

팽창재와 팽윤제가 혼합된 고로슬래그 콘크리트 Mock-up의 균열 저감 성능평가

Mock-up Crack Reduction Performance Evaluation of Blast Furnace Slag Concrete Mixed with Expansive and Swelling Admixture

윤상혁¹ · 최원영^{2*} · 전찬수³Sang-Hyuck Yoon¹ · Won-Young Choi^{2*} · Chan-Soo Jeon³

(Received December 5, 2023 / Revised December 19, 2023 / Accepted December 20, 2023)

The purpose of this study is to evaluate the crack reduction performance of blast furnace slag concrete mixed with expansive and swelling admixtures. As a basic performance test, various ingredients such as blast furnace slag fine powder (BFS), calcium sulfoaluminate (CSA), bentonite, and hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) were used, and the results showed that bentonite showed superior performance compared to HPMC. Afterwards, a MOCK-UP test was conducted to evaluate cracking and drying shrinkage according to the mixing ratio. As a result, when bentonite and a small amount of calcium phosphate were added, drying shrinkage was reduced and cracking was reduced. In particular, a cement mixture consisting of 30 % BFS, 1 % bentonite, and 1 % calcium phosphate showed optimal crack-free performance. It is believed that BFS concrete will contribute to compensating for shrinkage through continuous expansion activity and can be used for field applications.

키워드 : 고로슬래그미분말, 팽창재, 팽윤제, 건조수축, 균열

Keywords : Blast-furnace slag, Expansive admixture, Swelling admixture, Drying shrinkage, Cracks

1. 서론

콘크리트 재료의 고성능화, 자원의 재활용, 환경부하 및 탄소 배출량 저감 등의 관점에서 산업부산물로부터 발생하는 고로슬래그를 활용한 콘크리트에 대한 수많은 연구가 진행되고 있으나, 고로슬래그의 특성에 대한 충분한 검토와 연구가 없이 사용된다면 오히려 콘크리트의 품질저하를 발생시켜 강도, 내구성, 균열발생 등을 초래할 수 있다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 소오의 슬럼프 및 공기량을 얻기 위한 단위수량 저감, 유동성 및 재료분리 저항성에 대한 성능뿐만 아니라 분말도 및 혼합률에 따른 콘크리트의 수화 발열량 감소, 수밀성 증대, 장기 강도 향상, 알칼리골재 반응 억제, 염해 및 동결융해 저항성, 화학적 부식 저항성 등 다양한 품질성능이 개선되는 것으로 보고된바 있다(Yang et al. 2017).

반면, 조기강도 발현저하, 자기수축 및 초기 건조수축 증대, 중성화 촉진 등이 문제점으로 대두된다. 건조수축에 의한 균열은 타설 후 콘크리트 내부의 수분 증발량이 블리딩 양보다 많으면 콘크리트 표면이 건조되어 인장응력 작용으로 인장강도를 초과하여 발생된다(Ko et al. 2016). 재령일 경과에 따라 콘크리트 내부 수분 증발로 체적은 감소되며, 수축량은 0.5~0.8 mm로 연구된 바 있다(Lee et al. 2016).

또한, 콘크리트 온도변화에 따라 시멘트 수화 반응에 의한 온도 상승 및 강하, 온도 상승 시 팽창, 온도 강하 시 수축, 내부구속 및 외부구속에 의해 균열이 발생되며, 온도가 1 °C씩 증가에 따라 10×10^{-6} 팽창되며, 1 °C씩 감소에 따라 수축된다고 보고된바 있다(Yoon 2016).

이러한 콘크리트의 수축에 대한 균열 저감은 단위 수량과 시멘트 양을 낮게 하거나 팽창재를 사용하는 것이 효과적이라고 보고

* Corresponding author E-mail: wonyoungchoi@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 건축연구본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 건설시험인증본부 전임연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 건설시험인증본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

되고 있다(Park 2009). 고로슬래그의 혼합율 증가에 따른 조기강도 저하 문제는 거푸집 존치기간의 증가로 인한 현장적용의 문제점과 콘크리트의 내구성 향상이라는 양면성을 가지고 있다. 현행 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 한국산업표준(KS F 2563)에서 고로슬래그 미분말을 시멘트의 70 %(고로슬래그 시멘트 3종)까지 혼합하여 제조하는 것이 가능하도록 명시되어 있으며, 혼합시멘트 중 고로 슬래그 미분말 사용량을 40 %이하로 사용을 권고하고 있다(KS F 2563 2020).

또한, 레미콘 업계에서 일반적으로 사용하고 있는 고로슬래그 미분말의 함량은 10~20 %이며, 기술적인 한계에 부딪혀 있는 실정이다(Yoon et al, 2022). 이러한 조기강도를 개선시키는 방법으로서 고로슬래그의 분말도를 6,000 cm²/g 이상으로 증가시키거나 알칼리 자극제를 사용하는 방법 등이 제시되고 있으나, 콘크리트 제조시 원가상승 요인으로 작용하여 고로슬래그의 사용확대를 감소시킬 수 있다.

따라서, 팽창재 및 팽윤제를 혼입한 고로슬래그 콘크리트의 강도, 길이변화 등의 검토와 콘크리트용 혼화 재료로서 고로슬래그 사용 확대를 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 기본 성능 실험

2.1 실험계획 및 방법

기존의 팽윤재 및 팽윤제를 사용한 콘크리트의 내구 특성에 대해 이루어진 연구에서는 24, 30, 50 MPa 콘크리트 강도를 대상으로 동결융해 및 탄산화 저항성을 실험하였고, 그 결과 30 MPa 강도에서 내구성이 가장 좋았으며, 고성능 팽창재를 5 %이상 사용할 경우, 과다 팽창으로 인해 균열이 발생하는 것으로 나타났다(Yoon et al, 2022).

이에 본 연구에서는 30 MPa 콘크리트만을 대상으로 하여, 고로슬래그 미분말 치환율 30 %, 팽창재(CSA)는 5 % 첨가하였으며, 팽윤제로는 벤토나이트 1 %(E1)와 HPMC 1 %(E2)로 배합설계에 따라 첨가하고, 유기염계 경화 촉진제는 리튬카보네이트를 0.2 %로 하였다.

또한, 석출물의 경도에 대한 분석을 위하여 자기 치유 인산칼슘을 1 %(I1), 3 %(I3)로 혼입하여 비교하였다. 골재에 대해서는 잔골재 및 굵은골재를 잔골재율과 단위 시멘트 양을 기준으로 환산한 양을 적용하였으며, 현장 실험 단계에서 단위수량 및 유동화제 양을 조절하였다.

전체적인 실험 계획 및 인자는 Table 1과 같으며 콘크리트 배합설계는 Table 2와 같이 계획하였다.

Table 1. Experiment design and factors

Division	Materials and factor	Factor	Type of experiment
Design strength	-	30 MPa	<ul style="list-style-type: none"> • Air content • slump • Compressive strength • Lengthchange • Crack degree
Binder	BFS : OPC	30 : 70	
Expandable material	Calcium sulfo-aluminate (CSA) expansive admixture	5 %	
Swelling material	Na ⁺ -type bentonite swelling admixture	1 %	
Hardening accelerator	Lithium carbonate (Li ₂ CO ₃) hardener	0.2 %	
Selfhealing agent	Self-healing calcium phosphate	1 %, 3 %	

Table 2. Mix proportions

Symbol	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	Material quantity per unit volume (kg/m ³)									Retarder (%)	AE agent (%)	SP agent (%)
				BFS	OPC	CSA	E1	E2	H	I	G	S			
30-OPC	40	48.6	160	120	280	0	0	0	0	0	890	840	0.2	0.009	0.8
30-E1-I1	40	48.6	160	120	260	20	4.0	0	0.8	4.0	890	840	0.2	0.009	0.8
30-E1-I3	40	48.6	160	120	260	20	4.0	0	0.8	12.0	890	840	0.2	0.009	0.8
30-E2-I1	40	48.6	160	120	260	20	0	4.0	0.8	4.0	890	840	0.2	0.009	0.8
30-E2-I3	40	48.6	160	120	260	20	0	4.0	0.8	12.0	890	840	0.2	0.009	0.8

BFS: Blast-furnace slag

OPC: Ordinary Portland cement

CSA: Calcium sulfo-aluminate (CSA) expansive admixture

E1: Na⁺-type bentonite swelling admixture

E2: Hydroxypropyl methyl cellulose swelling admixture

H: Lithium carbonate (Li₂CO₃) hardener

I: Self-healing calcium phosphate

2.2 사용 재료

사용재료에 대한 상세한 내용은 Table 4~8에 나타났다.

시멘트는 분말도 3,483 cm²/g의 OPC를 사용하였다. 시멘트 이외에 공극 구조의 수밀화를 위하여 분말도 4,650 cm²/g의 고로슬래그미분말을 사용하였다. 특히 강열감량이 0.9 %로 구성 성분 이외에 이물질의 함량이 거의 없는 고품질의 재료를 사용하였다.

팽창재는 CSA계 중국산 보오코사이트를 사용하여 한국의 I사에서 합성한 것으로서 분말도는 3,811 cm²/g, 밀도 2.89 g/cm³로 시멘트보다는 약간 낮고 고로슬래그미분말과 유사한 중량을 가진 것이다.

팽윤제로는 분말 형태의 주성분 Na⁺계 벤토나이트와 섬유계 하이드록시 프로필 메틸셀룰로스(HPMC)를 사용하였다.

잔골재는 충북 청원군 옥산산 강모래를, 굵은골재는 옥산산 25 mm 부순 굵은 골재를 사용하였다.

화학 혼화제로는 “KS F 2560 콘크리트용 화학 혼화제”에 적합한 나프탈렌계 고성능 감수제를, AE제는 알코올계를, 인산칼슘은 tetracalcium phosphate를 사용하였다.

Table 3. Chemical properties of cement

Division	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Content (%)	62.2	20.3	6.0	3.39	3.2	2.4	0.78	0.14

Table 4. Properties of BFS

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Basicity	Chemical composition (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ig. loss
2.931	4,650	1.9	31.2	14.1	0.3	44.8	6.2	2.5	0.9

Table 5. Properties of CSA-based expansive admixture

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Chemical composition (%)						
		ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.89	3,811	0.1	3.7	9.0	1.5	55.7	1.6	28.4

Table 6. Properties of swelling material

Category	Main component	Form	Color	Viscosity
Bentonite	Na ⁺	Powder	Yellow	1,000 cps
HPMC	Cellulose	Powder	White	1,500 cps

Table 7. Characteristics for aggregates

Category	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Water absorption (%)	Mass per unit volume (kg/m ³)	0.08 mm sieve passing amount (%)
Fine aggregate	2.51	2.90	0.46	1,490	0.30
Coarse aggregate	2.63	7.04	0.58	1,532	0.40

Table 8. Properties of admixtures

Category	Main component	Form	Color	Density (g/cm ³)
Hardener	Lithium carbonate	Powder	White	-
Self-healing calcium phosphate	Cl (calcium phosphate)	Powder	White	-
Retarder	Fluorine-based	Powder	Yellow	-
High-performance water-reducing agent	Naphthalene	Liquid	Light brown	1.21
AE agent	High-quality alcohol	Liquid	Pale yellow	1.01

2.3 실험 결과

2.3.1 슬럼프 및 공기량

경화 전 콘크리트의 슬럼프와 공기량은 Fig. 1, 2와 같다. 시험체 별로 0, 30, 60분의 경시변화에 따른 슬럼프 값은 30-OPC에서 190, 175, 165 mm 순으로 나타났으며, 30-E1-I1은 190, 185, 170 mm, 30-E1-I3은 180, 175, 160 mm, 30-E2-I1은 180, 170, 150 mm, 30-E2-I3은 175, 170, 145 mm 순으로 나타났다. 30-OPC, 30-E1-I1, 30-E1-I3 세 종류의 배합은 “KS F 4009 레디믹스트 콘크리트” 기준인 목표 슬럼프 180 ± 25 mm를 만족하는 결과를 나타내어 유동성이 확보되었으나 30-E2-I1과 30-E2-I3 배합의 슬럼프는 다른 배합에 비하여 낮고 기준치를 만족하지 못함으로써 유동성을 확보하지 못한 것으로 판단된다.

한편, 0~30분에 비하여 30~60분으로 진행되면서 30-OPC 대비 다른 배합의 슬럼프 값이 보다 빠르게 감소하였다. 이는 팽창재 및 팽윤제를 사용한 콘크리트의 경우, 경시변화를 가속화하는 특성에 기인한 것으로 판단되며, 보습성이 강한 팽윤제의 경우, 물의 흡수가 급격하게 진행되어 굳지 않은 상태에서의 워커빌리티에 문제가 발생할 수 있는데 이를 해결하기 위하여 부분적으로 지연제를 사용하고 팽윤제 사용을 제한해야 될 것이다(Song et al. 2013). 또한, 팽창재 및 팽윤제의 함량이 높아지는 고강도 콘크리트 배합에서 경시 변화가 급격하게 하락하는 특성을 나타내기

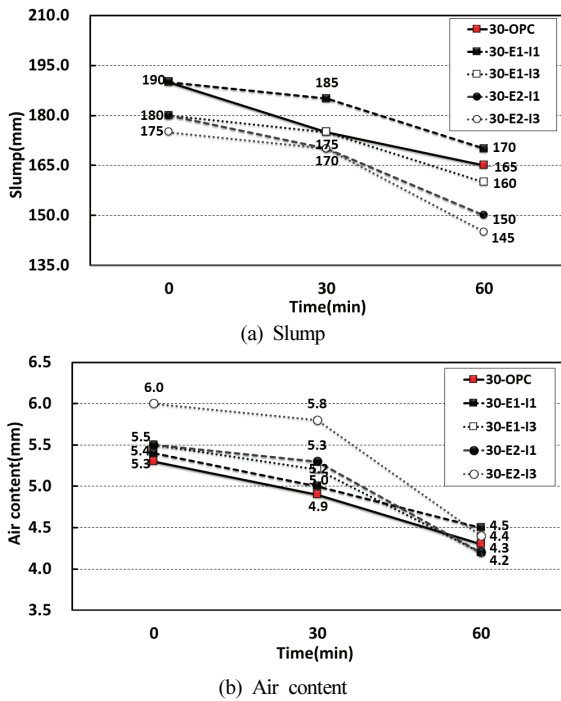
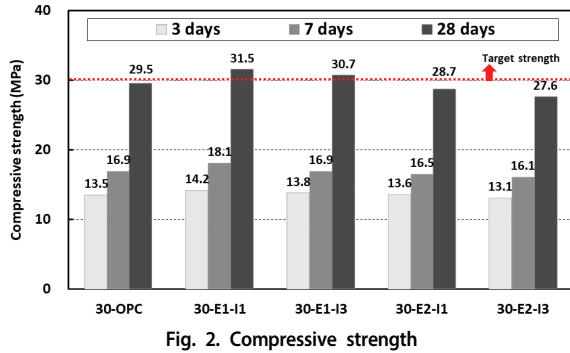


Fig. 1. Slump & air content



때문에 유동화제와 지연제를 사용하여 워커빌리티를 확보하는 것이 바람직할 것으로 판단된다(Han 2007).

공기량은 기준 4.5 ± 1.5 %를 모두 만족하였다. 30-OPC는 5.3, 4.9, 4.3 %, 30-E1-I1은 5.4, 5.0, 4.5 %, 30-E1-I3는 5.5, 5.2, 4.2 %, 30-E2-I1은 5.5, 5.3, 4.2 %, 30-E2-I3는 6.0, 5.8, 4.4 % 순으로 나타났다. 다만, 팽윤제 사용 증가 및 E2 사용에 따른 공기량 저감으로 추후 단위수량 및 공기연행제량 관리가 필요할 것으로 판단된다(Han et al. 2003).

2.3.2 압축강도

재령 3일, 7일, 28일 압축강도 시험 결과는 Fig. 3과 같다. 초기 강도 재령 3일에서 13.1~14.2 MPa, 재령 7일에서 16.1~18.1 MPa

로 30-OPC에 비해 초기강도에 영향이 없는 것으로 확인하였다. 재령 28일에는 27.6~31.5 MPa로 전체적으로 장기 재령이 경과할 수록 증진하는 경향을 나타냈다. 재령 28일에서 30-E1-I1과 30-E1-I3 즉, 벤토나이트계 팽윤제를 사용한 콘크리트의 강도 발현이 100 % 이상으로 나타나 OPC 및 HPMC계 팽윤제를 혼입한 콘크리트에 비하여 강도 발현에 유리한 것으로 확인되었다. 기존에 따르면 공기량이 1~9 %로 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도는 0~13 %까지 감소하는 것으로 확인된다(Shin et al. 2019). 이에 귀결된 결과로 공기량이 높게 나타난 HPMC계 팽윤제를 혼입한 콘크리트에 비하여 비교적 공기량이 적은 벤토나이트계 팽윤제를 사용한 콘크리트의 압축강도가 높은 것으로 사료된다.

이에 따라, 30-OPC, 30-E1-I1, 30-E1-I3 세 가지 배합 즉, 일반 시멘트 사용 콘크리트와 고로슬래그미분말, 팽창재, 벤토나이트계 팽윤제를 사용한 콘크리트 대상으로 현장 적용 시험을 통한 실질적 검증이 필요할 것으로 판단하였다.

3. Mock-up 실험

3.1 실험계획 및 방법

위의 기본 성능 실험을 통하여 도출된 결과를 바탕으로 본 장에서는 팽창재 및 팽윤제를 투입한 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 특성 분석을 Mock-up Test를 통하여 건조수축을 정량적으로 고찰하고자 하였다.

콘크리트 강도는 다양하게 접근할 수 있지만 본 연구에서는 선행된 성능 실험 결과를 바탕으로 보통 강도 콘크리트 적용 범위인 30 MPa 콘크리트를 대상으로 Mock-up 실험을 실시하였다. 팽윤제 1 %를 사용한 E1 배합을 기준으로 하고 균열 구속은 구속 거푸집으로 선정하여 3 m(가로) × 3 m(세로) × 0.15 m(높이)로 제작하였고 30-OPC, 30-E1-I1, 30-E1-I3의 배합 조건별로 레미콘을 적용하여 타설하였다.

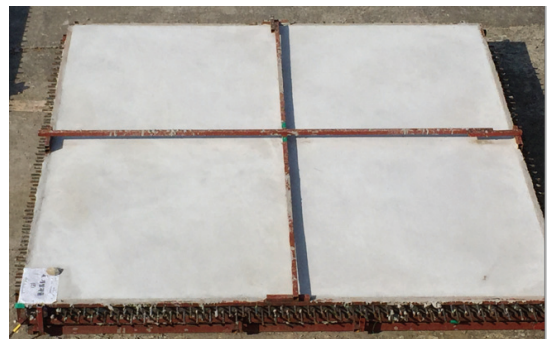


Fig. 3. Mock-up specimen

굳지 않은 콘크리트 유동특성 평가를 위해 레미콘에서 배출된 콘크리트를 받아 슬럼프와 공기량 실험을 실시하였다.

KS F 2403에 따라 압축강도 공시체를 제작하였으며, 현장 도착 후 표준 수증양생 방법으로 양생 하였으며, 재령 3, 7, 28일에 KS F 2405에 따라 압축강도를 평가하였고, 3개의 공시체에 대한 평균 값을 시험 결과로 채택하였다. W/B가 낮고 단위 결합재 양이 많은 콘크리트는 자기 수축이 증가되므로 자기 수축 균열이 발생하는 특성을 조사하기 위해 길이 변화를 분석하고자 하였다(Park et al, 2009; Ha et al, 2010).

시험체의 바닥에서부터 60 mm의 중심부에 바닥과 수평으로 길이 변화 센서인 매립형 게이지를 설치하고 데이터 로거를 이용하여 매시간 측정하였다. 고로슬래그미분말 및 팽창재, 팽윤제를 혼합한 콘크리트의 균열 모니터링은 재령 50일 후 균열 개소, 균열 폭, 균열 길이 등을 검토하였으며, 콘크리트 구조물의 균열 하자 판정 기준의 허용 균열 폭과 비교하였다.

Table 9. Experiment design of mock-up

Division	Materials and factor	Specimen size
30-OPC	Expansive admixture 0 % Swelling admixture 0 % Hardener 0 % Selfheating accelerator 0 %	W : 3 m L : 3 m H : 0.15 m
30-E1-I1	Expansive admixture 5 % Swelling admixture 1 % Hardener 1 % Selfheating accelerator 1 %	
30-E1-I3	Expansive admixture 5 % Swelling admixture 1 % Hardener 1 % Selfheating accelerator 3 %	

3.2 실험결과

3.2.1 슬럼프 및 공기량

슬럼프 결과는 30-OPC에서 185, 170, 160 mm로 나타났으며, 30-E1-I1은 180, 175, 165 mm, 30-E1-I3은 175, 170, 155 mm로 나타났다. 경시변화 60분 후 슬럼프는 30-E1-I1, 30-OPC, 30-E1-I3 순으로 감소하는 경향으로 나타났으나 “KS F 4009 레디믹스트 콘크리트” 기준인 목표 슬럼프 180 ± 25 mm를 만족하는 결과를 나타내어 콘크리트 유동성에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

공기량 결과는 모두 기준치를 만족하는 값으로 30-OPC는 4.4~5.4 %로 나타났으며, 30-E1-I1은 4.6~5.5 %, 30-E1-I3은 4.1~6.4 %로 나타났다. 초기 0분 대비 경시변화 30분, 60분의 경

우, 30-OPC 일 때 0.3~1.0 %, 30-E1-I1일 때 0.5~0.9 %, 30-E1-I3일 때 1.2~2.3 %로 감소하여 앞서 언급한 바와 같이 단위 수량 및 공기연행제량에 대한 관리는 고로슬래그미분말 및 팽창재, 팽윤제를 사용한 콘크리트 적용에 필수 요소일 것으로 판단된다.

3.2.2 압축강도

재령 3일, 7일, 28일 압축 강도는 Fig. 5와 같다. 30-OPC는 12.1~25.3 MPa로 나타났으며, 30-E1-I1은 13.5~30.0 MPa, 30-E1-I3는 13.2~29.4 MPa로 나타났다. 조기강도 재령 3일에는 30-OPC 대비 30-E1-I1은 약 11.6 %, 30-E1-I3는 약 9.1 %로 나타났으며, 재령 7일에는 30-OPC 대비 30-E1-I1은 약 15.6 %, 30-E1-I3는 약 11.7 %로 나타나 30-OPC 보다 조기강도에 영향이 없는 것으로 확인하였다.

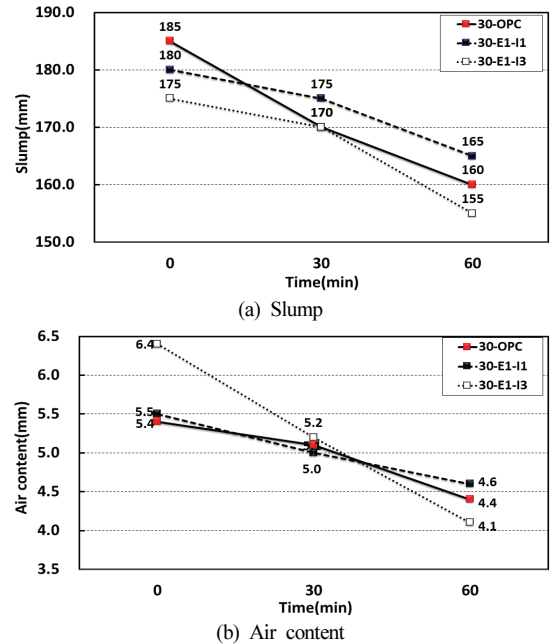


Fig. 4. Slump & air content for mock-up

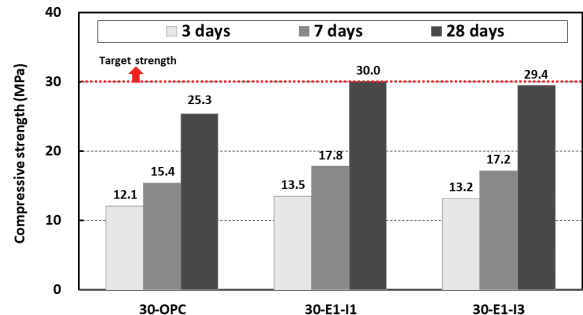


Fig. 5. Compressive strength results for mock-up

재령 28일에는 30-OPC 대비 30-E1-I1은 약 18.6 %, 30-E1-I3는 약 16.2 % 높은 강도를 발현하였고, 30-E1-I3 보다 30-E1-I1 배합이 효과적일 것으로 판단된다. 기존 연구에서는 인산칼슘을 시멘트와 혼합 사용한 경우, 수화반응 생성물로 인회석을 생성하여 강도증진 효과가 있다고 나타났으며, 이와 유사한 결과로 판단된다(Gong et al, 2021).

3.2.3 길이변화

길이변화는 굴곡 형태로 온·습도 변화가 영향을 끼친 것으로 판단된다. 30-OPC는 $-390 \sim -200 (\times 10^{-6})$, 30-E1-I1은 $-90 \sim 110 (\times 10^{-6})$, 30-E1-I3는 $-86 \sim 50 (\times 10^{-6})$ 범위이며, 30-OPC 대비 30-E1-I1는 약 25~50 %, 30-E1-I3은 약 15~25 % 정도 건조수축 저감률을 보여 30-OPC, 30-E1-I3, 30-E1-I1 순으로 길이변화가 적은 것을 확인할 수 있다.

30-OPC의 경우 초기부터 건조수축이 급격하게 발생하여 1일 동안 약 $-147 (\times 10^{-6})$ 수축하였으며, 이후 약 $-390 (\times 10^{-6})$ 까지 지속적으로 건조수축이 발생하여 균열 발생 확률이 높을 것으로 예상되었다. 팽창재를 사용한 30-E1-I1, 30-E1-I3의 경우 초기 팽창 값이 높아지고 이후 수축 값이 비교적 적게 나타났다. 이는 팽창재의 사용이 단순히 초기 팽창만을 부여하는 것이 아니라 지속적으로 내부 팽창 물질의 수화를 통하여 미세조직이 치밀화 되어 수축을 억제하는 효과를 나타낸 것으로 판단된다(Ryu et al, 2012).

일반적으로 콘크리트의 건조수축이나 경화가 일어날 때 발생하는 수화열에 의해 인장응력이 발생하고, 콘크리트의 인장강도를 상회하는 시점에서 균열이 발생하는데, 이러한 관점에 대하여 인장강도를 높이고 균열을 저감 시키는 방법 중 하나가 팽창재를 사용함에 따른 효과이다(Ko et al, 2018).

Fig. 6에서는 인산칼슘이 3 % 혼입된 30-E1-I3에 비해 인산칼슘이 1 % 혼입된 30-E1-I1에서 팽창 효과가 높은 것으로 나타났다.

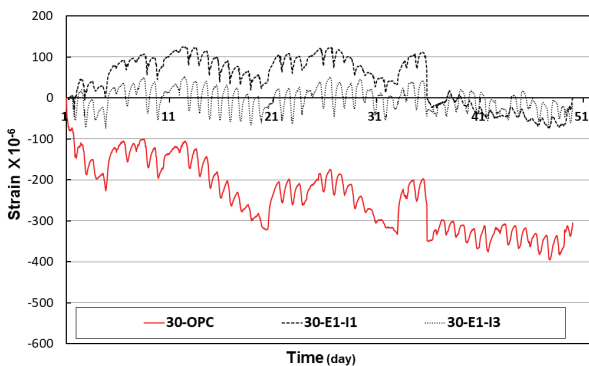


Fig. 6. Mock-up length change results

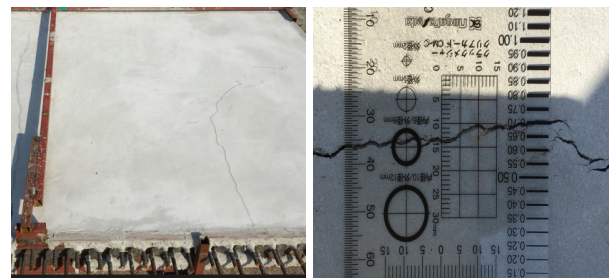
이는 인산칼슘의 혼입량 증가는 팽창재에 의한 에트리팅아이드와 수산화칼슘 생성에 따른 수화반응을 방해하여 팽창 효과를 저하시키는 작용을 한 것으로 사료된다.

Table 10. Crack occurrence results

Division	Number of cracks (EA)	Crack length (m)	Crack width (mm)
30-OPC	6	7.0	0.3~0.7
30-E1-I1	0	0	0
30-E1-I3	2+delusion crack	0.5	0.05~0.15

Table 11. Crack width

Division	Review of concrete crack defect criteria (allowable crack width)	
	0.3 mm or less (acceptable)	0.3 mm or more (unsuitable)
30-OPC	occurrence	occurrence
30-E1-I1	occurrence	non-occurrence
30-E1-I3	occurrence	non-occurrence



(a) 30-OPC



(b) 30-E1-I1



(c) 30-E1-I3

Fig. 7. Occurrence crack measurement

3.2.4 균열 확인

균열에 대한 모니터링 결과는 Table 10, 11과 같다. 또한, Fig. 7과 같이 30-OPC 균열 폭은 0.3~0.7 mm, 균열 길이는 7.0 m, 30-E1-1의 균열 폭은 0.0 mm, 균열 길이는 0.0 m, 30-E1-3의 균열 폭은 0.05~0.15 mm, 균열 길이는 0.5 m로 나타났다. 30-OPC는 콘크리트 타설 후 4시간이 경과한 뒤 균열이 발생하였으며, 30-E1-3의 경우 재령 14일이 지난 후 균열이 발생하였다. 또한, 30-E1-1는 균열이 발생하지 않았으며, 콘크리트 구조물의 균열 하자 판정 기준의 허용균열 폭 0.3 mm에 만족하였다(MOLIT 2021).

4. 결론

팽창재와 팽윤제를 혼입한 고로슬래그미분말 콘크리트의 현장 적용 가능성 확인을 위해 기본 성능 실험으로 최종 배합비를 선정하고, 이후 레미콘을 생산하여 Mock-up 시험체 타설 후 콘크리트의 유동특성, 강도 특성, 길이변화, 모니터링에 대해 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기본 성능 실험에서 벤토나이트계 팽윤제를 사용한 콘크리트가 공기량, 슬럼프, 압축강도를 확보하며 OPC와 유사한 성능 값을 나타냈고, HPMC계 팽윤제를 사용한 콘크리트는 성능을 확보하지 못하여 Mock up 시험에는 벤토나이트계 팽윤제를 사용한 콘크리트를 대상으로 선정하는 것이 유리할 것으로 판단하였다.
2. Mock-up 시험체별 슬럼프 및 공기량 특성은 30-OPC 시험체와 유사하게 나타나 유동성에는 영향이 없을 것으로 판단되며 재령 28일 기준으로 30-OPC 보다 30-E1-1은 18.6 %, 30-E1-3는 16.2 % 높은 강도를 발현하였고, 30-E1-1 배합 조건이 실무상 효과적일 것으로 판단된다.
3. 30-E1-1, 30-E1-3, 30-OPC 순으로 길이변화 폭이 낮게 나타났으며, 30-OPC는 수축균열이 지속적으로 발생하였다. 30-OPC 대비 30-E1-1은 25~50 %, 30-E1-3은 15~25 % 건조수축이 저감 되었다. 인산칼슘의 혼입량 증가가 팽창재에 의한 에트링가이트와 수산화칼슘 생성에 따른 수화반응을 방해하여 팽창효과를 저하시키는 것에 기인한 것으로 적절한 인산칼슘 양 조절이 필요할 것이다.
4. Mock-up 시험체 균열에 대한 모니터링 결과, 30-OPC는 일정 재령이 지난 후 균열이 발생하여 균열 폭은 0.3~0.7 mm, 균열 길이 7.0 m를 나타냈고, 30-E1-1는 균열 미발생,

30-E1-3의 균열 폭은 0.05~0.15 mm, 균열 길이 0.5 m로 나타났다. 이에 균열이 발생하지 않은 30-E1-1 배합이 현장 적용에 가장 유리할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 팽창재 및 팽윤제가 혼입된 고로슬래그미분말 콘크리트는 배합설계에 따라 소정의 물리적 특성을 확보하며 따라 지하주차장 등, 각종 건설공사에서 레미콘 제조용으로 다양하게 사용이 가능할 것으로 기대되며, 안정적 균열 저감, 중장기적 균열 저감, 경제적 균열 저감 등에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2023년도 한국건설기술연구원 평가인증사업의 일환으로 수행된 연구임.(NO. 20230062-001)

References

Gong, D.G., Kim, J.H., Chung, C.W. (2021). Analysis of basic properties for utilizing recycled cement containing calcium phosphate as a solidifying material for radioactive waste disposal, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **33(1)**, 405-406 [in Korean].

Ha, J.S., Lee, S.C., Kim, S.D., Kim, W.J., Lim, N.K., Jung, S.J. (2010). A study on the shrinkage characteristics of 150 MPa class ultra-high strength concrete according to the incorporation of expansion materials and self-shrinkage reducing agents, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **30(1)**, 257-258 [in Korean].

Han, C.G., Kim, S.W., Koh, K.T., Pei, Z.L. (2003). Properties on the shrinkage of high performance concrete using expansive additive and shrinkage reducing agent, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **15(6)**, 785-793 [in Korean].

Han, M.C. (2007). Estimation of the autogenous shrinkage of the high performance concrete containing expansive additive and shrinkage reducing agent, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **7(3)**, 123-130 [in Korean].

- Ko, J.W., Kim, Y.J., Min, K.S. (2016). The multi-functional crack reducing concrete technology for control of shrinkage cracks in concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **28(6)**, 37-41.
- Ko, J.W., Lee, E.B., Min, K.S. (2018). Development and application of smart crack reducing concrete, Magazine of Recycled Construction Resources Institute, **13(2)**, 49-55 [in Korean].
- KS F 2563. (2020). Ground Granulated Blast - Furnace Slag for Use in Concrete, Korean Standards and Certifications, Korea [in Korean].
- Lee, D.G., Han, H.S., Jung, Y.W. (2016). Chemical admixture technology for reducing shrinkage of concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **28(6)**, 31-36 [in Korean].
- MOLIT. (2021). Investigation of Defects in Apartment Complexes, Calculation of Repair Costs and Criteria for Determining Defects, **7(1)** [in Korean].
- Park, H., Kim, H.Y., Jung, S.J. (2009). A study on the autogenous shrinkage control of ultra-high-strength concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea, **25(12)**, 129-136 [in Korean].
- Park, S.G. (2009). A study on the expansion model of cement paste used ettringite-gypsum type expansive additive, Journal of the Architectural Institute of Korea, **25(7)**, 87-94.
- Ryu, D.W., Kim, W.J., Yang, W.H., Park, D.C. (2012). An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **12(4)**, 393-400 [in Korean].
- Shin, J.H., Choi, H.G., Hong, J.H., Baek, H.S., Seo, K.H., Park, M.Y. (2019). A study on basic properties of concrete using carbon nanomaterials, Journal of the Korea Concrete Institute, **31(2)**, 561-562 [in Korean].
- Song, T.H., Yoon, S.H., Park, J.S., Lee, S.H. (2013). Development of Long-Life Concrete for Structures on Artificial Ground, Korea Institute of Civil Engineering and Technology [in Korean].
- Yang, C.J. (2017). Mechanical Properties and Applicability of Concrete Depending on Substitution of Blast Furnace Slag, Ph.D Thesis, Chosun University, Korea [in Korean].
- Yoon, S.H. (2016). Shrinkage and Crack Reduction Characteristics of Blast-Furnace Slag Concrete mixed with Expansive and Swelling Agents, Ph.D Thesis, Dankook University, Korea [in Korean].
- Yoon, S.H., Choi, W.Y., Jeon, C.S. (2022). Hydration properties of mixed cement containing ground-granulated blast-furnace slag and expansive admixture, Journal of Material Cycles and Waste Management, **24(5)**, 1878-1892.

팽창재와 팽윤제가 혼입된 고로슬래그 콘크리트 Mock-up의 균열 저감 성능평가

본 연구는 팽창성 및 팽윤성 혼화제를 혼입한 고로슬래그 콘크리트의 균열 저감 성능 평가를 목적으로 한다. 기본 성능 실험으로 고로슬래그미분말(BFS), 칼슘설포알루미네이트(CSA), 벤토나이트, 하이드록시프로필 메틸셀룰로오스(HPMC) 등 다양한 혼입물을 사용하여 수행한 결과 벤토나이트가 HPMC에 비해 우수한 성능을 나타내었다. 이후, 혼입률에 따른 균열 및 건조수축 평가를 위해 MOCK-UP 테스트를 실시하였다. 그 결과, 벤토나이트와 소량의 인산칼슘을 첨가하였을 때 건조수축이 감소되어 균열이 저감 되었다. 특히, 30 %의 BFS, 1 %의 벤토나이트, 1 %의 인산칼슘으로 구성된 시멘트 혼합물이 균열이 없는 최적의 성능을 보였다. BFS 콘크리트가 지속적인 팽창 활동에 의하여 수축을 보상하는데 기여할 것으로 판단되며 현장 적용에 사용될 수 있을 것이다.