

배합강도 100N/mm²인 초고강도 콘크리트의 레미콘 생산성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Ready-mixed concrete Production of
Ultra-High Strength Concrete with Mixing Strength of 100N/mm²

정 진* 진 용 만** 강 훈*** 이 상 수****

Jung Jin, Jin Yong-Man, Kang Hoon, Lee Sang-Soo

ABSTRACT

In this study, the experiment was carried out to investigate and analyze the ready-mixed concrete production of ultra-high strength concrete with mixing strength of 100N/mm² according to types of mineral admixtures. 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) even if it secures similar slump, the viscosity appear to difference by mixing condition relatively.
- 2) The autogenous 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.
- 3) The concrete that use SF10+MK10 on 56days could confirm that it is possible that achieve compressive strength more than 100N/mm² under mixing conditions that is appearing by compressive strength 102.7N/mm².

1. 서론

최근 주상복합구조물의 고층화 경향에 따라 고강도 재료의 사용도 증대되어가고 있다. 고강도 재료의 적용은 고층화를 가능하게 할 뿐만 아니라 대스팬화 및 부재단면의 감소에 의한 건물의 경량화·유효단면의 확대 등의 효과도 기대할 수 있다. 고강도 재료 중 콘크리트의 고강도화는 초고층 주상복합구조물에서는 필수 불가결한 재료임에 틀림없다. 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 100N/mm²로 설정하고 각 혼화재 종류별 배합조건에 따른 유동특성 및 강도발현 성상이 레미콘 공장에서의 생산성에 미치는 영향에 대한 검토를 통하여 향후 초고강도 콘크리트의 실용화를 위한 기초자료로 제시하는데 그 목적을 두었다.

*정회원, 하이믹스산업(주), 차장

**정회원, 동남기업(주), 부장

***정회원, 하이믹스산업(주), 이사

****정회원, 한밭대학교 건축공학과 교수, 공박

2. 실험개요

2.1 실험계획

레미콘 공장에서의 생산성을 알아보기 위한 초고강도 콘크리트의 실험계획을 표 1과 같이 설정하였다.

본 실험에서는 초고강도 콘크리트의 자기충전성, 유동성 및 강도측면을 고려하여 굵은골재 최대치수를 20mm를 선정하였고, 배합조건으로는 배합강도 100N/mm²를 달성하기 위하여 실내시험에서 검토된 물-결합재비 25.0 및 단위수량 160kg/m³를 대상으로 하였으며, 혼화재료의 종류는 플라이애쉬, 실리카 흙, 메타카올린^{3),4)} 등을 선정하여 이성분계 및 삼성분계에 대한 검토를 수행하였다. 혼화재의 치환율은 유동성 및 강도를 고려하여 단위결합재 중량의 10%로 선정하였다. 한편, 초고강도 콘크리트의 요구성능을 표 2와 같이 설정하였다.

2.2 사용재료

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

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

골재는 레미콘 공장에서 일반 콘크리트에 사용되고 있는 상태의 골재로서, 잔골재는 조립율이 2.83인 인천산의 세척사를 사용하였으며, 굵은골재는 경기도 광주산의 20mm인 부순자갈을 사용하였다. 또한 고성능감수제는 국내 D사의 폴리카르본산계 제품을 사용하였다. 그의 물리적 성질은 각각 표 7 및 표 8과 같다.

2.3 레미콘의 제조 및 실험방법

초고강도 콘크리트를 생산하기 위한 레미콘의 제조는 기존의 일반 콘크리트에 적용되고 있는 횡형

표 1 실험계획

항 목		조 건
물-결합재비(W/B:%)		25.0
단위수량(kg/m ³)		160
혼화재 종류 및 치환율		FA10, SF10, MK10(이성분계), FA10+SF10, FA10+MK10, SF10+MK10(삼성분계)
시험 항목	굳지않은 콘크리트	슬립프플로우, 유하시간, 공기량, 경시변화(0, 30, 60, 90분)
	굳은 콘크리트	압축강도(3, 7, 28, 56일) 자기수축, 수화열

표 2 초고강도 콘크리트의 요구성능

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

표 3 시멘트의 물리·화학적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	용결시간 (h:m)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			주성분(%)					
			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
KS L 5201	-	≥ 2,800	≥ 1h	≤ 10h	≤ 3.0	≤ 0.8	≥ 130	≥ 200	≥ 290	-	-	-	-	≤ 5	-

표 4 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

혼화재 종류	비중	분말도 (cm ² /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	-	-	-	-	-

표 5 실리카 흙의 물리·화학적 성질

혼화재 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

표 6 메타카올린의 물리·화학적 성질

혼화재 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	안정도 (%)	활성지수(%)		화학조성(%)		
						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	

2축 강제식 믹서를 사용하였다.

배합방법 및 배합량은 단위결합재량이 많은 초고강도 콘크리트이기 때문에 재료의 균질성 확보 및 믹서의 부하를 줄이기 위하여 선모르타르방법 및 2m³/batch로 선정하였으며, 배합시간은 콘크리트의 비빔성능을 확보하기 위하여 일반 콘크리트의 2배인 90초로 하였다.

레미콘 생산시 굳지않은 콘크리트에 대한 슬럼프플로우시험은 JASS 5T-503 및 JSCE-F 503, 공기량 시험은 KS F 2421, ○형 유하시험은 일본토목학회 콘크리트 기술시리즈 No. 15의 시험방법에 따라서 실시하였다.

한편, 초고강도 콘크리트의 수화열 특성 및 자기수축특성을 알아보기 위하여 1,000mm×1,000mm×1,000mm 및 100mm×100mm×400mm의 크기로 시험체를 제작하여 계측기를 이용, 재령별 온도이력 및 수축변형을 알아보았다.

2.4 콘크리트의 배합

초고강도 콘크리트의 유동성 및 점성을 비롯한 각종 공학적 특성을 알아보기 위해 실내시험단계에서 수차례의 시험을 통하여 선정된 콘크리트의 계획배합은 표 9와 같다.

한편, 레미콘 공장에서 적용된 배합은 본 계획배합에 골재의 입도보정 및 표면수보정을 실시하였으며, 특히, 초고강도 콘크리트에서는 표면수의 영향이 크기 때문에 골재의 표면수율을 5% 이하로 사전에 충분히 관리하도록 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 심상

초고강도 콘크리트의 생산성능을 알아보기 위하여 레미콘공장의 배척플랜트 실기시험을 실시하였다.

레미콘공장 실기시험결과, 초기 슬럼프플로우치는 각 배합조건별로 차이를 보이고 있었지만 전반적으로 60~80cm 범위를 나타내고 있었다.

이와 같이 목표성능치보다 다소 높은 값을 보이고 있는 것은 고성능감수제 첨가율에 따른 영향이며, 본 배합에서의 고성능감수제의 첨가율은 2.0~2.4% 범위에 있었다.

표 7 골재의 물리적 성질

구분	최대입경 (mm)	조립율 (F.M)	표준비중	흡수율 (%)	씻기손실량 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비고	
잔분재	시험값	5	2.83	2.58	0.20	0.6	-	1,450	세척사
	KS F 2526	5	-	≥2.50	≤3.0	≤3.0	-	-	
굵은골재	시험값	20	7.05	2.61	0.81	0.7	57.4	1,558	부순자갈
	KS F 2527	20	-	≥2.50	≤3.0	≤1.0	-	-	

표 8 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제 종류	물리적 성질				품질성능						
	색상	주성분	pH	비중	감수율 (%)	블리딩량비 (%)	용결시간차 (min)		압축강도비 (%)		
							초결	종결	3일	7일	28일
고성능 감수제	열은 황색	폴리카르본계	7.0	1.212	23.0	49.0	-15	-10	142	137	126
KS F 2560	-	-	-	-	≥18	≤60	-30~+120	≥	≥	≥	

표 9 초고강도 콘크리트의 계획배합

물-결합재비 (%)	잔골재율 (%)	혼화제 종류	단위수량 (kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)					
				시멘트	플라이애쉬	실리카흄	메타카올린	잔골재	굵은골재
25.0	42.0	Plain	160	640	-	-	-	679	949
		FA10	576	64	-	-	670	936	
		SF10	576	-	64	-	671	938	
		MK10	576	-	-	64	674	941	
		FA10+SF10	512	64	64	-	662	924	
		FA10+MK10	512	64	-	64	664	928	
		SF10+MK10	512	-	64	64	666	930	

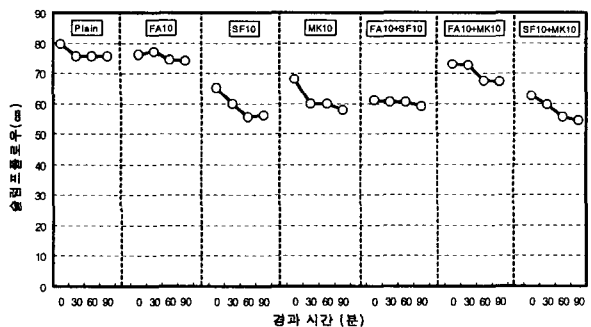


그림 1 경시변화에 따른 슬럼프플로우 특성

경시변화에 따른 슬럼프플로우 시험결과를 그림 1에 나타낸 바와 같이, 각 혼화재 종류별로 약간 차이를 보이고는 있지만 경시변화량은 슬럼프플로우 10cm 이하로서 매우 양호한 성능을 보이고 있었다. 이는 유지성능 및 감수성능이 우수한 폴리카르보산계 고성능감수제를 사용하므로서 나타난 결과이다. 따라서, 운반시간에 따른 콘크리트의 품질변동에는 커다란 문제가 없을 것으로 사료된다.

또한, 경시변화에 따른 유하시간 시험결과는 그림 2에 나타내고 있는 것처럼, 혼화재 종류에 따라 커다란 차이를 보이고 있었다. 유하시간은 콘크리트의 점성을 간접적으로 판단하는 지표로서 자기충전성을 목적으로 하는 콘크리트의 경우에 평가하는 새로운 시험방법이라 할 수 있다. 본 실험결과에서도 나타내고 있듯이, 유사한 유동성을 확보하고 있다할 지라도 점성이 상대적으로 차이를 보이고 있다는 것은 각 배합조건별로 자기충전성 효과가 다르다는 것을 의미한다.

이는 각 배합조건별 결합재의 구속수비 및 변형계수 차이에 따른 영향으로 판단된다. 따라서, 충전성을 고려한 초고강도 콘크리트에서는 무엇보다도 혼화재의 특성에 따른 영향이 크기 때문에 이를 사전에 충분히 검토한 후 선정하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

한편, 경과시간에 따른 공기량 시험결과를 알아 보면, 그림 3에 나타난 바와 같이, FA10+MK10을 제외하고는 경과시간이 증가할 수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 경과시간 30분까지 공기량 감소가 가장 크게 나타내고 있었다.

전반적으로 경과시간에 따른 공기량 감소는 콘크리트 자체의 점성증가와 상호 연관성이 있을 것으로 사료된다.

3.2 자기수축 및 수화열 특성

콘크리트가 고강도화 됨에 따라 문제점으로 대두되고 있는 것이 자기수축 및 수화열에 관한 사항이다. 일반적으로 콘크리트를 고강도화 시킬려면 물-시멘트비 저감을 위한 단위시멘트량의 증가가 필수적이기 때문에 이에 따른 자기수축 및 수화열의 증가도 예상된다. 이러한 콘크리트의 성상은 경화후의 콘크리트 균열을 초래하기 때문에 이에 대한 검토가 사전에 충분히 이루어져야 할 것이다.

각종 혼화재 종류에 따른 자기수축시험 결과를 그림 4에 나타낸 바와 같이, 플레인 콘크리트에 비하여 각종 혼화재를 사용한 경우가 수축량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 혼화재의 치환율에 따라 단위시멘트량이 감소하므로서 나타난 결과로 판단되며, 특히 MK10+FA10 및 MK10+SF10과 같은 삼

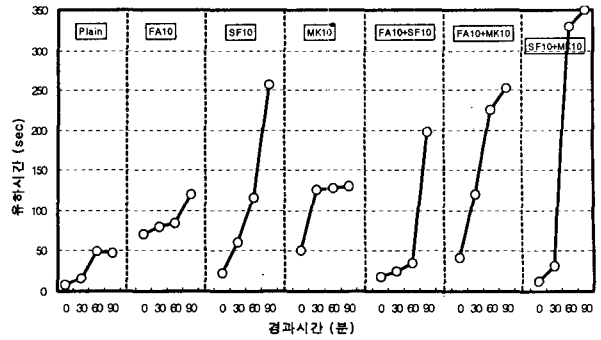


그림 2 경시변화에 따른 유하시간 특성

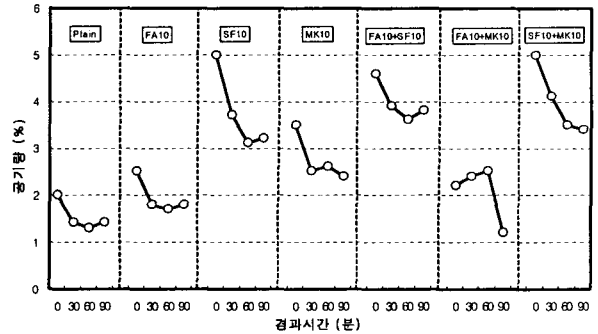


그림 3 경시변화에 따른 공기량 특성

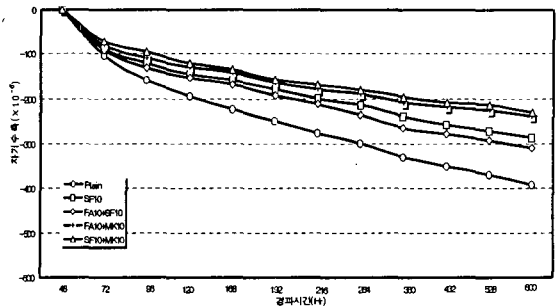


그림 4 혼화재 종류별 자기수축 특성

성분계의 경우가 플레인 콘크리트보다 약 1/2정도 감소하는 결과로 나타나고 있었다.

따라서, 각종 혼화재를 사용한 초고강도 콘크리트의 경우가 플레인 콘크리트에 비하여 상당히 낮은 수축량을 보이고 있어 초기재령에서의 자기수축에 의한 균열발생확률은 상대적으로 감소할 수 있으리라 사료된다.

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

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

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℃ 정도를 나타내고 있다. 최고온도와 외기온과의 온도차는 50℃ 이상을 보이고 있어 매시브한 구조물에 적용될 경우에는 온도균열의 발생이 클 것으로 예상된다고 하겠다. 따라서, 초고강도 콘크리트를 적용할 경우에는 사전에 수화열 제어대책을 충분히 검토하는 것이 바람직할 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 않는다는 문제점이 있어 향후에는 이를 보완할 수 있는 단열온도상승식의 정립이 필요하다고 하겠다.

각종 혼화재 종류에 따른 온도이력에서 최고온도는 플레인 및 SF10을 사용한 콘크리트가 가장 높게 나타나고 있었으며, 이성분계보다는 삼성분계의 초고강도 콘크리트가 혼화재 치환량의 영향으로 인해 수화열 제어효과는 크다고 할 수 있다.

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

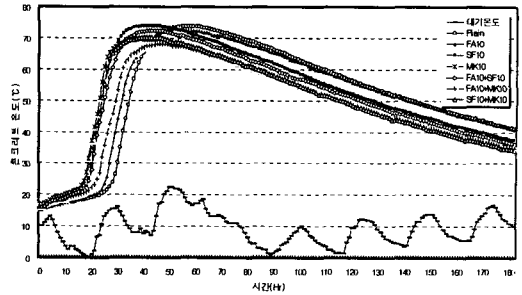


그림 5 혼화재 종류별 수화열 특성(중심부)

3.3 재령별 강도발현성상

레미콘 공장에서의 생산성 시험결과, 압축강도는 그림 6에서 나타내고 있듯이 재령 28일에 72.4~93.8N/mm²의 범위를 나타내고 있었으며, 특히 플레인 콘크리트보다는 상위한 값을 나타내고 있다. 혼화재 종류에 따른 강도특성에서는 SF10 및 SF10+MK10를 사용한 경우가 가장 높은 강도를 발현하고 있는 것으로 나타났다. 실대시험배합에 나타난 강도특성과 비교할 경우에는 압축강도 5~10N/mm² 정도로 적게 강도발현을 하고 있어 레미콘 공장에서의 원재료관리 및 제조관리 등 전반적인 품질관리를 철저히 행하여 품질변동에 따른 편차를 줄일 수 있도록 관리하지 않으면 안 될 것으로 판단된다.

재령 56일에서의 압축강도 발현성상은 실리카 흙을 사용한 이성분계 또는 실리카 흙 및 메타카올린을 혼용한 삼성분계의 경우가 압축강도 100.3N/mm² 및 102.7N/mm²로 나타나 본 배합조건에서도 100N/mm²

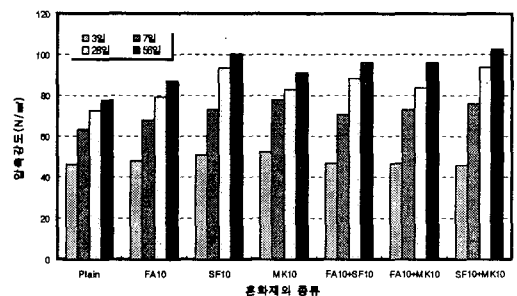


그림 6 재령별 압축강도 특성

이상의 압축강도를 달성하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

배합강도 100N/mm²의 초고강도 콘크리트를 레미콘 공장에서의 생산성을 알아보기 위하여 콘크리트의 유동특성 및 강도특성을 비롯한 각종 공학적 특성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기 슬럼프플로우치는 각 배합조건별로 고성능감수제의 첨가율에 따라 전반적으로 60~80cm범위를 나타내고 있었으며, 경시변화량은 전반적으로 슬럼프플로우 10cm 이하로서 매우 양호한 성능을 보이고 있었다.
- (2) 유사한 슬럼프플로우치를 확보하고 있다할 지라도 배합조건별로 점성이 상대적으로 차이를 보이고 있었다. 따라서, 충전성을 고려한 초고강도 콘크리트에서는 무엇보다도 혼화제의 특성에 따른 영향이 크기 때문에 이를 사전에 충분히 검토한 후 선정하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.
- (3) 초고강도 콘크리트의 자기수축특성은 플레인 콘크리트에 비하여 각종 혼화제를 사용한 경우가 수축량이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 MK10+FA10 및 MK10+SF10과 같은 삼성분계의 경우가 플레인 콘크리트보다 약 1/2정도 감소하는 결과로 보이고 있었다.
- (4) 초고강도 콘크리트의 수화특성은 플레인 및 SF10을 사용한 콘크리트가 가장 높은 상승온도를 나타내고 있었으며, 전반적으로 내외부 온도차가 50℃ 이상을 나타내고 있어 현장적용시 사전에 이에 대한 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다. 또한, 수화열 해석을 위하여 현행 시방서에서 제시한 단열온도상승식은 초기재령에서의 온도이력특성을 정확히 파악하지 않고 있기 때문에 새로운 단열온도상승식의 정립이 필요할 것으로 여겨진다.
- (5) 초고강도 콘크리트의 강도특성은 재령 28일에 72.4~93.8N/mm²의 범위를 나타내고 있었으며, 특히 재령 56일에서의 압축강도 발현성상이 실리카 흙을 사용한 이성분계 또는 실리카 흙 및 메타카올린을 혼용한 삼성분계의 경우가 압축강도 100.3N/mm² 및 102.7N/mm²로 나타나 본 배합조건에서도 100N/mm² 이상의 압축강도를 달성하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 레미콘 공장에서의 원재료관리를 비롯한 제조 및 생산관리 등의 품질관리를 철저히 기한다면 초고강도 콘크리트를 생산하는 데는 문제가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 박철립 외 3인, “혼화제를 사용한 고강도 콘크리트의 품질개선에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 봄 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 봄 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.
- 5) Bentur, A., and Goldman, A., “Curing effects, strength and physical properties of high strength Silica Fume Concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 1, No. 1, Feb. 1989, pp. 45~58.