

# 비소성 시멘트 모르타르의 증기양생 후 열처리에 따른 물리적 특성

## Physical Properties of Non-sintered Cement Mortar with Heat Treatment after Steam Curing

나 형 원<sup>1</sup>

형 원 길<sup>2\*</sup>

Na, Hyeong-Won<sup>1</sup>

Hyung, Won-Gil<sup>2\*</sup>

*Ph.D course, School of Architecture, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Korea<sup>1</sup>  
Professor, School of Architecture, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Korea<sup>2</sup>*

### Abstract

This study aims to develop non-sintered cement that can replace the Portland cement by utilizing industrial by-products. As a suggestion, the physical properties of non-sintered cement mortar depending on the curing method were investigated with ground granulated blast furnace slag, class C fly ash, and class F fly ash. As a result of the study, it was found that the strength performance and absorption rate were improved through the heat treatment process after steam curing. It was confirmed through crystal phase analysis that the hydration was accelerated after heat treatment, and the bonding material formed a dense internal structure.

Keywords : blast furnace slag, fly ash, steam curing, non-sintered cement mortar

### 1. 서 론

최근 알칼리 활성 결합재는 산업부산물을 적용할 수 있는 이점이 있어 친환경 결합재로 인식되고 있으며 특히, 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag; 이하 GGBFS) 및 플라이 애시(Fly Ash; 이하 FA)는 산업부산물을 재활용한 비소성 재료로서 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement; 이하 OPC)를 대체할 수 있는 새로운 시멘트 대체재라고 할 수 있다. 이와 같은 비소성 시멘트와 관련된 국내외 연구동향은 GGBFS 및 FA의 치환 비율을 점차 늘려가면서 OPC를 사용하지 않은 결합재를 개발하고 이를 제품화하는데 주력하는 경향을 보인다. 또한 OPC를 사용하

지 않는 조건에서 고강도를 확보하기 위해 알칼리 활성화제를 사용하여 반응성을 촉진하는 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 건설현장의 조건에 맞는 비소성 시멘트의 구체적인 배합방법이나 제품의 품질확보를 위한 다양한 양생조건 등의 기준정립이 이루어지지 않아 실사용에 있어서는 제약이 있다. 비소성 시멘트의 사용성 확대를 위해서는 고강도 발현 방안에 대한 연구를 진행함과 동시에 저강도 영역에서의 활용방안도 함께 모색할 필요가 있으며, 시약급의 알칼리 활성화제를 사용하지 않는 것이 경제적으로 유리할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 OPC와 알칼리 활성화제를 사용하지 않은 비소성 시멘트(Non-Sintered Cement; 이하 NSC) 모르타르를 개발하여 활용도가 높은 저강도의 콘크리트(Precast Concrete; 이하 PC)제품군에 적용하고자 하였다. 이를 위해 온도의존성이 높은 사용재료의 특성[1]을 고려하여 열처리를 실시한 NSC 모르타르의 물리적 특성을 파악하였다. 또한 적정 배합조건과 양생조건을 도출함으로써 산업부산물의 사용성 확대와 품질확보에 기여할 수 있는 방안에 대해 검토하였다.

Received : January 18, 2021

Revision received : February 18, 2021

Accepted : February 23, 2021

\* Corresponding author : Hyung, Won-Gil

[Tel: 82-53-810-2597, E-mail: beda@yu.ac.kr]

©2021 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 재료

본 실험에서는 NSC 모르타르의 물리적 특성을 대조해 보기 위해 「KS L 5201 포틀랜드 시멘트」의 규정을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 「KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그 미분말」의 규정을 만족하는 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 사용하였다. Table 1과 Figure 1은 원재료의 화학조성과 결정상을 나타낸 것이다.

GGBFS를 기반재료로 사용하였으며, 잠재수경성인 GGBFS의 수화반응을 촉진시키기 위해 C급 플라이 애시(Type C Fly Ash; 이하 CFA)를 사용하였다. CFA를 사용하는 경우, 다량의 CaO, SO<sub>3</sub> 등의 성분을 함유하고 있으므로 초기 수화반응 촉진과 수화물에 의한 팽창을 유발할 수 있다. 따라서 CFA는 단독으로 사용할 수 없으며 CFA를 사용한 결합재의 안정화를 도모하기 위해 F급 플라이 애시(Type F Fly Ash; 이하 FFA)와 혼합하여 사용할 것을 「KS L 5405 플라이 애시」에서 권장하고 있다. 이를 바탕으로 CFA와 FFA의 치환 비율을 1:3, 1:1, 3:1로 설정하였으며 혼합사용 시 적정 비율을 도출하고자 하였다.

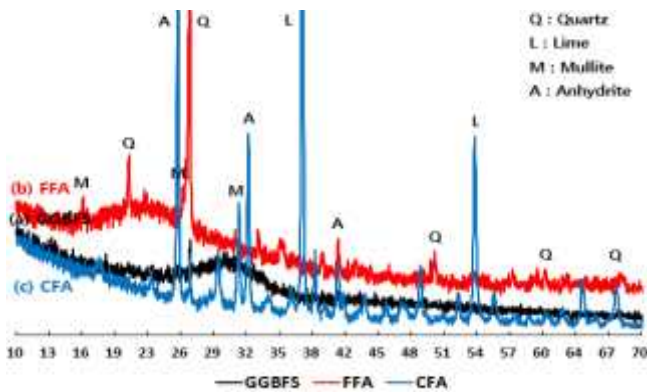


Figure 1. XRD patterns of (a) GGBFS and (b) FFA, (c) CFA raw materials

Table 1. Chemical composition of raw materials

Materials	Chemical composition (%)					
	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	15.16	4.13	3.86	67.53	3.59	3.25
GGBFS	31.08	13.66	0.49	46.79	2.55	3.05
CFA	3.80	1.32	0.51	62.05	3.34	27.55
FFA	66.49	19.21	5.08	3.86	1.50	0.48

### 2.2 공시체 제작

Table 2는 비소성 시멘트(NSC) 모르타르의 배합조건을 나타낸 것이다. 결합재와 잔골재의 중량비(B:S)는 1:3으로 설정하였으며, W/B는 0.4로 고정하여 진행하였다. NSC 모르타르의 비빔은 원재료를 계량한 후 배합수를 가하여 모르타르 혼합기를 사용하였다. 혼합 후에는 강제식 3연 몰드를 사용하여 제작하였다.

Table 3은 비소성 시멘트(NSC) 모르타르의 양생 이력을 나타낸 것으로 초기강도 향상을 위해 증기양생 후 열처리를 실시하였다. Step I은 증기양생 단계로, 전치양생 1시간 후 최고온도 60±5°C에서 5시간을 유지하고 3시간 이상 서서히 냉각시켰다. Step II는 열처리 단계로, 증기양생을 통해 경화된 공시체를 100°C와 250°C에서 24시간동안 열처리하였다. 열처리한 공시체는 서서히 냉각시킨 후 온도 20±2°C, 상대습도 60±5% 조건의 항온-항습실에서 양생을 실시하였다.

### 2.3 실험 계획

Table 4는 NSC 모르타르의 특성을 파악하기 위한 평가항목을 나타낸 것이다. 강도와 흡수율은 PC제품의 출하시기를 고려하여 설정한 것으로 재령 14일을 기준으로 전후 성능을 파악하고자 하였다. 또한 열처리 이후 재령 7일의 NSC 모르타르의 결정상을 분석하기 위해 양생조건과 배합비에 따라 X선 회절 분석(X-ray Diffraction; 이하 XRD)을 실시하였고 수화생성물을 관찰하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM) 관찰을 실시하였다.

Table 2. Mix proportions of mortars

Type	W/B	Binder proportion (%)				B:S
		GGBFS	CFA	FFA	OPC	
Plain	0.4	-	-	-	100	1: 3
C5F15	0.4	80	5	15	-	1: 3
C10F10	0.4	80	10	10	-	1: 3
C15F5	0.4	80	15	5	-	1: 3

Table 3. Curing regime

Step	Procedure	Temp. (°C)	Time (hr)
I	Steam	60±5	5
		100	24
II	Heating	250	24

Table 4. Evaluation Items

Flexural Strength (day)	Form removal and 3, 7, 14, 28, 56
Compressive Strength (day)	
Water Absorption (day)	3, 7, 14
XRD, SEM (day)	7

## 2.4 실험 방법

NSC 모르타르의 휨강도 및 압축강도 시험은 UTM (Hansin Kumpung, HST-50CS)을 사용하여 탈형강도와 재령 3, 7, 14, 28, 56일 강도를 측정하였다.

NSC 모르타르의 흡수율 시험은 온도  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  조건에서 24시간 건조시킨 절대건조 상태의 무게를 측정후, 온도  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  조건의 맑은 물 안에서 24시간 경과후 표면건조 상태의 질량을 측정하였다. 각 공시체의 흡수율은 수식 (1)에 대입하여 파악할 수 있다.

$$W_a = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

여기에서,  $W_a$  : water absorption (%)  
 $M_0$  : mass after drying (g)  
 $M_1$  : mass after absorption (g)

NSC 모르타르의 SEM 관찰은 강도 측정 시, 채취한 시료를 분말형태로 제조하여 1일 동안 아세톤 용액에 침지시킨 후 주사형 전자 현미경(Hitachi, S-4800)을 이용하여 관찰하였다. 결정구조는 X선 회절 분석기(Diatome, MPD for bulk)를 이용하여 40kv, 30mA, angle  $10^\circ \sim 70^\circ$  조건에서 측정하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 휨강도 및 압축강도

Figure 2는 NSC 모르타르의 양생방법에 따른 휨강도 시험 결과를 나타낸 것이다. 증기양생 실시 후, 모든 배합의 휨강도는 재령이 지남에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있다.

열처리 후 Plain 모르타르는 급격한 강도 저하를 나타내며 증기양생 그래프보다 대체로 낮게 나타난다. C5F15 배합은  $100^\circ\text{C}$  조건에서 강도저하 이후 가장 큰 폭으로 상승하며 증기양생 그래프보다 높게 나타난다. 그러나  $250^\circ\text{C}$  열처리 이후에는 증기양생 그래프보다 다소 저하되어 나타난다. C10F10 배합은  $100^\circ\text{C}$  열처리 후 강도저하는 나타나지만 재령이 지남에 따라 증기양생 그래프보다 높게 나타난다.  $250^\circ\text{C}$  열처리 후에는 강도의 변화가 더욱 큰 폭으로 나타나며 재령 28일 이후 휨강도는 하락한다. C15F5 배합은  $100^\circ\text{C}$  열처리 후 가장 안정적인 강도발현을 나타낸다. 그러나  $250^\circ\text{C}$  열처리

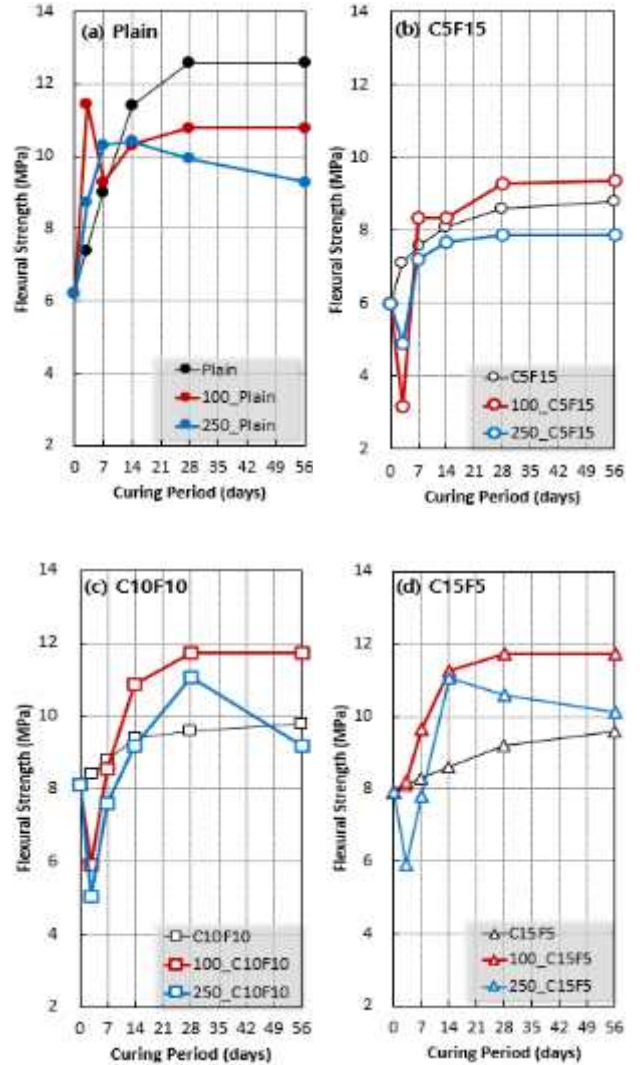


Figure 2. Flexural strength for mortar

후에는 강도저하가 발생되며 재령 14일 이후 점차 하락한다.

양생방법에 따른 NSC 모르타르의 휨강도 시험 결과, 열처리 온도와 배합조건에 따라 휨강도 발현은 다르게 나타난다. 적정 온도의 열처리를 통해 NSC 모르타르의 반응성은 향상되며,  $100^\circ\text{C}$  열처리 후 C15F5 배합이 가장 안정적으로 휨강도를 발현하였다.

Figure 3은 NSC 모르타르의 양생방법에 따른 압축강도 시험 결과를 나타낸 것이다. 증기양생 실시 후 모든 배합의 압축강도는 재령이 지남에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있다.

열처리 후 Plain 모르타르는 급격한 강도저하를 나타낸 반면 NSC 모르타르의 압축강도는 향상되는 경향을 보인다. C5F15 배합의 압축강도는 열처리 이후 증기양생 측정값보다

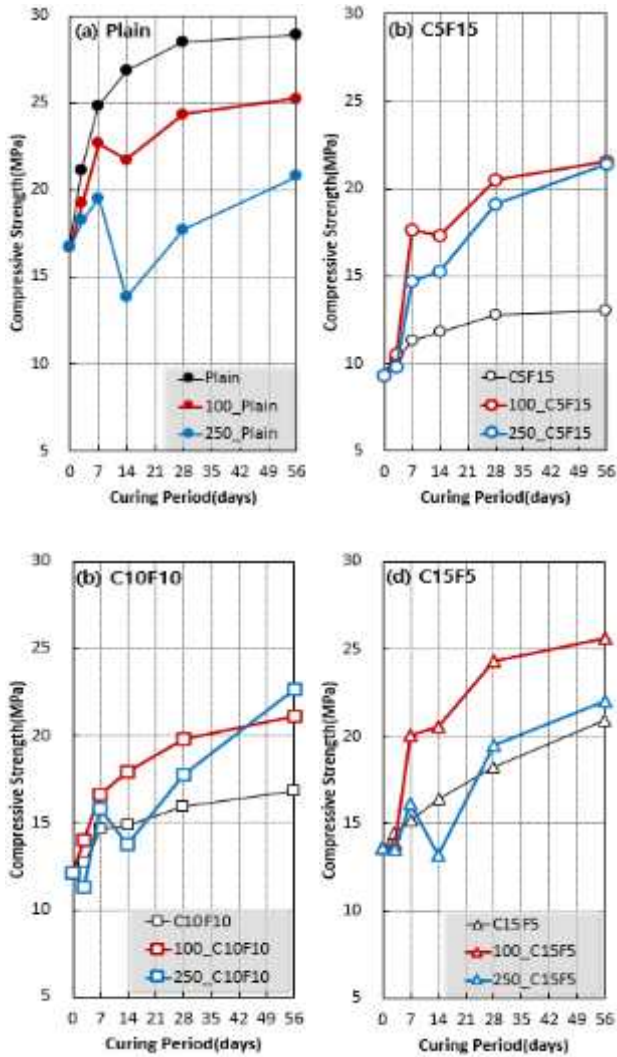


Figure 3. Compressive strength of mortar

크게 향상되어 나타났다. C10F10 배합은 100°C 열처리 후 일정하게 상승하는 경향을 보이지만, 250°C 열처리 후에는 재령 14일 강도저하가 나타난다. C15F5 배합은 100°C 열처리 후 NSC 모르타르 중 안정적으로 높은 강도를 가장 빠르게 발현하였다. 일반적으로 FFA는 반응성이 낮은 특성이 있어 결합재 적용 시 물리적 특성이 저하된다[2]. 반면 CFA는 CaO, SO<sub>3</sub> 함유량이 상대적으로 높기 때문에 반응속도가 빨라 초기강도 증진에 기여하므로 CFA의 혼입 비율이 높아질수록 빠르게 반응하게 된다.

양생방법에 따른 NSC 모르타르의 압축강도 시험 결과, 적정 열처리 온도와 배합조건은 100°C 열처리된 C15F5 배합으로 도출할 수 있다. 열처리 이후 일부 배합에서 강도저하는 나타나지만 이후 점차 안정화되며 강도는 다시 상승된다. 이를 통해 적정 온도의 열처리를 통해 NSC 모르타르의 압축강

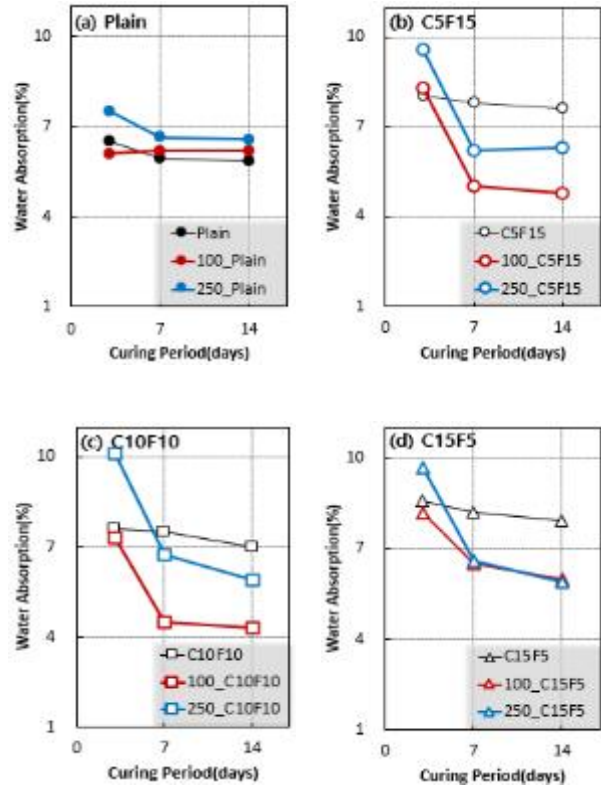


Figure 4. Water absorption of mortar

도는 향상되는 것을 확인할 수 있다. 결론적으로, 실험에 사용된 비소성의 원재료는 온도의존성이 높기 때문에 수화반응 촉진을 위해 적정 온도의 열처리는 필수적이며 NSC 모르타르는 PC제품 적용가능성이 높은 것으로 판단된다.

PC제품 중에서 벽돌과 보도블록 등은 일반적으로 활용도가 높은 저강도의 PC제품으로 압축강도 13MPa 이상[KS F 4004 콘크리트 벽돌], 휨강도 5MPa 이상[KS F 4419 보차도용 블록]의 품질기준을 만족해야 한다. 본 연구에서 제시한 배합조건과 양생이력을 통해 NSC 모르타르는 앞서 제시한 PC제품의 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다. 다만 강도 시험 결과와 함께 NSC 모르타르의 흡수율 또한 고려할 필요가 있으며 성능발현 시기를 고려하여 PC제품의 출하시기를 설정할 필요가 있다.

### 3.2 흡수율

Figure 4는 NSC 모르타르의 양생방법에 따른 흡수율 시험 결과를 나타낸 것이다. 증기양생 실시 후, 모든 배합의 흡수율은 재령이 지남에 따라 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나 열처리 후 NSC 모르타르의 흡수율은 변화폭이 급격하게 낮아지는 경향을 보인다. 100°C 열처리 이후 Plain 모르



타르의 흡수율은 휨강도 저하시기에 소폭 증가되는 반면 NSC 모르타르의 흡수율은 열처리 이후에 대폭 낮아지고 이 시기에 강도가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 250℃ 열처리 이후 재령 3일에는 모든 배합에서 흡수율이 다소 높게 나타나는데, 이를 통해 250℃ 조건에서는 충분한 내부구조를 형성하지 못한 것으로 볼 수 있다. 따라서 적정 온도의 열처리라는 강도 발현의 촉진과 치밀한 내부구조를 형성하는데 기여하는 반면 적정 온도 이상의 열처리는 내부구조 형성에 불리하게 작용하게 된다.

배합별로 살펴본 결과, 동일 재령에서 높은 압축강도를 나타내는 C15F5 배합의 흡수율이 비교적 높게 나타나는 것은 CFA의 치환비율에 따른 결과로 판단된다. 열처리 후 NSC 모르타르의 흡수율은 향상되지만 100℃ 조건에서 CFA의 치환비율이 높은 것은 다소 불리하게 작용할 수 있는 것으로 볼 수 있다. 다량의 CFA는 내부구조의 팽창 및 공극을 유발할 수 있으므로 흡수율이 높게 나타나는 원인으로 작용한 것으로 보인다. 이러한 경향은 SEM 관찰 결과를 통해서 확인할 수 있으나 추후 공극 구조를 파악하는 시험을 통해 정확도를 보완할 필요가 있을 것으로 사료된다.

양생방법에 따른 NSC 모르타르의 흡수율 시험 결과, 증기 양생 실시 후 열처리를 통해 NSC 모르타르의 흡수율은 향상되며 적정 열처리 온도는 100℃로 도출할 수 있다. 적정 배합비는 PC제품 종류에 따라 흡수율 기준이 상이하므로 이를 고려하여 도출할 필요가 있다.

### 3.3 X선 회절 분석

Figure 5는 NSC 모르타르의 양생방법에 따른 X선 회절 분석 결과를 재령 7일을 기준으로 비교한 것이다.

각 배합의 주요 결정상은 Portlandite( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Quartz( $\text{SiO}_2$ ), Calcite( $\text{CaCO}_3$ ), Mullite( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ) 임을 알 수 있다. Calcite는 다량의 CaO 성분이 공기 중의  $\text{CO}_2$ 와 반응으로 생성된 것이며[3-4], NSC 모르타르의 Mullite는 원재료의  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 반응에 의해 형성된 것으로 보고되고 있다[5].

Plain 모르타르는 Portlandite와 Calcium Silicate Hydrate(이하 CSH) 생성으로 강도발현에 기여한다. 열처리 후 Portlandite는 촉진되지만, 이때 휨강도는 급격하게 증가되었다가 저하되는 특징이 있다.

NSC 모르타르는 Alumino Silicate를 생성하고 Calcite와 CSH 수화물에 영향을 받는 것으로 판단된다. CSH 상은

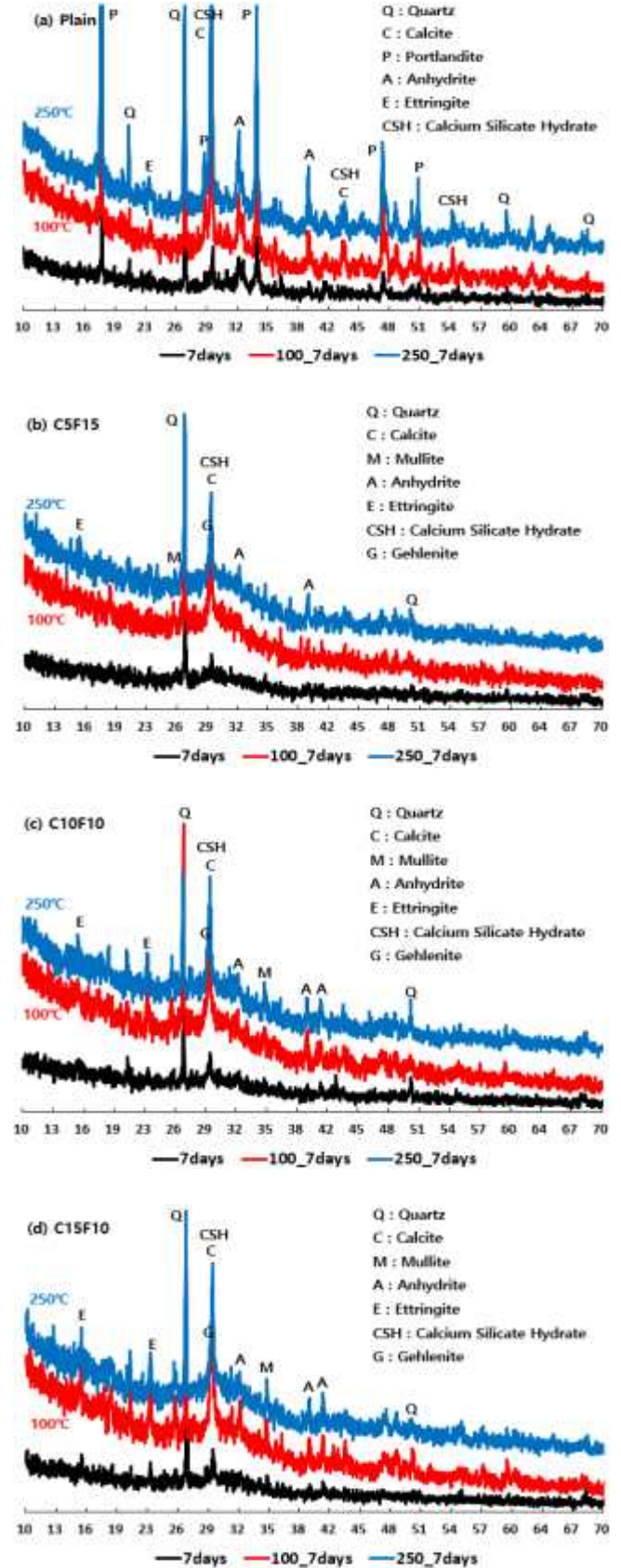


Figure 5. X-ray diffraction analysis of specimens in 7 days

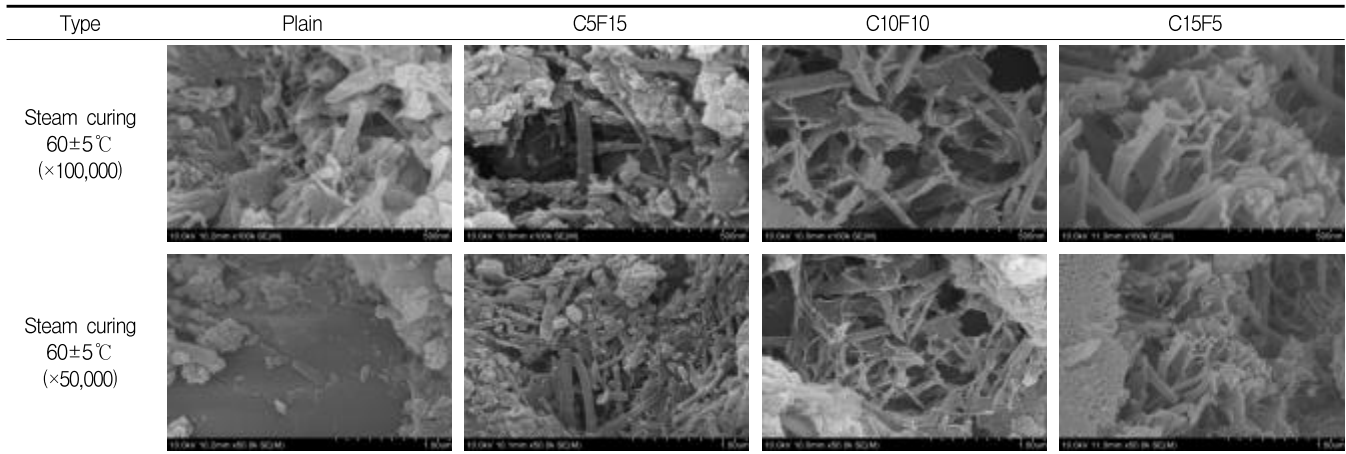


Figure 6. SEM image of form removal

CaO와 SiO<sub>2</sub> 성분이 반응하여 생성되며, CaO 성분은 Gehlenite(Ca<sub>2</sub>Al[AlSiO<sub>7</sub>]) 생성에도 기여하게 된다[6]. 이와 같이 NSC 모르타르는 CFA의 혼입으로 Ca 성분이 증가되어 GGBFS의 Si, Al 용출이 가속화되고[7], 증기양생과 열처리를 통해 Alumino Silicate 생성이 촉진되어[8-10] 강도향상과 치밀한 내부구조를 형성하게 된다.

양생방법에 따른 NSC 모르타르의 X선 회절분석 결과, 열처리 과정을 통해 반응성은 촉진되는 것으로 나타난다. 다만 반응성이 촉진되는 시기에 Ettringite와 같은 수화 생성물의 팽창 등으로 강도는 일시적으로 저하되는 것으로 사료된다.

### 3.4 SEM 관찰

Figure 6은 증기양생 후 탈형한 NSC 모르타르의 수화생성물을 관찰한 것이다. Plain 모르타르는 주로 판상형의 Portlandite 수화물을 관찰할 수 있다. 반면에 NSC 모르타르는 침상형의 생성물이 그물망처럼 연결되어 Alumino Silicate와 CSH 등의 수화물이 혼재되어 있는 형상을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 흡수율 측면에서는 다소 불리하게 작용할 수 있으나, 탈형 시 높은 휨강도 성능을 발휘하는데 기여한 것으로 판단된다.

Figure 7은 증기양생 후 열처리한 NSC 모르타르의 재령 7일 수화생성물을 관찰한 것이다. 열처리 후 Plain 모르타르는 고온양생의 결과로 인해 충분한 수화 반응이 이루어지지 않아 미세구조의 일체화가 저하된 모습을 보이며, 이러한 경향은 100°C 보다 250°C 조건에서 더욱 관찰하기 쉽다. 이미 경화된 Plain 모르타르에 열처리를 더하면 내부구조는 점차 붕괴되며[11] 주요 수화물인 Portlandite와 CSH의 탈수현상으로 수화물은 변화되고 내부의 일체화가 저해된다[12].

NSC 모르타르는 열처리 후 일체화가 촉진된 경향을 보이며 열처리 온도와 상관없이 밀실해진 내부구조를 관찰할 수 있다. 다만 100°C 조건에서 보다 낮은 흡수율을 나타내므로 좀 더 밀실한 내부구조를 관찰할 수 있다. 이를 통해 NSC 모르타르는 고온의 양생 조건에서 침상구조 사이에 수화물을 생성함으로써 일체화되고 안정적인 성능 확보가 가능한 것으로 사료된다. 양생방법에 따른 NSC 모르타르의 SEM 관찰 결과, 다양한 형상의 수화생성물을 관찰할 수 있으며 열처리 후 내부구조는 밀실해지는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구의 범위 내에서 비소성 시멘트(NSC) 모르타르의 물리적 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양생방법에 따른 NSC 모르타르의 강도 시험 결과, 적정 온도의 열처리를 통해 강도는 향상되는 것으로 나타났다. 열처리 후 강도는 일시적으로 저하되지만 재령이 지남에 따라 안정화된다.
- 2) 열처리 후 NSC 모르타르의 강도 발현은 CFA 치환비율이 높을수록 빠르게 반응하였다. PC 제품 적용 시 유리한 양생조건과 배합비를 도출하면 100°C 열처리 조건에서 C15F5 배합임을 알 수 있다.
- 3) 양생방법에 따른 NSC 모르타르의 흡수율 시험 결과, 열처리를 통해 강도가 향상되는 시기에 흡수율 성능도 크게 개선되는 것으로 나타났다. 이는 반응성이 촉진되어 흡수율 성능이 개선된 것으로 볼 수 있다.
- 4) 양생방법에 따른 NSC 모르타르의 XRD 분석 결과, 열

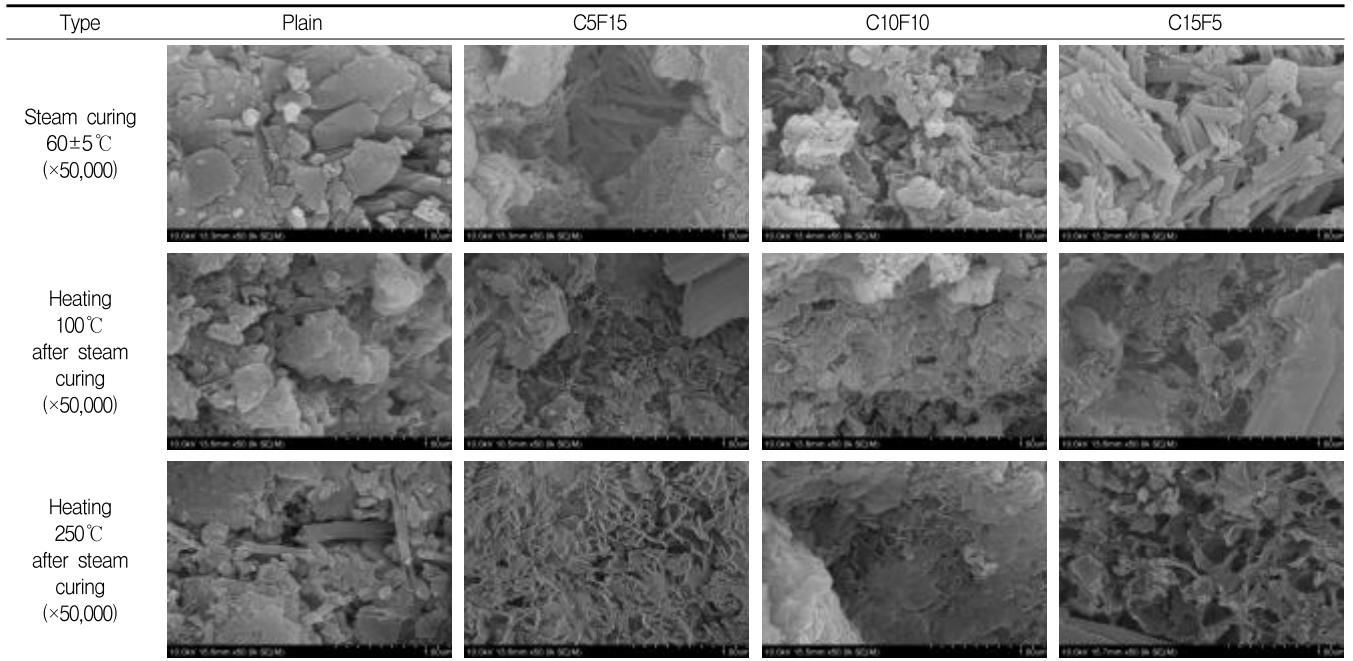


Figure 7. SEM image of specimens in 7 days

처리 이후 Alumino Silicate 생성이 촉진된다. 이와 같은 수화물이 촉진되는 시기에 강도의 저하를 유발하지만 이후 강도 성능은 향상된다.

5) 양생방법에 따른 NSC 모르타르의 SEM 관찰 결과, 열처리 이후 밀실해진 내부구조를 형성함에 따라 강도와 흡수율 성능이 개선된 것으로 판단할 수 있다.

본 연구 결과, 열처리 과정을 거친 NSC 모르타르를 PC제품에 적용한다면 초기강도 보완이 가능하고, 산업부산물의 사용성 확대에도 기여할 수 있을 것이다.

### 요 약

본 연구에서는 산업부산물을 전량 활용하여 포틀랜드 시멘트를 대체할 수 있는 비소성 시멘트 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 고로슬래그 미분말과 F급 플라이애시, C급 플라이애시를 사용하여 양생방법에 따른 비소성 시멘트 모르타르의 물리적 특성에 대해 파악하였다. 연구 결과, 증기양생 후 열처리 과정을 통해 강도성능과 흡수율이 향상되는 것으로 나타났다. 결정상 분석을 통해 열처리 후 수화물의 촉진을 확인하였으며, 결합재는 치밀한 내부구조를 형성하게 된다.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 증기양생, 열처리, 비소성 시멘트

### Funding

This research was supported by the Technology development Program (2020R1F1A1048414) funded by the National Research Foundation of Korea.

### ORCID

Hyeong-Won Na, <https://orcid.org/0000-0001-6367-5038>

Won-Gil Hyung, <https://orcid.org/0000-0003-2639-8929>

### References

1. Kim GY, Koo KM, Nam JS, Miyauchi H, Shin KS, Lee TG. Compressive strength development of blast furnace slag binder mortar. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2012 Sep;28(9): 99-106. [https://doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2012.28.9.99](https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2012.28.9.99)
2. Kumar S, Kumar R, Mehrotra SP, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. Journal of Materials Science. 2010 Feb;45:6

- 07-15. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3934-5>
3. Choi WZ, Park EK. Study on  $\text{CaCO}_3$  preparation from MSWI fly ash. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*. 2006 Oct;15:5(73):47-51.
  4. Palacios M, Puertas M. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and Concrete Research*. 2007 May;37(5):691-702. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.021>
  5. Jo SN, Kang SG. Effect of HF treatment on the crystallization behavior of the glass containing coal bottom ashes. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2011 Jan;48(1):80-5. <https://doi.org/10.4191/KCERS.2011.48.1.080>
  6. Son SG, Kim YD. Effect of thermal behaviour and mechanical properties of heat treatment on the geopolymer mortar. *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2010;27(8):709-18.
  7. Lee BK, Kim GY, Koo KM, Shin KS. Properties of compressive strength of mortar based on high-activated blast furnace slag using the slag by-product as an activator. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2014;14(1):37-44. <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.1.037>
  8. Pan X, Zhang D, Wu Y, Yu H. Synthesis and characterization of calcium aluminate compounds from gehlenite by high-temperature solid-state reaction. *Ceramics International*. 2018 Aug;44(12):13544-50. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.186>
  9. Ball RGJ, Mignanelli MA, Barry TI, Gisby JA. The calculation of phase equilibria of oxide core-concrete systems. *Journal of Nuclear Materials*. 1993 May;201:238-49. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90179-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90179-3)
  10. Heydari F, Maghsoudipour A, Hamnabard Z, Farhangdoust S. Evaluation on properties of  $\text{CaO-BaO-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  glass-ceramic sealants for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Elsevier Journal of Materials Science & Technology*. 2013 Jan;29(1):49-54. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2012.11.011>
  11. Ahn JC, Lee JH, Kang BH. Properties of recycle cement made of cementitious powder from concrete waste by conditions of burning. *Journal of Architectural Institute of Korea*. 2003 Nov;19(11):109-12.
  12. Zhang Q, Ye G, Koenders E. Investigation of the structure of heat cured portland cement paste by using various techniques. *Construction and Building Materials*. 2013 Jan;38:1040-1050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.071>