

다량의 혼화재를 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성

Mechanical Properties of High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixture

백철우^{1*} · 박조범¹ · 최성우¹ · 조현태¹ · 류득현¹

Chul-Woo Baek^{1*} · Cho-Bum Park¹ · Sung-Woo Choi¹ · Hyun-Tae Jo¹ · Deuk-Hyun Ryu¹

(Received July 21, 2014 / Revised September 25, 2014 / Accepted September 25, 2014)

The purpose of this study is to evaluate on the mechanical properties of High Volume Mineral Admixture(HVMA) high strength concrete to reduce the amount use of Ordinary Potland Cement, to discover the optimized HVMA binder and to test HVMA concrete based on the change of W/B and curing temperature.

The results were shown as follows: The HVMA binder using the mixture of combined heat power plant fly ash and anhydrous gypsum known as inorganic activators with the mixture of blast furnace slag and fly ash was optimized. The mixture of HVMA high strength concrete at 26% of W/B ratio had a good result on flow characteristic and mechanical properties. High strength HVMA concrete over 50MPa is possibly manufactured over curing temperature 20°C.

키워드 : 다량의 혼화재, 무기계 자극제, 탄성계수

Keywords : High Volume Mineral Admixture, Inorganic activator, Modulus of elasticity

1. 서론

최근 정부는 저탄소 녹색성장 기본법 시행에 따라 2020년까지 온실가스 배출량을 BAU(Business As Usual: 온실가스 배출전망치) 대비 30% 감축 목표를 설정하였다. 우리나라의 연간 시멘트산업에서 발생하는 CO₂ 배출량은 2008년도에 46.8백만톤으로 국가 전체 배출량의 10%를 차지하며, 시멘트 1톤 생산시 약 0.8톤의 이산화탄소가 발생하고 있다. 그 원인은 시멘트 제조시 1450°C 이상 고온의 소성공정에서 화석연료의 연소에 의한 다량의 CO₂가 배출되기 때문이다(Cho, 2011).

특히 건설공사에서 중요한 재료인 콘크리트는 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 다량 사용함으로써, 이러한 저탄소 녹색성장의 정부정책에 부합하고 CO₂ 저감 목표 달성에 적극적으로 기여할 수 있다.

이러한 측면에서 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 등의 광물질 혼화재에 알칼리 자극제로 활성화 시키는 비소성 시멘트 기술

로 지오폐리머, 알칼리 활성화 슬래그 등이 있으며, 포틀랜드 시멘트를 대체할 수 있는 기술로서 연구가 활발히 진행 중에 있다(Soh et al., 2001; Mun et al., 2006). 하지만 국내의 경우 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 활성화제로서 고가의 알칼리 자극제를 이용한 연구에 편중되어있고, 실험적 연구수준에 머무르고 있어 실용화에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한 기존 연구에 따르면 상온양생에서는 비교적 낮은 강도를 발현하며, 알칼리 자극제의 강알칼리성에 기인한 급결현상으로 작업성 저하의 문제점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Kwon et al., 2013).

이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 활성화제로 무기계 자극제를 첨가하여 최적화된 다량의 혼화재(High Volume Mineral Admixture)를 사용한 콘크리트용 결합재를 도출하고자 하였다. 또한 50MPa 고강도 콘크리트 적용을 위한 W/B에 따른 콘크리트 특성을 평가하였으며, 양생 온도에 따른 압축강도, 탄성계수 등의 역학적 특성을 OPC와 3성분계 배합과 비교·평가하고자 하였다.

* Corresponding author E-mail: cheolwoo@eugenes.co.kr

¹유진기업(주) 기술연구소 (R&D Center, Eugene Corporation, Kyonggi-do, 412-480, Korea)

2. 실험개요

2.1 실험계획 및 방법

본 연구의 실험계획을 Table 1에 나타내었다. HVMA 결합재 도출을 위한 모르타르 압축강도 평가와 W/B 및 양생온도에 따른 HVMA 고강도 콘크리트의 역학적 특성(압축강도, 탄성계수)을 평가하였으며, 결합재 조건에 따른 건조수축 특성을 평가하였다.

Table 1. Experimental program

Series	Item	Evaluation contents	
Mortar	Binder	OPC, BFS, FA	
	Inorganic activator	QL, HA, AG	
	Mixture factor	1. QL, HA, AG 2. QL+AG, HA+AG	
Conc.	W/B(%)	24, 26, 28, 30	
	Curing temp (°C)	10, 20, 30	
	Binder factor	OPC, PL, HVMA	
	Test method	Fresh	Slump flow(KS F 2594) Air content(KS F 2421)
		Hardened	Compressive strength(KS F 2505) Modulus of elasticity(KS F 2438) Shrinkage strain(KS F 2424)/20°C

Table 2. Mix proportions of HVMA binder (Mortar)

Mix design	Mix proportions of Binder(%)					
	OPC	GGBFS	FA	Inorganic activator		
				QL	HA	AG
PL	10	70	20	-	-	-
Q5		65		5	-	-
Q10		60		10	-	-
H5		65		-	5	-
H10		60		-	10	-
A5		65		-	-	5
A10		60		-	-	10
Q5A5		60		5	-	5
H5A5		60		-	5	5

Table 3. The Mix Proportions of HVMA C

W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				
		W	Binder	S	G	AD
30	47.2	155	516	768	865	3.61
28	46.0		554	732	865	4.71
26	44.7		596	693	864	5.66
24	42.9		646	645	865	6.78

최적 HVMA 결합재 도출을 위한 결합재 배합비를 Table 2에 나타내었다. OPC 10%, BFS 70%, FA 20% 만을 사용한배합(Plain; PL)을 기준으로 무기계 자극제인 QL, HA, AG를 5, 10%씩 단독사용과 QL과 AG, HA와 AG를 각각 5% 적용한 혼합 조건의 모르타르 압축강도 특성을 비교 평가하여 최적 결합재를 선정하고자 하였다.

HVMA 고강도 콘크리트 배합은 Table 3에 나타내었다. 목표강도 50MPa의 콘크리트 배합을 도출하기 위해 W/B 범위를 24~30%에서 2%씩 변동시킨 배합의 콘크리트 성능을 평가한 후 최적배합을 선정하였으며, 양생온도를 10, 20, 30°C의 3가지 수준으로 설정하여 결합재 조건(OPC, PL, HVMA)에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였다.

초기 유동성 확보를 위하여 목표 슬럼프 플로는 600±100mm, 목표 공기량은 3.5±1.5%를 설정하였고 이를 확보하기 위해 고성능 감수제를 사용하였다.

실험방법은 HVMA 결합재 조건을 적용하여 KS L ISO 679 에 따라 모르타르 압축강도 시편을 제작한 후 온도 20±1°C, 상대습도 90±5% 조건의 항온항습기에 2일 양생 후 탈형 및 수중양생을 실시하였으며, 재령 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다. 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 KS F 2505, 2438에 따라서 측정하였으며, 콘크리트의 압축변형은 컴프레소미터와 데이터로거를 사용하여 산출된 값을 사용하였다.

콘크리트 건조수축은 KS F 2424에 따라 100×100×400mm 크기의 몰드를 사용하였고, 매립형 게이지를 불균등 건조수축을 방지하기 위해 시편의 중앙에 고정시킨 후 시편을 제작하였고, 제작 직후부터 56일까지 측정하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 결합재의 물리·화학적 특성을 Table 4에 나타내었다. 시멘트는 H사의 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement: OPC), B사에서 생산하는 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag ; GGBFS) 3종 및 S 화력발전소에서 발생하는 플라이애시(Fly Ash; FA) 2종을 사용하였다. 혼화재의 초기 수화반응 촉진을 위한 무기계 자극제로 국내 B사의 생석회(Quick Lime: QL), 태국산 천연무수석고(Anhydrous Gypsum; AG) 및 Y 열병합발전소에서 발생하는 열병합애시(combined Heat power plant fly Ash; HA)를 사용하였다. AG의 경우 고로슬래그 미분말과의 반응으로 에트리자이트를 생성하여 초기강도를 보완시키며, QL의 경우 공업용으로 CaO 함량이 90% 이상이며, HA의 경우 일반 플라이애시와 달리 CaO와 SO₃ 함량이 높은 것이 특징

Table 4. Physical and Chemical Properties of Cementitious Materials

Types	Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I (%)	Density (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)	45 μ m seive residue (%)
OPC		21.6	5.55	3.83	60.8	2.07	2.35	2.17	3.10	3 342	11.4
GGBFS		34.1	15.4	0.50	41.6	4.16	3.15	0.32	2.90	4 191	3.00
FA		60.0	22.7	5.92	7.10	0.00	0.16	3.74	2.27	3 432	25.6
QL		1.51	1.30	0.50	90.5	0.60	0.65	4.45	3.28	2 566	45.4
HA		27.6	13.0	6.85	35.3	5.98	5.57	4.54	2.82	4 848	29.0
AG		2.95	1.40	0.35	38.8	1.56	50.6	3.85	2.82	3 643	9.30

이 있다. 골재는 바다 모래 및 최대치수 20mm인 부순 자갈을 사용하였으며, 화학혼화제는 폴리카르본산계(Polycarboxylate; PC) 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 HVMA 모르타르 실험결과

HVMA 결합재 조건으로 실험한 재령별 모르타르 압축강도 결과와 PL 대비 강도발현율을 Table 5와 Fig. 1에 나타내었다. QL을 단독 사용한 경우, Q5는 PL 대비 재령 3일 강도는 저하하지만 재령 7일 이후에는 강도 발현이 증가한 것으로 나타났다. 그러나 QL 사용량이 상대적으로 많은 QL10은 오히려 모든 재령에서 PL에 비해 강도가 저하하는 것으로 나타났다. 이는 10% 수준의 낮은 시멘트 사용량에 의해 초기수화가 늦어져 강도발현이 지연되었으나 QL을 사용함으로써 혼화재의 포졸란 반응에 기여하는 Ca이온이 공급되어 재령이 경과함에 따라 혼화재의 반응이 지속적으로 이루어져 강도가 증진되었지만, 적정 사용량 이상 공급된 QL10의 경우에는 오히려 시멘트의 수화 및 포졸란 반응의 촉진 효과가 감소하여 모든 재령에서 PL에 비해 강도가 저하하는 것으로 판단된다.

HA를 단독 사용한 경우, 모든 재령에서 PL에 비해 높은 강도를 발현하고 있으며, 특히 장기재령에 비해 초기 재령에서의 강도 발현효과가 양호한 것으로 나타났다. 이는 HA에서 공급한 CaO와 SO₃의 혼합작용으로 초기강도 증가와 28일 강도 증진효과가 발생하는 것으로 판단된다. HA의 사용량 변화에 따른 특성에 있어서도 사용량이 많을수록 초기 재령에서는 강도 발현 효과는 양호한 것으로 나타났으며, 재령 28일에서는 사용량이 적은 HA5가 HA10보다 강도 발현이 다소 높게 측정되었으나, 그 차이가 0.5MPa로 유사한 강도 발현수준으로 판단된다.

AG를 단독 사용한 경우, A5는 PL 대비 재령 7일까지는 강도가 증가하였으나 재령 28일에는 저하하는 것으로 나타났다. 이는 AG에 의한 SO₃ 공급으로 고로슬래그 미분말의 잠재수경성이 촉진되

Table 5. Compressive strength of HVMA mortar

Mix design	Compressive strength (MPa)			Strength development ratio (%)		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
PL	9.4	15.4	30.2	-	-	-
Q5	8.9	17.7	34.4	94.7	115	114
Q10	5.1	11.6	23.6	54.3	75.3	78.1
H5	9.9	16.3	31.3	105	106	104
H10	10.3	17.2	30.8	110	112	102
A5	16.1	24.1	29.8	171	156	98.7
A10	11.2	19.4	26.7	119	126	88.4
Q5A5	9.1	23.9	38.5	96.8	155	127
H5A5	13.2	27.2	36.0	140	177	119

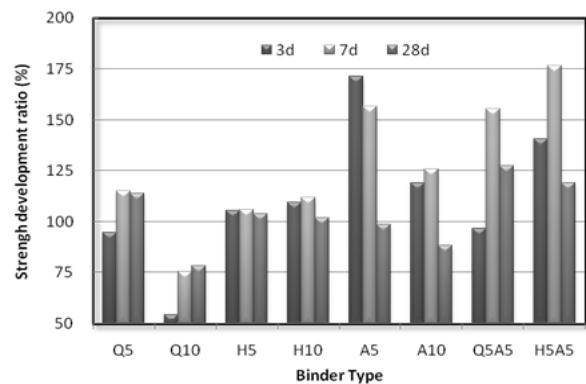


Fig. 1. Strength development ratio of HVMA mortar

어 초기강도발현이 향상되었으나, 장기재령에서의 포졸란반응을 유도하기 위한 Ca이온의 부족으로 C-S-H 겔 생성이 감소하여 재령 28일 강도가 저하한 것으로 판단된다(Soh et al., 2001). 또한 AG 사용량을 증대시킨 A10의 경우에도 재령 7일까지는 PL보다 강도발현이 증가하지만 재령 28일에서는 강도가 저하하는 것으로 나타났으며, 특히 A5에 비해서는 모든 재령에서 강도 발현이 저하하는 것으로 나타났다. 이는 A5에 비해 SO₃의 과다한 공급으로

인해 강도발현의 저하가 발생된 것으로 판단된다.

이상의 단독사용을 검토한 결과 모든 자극제에서 적정량 이상 사용시에는 오히려 강도 발현을 저하시키는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 바탕으로 각각의 자극제를 5%씩 혼합 사용된 경우에 대해 강도 발현 특성을 검토하였다.

QL과 AG를 혼합사용한 Q5A5의 강도발현율은 QL의 높은 CaO 함량으로 재령 28일 강도가 우수하게 나타났으나 초기재령 강도는 다소 지연되는 것으로 나타났다.

HA와 AG를 5%씩 혼합 사용한 H5A5는 장기강도 증진에 효과적인 CaO와 초기강도에 우수한 SO₃가 공급되어 PL 대비 재령 3일에 140%와 재령 7일에 177%로 높은 강도발현율을 나타내었으며, 재령 28일까지 지속적으로 강도가 증진되어 113%로 확보할 수 있었다.

이상의 자극제 사용 방법에 의한 강도 발현 특성을 검토한 결과 초기재령과 장기재령에서 모두 소요의 강도 발현특성이 양호한 H5A5 배합을 HVMA 결합재로 선정하였으며, 선정된 결합재 배합 비를 사용하여 HVMA 고강도 콘크리트의 특성을 검토하였다.

3.2 W/B에 따른 HVMA 고강도 콘크리트 실험결과

3.2.1 굳지 않은 콘크리트

W/B에 따른 콘크리트 슬럼프 플로와 공기량을 Fig. 2에, 고성능

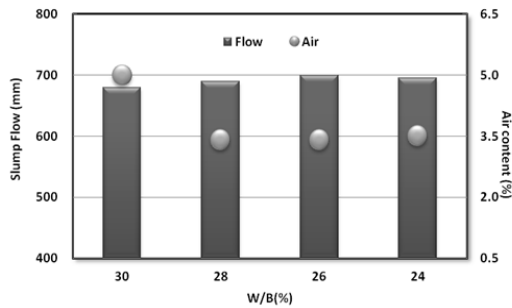


Fig. 2. Slump flow and Air of HVMAC

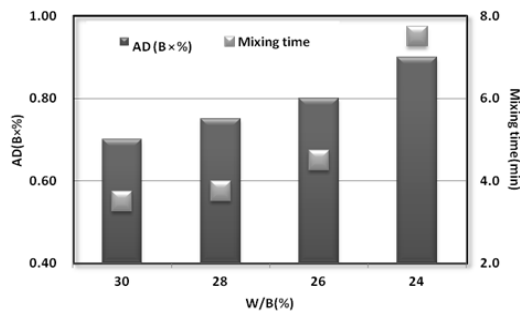


Fig. 3. AD dosage and Mixing time of HVMAC

감수제 사용량과 비빔시간을 Fig. 3에 나타내었다.

슬럼프 플로는 680~700mm, 공기량은 3.4~5.0%로 모두 목표 범위를 확보하였으며, 고성능 감수제 사용량 및 비빔시간은 W/B가 낮아질수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 W/B 24%의 경우, 콘크리트의 요구 성능을 확보할 수 있는 콘크리트 비빔시간이 W/B 26%에 비해 3분 이상 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 실용화를 고려할 경우 생산 효율성의 저하가 예상되어 본 연구 범위에서 검토된 HVMA 고강도 콘크리트의 적용이 곤란하며, 이에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2 압축강도와 탄성계수

W/B에 따른 재령별 압축강도 결과는 Fig. 4에, 목표강도 50MPa 대비 압축강도 발현율을 Fig. 5에 나타내었다.

W/B가 증가할수록 강도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 각 W/B의 재령 28일 압축강도는 각각 59.4, 53.4, 50.0, 45.8MPa로 측정되었다.

W/B에 따른 강도발현율의 특성을 살펴보면, W/B가 증가할수록 재령에 따른 목표 강도발현율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 W/B에 따른 재령별 목표 강도 50MPa의 확보 시기는, W/B 24%는 재령 7일에서, 26 및 28%는 28일에서 확보가 가능했

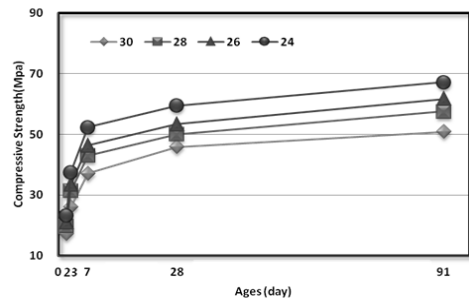


Fig. 4. Compressive strength of HVMAC

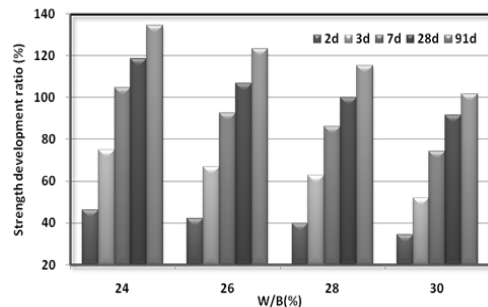


Fig. 5. Strength development ratio compared with 50 MPa

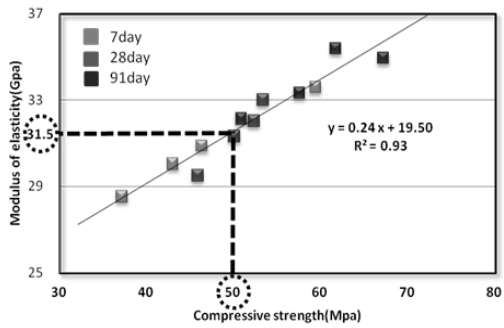


Fig. 6. Modulus of elasticity and compressive strength

으며, W/B 30%의 경우 재령 91일에서 가능한 것으로 나타났다.

이상의 W/B에 따른 강도발현 특성을 검토한 결과, 본 연구 범위에서 검토된 HVMA 결합재를 사용할 경우 50MPa를 확보하기 위한 W/B는 최대 26% 이하로 설계되어야 할 것으로 판단된다.

HVMA 고강도 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 탄성계수는 압축강도와 비례관계인 것으로 나타났다. 상관식은 $y=0.24x+19.50$ 로 신뢰도 93%의 높은 신뢰수준을 보이고 있으며, 목표강도 50MPa 일때 31.5GPa의 탄성계수를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

기존 연구에서 40~80MPa 고강도 콘크리트에서의 탄성계수 범위가 25~40GPa 범위로 알려져 있으며, 본 연구에서 검토한 HVMA 고강도 콘크리트를 사용하여도, 기존의 연구 결과와 유사한 경향을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.(Lee et al, 2013).

따라서, 본 연구의 범위에서 검토된 HVMA 고강도 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 탄성계수를 종합적으로 검토한 결과, HVMA 고강도 콘크리트의 적정 W/B는 26%로 선정하였다.

3.3 양생온도에 따른 콘크리트 실험결과

3.3.1 굳지 않은 콘크리트

양생온도에 따른 HVMA 고강도 콘크리트 강도 발현특성을 평가하기 위해 앞에서 선정된 HVMA 결합재와 비교용으로 OPC 100% 및 무기계 자극제를 사용하지 않은 PL 배합에 대해 콘크리트 실험을 진행하였으며, 콘크리트의 제조 직후 슬럼프 플로와 공기량 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

슬럼프 플로는 670~690mm, 공기량은 2.8~3.5%로 모두 목표 슬럼프 플로와 목표 공기량 범위를 만족시켰으며, 이때 고성능 감수제 사용량은 OPC 1.30%, PL 0.70%, HVMA 0.95% 적용하였다.

3.3.2 압축강도

양생온도별 결합재 종류에 따른 압축강도 측정 결과를 Fig. 8~10에 나타내었다.

양생온도 10°C의 경우, 초기재령에서 OPC는 21.9MPa로 강도가 발현되고 있지만, PL과 HVMA는 1.4~3.7MPa 범위로 강도 발현 수준이 매우 낮게 나타났다. OPC는 재령 7일에서 목표강도를 확보하였으나, PL은 모든 재령에서 목표 강도를 확보하지 못하였으며, 재령 28일 이후에는 거의 강도 증진이 없는 것으로 나타났다. HVMA의 경우 PL 대비 재령 3일 이후에는 강도 증진이 나타났다.

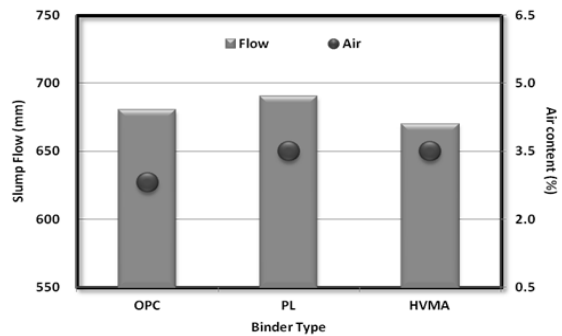


Fig. 7. lump flow and air content of Concrete

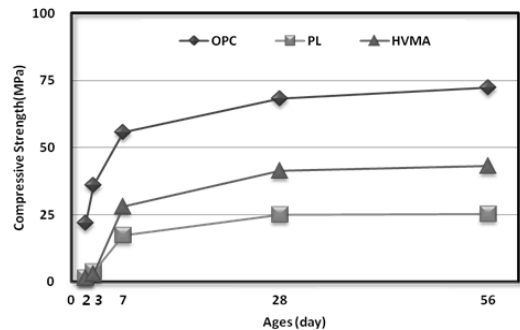


Fig. 8. Compressive Strength of Concrete in 10°C

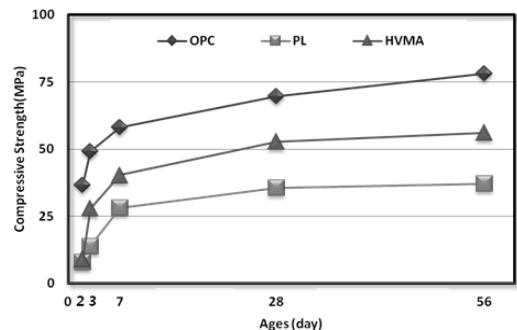


Fig. 9. Compressive Strength of Concrete in 20°C

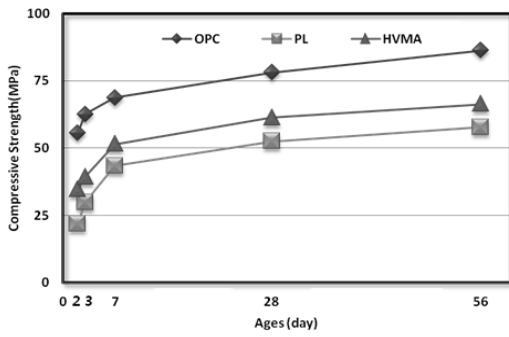


Fig. 10. Compressive Strength of Concrete in 30°C

지만 재령 56일에서 43.2MPa 수준으로 나타나 저온에서의 목표 강도 확보가 곤란한 것으로 나타났다.

양생온도 20°C의 경우, OPC 배합은 10°C에 비해 이른 재령인 재령 3일에서 목표 강도를 확보한 것으로 나타났다. PL은 압축강도가 3일에서 13.8MPa로 10°C 대비 비교적 높은 강도를 나타내고 있으나, 재령 56일에서도 목표 강도를 확보 하지 못하는 것으로 나타났다. HVMA의 경우 재령 2일의 압축강도는 PL과 동등한 수준이지만, 재령 3일 이후 강도증진이 지속적으로 진행되어 재령 28일에서는 목표 강도를 확보하는 것으로 나타났다.

양생온도 30°C의 경우, 높은 양생온도로 인하여 모든 결합재 조건에서 초기재령부터 높은 강도발현 특성을 나타내고 있으며, OPC는 목표 강도를 재령 2일부터 확보 가능한 것으로 나타났다. HVMA의 경우에는 재령 7일에서 목표 강도를 확보하였으며, 특히 PL의 경우에는 10°C 및 20°C에서는 목표 강도를 확보하지 못하였으나, 30°C에서는 재령 28일에서 목표 강도 확보가 가능한 것으로 나타났다.

양생온도에 따른 OPC 대비 PL과 HVMA의 재령별 강도발현율을 Fig. 11에 나타내었다. 양생온도가 증가함에 따라 PL 및 HVMA 배합은 OPC 대비 강도 발현율이 증가하는 경향을 나타내고 있으

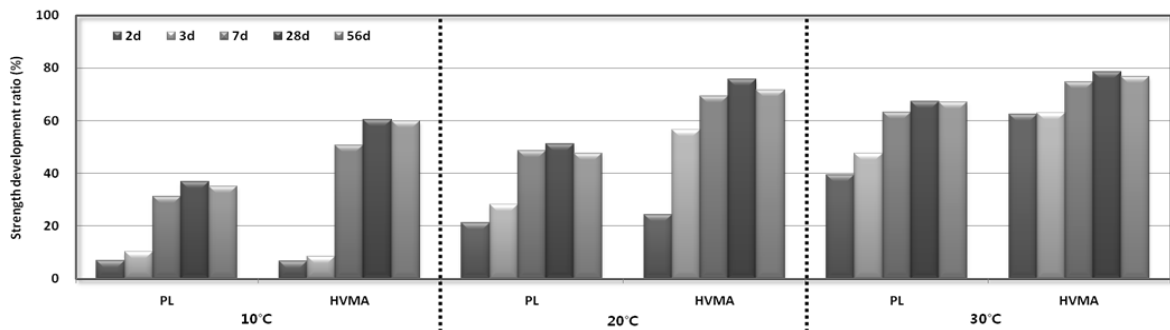


Fig. 11. Strength development ratio compared with OPC

며, 특히 PL 및 HVMA의 초기 재령 강도발현율의 변화 폭은 장기 재령 강도발현율의 변화 폭에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 고로슬래그 미분말의 온도의존성의 영향으로 판단되며, 특히 HVMA의 경우, 무기계 자극제가 고온에서의 활발한 반응으로 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 플라이애시의 포졸란 반응성을 촉진시켜 초기강도가 증진된 것으로 판단된다(Soh et al., 2001).

이상의 양생온도가 HVMA 고강도 콘크리트의 강도 발현성에 미치는 영향을 검토한 결과, HVMA 고강도 콘크리트의 경우 양생 온도가 콘크리트 강도에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났으며, 한중 콘크리트 적용시에는 20°C 이상의 양생온도를 확보할 수 있는 다양한 보양 방법의 확보가 필요한 것으로 나타났다.

3.3.3 탄성계수

양생온도별 결합재 종류에 따른 탄성계수 특성을 Fig. 12~14에 나타내었다.

양생온도 10°C에서 PL의 경우 재령에 따른 탄성계수 증진이 없었으며, 압축강도 결과와 유사하게 OPC, HVMA와의 탄성계수 차이가 크게 발생하였다. 이는 PL의 압축강도가 충분히 확보되지

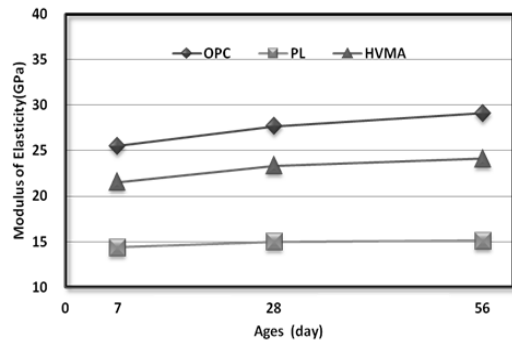


Fig. 12. Modulus of elasticity of Concrete in 10°C

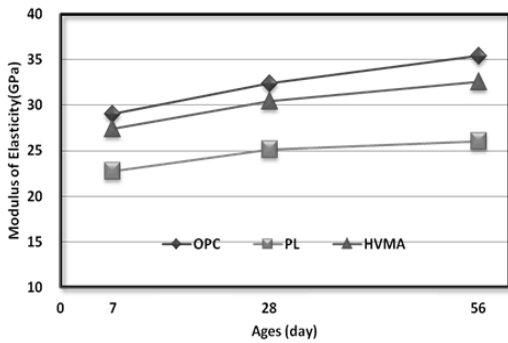


Fig. 13. Modulus of elasticity of Concrete in 20°C

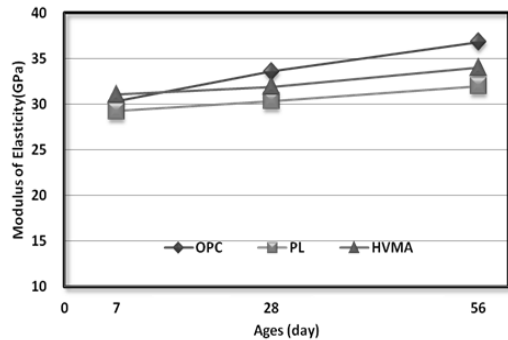


Fig. 14. Modulus of elasticity of Concrete in 30°C

않았기 때문에 낮은 탄성계수를 유지한 것으로 판단된다.

양생온도 20°C에서의 재령 28일에서 OPC와 HVMA의 압축강도 및 탄성계수의 차이는 각각 24%와 9%로 압축강도 대비 탄성계수 차이가 상대적으로 감소하였으며, 이는 모든 재령에서 유사한 경향을 나타내고 있다.

양생온도 30°C에서의 양생온도가 증가하면서 모든 결합재 조건에서 동일하게 탄성계수가 증가하고 있으며, OPC 대비 탄성계수의 저하폭도 감소하는 것으로 나타났다.

모든 양생온도 조건에서 HVMA 고강도 콘크리트가 OPC 콘크리트의 탄성계수에 비해 낮은 값을 나타냈다. 이는 콘크리트의 압축강도의 차이에서 기인한 것으로 판단되며, 이것은 기존 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다(Han et al., 2001).

3.4 건조수축 특성

결합재에 따른 콘크리트 건조수축 특성을 Fig. 15에 나타내었다.

PL의 경우 건조수축 변화율이 -528×10^{-6} 으로 OPC와 HVMA 대비 높은 건조수축을 나타내고 있다. 이는 PL 결합재 조건 중 70%를 차지하는 고로슬래그의 표면이 거칠어 입자 표면에 흡착되는 물의 양이 증가하여 수화에 필요한 물의 양이 감소하고 모세관

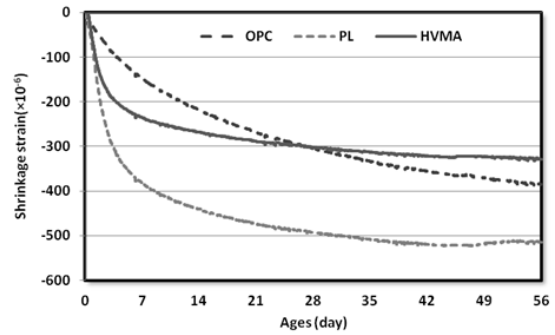


Fig. 15. Shrinkage strain of Concrete

공극내의 부압력이 증가하여 자기수축이 크게 발생한 것으로 판단된다(Lee, K.M, et al., 2004).

반면 HVMA의 경우는 길이변화율이 -332×10^{-6} 로서 OPC의 -404×10^{-6} 값보다 저감된 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 무기계 자극제 첨가로 팽창압을 발현하는 수화상이 생성되어 수축 저감작용이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 HVMA가 OPC와 동등수준의 콘크리트 수축량을 보임으로써, 건조수축에 취약한 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 다량 사용함에도 건조수축 저감효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 고강도 콘크리트의 제조과정에서 발생하는 CO₂를 저감시키기 위해 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 다량 사용한 HVMA 결합재 및 이를 사용한 HVMA 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 검토한 것으로 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시멘트 10% 수준에서 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 다량 사용하기 위한 HVMA 결합재 최적 배합비는 OPC 10%, BFS 60%, FA 20%, HA 5%, AG 5%로 도출되었다.
2. HVMA 고강도 콘크리트의 W/B별 강도발현 특성에서 실용화를 고려한 비빔시간 및 강도 발현특성을 고려할 경우 적정 W/B는 26% 수준인 것으로 나타났다.
3. HVMA 고강도 콘크리트는 양생온도에 따른 의존성이 큰 것으로 나타났으며, 최소 20°C 이상의 양생온도 조건을 확보한다면 HVMA 고강도 콘크리트의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.
4. 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 다량 사용한 HVMA 고강도 콘크리트의 길이변화율이 -332×10^{-6} 으로 OPC의 -404×10^{-6}

값보다 -72×10^{-6} 작기 때문에, 건조수축 저감효과가 있는 것으로 판단할 수 있다.

이상을 종합하면 HVMA 고강도 콘크리트는 시멘트 사용량을 10% 이하로 절감함으로써 CO₂ 발생량을 감소시키면서 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 충분히 확보할 수 있는 것을 확인하였으며, 향후 실용화를 위해 프리믹스나 설비개선에 관한 연구와 경제성 평가를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다.

References

Cho, J. W. (2011). CO₂ Reduction Cement Technologies, Magazine of the Korea Concrete Institute, **23(6)**, 32–35.
 Han, S.H., Kim, J.K., Park, W.S., and Kim, D.H. (2001). Effect of Temperature and Aging on the Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **13(6)**, 610–618.
 Kim, M.H., Lee, S.S. (1999). A Study on the Application in Site of the Concrete Using Fly Ash Produced in Combined Heat

Power Plant, Journal of the Korea Concrete Institute, **11(5)**, 41–49.
 Kwon, Y.H., Lee, D. G. (2013). A Study on the Quality Properties of Alkali-activated cement free Mortar using Industrial by-products, Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 58–66.
 Lee, K.M., Kwon, K.H., Lee, H.K., Lee, S.H., Kim, G.Y. (2004). Characteristics of Autogenous Shrinkage for Concrete Containing Blast-Furnace Slag, Journal of the Korea Concrete Institute, **16(5)**, 621–626.
 Mun, G.J., Lee, C.W., So, S.Y., Soh, Y.S. (2006). Hydration Reaction of Non-Sintering Cement Using Inorganic Industrial Waste as Activator, Journal of the Korea Concrete Institute, **18(2)**, 267–274.
 Soh, Y.S., Piao, Y.M., Mun, G.J. (2001). Effect of Inorganic Stimulus Agent on Compressive Strength and Pore Structure of Blast Furnace Slag Cement, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **17(9)**, 1–8.
 Yoon, Y.S., Shin, H.O., Lee, S.H., Lee, W.J. (2013). Evaluation of Mechanical Properties of 200MPa Ultra-High-Strength Concrete Incorporating Different Fine Aggregates, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **29(9)**, 47–55.

다량의 혼화재를 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성

본 연구에서는 시멘트 사용량을 저감하고 다량의 혼화재를 사용하여 고강도 콘크리트 제조 과정에서 시멘트에 의한 CO₂ 발생량을 감소시킬 목적으로 혼화재 및 무기계 자극제를 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였으며, HVMA 결합재 도출과 W/B 변화 및 양생온도에 따른 HVMA 고강도 콘크리트를 실험하였다.

실험결과, 다량의 혼화재와 무기계 자극제인 열병합애시와 무수석고를 혼합 사용한 HVMA 결합재 배합을 설계하였으며, 설계된 HVMA 결합재를 사용할 경우 W/B 26% 수준에서 HVMA 고강도 콘크리트 배합이 유동특성과 역학적 특성이 양호한 것으로 나타났다. 또한 HVMA 결합재를 사용한 고강도 콘크리트의 양생온도 영향을 검토한 결과, 양생온도 20℃ 이상 확보한 경우에는 50MPa 이상의 고강도 HVMA 고강도 콘크리트 제조가 실용화 가능성이 높은 것으로 나타났다.