

# 친환경 SCW공법용 그라우팅재의 경화특성

## A Hardening Properties of Eco-Friendly SCW Grouting Material

조 정 규<sup>1</sup>                      박 인 옥<sup>2</sup>                      문 경 주<sup>3</sup>                      형 원 길<sup>1\*</sup>

Jo, Jung-Kyu<sup>1</sup>                      Park, In-Wook<sup>2</sup>                      Mun, Kyung-Ju<sup>3</sup>                      Hyung, Won-Gil<sup>1\*</sup>

School of Architectural Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 38541, Korea <sup>1</sup>  
Korea Conformity Laboratories(KCL), Dalsung-Gun, Daegu, 42994, Korea <sup>2</sup>  
CMD Group, Wanju-Gun, Jeollabuk-Do, 55338, Korea <sup>3</sup>

### Abstract

Since the current method of SCW cement milk pouring method uses one to one ratio of cement milk with OPC, there are some problems such as drying shrinkage, increased cost, difficulty of controlling mix proportions for various conditions of applied soil, and precipitation of Cr<sup>6+</sup> due to the excessively used cement. Specifically, in aspect of sustainability issues of cement manufacturing, the consumption of cement should be reduced. Hence, in this research, as a replacement of cement for SCW method, blast furnace slag with sulfate or alkali as a stimulant, and expansive admixture were used. By using blast furnace slag as a hardening composite of SCW, there are many advantages such as free controllable mix proportions, rapid setting time with less mud occurrence, less cost with less energy for mixing, constant strength development, and less precipitation of Cr<sup>6+</sup>. Regarding the alternative composites for SCW, in this research, durability and chloride resistance were evaluated.

Keywords : eco-cement, ground solidification materials, durability, ground solidification materials, seawater attack

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

산업 혁명 이후 시멘트는 건설산업의 발전으로 인해 폭넓게 사용되어 왔다. 하지만 시멘트생산은 유해물질과 CO<sub>2</sub> 가스를 배출하고 이로 인한 환경문제가 세계적으로 대두되고 있다[1,2,3]. 이 중 시멘트 산업의 CO<sub>2</sub> 배출 비중은 전체 배출량의 7%~10%를 차지하고 있으며 시멘트 1톤 생산 시 약 0.8~0.9톤의 이산화탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 기존에 사용되던 시멘트를 대체하여 산업부산물을 사용하게 될 경우 CO<sub>2</sub> 배출 저감 효과는 물론이고 건설비도 절감할

수 있다. 이러한 혼화재로 많이 사용되는 산업부산물 중 하나가 바로 고로슬래그 미분말(Granulated Blast Furnace Slag, 이하 GBFS)이다[4,5,6]. 본 연구에서는 시멘트 생산에 의한 CO<sub>2</sub> 배출과 이로 인한 환경 부하를 감소시키기 위해 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 활용하여 기존 SCW 공법에 사용되던 시멘트주입재를 친환경 무기결합재로 대체하여 모르타르를 제작하고 친환경 밀크주입재로써 적용이 가능한지를 파악하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 시멘트 및 고로슬래그 미분말

본 실험에서는 시멘트는 KS L 5201에 규정된 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement; OPC)와 KS F

Received : November 30, 2017

Revision received : December 29, 2017

Accepted : March 12, 2018

\* Corresponding author : Hyung, Won-Gil

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

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2563 콘크리트용 고로슬래그 규정을 만족하는 분말도 6,000(cm<sup>2</sup>/g)의 국내산 2종 고로슬래그를 사용하였다. 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical and physical properties of raw materials

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S
OPC	22	5.5	65	1.4	1.0	1.5	3.3
GBFS	34	15	43	4.7	1.6	0.1	1.1

## 2.2 공시체제작

KS L ISO 679 규준에 따라 원재료를 계량 후 혼합수를 가해 저속(140±5rpm)에서 30초간 교반 후 30초 동안 모래 전량을 서서히 혼입하고 이어 30초간 고속(285±10rpm)으로 교반하였다. 90초간 혼합기를 정지하여 처음 15초 동안 스크레이퍼로 용기 벽에 부착된 모르타르를 용기의 중간으로 모아주고 다시 60초간 고속 교반하였다. 혼합이 끝난 모르타르는 40×40×160mm 강제식 3연 몰드를 사용하여 공시체를 제작하였다. 제작한 시험체는 20℃ 50%R.H의 양생조건에서 밀봉양생을 실시하였다. 공시체의 배합표는 Table 2와 같다.

Table 2. Mix proportions of binder

Type	Mix proportions of NSB(%)					
	OPC	GBFS	APG	DPG	SL	WL
OPC	100	-	-	-	-	-
NSB1	-	87	12	-	1	-
NSB2	-	82	-	17	1	-

\*APG : anhydrite phosphogypsum, DPG : dihydrate phosphogypsum, SL : slaked lime, WL : waste lime

## 2.3 실험 계획

친환경 밀크 주입재를 혼입하여 제조한 친환경 SCW공법 용 그라우팅재 경화체의 특성을 파악하기 위한 실험계획은 다음과 같이 설정하였다.

- 1) 내산성 침지실험은 시약용 염산과 황산을 각각 5% 및 10%로 희석시켜 사용하였고, 용액의 온도를 20±3℃로 일정하게 유지하였다. 제작한 NSB 경화체의 중량 변화율을 측정하여 OPC와 비교하였다.

- 2) NSB 경화체의 내해수성 비교를 위하여 인공해수침지 실험을 실시하였다. 모르타르는 인공해수에 침지시켜 소정의 재령에서 압축강도를 KS L 5105에 의거하여 측정하고 그 결과를 OPC와 비교 고찰 하였으며, 내부 미세구조관찰(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)과 X선회절분석(X-ray Diffraction, 이하 XRD)을 통해 수화생성물을 분석하였다.

## 2.4 실험측정방법

### 2.4.1 내산침지실험

내산성 실험은 1년 재령의 시멘트 모르타르를 이용하여 ASTM C 267, 579에 준하여 실시하였다.

$$\text{중량감소율}(\%) = \frac{W_n - W_o}{W_n} \times 100 \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서, W<sub>n</sub> : 침지재령에서의 공시체 중량(g)

W<sub>o</sub> : 침지전의 공시체 중량(g)

### 2.4.2 내해수성 실험

ASTM D 1141에 준하여 2배 농도의 인공해수를 사용하였으며 침지기간이 경과함에 따라 용액이 묻어지는 점을 고려하여 4주마다 인공해수를 교체하였다. 인공해수의 화학 조성은 Table 3과 같다. 내해수성 실험은 1년 재령의 시멘트 모르타르를 인공해수에 침지시켜 소정의 재령에서 압축강도 및 휨강도를 KS L 5105에 의거하여 측정하였다. 성능저하 지수(Deterioration Factor, 이하 DF)를 이용하여 산출하였다.

Table 3. Chemical properties of artificial seawater (g/l)

NaCl	MgCl · 6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl
50.86	10.40	8.18	2.32	1.39

$$DF(\%) = \frac{F_w - F_s}{F_w} \times 100 \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, DF : 성능저하 지수(%)

F<sub>w</sub> : 담수에 침지한 콘크리트의 압축강도(MPa)

F<sub>s</sub> : 인공해수에 침지한 콘크리트의 압축강도(MPa)



Figure 1. Acid resistance test body

### 2.4.3 휨강도 및 압축강도

휨 및 압축강도 측정은 KSL ISO 679 규준에 의거하여 진행되었으며 공시체의 28일의 강도를 측정하였다. 만능시험기(UTM)를 이용하여 휨강도를 측정한 뒤 절단된 두 시편으로 압축강도를 측정하였다

### 2.4.4 내부 미세구조 관찰(SEM), 결정상 분석(XRD)

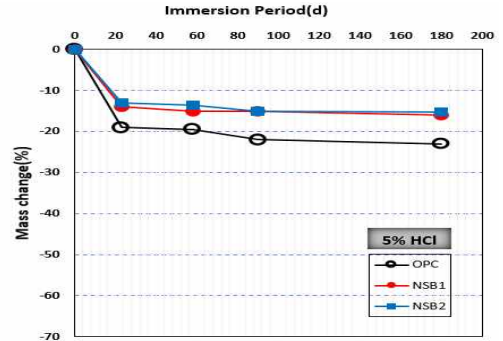
수화 생성물 및 내부 미세구조의 관찰을 위해 압축강도 측정 시 파단면의 시편을 채취하여 1일간 아세트산 용액에 침지시켜 수화반응을 정지시키고, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; 이하 SEM)을 이용하여 관찰하였다. 또한 미분쇄된 시편을 X선 회절 분석법(X-Ray Diffraction; 이하 XRD)을 이용하여 결정상 분석을 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

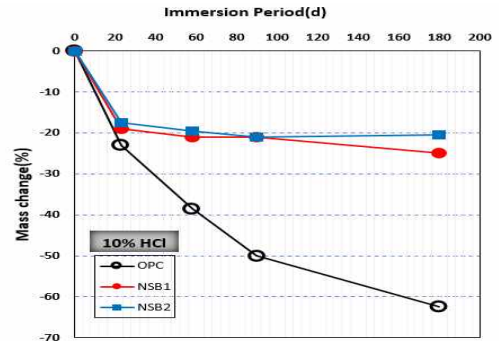
### 3.1 내산침지실험

Figure 1은 OPC, NSB1,2 경화체의 180일 침지 내산성 반응 결과물이다. OPC경화체의 중량감소율 -70%에 비하여 NSB1, NSB2 경화체의 중량 감소율은 -23%~-25%로 육안으로도 쉽게 확인할 수 있다.

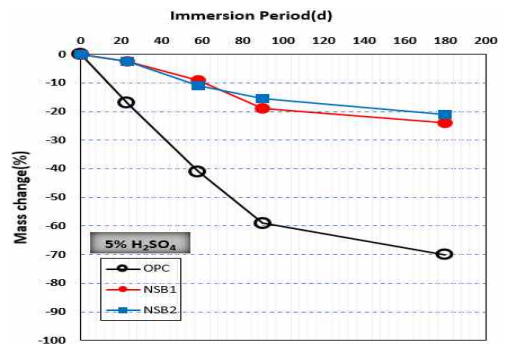
Figure 2는 OPC, NSB1,2 내산침지 시험체의 중량변화율을 나타낸 그래프이다. NSB1,2 경화체가 침지 기간 28일까지는 HCl에 비하여  $H_2SO_4$ 에 대한 저항성이 우수하게 나타나는데  $H_2SO_4$  침지기간 28일까지는 오히려 중량이 증가되거나 동일하여 전혀 침식되지 않았다. 또한 침지 기간 28일 이후부터 서서히 중량이 감소하는 경향을 보이며 90일 이후 급격히 감소하는 경향을 보였으나, 전반적으로 OPC와 비교하여 높은 내산성을 나타냈다. 이와 같은 실험을 통해, NSB1, NSB2 경화체는 각종 산성에 대한 저항성이 높은 것으로 확인된다.



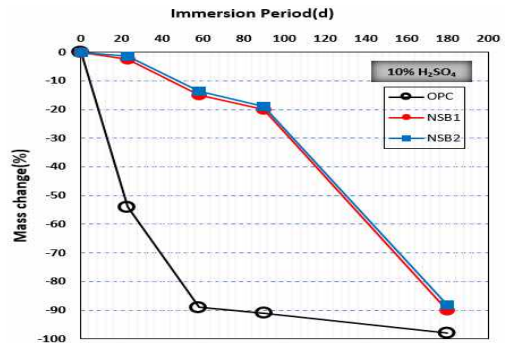
a) 5% HCl weight variation



b) 10% HCl weight variation



c) 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> weight variation



d) 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> weight variation

Figure 2. Weight change rate of acid-resistant immersion test body

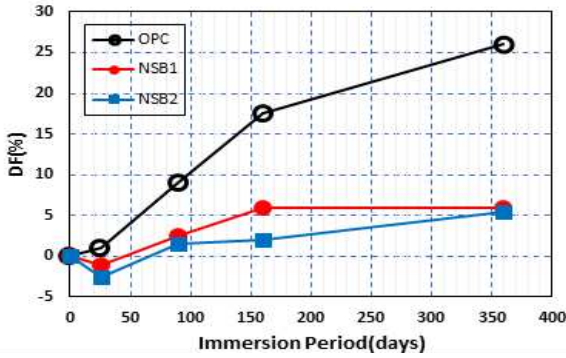


Figure 3. DF to seawater immersion

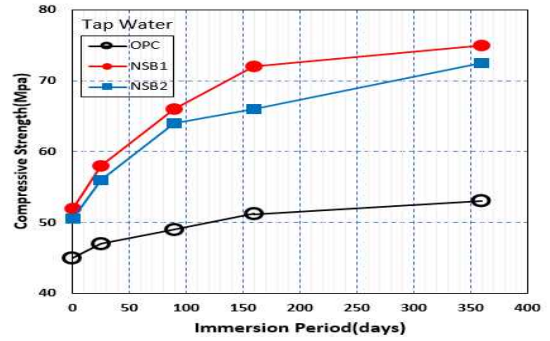
### 3.2 내해수성실험

Figure 3은 해수침지에 따른 성능저하지수(DF)를 나타낸 그래프이다. 모르타르의 압축강도에 대한 인공해수에 침지한 모르타르의 압축강도를 성능저하지수(DF)로 나타내어 정리한 것으로, 침지 기간에 관계없이 OPC 경화체의 DF가 NSB1, NSB2 경화체보다 크게 나타남을 알 수 있다. 한편 NSB1, NSB2 경화체의 경우, 초기 침지재령에서 침지 기간 28일까지의 DF가 음(-)의 값으로 나타났으며, 침지 기간 1년에서 OPC 모르타르의 DF는 26.9%로써 NSB1, NSB2 모르타르의 5.4~6.6%보다 각각 4~5배 높게 나타났다.

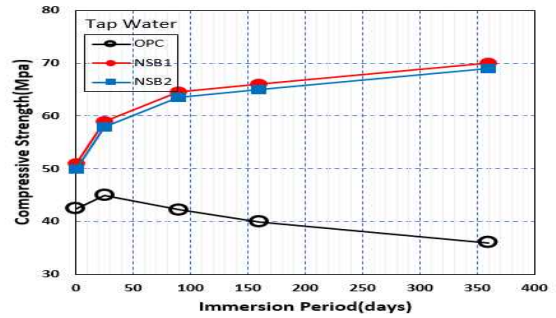
### 3.3 휨강도 및 압축강도

Figure 4는 해수침지 기간에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다. 담수에 침지한 모르타르의 압축강도는 시간이 경과함에 따라 증가하였으며 특히, NSB1, NSB2 경화체는 OPC 경화체와 비교하여 높은 강도 발현 성상을 보였다. 한편 인공해수에 침지한 OPC는 침지 기간 90일에서 해수 중의 유해이온에 의한 침식으로 압축강도가 감소하였다. 특히 OPC의 경우 침지 재령 90일에서 강도가 저하되는 경향을 보이며 침지 기간 1년에서의 압축강도는 28일의 압축강도보다 약 15% 정도 감소하였다.

반면 NSB1, NSB2 경화체의 경우 침지 기간이 경과함에 따라 지속적으로 강도가 증가하는 경향을 나타냈다. NSB1, NSB2의 경우에도 OPC와 거의 유사한 특성을 보였으며 인공해수에 1년 침지한 NSB1 모르타르의 압축강도는 68.6MPa, 담수에 침지한 경우의 압축강도는 73.5MPa로 나타나 인공해수 침지에 의한 강도저하 영향은 거의 받지 않음을 확인 할 수 있었다.

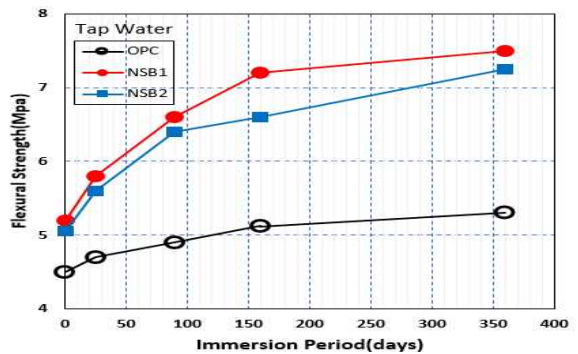


a) Results of compressive strength measurement of water immersion

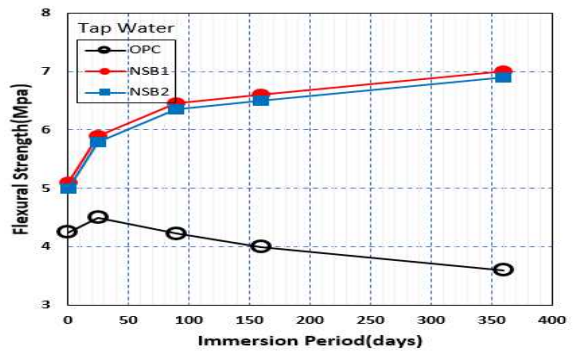


b) Results of compressive strength measurement of sea water immersion

Figure 4. Results of compressive strength measurement according to seawater immersion period

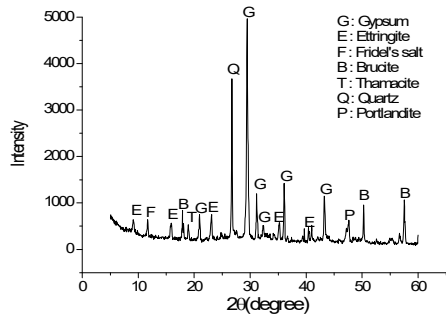


a) Flexural strength measurement of water immersion

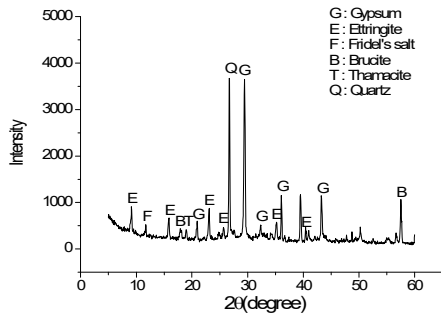


b) Flexural strength measurement of sea water immersion

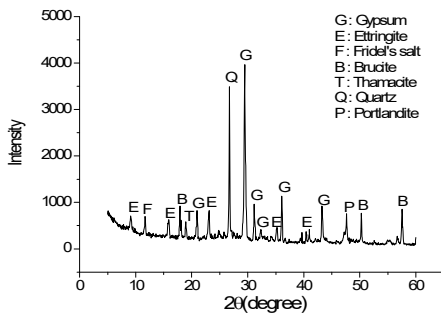
Figure 5. Flexural strength measurement of sea water immersion



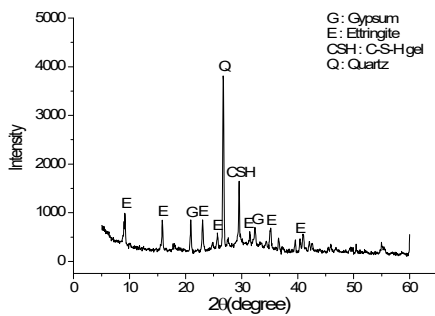
a) OPC mortar after 1-year artificial sea water immersion.



b) NSB1 mortar after 1-year artificial sea water immersion



c) Inner 5mm from surface of OPC mortar after 1-year artificial sea water immersion.



d) Inner 5mm from surface of NSB1 mortar after 1-year artificial sea water immersion.

Figure 6. XRD analysis of 1 year immersion in seawater

Figure 5는 해수침지기간에 따른 힘강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 힘강도 또한 인공해수에 침지한 압축강도와 유사한 경향을 보였으며, NSB 모르타르는 OPC에 비하여 높은 힘강도를 나타내는 것을 볼 수 있다.

### 3.4 내부 미세구조 관찰(SEM), 결정상 분석(XRD)

Figure 6은 인공해수에 1년간 침지시킨 OPC, NSB 경화체의 XRD 분석 그래프이다. 인공해수 중에 함유되어 있는  $SO_4^{2-}$  이온의 영향으로 ettringite 및 석고의 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다.

$Mg_2 +$  이온과 NSB에서 용출된 칼슘이온의 반응으로 생성된 brucite의 피크도 관찰되었다. 또한 인공해수 중의  $Cl^-$  이온이 시멘트 경화체 속으로 침투함으로써 생성된 Friedel's salt도 확인되었으며, 해수의 작용으로 인한 thaumasite의 피크도 확인할 수 있었고, OPC는 portlandite가 관찰되었다. Portlandite 피크 강도가 표층부에 비하여 크게 관찰됨으로써 이후의 기간에서 해수 중 유해 이온과의 반응으로 인한 성능저하 현상이 더욱 심화될 것으로 예상된다. 반면, NSB 모르타르는 인공해수 중에 함유되어 있는 이온의 영향을 거의 받지 않은 것으로 나타났으며 NSB의 주요 수화물인 ettringite 및 C-S-H(I)겔 등의 피크가 강하게 나타났다.

NSB 모르타르의 XRD 분석결과에서 나타난 석고는 인공해수에 의한  $SO_4^{2-}$  보다는 NSB에 함유된 미반응 DPG인 것으로 판단된다. 따라서 NSB 모르타르는 표층부만이 해수 중의 이온과 반응할 뿐 치밀한 내부조직에 의해 내부로의 확산이 억제된 것으로 사료된다.

Figure 7은 인공해수에 1년간 침지시킨 경화체의 미세구조 사진이다.

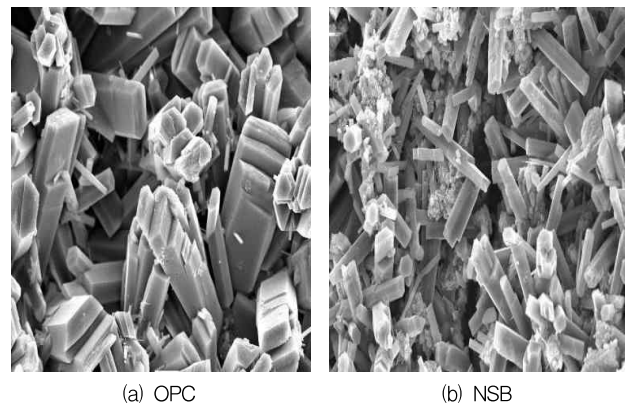


Figure 7. Seawater immersion 1 year microstructure of mortar

양쪽 모두 석고의 결정이 확연하게 관찰되었으나 결정의 크기에서는 차이를 보였다. 동일한 침지기간과 동일한 배율의 분석임에도 불구하고 OPC가 NSB에 비하여 석고 결정이 더욱 발달해 있어 OPC 모르타르가 인공해수 중에 함유되어 있는  $\text{SO}_4^{2-}$  이온에 의한 침식현상이 더욱 큰 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

일반 보통 시멘트 밀크주입재를 친환경 무기결합 밀크주입재로 대체한 NSB경화체의 특성을 종합하면 다음과 같다.

- 1) 내산침지실험에서 10% HCl 침지 중량 변화율을 살펴보면 90일에서 NSB 경화체의 침지 중량변화율이 -20%지만 OPC 경화체는 -65%정도로 3배의 차이를 나타내었다. 또한 5%의  $\text{H}_2\text{SO}_4$  침지 중량변화율에서는 NSB 경화체의 침지중량 변화율은 -20%를 나타내고 OPC 경화체의 침지중량 변화율은 -70%로써 10% HCl 침지와 마찬가지로 3배의 차이를 나타낸다. 이는 NSB 경화체는 OPC 경화체에 비하여 산성수용액에서 높은 내산성을 지니고 있음을 알 수 있다.
- 2) 해수에 침지한 NSB 경화체의 압축강도는 기간이 경과함에 따라 증가하였으며 특히, NSB 경화체는 침지재령 28일부터 OPC 경화체와 비교하여 높은 강도를 보였다. OPC 경화체의 경우 해수 침지 재령 28일에서 오히려 강도가 저하하는 경향을 보이며 침지 기간 1년에서의 압축강도는 35.2MPa로 침지 기간 28일의 압축강도보다 약 15% 정도 저하했다. 이는  $\text{C}_3\text{S}$  및  $\text{C}_2\text{S}$ 의 수화반응으로 생성된  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  가 해수 중의  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{Mg}_2^+$  이온과 반응하여  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  및  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  를 생성함으로써 콘크리트의 조직구조를 연화시키기 때문으로 사료된다[7]. NSB는 해수침지 28일부터 90일까지 강도가 지속적으로 증가하는 모습을 나타냈다. 이는 내부조직이 밀실하여 해수 중의 유해이온의 침투가 억제될 뿐만 아니라, 수화과정 중  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  가 생성되지 않기 때문에 해수 중의  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{Mg}_2^+$  이온과 반응하지 않기 때문으로 사료된다.

또한 DF값을 측정해본 결과 침지기간 1년에서 OPC 경화체의 DF는 26.9%, NSB경화체의 DF는 5.4%~6.6%로 OPC 경화체가 5배 높게 나타났다.

- 3) XRD 결정분석 및 SEM 내부미세구조를 분석한 결과, OPC 경화체가 NSB 경화체와 비교하여 석고, brucite 및 thaumasite 등의 피크가 강하게 나타남에 따라 해수이온에 의한 침식이 더욱 큰 것으로 판단된다. OPC 경화체는 표면부에 비하여 피크 강도가 약간 감소했을 뿐 거의 동일하게 나타나 시험체의 내부도 해수 중의 이온에 의해 침식된 것으로 나타났다.

그러나 NSB 경화체는 표층부만이 해수 중의 이온과 반응할 뿐 치밀한 내부조직에 의해 내부로의 확산이 억제되어 내해수성이 우수한 것으로 판단된다.

본 연구의 실험 결과를 종합적으로 분석한 결과 NSB 경화체가 OPC 경화체와 비교해 내산성, 내해수성, 압축강도 등이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 친환경무기결합재 모르타르는 높은 내구성, 내화확성을 요구하는 SCW 공법과 같은 흙막이벽, 해양하부구조물 등의 지반재료용 결합재에 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

#### 요 약

본 연구에서는 시멘트 생산에 의한  $\text{CO}_2$  배출과 이로 인한 환경 부하를 감소시키기 위해 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 활용하여 기존 SCW 공법에 사용되던 시멘트주입재를 친환경 무기결합재로 대체하여 모르타르를 제작하고 친환경 밀크주입재로써 적용이 가능한지를 파악하였다. 본 연구 결과 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않은 비소성 시멘트를 이용한 NSB 경화체가 보통 포틀랜드 시멘트 경화체와 비교해 내산성, 내해수성, 압축강도 등이 우수한 것으로 나타나고 있다.

따라서 본 연구를 통해 만들어진 친환경 무기결합재 모르타르는 높은 내구성, 내화확성을 요구하는 SCW 공법과 같은 흙막이벽, 해양하부구조물 등의 지반재료용 결합재에 적용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

**키워드** : 친환경 시멘트, 고로슬래그미분말, 내구성, 지반고화재, 내해수성

---

## Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and future Planning(No. 2015R1A2A2A01005901)

## References

1. Hester D, McNally C, Richardson M, Study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*. 2005 Nov; 19(9):661-5.
2. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blastfurnace slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2012 Dec;12(4):393-400.
3. Mun KJ, Hyoung WK, Lee CW, So SY, Soh YS. Basic properties of non-sintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator. *Construction and Building Materials* 2007 Jun;21(6):1342-50.
4. Hester D, McNally C, Richardson M, Study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*. 2005 Nov;19(9):661-5.
5. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blastfurnace slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2012 Aug 20;12(4): 393-400.
6. Bijen J, Niel E. Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries. *Cement and Concrete Research*. 1981 May;11(3):307-22.
7. Erdem E, Olmez H. The Mechanical Properties of Supersulphated Cement Containing Phosphogypsum. *Cement and Concrete Research*. 1993 Jan;23(1):115-21.