

초고강도 콘크리트의 특성에 미치는 시멘트 종류 및 혼화제 종류의 영향에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Influence of Types of Mineral Admixtures and Cement on the Properties of Ultra-High Strength Concrete

○ 김 덕 현* 강 훈** 이 상 수*** 송 하 영***
Kim Duk-Hyun, Kang Hoon, Lee Sang-Soo, Song Ha-Young,

Abstract

In this study, the experiment was carried out to investigate and analyze the strength properties and flowability of ultra-high strength concrete according to types of mineral admixtures and cements. The main experimental variables were water/binder ratio 25.0%, water content 160kg/m³ and mineral admixtures such as fly ash, silica fume and meta kaolin.

According to the test results, the principle conclusions are summarized as follows

- 1) In case of using admixtures, superplasticizer amount need more than plain concrete.
- 2) According to kinds of admixtures and cements, the viscosity of concrete show much difference.
- 3) The autogeneous shrinkage of ultra-high strength concrete is profitable that use admixture, and heat of hydration is desirable that apply considering countermeasure enough in the advance.
- 4) Meta kaolin is excellent in side but has viscosity enlargement efficiency a little. But, problem estimates that is not to make design strength 60 and 70N/mm² if use mixing condition with water-binder ratio properly.

키워드 : 자기수축, 메타카올린, 점성, 초고강도 콘크리트

Keywords : autogeneous shrinkage, meta kaolin, viscosity, ultra-high strength concrete

1. 서론

최근 도심지에서는 토지의 고도이용 및 건축물의 용적을 증대, 조망권의 확보, 내구년한의 증대 등을 위해 초고층의 주상복합구조물 건설이 활발히 추진되고 있다. 이와 같이 주상복합구조물의 고층화 경향에 따라 고강도 콘크리트의 사용도 증대되어가고 있다. 고강도 콘크리트의 적용은 고층화를 가능하게 할 뿐만 아니라 대스팬화 및 부재단면의 감소에 의한 건물의 경량화·유효단면의 확대 등의 효과도 기대할 수 있다. 그러나 아직까지는 국내의 경우, 시공경험 부족, 품질 및 시공관리에 대한 불확실성 등으로 고강도 콘크리트의 사용을 회피하고 있는 실정이다. 지금까지 국내에 적용되고 있는 고강도 콘크리트는 40~50N/mm² 정도로서 선진국의 적용한 실적과 비교하면 강도범위가 미미한 수준에 불과하다. 그러나 앞으로는 구조물의 초고층화 추세에 따라 60~80N/mm²인 초고강도 콘크리트의 사용이 증대될 것으로 예상된다.^{1),2)}

따라서, 본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 개발을 위한 목표강도를 향후 건설현장 적용을 고려하여 설계기준 강도 80N/mm²로 설정하고 각 시멘트 종류 및 혼화제 종류별 조합조건에 따른 유동특성 및 강도발현 성상을 비롯한 제공학적 특성을 검토함으로써 향후 초고강도 콘크리트의 실용화를 위한 기초자료로서 제시하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

각종 배합조건별 초고강도 콘크리트의 특성을 검토하기 위해 실험계획을 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. 실험계획

항 목		조 건
물-결합재비(W/B:%)		25.0
단위수량(kg/m ³)		160
시멘트 종류		보통시멘트(opc), 슬래그시멘트(slc)
혼화제 종류 및 치환율		FA10, SF10, MK10, FA10+SF10, FA10+MK10, SF10+MK10
시험 항목	굳지않은 콘크리트	슬럼프플로우, 유화시간, 자기수축, 수화열
	굳은 콘크리트	압축강도(3, 7, 28, 56일)

본 실험에서는 초고강도 콘크리트의 자기충전성, 유동성 및 강도측면을 고려하여 굵은골재 최대치수 20mm를 선정하여 실시하였고, 물-결합재비 25.0%, 단위수량 160 kg/m³를 대상으로 시멘트 및 혼화재료의 종류에 따른 이 성분계 및 삼성분계를 검토하기로 하였으며, 혼화제의 치환율은 유동성 및 강도를 고려하여 10%로 검토하였다. 한편, 초고강도 콘크리트의 요구성능을 표 2와 같이 설정하였다.

*정회원, 한밭대학교 건축공학과 석사과정
**정회원, 하이믹스산업(주), 이사
***정회원, 한밭대학교 건축공학과 교수, 공박

표2. 초고강도 콘크리트의 요구성능

항 목	목 표 치	비 고
설계기준강도(N/mm ²)	80	
배합강도(N/mm ²)	96	할증계수 1.2 고려
슬럼프플로우(cm)	65±10	자기충전성 고려
공기량(%)	3.0±1.5	강도 고려
유하시간(sec)	20±10	점성 고려

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 영월산 H사에서 제조된 KS L 5201규정의 보통 포틀랜드시멘트(I종)을 사용하였으며, 그의 물리·화학적 성질은 표 3과 같다.

혼화제에 있어서 플라이애쉬는 보령산 F급을 사용하였으며, 실리카 흙은 체코슬로바키아산을, 메타카올린은 국내 A사에서 제조된 것을 사용하였다. 그 물리·화학적 성질은 각각 표 4, 표 5, 표 6과 같다.

표3. 시멘트의 물리·화학적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm/g)		용결시간 (h:m)		강열감량 (%)		안정도 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			주성분(%)					
		초결	종결	초결	종결	3일	7일		28일	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
OPC	3.15	3,419	5:19	7:04	0.99	0.08	223	298	376	22.6	5.8	3.2	61.9	2.7	2.2		
SLC	3.02	4,140	3:40	7:25	0.72	0.04	181	271	425	31.7	10.3	1.7	52.6	-	2.7		
KS L 5201	-	≥ 2,800	≥ 1h	≤ 10h	≤ 3.0	≤ 0.8	≥ 130	≥ 200	≥ 290	-	-	-	-	≤ 5	-		

표4. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

혼화제 종류	비중	분말도 (cm/g)	강열감량 (%)	습분 (%)	강도비 (%)	주성분(%)					
						28일	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
F급	2.20	3,639	3.4	0.11	82	53.6	26.5	9.0	2.5	1.3	1.1
KS F 5405	-	≥ 2,400	≤ 5.0	≤ 1.0	≥ 60	≥ 45	-	-	-	-	-

표5. 실리카 흙의 물리·화학적 성질

혼화제 종류	비중	분말도 (m ² /g)	강열감량 (%)	염화이온 (%)	활성도 지수(%)	주성분(%)					
						7일	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
실리카 흙	2.30	22	1.3	0.19	99	92.6	0.7	1.69	0.31	1.03	0.15
KS F 2567	-	≥ 15	≤ 5.0	≤ 0.3	≥ 95	≥ 85	-	-	-	≤ 5	≤ 3

표6. 메타카올린의 물리·화학적 성질

혼화제 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	안정도 (%)	활성지수(%)		화학적 조성(%)		
						7일	28일	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O+0.658K ₂ O
MK (N급)	2.53	10,000	1.95	0.63	0.08	92	92	93.7	0.11	0.68
ASTM C 618	-	≥ 2,800	≤ 10	≤ 3	≤ 0.8	≥ 75	≥ 70	≤ 4	≤ 1.5	-

골재의 경우는 잔골재는 인천산의 세척사를 사용하였으며, 굵은골재는 광주산의 부순자갈을 사용하였다. 또한 고성능감수제의 경우 국내 D사의 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용하였다. 그 물리적 성질은 각각 표 7 및 표 8과 같다.

표7. 골재의 물리적 성질

구분	최대입경 (mm)	조립율 (F.M)	표준비중	흡수율 (%)	씻기 손실량 (%)	실적율 (%)	단위용적 중량 (kg/ℓ)	비고
잔골재	KS F 2526	5	-	≥ 2.50	≤ 3.0	≤ 3.0	-	-
	시험값	20	7.05	2.61	0.81	0.7	57.4	1,558
굵은골재	KS F 2527	20	-	≥ 2.50	≤ 3.0	≤ 1.0	-	-
	시험값	20	7.05	2.61	0.81	0.7	57.4	1,558

표8. 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제 종류	물리적 성질				품질성능						
	색상	주성분	pH	비중	감수율 (%)	블리딩량비 (%)	응결시간차 (min)		압축강도비 (%)		
							초결	종결	3일	7일	28일
고성능 감수제 (표준형)	흰색	폴리카르본산계 (고축합형)	7.0	1.212	23.0	49.0	-15	-10	142	137	126
KS F 2560	-	-	-	-	≥ 18	≤ 60	-30 ~ +120	-	≥ 135	≥ 125	≥ 115

3. 실험방법 및 콘크리트의 배합

3.1 실험방법

초고강도 콘크리트의 실내배합시험은 팬형의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료투입은 단위결합재량이 많은 초고강도 콘크리트이기 때문에 재료의 균질성을 위하여 선모르타르방법을 사용하였다. 비빔시간은 건비빔 30초, 선모르타르 비빔 60초, 콘크리트 비빔 150초로서 총 240초(4분)로 하였다. 고성능감수제의 사용량은 목표 슬럼프 플로우를 확보하기 위한 최소의 양을 사용하였다.

굳지않은 콘크리트에 대한 슬럼프플로우시험은 JASS 5T-503 및 JSCE-F 503, 공기량 시험은 KS F 2421, O형 유하시험은 일본토목학회 콘크리트 기술시리즈 No. 15의 시험방법에 따라서 실시하였다. 또한 초고강도 콘크리트의 재령별 압축강도를 측정하기 위하여 압축강도 측정용 ϕ10×20cm 공시체를 제작하였다. 24시간 후에 물드를 탈형한 다음, 공시체는 소요의 재령까지 20±3℃의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

표9. 초고강도 콘크리트의 배합표(플레인 콘크리트 : OPC)

물-결합제비 (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)					
			시멘트	플라이애쉬	실리카흙	메타카올린	잔골재	굵은골재
25.0	42.0	160	640	-	-	-	679	949

3.2 콘크리트의 배합

초고강도 콘크리트의 유동성 및 점성을 비롯한 각종 공학적 특성을 알아보기 위해 선정된 플레인 콘크리트의 배합표는 표 9와 같다. 대상 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트 및 슬래그 시멘트로서 물-결합제비 25.0%를 선정하였고 단위수량은 160kg/m³를 대상으로 평가하도록 하였다. 한편 혼화제 종류에 따른 초고강도 콘크리트 특성을 알아보기 위하여 단위시멘트량에 대한 대체재로서 사용하였으며, 치환율은 강도특성을 고려하여 플라이애쉬, 실리카 흙 및 메타카올린 10%를 이성분계 및 삼성분계로 치환하였다. 잔골재율은 단위결합재량이 많은 초고강도

콘크리트라 할지라도 골재의 조건에 따라 적정하다고 평가되는 42.0%를 선정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지않은 콘크리트의 성상

초고강도 콘크리트의 유동성을 알아보기 위한 슬럼프 플로우의 시험결과를 그림-1에 나타난 바와 같다. 목표 슬럼프플로우를 만족하기 위한 각 배합조건별 고성능감수제의 사용량은 다소 차이를 나타내고 있었다. 일반적으로 혼화제를 사용한 경우가 플레인 콘크리트보다 고성능감수제의 사용량이 증대되는 경향을 보이고 있다. 특히, 메타카올린을 사용한 경우에는 전반적으로 높은 고성능감수제량을 나타내고 있어, 화학조성, 치환율 및 분말도에 따른 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

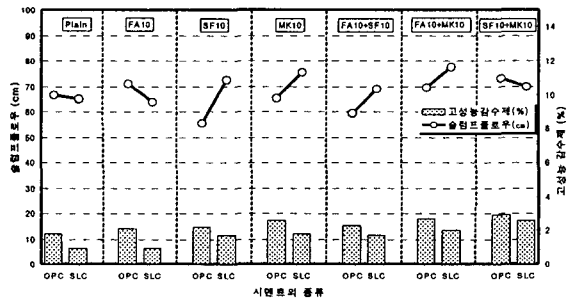


그림1. 굳지않은 콘크리트의 슬럼프플로우 특성

시멘트 종류에 따른 고성능감수제의 사용량은 보통시멘트를 사용한 경우보다 슬래그시멘트를 사용한 것이 감소하는 경향을 보이고 있었다. 이는 슬래그 미분말이 곧바로 전면적인 수화를 개시하지 않는다거나 유리질로 평활한 입자표면을 갖고 있어 모르타르의 전단 미끄럼면을 형성하여 윤활기능을 부여하였기 때문으로 사료된다.

한편, 슬럼프플로우와 유하시간의 관계를 그림-2에 나타난 바와 같이, 목표 슬럼프플로우에 따른 유하시간은 각 배합조건별로 커다란 차이를 보이고 있다.

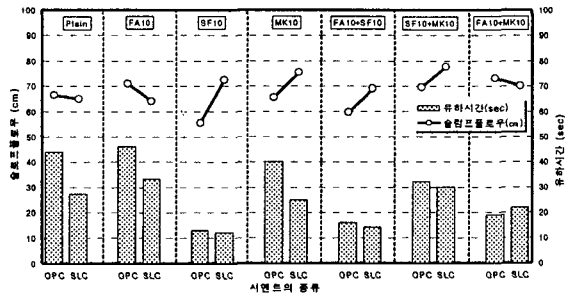


그림2. 굳지않은 콘크리트의 슬럼프플로우 유하시간 특성

일반적으로 유하시간은 콘크리트의 점성을 간접적으로 평가하는 방법으로서 본 시험결과에서 나타난 바와 같이, 목표 슬럼프플로우값이 유사할 지라도 콘크리트의 구성재료 즉, 혼화제의 종류에 따라 콘크리트의 점성은 커다

란 차이를 보인다는 것을 알 수 있다.

특히, 실리카 흙 및 슬래그시멘트를 사용한 경우가 낮은 점성을 확보하고 있는 경향을 보이고 있다. 따라서, 분체량이 많은 초고강도 콘크리트에서는 워커빌리티 확보에 유리할 것으로 판단된다. 결국, 콘크리트의 워커빌리티는 유동성 및 점성의 적절한 조화가 이루어져야만 양호한 충전성을 확보할 수 있기 때문에 점성은 일반강도 콘크리트에서 중요하지 않았지만 초고강도 콘크리트에서는 중요한 품질항목이라고 할 수 있다.

따라서, 초고강도 콘크리트의 컨시스턴시는 유동성측면보다는 점성측면에서 만족하는 배합조건을 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.2 굳은 콘크리트의 성상

초고강도 콘크리트의 강도발현 성상을 그림-3에 나타내고 있는 것처럼, 혼화제를 사용한 경우가 초기강도에서는 낮은 강도발현을 보이고 있지만 장기강도에서는 플레인 콘크리트보다 양호한 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 이는 혼화제를 사용함에 따른 장기재령에서의 포졸란 반응에 의한 영향으로 판단된다.

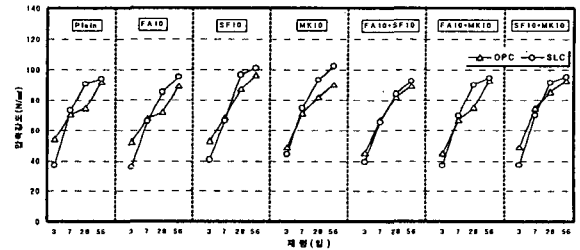


그림3. 굳은 콘크리트의 강도발현성상

따라서, 초고강도 콘크리트의 강도관리재령은 기존의 28일 강도로 평가하기보다는 56일 및 91일에 평가하는 것이 구조물에 적용되는 초고강도 콘크리트의 성능 및 경제성차원에서 바람직할 것으로 여겨진다.

한편, 시멘트 종류에 따른 각 혼화제별 강도발현성상은 전반적으로 보통시멘트의 경우에 초기강도발현이 높은 반면에 슬래그시멘트의 경우에는 장기강도 발현율이 높아 재령 7일이 지나면 강도역전현상을 나타내고 있었다.

또한 혼화제 종류에 따른 강도발현 성상은 실리카 흙 및 메타카올린을 사용한 콘크리트의 경우만 압축강도 100N/mm² 이상을 확보하고 있어 초고강도 콘크리트 영역의 혼화제로서 활용성이 클 것으로 예상된다.

4.3 자기수축 및 수화열 특성

각종 혼화제 종류에 따른 자기수축시험 결과를 그림-4에 나타난 바와 같다. 본 시험결과, 보통시멘트만을 대상으로 실시한 결과, 플레인 콘크리트에 비하여 각종 혼화제를 사용한 경우가 수축량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 혼화제의 치환율에 따라 단위시멘트량이 감소하므로서 나타난 결과로 판단되며, 특히 MK10+FA10 및 MK10+SF10과 같은 삼성분계의 경우가 플레인 콘크리트보다 약 1/2정도 감소하는 결과가 나타나고 있었다. 따라서, 각종 혼화제를 사용한 초고강도 콘크리트의 경우가

플레인 콘크리트에 비하여 상당히 낮은 수축량을 보이고 있어 초기재령에서의 자기수축에 의한 균열발생확률은 상대적으로 감소할 수 있으리라 사료된다.

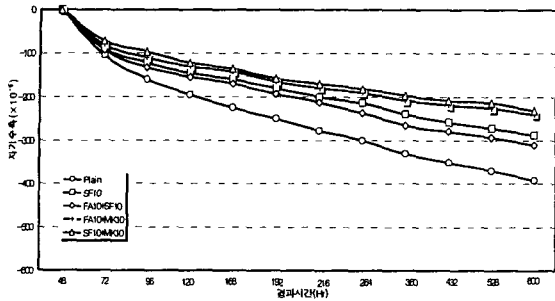


그림4. 혼화제 종류별 자기수축 특성

한편, 초고강도 콘크리트의 수화특성을 알아보기 위하여 실대부재시험을 제작하여 간이단열양생조건하에서 온도이력특성을 검토하였다.

각 배합조건별 초고강도 콘크리트의 온도이력곡선은 그림-5에 나타난 바와 같다.

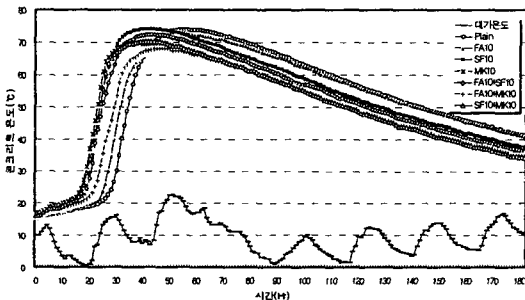


그림5. 혼화제 종류별 온도이력곡선(중심부)

그림에서 나타난 바와 같이, 온도이력곡선은 초기재령에서 완만한 온도상승을 보이다가 재령 1일 후에 급격한 온도상승을 나타내고 있다. 최고온도는 각 배합조건별로 약간 차이를 보이고 있지만 70~75°C 정도를 나타내고 있다. 최고온도와 외기온과의 온도차는 50°C 이상을 보이고 있어 매시브한 구조물에 적용될 경우에는 온도균열의 발생이 클 것으로 예상될 것으로 여겨진다.

이러한 단열온도상승시험의 결과를 $Q(t) = K(1 - e^{-at})$ (여기서, $Q(t)$ 는 재령 t 일에서의 단열온도상승량, K 는 최종단열온도상승량, a 는 온도상승속도)와 같은 e 함수 형태로 표현되어 온도해석을 위한 입력치로 이용되기 때문에, 콘크리트 수화열 해석에 있어서 기본적인 실험치라고 할 수 있다. 그러나 상기 식은 초기재령에서의 온도이력특성을 제대로 파악되지 않았다는 문제점이 있어 향후에는 이를 보완할 수 있는 단열온도상승식의 정립이 필요하다고 하겠다.

각종 혼화제 종류에 따른 온도이력에서 최고온도는 플레인 및 SF10를 사용한 콘크리트가 가장 높게 나타내고 있었으며, 이성분계보다는 삼성분계의 초고강도 콘크리트

가 혼화제 치환량의 영향으로 인해 수화열 제어효과는 크다고 할 수 있다.

한편, 콘크리트의 거푸집 해체시기는 콘크리트의 내외부 온도차를 25°C 이내로 되는 시점에서 적용하는 것이 바람직할 것으로 여겨지기 때문에 본 실험결과에서는 재령 7.5일 후에 실시하는 것이 타당하리라고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 각종 시멘트 및 혼화제 종류별 초고강도 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 대한 일련의 실험으로서 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초고강도 콘크리트의 유동성을 알아보기 위한 슬럼프 플로우의 시험결과, 혼화제를 사용한 경우가 플레인 콘크리트보다 고성능감수제의 사용량이 증대되는 경향을 보이고 있으며, 특히, 메타카올린을 사용한 경우는 전반적으로 높은 고성능감수제량을 나타내고 있다.
- (2) 목표 슬럼프플로우에 따른 유하시간은 혼화제의 종류에 따라 콘크리트의 점성이 커다란 차이를 보이고 있다. 특히 실리카 흙을 사용한 경우가 낮은 점성을 보이고 있어 단위결합재량이 많은 초고강도 콘크리트의 워커빌리티 확보에 유리한 것으로 판단된다.
- (3) 강도발현 성상을 살펴보면, 혼화제를 사용한 경우가 초기강도에서는 낮은 강도발현을 보이고 있지만 재령 7일 이후에서는 플레인 콘크리트보다 높은 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 또한, 슬래그시멘트를 사용한 이성분계 배합조건(SF10, MK10)에서는 압축강도 100N/mm² 이상을 발현하고 있어, 앞으로 초고강도 콘크리트 영역에서의 활용성이 클 것으로 여겨진다.
- (4) 실리카 흙의 대체재로서 검토된 메타카올린은 강도측면에서는 우수하나 다소 점성증대 효과를 가지고 있으나 물-결합제비 등 배합조건을 적절히 사용하면 설계기준강도 60 및 70N/mm²을 제조하는 데 문제는 없을 것으로 판단되며, 향후에는 경제성이 우수한 메타카올린의 활용성이 매우 높을 것으로 여겨진다.

참고 문헌

- 1) 박철림의 3인, "혼화제를 사용한 고강도 콘크리트의 품질개선에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 제5권1호, 1993.3 pp.79~88.
- 2) 이상수, 원철, 김동석, 박상준, "초고층아파트 시공을 위한 고강도 콘크리트의 배합설계 및 품질관리", 대한건축학회 추계학술발표 논문집 제20권2호, 2000. 10, pp.467~470
- 3) 김진만, 김동석, 이상수, "메타카올린을 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집 제15권1호, 2003. 5, pp.47~52.
- 4) Hee-Yong Choi, Hey-Zoo Hwang, Moo-Han Kim and Moon-Han Kim, "Activating Temperature of Kaolin As a Cement Admixture," KCI Concrete Journal, Vol.13, No.1, 2001, pp.3~9.