

# 내한축진제를 사용한 고로시멘트 모르타르의 수축성상

## Shrinkage Properties of Blast Furnance Slag Cement Mortar by using Frost-Resistant Accelerator

최 형 길<sup>1</sup>

이 준 철<sup>2\*</sup>

Choi, Hyeong-Gil<sup>1</sup>

Lee, Jun-Cheol<sup>2\*</sup>

Assistant Professor, Graduate School of Architecture, Kyungpook National University, Buk-Gu, Daegu, 14566, Korea <sup>1</sup>

Research Professor, Daegyeong Regional Infrastructure Technology Development Center, Kyungpook National University, Buk-Gu, Daegu, 14566, Korea <sup>2</sup>

### Abstract

In this study, the effects of blast furnace slag cement and frost-resistant accelerator on shrinkage properties and shrinkage properties of mortar were examined. As a result, the addition of the frost-resistant accelerator to both OPC and BB has a small effect on the flash properties of mortar and the compressive strength increases from the early ages. In addition, when a frost-resistant accelerator is used in excess of the standard usage amount, it is necessary to examine the relationship of the expansion behavior at the early age, especially, between the compressive strength development and the expansion property. And it was confirmed that the addition of the frost-resistant accelerator tended to increase the shrinkage of mortar using the OPC and BB. With the addition of the frost-resistant accelerator, the amount of pores with a diameter of under the 30nm, especially, the amount of pores with a diameter of 20 to 30nm and the amount of pores with an ink-bottle decrease, and the shrinkage increases. And it is considered that a change in the amount this range of pores has a large effect on the shrinkage property.

Keywords : frost-resistant accelerator, blast furnace slag cement, compressive strength, shrinkage property, pore volume

## 1. 서 론

콘크리트 재료로서 고로시멘트는 환경부하 및 산업부산물의 재활용 측면에서 최근 이용이 확대되고 있다[1]. 하지만 고로시멘트는 초기재령에서의 강도발현성이 낮고 온도의존성이 높아 한중 콘크리트 공사에 적용하는데 한계가 있다 [2]. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 고로시멘트와 내한축진제를 병용한 콘크리트에 대한 연구들이 진행되고

있다[3]. 내한축진제를 콘크리트에 혼입할 경우 경화축진 및 동결점 저하 등의 성능을 발휘하여 저온에서도 굳지 않는 콘크리트가 동결하지 않는 동시에 콘크리트의 소요 압축강도를 발현시킬 수 있다[4,5,6]. 특히, 내한축진제가 가지고 있는 경화축진 작용에 의한 강도증진 효과는 고로시멘트의 단점인 한중 콘크리트 공사 시 초기강도 저하라는 단점을 보완할 수 있다. 이러한 측면에서 기존의 연구들에서는 고로시멘트를 활용한 콘크리트의 초기동해 방지 측면에서 초기 강도 회복에 대해 중점을 두고 있다.

하지만 콘크리트 내구성과 관련하여 열화의 기점이 되는 수축균열에 관한 연구는 미비한 편이다. 수축에 의한 균열 발생은 콘크리트 구조물의 안전성 및 내구성에 큰 영향을 미치기 때문에 고로시멘트와 내한축진제를 사용한 콘크리트에서도 수축에 의한 균열을 파악하는 것은 매우 중요한 시안

Received : October 30, 2018

Revision received : November 23, 2018

Accepted : December 17, 2018

\* Corresponding author : Lee, Jun-Cheol

[Tel: 82-53-950-4741, E-mail: uggenius@hanmail.net]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

이다[7,8].

따라서 본 연구에서는 고로시멘트와 내한축진제를 사용한 콘크리트의 수축균열을 파악하기 위한 기초적인 연구의 일환으로, 고로시멘트와 내한축진제를 병용한 시멘트페이스트와 모르타르를 이용하여 수축특성 및 수축성상에 미치는 요인에 대해 검토하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 사용재료

본 실험에서는 내한축진제가 고로시멘트의 수축특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 시멘트 페이스트와 모르타르 시편을 이용하였다. Table 1은 본 실험의 실험계획을 나타낸 것이며, Table 2는 본 실험에 사용된 재료의 물성을 나타낸 것이다. 본 실험에서의 고로시멘트는 고로시멘트 B종(이하 BB)을 사용하였으며, 보통포틀랜드 시멘트(이하 OPC)를 이용하여 상대적인 비교를 실시하였다. 본 실험에 사용된 내한축진제는 감수성분이나 AE성분 등이 포함되지 않고 내한축진 성분만으로 구성되어 있는 타입Ⅱ를 사용했다.

Table 1. Experimental programs

Mortar test				
Cement	Frost resistant accelerator	W/C (%)	C:S	Test items
OPC	0, 2, 4, 8	50	1:3	• Slump flow
BB				• Air contents
				• Compressive strength
				• Expansion rate
				• Dry shrinkage
Cement paste test				
Cement	Frost resistant accelerator	W/C (%)		Test items
OPC	0, 4	50		• MIP
BB				• TG-DTA
				• Archimedes method
				• Water vapor adsorption properties

Table 2. Used materials

Type	
Cement	Ordinary portland cement, Density: 3.17 g/cm <sup>3</sup>
	Blast furnace slag cement, Density: 2.91 g/cm <sup>3</sup>
sand	Land sand, Density: 2.67 g/cm <sup>3</sup> , Absorption ratio: 1.57%
Admixture	Frost resistant accelerator (Type II), Density: 1.41 ~ 1.45 g/cm <sup>3</sup>

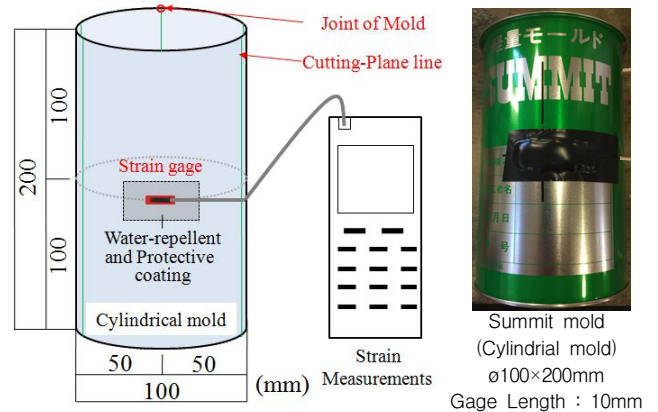


Figure 1. Overview of expansion rate test[10]

본 실험에서는 내한축진제를 혼합한 고로시멘트의 강도와 수축성상을 파악하기 위해 모르타르 시편을 제조하였다. 모르타르의 물시멘트비는 50%, 시멘트-잔골재비는 1:3으로 하였다. 내한축진제는 시멘트 중량대비 0% (무사용), 2% (과소사용량), 4% (표준사용량), 8% (과대사용량)로 하여 모르타르에 혼합하였다. 또한 고로시멘트와 내한축진제를 병용한 시멘트 경화체의 수축성상에 미치는 영향을 파악하기 위해 시멘트 페이스트 시편을 제조하였다. 시멘트 페이스트의 물시멘트비는 50%로 하였으며, 내한축진제는 시멘트 중량대비 0%, 4%를 혼합하였다.

### 2.2 실험방법

내한축진제를 혼합한 고로시멘트의 굳지 않은 성상을 평가하기 위해 모르타르의 슬럼프 플로우와 공기량을 측정하였다.

강도 시험용 모르타르 시험체는  $\phi 50 \times 100$ mm의 원주형 시편을 제작하여 재령 1일에 탈형한 후 20°C 표준 수증양생 하에서 재령 1일, 3일, 7일, 28일에 KS F 2405에 의거 압축강도를 측정했다[9].

모르타르의 수축성상을 파악하기 위해 팽창율, 길이변화 및 질량변화율을 측정했다. 팽창율 시험은 JIS A 009-2012에 근거하여 Figure 1과 같이  $\phi 100 \times 200$ mm의 원통형 거푸집(서미트몰드)에 길이 10mm의 변형게이지를 부착하여 20°C 봉합양생의 조건에서 재령 3일까지 측정했다[10]. 길이변화 및 질량변화율 시험은 KS F 2424에 준하여  $40 \times 40 \times 160$ mm의 각주 시험체를 제작하여 재령 1일에 탈형하고 7일간 수증양생을 실시한 후, 20°C, 60%RH의 항온 항습 조건하에서 다이얼 게이지법에 의해 소정의 재령까지 측정했다[11].

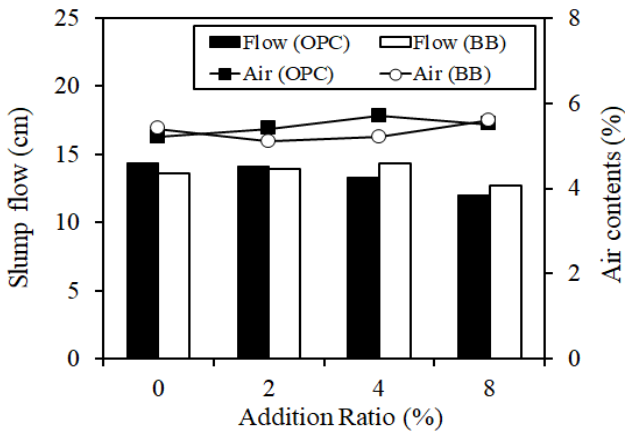


Figure 2. Fresh properties

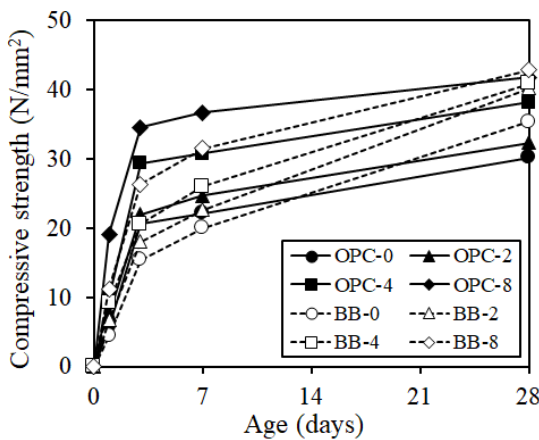


Figure 3. Compressive strength

한편, 시멘트 페이스트 실험은 기존의 연구[12,13,14, 15]로부터 수축량과 상관관계에 있다고 여겨지는 세공영역의 세공량 및 ink-bottle 세공량의 변화를 확인했다. 분석에 이용한 시험체는 소정의 재령에 있어 샘플을 채취하여 5mm의 입방체로 절단한 후 1주일간 에탄올 치환에 의해 수화정지 및 D-dry법에 의한 건조를 1일간 실시한 후 아르키메데스법 및 수은압입법에 의해 세공분포를 측정했다. 최대압력을 220MPa, 즉, 최소직경 6nm까지의 세공경분포를 측정했다. 또한, 0.1MPa에서 200MPa까지 가압하여 수은을 압입시킨 후 0.1MPa까지 감압하여 수은을 배출하는 공정을 2회 연속 실시하여 세공의 형상 및 연속성의 영향으로부터 공극내에 존재하는 수은량을 ink-bottle 세공량으로 계산했다[12]. 또한, 분쇄한 분말시료를 이용하여 TG-DTA에 의해 팽창성 수화 생성물인 수산화칼슘의 함유율에 대해서도 검토를 실시했다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 굳지 않은 성상 및 압축강도

Figure 2는 굳지 않은 모르타르의 슬럼프 플로우와 공기량을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 내한축진제는 감수성분이나 AE성분 등이 포함되지 않은 내한축진 성분만으로 구성되어 있는 타입Ⅱ를 사용하고 있기 때문에 내한축진제 혼입에 따라 슬럼프 플로우는 약간 감소하는 경향을 나타냈으나 변화량은 미미하였다. 또한 시멘트 종별에 관계없이 슬럼프 플로우, 공기량은 내한 축진제의 첨가에 의한 영향은 크지 않다고 판단된다.

Figure 3은 각 재령별 모르타르의 압축강도를 나타내고 있다. 초기재령에서의 압축강도는 BB보다 OPC가 큰 것으로 나타났으며, 내한축진제의 첨가량이 증가할수록 초기재령에서의 압축강도는 OPC, BB 모두 증가하는 것으로 나타나 내한축진제의 경화축진 효과를 확인할 수 있었다. 또한, BB는 OPC에 비해 초기강도는 작지만, 재령 28일에 있어 높은 강도 증진을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 수축성상

Figure 4에 모르타르의 팽창률 시험 결과를 나타낸다. 내한 축진제를 8%로 과대 사용한 경우 OPC, BB 모두 초기 재령에 있어 팽창을 나타내지만, 그 이외의 수준에서는 팽창을 볼 수 없었다.

기존의 연구[5]에 있어서, 내한 축진제의 첨가에 의해 초기 재령에 있어 팽창성 수화 생성물인 에트링가이트 (AFt)나 수산화칼슘 (CH)의 생성량 증가하는 것이 확인되고 있다. 또한, 내한 축진제는 경화축진 작용시 시멘트 매트릭스가 경화해 가는 과정에서 팽창 발현의 타이밍이 중요하여 내한 축진제를 과대 사용한 8%의 경우 초기재령에 있어서의 팽창 현상에 유의해야 한다. 일반적으로 팽창재 등을 사용할 경우, 재령 1일 정도의 초기단계에서 팽창현상에 의해 효율적으로 압축력을 도입하여 수축을 저감하는 효과를 나타낸다 [16,17]. 하지만 내한 축진제를 사용할 경우 초기재령의 경화축진 작용에 의해 그만큼 강도발현도 빨라지기 때문에 매트릭스가 충분히 경화한 후의 팽창은 오히려 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 내한 축진제를 표준 사용량 이상으로 다량 사용할 경우에는 초기재령에 있어서의 팽창거동, 특히 강도 발현과 팽창성의 관계에 대해 충분히 검토한 후에 적용할 필요가 있다고 판단된다.

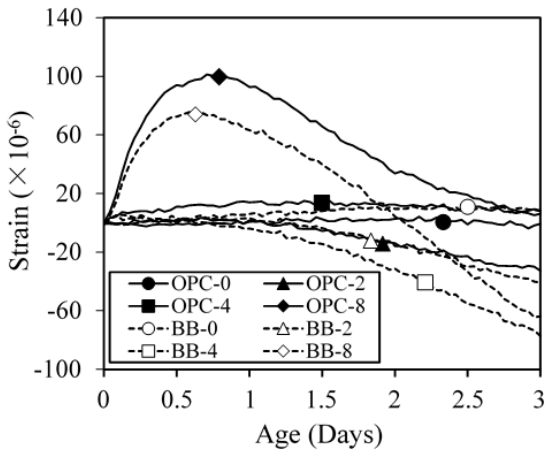


Figure 4. Expansion rate

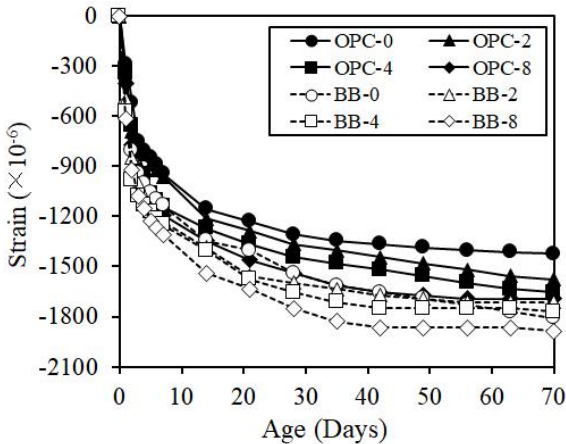


Figure 5. Drying shrinkage

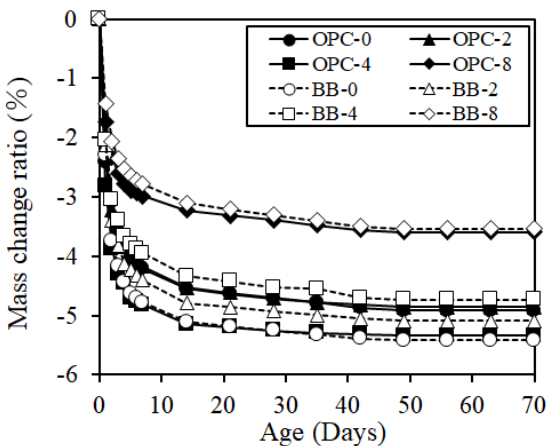


Figure 6. Mass change ratio

Figure 5와 Figure 6은 모르타르의 자유 수축 및 질량 변화율 시험 결과를 나타내고 있다. OPC와 비교해 BB의 길이 변화가 상대적으로 크며, OPC 및 BB 모두 내한 촉진제의 첨가량 증가에 의해 수축량이 커지는 경향을 확인할 수 있다. 특히, 내한 촉진제 첨가량 0%에 비해 내한 촉진제를 과량첨가한 8%의 경우 재령 70일 시점에서 OPC는  $269\mu\text{m}$ ,

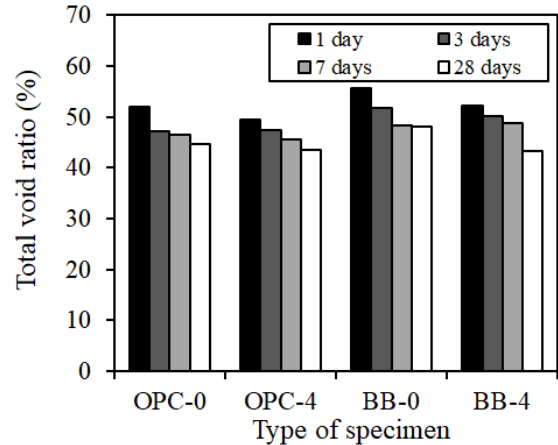


Figure 7. Total porosity ratio

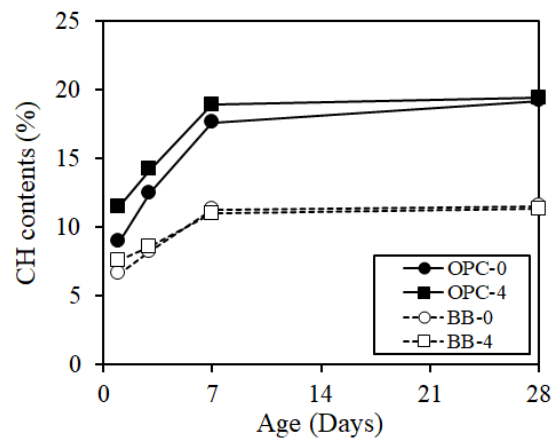


Figure 8. CH content

BB는  $77\mu\text{m}$  정도의 수축량이 커지는 것을 확인할 수 있다. 반면 질량변화율의 경우는 일반적으로 질량변화율이 클수록 길이변화율이 커지는 관계가 있지만, 본 실험에서는 수축량이 큰 내한 촉진제 첨가량 8%의 시험체가 가장 작은 질량 변화율을 보이고 있어 일반적인 경향을 확인할 수 없었다. 이는 내한촉진제의 첨가에 따라 초기재령에 있어 다량으로 생성되는 에트링가이트(AFT)의 경우 물분자를 흡수하기 때문에 외부로의 수분의 증발은 작지만, 공극구조나 세공분포의 변화가 수축성상에 영향을 미칠 가능성이 있으며, 이 점을 포함해 향후 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

### 3.3 공극구조

Figure 7은 아르키메데스법에 의한 시멘트 페이스트의 전공극율을 나타내고 있다. 재령이 증가함에 따라 전 공극율이 작아지며, 또한 내한촉진제를 첨가함에 따라 전공극률이 감소되는 경향을 확인할 수 있다.

Figure 8은 수화생성물 중 하나인 수산화칼슘 (CH)의 생



성량을 나타낸다. 내한축진제를 첨가함에 따라 초기재령으로부터 수화축진에 따른 수화생성물의 생성량이 증가하여공 구조가 치밀해지고 있는 것을 확인할 수 있다.

Figure 9와 Figure 10은 수은압입법에 의한 시멘트 페이스트의 세공분포를 나타낸다. 내한축진제를 첨가하지 않은 경우, BB보다 OPC가 치밀화하기 쉬운 경향을 확인할 수 있으며 내한축진제를 첨가할 경우 OPC 및 BB 모두 세공경의 피크는 보다 치밀한 쪽으로 이동되고 있는 것을 확인할 수 있다.

Figure 11과 Figure 12는 시멘트 페이스트의 누적 세공용적을 나타내고 있다. 전공극률의 결과와 같이 재령의 증가 및 내한축진제의 첨가에 의해 공극이 치밀화 되고 있는 것이 확인되었다. 재령 초기에서는 내한축진제의 첨가유무에 따라 누적 세공용적은 큰 차이를 보였지만, 재령이 지남에 따라 그 차이는 줄어들어 재령 28일에 있어서는 시멘트 종별이

나 내한축진제의 유무에 따른 차이는 작으며, 초기재령에서의 내한축진제의 경화축진 효과를 확인할 수 있었다.

### 3.4 공극구조와 수축성상의 관계

건조수축 실험에서 얻은 재령 28일의 측정결과와 아르키메데스법 및 수은압입법에 의해서 얻은 세공구조의 상관성에 대해 기존연구에 근거해 검토를 실시했다. 일반적으로 55~60%RH 습도의 범위에서는 시멘트계 재료의 건조수축에 영향을 미치는 세공경은 직경 30nm 이하라고 알려져 있다[13]. 특히 직경 8nm 이하의 세공량이 시멘트 경화체의 건조수축에 영향을 미친다고 보고하고 있다[12,13]. 따라서 본 연구에서도 재령 28일에 있어서의 직경 30nm 이하의 세공량 및 직경 8nm 이하의 세공량과 길이변화의 관계성을 검토했다.

본 실험에서의 수은압입법의 경우, 측정 가능한 세공경은

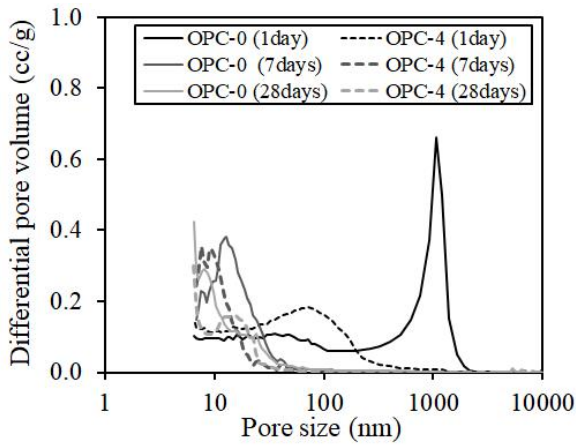


Figure 9. Differential pore volume of OPC

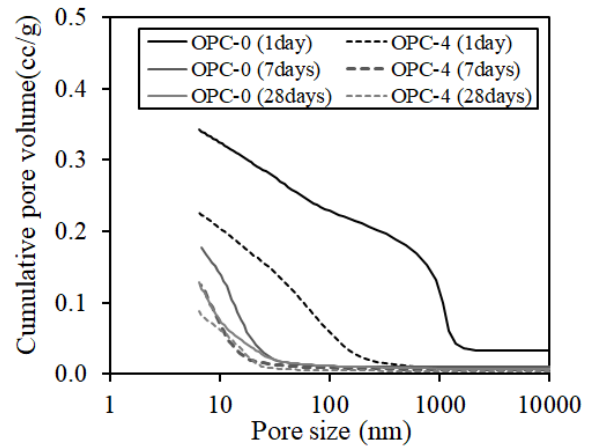


Figure 11. Cumulative pore volume

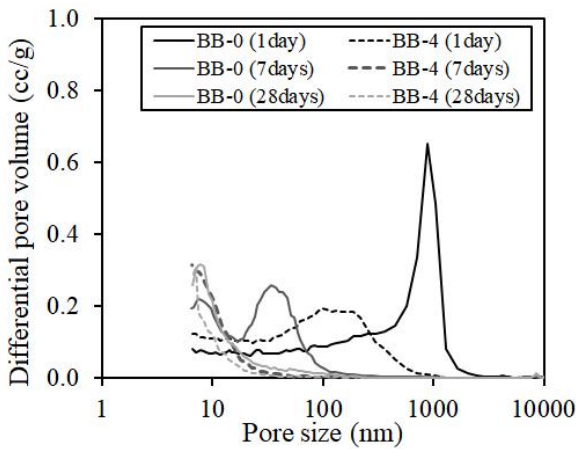


Figure 10. Differential pore volume of BB

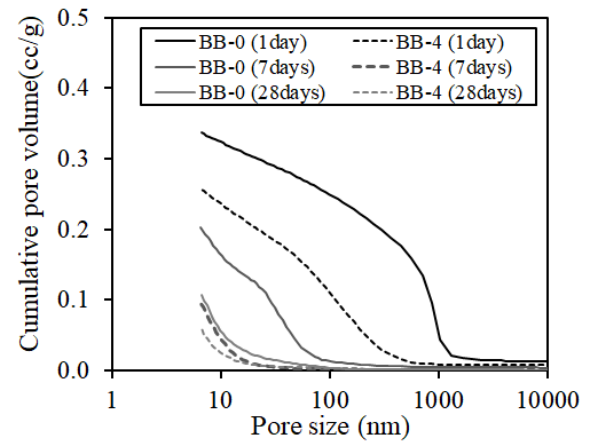


Figure 12. Cumulative pore volume

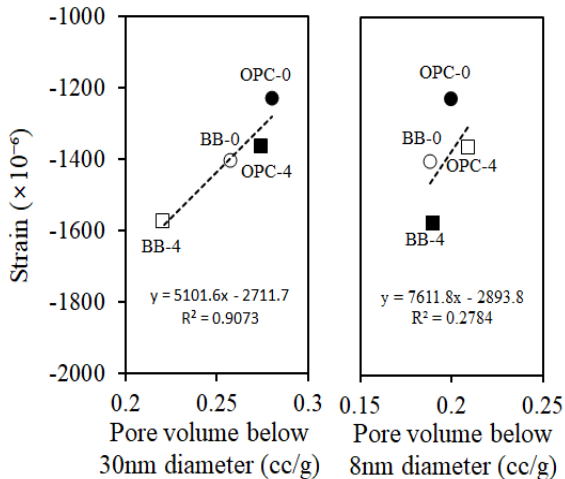


Figure 13. Relationship between pore volume and drying shrinkage (under the 30nm and 8nm diameter)

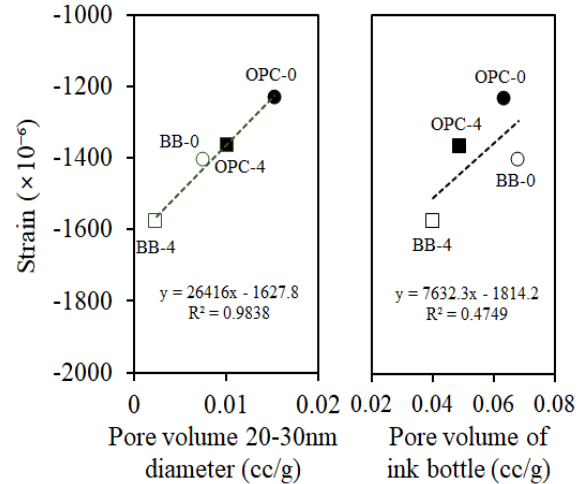


Figure 14. Relationship between pore volume and drying shrinkage (between 20-30nm diameter and ink bottle pore)

직경 6nm 이상으로 직경 6nm 이하의 세공분포의 측정이 곤란하기 때문에 아르키메데스법에 의해 구한 전공극량으로부터 수은 압입법에 의해서 구한 직경 6nm 이상의 세공량을 통제하는 것으로 직경 6nm 이하의 세공량을 산출한 후, 이것을 고려하여 직경 30nm 이하 및 직경 8nm이하의 세공량을 계산했다. Figure 13은 산출한 직경 30nm 이하의 세공량 및 직경 8nm 이하의 세공량과 길이 변화율과의 상관관계를 나타낸 것이다.

OPC, BB 모두 내한축진제의 혼입에 따라 직경 30nm 및 직경 8nm이하의 세공량은 감소하고 수축이 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 직경 30nm 이하의 세공량과 길이변화 간의 높은 상관성을 확인할 수 있었다.

또한 내한축진제 첨가에 따른 길이변화와 상관관계가 큰 세공경의 범위를 특정하기 위해 직경 30nm 이하의 세공분포를 Min. (0~20nm) 및 Max. (6~30nm)로 구분하여 각 구간에 있어서의 세공량과 길이 변화의 상관성을 검토했다. Table 3은 각 구간에 있어서 세공량과 길이변화의 결정계수를 나타낸 것이다.

본 검토에서 설정한 구간에서는 직경 20~30nm 이하의 세공량과 길이변화의 결정계수가 0.9838로 가장 높은 것을 확인할 수 있어 내한축진제의 첨가에 따라 직경 30nm 이하의 세공량, 특히 Figure 14와 같이 직경 20~30nm 세공량이 길이변화에 미치는 영향이 크다고 판단된다.

Table 3. Relationship between pore size and drying shrinkage

Min.	Max.			
	6nm	10nm	20nm	30nm
0nm	0.0659	0.9125	0.8434	0.9073
6nm	-	0.1721	0.7089	0.8667
10nm	-	-	0.6883	0.8101
20nm	-	-	-	0.9838

Figure 14는 ink-bottle 세공량과 길이변화의 관계를 나타낸 것이다. 기존 연구에서는 ink-bottle 세공내의 수분 일산에 대한 검토가 이루어지고 있어[12,14,15], ink-bottle 입구부의 수분의 건조가 진행되면 그 ink-bottle 내의 수분이 내부에 재분배되는 것으로 수축이 저감한다고 보고되고 있다. 본 검토에서는 OPC 및 BB의 시멘트 종류에 관계없이 내한축진제의 첨가에 의해 ink-bottle 세공량이 감소하고 있어 ink-bottle 세공에 의한 수축억제 효과가 감소하는 것을 확인할 수 있고, 이는 내한축진제를 첨가함에 따라 수축이 커진 원인으로 생각할 수 있다.

이상으로부터 OPC, BB 모두 내한축진제를 첨가함에 따라 세공구조, 특히 직경 20~30nm의 세공량 및 ink-bottle 세공량이 감소하여 길이변화가 커지는 것을 확인할 수 있으며 이 범위의 세공량의 변화가 내한축진제를 첨가한 시멘트 경화체의 수축성상에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

고로시멘트와 내한 축진제를 병용한 모르타르의 수축특성 및 수축성상에 미치는 영향에 대해 검토한 결과 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) OPC, BB 모두 내한축진제의 첨가에 의한 굳지 않은 성상에 미치는 영향은 작고, 내한축진제를 첨가함에 따라 내한축진제의 경화축진 효과로부터 초기재령부터 압축강도는 커진다.
- 2) 내한축진제를 8% 첨가한 경우 초기 재령으로부터 팽창 현상이 생기는 것을 확인할 수 있어, 내한 축진제를 표준 사용량 이상으로 다량 사용할 경우에는 초기재령에 있어서의 팽창거동, 특히 강도발현과 팽창성의 관계에 대해 충분히 검토한 후에 적용할 필요가 있다.
- 3) 내한축진제를 첨가함으로써 OPC, BB 모두 길이변화가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 내한축진제를 첨가함에 따라 직경 30nm 이하의 세공량의 변화, 특히 직경 20~30nm의 세공량 및 ink-bottle 세공량의 감소가 원인으로 생각되며, 이 범위의 세공량의 변화가 내한축진제를 첨가한 시멘트 경화체의 수축성상에 미치는 영향이 크다고 판단된다.

## 요 약

고로시멘트와 내한축진제를 병용한 모르타르의 수축특성 및 수축성상에 미치는 영향에 대해 검토했다. 그 결과, OPC, BB 모두 내한축진제를 첨가함에 따라 굳지 않은 성상에 미치는 영향은 작고, 초기재령부터 압축강도는 커진다. 또한, 내한 축진제를 표준 사용량 이상으로 다량 사용할 경우에는 초기재령에 있어서의 팽창거동, 특히 강도발현과 팽창성의 관계에 대해 검토할 필요가 있다. 한편, 내한축진제를 첨가함으로써 OPC, BB 모두 길이변화는 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 내한축진제를 첨가함에 따라 직경 30nm 이하의 세공량, 특히 직경 20~30nm의 세공량 및 ink-bottle 세공량이 감소하여 수축량은 커지게 되며, 이 범위의 세공량의 변화가 수축성상에 미치는 영향이 크다고 판단된다.

**키워드** : 내한축진제, 고로슬래그, 압축강도, 수축성상, 세공량

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2018R1A5A1025137).

## References

1. Lee SY, Innovation of concrete technology through the value finding of blast furnace slag powder, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2017 Dec;29(6):6-7.
2. Architectural Institute of Japan, Recommendation for practice of concrete with portland cement and ground granulated blast-furnace slag, Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2001, 70 p.
3. Nonomura Y, Shimata A, Shimada H, Yoshida S, A fundamental study on expansion of use of frost-resistant accelerator for blast furnace slag cement, Hokkaido(Japan): Civil Engineering Research Institute for Cold Region; 2015 Oct 45-50 p, Report No.:749.
4. AIJ, Recommendation for Practice of Cold Weather Concreting, Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2010, 240 p.
5. Taniguchi M, Nakamura T, Koike S, Nishi H, Study on effect and mechanism of accelerator for freeze protection, Hokkaido(Japan): Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute; 2015 Mar, 1-11 p, Report No.:358.
6. Hama Y, Kamada E, The properties of concrete containing a frost-resistant accelerator, Concrete Journal, 1999 Jan;37(11): 3-8.
7. Architectural Institute of Japan, Recommendations for Practice of Crack Control in Reinforced Concrete Buildings (Design and Construction), Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2006, 17-24 p.
8. Japan Concrete Institute, Research committee report on shrinkage of concrete, Tokyo(Japan): Japan Concrete Institute; 2010, 81-2 p.
9. KS F 2405, Standard test method for compressive strength of concrete, Seoul(Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2017, 1-7 p.
10. JIS S 009-2012, Method of test for restrained expansion of expansive concrete using a cylindrical mold, Tokyo(Japan): Japan Industrial Standards; 2012, 1-3 p.
11. KS F 2424, Testing method for length change of mortar and

- concrete, Seoul(Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2015, 1–11 p.
12. Narumi R, Zhang W, Kishimoto Y, Hama Y, Investigation of affecting factors on reductance of drying shrinkage and degaradation of frost resistance of mortar with shrinkage reducing agent. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 2014 Jul;72(700):671–80.
  13. Maria CGJ, Hamlin MJ, Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and drying shrinkage of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 2002 Feb;32(2):289–96.
  14. Knut O.K., Elisabeth H.A., Pore structure of cement silicafume systems presence of hollow–shell pores. *Cement and Concrete Research*. 1999 Jan;29:133–42.
  15. Rosa ME, Lutz F, Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherm of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2006 Oct;36:1969–84.
  16. KS F 2562, Expansive additive for concrete, Seoul(Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2014, 1–19 p.
  17. Choi HG, Kim GY, Noguchi T, Hama Y, Estimation of Shrinkage Behavior and Stress of Expansive Concrete on Buildings. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2016 Feb;28(1):23–31.