

## 고로슬래그미분말 및 팽창재를 혼입한 조강형 모르타르의 역학적 특성

# Mechanical Properties of Early Strength Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Expansive Additive

구경모<sup>1</sup> · 최재원<sup>2</sup> · 유병노<sup>3</sup> · 차완호<sup>4\*</sup> · 강봉희<sup>5</sup>

Kyung-Mo Koo<sup>1</sup> · Jae-Won Choi<sup>2</sup> · Byeong-Know You<sup>3</sup> · Wan-Ho Cha<sup>4\*</sup> · Bong-Hee Kang<sup>5</sup>

(Received April 7, 2021 / Revised April 13, 2021 / Accepted April 13, 2021)

In this study, the effects of ground granulated blast furnace slag(GGBFS) and expansive additive(EA) on early strength mortar were examined for the purpose of reducing carbon and improving cement performance. As a result, early strength Portland cement(EPC) tended to decrease in flow compared to ordinary Portland cement(OPC), but binder with EPC and GGBFS was possible to obtain higher liquidity than OPC. EPC showed higher compressive strength and shrinkage than OPC. The compressive strength of specimen with EPC and GGBFS was reduced proportionally to the replacement ratio of GGBFS. The replacement ratio of GGBFS above the compressive strength equivalent to OPC was higher under low temperature conditions. The use of GGBFS resulted in high shrinkage compared to OPC, and this characteristic was even greater under low temperature conditions. The shrinkage of specimen with EA was decreased in early ages, but was higher than the OPC in long-term ages.

**키워드** : 조강형 모르타르, 고로슬래그미분말, 팽창재, 역학적 특성

**Keywords** : Early strength mortar, Ground granulated blast furnace slag, Expansive agent, Mechanical properties

## 1. 서론

건설산업 전반에 걸쳐 환경부하저감 및 산업부산물의 유효이용과 관련한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 시멘트의 생산과정에서 배출되는 이산화탄소를 줄이기 위해 콘크리트 생산시 플라이애시, 고로슬래그와 같은 광물질 혼화재를 혼입 사용하거나, 지오폴리머 등의 무시멘트 개발과 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다(Hosan and Shaikh 2021; Zhang et al. 2021). 또한 최근에는 콘크리트가 고성능화되면서 결합재의 사용량도 증가되고 있기 때문에 배합상 시멘트를 줄이기 위한 노력이 더욱 필요한 실정이다.

이에 건설사 및 레미콘사에서는 현장조건에 적합하도록 다양한 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트 최적 배합을 도출하여 사용하고

있으며, 광물질 혼화재 중에서도 고로슬래그미분말을 일반적으로 적용하고 있다. 고로슬래그미분말은 콘크리트의 수화발열량 감소 및 유동성 개선 효과 뿐 아니라 자체 수경성에 기인하여 장기강도 및 내구성 향상의 장점을 갖고 있어 폭넓게 사용되고 있다(Hester et al. 2005; Leng et al. 2000). 그러나 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트는 초기강도가 저하되고, 혼입률이 적정범위 이상 증가되는 경우 반응성이 저하되어 장기강도 또한 억제되는 것으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라 온도 의존성의 특징을 갖고 있어 저온 조건의 콘크리트 시공시에는 초기동해 방지를 위한 대책이 별도로 마련되어야 할 필요가 있다(Ryu et al. 2012).

이를 보완하기 위한 방안으로 고로슬래그미분말의 분말도를 향상시키거나 알칼리 자극제를 혼입하는 경우가 있다(Hester et al.

\* Corresponding author E-mail: [chawh@asiacement.co.kr](mailto:chawh@asiacement.co.kr)

<sup>1</sup>한화건설 건축사업본부 기술혁신팀 과장 (Building Engineering Team, Building Construction Division, Hanhwa Engineering & Construction, Seoul, 04541, Korea)

<sup>2</sup>아세아시멘트 기술연구소 선임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

<sup>3</sup>아세아시멘트 기술연구소 책임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

<sup>4</sup>아세아시멘트 기술연구소 연구실장 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

<sup>5</sup>아세아시멘트 이사 (Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

2005; Siddique and Bennacer 2012). 또 다른 방안으로 시멘트의 분말도를 높여 수화반응을 촉진하는 방법이 있으며, 이는 최근 동절기 공사시 철근콘크리트 공정의 공사기간을 단축하기위한 목적으로 다양하게 연구되고 있다(Kim et al, 2017; Lee et al, 2019; Lee et al, 2020).

그러나 고분말도의 조강형 시멘트와 고로슬래그미분말을 함께 사용하는 경우, 결합재의 분말도 증가와 고로슬래그미분말의 초기 수화반응성의 촉진에 기인하여 공극이 치밀해지고 수축이 증가될 수 있다(Lim and Wee 2000). 이에 수축을 저감시킬수 있는 방안으로 수축저감제 또는 팽창재의 활용을 들 수 있다. 그 중 팽창재는 시멘트 및 물과 함께 혼합하였을 경우 수화반응에 의해 에트링가이트 또는 수산화칼슘 등을 생성하고 모르타르 또는 콘크리트를 팽창시키는 혼화재료로서, 칼슘설펜 알루미늄이네이트계(Calcium sulfo-aluminate)와 CaO계를 주성분으로 하는 석회계의 두 종류가 있다. 이러한 팽창재를 혼합하였을 때 팽창이 응결보다 너무 빠르게 끝나면 수축에 대한 보상이 일어나지 않게 되고, 또한 팽창이 과다하게 진행되면 조직이 붕괴되기 때문에 적절한 혼입량을 조절하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 탄소저감, 산업부산물의 활용 확대 및 결합재의 성능개선을 목적으로 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)와 동등 수준의 압축강도를 발현하기 위한 조강형시멘트(이하 EPC) 및 고로슬래그미분말(이하 GGBFS)의 혼합범위를 검토하고자 하였다. 또한, 두 재료의 혼합조건(EPC+GGBFS)에서 발생될 수 있는 수축변형 증가에 대하여 석회계 팽창재(이하 EA)의 적용가능성 및 개선효과를 확인하였다. 여기에 조강형시멘트 기반의 결합재가 저온조건에서 나타내는 역학적 특성도 함께 분석함으로써 연구결과의 활용성을 확대하고자 하였다.

Table 1. Experiment plan

ID	W/B (%)	B : S	Binder composition(%)				Curing temperature (°C)	Test item
			OPC <sup>1)</sup>	EPC <sup>2)</sup>	GGBFS <sup>3)</sup>	EA <sup>4)</sup>		
OPC	50	1 : 3	100	-	-	-	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flow(mm)</li> <li>• Unit weight(ton/m<sup>3</sup>)</li> <li>• Compressive strength(MPa)</li> <li>• Length change(×10<sup>-6</sup>)</li> </ul>
EPC			-	100	-	-		
E+B10			-	90	10	-		
E+B20			-	80	20	-	10	
E+B30			-	70	30	-		
E+B40			-	60	40	-		
E+B30+E2			-	68	30	2		
E+B30+E4			-	66	30	4		

1) OPC : Ordinary portland cement 2) EPC : Early strength portland cement  
 3) GGBFS : Ground granulated blast furnace slag 4) EA : Expansive agent

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

Table 1은 실험계획을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 양생온도 20°C 및 10°C의 조건에서 W/B 50%의 모르타르를 대상으로 EPC에 GGBFS를 10~40%범위로 혼합하였을 때의 압축강도 변화를 확인하였다. 그 중 OPC와 동등수준의 압축강도를 발현하는 GGBFS의 혼입률(30%)을 선정한 후, 기존 연구(Jeong et al, 2018)를 바탕으로 EA를 2% 및 4% 혼입하였을 때의 역학적 특성을 검토하였다.

### 2.2 사용재료 및 실험방법

Table 2는 본 연구에 사용된 재료의 물리적 성능을 나타낸 것이다. 시멘트는 A사에서 생산하는 1종 보통 포틀랜드시멘트 중 일반형 제품(OPC)과 조강형 제품(EPC)을 사용하였으며, 분말도가 각각 3,560cm<sup>2</sup>/g 및 5,210cm<sup>2</sup>/g로 차이를 나타내었다. 또한 EA는

Table 2. Mechanical properties of material

Material	Properties
Cement	Ordinary portland cement (density 3.15g/cm <sup>3</sup> , blaine 3,560cm <sup>2</sup> /g)
	Early strength portland cement (density 3.15g/cm <sup>3</sup> , blaine 5,210cm <sup>2</sup> /g)
Ground granulated blast furnace slag	Density 2.90g/cm <sup>3</sup> , blaine 4,580cm <sup>2</sup> /g
Expansive agent	Density 2.70g/cm <sup>3</sup> , blaine 2,210cm <sup>2</sup> /g
Sand	ISO standard sand maximum size 2mm, density 2.62g/cm <sup>3</sup>

정유사의 탈황공정에서 발생하는 산업부산물로 CaO 함량이 약 33% 내외이며, 밀도는 약 2.7g/cm<sup>3</sup>로써 바닥용 건조 모르타르 제품 등에 활용되는 것을 적용하였다.

모르타르의 비빔 시 온도는 약 19~20°C 범위로 하고, 플로 및 압축강도는 KS L 5105 및 KS L ISO 679에 준하여 평가했다. 길이 변화율의 경우, KS F 2424에 준하여 40×40×160mm의 모르타르 시험체를 대상으로, 비빔 직후 상대습도 60% 및 온도는 20°C 또는 10°C의 조건으로 구분하여 양생하였다. 이후 재령 1일에 탈형하여 매립된 센서를 통해 길이를 측정하였고, 양생 환경은 타설 직후의 조건과 동일하게 진행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

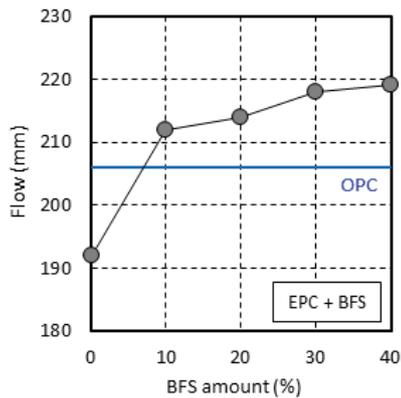
#### 3.1 플로 및 단위용적중량

Fig. 1은 결합재 종류에 따른 플로를 나타낸 것이다. EPC를 단독으로 하는 모르타르의 플로는 OPC에 비해 약 10% 감소하였으

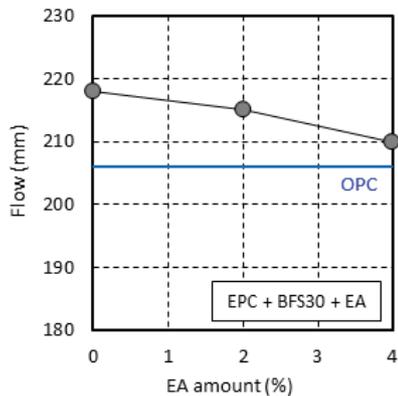
나, EPC에 GGBFS를 혼입하는 경우 혼입률의 증가에 따라 플로가 비례적으로 증가하였다. Siddique and Bennacer(2012)의 연구에 따르면 GGBFS는 입자 형상이 플라이애시처럼 원형은 아니지만 표면이 매끄럽기 때문에 유동성의 증가에 기여하는 것으로 알려져 있으며, 특히 본 연구의 경우 고분말도의 시멘트가 GGBFS와의 혼합을 통해 입도가 개선되는 효과로 판단된다.

한편, EA의 혼입률이 증가함에 따라 유동성이 약 3~6% 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 EA는 CaO의 성분이 포함되어 있어 급격한 반응에 의한 유동성 저하를 일부 발생시키는 것으로 사료된다(Lee et al, 2015).

Fig. 2는 결합재 종류에 따른 단위용적중량을 나타낸 것이다. EPC를 단독으로 하는 모르타르에 비해 GGBFS를 혼입하는 경우 단위용적중량이 감소하였으며, 이는 EPC 대비 GGBFS의 낮은 밀도에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 GGBFS의 혼입률 증가에 따른 단위용적중량의 변화는 거의 발생하지 않았으며, 이는 GGBFS 혼입시 공기량이 감소하는 특성(Japan Cement Association 1993)에 의해 단위용적중량의 감소가 상쇄된 것으로 예상된다.

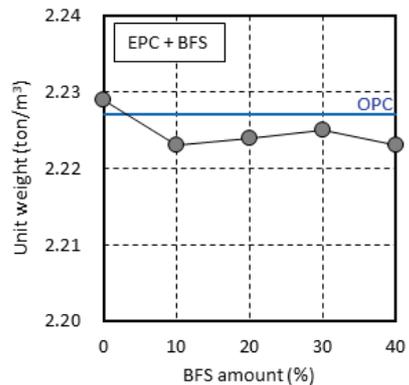


(a) EPC+BFS

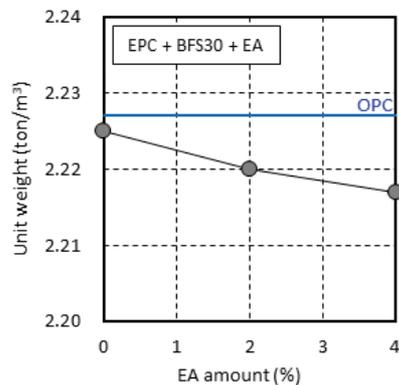


(b) EPC + BFS 30% + EA

Fig. 1. Mortar flow by binder types



(a) EPC+BFS



(b) EPC + BFS 30% + EA

Fig. 2. Mortar unit weight by binder types

### 3.2 압축강도

Fig. 3은 결합재 종류에 양생온도별 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다. 양생온도 20°C의 조건에서 EPC는 OPC보다 높은 강도를 발현하였으며, 재령이 1, 7, 28일로 경과함에 따라 압축강도 차이가 17.9, 16.1, 8.9MPa로 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 10°C의 양생온도 조건에서는 EPC가 OPC에 비해 높은 압축강도를 발현함과 동시에 재령이 1, 7, 28일로 경과함에 따라 압축강도 차이가 9.8, 16.3, 17.1MPa로 오히려 증가하였다. 특히, 초기재령(1일)에 있어서 20°C의 조건에서는 EPC가 OPC 대비 약 2.2배의 강도 향상 효과를 보였고, 10°C의 조건에서는 4.5배 높은 강도를 발현함으로써, 저온 조건에서 EPC의 우수한 강도발현능을 확인할 수 있었다.

EPC에 GGBFS 및 EA를 혼입하였을 때 압축강도 특성을 OPC

와 비교하기 위해 Fig. 4를 제시하였다. EPC에 GGBFS를 10~40% 혼입한 경우, 혼입률이 증가함에 따라 EPC 대비 초기재령 뿐 아니라 장기재령에서도 압축강도가 감소하였다(Fig. 4 (a)). 이를 양생온도별로 OPC와 비교해보면, 20°C의 경우 재령 1일에서는 GGBFS 40%까지 OPC 대비 동등 이상의 수준을 발현하였고, 재령 28일에서는 GGBFS 30%까지가 동등 수준 이상을 나타내었다. 그러나 양생온도 10°C의 조건에서는 모든 재령에서 GGBFS 40%까지 OPC 대비 동등 수준 이상의 압축강도를 발현하였다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 저온 조건에서 EPC가 OPC대비 초기재령 뿐만 아니라 장기재령에서도 우수한 강도발현을 나타내기 때문에, 저온 조건 일수록 GGBFS의 수화반응에 대한 기여도도 더욱 커진 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상기 압축강도 시험결과를 바탕으로, EPC에 GGBFS를 30% 혼입한 결합재 조건에서 EA의 혼입에 따른 압축강

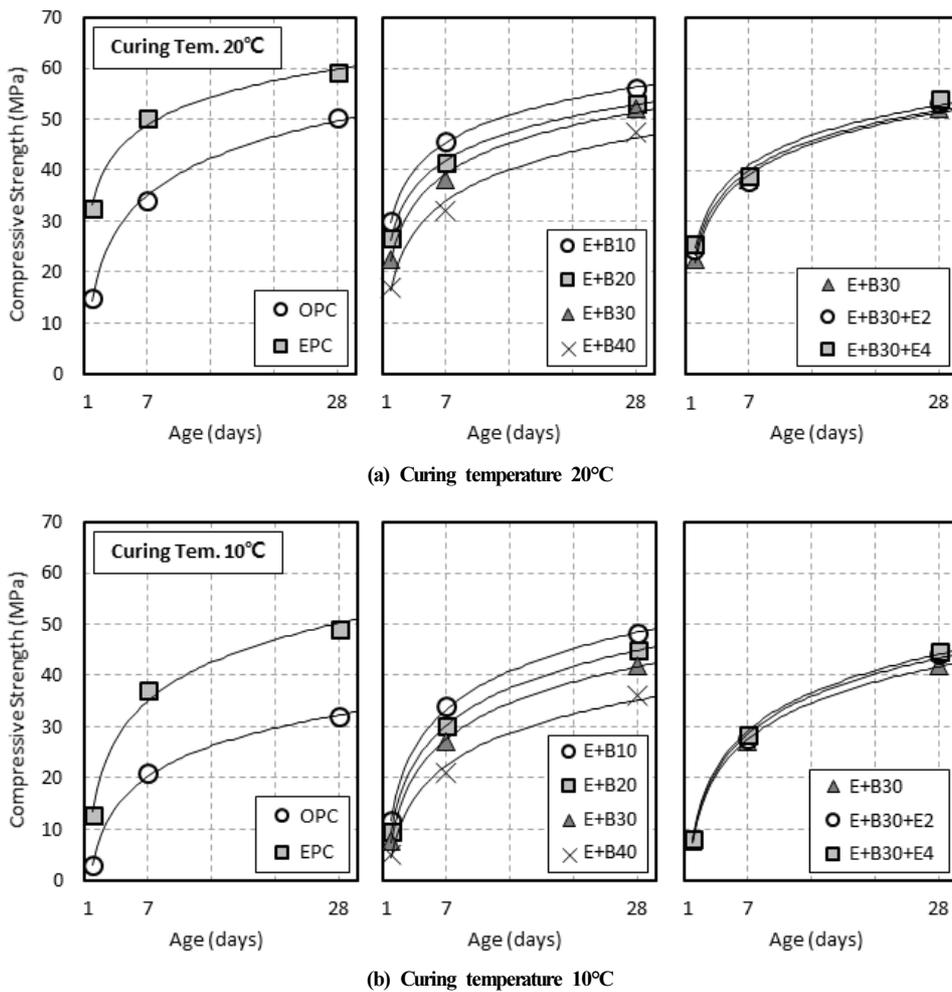


Fig. 3. Compressive strength by binder types

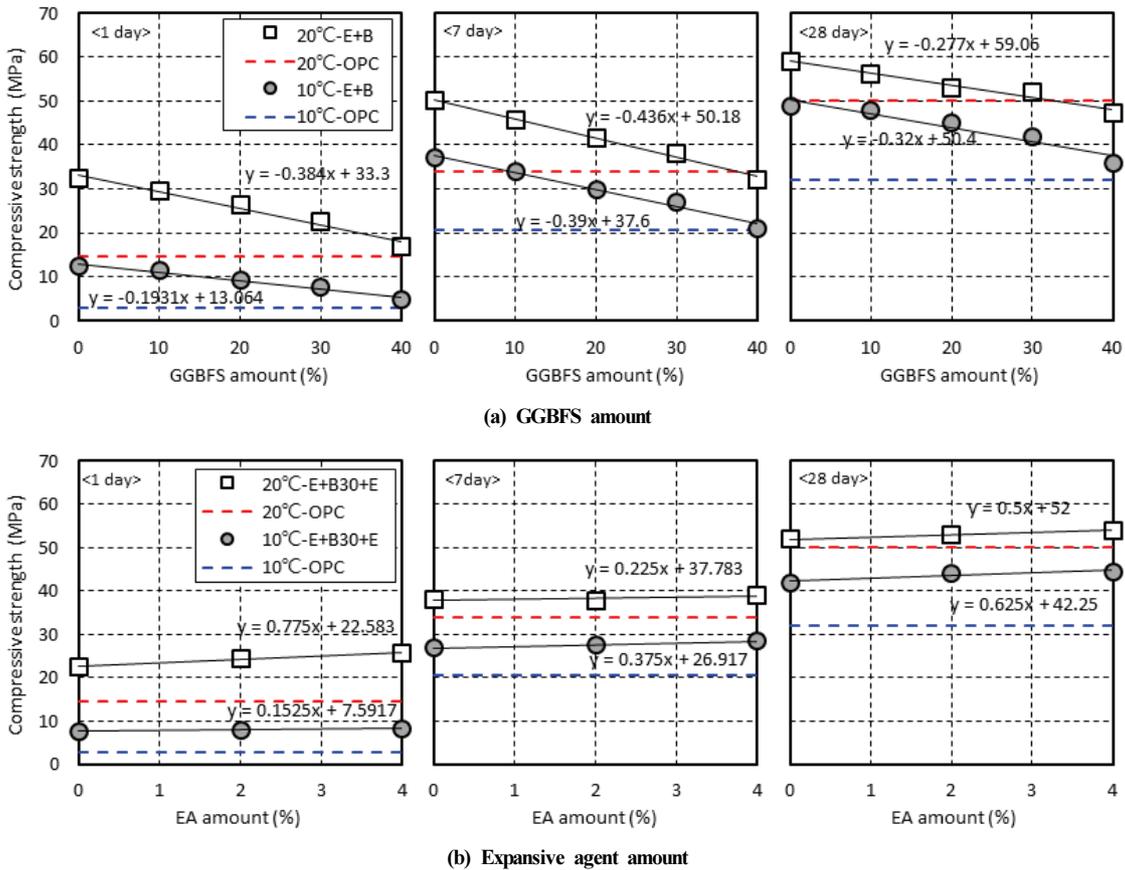


Fig. 4. Compressive strength according to mineral admixture ratio

도 성능을 검토하였다(Fig. 4 (b)). 그 결과, EA의 혼입에 따라 압축 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 초기재령(1일)에 있어 강도 증진효과가 약 5~10%로 높았으며, 재령이 경과함에 따라 그 효과가 감소하였다. 이와 같은 현상은 팽창재 상의 CaO가 물과 접촉한 후 Ca(OH)<sub>2</sub>를 생성하고, 고로슬래그 미분말의 수화반응을 촉진하여 C-S-H를 생성하기 때문으로 판단된다(Yang et al, 2012). 또한 사용된 EA에는 무수석고(CaSO<sub>4</sub>) 및 석회석(CaCO<sub>3</sub>)의 성분이 각각 약 35% 및 20% 함유되어 있어, GGBFS의 잠재수경성 반응에 기여하는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 OPC 대비 각 결합재(EPC, EPC+GGBFS, EPC+GGBFS+EA)의 압축강도 발현율(%)을 양생온도별로 비교한 것이다. 재령 1일에서 양생온도 20°C의 OPC 대비 압축강도 발현율은 약 115~222%의 범위인 반면, 양생온도 10°C의 경우 175~450%로 상대적으로 높은 발현율을 나타내었다. 이러한 저온에서의 상대적인 강도증진 효과는 재령 7 및 28일에도 확인되었지만, 그 영향은 초기에 비해 감소하였다.

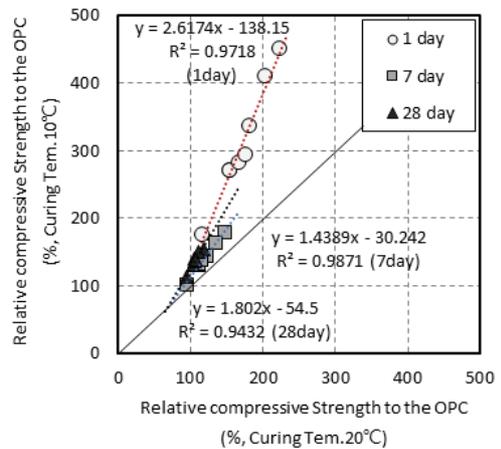
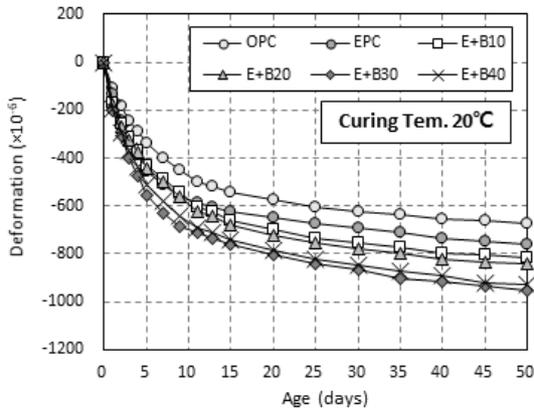


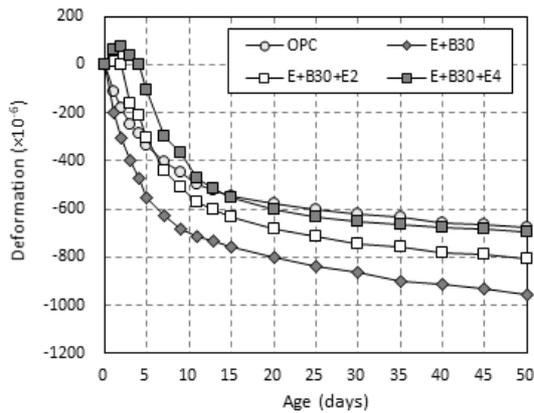
Fig. 5. Comparison of relative compressive strength to the OPC by curing temperature

### 3.3 길이변화율

Fig. 6은 양생온도 20°C에서의 길이변화율을 나타낸 것으로, 탈형 직후(재령 1일)부터 50일간의 측정결과이다. 재령 50일을 기



(a) EPC+BFS

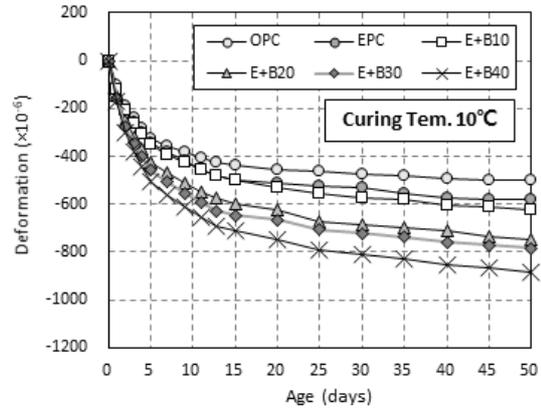


(b) EPC + BFS 30% + EA

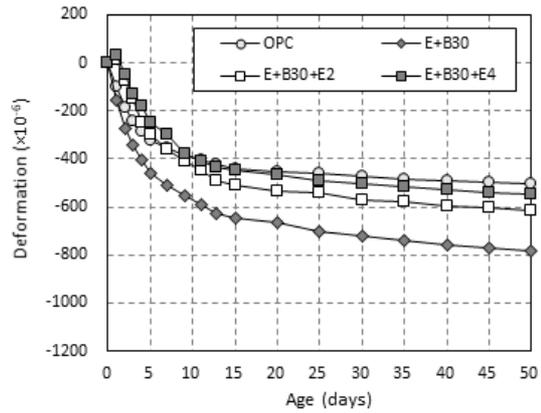
Fig. 6. Length change(curing temp. 20°C)

준으로 OPC 및 EPC의 수축변형량은 674 및  $760 \times 10^{-6}$ 으로 확인되었다. 또한 E+B10, E+B20, E+B30 및 E+B40의 시험체의 변형량은 818, 843, 954 및  $930 \times 10^{-6}$ 으로 GGBFS의 혼입률이 증가함에 따라 수축이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 OPC 대비 EPC의 경우, 분말도가 높아 초기재령에 수화반응 촉진에 의해 밀실한 공극구조가 형성되어 수축이 증가된다. 또한 고로슬래그 치환율이 증가하면서 초기에 미반응의 자유수가 증가하기 때문에 건조에 의한 수축이 증가되고, 장기재령에 있어서는 잠재수경성에 기인하여 공극구조를 더욱 치밀하게 만들기 때문에 수축이 높게 발생할 수 있다(Lim et al. 2020). 한편, E+B30+E2 및 EPC+B30+E4 시험체의 경우, 재령 50일에 806 및  $693 \times 10^{-6}$ 으로 EPC+B30시험체 대비하여 약 15% 및 25% 감소하는 효과를 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 양생온도 10°C에서의 길이변화율을 나타낸 것으로, 전반적으로 양생온도 20°C의 조건과 비교하여 유사한 경향을 나타내며 상대적으로 낮은 수축변형량을 보였다. 특징적인 것은 EPC



(a) EPC+BFS

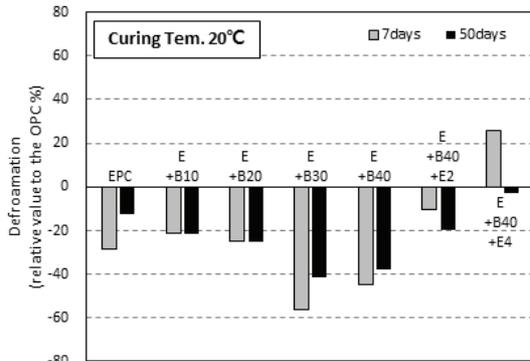


(b) EPC + BFS 30% + EA

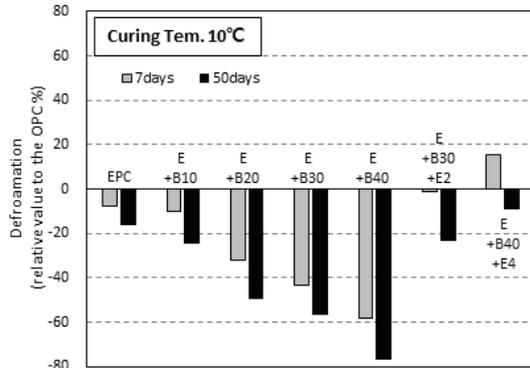
Fig. 7. Length change(curing temp. 10°C)

와 비교하여 20°C 조건에서는 GGBFS의 혼입률이 증가함에 따라 수축량이 8~25% 증가하는 반면, 10°C의 조건에서는 최대 52%까지 증가한다는 점이다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 GGBFS에 의한 영향 뿐 아니라 저온인 경우에 수화작용의 진행이 지연되어 수화작용에 관여하지 않은 자유수가 더 증가하기 때문에 수축량이 높아진다고 판단된다(Koh et al. 2005).

Fig. 8은 재령 7일 및 50일을 기준으로 OPC 대비 수축변형의 상대값(%)을 나타낸 것이다. OPC를 기준으로 EPC 및 E+B 시험체들은 20°C 양생시 약 20~56% 수축량이 증가하였고, 10°C 양생조건에서도 10~76%까지 증가하는 경향을 보였다. EA가 2% 혼입된 시험체의 경우, 양생온도에 관계없이 재령 7일까지는 OPC와 동등 수준의 수축량을 발현하다가 장기재령에서는 OPC 대비 약 20% 내외로 수축량이 증가하였다. 또한 EA가 4% 혼입된 시험체에 있어서도 초기재령에는 OPC보다 약 15~25% 낮은 수축량을 나타내었지만, 장기재령에서는 수축이 증가하는 경향으로 역전되었다.



(a) Curing temperature 20°C



(b) Curing temperature 10°C

Fig. 8. Relative value of deformation to the OPC

이는 EA가 초기 팽창성만을 부여하는 것으로 판단할 수 있으며, 수축이 시작되는 지점을 고려한다면, 수축이 OPC 및 EPC보다 상당량 증가는 것으로 볼 수 있다. 이에 EA 사용시에는 양생에 보다 철저한 관리가 필요하다고 판단된다.

#### 4. 종합결론

본 연구에서는 고분말도 시멘트를 활용한 조강형 모르타르의 역학적 특성에 대하여 산업부산물인 고로슬래그미분말 및 팽창재의 영향을 양생온도 20°C와 10°C를 기준으로 검토하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. OPC에 비해 EPC는 플로가 감소하는 경향을 보였으나, EPC와 GGBFS를 함께 사용하는 경우 OPC보다 높은 유동성의 확보가 가능하며, 여기에 EA는 CaO의 성분 등에 기인하여 다소 감소하였다.
2. EPC는 OPC보다 높은 압축강도 발현특성을 나타내었으며, 특

히 저온에서 장기재령까지 지속적인 우수한 성능을 보였다.

3. EPC에 GGBFS를 혼합하는 경우, 그 혼합률에 비례적으로 강도가 감소하였으며, 재령 28일을 기준으로 양생온도 20°C에서는 GGBFS 30%, 양생온도 10°C에서는 40%까지 혼합 대체하여도 OPC대비 동등수준 이상의 압축강도를 발현하였다. 또한 EA는 GGBFS의 수화반응 촉진 등의 역할로 압축강도가 향상되었다.
4. EPC에 GGBFS의 혼합률이 증가함에 따라 OPC 대비 수축량이 증가하였고, 이는 저온의 조건에서 더 커지는 경향을 보였다.
5. EA는 초기재령의 팽창성에 의해 OPC보다 감소하였으나, 장기재령으로 갈수록 수축이 오히려 증가하기 때문에 실제 사용시에는 양생관리가 필요할 것으로 판단된다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 한국산업기술평가관리원 소재부품기술개발 사업의 연구비 지원(과제번호 20010616)으로 수행되었습니다.

#### References

Hester, D., McNally, C., Richardson, M.G. (2005). Study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Construction and Building Materials*, **19(9)**, 661-665.

Hosan, A., Shaikh, F.U.A. (2021). Compressive strength development and durability properties of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano-CaCO<sub>3</sub>, *Journal of Materials Research and Technology*, **6**, 1310-1322.

Japan Cement Association. (1993). *Easy to Understand for Cement Science*, Japan: Japan Cement Association.

Jeong, I.D., Lee, T.W., Koo, K.M., Jang, S.S., Jung, Y.W., Kwon, Y.H. (2018). Compressive strength and deformation of high strength mortar with CaO-gypsum, *The Proceedings of the Korea Concrete Institute*, **30(1)**, 163-164.

Kim, K., Choi, H., Yoon, S., Kim, J., Gong, M., Jeong, Y. (2017). An experimental study on the reduction of construction period in the winter season using high early strength cement, *Proceeding of*

- Korea Concrete Institute, 473~474.
- Koh, K.T., Cheong, H.M. (2005). Properties of concrete to curing temperature, Korea Concrete Institute, **17(1)**, 22-27.
- Lee, E.B., Ko, J.W., Yoo, J.K., Kim, G.T., Song, D.G., Koo, K.M. (2020). Early age strength of concrete using high fineness ordinary portland cement and powdered early strength admixture, **36(7)**, 163-171.
- Lee, S.H., Lee, K.H., Yoo, D.W., Ha, J.H., Cho, Y.G. (2015). Hydration and insulation characteristics of a ground granulated blast furnace slag based non-sintered cement using circulating fluidized bed combustion ash as a activator, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(3)**, 245-252.
- Lee, T.G., Kim, Y.R., Song, Y.C., Lee, J.H., Park, C.J. Park, J.H. (2019). Evaluation on strength development of high early strength concrete for horizontal form removal, Proceeding of Korea Concrete Institute, 517-518.
- Leng, F., Feng, N., Lu, X. (2000). An experiment study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, Cement and Concrete research, **30**, 989-992.
- Lim, S.N., Wee, T.H. (2020). Autogenous shrinkage of ground-granulated blast furnace slag concrete, ACI Materials Journal, **97(5)**, 587-593.
- Park, C.Y., Kang, B.H. (2008). A study on rheological properties of cement paste using expansive additives by kind & replacement ratio, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **8(2)**, 99-106.
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., You, J.H., Ko, J.W. (2012). An experimental study on the freezing-thawing and chloride resistance of concrete using high volumes of GGBFS, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **12(3)**, 315-322.
- Siddique, R., Bennacer, R. (2012). Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar, Resources Conservation and Recycling, **69**, 29-34.
- Yang, K.H., Cho, A.R., Song, J.K., Nam, S.H. (2012). Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars, Construction and Building Materials, **29**, 410-419.
- Zhang, H.Y., Kiu, J.C., Wu, B. (2021). Mechanical properties and reaction mechanism of one-part geopolymer mortars, Construction and Building Materials, **273(2)**, 121973.

### 고로슬래그미분말 및 팽창재를 혼입한 조강형 모르타르의 역학적 특성

본 연구에서는 탄소저감 및 시멘트 성능 향상을 목적으로 조강형 모르타르에 대하여 산업부산물인 고로슬래그미분말(GGBFS) 및 팽창재(EA)가 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 보통포틀랜드시멘트(OPC)에 비해 조강형시멘트(EPC)는 플로가 감소하는 경향을 보였으나, EPC와 GGBFS를 함께 사용하는 경우 OPC보다 높은 유동성의 확보가 가능하였다. 또한 EPC는 OPC 대비 높은 압축강도를 보였으나, 수축이 증가하는 경향을 보였다. EPC에 GGBFS를 사용하는 경우, 그 혼입률에 따라 비례적으로 압축강도는 감소하고, 수축량은 커지는 경향을 보였으며 수축은 저온조건에서 더욱 증가하였다. EPC 및 GGBFS로 구성된 결합재 조건에서, EA는 압축강도를 향상시키고, 초기재령의 수축을 저감시키는 효과를 확인하였다.