

# 콘크리트 폐기물에서 분리된 시멘트 페이스트를 활용한 시멘트계 고화재 개발에 관한 연구

## Development of Cement-type Stabilizer using Cement Paste Separated from concrete Waste



**민태범 Tae-Beom Min**  
성신양회기술연구소/연구원  
E-mail : tbmin@sscem.com



**이민석 Min-Seog Lee**  
성신양회기술연구소/연구소장  
E-mail : mslove0519@sscem.com



**변승호 Seung-Ho Byeon**  
성신양회기술연구소/연구원  
E-mail : cemater@sscem.com

### 1. 머리말

최근 재건축 활성화로 인해 연간 2,000만 톤 이상의 건설 폐기물이 발생되고 있다. 이중 콘크리트 폐기물은 70% 이상을 차지한다.<sup>1,2)</sup> 따라서, 환경문제와 자원부족 문제, 폐기물 처리비용 및 야적지 부족문제 등으로 인하여 환경문제가 야기되고 있다.

이러한 사회적 배경 및 문제를 해결하기 위해 국내외에서 콘크리트 재활용에 관한 연구<sup>3,4)</sup>가 진행되고 있으며 국내에서는 폐콘크리트를 이용한 재생골재 연구가 많은 성과를 나타내 재자원화가 되었다. 그러나 폐 콘크리트의 30% 정도의 시멘트 페이스트에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이러한 문제를 해결하여 30%의 시멘트 페이스트를 재활용 할수 있다면 환경적 부담을 줄이고 원천 해체 폐기물 처리 비용을 크게 감소시킬 수 있을 것이다. 또한 30%의 시멘트 페이스트를 폐기물로 취급하기 보다는 600℃ 이상에서 고온열처리 하여 고화재로서 재활용할 수 있는 기술을 개발하게 된다면 환경적인 측면과 경제적인 측면에서 콘크리트 폐기물 분야의 자원재순환 기술로서 잠재적인 기술 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

따라서 본 기술기사에서는 폐콘크리트로부터 분리된 페이스트의 고온처리 온도에 따른 고화재 활용 가능성에 대하여 논하고자 한다.

### 2. 실험개요

본 연구에서는 폐콘크리트내에 포함된 골재의 영향을 제어하고자 폐콘크리트에서 채취한 시멘트 페이스트가 아닌 일반 시멘트 페이스트를 급속 탄산화 반응을 실시 후 노후화를 시킨 다음 노후화된 페시멘트 페이스트를 대상으로 연구를 실시하였다.

## 2.1 실험 방법

본 연구는 폐 콘크리트에서 분리된 페이스트를 고화재의 주요 원료로 활용하는 방안을 검토하기 위한 기초 실험으로써 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하여, 20×20 mm Cube몰드로 물시멘트비(W/C) 0.4의 순수한 페이스트 시험체를 제작하였다. 28일간 포화수산화칼슘 수용액에서 양생한 후, 노후화된 페이스트 시편을 모사하기 위하여 KS F 2584 “콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법”으로 탄산화 처리 한 시료와 탄산화를 실시하지 않은 두 가지 시료를 제작 하였으며 시료를 제조한 절차는 <그림1>과 같다.

위의 방법에 따라 제작된 두가지 시멘트 페이스트를 고화재의 원료로 사용하기 위하여 시멘트 페이스트 입자의 크기를  $\mu\text{m}$ 크기로 분쇄 후 100℃로 건조 하였다. 이후 실험용 Ball Mill에서의 분쇄를 통해 시멘트 입자와 유사한 분말도를 맞추었

다. 또한 재수화를 회복하기 위해 고온가열 조건은 0, 500, 600, 700, 800, 900℃로 설정하였으며<sup>5-9)</sup> 페이스트의 탄산화가 고화재로서 재활용에 미치는 영향을 확인하기 위해 탄산화 처리를 하지 않은 시료(NP: Normal Paste)에 대하여 탄산화된 시료(CP: Carbonated Paste)를 0, 25, 50, 75%를 혼합하여 탄산화에 의한 물리화학적 성질의 변화를 확인 하였다. 최종적으로 고화재의 성능을 확보하기 위해 4%의 이수석고를 자극제로 활용하였다.

## 2.2 실험 항목

본 연구의 실험 항목은 NP와 CP의 고온가열 온도에 따른 화학조성 차이를 확인하기 위해 시멘트의 형광 X선 분석과 비중, 강열감량 측정을 실시하였다. 또한 미소수화열 실험을 통해 수화반응 속도를 측정 하였으며 모르타르 레벨에서의 고화재의 압축강도 특성을 분석 하였다.

## 2.3 배합

고온가열을 하지 않은 페이스트(Plain)과 500~900℃에서 가열한 페이스트를 사용하여 모르타르 시험체를 제작 하였다. 사용 배합은 [표1]과 같다. W/B는 고온가열 조건에 따라 적용 하였으며 가열온도 0, 500, 600℃는 W/B 60% 적용 하였으며 가열온도 700℃는 W/B 70%, 800, 900℃는 W/B 80%로 적용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 사용재료의 기초적 물성

[표 2]는 본 연구에서 사용된 일반포틀랜드 시멘트(OPC)와 <그림 1>의 시료제작 절차에 따라 제작된 재생 시멘트 페이스트(NP, CP)의 화학적 성분 및 강열감량 결과를 나타낸 것이다. 강열감량 실험결과 일반 OPC대비 NP와 CP는 높은 강열감량을 나타냈다. 이는 NP와 CP의 시편 내부에 이미 수

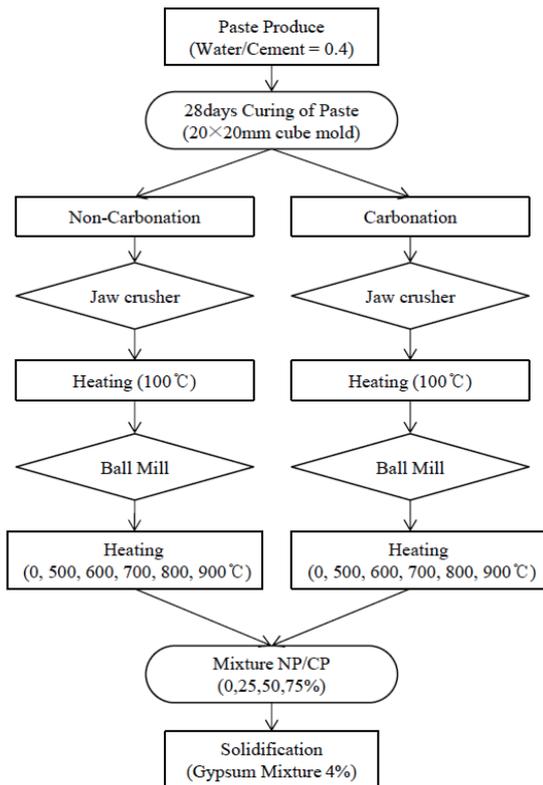


그림 1. 시료 제조 절차

[표 1] 모르타르 배합표

Specimen	Temperature (°C)	W/B (%)	Binder(%)			Sand (g)
			NP	CP	Gypsum	
01 ~ 03	0 500 600	60	96	-	4	1350
04 ~ 06			72	24		
07 ~ 09			48	48		
10 ~ 12			24	72		
13	700	70	96	-	4	1350
14			72	24		
15			48	48		
16			24	72		
17 ~ 18	800 900	80	96	-	4	1350
19 ~ 20			72	24		
21 ~ 22			48	48		
23 ~ 24			24	72		

\* NP and CP indicate normal paste and carbonated paste, respectively

[표 2] 탄산화 여부에 따른 화학성분 및 강열감량 실험 결과

Specimen	Chemical composition(wt.%)						
	lg-Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC(Plain)	2.9	21.4	4.7	3.5	61.6	2.3	2.1
NP	14.1	15.6	3.3	2.7	49.2	1.7	1.4
CP	25.6	15.6	3.3	2.7	49.2	1.7	1.4

[표 3] 탄산화 여부에 따른 비중 측정 결과

Properties	Specimen		
	OPC	NP	CP
Density(g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.62	2.64

화반응이 이루어져 다량의 수화물이 존재하며 이들 수화물에서 결합수가 열분해 반응으로 방출되었으며 특히 CP의 경우 탄산화된 수화물로부터(CaCO<sub>3</sub>) 탈탄산 반응으로 인하여 NP보다 강열감량이 증가 하는 것으로 나타났다. 이는 이산화탄소가 수산화칼슘만 탄산칼슘으로 석출시키지 않고 C-S-H 내부의 칼슘과도 반응하여 탄산칼슘을 석출하여 강열감량이 높게 나타나는 것으로 사료된다.

[표 3]은 비중 측정 결과를 나타낸 표이다. 측정결과 NP와 CP의 차이는 크게 나타나지 않았다.

### 3.2 고온가열에 의한 물성변화 결과

폐 시멘트 페이스트가 고화재의 원료로 사용되기 위해서는 해당재료가 자체수경성을 가지고 있어야 한다. 따라서 페이스트의 분리를 용이하게 하고, 수화반응을 부분적으로 회복시켜 자체수경성을 확보하기 위한 방법으로 고온가열을 하였다. 고

온가열은 수화생성물의 열분해 메커니즘에 근거하여 소성온도를 500, 600, 700, 800, 900°C로 설정한 후, 강열감량을 측정하였으며 그 결과를 [표 4]에 나타내었다. 가열온도에 따른 강열감량 실험결과 CP의 강열감량이 NP의 강열감량에 비해 전체적으로 높게 나타났다. 또한 탄산칼슘의 분해가 일어나는 시점 (약 600-800°C)에서의 강열감량은 더욱 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞서 언급된 바와 마찬가지로 축진탄산화 처리가 C-S-H 내부의 칼슘을 일부 용출시켜 구조적인 불안정을 초래하고, 이로 인하여 다량의 탄산칼슘이 석출되었기 때문으로 사료된다. 그러나 500°C에서 CP의 강열감량이 NP의 강열감량보다 다소간 높게 측정된 것은, C-S-H 내부의 구조 불안정으로 화학적 결합수의 유실과 연관성이 있는 것으로 추정할 수 있으나 보다 정확한 분석 위해서는 후속의 연구를 통해 증명할 필요가 있다.

<그림 2>는 고온가열에 의한 NP와 CP의 페이스트의 비중의 변화를 나타낸 것이다. 가열온도가 높아짐에 따라 수화물의 열분해 반응이 증가하며, 강열감량이 증가하는 것으로 나타났다. 이로 인해 결합수가 제거되면서 수화 상(phase)이 다른 상 구조로 변화하면서 비중이 점차 증가하는 것으로 나타

[표 4] 가열온도에 따른 강열감량

Specimen	lg-Loss(wt.%)				
	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
NP	7.8	9.4	9.9	11.4	13.1
CP	8.0	11.1	15.7	19.1	23.9

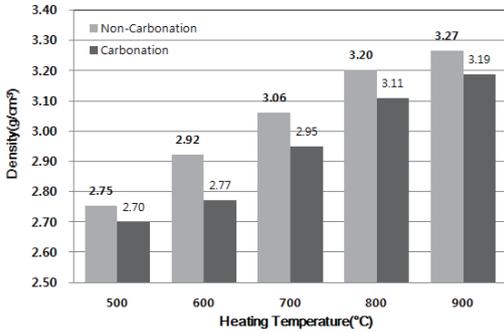


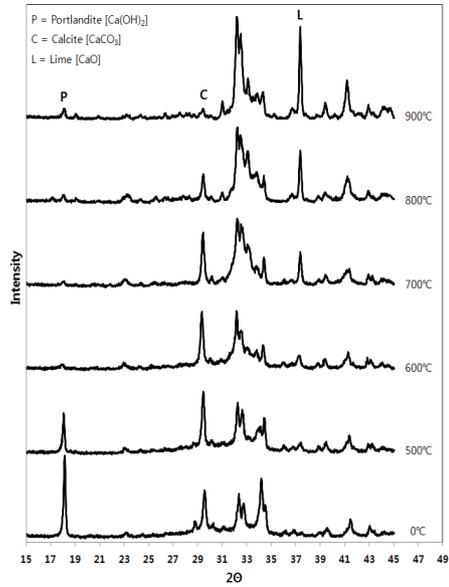
그림 2. 고온가열에 의한 NP와 CP의 페이스트의 비중측정 결과

났으며 동일한 중량에서 비중의 증가는 부피의 감소 의미로 해석할 수 있다.

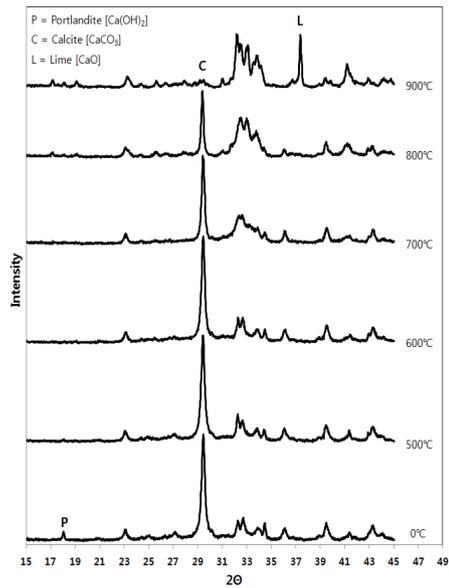
### 3.3 XRD 분석

<그림 3>은 고온가열 온도 조건에 따른 페이스트의 XRD(X-ray diffractometer) 분석 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 경화된 시멘트 페이스트에서는 수화반응에서 생성되는 Ca(OH)<sub>2</sub>의 피크(peak)가 가장 두드러지게 나타나며, 반응 물질인 시멘트 광물 상(C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S 등)들은 수화반응을 통하여 소비되기 때문에 피크가 감소하게 된다. 시멘트 경화체 중에서 Ca(OH)<sub>2</sub>는 CO<sub>2</sub>가 존재하는 환경에서는 서서히 CaCO<sub>3</sub>로 변화되는데 이를 탄산화(carbonation)라고 한다.

고온가열을 실시하지 않은(<그림 3>에서 0°C 시편으로 표기) NP, CP 시편의 X선 회절분석 결과에서는 상기와 같은 이유에 따라 각기 Ca(OH)<sub>2</sub> 피크와 CaCO<sub>3</sub> 피크가 뚜렷하게 관찰된다. 우선 소성하지 않은 시편에서는 Ca(OH)<sub>2</sub> 피크가 뚜렷하게 나타나고 있으나, 약 450°C에서 일어나는 열분해반응 (Ca(OH)<sub>2</sub> → CaO(s) + H<sub>2</sub>O(g)) 반응을 통하여 500°C 소성한 시편에서는 현저히 감소하고 있다. 또한 600°C 부터는 CaCO<sub>3</sub>의 탈탄산반응을 통하여 서서히 생석회(lime; CaO)를



(a) NP



(b) CP

그림 3. 고온가열 온도 조건에 따른 페이스트의 XRD 분석 결과

[표 5] 압축강도 측정 결과

Specimen	Temperature (°C)	W/B	Binder(%)			Compressive strength (MPa)	
			NP	CP	Gypsum	7days	28days
1	0	0.6	96		4	6.1	10.8
2			72	24	4	5.5	11.8
3			48	48	4	4.8	11.3
4			24	72	4	4.0	10.4
5	500	0.6	96		4	15.0	22.0
6			72	24	4	12.9	19.1
7			48	48	4	10.3	18.2
8			24	72	4	9.3	16.5
9	600	0.6	96		4	21.3	30.8
10			72	24	4	17.3	27.0
11			48	48	4	13.0	22.1
12			24	72	4	10.0	19.4
13	700	0.7	96		4	14.9	19.9
14			72	24	4	15.4	19.1
15			48	48	4	12.6	16.5
16			24	72	4	10.2	10.8
17	800	0.8	96		4	1.9	20.3
18			72	24	4	1.0	16.3
19			48	48	4	0.5	11.1
20			24	72	4	0.4	8.1
21	900	0.8	96		4	5.9	14.7
22			72	24	4	4.3	11.5
23			48	48	4	3.3	9.0
24			24	72	4	2.0	8.3

생성하기 시작하며, 900 °C 온도에서는 대부분의 calcite(탄산칼슘; 방해석)이 사라지고 CaO로 변화되는 것으로 확인되었다. 탄산화반응을 겪은 CP시험체의 경우 Ca(OH)<sub>2</sub>의 피크는 미세하게 나타나고 있는데, 이는 대부분의 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변하였기 때문이다. 마찬가지로 900 °C 소성시에 대부분이 탈탄산 반응으로 인하여 CaO로 변화되는 것으로 나타났다. NP, CP 시편 모두 공통적으로 온도가 올라감에 따라 2θ 회절각 31~34°의 범위에서 피크가 성장하는 것으로 나타났다. 이들 피크는 시멘트 수화물이 고온가열과정에서 탈수반응과 상변화 반응이 일어나기 때문이다.

### 3.4 모르타르 압축강도

[표 5]는 압축강도 실험결과를 나타낸 것이다. 모든 온도조건에서 탄산화된 시료의 함유량이 높을수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 탄산화에 의해 생성된 석회석이

압축강도 증진에 큰 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다.

압축강도 실험결과 가장 높은 강도를 나타낸 온도조건은 600 °C이었다. 이는 온도조건에 따라 수산화칼슘의 열분해 과정과 CaCO<sub>3</sub>의 탈탄산반응에서 생성되는 CaO의 영향으로 600°C가 더 우수한 강도를 나타내는 것으로 판단된다. CaO가 대량으로 생성되기 시작하는 온도인 700 °C 이상부터는 몰탈 실험 중 유동성의 저하가 매우 컸으며 이에 따라 단위수량이 증가되고, 특히 800, 900 °C의 경우 초기 유동성 저하 및 급격한 로스생성, 강도 또한 낮음을 확인할 수 있었다.

### 3.5 미소수화열 분석

일반시료와 탄산화시료를 동일한 양으로 혼합한 배합에 대하여 고온가열조건에 따른 수화열을 분석하기 위하여 미소수화열량계를 사용하여 수화열을 측정한 결과를 <그림 4>에 나

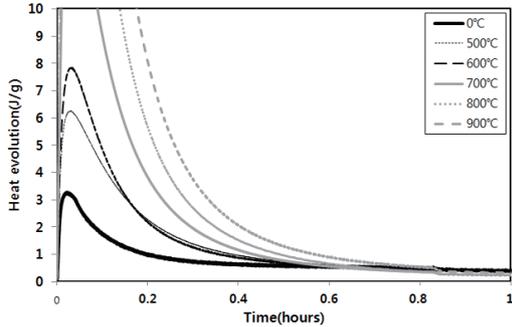


그림 4. 고온가열에 온도별 수화열 측정 결과

타내었다. 실험 결과 높은 온도에서 가열된 원료일수록 초기 수화속도가 빠르며 높은 수화발열량을 나타내었다. 일반 시멘트와는 다르게 모든 재료에서 1차 발열 이후 2차 수화발열은 나타나지 않았으며 온도가 증가할수록 수화발열은 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 특히 700~900 °C 재료는 분석기기의 측정범위를 초과하는 결과로 분석되었으며, 이는 XRD 분석결과에서 나타나듯 가열온도가 높아짐에 따라 CaO의 생성량이 증가하고 CaO가 초기에 높은 수화열을 발생시키기 때문이다.

CaO의 함량이 너무 높으면 초기에 과팽창이나 부풀음 현상이 발생할 수 있으므로 안정적인 수화반응 관점에서는 700 °C 보다는 낮은 온도를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 콘크리트로부터 분리된 페이스트 미분말을 이용 시멘트계 고화재로 활용하기 위하여 기초 특성을 검토하고자 하였다. 검토 결과 수화반응이 끝난 페이스트는 시멘트보다 비중이 낮고 수화회복을 위한 고온가열 과정에서 온도증가에 따라 비중이 다르게 나타나 그에 따른 부피도 고려되어야 할 것으로 판단된다. 수화회복을 위한 소성온도에서 압축강도가 가장 우수한 온도조건은 600 °C로 나타났으며, 700 °C 이상에서는 CaO의 생성량이 과도하여 높은 수화열, 유동성 저하 및 낮은 강도가 발현되는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구 범위 내에서 고화재로 활용 가능한 적정 수화회복 온도는 600 °C로 판단되며 시멘트계 고화재료로서 활용될 수 있는 가능성을 보였다는 점에 의의를 둔다.

#### 참고문헌

1. Sasaki T, Sone T, Koyama H, Yamaguchi H. Steam-assisted pyrolysis system for decontamination and volume reduction of radioactive organic waste. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2009 Mar;46(3):232-38.
2. Sawada K, Uruga K, Koyama T, Shimada T, Mori Y, Enokida Y, Yamamoto I. Stoichiometric Relation for Extraction of Uranium from UO<sub>2</sub> Powder using TBP Complex with HNO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O in Supercritical CO<sub>2</sub>. 2005 Mar;42(3):301-4.
3. COX EJ, GARDE R. decontamination of concrete surfaces at the Los Alamos Scientific Laboratory. In: Proc. DOE Concrete Decontamination Workshop; 1980 May 28-29; Battelle Conference Center, Seattle(WA): the Los Alamos Scientific Laboratory; 1980. p.109-23.
4. Koga Y, Inoue T, Tateyashiki H, Okamoto M, Asano T. A process for separating aggregate from concrete waste during the dismantlement of nuclear power plants. *Journal of Hoshasei Haikibutsu Kenkyu*. 1997;3(2):17-25.
5. Jang JH, Kim YR, Choi SJ, Choi HY, Kim MH, Kim MH. A Study on the Fundamental Properties and Application as Cementious Admixture by heating Temperature of Recycled Powder. *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2001 May 12; Anseong, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2001. p. 635-40.
6. Cho MC, Park TS, Chu YS, Hwang HZ. A study on the development of recycling cement using the waste concrete powder. *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2002 May 12; Chungju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2002. p. 137-42.
7. Xinwei M, Zhaoxiang H, Xueying L. Reactivity of Dehydrated Cement Paste from Waste Concrete Subjected to Heat Treatment, Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization Conference Proceeding Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies; 2010 Jun 28-30; Ancona, Italy, West Midlands (United Kingdom): Sustainable Construction Materials and Technologies; 2010. p. 175-80.
8. Letelier V, Tarela E, Muñoz P, Moriconi G. Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2017 Feb;132:365-75.
9. Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013 Mar;61(1):145-54.

담당 편집위원 : 민태범(성신양회(주))