

150MPa 초고강도 콘크리트의 배합 및 재료역학특성 평가 연구

Evaluation on Mechanical and Mixing Properties of Ultra-high Strength Concrete with $f_{ck}=150MPa$

강 훈* 안 종 문** 신 성 우***
 Kang, Hoon Ahn, Jong Mun Shin, Sung Woo

Abstract

Ultra-High Strength Concrete (UHSC) demands a clear presentation of its mechanical properties, as distinct from normal strength concrete, and an evaluation of the serviceability of high-rise buildings that use ultra-high strength concrete. Ultra-high strength concrete $f_{ck}=150MPa$ was manufactured with pre-mix cement, and an experimental study was conducted to evaluate the mixing properties and compressive strength, with the major variables being unit cement contents, water-binder ratio, and type of pre-mix cement. The test result showed that 150MPa concrete requires about 6~7 minutes of mixing time until each of the materials (ordinary Portland cement, silica fume, blast-furnace slag powder and anhydrite) are sufficiently revitalized. The slump flow of fresh concrete was shown to be about 700~800mm with the proper viscosity. The average value of concrete compressive strength was shown to be about 70% in 7 days, 85% in 14 days, and 95% in 28 days, for 56 days of concrete material age.

Keywords : Ultra-high Strength Concrete, Slump Flow, Compressive Strength, 150MPa

1. 서 론

1.1 연구배경

최근 우리나라는 시공 중인 건물을 포함하여 40층 이상의 주거 건축물 수에서 세계 4위의 국가이고 세계 100대 주거용 건물 가운데 9개동이 국내에 있으며, 이는 세계 3위에 속한다¹⁾. 이러한 고층화 경향에 따라 세계 각국에서도 50층 이상의 초고층 철근콘크리트(R/C) 구조물은 급속히 증가하고 있으며, 중, 저층 건축구조물과 장기간을 가지는 건축 및 토목 구조물에 대한 요구도 급증하고 있다. 이때 사용되는 콘크리트강도(설계기준강도 f_{ck})는 60층 규모의 경우 대개 40~60MPa 정도를, 100층 건물의 경우는 70~100MPa의 사용이 보편화되어 있으며 이에 관한 연구 및 시공지침 그리고 구조설계법 등이 발간되고 있다²⁾.

표 1에서 알 수 있는 것처럼 세계 각국의 기준에서는 고강도 콘크리트의 사용에 대하여 많은 제한을 두고 있지는 않으나 대략

70MPa를 초과하는 초고강도 콘크리트를 적용할 경우에는 실험에 의한 검증을 실시하고 구조물에 적용할 것을 권고하거나, 부재의 특성에 따라 강도의 상한선을 정하고 있는 상황이다.^{3)~5)} 따라서 앞으로 70MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 사용이 활발할 것으로 기대되므로 이에 대한 폭넓은 연구가 활발히 이루어져야 할 필요가 있다.

표 1. 각 국별 고강도 콘크리트 강도 상한값 규정

국가	기준	년도	강도상한값 (MPa)	표준공시체(mm)
유럽	CEB-FIP MC-90	1993	80	150×300(실린더) 200×200(큐브)
유럽	EC2-02 (Final Draft)	2002	90	150×300(실린더) 200×200(큐브)
캐나다	CSA A23.3-94	1994	80/55*	150×300(실린더) 100×200(실린더)
미국	ACI 318-02	2002	없음**	6×12 in.(실린더) 152×304(실린더)
뉴질랜드	NZS 3101-95	1995	100/70*	152×304(실린더)
한국	콘크리트 구조설계기준	2007	없음**	150×300(실린더)

* 한양대학교 건축공학과 박사과정, 교신저자(himix11@hanmail.net)

** 안산1대학 건축설계과 조교수, 공학박사

*** 한양대학교 건축공학과 교수

본 연구는 교육과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음. (R11-2005-056-01003-0)

* 연성부재의 내진설계시 적용

** 단, 정착길이 및 전단설계시에는 제한이 있음

$$\sqrt{f_{ck}} \leq 8.35 \text{ MPa}$$

국내 및 다른 나라의 초고강도 콘크리트 개발동향을 보면 일본의 경우 이미 130~150MPa급 콘크리트의 제조 및 실용화 연구에 이어 2000년 이후 실제 구조물에 적용되고 있으며⁸⁾, 국내의 경우도 150MPa의 초고강도 콘크리트의 실용화와 180~240MPa 초고강도 콘크리트의 개발이 진행되고 있는 상황이다^{9)~12)}. 따라서 60~70층 규모의 초고층 구조물의 건설이 활발하게 추진되고 있고, 향후 5년 이내에 100층 이상의 초고층 구조물이 다수 건설될 것으로 예상되는 상황에서 이러한 구조물에 적용이 요구될 것으로 기대되는 100~150MPa 수준의 초고강도 콘크리트 설계, 제조, 시공 및 구조성능에 이르기까지의 제반 역학특성에 대한 연구가 요구된다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 실내배합 실험을 통하여 재령 56일에서의 목표 배합강도 150MPa를 가지는 초고강도 콘크리트의 제반 물성을 평가한 후 150MPa 초고강도 콘크리트의 최적배합조건을 제시하고자 하며, 압축강도, 응력-변형률 관계, 탄성계수와 인장강도, 휨강도 등과 같은 기본적인 재료역학 특성을 평가하고자 한다.

2. 초고강도 콘크리트 배합 실험

2.1 실험변수 및 계획

초고강도 콘크리트의 목표 물성으로 재령 56일에서의 실험실 배합강도 150MPa(레미콘 배치플랜트에서는 130MPa), 슬럼프 플로는 700±50mm를 목표로 정하여 각각의 배합조건에 따른 물성 및 역학특성을 검토하였다. 최적의 배합조건을 도출하기 위한 초고강도 콘크리트의 실험변수 계획은 표 2와 같다.

표 2. 초고강도 콘크리트의 실험계획

항 목	조 건	비 고
굵은골재 최대치수 (mm)	13	강도 및 유동성 고려
물-결합재비 (W/B : %)	12~15	목표강도 고려
단위수량 (W : kg/m³)	150 이하	건조수축 및 내구성 고려
단위결합재량 (B : kg/m³)	1000~1160	-
사용 시멘트	프리믹스시멘트 (조성비율 종류)	강도 및 유동성 고려

2.2 사용 재료

2.2.1 시멘트

본 배합에 사용된 시멘트는 H사의 보통포틀랜드 시멘트 1종과

고로슬래그 미분말, 실리카흙, 무수석고를 혼합한 4성분계 프리믹스 시멘트를 사용하였으며, 그 재료의 물리-화학적 성질 및 조성비율표는 표 3과 4에 나타난 바와 같다.

표 3. 프리믹스 시멘트 조성재료의 물리-화학적 성질

구분	분말도 (㎍/g)	비중	강열 감량 (%)	화학조성(%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
시멘트	3,492	3.15	2.18	21.16	4.65	3.14	62.79	2.81	2.13
고로슬래그	4,210	2.9	0.35	28.14	15.87	1.06	45.95	4.98	2.12
실리카흙	250,000	2.2	3.5	97	0.50	2.0	0.80	0.90	-
무수석고	6,035	2.87	3.62	3.23	0.79	0.38	36.17	0.13	-

표 4. 프리믹스 시멘트 조성비율표

시멘트 종류	1종시멘트 (%)	슬래그 미분말 (%)	실리카흙 (%)	무수석고 (%)
A	54	30	10	6
B	59	25	10	6
C	64	20	10	6
D	50	32	15	3
E	55	30	12	3

2.2.2 골재

본 배합에 사용된 골재는 콘크리트의 강도 및 유동성을 고려하여 잔골재의 경우 조립률 2.8 내외를 가지도록 인천산 세척사와 경기도 광주산 부순 잔골재를 혼합 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수를 13mm의 경기도 광주산 부순 굵은골재를 사용하였다. 각 골재의 물리적 성질은 표 5에 나타난 바와 같다.

표 5. 골재의 물리적 성질

구분	최대입경 (mm)	조립률	표기준	흡수율 (%)	0.08mm 통과량 (%)	실적율 (%)	마모율 (%)	단위질량 (kg/m³)
잔골재	KS 2526	5	-	2.5 이상	3.0 이하	3.0 이하	-	-
	세척사	5	2.6	2.6	2.6	1.7	-	1578
	부순 잔골재	5	3.0	2.6	2.6	2.1	-	1657
굵은골재	KSF 2527	13	-	2.5 이상	3.0 이하	1.0 이하	-	40 이하
	부순 골재	13	6.30	2.64	0.68	0.4	59.7	20

2.2.3 고성능 감수제

본 배합에 사용한 고성능 감수제는 높은 감수효과 및 분산효과와 유지능을 가지는 E사의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였으며 그 물리적 성질은 표 6에 나타난 바와 같다.

표 6. 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제 종류	물리적 성질					품질 성능					
	색상	주성분	PH	밀도	감수율 (%)	블리딩량비 (%)	응결시간 차 (min)		압축강도 비(%)		
							초결	종결	3일	7일	28일
KSF 2560-7	-	-	-	-	18	60	-30	~ +120	135	125	115
고성능 감수제 표준형	염은 황색	폴리카르본산계 (고축합형)	7.0	1.212	23.0	48.0	+35	+40	143	130	119

2.3 배합실험 결과 및 분석

2.3.1 콘크리트 배합

초고강도 콘크리트의 실내 배합시험은 2축 강제식 믹서를 사용하였으며, 잔골재와 굵은골재를 동시 투여한 후 30초간 건비빔한 후 프리믹스 시멘트를 투여하고 다시 30초간 건비빔 후 사용수와 고성능 감수제를 동시 투여하여 각 재료가 완전히 활성화되어 초고강도 콘크리트로서 요구되는 물성을 가지게 될 때까지 믹서내에서 배합하였다. 각 배합별 소요배합시간은 약 5~7분정도가 소요되어, 이는 일반적인 고강도 콘크리트 보다 2~3분정도 배합시간이 더 요구되는 것으로 나타났다. 믹서에서 콘크리트를 토출한 후 즉시 슬럼프플로 값을 측정하였다. 압축강도 및 쪼갬 인장강도 측정을 위해 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 공시체를 제작하였으며, 양생조건별 압축강도 발현을 측정하기 위한 공시체는 공시체 탈형 후 편심을 최대한 고려하여 공시체의 양면을 연마작업을 통해 평활하게 하고 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 수증양생을 실시하였다.

2.3.2 굳지 않은 콘크리트 물성(슬럼프 플로) 평가

본 연구에서 배합 실험한 57개 배합의 콘크리트 배합표와 그에 따른 굳지 않은 콘크리트 성질의 슬럼프 플로와 공기량, 각 배합별 재령에 따른 압축강도 측정 결과는 표 7과 같다.

그림 1에 나타나 있는 것처럼 각 배합의 배합직후 플로값은 대부분의 배합에서 목표값인 650~750mm를 만족하는 것으로 측정되었다. 그러나 150MPa 초고강도콘크리트의 점성이 너무 크게 나타나 콘크리트 타설 및 작업에 많은 어려움이 있을 것으로 예상되므로 재료분리가 되지 않는 전체 아래, 초고강도 콘크리트의 플로값은 700mm 정도를 확보해야하며, 800mm 이상이 되더라도 콘크리트의 성능에는 이상이 없음을 확인하였다.

표 7. 변수별 배합표 및 실험 결과

NO	C/NO	W/C	S/a	Unit weight(kg/m ³)				AD (C%)	Fresh Concrete		Compressive Strength(MPa)				
				W	C	S	G		Slump Flow (mm)	Air (%)	3D	7D	14D	28D	56D
1	A	14.0	35	140	1,000	476	897	2.8	-	-	-	88.40	90.05	105.66	109.74
2	A	14.0	35	140	1,000	476	897	2.9	740/740	-	-	89.54	89.51	110.94	115.93
3	A	14.0	32	140	1,000	435	939	3.0	740/740	-	-	88.47	90.05	116.00	119.74
4	A	14.0	35	140	1,000	476	897	2.9	790/800	-	-	88.40	92.42	132.66	141.63
5	A	14.0	35	140	1,000	476	897	2.9	-	-	-	-	-	-	-
6	A	14.0	35	140	1,000	476	897	2.6	810/810	1.0	-	-	-	-	-
7	A	15.0	32	150	1,000	467	880	2.6	760/760	-	-	89.58	-	126.74	-
8	A	14.3	35	150	1,050	451	851	2.95	690/730	-	-	86.22	-	111.34	-
9	A	14.3	35	150	1,050	451	851	2.75	760	-	-	103.23	-	131.41	-
10	A	14.3	35	150	1,050	451	851	2.75	780/770	-	-	90.51	115.80	109.55	122.32
11	A	14.3	35	150	1,050	451	851	2.75	680/690	-	-	73.69	90.39	94.72	106.72
12	A	14.0	32	150	1,070	445	839	2.9	700/730	-	-	115.91	125.93	134.75	139.75
13	A	14.0	35	150	1,070	445	839	2.9	670/680	-	-	103.79	116.99	126.94	131.54
14	A	14.0	35	150	1,070	445	839	2.9	710/730	-	-	106.99	116.43	140.40	139.27
15	A	14.6	35	150	1,030	458	863	2.75	780/800	1.0	-	125.63	134.43	144.21	-
16	B	14.6	35	150	1,030	458	863	2.75	740/760	1.5	-	133.04	134.58	151.79	-
17	C	14.6	35	150	1,030	458	863	2.80	740/750	1.7	-	136.81	138.33	151.97	153
18	B	14.6	35	150	1,030	458	863	2.85	750/750	1.7	-	135.44	134.43	147.82	-
19	B	14.6	35	150	1,030	458	863	2.85	740/740	2.5	-	136.56	136.66	147.81	-
20	A	14.6	35	150	1,030	458	863	2.30	790/805	1.0	86.53	111.53	-	-	-
21	A	14.6	35	150	1,030	458	863	2.30	805/810	1.5	97.44	119.76	-	-	-
22	A	14.1	32	145	1,030	421	912	2.30	800/850	-	67.63	108.45	-	-	-
23	B	14.6	35	150	1,030	458	863	2.50	780/790	1.0	80.25	104.24	125.63	139.25	144.46
24	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.5	720/730	1.6	79.86	106.33	133.84	142.67	147.64
25	B	14.1	35	145	1,030	462	871	2.5	740/750	1.6	79.23	114.04	129.93	140.54	145.55
26	B	14.6	35	145	1,030	458	863	2.5	700/730	-	88.27	110.55	132.35	145.64	150.86
27	B	14.1	35	145	1,030	462	871	2.5	720/750	0.8	58.78	96.45	118.57	129.97	134.86
28	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.5	710/730	1.0	68.30	95.5	121.08	134.98	140.50
29	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.5	755/760	1.0	71.89	89.56	115.79	131.15	140.43
30	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	775/775	0.7	81.49	107.25	115.27	118.96	135.69
31	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	795/810	0.9	74.27	104.36	120.68	135.24	142.58
32	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	750/840	0.7	-	102.91	121.25	133.67	139.57
33	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	770/800	0.8	-	99.71	118.45	128.40	132.54
34	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	22.5cm	1.6	-	98.16	111.15	116.83	134.16
35	B	13.6	35	140	1,030	445	839	3.2	620/630	2.8	-	93.06	107.65	115.81	138.65
36	B	13.1	35	140	1,070	445	839	2.6	730/740	-	-	100.12	111.05	114.47	138.14
37	B	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	770/780	-	102.57	103.74	106.59	111.54	134.25
38	D	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	740/750	1.6	88.13	101.55	105.32	116.35	138.51
39	D	13.6	35	140	1,030	467	880	3.2	530/550	2.5	102.73	104.75	103.96	108.65	134.97
40	B	13.1	35	140	1,070	445	839	2.6	730/730	-	107.07	115.49	110.28	125.36	137.72
41	D	13.6	35	140	1,030	467	880	2.6	780/800	-	43.60	106.33	-	-	-
42	D	13.1	35	134.5	1,030	467	880	2.6	710/710	-	46.80	104.33	-	-	-
43	D	13.1	35	134.5	1,030	467	880	2.9	780/780	-	44.03	103.33	-	-	-
44	D	13	30	150	1,154	353	824	2.6	550/600	1.4	68.17	109.43	104.75	110.58	125.37
45	D	13	30	150	1,154	353	824	3.0	470/480	-	66.37	107.17	110.95	115.62	134.53
46	E	13.5	30	156	1,154	174	812	2.9	700/740	2.1	65.63	106.70	113.5	119.26	133.64
47	E	13.5	45	156	1,154	261	638	2.9	540/550	2.0	65.63	112.73	126.05	135.27	144.25
48	E	14.6	35	150	1,030	225	836	2.9	580/610	2.0	62.47	102.03	113.74	124.38	136.95
49	E	13	40	150	1,154	376	705	2.9	700/720	1.6	72.43	110.25	121.57	129.68	143.24
50	D	13	40	150	1,154	353	823	2.9	480/480	2.3	86.73	104.46	105.75	135.66	148.35
51	B	13	30	150	1,154	282	823	2.9	640/660	2.9	72.93	116.16	128.69	132.55	148.57
52	B	13	30	150	1,154	282	823	3.3	540/560	2.9	92.40	110.45	128.97	131.88	149.66
53	D	13	30	150	1,154	247	823	3.0	540/560	1.5	69.33	108.66	113.56	132.19	139.56
54	D	13	30	150	1,154	247	823	3.1	520/520	2.5	86.14	109.38	120.24	135.20	142.59
55	D	12.6	30	145	1,154	249	831	3.1	690/710	1.8	66.45	115.07	128.13	120.6	156.38
56	D	12.6	30	145	1,154	249	831	2.9	710/730	1.7	81.46	116.38	119.44	124.3	155.97
57	D	12.6		145	1,154	249	831	3.2	725/745	1.2	53.96	110.10	121.55	129.63	157.16

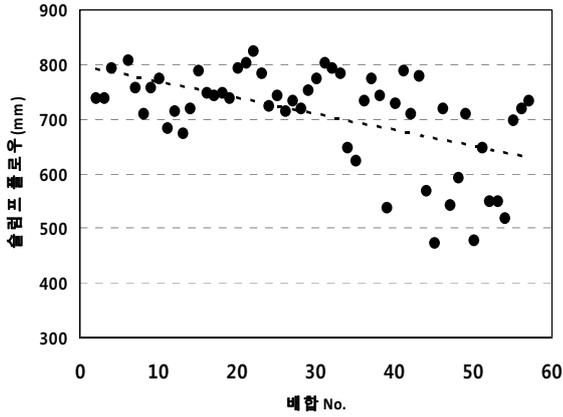


그림 1. 배합별 초기 슬럼프 플로 비교

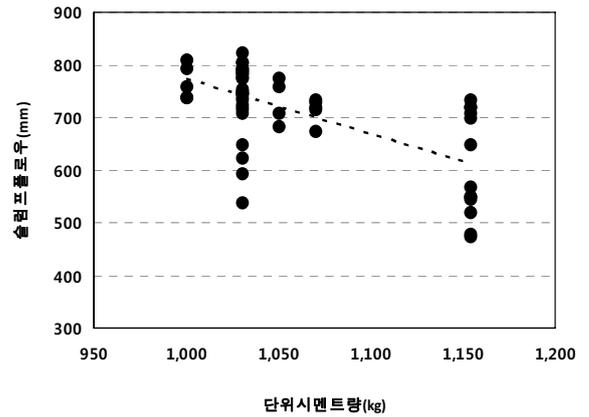


그림 3. 단위시멘트량과 초기 슬럼프 플로 비교

1) 물-결합재비(W/B)의 영향

그림 2에 물-결합재비와 초기 플로값을 비교한 내용이 나타나 있다. 물-결합재비가 증가함에 따라 플로값은 증가하는 경향을 보였으며, 그림에서 알 수 있는 것처럼 물-결합재비가 13.5~14% 정도일 때가 가장 양호한 플로값을 가지는 것으로 판단된다. 그러나 초고강도 콘크리트 배합에서는 단위수량을 산정할 때 혼화제에 포함되어 있는 고형분량을 고려한 단위수량 결정이 필요하며, 물-결합재비보다는 화학혼화제의 역할이 더욱 중요한 것으로 판단된다.

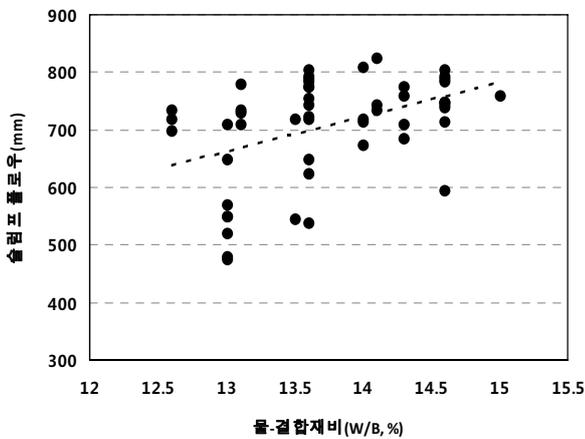


그림 2. 물-결합재비와 초기 슬럼프 플로 비교

2) 단위시멘트량의 영향

다음 그림 3에 단위시멘트량과 초기 플로값을 비교한 내용이 나타나 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 단위시멘트량이 증가함에 따라 플로값은 감소하는 것으로 나타났으며, 본 실험결과에 따르면 150MPa 초고강도 콘크리트 배합시 적절한 플로값인 700mm 이상을 확보하기 위한 단위시멘트량은 대략 1,000 ~ 1,070 kg/m³ 정도인 것으로 나타났다.

2.3.3 경화콘크리트의 압축강도 평가

압축강도 시험 후 최종파괴된 공시체 상태가 다음 사진 1에 나타나 있다. 사진에서 처럼 대부분의 공시체는 최대강도 도달 이후 급격하게 폭발적으로 파괴되는 취성파괴특성을 나타내었다.



사진 1. 압축강도 시험 후 공시체 파괴상태

콘크리트 공시체는 제작 후 3일 뒤에 촬영하여 상부면을 연마한 후 수증양생을 실시하면서 소요 재령인 7일, 14일, 28일, 56일에 압축강도시험을 실시하였다.[그림 4]

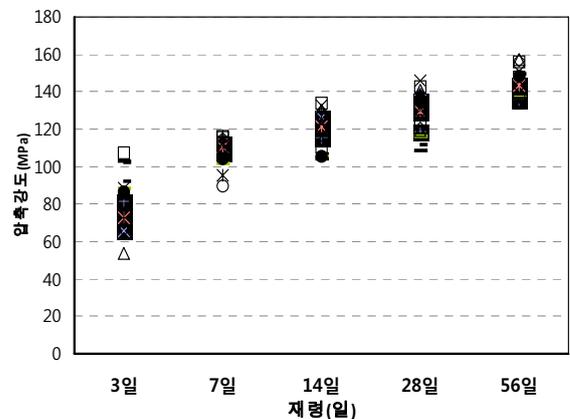


그림 4. 재령별 압축강도 발현특성

재령 56일을 기준으로 7일에서는 약 70%, 14일에서는 약 85%정도로 나타났고, 28일에서는 약 95%정도로 나타났다. 이로 부터 프리믹시멘트를 사용한 초고강도 콘크리트에서는 분말도가 높은 각 재료의 초기 수화반응이 빠르게 이루어져 초기에 대부분의 강도를 확보하고 이후의 강도발현은 서서히 증가하는 것으로 판단된다.

1) 물-결합재비의 영향

물-결합재비에 따른 압축강도 발현 특성을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 물-결합재비가 증가함에 따라 압축강도가 다소 증가하는 경향을 보였으나, 본 실험에 적용한 물-결합재비는 12.6~14.6%의 범위로서 이 정도의 범위에서 물-결합재비의 영향을 정량적으로 평가하는 것은 한계가 있으며, 혼화제 사용량의 영향도 포함한 정량적인 평가가 이루어져야 한다. 본 실험에 의하면 14.6%의 물-결합재비에서 가장 양호한 압축강도 발현특성을 나타내었다.

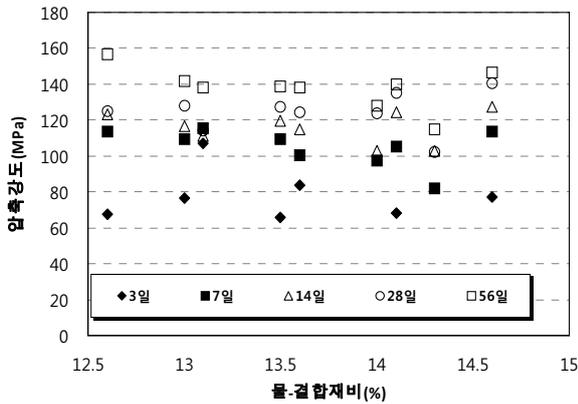


그림 5. 물결합재비와 압축강도 발현특성

2) 초기 플로값의 영향

콘크리트 배합직후 측정된 플로치에 따른 압축강도 발현 특성을 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 초기 플로값이 클수록 양호하게 압축강도가 발현됨을 알 수 있으며, 이러한 특성을 고려하면 초기 플로치가 클수록 콘크리트 공시체의 성형과 양생에 효과적임을 알 수 있다.

3) 단위시멘트량의 영향

그림 7에서 알 수 있는 것처럼 단위시멘트량이 1,154kg/m³인 경우가 안정적인 압축강도를 발현하였다. 일반적인 조건에서 단위시멘트량이 증가함에 따라 다소의 압축강도 증진효과는 있으나 기본적으로 130~150MPa정도의 초고강도 콘크리트 제조를 위한 단위시멘트량은 대략 1150kg/m³정도 내외에서 결정될 수 있음을 알 수 있다.

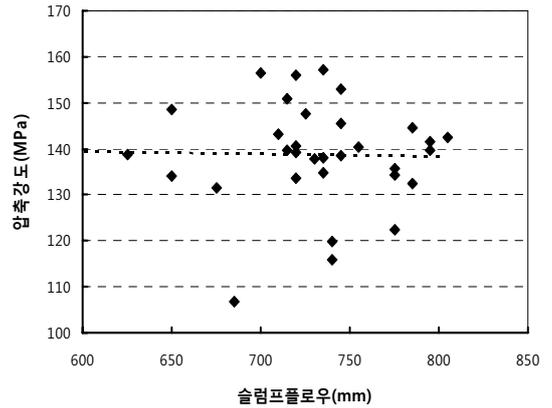


그림 6. 슬럼프 플로값에 따른 압축강도 발현특성

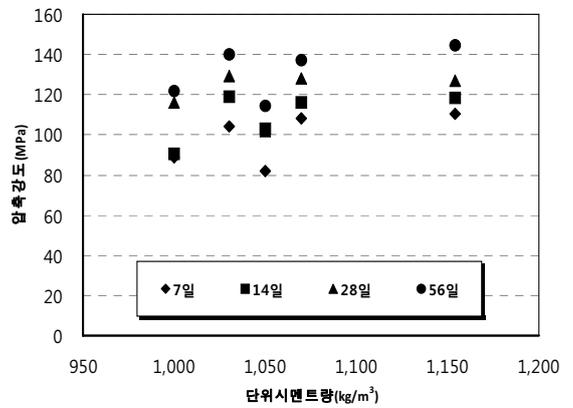


그림 7. 단위시멘트량에 따른 압축강도

4) 프리믹시멘트 종류의 영향

프리믹시멘트 종류에 따른 압축강도 발현특성이 그림 8에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 150MPa 정도의 초고강도 콘크리트 제조를 위한 프리믹시멘트에 혼입되는 각 재료의 적절한 혼입비율은 OPC는 50~55%내외, 슬래그미분말은 30~35%, 실리카흄은 10~15%, 무수석고는 3~6%정도의 범위에서 프리믹시멘트를 제조하여 콘크리트 배합에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 초고강도 콘크리트 재료역학성능 평가

3.1 일반 사항

탁월한 구조적 장점을 가진 초고강도 콘크리트는 부재 단면의 축소 및 공사비 절감, 공기단축, 내구성향상 등 많은 장점을 가지고 있으나 필연적으로 초고강도 콘크리트에 대한 설계강도의 만족, 높은 수화열로 인한 균열의 방지, 시공성의 확보, 조기 강도의 발현 및 취성파괴에 의한 구조적 안정성 및 사용성에 대한 추정이 시급한 실정이다.

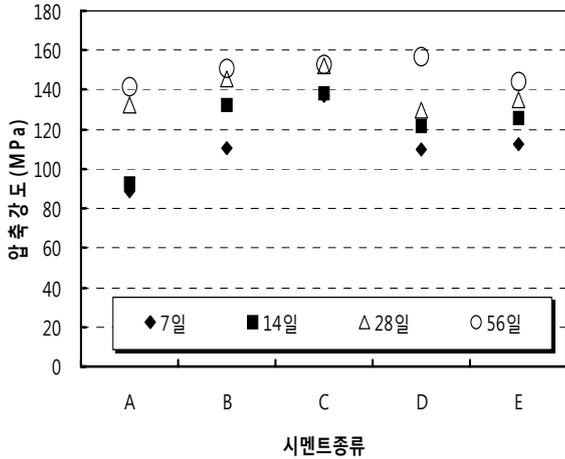


그림 8. 시멘트종류별 평균압축강도 비교

특히, 구조물이 고강도화 됨에 따라 기존에 사용되었던 응력-변형률 곡선에 대한 재검토가 필요하며, 재료의 역학적인 특성인 상호 응력관계를 명확히 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 150MPa 범위의 초고강도 콘크리트에 대한 재료역학실험과 기존에 수행된 국내외의 실험 자료를 비교분석하여 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계 및 압축강도에 따른 탄성계수와 인장강도를 평가하고 재령별 강도 발현율 등의 기본적인 재료의 역학적 특성을 평가하고자 한다. 이와 같은 연구를 통해 초고강도 콘크리트의 설계 및 해석 시스템 개발에 도움이 되고자 한다.

3.2 압축강도

초고강도 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해 시험에 앞서 공시체 탈형 후 편심을 최대한 고려하여 공시체의 양면을 연마 작업을 통해 평활하게 하고 탄성계수와 포아송비 산출을 위해 스트레인 게이지를 부착하였다.

압축강도 측정을 위해서 KS F 2405에 의거하여 사진 2와 같이 시험하였고 재령별 압축강도 시험결과는 표 8과 같이 측정되었다.



사진 2 압축강도 시험



사진 3. 인장강도시험

초고강도 콘크리트의 압축강도 시험결과 재령에 따라 56일 압축강도를 100% 기준으로 하여 3일 압축강도는 64%, 7일 압축강도는 70%, 28일은 95% 발현하였다. 양생조건에 따른 압축강도의 경우 시험결과에 다소 편차가 있지만 보통강도 콘크리트와 같이 수중양

생이 기중양생보다 약간의 높은 압축강도를 나타내는 경향이 있으나 초기 재령에서는 기중양생공시체의 경우 수분증발에 따른 살수 양생이 없어 수중양생공시체보다 강도값이 적게 측정되었으나, 콘크리트 내 수분이 별다른 영향을 미치지 않는 7일 재령이후에서는 강도값이 별 차이가 나지 않았다. 또한 공시체 크기에 대해서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

표 8. 콘크리트 공시체의 배합별 평균 압축강도 시험결과

No.	양생 조건	압축 강도 (MPa)							
		Ø100×200mm					Ø150×300mm		
		3일	7일	28일	56일	91일	7일	28일	56일
1	기 중	37,5	111,3	134,2	147,6	-	-	-	-
	수 중	94,6	103,4	139,3	148,1		83,4	123,6	148,7

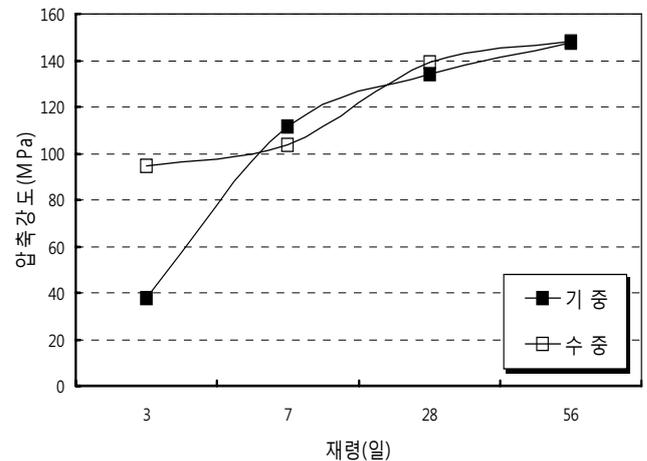


그림 9. 양생조건에 따른 재령별 평균압축강도 비교

3.3. 응력-변형률 관계

압축강도 실험으로부터 얻은 응력-변형률 곡선의 상향곡선부분은 직선에 가깝게 상승하는 것을 알 수 있다. 그러나 초고강도 콘크리트에 있어서는 급격한 취성파괴로 인해 변곡부 이후의 하강곡선의 긴꼬리 부분을 정확하게 시험으로부터 데이터를 얻을 수는 없었다. 초고강도 콘크리트에 있어서 최대 응력은 압축변형률이 약 0.0032인 점에서 발생하였다.

3.4. 쪼갬 인장강도

초고강도 콘크리트의 인장강도를 측정하기 위하여 Ø100×200mm의 원통형 공시체를 이용하여 사진 3과 같이 쪼갬 인장강도시험을 실시하였으며, 쪼갬 인장강도의 측정은 공시체의 상하면에 재하판을 설치하여 하중이 균등하게 전달되도록 하였으며, 공시체가 파괴될 때까지 가력하였다. 초고강도 콘크리트의 휨인장강도와 쪼갬 인장강도 시험결과는 표 9와 같다.

압축강도에 대한 쪼갬 인장강도의 비율은 보통강도 콘크리트가

약 8 %인데 비하여 초고강도 콘크리트에 있어서는 약 5.2 %로써 보통강도 콘크리트보다 다소 작은 값을 보이고 그림 11과 같이 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났으며, 또한 ACI 318-02와 KCI에서 예측하는 값보다 다소 높은 경향을 나타내었다.

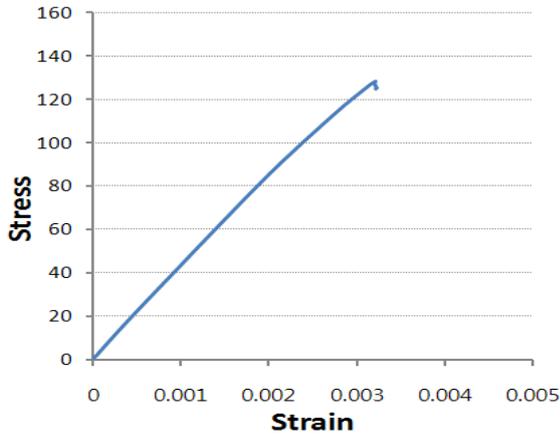


그림 10. 콘크리트 응력-변형률 곡선

표 9. 콘크리트 공시체의 배합별 평균 인장강도 시험결과

압축강도 (MPa)			인장강도 (MPa)					
Ø100×200mm			휨강도			쪼갠 인장강도		
7일	28일	56일	7일	28일	56일	7일	28일	56일
103.4	139.3	148.1	8.54	10.22	11.7	7.03	7.49	7.68

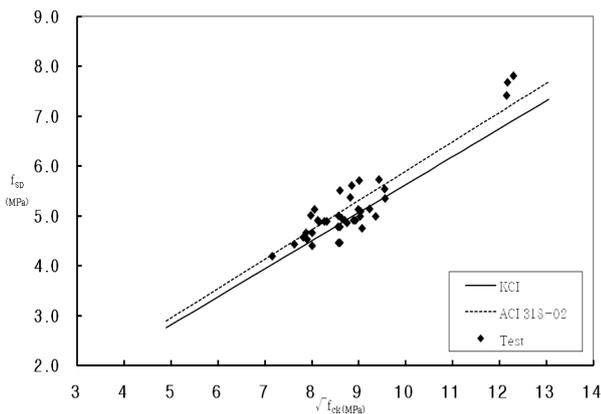


그림 11. 압축강도에 따른 쪼갠 인장강도

3.5 휨 강도

초고강도 콘크리트에 있어서 압축강도에 대한 휨강도의 비율은 약 8 %정도로 평가되었고 재령이 증가할수록, 그리고 압축강도가 높아질수록 상대적으로 휨강도의 비는 낮아지는 추세이다.

3.6 탄성계수

응력-변형률 곡선으로부터 구한 탄성계수와 기존 실험에서 얻은 탄성계수의 분포는 그림 12와 같다. 보통 측정방법에 따라 차이는 있지만 이들의 범위는 32,000~46,000MPa 로 대부분 해당범위에 분포하고 있다.

실험으로부터 계산한 탄성계수와 여러 규준의 모델식과 비교해 보면 고강도부분에서는 CSA A23.3-94와 NZS 3101-95가 다소 정확히 예측하는 것으로 보이나 초고강도부분에서의 탄성계수는 ACI 318-02와 EC2-02에서 예측하는 값들이 다른 규준들에 비해 좀 더 정확히 예측하는 것으로 판단된다.

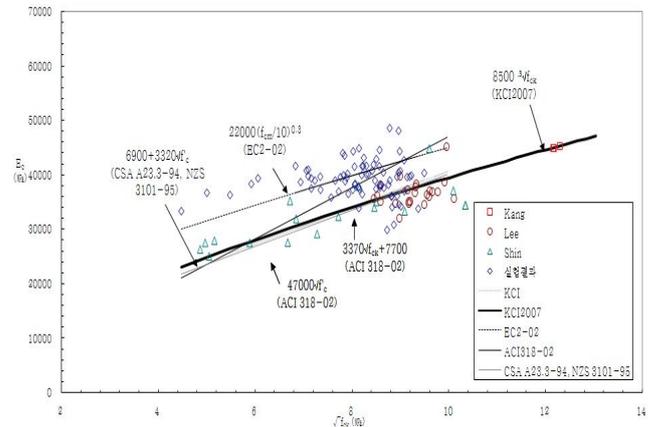


그림 12. 압축강도에 따른 탄성계수

4. 결론

- 1) 150MPa 초고강도 콘크리트의 배합에 소요되는 시간은 재료계량에서부터 믹싱한 후 배출까지 약 5~7분이 소요되어 일반적인 고강도 콘크리트 보다 2~3분정도 배합시간이 더 요구되는 것으로 나타났다.
- 2) 초고강도 콘크리트는 보통 고강도 콘크리트보다 매우 큰 점성을 가지므로 이러한 점성과 콘크리트 타설 및 작업성의 상관성을 고려하여 700~800mm 정도의 플로값을 확보하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 150MPa 정도의 초고강도 콘크리트 제조를 위한 단위시멘트량은 대략 1,030~1,150kg/m³ 정도이며, 물-결합재비는 12~14%의 범위 내에서 적당하며, 잔골재율은 점성 및 작업성을 고려하여 30~35% 범위 내에서 결정될 수 있음을 확인하였다.
- 4) 재령 56일 압축강도를 100%로 할 때 3일은 64%, 7일은 70%, 28일은 약 95% 발현하였다. 양생조건에 따른 압축강도는 배합별로 다소 편차가 있지만 수중양생이 기중양생보다 약간 높은 압축강도를 나타내었고, 공시체 크기에 따른 차이는 크지 않았다.

- 5) 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 최대응력까지 직선적인 분포를 보이다 최대하중 이후 급격한 취성과파괴함으로 하강곡선을 정확하게 얻을 수는 없었으며 압축변형률이 약 0.0032인 점에서 최대 응력이 발생하였다.
- 6) 압축강도에 대한 쪼갬 인장강도의 비율은 약 5.2%로써 보통강도 콘크리트보다 다소 작은 값을 보이고 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났으며, ACI 318-02와 KCI에서 예측하는 값보다 다소 높은 경향을 나타내었다.
- 7) 압축강도에 대한 휨강도의 비율은 재령이 증가할수록, 압축강도가 높아질수록 상대적으로 휨강도의 비는 낮아지는 추세이다.

- 9. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-02), ACI, Detroit, 2002
- 10. CEB-FIP, High-Strength Concrete : State of the Art Report, CEB-FIP, 1992
- 11. Patrick Paultre and Denis Mitchell, Code Provisions for high strength Concrete an International Perspective, Concrete International, pp.76~90, 2003
- 12. www.emporis.com

(접수 2010.4.30, 심사 2010.5.25, 게재확정 2010.6.1)

참 고 문 헌

- 1. 국토 해양부, 콘크리트 구조 설계 기준, 한국콘크리트학회 2007
- 2. 김강민의, 하이플로 시멘트를 이용한 240MPa 초고강도 콘크리트 물성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집, 제20권 제1호, pp.92~95
- 3. 손유신의, 설계강도 150 MPa 초고강도 콘크리트 개발, 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집, 제18권 제1호, pp.29~32, 2006
- 4. 신성우의, 고강도 콘크리트 제조, 시공 및 설계, 기문당, 2008
- 5. 안중문의, 90MPa 초고강도 콘크리트의 재료역학 특성 평가, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 제19권 제2호, pp.681~684, 2007
- 6. 이승훈의, 설계강도 150MPa 초고강도 콘크리트 현장 적용, 한국콘크리트학회지 제18권 제5호, pp.59~64, 2006.9
- 7. Hayakawa Mitsutaka, 일본 고강도 콘크리트 개발 및 적용사례, 제2회 초고충전축과 고성능콘크리트 국제심포지엄 논문집, 롯데건설(주) 기술연구소, pp.151~174, 2007.3
- 8. ACI 363, State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI363R-92(Reapproved 1997), 1992

요 약

본 연구에서는 실내 배합 실험을 통하여 150MPa 초고강도 콘크리트의 제반 물성을 평가한 후 150MPa 초고강도 콘크리트 제조를 위한 최적 배합 조건을 제시하고자 하며 압축강도, 응력-변형률 관계, 탄성계수와 인장강도, 휨강도 등과 같은 기본적인 재료역학 특성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 초고강도 콘크리트의 목표 물성으로 배합강도는 150MPa, 슬럼프 플로는 700 ± 50mm를 목표로 정하여 57개의 배합을 실시하였으며, 각각의 배합조건에 따른 물성 및 역학특성을 검토하였다. 실험결과 초고강도 콘크리트는 보통의 고강도 콘크리트보다 매우 큰 점성을 가지므로 이러한 점성과 콘크리트 타설 및 작업성의 상관성을 고려하여 700~800mm 정도의 플로값을 확보하여야 할 것으로 판단되며, 재령 56일 압축강도를 100%로 할 때 3일은 64%, 7일은 70%, 28일은 약 95% 발현하였다. 150MPa 정도의 초고강도 콘크리트 제조를 위한 단위 시멘트량은 대략 1030~1150kg/m³ 정도이며, 물-결합재비는 12~14%의 범위 내에서 적당하며, 잔골재율은 점성 및 작업성을 고려하여 30~35% 범위 내에서 결정될 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 초고강도 콘크리트, 슬럼프 플로, 압축강도, 150MPa