초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 물리적 특성에 미치는 요인 연구

김강민* · 송용순 · 강석화
<동양시멘트 기술연구소>

1. 서 론

건설기술의 지속적인 선진화에 따라 건설 구조물이 초고층화, 대형화, 특수화 되고 있어 경간의 장대화, 수직부재 단면의 축소, 내구성 증진, 공기단축 등의 여러 장점들을 가진 초고강도 콘크리트의 적용 사례가 증가하고 있으며, 계속해서 증가할 것으로 전망된다. 이러한 콘크리트의 초고강도화를 위해서는 다양한 방법들이 존재하지만, 그 중 결합재의 강도를 증진시키는 것이 가장 중요하다. 또한 혼화제를 사용하여 낮은 물-시멘트비와 각종 특수 광물질 혼화재를 사용하여 수화물량을 증가시키는 방법 등이 이용되고 있다.

이러한 초고강도 콘크리트는 국내·외적으로 100층 이상 초고층 건축물에 필수적인 요소기술로 인식되고 있다. 하지만 150MPa이상을 제조하기 위해서는 극히 낮은 물-시멘트비에 의한 높은 점성으로 레미콘 제조 및 현장 타설이 곤란하다. 이에 작업성 확보 등 시멘트 결합재에 대한 기술적인 대책이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 국내 최초 240MPa급 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재 및 콘크리트를 개발하고자 하였으며, 핵심기술은 자사에서 기 개발된 고유동, 고강도용 '하이플로 시멘트'를 주원료로 하고, 초고강도용 혼합재 등을 사용한 다성분계 시멘트 결합재의 최적조합이다. 또한 시멘트 결합재의 분산성과 균질성을 확보하고 극히 낮은 물-시멘트비에서의 콘크리트 유동성을 향상시키기 위한 프리믹스형 시멘트의 제조와 특수 골재 및 특화된 양생에 따른 240MPa 이상의 안정된 초고강도 콘크리트 품질 확보를 위한 기초적인 연구로 수행하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재

초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재는 자사에서 기 개발된 고유동, 고강도용 '하이플로 시멘트'를 주원료로 사용하고, 초고강도용 혼합재로서 실리카 흄, 슬래그 미분말, 자사 초고강도용 결합재 Σ1000 그리고 충전재 등을 대상으로 검토하였다. <표 1>은 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재 조성물을 구성하는 각 사용재료의 물리·화학적 특성이고, <표 2>는 목표 유동성 및 강도 등을 최적으로 만족시키는 원재료의 조성비율로 사전 혼합된 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 물리·화학적 특성을 나타내었다.

2.2 충전재 및 골재

잔골재용 충전재로 <표 1>의 물리화학성분을 갖고 있는 것을 사용하였으며, 굵은골재는 <표 3>과 같은 초고강도용 골재를 사용하였다.

2.3 혼화제

혼화제는 폴리카본산계 고성능 감수제로서 고형분율 25%로 일반적인 폴리카본산계 고성능감수제의 평균 20% 보다 높은 것이 특징이며, 사용량이 결합재 중량대비 2% 이상 사용하는 것에

<표 1> 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재 조성물을 구성하는 재료의 물리·화학적 특성

재료 구분	화학적 특성 (%)						물리적 특성	
	Ig-loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	비표면적 (㎠/g)	밀도 (g/㎤)
하이플로 시멘트	1.42	20.67	5.05	3.55	62.15	4.17	3,681	3.14
실리카 흄	2.71	91.26	2.01	0.85	1.20	0.40	200,000	2.20
슬래그 미분말	-3.10	34.89	16.58	0.45	42.57	3.66	8,000	2.85
Σ1000	8.33	8.59	7.87	0.49	35.22	0.79	7,535	2.83
충전재	3.04	89.02	2.43	2.09	1.06	1.01	82,000	2.60

<표 2> 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 물리·화학적 특성

구분	밀도 (g/㎤)	비표면적 (㎠/g)	화학적 특성 (%)								
			Ig-loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
UHSC	2.92	7,498	1.52	56.85	8.42	5.11	25.57	2.14	2.93	1.50	0.12

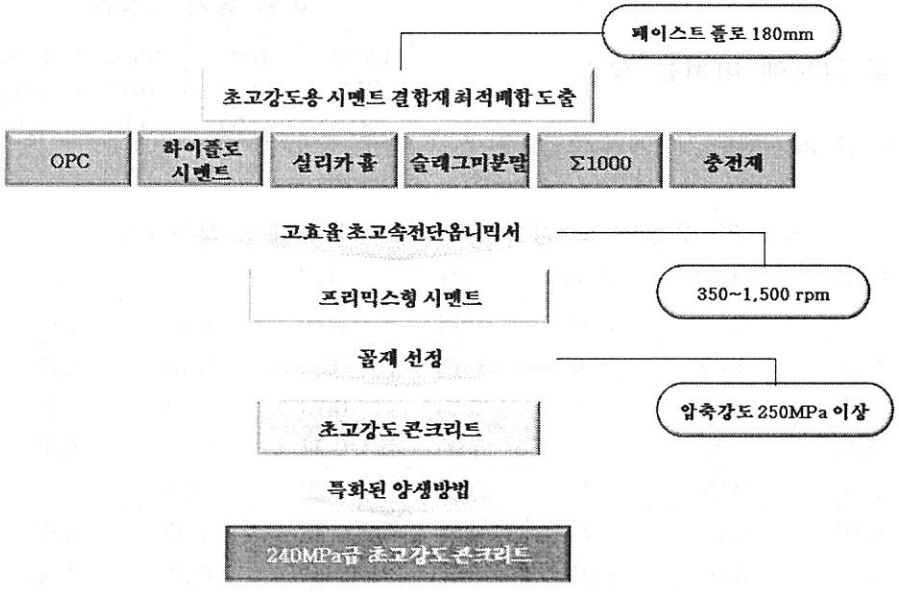
의해 발생될 수 있는 초기 경화지연이 방지된 제품을 유동성 상호 비교 후 선정 사용하였다.

<표 3> 초고강도용 골재의 특성

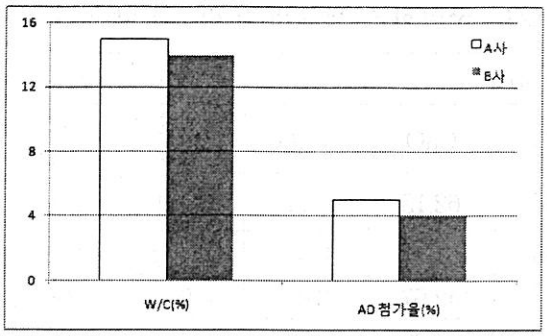
G_{max}(mm)	밀도(g/㎤)	흡수율(%)	조립율
5.0 이상	2.79	0.48	4.36

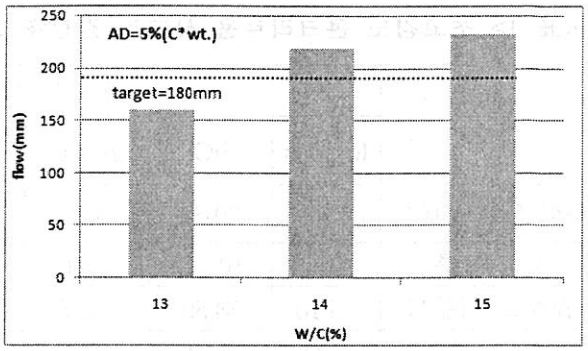
2.4 실험방법

초고강도 콘크리트의 유동성 및 강도에 미치는 각 원재료의 사용비율을 도출하기 위해 다음 <그림 1>과 같은 방법으로 진행하였으며, 초고강도용 골재의 선정과 특화된 양생을 통해 목표 강도 이상의 안정된 초고강도 콘크리트의 물성을 확인하였다.



<그림 1> 실험방법





<그림 2> 혼화제 종류별 유동성 비교

3. 실험결과 및 분석

3.1 혼화제 유동성 비교

초고강도 콘크리트의 유동성을 확보하기 위해서 혼화제는 적정량의 사용으로도 고성능의 유동성능을 확보하여야 하는 가장 중요한 역할을 한다. 본 연구에서도 초고강도 콘크리트용으로 시판되고 있는 2개사의 제품을 비교 시험한 결과 및 적정 첨가량의 범위는 <그림 2>와 같다.

그림에서와 같이 비슷한 용도의 초고강도용 혼화제를 사용한 결과 B사의 경우 낮은 W/C비와 첨가율에서도 A사와 동일한 유동성능을 보였으며, B 혼화제 사용시 적정 W/C비 및 첨가량의 범위는 14%에서 2~3% 수준으로 파악되었다.

3.2 유동성 및 강도에 미치는 요인

초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 주성분을

<표 4> 원재료 조성비율에 따른 유동성 및 강도 특성

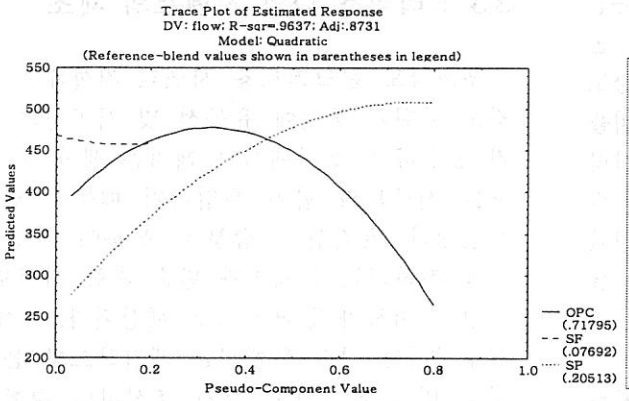
OPC	SF	SP	flow	압축강도(kgf/cm2)	
			time(sec)	heat	standard
60	10	30	360	1827	1087
62.5	7.5	30	480	1809	1092
70	10	20	480	1982	1325
65	5	30	540	1902	1268
72.5	5	22.5	450	1891	1237
80	7.5	12.5	240	2016	1180
80	10	10	270	1883	986
80	5	15	300	1903	1034
W/B =	14%		AD =	B*3%(wt.)	

<표 5> 유동성 및 강도가 우수한 최적 조성 비율 통계 추정값

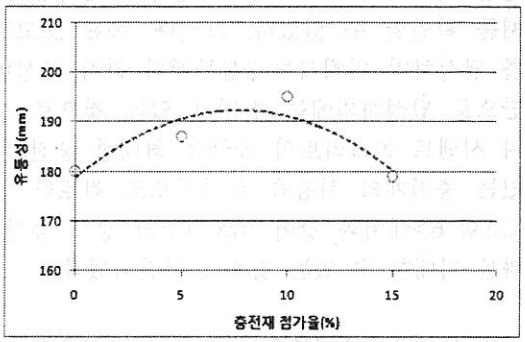
factor	min.	max.	flow	heat
OPC	0.60	0.80	0.68	0.74
SF	0.05	0.10	0.11	0.08
SP	0.10	0.30	0.21	0.18

<표 6> 유동성 및 강도에 미치는 각 원재료 상관계수

factor	(A)OPC	(B)SF	(C)SP	AB	AC	BC	flow	heat
(A)OPC	1.00	0.57	0.37	0.74	0.70	0.16	0.69	0.84
(B)SF	0.57	1.00	0.57	0.78	0.33	0.78	0.69	0.76
(C)SP	0.37	0.57	1.00	0.16	0.70	0.74	0.91	0.81
AB	0.74	0.78	0.16	1.00	0.26	0.21	0.47	0.61
AC	0.70	0.33	0.70	0.26	1.00	0.26	0.86	0.81
BC	0.16	0.78	0.74	0.21	0.26	1.00	0.61	0.58
flow	0.69	0.69	0.91	0.47	0.86	0.61	1.00	0.96
heat	0.84	0.76	0.81	0.61	0.81	0.58	0.96	1.00



<그림 3> 3성분계 함량에 따른 유동성의 예측



<그림 4> 충전재 첨가량에 따른 유동성 변화

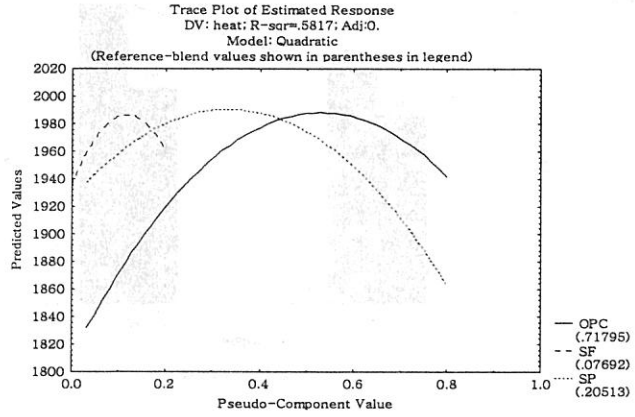
이루는 시멘트, 슬래그 미분말, 실리카 흄의 3성분계의 배합비에 따른 유동성 및 압축강도에 미치는 요인을 분석한 결과는 <표 4~6>과 같다.

3.2.1 유동성에 미치는 요인

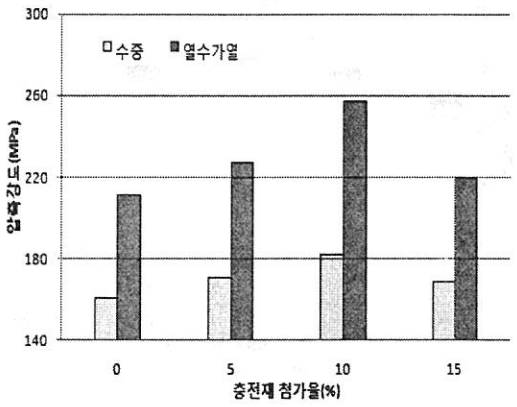
각 혼합재의 조성비율에 따른 유동성의 변화는 <그림 3>과 같다. 그림에서와 같이 실리카 흄의 경우 첨가량이 증가할수록 증가하는 반면 슬래그 미분말의 경우 감소하는 경향 즉, 유동성을 발휘하는데 소요되는 시간이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 하이플로 시멘트의 경우 본 연구의 범위에서 변곡점이 존재하는 것으로 나타났으며, 유동성을 최적으로 하는 3성분계의 최적 배합비율 도출이 가능하였다. 또한, 유동성에 가장 상관성이 높은 인자로는 슬래그 미분말 및 슬래그미분말과 시멘트의 교호작용이 가장 큰 것으로 나타났다. 초고강도 콘크리트의 유동성 및 강도 증진 개선을 위해 고미분말의 충전재 사용 효과를 파악한 결과 충전재의 첨가량이 일정이상 증가시 유동성이 저하되는 구간이 있었으며, 그 첨가량의 한계는 대략 15%이내인 것으로 판단되었다.

3.2.2 압축강도에 미치는 요인

각 혼합재의 조성비율에 따른 압축강도의 변화는 그림 5와 같다. 그림에서와 같이 3성분계의 모든 원재료마다 최고 강도를 발현하는 변곡점이 존재하는 것으로 나타났다. 실리카 흄의 경우 첨가량 10% 이상 증가시 오히려 감소하는 것을 나타내어 초고강도를 위한 실리카 흄의 최대 사



<그림 5> 3성분계 함량에 따른 압축강도 예측



<그림 6> 충전재 첨가량에 따른 강도 변화

용량에도 한계가 있는 것으로 나타나 최대 유동성을 확보하면서 강도를 개선하는 첨가량의 존재를 확인할 수 있었다. 그러나, 목표 초고강도를 달성하기 위해서는 3성분계의 최적 조성비율만으로 달성하기에는 한계가 있는 것으로 나타나 시멘트 콘크리트의 공극을 최대한 충전할 수 있는 충전재의 사용을 추가적으로 검토한 결과 <그림 6>에서와 같이 10%이상의 강도 증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단되었다.

또한, 진동 테이블을 이용하여 다짐을 실시한 굳지 않은 초고강도 콘크리트의 초기 경화를 위해 습윤양생을 실시 후 각각의 시험체들을 수중, 증기, 가열, 열수 가열 양생 조건에 따른 강도변화를 고려한 결과 <그림 7>에서 보는 바와 같이 일반 수중양생에 비해 증기, 가열, 열수양생을 실시하였을 경우 13~16% 정도의 강도 증진 효과를 발휘하여 200MPa이상과 열수 가열 양생을 추가 실시함으로서 36% 정도의 강도가 증진되어 240MPa이상의 초고강도 콘크리트를 제작할 수 있었다.

초고강도 영역에서 하이플로 시멘트의 성능을 알아보기 위해 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재 중 일반 OPC와 하이플로 시멘트를 사용하여 실험을 실시한 결과 <그림 8>에서 처럼 페이스트 플로는 약 11% 정도 증진되는 것을 알 수가 있었으며, 강도는 양생조건에 따라 15~27% 정도 더 높게 나타났다.

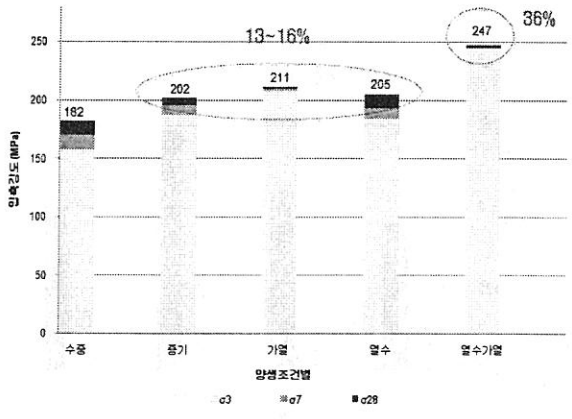
3.3 프리믹스 타입 시멘트의 제조

초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재는 초고강도 발현과 동시에 유동성 및 시공성의 확보가 중요하나, 실무에서는 레미콘 생산 시 혼합재를 시멘트와 함께 투입하기 때문에 입자의 분산성과 균질성이 충분치 못하여 시공성이 크게 저하되는 문제점과 단순 혼합 시에도 시공성의 저하가 문제점으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 이런 문제점을 해결하고자 옴니믹서로 미리 혼합하여 상기 조성비의 결합재를 제조한 결과 실리카 흄 및 충전재 등 초미립자의 분산을 충분히 이루어져 유동성 및 작업성이 크게 향상되는 효과를 기대할 수 있었다.

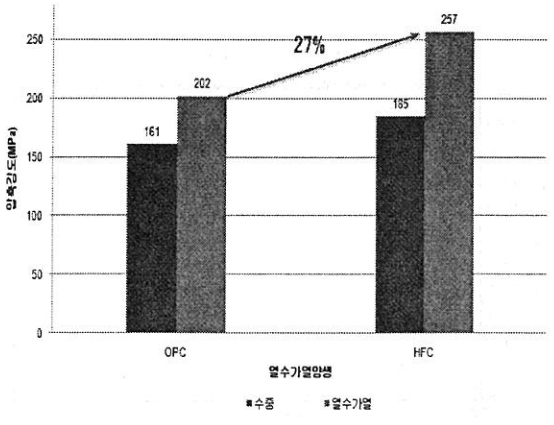
4. 결론 및 향후 계획

초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 물리적 특성에 미치는 요인에 관한 실험결과는 다음과 같다.

(1) 고로슬래그미분말이 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 유동성에 크게 미치는 요인으로 판단되었으며, 하이플로 시멘트를 사용하여 목표 플로를 만족하는 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 최적배합비의 도출이 가능하였다.



<그림 7> 초고강도 콘크리트의 양생조건별 강도



<그림 8> OPC와 하이플로 시멘트 비교

(2) 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 압축강도는 시멘트가 매우 높은 인자로 작용하고 있었으며, 3성분계의 혼합이외에 충전재의 사용으로 목표 강도이상의 콘크리트 제조가 가능하였다.

(3) 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재와 함께 특화된 양생(열수가열양생조건)을 통해 목표강도 이상의 초고강도 콘크리트를 확보할 수 있었다.

(4) 향후 실용적인 80~120MPa 수준의 다양한 프리믹스형 초고강도 콘크리트용 시멘트 결합재의 수요가 증가할 것으로 보이며, 이에 대한 초고강도 제조방법, 품질관리 및 시공관리에 대한 기초적인 자료로서 적극적으로 활용할 계획이다.