaO 성분이 수화 과정에서 Ca(OH)<sub>2</sub> 광물로 전환하면서 발생하는 부피팽창으로 급격한 강도 저하가 발생한다고 보고하고 있다. Table 4의 길이 변화 측정 결과에서 알 수 있는 바와 같이, OPC와 슬래그 시멘트에 CBPD 첨가할수록 길이 변화는 증가하지

만, 최대 길이 변화가 0.018mm로 시중에 유통되는 고화재의 7일 재령에서 길이 변화 0.158mm의 10% 수준으로 낮게 나타남을 확인하였다. CBPD 첨가량에 따른 길이 변화가 크지 않은 이유는 CBPD 광물 특성 분석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 CBPD에 함유된 CaO 성분의 상당 부분이 Ca(OH)<sub>2</sub> 광물로 전환되어 있었기 때문으로 판단된다. Hwang et al.<sup>18)</sup> 연구 결과에 따르면 점토와 같은 흙이나 유기물이 다량 함유된 물질을 고화시킬 때 에트린자이트와 같은 팽창성 물질 생성이 토양에서의 함수비를 낮춤과 동시에 흙 입자의 이동을 구속하여 응집력 발현을 유도하는 것으로 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서 비교 대상으로 분석한 7일 고화재의 길이 변화가 0.158mm로 상대적으로 크을 알 수 있는데, 이것은 고화재 특성 발현을 위하여 의도적으로 팽창성을 유도한 것으로 예상된다.

Table 5와 Fig. 4에 CBPD 첨가에 따른 OPC와 슬래그 시멘트에서 압축강도 측정 결과를 나타내었다. 압축강도

측정 결과에서와 같이 CBPD 첨가량을 25%, 50% 및 75%로 증가할수록 압축강도가 감소하였으며, CBPD 첨가에 따른 압축강도 발현은 OPC와 비교하여 슬래그 시멘트에서 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 시간 경과에 따른 강도 발현율도 고화재와 OPC에 비교하여 슬래그 시멘트에서 크게 나타남을 확인하였다. 이 결과는 CBPD에 함유된 알카리 성분이 슬래그 시멘트의 잠재 수경성을 증가하였기 때문이라 판단된다. Kalina et al.<sup>5)</sup>은 CBPD를 시멘트와 슬래그 분말에 첨가한 실험에서 CBPD에 함유된 알카리 성분이 수화반응을 촉진하기 때문에, 강도 발현을 촉진하며 시멘트 수축 문제를 감소하고 급격한 유동성 저하의 원인이 된다고 하였다. 슬래그 시멘트에 CBPD를 25% 첨가했을 때의 압축강도는 3일, 7일 28일에서 15.65MPa, 28.15MPa, 36.68MPa로써, 고화재 7일 압축강도 16.50MPa과 비교할 때 70% 이상 높은 강도 발현을 확인하여 고화재 원료로의 사용 가능성을 확인하였다.

#### 4. 결 론

시멘트 산업부산물로 발생하는 CBPD를 활용한 재활용 방안 도출을 위하여 고화재 원료로써 활용 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 시멘트 산업에서 발생하는 CBPD를 OPC와 슬래그 시멘트에 첨가하여 물리특성 변화를 파악하였으며, 시중에 유통되고 있는 고화재와 비교분석을 통하여 CBPD의 고화재 원료 활용 가능성을 확인하였다. CBPD 첨가에 따른 flow 및 W/C 영향에 대한 실험을 진행하여 CBPD 첨가가 OPC와 슬래그 시멘트의 flow 및 W/C 변화에 영향을 주며 flow 감소 폭은 슬래그 시멘트에서 적게 나타남을 확인하였다. CBPD 첨가할수록 OPC와 슬래그 시멘트의 길이 변화는 증가하는 경향이지만 최대 길이 변화는 0.018mm로 시중에 유통되는 고화재 길이 변화 0.158mm보다 매우 낮게 나타났는데, 이 결과는 CBPD에 함유된 CaO 성분이 이미 Ca(OH)<sub>2</sub> 광물로 전환되었기 때문으로 예상되었다. CBPD 첨가량을 증가할수록 압축강도는 감소하였으며 OPC와 비교하여 슬래그 시멘트에서 강도 발현이 높게 나타남을 알 수 있었는데, 이 결과는 CBPD에 함유된 알카리 성분이 슬래그의 잠재 수경성을 증가시켰을 것으로 판단되었다. 슬래그 시멘트에 CBPD를 25% 첨가했을 때의 7일 압축강도는 28.15MPa로써, 고화재 압축강도 16.50MPa과 비교할 때 70% 이상 높은

강도 발현을 나타내고 있어 고화재 원료로의 사용 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통산자원부 탄소중립산업핵심기술개발사업(RS-2023-00265662)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

1. Sun-Mok Lee, Daekeun Lee, Woo Sung Yum, et al., 2023 : Characteristics Analysis of Chlorine Bypass Dust and Water-washed Residue, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 32(5), pp.44-51.
2. Piotr Smarzewski and Krystian Błaszczyk, 2024 : Influence of Cement Kiln Dust on Long-Term Mechanical Behavior and Microstructure of High-Performance Concrete, Materials, 17(4), 833. <https://doi.org/10.3390/ma17040833>
3. Karolina Wojtacha-Rychter, Magdalena Krol, Małgorzata Gołaszewska, et al., 2022 : Dust from chlorine bypass installation as cementitious materials replacement in concrete making, J. Build. Eng., 51, pp.1-20.
4. Youngmin Yun, Nari Yeom, Kabsoo Lee, et al., 2017 : Preparation of KCl through Removal of Heavy Metals from Chlorine By-Pass Dust, J. of Korean Inst. of Resources and Recycling, 26(2), pp.11-17.
5. Lukáš Kalina, Vlastimil Bílek Jr., Jiří Másilko, et al., 2018 : Cement Kiln By-Pass Dust: An Effective Alkaline Activator for Pozzolanic Materials, Materials, 11(9), 1770.
6. 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.
7. Global Cement Magazine, Global Cement News, Reshape Your Footprint. <http://www.cfc.dz/images/telechargements/eGCFeb2022ns.pdf>, February 15, 2022.
8. Eva Terpáková<sup>1</sup>, Nadežda Številová<sup>1</sup>, 2020 : Trends in the Use of Cement Bypass Dusts for their Application in Construction, Key Eng. Mater., 838, pp.39-45.
9. Seung-Heun Lee, Yang-Yi Woo and Do-Young Cho, 2015 : Applications and Technical status of Solidification, J. Rec. Const. Resources, 10(2), pp.26-32.
10. Byung-Sik Chun and Jin-Chun Kim, 2000 : A Study on the Application of Soilcrete Cement for Improvement of Marine City, J. Ocean Eng. Technol., 14(3), pp 72-77.
11. Chul-Jin Yang, Jun-Seok Bae, Jong-Sik Lee, et al., 2018 :

Analysis of Mechanical Properties of Solidified soil using Pig Iron Slag, J. Korean Geosynth. Soc., 17(1), pp.1-10.

12. Kwang-Wu Lee, Jae-Hyun Park, Dae-Sung Cho, et al., 2023 : A Study on the Utilization Method in the SCW Method using Supplementary Cementitious Materials, J. Korean Geosynth. Soc., 22(3), pp.87-95.

13. Karolina Wojtacha-Rychter, Magdalena Krol, Adam Smolinski et al., 2022 : Dust from chlorine bypass installation as cementitious materials replacement in concrete making, J. Build. Eng., 51(1). pp.1-20.

14. J. Strunge, D. Knoefel, I. Dreizler, 1985 : Effect of alkalies and sulfur on the properties of cement, Zem. Kalk Gips, 38(3), pp.150-158.

15. M. A. Daous, 2004 : Utilization of Cement Kiln Dust and Fly Ash in Cement Blends in Saudi Arabia, Eng. Sci., 15(1), pp.33-45.

16. Przemysław Czapiak, Justyna Zapala-Slaweta, Zdzisława Owsiak, et al., 2020 : Hydration of cement by-pass dust, Constr. Build. Mater., 231, pp.1-9.

17. Ewelina Tkaczewska, 2019 : The influence of cement bypass dust on the properties of cement curing under normal and autoclave conditions, Structure and Environment, 11(1), pp.44-51.

18. Jin-yeon Hwang, Byung-joo Kang, Tae-jin Cho, et al., 2005 : An Experimental Study for the solidifying of Clay Sediments Consisting Soft Foundation by using Cement and Mineral Admixtures, J. Miner. Soc. Korea, 18(4), pp.301-312.

---

**최재준**

- 현재 충남대학교 토목공학과 박사과정
- 현재 삼부토건주식회사 토목부 상무

---

**이선목**

- 충남대학교 토목공학과 석사
- 충남대학교 토목공학과 박사
- 현재 (주)정우소재 이사

---

**장주찬**

- 동아대학교 화학공학 학사
- 현재 ㈜삼표시멘트 R&D팀 팀장

---

**오양석**

- 영남대학교 화학공학 학사
- 현재 ㈜삼표시멘트 R&D팀 과장

---

**김윤용**

- KAIST 토목공학과 공학박사
  - 현재 충남대학교 토목공학과 교수
-