

# 다성분계 초고강도콘크리트의 유동특성 및 강도특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Fluidity and Strength Properties of Multi Component Ultra-High Strength Concrete

김 동 배\*    최 세 진\*\*    이 성 연\*\*\*    이 상 수\*\*\*\*    송 하 영\*\*\*\*    김 을 용\*\*\*\*  
Kim, Dong-Pai    Choi, Se-Jin    Lee, Seong-Yeon    Lee, Sang-Soo    Song, Ha-Young    Kim, Eul-Yong

### ABSTRACT

In this study, recently, more highly effective construction materials are needed for a reasonable cause and economical structure system is required as the construction structures become more multi storied, large-sized and diversified. Also, the experiment was not carried out to investigate and analyzed the strength properties and flowability of ultra-high strength according to the types of mineral admixtures.

Therefore, this is an experimental study to compare and analyze the influence of cementitious materials type on the fluidity and the strength properties of ultra-high strength concrete.

For this purpose, it has decided to do the mix proportions of concrete according to the type of cementitious materials(fly ash, blast furnace slag, silica fume, slag cement) and W/B(23.5, 27.5, 31.5%) has selected. And then we conducted an experiment to find out basic properties of the ultra-high strength concrete such as slump-flow, O-lot and the age of specimens(3, 7, 28, 56days) for compressive strength.

### 1. 서 론

최근 국제 경쟁력 제고를 위해 전세계적으로 초고층빌딩의 구조역학의 진보, 컴퓨터에 의한 설계계산의 촉진, 커튼 월(curtain wall)공법 등의 기술이 발전됨에 따라 시가지 내의 토지고도 이용의 목적으로 도심 내의 건물은 초고층화되어가고 있다.<sup>3)</sup> 1931년에 건설된 뉴욕의 엠파이어스태이트 빌딩은 지상 102층, 높이 381m나 되는 철근콘크리트구조로서 세계 최고층빌딩으로 유명하였으나, 1973년에 완성된 시카고의 Sears Tower(442m)에 그 자리를 내어주었다. 그리고 2004년 4월 대만에 지상 101층, 높이 508m의 Taipei 101이 완공됨에 따라 현재 세계에서 가장 높은 빌딩으로 알려져 있다. 이러한 건물의 초고층화를 위해서는 지금까지의 일반강도콘크리트 수준과는 달리 고강도콘크리트의 사용이 불가결한 요건이나 이웃 일본이나 동남아시아에서도 활발히 적용되고 있는 철근콘크리트 구조물의 초고층건물 시공이 아직까지 국내에서는 시공경험과 연구부족, 품질 및 시공관리에 대한 불확실성 등으로 인해 고강도콘크리트의 사용을 회피하고 있는 실정이다.<sup>1),2)</sup>

따라서, 본 연구에서는 종류별 혼화재의 치환율에 따른 유동특성 및 강도발현 성상을 비롯한 기타 공학적 특성을 실험·실증적으로 검토한 후, 경제성을 만족할 수 있는 최적의 배합을 도출하므로써 국내에 적용 가능한 초고강도콘크리트의 개발과 그 실용화를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

\* 정회원, 한밭대학교 공과대학 건축공학과 대학원 석사과정

\*\* 정회원, (주)삼표 기술연구소 책임연구원, 공박

\*\*\* 정회원, (주)삼표 기술연구소 소장, 공박

\*\*\*\* 정회원, 한밭대학교 공과대학 건축공학과 교수, 공박

## 2. 실험개요

### 2.1 실험계획

본 실험에서는 초고강도콘크리트의 각종 공학적 특성을 알아보기 위해 선정된 콘크리트의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, 소요강도를 확보하기 위한 물-결합재비는 각각 23.5, 27.5, 31.5(%)의 3개 수준을 계획하였고, 단위수량은 160, 165(kg/m<sup>3</sup>)를 대상으로 평가하도록 하였다. 콘크리트의 각종 성능을 개선하기 위한 혼화재료는 중복되지 않는 조합조건을 선정하였다. 특히, 고로슬래그 미분말의 치환율은 물-결합재비가 낮을수록 단위결합재량의 증가에 따른 점성 증대를 감안하여 30, 40, 50(%)로 높혀 사용함으로써 콘크리트의 시공성 및 작업성을 확보하고자 하였다. 또한, 잔골재율은 단위결합재량이 많은 고강도콘크리트라 할지라도 골재의 조건에 따라 적정하다고 평가되는 44%를 선정하였다. 본 연구의 목표성능은 표 2에서 보는바와 같다.

표 1 실험계획

항 목	조 건	측 정 항 목
W/B (%)	23.5, 27.5, 31.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기량</li> <li>• 슬럼프 플로우</li> <li>• 슬럼프플로우 50cm 도달시간</li> <li>• O-lot 유하시간</li> <li>• 압축강도</li> </ul> (재령 3, 7, 28 및 56일) ※ ( )는 측정재령임
S/a (%)	44	
W (kg/m <sup>3</sup> )	160, 165	
혼화재의 조합조건	삼성분계	SL4(30,40,50)SF10 <sup>11</sup> - I SL6(30,40,50)FA10 <sup>21</sup> - II
	사성분계	FA5SF5(SLC) <sup>31</sup> - III FA10SF10(SLC) <sup>41</sup> - IV

표 2 고강도콘크리트의 목표성능

항 목	조 건	품질시험규격
설계기준강도 (Mpa)	60, 70, 80	KS F 2403 및 KS F 2405 (Φ100×200mm 공시체)
배합강도 (Mpa)	72, 84, 96	
슬럼프 플로우 (cm)	60Mpa	55±5
	70Mpa	60±5
	80Mpa	65±5
공기량 (%)	2.0±1.5%	KCI CT 103  KS F 2421

주] 1, 2, 3, 4) SL:고로슬래그미분말(치환율:30, 40, 50%), SF:실리카흙(5, 10%), FA:플라이애쉬(5, 10%), SLC:슬래그시멘트

### 2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 각 재료의 물리적 성질은 표 3에 나타낸 바와 같다.

표 3 각 사용재료의 물리적 성질

구 분	기초 물리적 성질	비 고
시멘트 (1종보통)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):3.15</li> <li>• 강열감량(%):2.0</li> <li>• 용결도(h:m):초결-4:20, 종결-6:35</li> </ul>	A사
슬래그 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):3.05</li> <li>• 강열감량(%):0.8</li> <li>• 용결도(h:m):초결-5:20, 종결-8:25</li> </ul>	A사
플라이애쉬 (F급)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.19</li> <li>• 강열감량(%):3.5</li> <li>• 플로우비(%):97</li> </ul>	S사
고로슬래그 미분말(4,000급)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.90</li> <li>• 분말도(cm<sup>2</sup>/g):4.495</li> <li>• 강열감량(%):0.09</li> <li>• 플로우비(%):96</li> </ul>	Japan산
고로슬래그 미분말(6,000급)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.90</li> <li>• 분말도(cm<sup>2</sup>/g):6.574</li> <li>• 강열감량(%):0.49</li> <li>• 플로우비(%):103</li> </ul>	기초소재
실리카흙	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.10</li> <li>• 분말도(m<sup>2</sup>/g):25</li> <li>• 강열감량(%):1.3</li> <li>• 염화이온(%):0.19</li> </ul>	Norway산
고성능 AE감수제	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유형:액상</li> <li>• 색상:갈색</li> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):1.10</li> <li>• pH:7.0</li> </ul>	폴리카르본산계
부순골재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입경(mm):20</li> <li>• 조립율(F.M.):6.74</li> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.60</li> <li>• 흡수율(%):0.67</li> <li>• 실적율(%):60.4</li> <li>• 단위용적질량(kg/ℓ):1.566</li> </ul>	양주산 부순자갈
세척모래	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입경(mm):5</li> <li>• 조립율(F.M.):2.82</li> <li>• 밀도(g/cm<sup>3</sup>):2.60</li> <li>• 흡수율(%):0.78</li> <li>• 단위용적질량(kg/ℓ):1.564</li> </ul>	인천산 세척사

표 4 콘크리트 배합

W/B (%)	S/a (%)	조합 조건	W (kg/m <sup>3</sup> )	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )							SP (%)		
				C	SL	FA	SF	S1	S2	G			
23.5	44	I	160	272	341	0	68	656	0	842	1.05		
				272	341	68	0	658	0	844	0.75		
				613	0	34	34	660	0	847	0.85		
				545	0	68	68	650	0	833	1.00		
		II	165	281	351	0	70	642	0	824	1.05		
				281	351	70	0	644	0	826	0.85		
				632	0	35	35	647	0	829	0.90		
				562	0	70	70	636	0	815	1.05		
		27.5	45	I	160	291	233	0	58	713	0	878	1.00
						291	233	58	0	715	0	880	0.70
						524	0	29	29	715	0	881	0.85
						466	0	58	58	706	0	869	1.45
II	165			300	240	0	60	700	0	862	1.10		
				300	240	60	0	702	0	864	0.65		
				540	0	30	30	702	0	865	0.75		
				480	0	60	60	692	0	853	1.05		
31.5	46	I	160	305	152	0	51	761	0	901	1.35		
				305	152	51	0	763	0	902	0.90		
				457	0	25	25	761	0	901	0.90		
				406	0	51	51	753	0	891	1.30		
		II	165	314	157	0	52	749	0	886	1.10		
				314	157	52	0	750	0	887	0.85		
				472	0	26	26	749	0	886	0.85		
				419	0	52	52	740	0	875	1.20		

### 2.3 콘크리트배합

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 표 4와 같이 소요강도, 충전성 및 유동성 등을 만족하는 최적의 조합조건을 선정할 목적으로 적정 설계기준강도를 만족하는 범위 내에서 물-결합재비 및 단위수량, 혼화재 종류 및 치환율등을 변화시켜 시험배합을 실시하였다.

### 2.4 비빔 및 시험체 제작방법

콘크리트의 비빔은 그림 1과 같이 100리터의 강제식 팬믹서를 사용하여 시멘트, 잔골재 및 혼화재를 투입하여 30초간 건비빔한 후 고성능AE감수제를 첨가하여 다시 60초간 비빔 후, 굵은골재를 투입하고 150초간 비빔을 실시하여 총 240초가 소요되도록 하였다. 또한, 압축강도 평가용 공시체는 KS F 2403 『콘크리트 강도시험용 시험체 제작방법』에 준하여  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원추형 시험체를 제작하였으며, 약 24시간 후 탈형하여 소요의 재령까지 온도  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시하여 제작하였다.

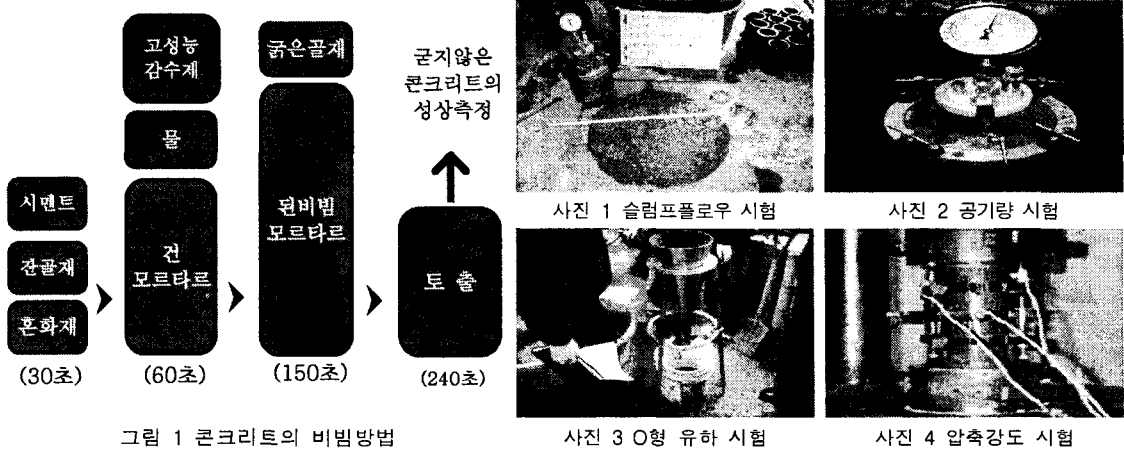


그림 1 콘크리트의 비빔방법

사진 3 O형 유하 시험

사진 4 압축강도 시험

## 3. 실험결과 분석

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 분석

사진 1~사진 3과 같이 굳지않은 콘크리트의 슬럼프플로우, 공기량 및 O형 유하시험을 측정하였으며, 그림 2와 그림 3은 조합조건에 따른 콘크리트배합시험의 각종 유동특성 및 강도특성을 나타낸 실험결과이다. 초고강도콘크리트의 유동성을 평가하기 위한 슬럼프플로우치는 고성능감수제의 첨가율이 0.65~1.45%의 범위로 나타났으며, 그에 따른 슬럼프플로우치는 51.5~72.5cm의 범위를 보이고 있다.

또한, 그림 4와 그림 5의 걸보기 점성을 알아보기 위한 유하시간은 14.6~45.5초의 범위를 나타내고 있으며, 초기의 유동속도에 따른 걸보기 점성을 알아보기 위한 50cm도달시간은 4.7~20.3초의 범위를

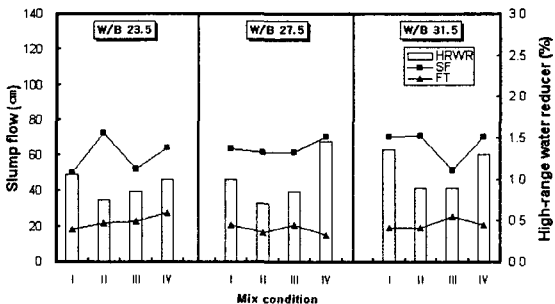


그림 2 슬럼프플로우 시험결과 (단위수량 160kg/m<sup>3</sup>)

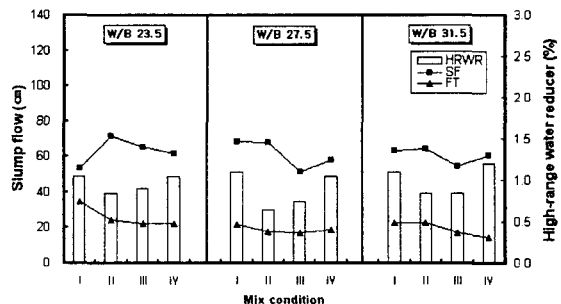


그림 3 슬럼프플로우 시험결과 (단위수량 165kg/m<sup>3</sup>)

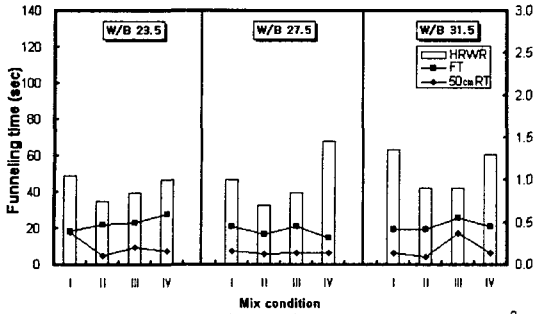


그림 4 O형 유하 시험결과 (단위수량이 160kg/m<sup>3</sup>)

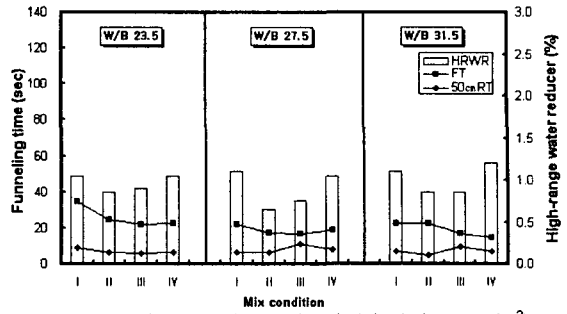


그림 5 O형 유하 시험결과 (단위수량이 165kg/m<sup>3</sup>)

나타내고 있었다. 공기량 시험결과에서는 전반적으로 0.2~2.0%로서 목표 공기량에 만족하는 범위를 나타내고 있었다.

### 3.2 굳은 콘크리트의 분석

본 연구범위내에서의 초고강도콘크리트의 압축강도 발현성상(재령 56일)은 물-결합재비(23.5%)의 경우, 79.9~94.5Mpa의 범위, 물-결합재비(27.5%)는 경우 80.9~88.6Mpa의 범위, 물-결합재비(31.5%)의 경우, 68.1~79.2Mpa의 범위를 나타내고 있었다. 또한, 단위수량에 따른 압축강도 발현성상은 단위수량 160kg/m<sup>3</sup>의 경우, 70.7~94.1Mpa, 단위수량 165kg/m<sup>3</sup>의 경우에는 68.1~94.5Mpa범위로 나타내고 있어 본 실내배합에서는 단위수량 165kg/m<sup>3</sup>의 경우가 양호한 압축강도 발현성상을 나타내고 있다.

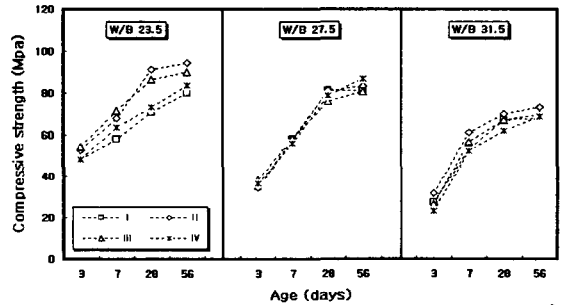
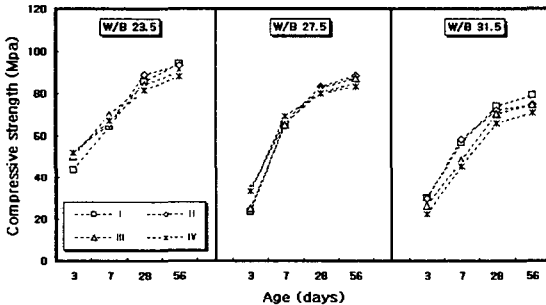


그림 6 재령별 압축강도 시험결과 (단위수량이 160kg/m<sup>3</sup>)      그림 6 재령별 압축강도 시험결과 (단위수량이 165kg/m<sup>3</sup>)

### 4. 결 론

본 연구를 행한 결과, 초고강도콘크리트는 많은 분체량을 갖고 있어 이에 따라 발생되는 점성의 차이로 인하여 콘크리트의 유동성을 평가하는 슬럼프플로우치는 51.5~72.5cm 정도로서 커다란 차이를 보이고 있는 것으로 보아 초고강도콘크리트의 유동성 평가를 슬럼프플로우로서 평가하는 것이 타당하다는 것을 알 수 있었으며, O형 유하시간은 15~45초 정도로 양호한 점도특성을 나타내고 있어 초고강도콘크리트에서 문제시되었던 충전능성이 우수할 것으로 판단된다. 이는 조합조건 및 골재의 입도·입형이 우수하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 또한, 초고강도 콘크리트의 강도특성은 목표성능에는 만족하고 있었으나, 각 조합조건에 따라 약간 차이를 보이고 있기 때문에 유동특성을 고려해서 최적배합을 선정하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

#### 참고문헌

- 1) 한국콘크리트학회, 고강도콘크리트 실용화 연구, KCI, 1991
- 2) 日本建築學會, 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, 2005
- 3) 日本建築學會, 高強度コンクリートの技術の現状, 1991