

압축강도 3116kgf/cm² 초고강도콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Manufacturing Ultra-High Strength Concrete of 3116kgf/cm² Compressive Strength

최세진* 강석표* 최희용** 김규용* 김진만*** 김무한****
Choi, Se Jin Kang, Suk Poo Choi, Hee Yong Kim, Gyu Yong Kim, Jin Man Kim, Moo Han

Abstract

The strength of concrete depends on factors of materials, composition, and manufacturing method. Among these factors, preparatory experiments are to consider and analyze the factors on compressive strength of ultra-high strength concrete according to types of aggregate, binder content, water-binder ratio, and curing methods. And the final experiment to develop the ultra-high strength over 3,000kgf/cm² is based on these preparatory experiments. As the result of this final experiment, We could manufacture the ultra-high strength concrete with a marvelous compressive strength of 3,116kgf/cm². This study is to compare and analyze the manufacturing system of ultra-high strength concrete of 3,116kgf/cm² compressive strength in the side of material development of construction industry.

1. 서 론

최근 국내에서도 콘크리트학회가 주관하는 고강도콘크리트 콘테스트에 발맞추어 콘크리트의 고강도화를 위한 연구가 많이 행하여 지고 있으며, 제조 가능한 콘크리트의 강도 수준도 지속적으로 증가하고 있다.

지금까지 국내의 콘크리트 관련 학회에 보고된 최고의 강도는 2318kgf/cm²로써 보통강도의 약 10

* 정회원, 충남대 건축공학과 대학원

** 정회원, 충남대 건축공학과 대학원, (주)대동주택 기술연구소 연구원

*** 정회원, 공주대 건축공학과 교수, 공학박사

**** 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

배에 해당하는 높은 강도를 보이고 있다. 그러나 콘크리트의 이론적인 강도는 재료의 분자결합력에 기 초할 때 $100,000\text{kgf/cm}^2$ 수준임을 고려하면, 현재 제조 가능한 강도는 이론강도의 약 1/40로 매우 미미한 수준이다.

콘크리트는 미시적인 관점에서 살펴보면 결합재(Binder), 골재(Aggregate), 이 두 재료의 계면 (Transition Zone)의 3개 상(相)으로 구성되어 있으며, 이들은 각각 수많은 결합부분을 가지고 있 다. 그러므로 이들 3개 상에 존재하는 결합을 최소화시키고 각 상의 강도 및 탄성계수를 적절히 조화 시킬 경우 제조가능한 강도는 더욱 더 높아질 수 있을 것이다.

본 연구는 국내에서 통용되고 있는 재료를 사용하여 최고의 압축강도를 갖는 콘크리트를 제조하기 위한 것으로 결합재, 골재 및 계면을 최적화 하기 위해 현재까지 보고된 국내·외 연구결과와 본 실험 실의 연구결과를 기초로 최적의 재료를 선정함과 아울러 조합, 비빔, 다짐, 양생방법을 적절히 조화시 켜 압축강도 3000kgf/cm^2 이상을 발현하는 것으로 목표로 하였다.

2. 연구계획 및 방법

2.1 연구 추진계획

압축강도 3000kgf/cm^2 이상의 초고강도콘크리트를 제조하기 위한 본 연구의 추진계획은 그림 1과 같이 결합재, 골재, 계면의 강도에 영향을 미치는 요인을 재료, 조합, 제조조건 of 3가지로 분류하여 각 요인의 영향을 기존 문헌과 본 연구실의 실험결과를 바탕으로 검토한 후 최고의 강도를 발현할 수 있는 최적의 실험요인 및 수준을 설정하여 실시하였다.

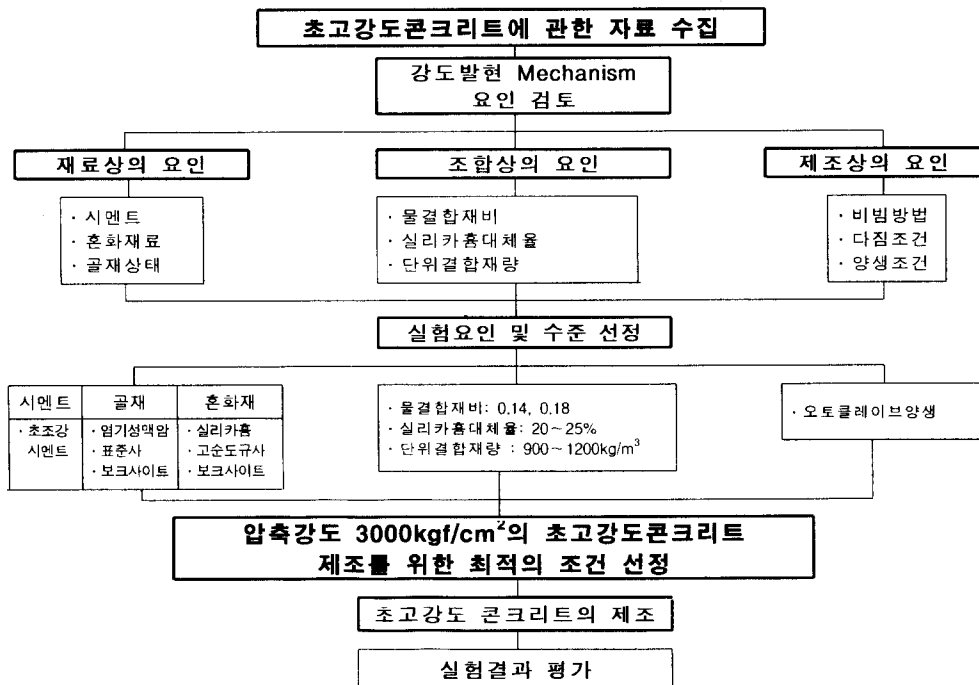


그림 1 연구 추진 계획

표 1 실험요인 및 수준

조 합	I	II	III	IV
물결합재비	0.18		0.14	
시멘트의 종류	초조강 시멘트			
골재의 종류	G1 · G2 · G3	G2 · G3	G2 · G3	G1
혼화제의 종류 및 대체율	실리카흙(25%)	실리카흙(20%), 고순도규사(20%)	실리카흙(20%), 고순도규사(20%)	실리카흙(25%), 고순도규사(10%), 보크사이트미분말(10%)
단위결합재량 (kg/m ³)	900		1200	
양생조건	오토클레이브			

주) G1 : 염기성 맥암 (I : 최대크기 2.5mm, IV: 최대크기 1.2mm)

G2 : 표준사

G3 : 보크사이트(최대크기 5mm)

2.2 실험요인 및 수준

본 연구의 실험요인 및 수준을 나타낸 표 1에서 알 수 있는 바와같이 본 실험은 물결합재비, 골재의 종류, 혼화제의 종류 및 대체율, 단위결합재량에 따라 4개의 조합으로 구성되어 있으며, 각 조합별 실험요인 및 수준은 다음과 같다.

- ① 조합 I : 물결합재비를 0.18, 단위결합재량을 900kg/m³로 하고, 골재의 종류는 최대크기 2.5mm의 염기성 맥암(G1), 표준사(G2) 및 최대크기 5mm의 보크사이트(G3)를 사용하였으며, 콘크리트 내부의 미세공극을 충전하기 위하여 실리카흙을 결합재 중량의 25% 첨가하였다.
- ② 조합 II : 물결합재비를 0.18, 단위결합재량을 900kg/m³로 하고, 골재의 종류는 표준사(G2) 및 최대크기 5mm의 보크사이트(G3)를 사용하였으며, 콘크리트 내부에 Micro-Filler작용을 하기 위하여 실리카흙(결합재 중량의 20%) 및 고순도 규사(결합재 중량의 20%)를 사용하였다.
- ③ 조합 III : 물결합재비를 0.14, 단위결합재량을 1200kg/m³로 하고, 골재의 종류는 표준사(G2) 및 최대크기 5mm의 보크사이트(G3)를 사용하였으며, 콘크리트 내부의 미세공극을 충전하기 위하여 실리카흙(결합재 중량의 20%) 및 고순도 규사(결합재 중량의 20%)를 사용하였다.
- ④ 조합 IV : 물결합재비를 0.14, 단위결합재량을 1200kg/m³로 하고, 골재는 최대크기 2.5mm의 염기성 맥암(G1)을 사용하였으며, 콘크리트 내부에 Micro-Filler작용을 하기 위하여 실리카흙(결합재 중량의 20%), 고순도 규사(결합재 중량의 10%) 및 보크사이트 미분말(결합재 중량의 10%)을 사용하였다

2.3 사용 재료

각 재료의 물리·화학적 성질은 콘크리트의 강도에 매우 큰 영향을 미치므로 초고강도 콘크리트의 제조시 재료의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용한 각 재료는 국내·외의 연구자료 및 수차례의 예비실험을 토대로 결정하였고 그 물리적 성질은 표 2~6과 같다.

2.4 비빔 및 성형방법

콘크리트의 강도발현을 위해서는 각 구성재료의 균질성을 확보하는 것이 중요한 요인으로써, 이것

표 2 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	용 결 도 (h:m)		강 열 감 량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)		
			초결	종결		3일	7일	28일

표 3 실리카흙의 물리·화학적 성질

주 성 분 (%)					비표면적 (cm ² /g)	비중
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO		
92.8	0.6	1.0	0.8	0.3	245,000	2.1

표 4 고성능감수제의 물리적성질

고성능감수제 종류	유형	색상	주 성분	비중
SSP-104	액상	황색	Graft - Copolymer	1.10

표 5 소포제의 물리적성질

품명	색상	형상	비중
AFK-2	황색	액상	2.1

표 6 골재의 물리적 성질

구 분	입경 (mm)	조립율 (F.M)	비중	흡수율 (%)	비 고
염기성매암	2.5	-	2.87	0.78	육천산
보크사이트	5	2.97	3.3	5.40	중국산

은 콘크리트의 비빔과정에서 충분히 고려되어야 할 사항이다. 그러므로, 본 실험에서는 콘크리트의 균질성을 향상시키기 위해 용량 30 l의 Omni-Mixer를 사용하였으며, 비빔방법은 그림 2와 같이 세골재를 2회로 나누어 분할투입하였고, 비빔은 육안관찰로서 콘크리트의 균질성이 확보될 수 있을때까지 하였으며, 소요시간은 총 12~14분 이었다.

또한, 공시체의 제작방법은 콘크리트를 2개층으로 나누어 몰드에 투입 한 후, 각 층에 대해서 봉 바이브레이터 및 테이블 바이브레이터로 콘크리트 내부의 공기포가 충분히 제거될 때까지 진동다짐을 행하여 제작하였다.

2.5 양생방법

양생방법으로는 180℃, 10기압의 오토클레이브양생으로서 그림 3에서 보는바와 같이 탈형후 전치양생 12시간, 승온 및 승압 6시간, 180℃ 10기압에서 6시간, 강온·강압 12시간후 80℃수중양생에 보존하는 방법으로 실시하였다.

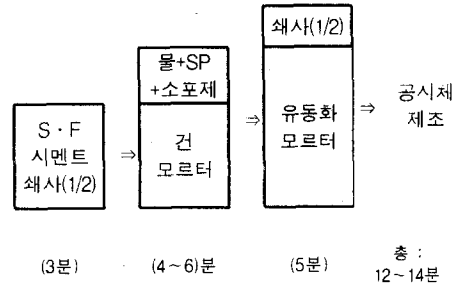


그림 2 콘크리트의 비빔방법

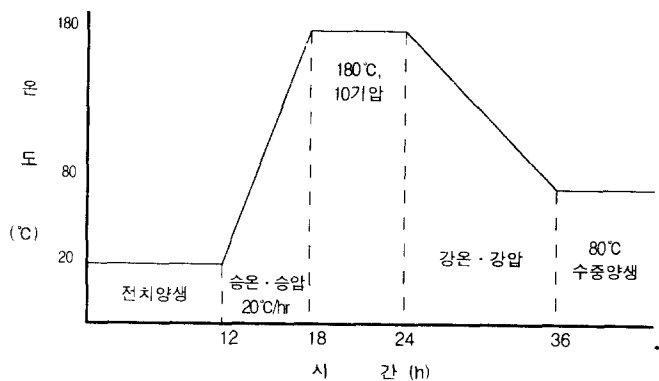


그림 3 오토클레이브 양생방법

3. 실험결과의 분석 및 검토

콘크리트의 조합에 따른 압축강도 시험결과를 나타낸 표 7 및 그림 4에서 알 수 있는 바와같이 조합

표 7 콘크리트의 조합 및 압축강도 시험결과

조합	물결합재비	Silica Fume 대체율 (%)	G3 대체율 (%)	고순도 규사 대체율 (%)	단위결합재량 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	절대용적(ℓ/m ³)						중량(kg/m ³)						압축강도 (kgf/cm ²)		
							시멘트	실리카흄	고순도 규사	G1	G2	G3	시멘트	실리카흄	고순도 규사	G1	G2	G3	3일	7일	14일
I	0.18	25	-	-	900	162	217	107	-	227	227	50	675	225	-	652	590	165	2379	2280	-
II	0.18	20	-	20	900	162	174	86	69	-	200	299	540	180	180	-	520	987	2249	2500	-
III	0.14	20	-	20	1200	168	232	114	92	-	154	230	720	240	240	-	400	759	2545	2357	-
IV	0.14	25	10	10	1200	168	212	142	46	386	-	36	660	300	120	1107	-	120	2970	-	3116

I, II, III의 경우 2200kgf/cm²~2600kgf/cm² 정도의 압축강도를 발현하여 학회에 앞서 보고되었던 최고의 압축강도를 넘어서고 있다. 이는 골재로서 표준사를 염기성 맥암 및 보크사이트와 적절히 조합시키고, 또한 결합재로서 초조강 시멘트를 실리카흄 및 고순도규사와 적절히 혼합 사용함으로써 얻어진 결과로 사료된다.

특기할만한 것은 조합 I 및 III에서 3일 강도에 비하여 7일 강도가 다소 낮게 나타나고 있는데 이는 초기재령에서 오토클레이브 양생한 후 80℃ 수증양생을 함으로써 초기에 수화반응이 거의 완료되었고 역학적으로 대상 공시체의 강도영역이 매우 높아 공시체가 취성적인 파괴를 보일뿐만 아니라 공시체의 일부에 발생한 결함이 하중의 작용시 공시체 전체로 쉽게 전파되어 시험체에 따른 편차가 크기 때문에 나타난 현상으로 사료되나, 부분적으로는 화학적으로 수화반응에 의해 발생한 물질의 경시에 따른 전이현상도 포함되어 있을 것으로 추정된다.

4개의 조합중에서 가장 높은 강도를 보인 것은 조합 IV로써 3일 강도에 이미 목표치인 3000kgf/cm²의 수준에 거의 근접 2970kgf/cm²의 강도를 보이고 있고, 재령 14일에는 3116kgf/cm²의 강도를 보이고 있으며, 조합 I 및 III에서 나타난 재령의 증가에 따른 강도의 저하는 나타나지 않고 있다. 이와같이 높은 강도를 보이는 것은 골재의 재질이 매우 견경한 염기성 맥암을 최대크기 1.2mm로 세립화하여 사용하고, 결합재로써 초조강 시멘트, 실리카흄, 고순도규사를 적절히 배합하고 또한 활성이 우수한 보크사이트를 미분말화하여 골재가 아닌 혼화재로써 사용하였기 때문에 가능하였던 것으로 사료된다.

이상에서 고찰한 바와같이 현재 국내에 유통되고 있는 재료를 사용하고도 재료의 적절한 선정과 각재료를 최적의 조건으로 혼합하고, 비빔, 다짐, 양생을 적절히 행할 경우 압축강도 3000kgf/cm²를 상회하는 초고강도콘크리트

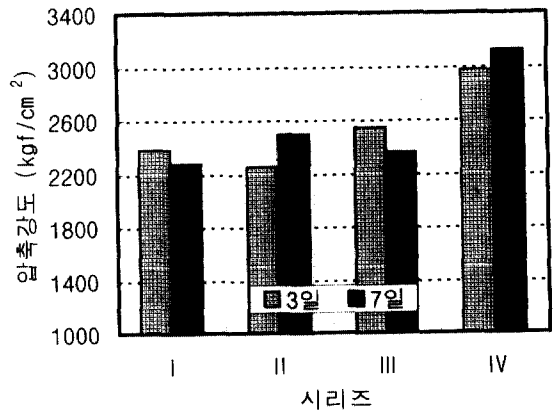


그림 4 압축강도 시험결과

의 제작이 가능하였다. 그러나 본 실험에서는 각재료의 조합, 양생에 관해서는 충분한 검토가 행하여지지 않았으며, 이 부분에 관해서는 앞으로 개선의 여지가 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 실험은 압축강도 3000kgf/cm^2 이상의 초고강도콘크리트를 제조할 수 있는지를 실증적으로 알아보기 위한 실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재 국내에서 유통되고 있는 재료를 사용하여 재료의 선정과 조합을 적절히 행하고 다짐과 양생을 충분히 행함으로써 압축강도 3000kgf/cm^2 이상의 초고강도콘크리트를 제조하는 것이 가능하였다.
- 2) 압축강도 2000kgf/cm^2 의 초고강도 영역에서는 재령에 따른 강도의 증진이 크지 않은 것으로 나타났다는데, 이는 오토클레이브 양생후 고온수증양생을 함으로써 초기재령에서 수화반응이 거의 완료된 것과 부분적으로는 시험체간의 편차가 큰 것 및 재령의 증진에 따른 초기수화물의 전이현상등이 복합적으로 작용한 결과로 사료된다.
- 3) 앞으로 건설 구조재료의 첨단 신소재로서 초고강도콘크리트의 연구영역 및 분야를 넓힐 수 있는 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 김무한 외 : 압축강도 2300kgf/cm^2 의 초고강도콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구(제1,2 보), 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 7권 제 2호, 1995. 11, pp.246-255
2. 김무한 외 : 초고강도콘크리트의 제조시스템 및 압축강도 발현요인 영향에 관한 실험적 연구(제1,2보), 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제 16권 제 1호, 1996. 4, pp.465-476
3. 日本建築學會 : 高強度コンクリートの技術の現状, 丸善, 1991. 1, pp.7-21
4. 金武漢 : 構造材料實驗方法論, 學文社, 1982, pp.194-270
5. 김진만 : 고강도 영역 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 제요인의 영향에 관한 연구, 박사 학위논문, 1996. 2
6. Malhotra, V.M. and G.G. : Silica Fume Concrete Properties, Application and Limitations, Concrete International, Vol. 5, May 1983, pp.40-46
7. State of Art Report on High-Strength Concrete, Reported by ACI committee 363, ACI Journal, 1992
8. Yoyendran, Langan, Hague and Word, Silica-fume in High-Strength Concrete, Vol. 84, No.1-6, ACI Materials Journal, 1987, pp.124-129