

고로슬래그와 플라이애시 대체율이 80MPa 3성분계 고강도콘크리트의 재료물성에 미치는 영향

The Effect of Mixing Ratio of Blast Furnace Slag and Fly Ash on Material Properties of 80MPa High Strength Concrete with Ternary Cement

이범식¹ · 전명훈² · 이도현³

Bum-Sik Lee¹, Myoung-Hoon Jun² and Do-Heun Lee³

(Received June 19, 2012 / Revised July 26, 2012 / Accepted July 26, 2012)

요 약

보통포틀랜드시멘트(OPC)와 고로슬래그 및 플라이애시만으로 설계기준압축강도 80MPa의 3성분계 고강도콘크리트(이하 고강도콘크리트)를 개발하기 위하여, 고로슬래그와 플라이애시의 대체율이 고강도콘크리트의 경화전 후 재료물성 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 고강도콘크리트의 경화전 후 재료물성 평가결과, 고로슬래그와 플라이애시 대체율이 최대 30%까지 증가할수록 유동성과 장기강도가 우수한 것으로 나타났다. 또한 OPC만으로 제작된 시편체와 비교하여 길이변화 특성이 우수하며, 혼화재 사용에 따른 탄산화는 없는 것으로 나타났다. 고강도콘크리트 재료물성 평가결과, 고로슬래그 대체율 25%, 플라이애시 대체율 15%일 경우, 경화전 후 재료물성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이 연구결과는 향후 고가의 실리카폼을 대체할 수 있는 고강도콘크리트의 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 고강도콘크리트, 고로슬래그, 플라이애시, 유동성, 압축강도, 탄산화, 길이변화

ABSTRACT

To develop 80MPa-high strength concrete with ternary cement used in OPC, blast-furnance slag, and fly ash, mixing ratio of blast-furnace slag and fly ash was evaluated in material characteristics before and after hardening of the high strength concrete. According to the evaluated results of material characteristics before and after hardening of the high strength concrete, the flowability and long-term compressive strength increase up to 30% mixing ratio of blast-furnace slag and fly ash. Also, it is superior to characteristics of length change and neutralization due to the use of mineral admixture when compared in test sample mixed with OPC. The evaluated results show that material characteristics of the high strength concrete was the most outstanding performance at blast-furnace slag of 25% and fly ash of 15%. The result of this study will be useful for the development of high strength concrete as a substitute of costly silica fume in the near future.

Key words: High Strength Concrete, Blast Furnace Slag, Fly Ash, Slump Flow, Compressive Strength, Carbonation Thickness

1. 서 론

고강도콘크리트는 초고층 구조물의 건립 시 필수적인 구조재료이다. 최근 국내에서 초고층형구조물의 건립에 대한 관심이 높아짐에 따라, 보다 더 우수한 성능의 고강도콘크리트의 개발과 실용화에 필요한 기술을 선점하기 위한 노력이

활발히 이루어지고 있다. 이 논문에서는 향후 50층~100층 규모의 초고층구조물에 적용이 기대되는 80MPa급 고강도콘크리트의 실용화를 위한 노력의 일환으로 실리카폼을 사용한 고강도콘크리트와 비교하여 경제적이며, 동등이상의 재료물성을 가지는 고강도콘크리트의 제조가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 고강도콘크리트의 제조에 이용되고 있는

본 논문은 토지주택연구원에서 국토해양부 국책과제로 수행한 “고강도콘크리트를 이용한 초고층 공동주택 적용방안(5)”연구(한국토지주택공사, 2007)의 일부분을 정리한 내용입니다.

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: bslee417@LH.or.kr)

2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: mhjun@LH.or.kr)

3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 선임연구원

고가의 실리카폼의 사용을 배제하고 시멘트 대체 재료로서 산업부산물인 고로슬래그와 플라이애시만을 사용하여 제작한 고강도콘크리트를 대상으로 고로슬래그와 플라이애시 대체율이 고강도콘크리트의 경화 전후의 다양한 재료물성에 미치는 영향을 평가하고, 설계기준압축강도 80MPa급 3성분계 고강도콘크리트의 제조에 필요한 고로슬래그와 플라이애시의 최적 대체율을 제안하였다. 이 연구결과는 기존의 고강도콘크리트보다 경제적이며 우수한 재료물성을 가지는 고강도콘크리트의 개발에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

와 플라이애시 대체율을 각 3수준(BS:20%, 25%, 30%, FA:10%, 15%, 20%)으로 달리한 콘크리트를 제작하고 이를 대상으로 경화전후 고강도콘크리트의 재료물성을 측정하는 것으로 계획하였으며, 비교대상으로는 OPC만 사용한 콘크리트로 하였다.

고강도콘크리트의 경화전 물성 평가항목은 공기량과 유동성으로 하였으며, 레미콘 운송시간을 고려하여 1시간 경과 후의 유동성을 측정하였다. 또한 실리카폼을 첨가하지 않았을 경우 점성저하로 인하여 재료분리가 발생할 수 있기 때문에 믹싱 후의 재료분리도 함께 관찰하였다. 경화 후 물성 평가 항목으로는 압축강도, 길이변화 및 탄산화에 대한 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 콘크리트의 제조는 고강도콘크리트의 제조에 필요한 설비를 구비하고 있는 충북 오창 소재 W기업에서 수행하였다. 고강도콘크리트의 초기 재령시의 강도특성과 재료 역학적 특성은 W기업에서, 28일 이후의 강도 및 탄성계수 측정은 공사의 품질시험센터와 충북 청원 소재 S시멘트 연구소에서 수행하였다.

본 연구에서 고강도콘크리트의 물성평가 항목은 표 1과 같으며, 시험체 계획과 배합은 표 2와 같다.

2. 재료물성 평가계획 및 시험체 제작

2.1 재료물성 평가계획

2.1.1 시험체 계획

본 논문에서는 설계기준압축강도 80MPa급 3성분계 고강도콘크리트(이하 고강도콘크리트, 할증계수 1.2, 배합강도 96MPa)의 제조에 있어서 고로슬래그, 플라이애시의 대체율이 재료물성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 고로슬래그

표 1. 고강도콘크리트 재료물성평가 항목

구 분		측정 재령일(일)	공시체 크기	공시체 수
경화 전 물성 (배합 시 현장 측정/평가)		· 공기량 : 3.0 ± 1.5% · Slump flow : 650 ± 50mm / Slump flow 500mm 도달시간 : 10 ± 5 sec. · 재료분리		
경화 후 물성	압축강도	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91	∅100 × 200mm	3 × 7 × 10 = 210 (3개 × 재령 × 수준)
	길이변화	제작 후 7일간	100 × 100 × 400mm	10
	탄산화	7, 28, 56일 측정 (14일 수중양생, 14일 기건양생 후)	100 × 100 × 400mm	10

표 2. 고강도콘크리트 재료물성평가를 위한 시험체명과 시험체별 배합표

시험체명	W/B (%)	S/a (%)	단위 재료량(kg/m ³)						SP (%)
			W	OPC	BS	FA	S	G	
OPC-100	23.5	38.0	150	640	0	0	622	1022	2.45
B20-F10			150	448	128	64	612	1007	0.65
B20-F15			150	416	128	96	608	999	
B20-F20			150	384	128	128	603	991	
B25-F10			150	416	160	64	612	1007	
B25-F15			150	384	160	96	608	999	
B25-F20			150	352	160	128	603	991	
B30-F10			150	384	192	64	612	1007	
B30-F15			150	352	192	96	608	999	
B30-F20			150	320	192	128	603	991	

□□ - □□ ① B : 고로슬래그, ② F : 플라이애시 ③ 대체율 (%)
①③ ②③

표 3. 고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 시멘트의 물리적 성질 및 화학성분

종류	구분	분말도 (cm ² /g)	평균입경	밀도	응결시간		재령별 압축강도(MPa)			
					초결(m)	종결(h)	3일	7일	28일	
OPC		3,344	17 μ m	3.05	230	6.5	23.0	31.0	40.0	
성분		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg.loss		
합량		21.6	5.2	3.6	62.8	2.7	2.0	0.9		

표 4. 고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 골재의 물성

종류	구분	최대치수(mm)	조립률	비 중	실적률(%)
쇄석		19	6.51	2.63	60.1
부순 모래		-	3.27	2.61	-

표 5. 고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 결합재의 화학성분

구분	평균입경	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	합계(%)
고로슬래그 미분말	12 μ m	34.8	17.5	0.6	42.4	3.1	0.03	-	-	-	98.43
플라이애시	26 μ m	59.5	25.4	5.8	3.7	0.7	-	0.4	1.1	1.6	98.20

※ 고로슬래그 미분말 : Blast Furnace Slag(분말도 4,400cm²/g), 플라이애시 : Fly Ash(분말도 3,400cm²/g)

표 6. 고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 혼화제 물성

종류	구분	형 태	주 성분	점 도(20°C)	비 중	pH
SP제		암갈색 액상	폴리에틸렌글리콜술폰산계 에테르형	103.4cp	1.09	5.88
AE제		투명한 액상	Sodium lauryl ether sulfate	41.1cp	1.42	6.63

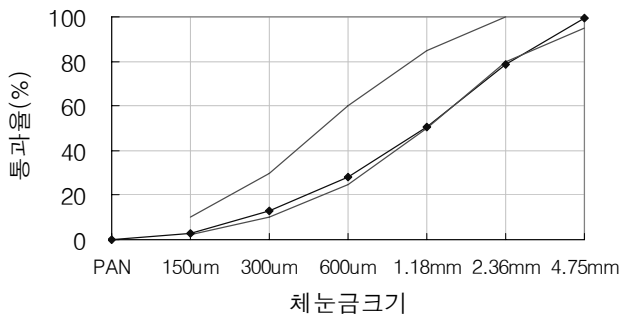


그림 1. 고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 잔골재의 입도곡선

부순 모래의 입도곡선은 그림 1과 같다.

(3) 혼화제

고강도콘크리트의 포졸란 반응성 및 잠재수경성을 통한 내구성 확보 및 유동성 증진을 목적으로 시멘트를 대체하여 고로슬래그와 플라이애시와 고로슬래그를 사용하였다. 플라이애시는 경남 하동소재 발전소산이고 고로슬래그 미분말은 시멘트와 같은 S사 제품으로 시판되고 있는 제품을 사용하였다. 시험체 제작에 사용된 혼화제의 성분은 표 5와 같다.

(4) 혼화제

고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 혼화제로는 국내 W사에서 제조된 AE제와 SP제를 사용하였으며 혼화제의 물성은 표 6과 같다.

2.2 시험체 제작 및 측정

2.2.1 시험체 제작

단위 결합재량이 많은 고강도콘크리트의 혼합에 일반적으로 사용하고 있는 일괄 투입법을 사용할 경우 점성이 크기 때문에 분체를 균일하게 분산시키기 어려울 뿐만 아니라 믹

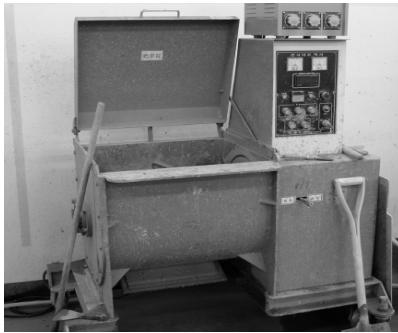
2.1.2 사용재료

(1) 시멘트

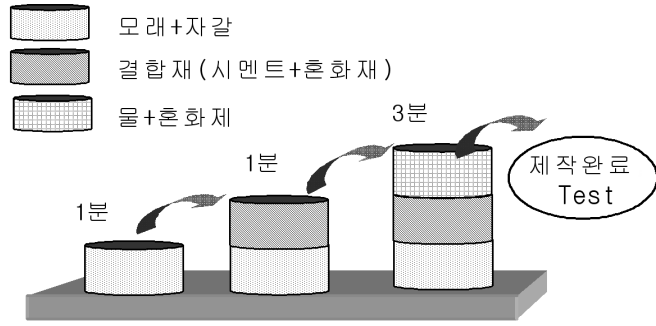
시험체 제작에 사용된 시멘트는 국내 S사 보통포틀랜드 시멘트로서 물리적 성질 및 화학성분은 표 3과 같다.

(2) 골재

고강도콘크리트 시험체 제작에 사용된 골재는 국내 S사의 골재로서 굵은 골재는 최대치수 19mm의 천안산 쇄석을 사용하였고, 모래는 천안산 부순모래를 사용하였다. 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 성질은 표 4와 같으며, 잔골재로 사용된



(a) 일축형 콘크리트 믹서기



(b) 고강도 콘크리트 배합 시간 및 순서

그림 2. 시험체 제작에 사용된 고강도콘크리트 믹서기 및 재료배합방법

서의 부하량을 증가시키게 되어 콘크리트의 소요품질 확보에 어려움이 있다. 그러므로 본 실험에서는 비빔효율을 증대시키기 위하여 그림 2와 같이 용량 50리터의 일축형 믹서를 사용하여 골재를 1분간 건비빔한 후 결합재를 투입하여 다시 1분간 건비빔 한 후에 혼화제를 희석한 물을 투입하여 3분간 34rpm의 속도로 혼합하였다.

2.2.2 시험체 재료물성 측정

(1) 경화 전 재료물성 측정

고강도콘크리트의 경화 전 재료물성 평가는 유동성과 공기량을 대상으로, 혼화제 대체율에 따른 공기량과 유동성의 변화 및 현장적용시 타설을 위한 적정 유동성을 확인하였다. 유동성 측정은 KS F 2594에서 정의하고 있는 방법으로 슬럼프플로 및 500mm 플로 도달시간을 측정하였으며, 현장 적용시 레미콘 운반 시간을 고려하여 1시간 후 슬럼프플로 및 500mm 플로 도달시간을 동일한 방법으로 한번 더 측정하였다. 공기량 측정 또한 KS F 2421에 규정된 방법으로 한번 측정 후 한 시간 후에 다시 측정하였다.

(2) 경화 후 재료물성 측정

고강도콘크리트의 경화 후 물성 평가 항목은 재령별 압축강도, 탄성계수, 길이변화, 탄산화 깊이로 설정 하였다. 압축강도에 대한 평가는 혼화제 대체율에 따른 강도 발현 특성을 평가하고 이를 기초로 최적 배합을 설정하는데 활용하기 위하여 실시하였으며 측정방법은 KS F 2504에 규정된 방법으로 하였다. 고강도콘크리트는 보통강도 콘크리트와 비교하여 건조수축은 작으나 자기수축이 크다고 알려져 있으므로 구조물에 적용을 위한 적합성 검토를 위하여 혼화제의 사용비율에 따라 수축량이 큰 초기재령(7일간)의 길이변화를 측정하였다. 고강도콘크리트의 길이변화 시험은 제원 100 × 100 × 400mm인 각주형 시험체에 길이변화 센서를 장착 후 데이터 로거에 연결하여 실시간으로 측정하였다.

경화초기 콘크리트는 수산화칼슘 등의 영향으로 강알카리성을 나타내지만 시간이 경과함에 따라 대기 중에 포함되어 있는 탄산가스가 용해된 약산성의 탄산수와 수산화칼슘이 반응하여 알카리성을 잃게 된다. 이러한 현상을 콘크리트의 탄산화는 일반적으로 콘크리트 표면에서부터 시작되어 내부로 진행된다. 콘크리트의 탄산화는 철근의 부식을 야기시켜 종국적으로 콘크리트 구조물을 손상시키게 되므로 구조물의 내구성에 중요한 물성이다.

콘크리트의 탄산화는 콘크리트가 타설된 지역의 환경적인 요인 이외에도 콘크리트의 제조에 사용되는 혼화제의 대체율과 물-결합재비 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이와 관련된 기존 연구결과를 살펴보면, 재령 28일 시 고로슬래그 대체율이 0%인 콘크리트의 탄산화 깊이를 1로 가정할 경우, 고로 슬래그 대체율이 10%일 경우는 약 1.12배, 20%인 경우 1.25배, 30%인 경우 1.3배로 대체율이 높아질수록 탄산화 깊이가 큰 것으로 나타나 고로 슬래그 대체율이 콘크리트의 탄산화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다(이한승, 2003). 그리고 물-결합재비가 콘크리트의 탄산화에 미치는 영향을 평가한 연구자료에 의하면, 물-결합재비가 25%이고 고로슬래그 대체율이 0%, 30%인 경우 두 시험체의 탄산화 깊이는 1mm미만으로 두 시험체 모두 탄산화가 거의 발생하지 않았으나, 물-결합재비가 55%인 경우 고로슬래그 대체율 30%시의 탄산화 깊이는 약 12mm로 고로슬래그 대체율 0%인 경우의 탄산화깊이가 약 8mm인 것과 비교하여 약 50%정도 탄산화 깊이가 증가한 것으로 나타나(오병환, 2003) 물-결합재비가 탄산화에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

초고층구조물에서의 적용을 목표로 본 연구에서 개발 중인 고강도콘크리트의 경우 물-결합재비가 23% 내외이고, OPC 대체재로 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 대체율을 다양화하여 개발하고 있으므로, 물-결합재비와 혼화제 대체율이 고강도 콘크리트의 탄산화에 미치는 영향을 평가하고 그 결과를 표준배합의 결정 시 반영하기 위하여 탄산화 실험을 실시하였다. 탄산화실험방법으로는 KS에 규정된 KS F 2584(콘크리트

표 7. 고강도콘크리트 탄산화 촉진조건

	온도	습도	이산화탄소 농도
탄산화 촉진조건	20± 2℃	60± 5%	5± 0.2%

표 8. 고로슬래그와 플라이애시 대체율에 따른 고강도콘크리트의 경화 전 물성

시험체명	슬럼프플로(mm)				슬럼프플로 500mm 도달시간 (sec.)				공기량 (%)			
	기준(목표) (mm)	직후	1시간 후	평가 결과	기준(목표) (sec.)	직후	1시간 후	평가 결과	기준(목표) (%)	직후	1시간 후	평가 결과
OPC-100	650±50	410/420	-	평가불가	10±5	-	-	평가불가	3.0±1.5	2.4	-	평가불가
B20-F10	650±50	470/490	-	평가불가	10±5	-	-	평가불가	3.0±1.5	2.1	-	평가불가
B20-F15	650±50	570/570	510/520	불만족	10±5	5.57	7.2	만족	3.0±1.5	1.7	1.2	불만족
B20-F20	650±50	620/630	600/610	만족	10±5	3.18	5	만족	3.0±1.5	1.5	1.6	만족
B25-F10	650±50	580/580	530/520	불만족	10±5	4.90	9.53	만족	3.0±1.5	1.8	1.3	불만족
B25-F15	650±50	610/620	590/600	만족	10±5	4.37	4.97	불만족	3.0±1.5	1.8	1.5	만족
B25-F20	650±50	680/680	650/640	만족	10±5	3.24	4.48	불만족	3.0±1.5	1.4	1.3	만족
B30-F10	650±50	630/640	580/590	불만족	10±5	4.00	7.11	불만족	3.0±1.5	2.0	1.3	불만족
B30-F15	650±50	670/680	650/660	만족	10±5	3.56	4.13	불만족	3.0±1.5	1.6	1.5	만족
B30-F20	650±50	720/730	700/720	불만족	10±5	2.81	3.31	불만족	3.0±1.5	1.9	1.5	만족

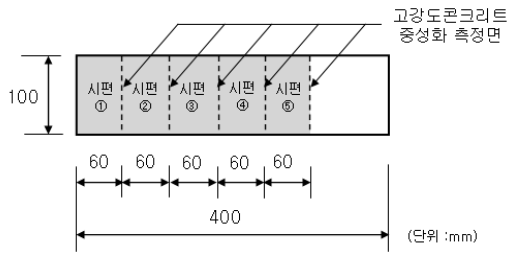


그림 3. 탄산화 깊이 측정위치

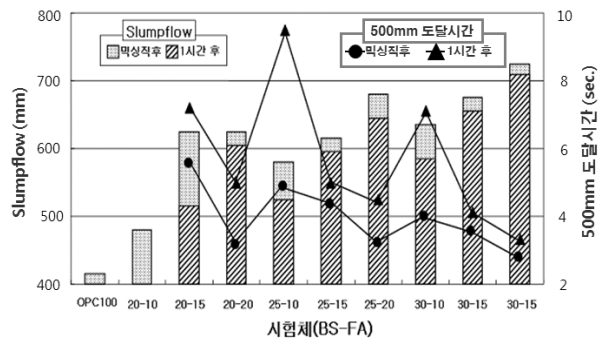


그림 4. 고로슬래그와 플라이애시 대체율에 따른 고강도콘크리트의 유동성 변화

의 촉진 탄산화 시험방법), KS F 2596(콘크리트의 탄산화 깊이 측정 방법)에 따랐으며 탄산화 촉진조건은 표 7과 같다.

고강도콘크리트의 탄산화 측정을 위하여 제원 100 × 100 × 400mm인 각주형 시험체를 2주간 수중양생 후 2주간 기건 양생을 실시하고 한쪽 면을 제외한 모든 면을 에폭시로 코팅하여 탄산화 챔버에 보관하였다. 수준별로 1개의 공시체를 측정하였으며 그림 3과 같이 목표 재령에서 60mm의 길이로 절단하여 단면을 측정하고 나머지 시험체는 다시 탄산화 챔버에 보관하여 다음 측정일에 측정하였다. 고강도콘크리트의 탄산화 측정 재령은 7일, 28일, 56로 하였다.

시 대체율에 따른 유동성 실험 결과를 표 8, 그림 4 및 그림 5에 나타내었다. 혼화제를 사용하지 않고 OPC만을 사용한 경우 믹싱 직후의 슬럼프플로가 410mm로 500mm 도달시간을 측정할 수 없었으며, 믹싱 1시간 후에는 측정을 위해 필요한 유동성을 확보하기가 곤란하여 유동성 및 공기량을 측정할 수 없었다.

유동성 평가결과, 고로슬래그 대체율이 높을수록 슬럼프플로 값이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 고로슬래그 대체율이 동일한 경우에는 플라이애시 대체율이 높을수록 슬럼프플로 값이 큰 것으로 나타나 플라이애시 역시 슬럼프플로에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

OPC를 사용한 경우 가로, 세로방향의 슬럼프플로가 410mm, 420mm로 가장 작은 것으로 나타났다. 시험체 OPC-100, B20-F10, B20-F15, B25-F10 및 B30-F20를 제외하고 표 1의 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 특히 시험체 B30-F20(고로슬래그

3. 고강도콘크리트 재료물성 평가 결과 및 고찰

3.1 경화 전 재료물성

3.1.1 유동성

고강도콘크리트의 제조에 사용된 고로슬래그와 플라이애

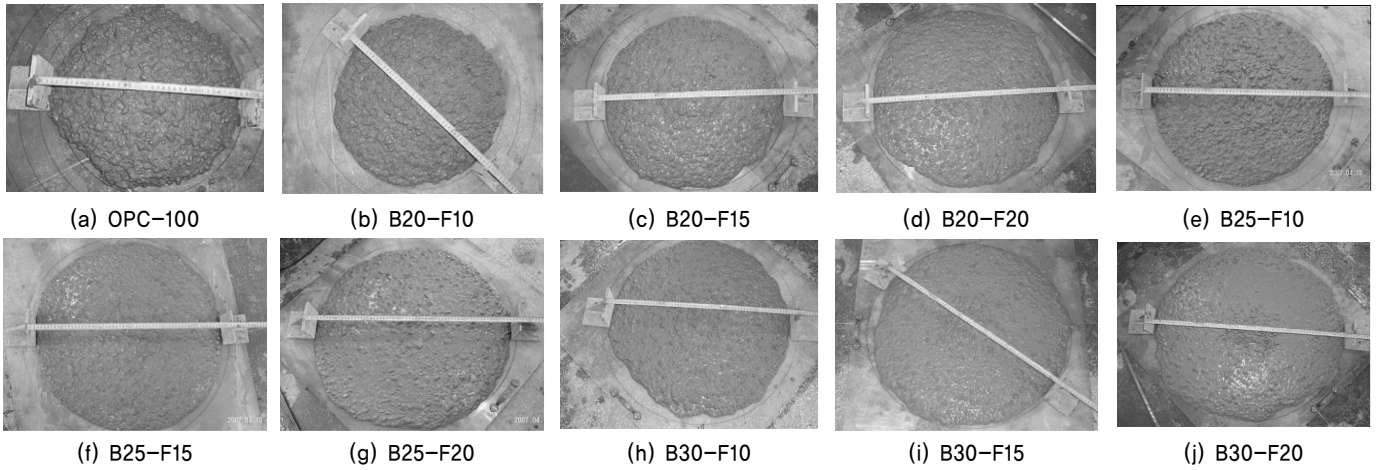


그림 5. 고강도콘크리트 시험체의 제작 직 후 슬럼프플로 측정 결과

표 9. 혼화재 대체율이 3성분계 고강도콘크리트의 유동성에 미치는 영향

(a) 플라이애시가 유동성에 미치는 영향

시험체명	BS20			BS25			BS30		
	FA10	FA15	FA20	FA10	FA15	FA20	FA10	FA15	FA20
슬럼프플로 (mm)	480	570	625	580	615	680	635	675	725
슬럼프플로비(%)	100	119	130	100	111	117	100	106	114

(b) 고로슬래그가 유동성에 미치는 영향

시험체명	FA10			FA15			FA20		
	BS20	BS25	BS30	BS20	BS25	BS30	BS20	BS25	BS30
슬럼프플로 (mm)	480	580	635	570	615	675	625	680	725
슬럼프플로비(%)	100	121	132	100	108	118	100	109	116

대체율 30%, 플라이애시 대체율 20%)의 경우 슬럼프플로가 평균 725mm로 목표 슬럼프플로를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 1시간 이후의 슬럼프플로는 고로슬래그 대체율에 관계없이 플라이애시 대체율 15% 이상이 되어야 목표 슬럼프플로를 만족하는 것으로 나타났다.

표 9는 본 연구에서 개발 중인 고강도콘크리트의 제조에 사용된 혼화재인 플라이애시와 고로슬래그가 유동성에 미치는 영향을 나타내고 있다.

고로슬래그 대체율이 동일한 경우 플라이애시 대체율이 증가함에 따라 슬럼프플로도 증가하는 것으로 나타났다. 고로슬래그 대체율이 20%이고 플라이애시 대체율이 20%인 경우가 플라이애시 대체율이 10%인 경우와 비교하여 슬럼프플로가 490mm에서 625mm로 약 30%로 가장 많이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 고로슬래그 대체율이 20%, 30%일 경우 플라이애시 대체율이 20%에 달하여도 슬럼프플로는 최대 17%만 증가하는 것으로 나타나, 고로슬래그 대체율이 20%시 플라이애시 대체율에 따른 슬럼프플로 개선효과 비율이 가장 큰 것으로 나타났다.

동일한 플라이애시 대체율일 경우 고로슬래그 대체율이 증가함에 따라 슬럼프플로도 증가하는 것으로 나타났으며, 플라이애시 대체율 10%, 고로슬래그 대체율 30%일 때 고로슬래그 대체율 20%와 비교하여 슬럼프플로가 약 32% 증가하여 슬럼프플로 개선효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났다. 플라이애시 대체율이 20%인 시험체의 경우 고로슬래그 대체율에 관계없이 타 시험체보다 슬럼프플로 특성이 우수한 것으로 나타났으며, 특히 플라이애시 대체율 20%, 고로슬래그 대체율 30%일 경우 최대 슬럼프플로를 나타내었다.

동일한 고로슬래그 사용량에서 플라이애시 변화 시, 동일 플라이애시 사용량에서 고로슬래그 혼입량 변화 시 모두 대체율 증가함에 따라 유동성이 좋아지는 것을 볼 수 있으므로 본 실험에 사용된 두 가지의 혼화재 모두 유동성 확보에 효과적인 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 플라이애시는 구형 입형에 의한 볼 베이킹 효과로 유동성 개선에 효과적이며, 고로슬래그는 분체입자의 혼화재로서 혼합시 혼합 특성이나 콘크리트에 대한 결합재의 분산특성이 우수함이 입증되었다(한국콘크리트학회, 2005).

일반적으로 고로슬래그 보다는 플라이애시의 유동성 개선 효과가 더 큰 것으로 알려져 있으나 본 연구결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 분말도의 차이에 의한 것으로 사료된다.

배합에 따른 유동성 평가 결과 혼화재의 사용이 가장 많은 B30-F20 시험체의 경우가 가장 좋은 유동성을 나타내었지만, OPC100, B20-F10, B25-F10 시험체를 제외하고는 모든 시험체가 목표 슬럼프플로 600mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 슬럼프플로 500mm 도달시간의 경우, 고로슬래그의 대체율에 관계없이 플라이애시 대체율이 10%, 15%의 경우 5초 내외로 짧은 시간에 분산되는 것을 확인할 수 있었다. 유동성 실험을 수행한 모든 시험체에서 재료분리가 발생하지 않아 실리카폼을 사용하지 않고도 재료분리 없이 설계기준압축강도 80MPa의 고강도콘크리트를 제작할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 공기량

일반적으로 콘크리트에 적당량의 연행공기를 분포시키면, 콘크리트의 위커빌리티가 현저하게 개선되며 이에 따라 잔골재율과 단위수량을 작게 할 수 있기 때문에 콘크리트 내구성의 증가에도 큰 역할을 한다. AE제를 첨가한 공기연행 콘크리트가 콘크리트의 장기내구성 가운데 중요한 요인인 동결융해작용에 대한 내구성 증진에 효과적이라는 사실이 알려졌으나 공기량이 증가함에 따라 강도가 저감되는 단점도 있어 실리카폼을 사용하여 고강도콘크리트에서도 공기량이 증가함에 따라 강도감소없이 동결융해 저항특성을 향상시키기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 장기내구성의 확보의 일환으로 AE제를 첨가하여 공기량을 확보하고자 하였으며, 혼화제로서 고로슬래그와 플라이애시 대체율이 공기량에 미치는 영향을 평가하였다.

그림 6은 혼화재 대체율에 따른 공기량의 변화를 그래프로 나타내고 있다. FA는 미연탄소분에 의한 AE제의 흡착으로 공기량이 적게 나타날 수 있다. 따라서 OPC만을 사용한 시험체에 비하여 혼화재를 사용한 시험체가 낮은 공기량을 보이며, 혼화재 종류 및 대체율에 따른 경향을 평가하기는 어려운 것으로 판단되었다.

3.2 시험체 경화 후 물성

3.2.1 압축강도

시험체별 재령에 따른 압축강도특성을 평가하면, 재령 1일 시 시험체 OPC-100의 압축강도는 약 36MPa로 가장 높게 나타났다. 고로슬래그 대체율 20%이고 플라이애시 대체율이 각 10%, 15%인 시험체 B20-F10, B20-F15가 약 19, 13MPa로

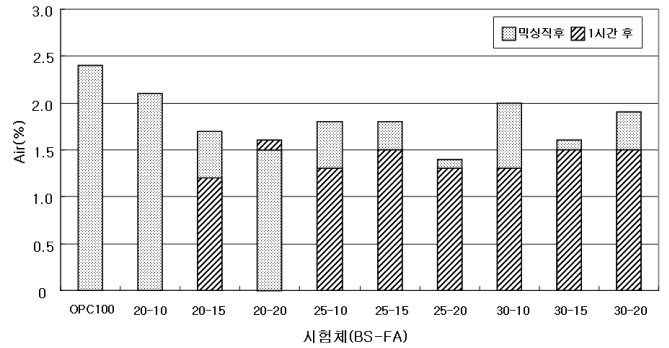


그림 6. 고로슬래그와 플라이애시 대체율에 따른 고강도콘크리트의 공기량 변화

높게 나타났으며, 시험체 B25-F10의 경우 약 12.7MPa로 나타났다. 재령 3일 시 시험체 OPC-100의 압축강도는 약 63MPa로 가장 높고 시험체 B20-F10, B20-F15가 약 52, 51MPa의 순으로 높게 나타났으며, 고로슬래그 대체율이 25%, 30%인 시험체의 강도는 시험체 B25-F10를 제외하곤 42~45MPa 정도로 고로슬래그 대체율 20%인 시험체와 비교하여 낮게 나타났다. 재령 7일과 14일에서의 강도발현 역시 이와 유사한 경향을 나타내고 있으나 재령 1일과 3일에서 시험체 OPC-100의 강도에 비하여 매우 낮은 강도발현을 나타낸 것과 비교하여 OPC-100의 강도에 근접하고 있으며, 특히 재령 14일에서부터 일부시험체에서 시험체 OPC-100의 강도보다 높은 강도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 목표로 하는 설계기준압축강도 80MPa의 경우, 시험체 OPC-100은 재령 7일 시 달성되었으며, 이후 재령 91일까지 약 12% 증가하였다. 시험체 B30-F20을 제외한 나머지 시험체의 경우 재령 14일에 설계기준압축강도 80MPa에 도달하였다. 재령 28일 시 최대강도는 시험체 B30-F10, 재령 56일 시 최대강도는 B25-F15로 105.5MPa이며, B25-F10 등 일부 시험체에서 28일 이후의 장기강도가 28일 강도보다 낮게 나타난 것은 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

시험체별 재령에 따른 강도특성 평가결과, 재령 56일의 B25-F15 시험체의 경우 OPC100시험체의 강도값에 118%에 이르는 장기강도 발현율을 보여 장기강도 측면에서는 OPC 단독 사용보다 3성분계의 결합재가 더 유리한 것으로 나타났으며, 재령 91일에서는 B20-F20, B25-F15, B30-F10의 시험체가 대체적으로 높은 값을 나타내어 이를 통해 강도적 측면에서는 BS+FA의 최적 혼입률은 40%인 것으로 나타났다.

OPC100 시험체를 제외한 모든 시험체의 경우 재령 58일의 경우에는 모두 목표강도 96MPa를 만족하였고, 대부분 시험체의 경우 재령 56일 또는 91일에는 할증계수 1.3을 고려한 목표강도 104MPa값도 상회하는 것으로 나타났다. 시험체별 재령 28일 강도에 기초한 재령별 강도발현 정도를 평가한 결과, 혼화재를 사용하지 않은 고강도콘크리트 시험체 OPC-100

표 10. 고강도콘크리트 시험체의 재령별 압축강도 측정결과

시험체명	재령(일)						
	1	3	7	14	28	56	91
OPC-100	35.7	63.3	81.2	83.0	89.6	89.6	91.0
B20-F10	19.4	52.5	75.8	90.1	93.6	103.1	97.8
B20-F15	13.4	51.5	74.9	82.4	88.0	102.1	96.1
B20-F20	5.6	46.5	72.1	84.8	87.1	97.2	108.7
B25-F10	12.7	49.9	73.3	80.6	89.5	104.2	96.6
B25-F15	8.0	44.8	70.2	80.7	92.0	105.5	103.4
B25-F20	3.8	42.2	66.4	85.5	89.1	99.8	104.4
B30-F10	7.3	46.1	73.7	85.4	96.5	91.4	109.7
B30-F15	3.0	43.4	71.1	81.6	90.0	104.7	102.8
B30-F20	1.1	39.4	65.1	79.0	89.4	94.2	100.2

의 경우 재령 3일에서 28일강도의 70%, 재령 7일과 14일에서 각 90%, 92%에 도달하였으며 28일 이후 91일까지 강도증가율은 28일 강도의 약 1%에 불과한 것으로 나타났다. 고로슬래그 대체율이 20%인 시험체의 경우 28일 시 강도 대비 재령 3일과 7일 시 강도발현율은 약 55%, 80~85%로 시험체 OPC-100보다 강도가 늦게 발현되나 91일강도 최대 24%까지 증가하는 것으로 나타났다. 고로슬래그 대체율이 25%, 30%인 시험체의 경우 시험체 OPC-100, 시험체 B20계열 보다 강도발현이 늦으나 91일 강도는 28일 강도보다 최대 17% 높게 발현하는 것으로 나타났다. 재령별 강도발현비에 대한 평가 결과, 고로슬래그와 플라이애시가 3성분계 고강도콘크리트의 28일 이후의 장기강도 발현에 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 시험체 OPC-100과 비교하여 3성분계 시험체가 초기 재령시 강도 발현이 다소 낮으나 장기재령으로 갈수록 고로슬래그와 플라이애시에 의한 포졸란 반응이 장기강도 확보에 기여하는 것으로 평가되었다.

혼화재 대체율에 따른 강도특성을 평가한 결과, 재령 7일까지는 고로슬래그 및 플라이애시의 대체율이 증가함에 따라 강도발현율이 감소하나 재령 14일에는 시험체 OPC-100과 유사한 강도를 나타낸다. 재령 28일 이후에는 시험체 OPC-100과 비교하여 고로슬래그 대체율이 20%, 25%일 때 고로슬래그와 플라이애시의 대체율이 증가할 수록 28일 강도대비 강도발현율이 증가하는 것으로 나타났다. 재령 7일까지는 고로슬래그 대체율이 증가함에 따라 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 재령 56일 시 플라이애시 대체율이 강도발현에 미치는 영향을 평가한 결과 고로슬래그 대체율이 20%일 경우 플라이애시 대체율이 10%, 고로슬래그 대체율이 25%, 30%일 경우 플라이애시 대체율이 15%인 경우가 R, 고로슬래그 대체율이 30%일 경우 각각의 강도조합에서 최대강도를 발휘하는 것으로 나타났다.

표 10과 그림 7은 고강도콘크리트 표준배합을 도출하기 위

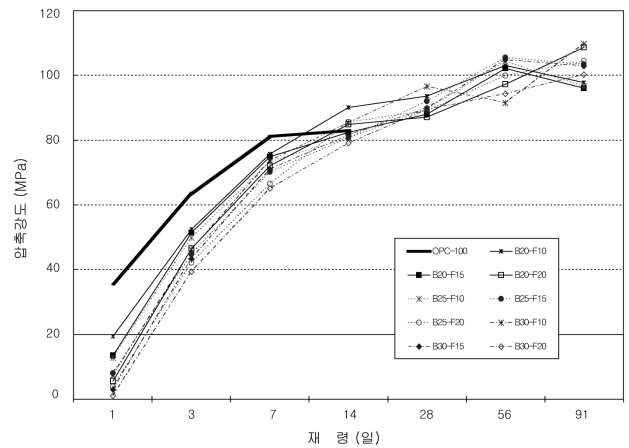


그림 7. 고로슬래그와 플라이애시 대체율에 따른 재령별 압축강도 측정결과

하여 수행된 실험의 재령별 고강도콘크리트 압축강도를 나타내고 있다.

3.2.2 길이변화

고강도콘크리트 시험체의 길이변화 측정은 압축강도 및 유동성 측정 결과가 나온 후에 결과를 평가한 후 시험체 B20-F15, B25-F10, B25-F15, B25-F20, B30-F20를 길이변화 평가용 시험체로 선정하였으며, 비교대상으로 시험체 OPC-100를 제작하여 시험을 수행하였다.

길이변화를 측정하기 위하여 제작된 6개의 시험체를 항온항습챔버에 양생하면서 시험체 내부의 센서를 외부의 데이터 로거와 연결하여 시험체의 길이변화를 실시간으로 관찰하였다. 표 11과 그림 8은 길이변화 측정용 시험체에 매립된 센서를 통하여 측정된 재령 28일간의 변화를 나타내고 있다. 실험 결과를 관찰하면 혼화재를 사용한 경우가 OPC 만을 사용한 경우보다 길이변화가 작은 시험체도 보이나 그렇지 않은 경우도 많으며, B25-F15의 시험체가 가장 수축이 적은 것으로

표 11. 고강도콘크리트 시험체의 재령 28일시 길이변화율(x 10⁻⁶)

시험체 명	OPC100	B20-F15	B25-F10	B25-F15	B25-F20	B30-F15
길이변화율	-634	-678	-622	-530	-612	-600

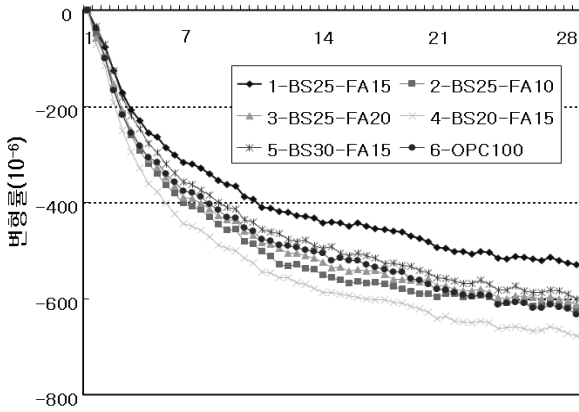


그림 8. 고강도콘크리트 시험체의 재령변화에 따른 길이변화

나타났다. 그러나 기 수행된 연구결과에서는 혼화재를 사용한 경우 길이변화에 불리하다는 자료가 대부분이다. 본 실험은 데이터로거를 통하여 측정된 값으로 센서를 사용하여 매우 미세한 움직임에도 영향을 받기 때문에 환경적인 변화에 의한 실험의 오차가 적용되었을 가능성도 있기 때문에 이러한 연구의 내용은 추후에 다시 실험을 통하여 규명되어야 할 것이다.

3.2.3 탄산화

탄산화는 온습도 등의 환경적 요인 외에도 고강도 콘크리트에서 사용하는 고로슬래그 미분말, 실리카폼, 플라이애시 등 혼화재의 치환율에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 본 실험을 통하여 혼화재를 사용한 설계기준압축강도 80MPa급 고강도 콘크리트에서의 탄산화 반응성에 대한 기초자료를 제시하고자 실험을 실시하였다.

탄산화 실험은 다음의 순서와 같으며, 측정재령은 7, 28, 56, 91일 각각 측정하였다.

- ① 공시체 제작 ⇒ ② 몰드탈형 ⇒ ③ 2주 수중양생 ⇒ ④ 2주 기건양생 ⇒ ⑤ 콘크리트 표면의 에폭시 처리 ⇒ ⑥ 콘크리트 탄산화 촉진 시험기에 투입 ⇒ ⑦ 시험체 절단 ⇒ ⑧ 시험체 절단면에 페놀프탈레인 용액 분무 ⇒ ⑨ 분무 후 색상변화 측정

그림 9는 위에서 기술한 탄산화 실험과정을 단계별로 나타내고 있다.

다음 표 12는 고강도콘크리트 시험체의 재령별 탄산화 측정 실험을 한 것으로 페놀프탈레인을 분무한 면이 모두 붉게 나타나 탄산화가 진행된 곳을 발견할 수 없었다. 그러므로 본 탄산화 실험을 통하여 고로슬래그 미분말이나 플라이애시의



그림 9. 고강도콘크리트 탄산화 실험 현황

종류에 상관없이 최대 혼입률 45%까지 사용하여도 탄산화가 발생하지 않는 것으로 나타나 설계기준압축강도 80MPa급 고강도 콘크리트에서는 탄산화 우려가 없는 것으로 나타났다.

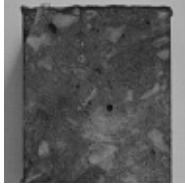
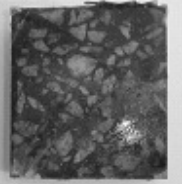
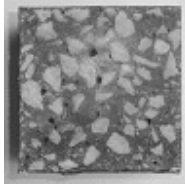
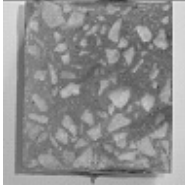

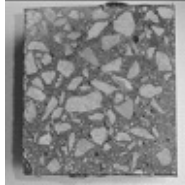
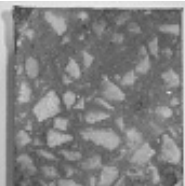
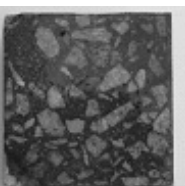
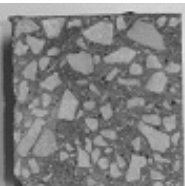
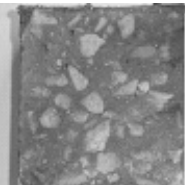

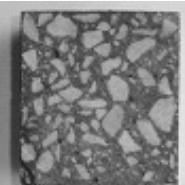
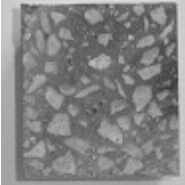
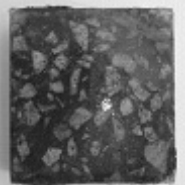
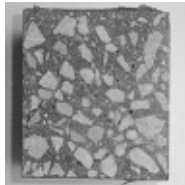

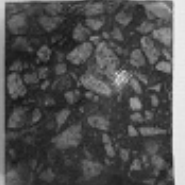
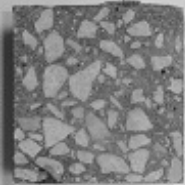
4. 결론

본 연구는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합한 경제적인 3성분계 콘크리트를 현장에 적용시키기 위하여 유동성과 고내구성을 모두 만족시킬 수 있는 배합을 도출하기 위한 실험으로써 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

① 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 혼입률이 커질수록 유동성 확보가 용이하였으며 혼입률이 작은 일부 시험체를 제외하고는 모두 목표로 하는 슬럼프플로 600mm를 만족하였다. 슬럼프플로 500mm 도달시간 또한 5초 내외로 짧은 시간에 분산되는 것을 확인할 수 있었으며, 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 50%까지 혼합하여도 재료분리가 발생하지 않는 것으로 나타나 현장적용을 위한 유동특성은 적합한 것으로 나타났다.

② 초기재령에서는 OPC만을 사용한 경우가 가장 높은 강

표 12. 고강도콘크리트 시험체 별 탄산화 발생여부

규격	측정일			탄산화 발생 깊이(mm) 및 발생유무(○,×)	
	7일	28일	56일		
OPC-100				0mm	×
B20-F15				0mm	×
B25-F10				0mm	×
B25-F15				0mm	×
B25-F20				0mm	×
B30-F15				0mm	×

도 값을 나타내나 재령 56일의 B25-F15 시험체의 경우 OPC 시험체의 강도 값에 118%에 이르는 장기강도 발현율을 보여 장기강도 측면에서는 OPC 단독 사용보다 3성분계의 결합재가 더 유리한 것으로 나타났다. OPC100 시험체를 제외한 모든 시험체의 경우 재령 58일의 경우에는 모두 목표강도 96MPa를 만족하였고 대부분의 시험체의 경우는 재령 56일 또는 91일에 할증계수 1.2를 고려한 목표강도 104MPa 값까지도 상회하는 것으로 나타났다.

③ 길이변화 측정결과 혼화재를 사용한 경우가 OPC만을 사용한 경우보다 길이변화에 더욱 저항적인 시험체도 있으

며, 그중 B25-F15의 시험체가 가장 수축에 저항적인 것으로 나타났다.

④ 혼화재의 혼입이 많은 시험체의 경우 발생할 수 있는 탄산화의 피해에 대한 우려로 탄산화 촉진시험을 시행하였으나, 고로슬래그 미분말이나 플라이애시의 종류에 상관없이 최대 혼입률 45%까지 사용하여도 탄산화가 발생하지 않는 것으로 나타나, 압축강도 100MPa급 초고강도 콘크리트에서는 탄산화에 우려가 없는 것으로 나타났다.

⑤ 실리카폼 사용에 따른 경제성 저하를 방지하기 위하여 OPC, 플라이애시, 고로슬래그 미분말의 삼성분계 결합재를

사용한 설계기준압축강도 80MPa급 고강도콘크리트의 제조에는 고로슬래그 대체율 20%, 플라이애시 대체율 15%가 적정 조합으로 평가되었다.

본 실험에서 실시한 실험항목 외에도 추가적 연구가 실행되어야 할 것이지만, 본 실험을 통하여 얻은 결과값으로는 현장적용을 위한 충분한 유동성 및 내구성을 만족하는 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 혼합한 경제적인 3성분계 배합을 확인하였다.

참고문헌

1. 오병환(2003), “고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 사용 시 유의사항”, 『시멘트』, 161: 24~27.
2. 이한승(2003), 「콘크리트용 혼화재로서 고로슬래그 미분말의 사용방안」, 대한건축학회 국제세미나, pp. 87~148.
3. 한국콘크리트학회(2005), 「최신 콘크리트 공학」, 기문당, pp. 496~499.
4. 한국토지주택공사(2007), 「고강도콘크리트를 이용한 초고층 공동주택 적용방안(Ⅱ)」, 국토해양부, pp. 6~23.