

# 고강도 경량콘크리트의 재료특성

Material Properties of High Strength Lightweight Concrete

이재삼, 김정식, 강 훈  
〈고려산업개발 (주) 연구개발실〉

최 명 신  
〈한양대학교 대학원〉

반 병 열  
〈대전대학교 건축공학과 조교수〉

신 성 우  
〈한양대학교 건축공학과 교수〉

- |                |                         |
|----------------|-------------------------|
| 1. 서론          | 3.2 굳지 않은 경량콘크리트의 특성    |
| 2. 사용재료 및 시험방법 | 3.3 압축강도                |
| 2.1 사용재료       | 4. 고강도 경량콘크리트 제조 및 재료특성 |
| 2.2 배합계획       | 4.1 일반사항                |
| 2.3 시험방법       | 4.2 레미콘 제조 및 재료역학 특성 실험 |
| 3. 실험결과 및 분석   | 5. 결론                   |
| 3.1 일반사항       |                         |

## 1. 서론

콘크리트구조물의 고층화, 대형화, 복합기능화에 따라 콘크리트의 물리적성능향상이 필요하게 되었으며, 이에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 콘크리트는 경제성과 우수한 성능을 가지고 있어 가장 많이 사용되는 건설재료임에도 불구하고 단위무게에 비하여 낮은

강도 때문에 부재단면이 확대되어 자중의 증대 및 유효사용면적의 감소라는 문제점을 가지고 있다. 이러한 단위체적당 중량과 강도 문제를 해결하기 위해 콘크리트의 경량화가 시도되고 있다. 그러나, 콘크리트의 경량화에 따른 강도의 저하로 구조용 콘크리트로 사용하려면 경량콘크리트의 고강도화가 필수적이며, 선진 각국에서는 고강도 경량콘크리트에 대한

연구가 활발히 진행되어 이미 실용화가 이루어 졌고 고층건물, 교량, 해양구조, 프리캐스트 구조물 등에 대한 많은 시공사례가 있다.

고강도 경량콘크리트를 레미콘 공장에서 대량생산하기 위해서는 경량골재의 강도 확보, 골재수급의 난이성에 따른 제조가격의 상승, 시공시 발생하는 급격한 슬럼프 손실과 펌프 압송상의 문제점 등을 내포하고 있어 이를 개선하여 사용할 수 있도록 국내 실정에 맞는 고강도 경량콘크리트의 실용화에 대한 연구가 절실한 실정이다.

그러므로, 고강도 경량콘크리트의 실용화에 앞서 실내실험배합을 통하여 고강도 경량콘크리트의 반죽질기(Consistency), 슬럼프경시변화, 단위용적중량, 물-결합재비의 영향, 수화열경시변화, 압축강도 등에 대한 실험조사가 시행되었다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 골재

굵은골재로 사용된 팽창점토는 회전로에서 점토를 소성가공하여 만들어지는 인공경량골재를 사용하였으며, 잔골재는 세척사를 사용하였고 [표 1]에 물리적 성질을 나타내었다.

[표 1] 골재의 물리적 성질

구 분	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	비중(표건)	흡수율(%)	공극율(%)	실적율(%)	조립율(%)
잔골재(세척사)	1612	2.59	0.78	-	-	2.73
팽창점토 (19mm)	729	1.22	11.01	40.2	59.8	6.82

#### 2.1.2 광물혼화제

시멘트 대체재료로서 사용한 혼화제는 실

리카흙, 플라이애쉬, 제올라이트이며, 제올라이트(Zeolite) 주성분은 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이며, 특히 국내산 제올라이트는 그 활성도가 높은 것으로 알려져 있다.

따라서, 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우 포졸란 반응에 의한 강도의 증진, 수밀성의 향상 등이 기대되며, 특히 유동화 경량콘크리트의 점성을 높여 골재의 부립현상을 막아주는 작용을 하게될 것으로 예상된다.

#### 2.1.3 화학혼화제

고성능감수제가 사용되지 않았을 때의 경량콘크리트의 반죽질기나 슬럼프와 동일한 성질을 획득하고 결과적으로 강도증진을 시킬 수 있는 감수제를 사용하였다. 고성능감수제로는 낮은 물-시멘트비의 고강도 경량콘크리트를 제조하기 위해 J사의 나프탈렌계 PHOENIX-R#1을 사용하였다.

### 2.2 배합계획

[표 2]에 본 실험의 배합변수를 나타내었으며, 경량콘크리트의 고강도화를 위하여 단위결합재량을 500, 550kg/cm<sup>2</sup>으로 높게하고, 시멘트의 일부를 제올라이트, 실리카흙, 플라이애쉬로 치환하여 고강도화에 따른 제반 요구성능을 만족하도록 계획하였다. 또한, 고성능감수제의 혼입량은 목표슬럼프 21±2cm를 만족하도록 0.5%~1.75%범위에서 각 변수에 맞게 조절하였다.

### 2.3 시험방법

굵은골재로 사용된 팽창점토는 흡수율이 매우 커서 건조한 상태로 배합할 경우 급격한 슬럼프 손실이 발생하므로 배합전에 충분한 사전흡수 과정을 거쳐 표면건조 내부포수 상

(표 2) 배합계획 및 실험결과

Spec. No.	Binder (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	S/A (%)	Zeolite (%)	FA (%)	SF (%)	SP (%)	물 성 실험 결과				압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
								Slump (cm)	Flow (cm)	Air (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )	3-day	7-day	28-day
A1	500	35	45	0	0	0	1.5	22.0	39/38	4.2	1904	228	296	361
A2				5	0	0	1.5	22.5	39/40	4.5	1879	231	299	375
A3				5	5	0	1.3	21.0	36/37	4.1	1881	199	277	366
A4				5	0	5	1.75	22.0	38/40	4.6	1868	225	310	377
A5				10	0	0	1.5	19.5	32/32	4.6	1878	210	284	360
A6				10	5	0	1.5	20.5	35/36	4.4	1858	194	264	344
A7				10	0	5	1.75	21.0	36/34	4.5	1872	213	270	375
B1		40	45	0	0	0	0.5	21.5	42/40	4.0	1859	214	277	345
B2				5	0	0	0.5	19.5	34/36	4.2	1871	192	259	338
B3				5	5	0	0.7	13.0	43/41	4.4	1886	192	256	309
B4				5	0	5	0.8	19.5	38/36	3.8	1870	218	268	349
B5				10	0	0	0.75	22.0	40/42	4.2	1867	188	250	324
B6				10	5	0	0.7	21.5	42/39	4.0	1858	171	229	293
B7				10	0	5	0.9	17.0	31/29	4.4	1849	204	259	335
C1	550	33	42	0	0	0	1.5	24.0	53/56	2.7	1936	245	324	371
C2				5	0	0	1.5	24.5	50/52	2.9	1906	260	327	388
C3				5	5	0	1.5	24.0	49/51	2.6	1922	257	233	367
C4				0	5	5	1.6	21.5	38/37	2.8	1870	259	305	363
C5				0	5	0	1.3	23.5	48/49	2.6	1926	262	313	376
D1			45	0	0	0	1.2	21.5	35/35	3.7	1904	252	304	377
D2				5	0	0	1.2	24.0	47/49	2.8	1938	261	333	395
D3				5	5	0	1.3	23.0	40/43	3.0	1914	241	307	380
D4				0	5	5	1.6	23.0	41/41	3.3	1911	255	327	396
D5				0	5	0	1.2	24.0	49/49	3.1	1917	254	315	383
E1		35	42	0	0	0	1.1	22.5	41/43	3.3	1860	232	292	361
E2				5	0	0	1.1	22.0	42/43	3.7	1882	232	295	355
E3				5	5	0	1.2	22.0	40/41	3.6	1870	219	282	351
E4				5	0	5	1.5	22.5	41/42	3.2	1864	242	307	387
E5	10			0	0	1.2	21.5	37/38	3.9	1856	221	280	340	
E6	10			5	0	1.3	21.0	36/36	3.2	1853	208	275	346	
E7	10			0	5	1.6	22.5	41/42	3.6	1834	214	281	348	
F1	45	0	0	0	1.0	20.0	35/36	3.7	1903	240	306	364		
F2		5	0	0	1.0	20.0	35/36	3.5	1873	224	291	367		
F3		5	5	0	1.2	22.0	37/38	3.3	1911	239	308	373		
F4		5	0	5	1.4	20.0	34/35	3.2	1911	260	331	406		
F5		10	0	0	1.2	21.5	41/41	3.6	1901	238	300	362		
F6		10	5	0	1.2	20.0	35/35	2.7	1918	235	302	379		
F7		10	0	5	1.5	21.5	36/39	3.3	1878	236	296	377		

태로 실험을 실시하였다.

실험은 중량배합으로 실시되었으며, 물과 혼화제를 제외한 각 재료의 전량투입→건비빔 40초→물+고성능감수제 투입→40초 혼합→상태확인 후 20초 혼합→배출 후 물성실험을 실시하는 순서로 진행되었다. 공시체 제작은 KS F 2403에 따라 실시하였으며,  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  크기로 3일, 7일, 28일 압축강도 측정용으로 각 재령별로 3개씩 제작하였고,  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 항온수조에서 수중양생 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 일반사항

기건중량이  $2.0\text{ton/m}^3$  이하인 고강도-경량콘크리트의 실용화를 위해 실험실 배합실험을 실시하였으며, 레미콘 제조를 위해 최적 배합비를 도출하고 레미콘 생산설비로 제조 가능하며, 현장에서 시공이 가능한 최상의 품질을 확보하는 것을 목표로 하였다.

#### 3.2 굳지 않은 경량콘크리트의 특성

##### 3.2.1 반죽질기

목표 슬럼프를  $21 \pm 2\text{cm}$ 로 하여 실시한 실험 결과  $17.0 \sim 24.5\text{cm}$  범위의 슬럼프값을 얻었으며, 또한 슬럼프 플로우는  $35 \sim 55\text{cm}$  범위로 나타나, 실제 구조물에 유동화 경량콘크리트로 사용하기에 충분한 반죽질기를 얻었다.

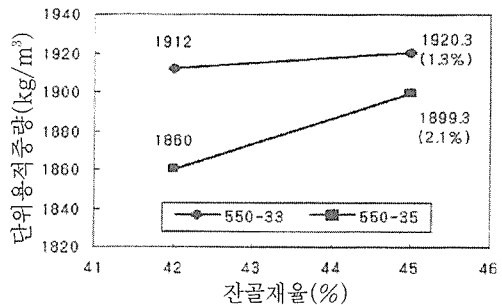
##### 3.2.2 슬럼프 경시변화

경시변화 실험결과는 D5의 경우는 경시변화에 대한 대책을 마련하기 위해 고성능감수제를 2회에 나누어 투여하였다. 사전 흡수시킨 골재를 사용한 D3에서는 110분 경과 후의 슬럼프 및 슬럼프플로우가 각각  $19.5\text{cm}$ ,

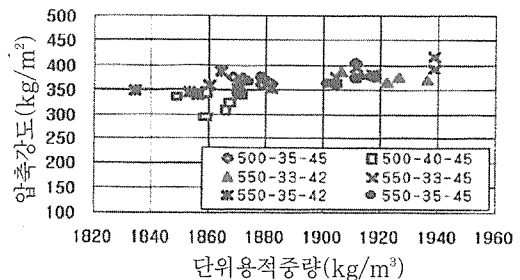
$37/39\text{cm}$ 로 나타나, 통상의 레미콘 운반시간에 대하여 만족한 결과를 얻었다.

#### 3.2.3 단위용적중량

구조용 경량콘크리트의 단위용적중량은  $2.0\text{t/m}^3$  이하로 되어야한다. 본 실험의 단위용적 중량은  $1834 \sim 1938\text{kg/m}^3$  범위로 나타나, 구조용 콘크리트로 사용함으로써 보통중량콘크리트에 비해  $1\text{m}^3$ 당 약  $400 \sim 500\text{kg/m}^3$  이상의 자중감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한, [그림 1]에 나타난 바와 같이 단위결합재량  $550\text{kg/m}^3$ 인 경우에는 잔골재율 증가에 따라 물-결합재비 33%에서 단위용적중량이 1.3%, 물-결합재비 35%에서 2.1%증가하는 결과를 나타내었다.



(그림 1) 단위용적중량과 잔골재율



(그림 2) 단위용적중량과 압축강도

#### 3.2.4 공기량

ACI 위원회 211에서는 동결융해 또는 염해의 우려가 있는 경량콘크리트에 대해 굵은

골재 최대크기에 따라서 19mm일 때 공기량을 4~6%, 10mm일 때 공기량을 4.5~7.5%로 하도록 권장하고 있다. 본 실험에서는 공기량이 2.6%~4.6%범위로 나타났다.

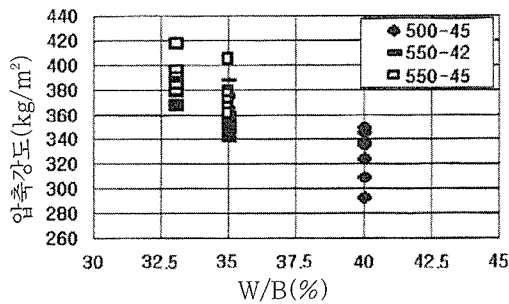
### 3.3 압축강도

#### 3.3.1 단위결합재량의 영향

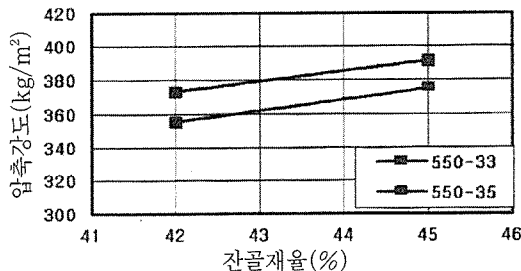
단위결합재량 증가에 비례하여 압축강도는 증가하게 되나 단위결합재량을 높여도 압축강도가 더 이상 높아지지 않는 한계가 있는데, 이는 경량골재 자체의 강도에 한계가 있기 때문이다. 실험결과 단위결합재량이 500 kg/m<sup>3</sup>에서 550kg/m<sup>3</sup>으로 증가함에 따라서 압축강도는 평균 26kg/m<sup>2</sup>이 증가하였다.

#### 3.3.2 물-결합재비의 영향

[그림 3]은 물-결합재비 감소에 따라 압축강도가 증가하고 있음을 나타낸다. 결합재량 500kg/m<sup>3</sup>에서는 물-결합재비를 35%에서



(그림 3) 물-결합재비와 압축강도



(그림 4) 잔골재율과 압축강도

40%로 5% 증가시킴에 따라서 압축강도는 평균 37.9kg/m<sup>3</sup>이 감소하였다.

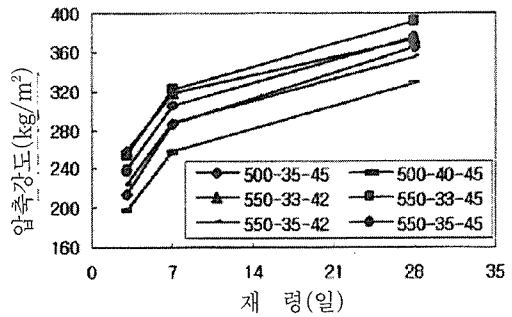
결합재량 550kg/m<sup>3</sup>에서는 물-결합재비를 33%에서 35%로 2% 증가시킴에 따라서 압축강도는 잔골재율 42%일 때 평균 17.6kg/cm<sup>2</sup> 이 감소하고, 잔골재율 45%일 때 평균 10.8kg/cm<sup>2</sup> 이 감소하였다.

#### 3.3.3 잔골재율의 영향

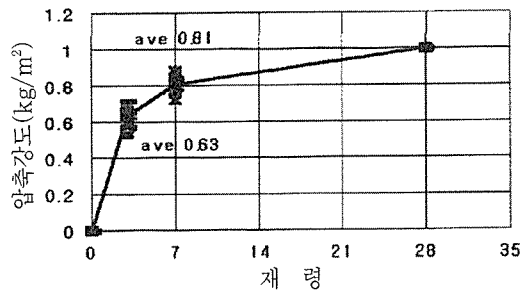
[그림 4]는 잔골재율과 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 결합재량 550kg/m<sup>3</sup>인 시리즈에서 잔골재율이 42%에서 45%로 증가함에 따라서 압축강도는 물결합재비가 33%일 때 평균 13.2kg/cm<sup>2</sup>이 증가하였고, 물 결합재비가 35%일때는 평균 20kg/cm<sup>2</sup>이 증가하였다.

#### 3.3.4 양생재령에 따른 강도발현

[그림 5]는 양생재령에 따른 강도발현 추



(그림 5) 재령에 따른 압축강도



(그림 6) 재령에 따른 압축강도 발현율

이를 나타내었고, [그림 6]에 28일강도를 기준으로하여 압축강도 발현비율을 나타내었는데 3일강도에서는 28일 강도의 약 63%, 7일 강도에서는 약 81% 정도의 압축강도 발현율을 보이고 있다.

#### 4. 고강도 경량콘크리트 제조 및 재료 특성

##### 4.1 일반사항

앞서 수행된 실험실 배합실험을 통해 선정된 최적배합비를 이용하여 배척플랜트에서 실제로 레미콘을 제조하여 재료역학적 특성 규명 실험을 위한 시험체를 제작하였고, 현장 시공성을 확인하여 적절한 시공방안을 마련하기 위해 실 구조물에 시험타설을 추진하여 종합적인 실용화 방안을 강구하였다.

##### 4.2 레미콘 제조 및 재료역학 특성 실험

###### 4.2.1 실험개요

실험실 배합실험의 결과와 재료적 성질, 제조원가, 수화온도, 레미콘 생산설비 등에 대한 종합적인 검토를 통해 선정된 최적배합비로 레미콘을 제조하여 실험체를 제작하였다. 굵은골재의 최대 치수는 19mm이고 물성실험 결과는 [표 3]에 나타나 있다.

[표 3] 굵지 않은 콘크리트의 물성실험

항목	최적배합				슬럼프 (cm)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	기건단위 중량 (kg/m <sup>3</sup> )
	단위결합재 량(kg/m <sup>3</sup> )	물결합재 비(%)	잔골재 율(%)	플라이애 쉬(%)				
19mm	550	31	45	5	21.0	35/36	2.6	1886

고강도 경량콘크리트의 압축강도 특성을 규명하기 위하여  $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 몰드를

를 제작하였고, 내부 수화온도 측정을 위해  $500 \times 500 \times 500$ mm 크기의 입방체를 제작하여 표면과 내부 중앙에 각각 온도계지를 매립하였다. 실린더 시험체의 수중양생, 기건양생, 그리고 천공된 시험체의 각 재령별로 압축강도를 측정된 결과는 [표 4]에 나타나 있다.

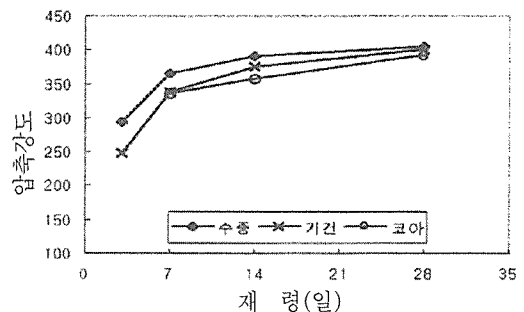
[표 3] 재령별 압축강도

구분	항목	압축강도			
		3일	7일	14일	28일
수	중	294	364	390	404
기	건	249	337	375	388
코	아	-	336	357	373

###### (1) 압축강도

일축 압축가력 하에서의 경량콘크리트의 응력 변형도 거동을 보통중량콘크리트와 비교할 때 곡선의 상승부분의 경사는 다소 완만하여 강성이 낮고, 최대하중 이후에는 하강곡선이 급격히 떨어져 보통중량콘크리트 보다 취성적인 파괴 거동을 보였다. 이러한 압축거동 특성은 경량골재의 강도가 보통중량 골재의 강도보다 낮고 또한 경량골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도도 낮기 때문인 것으로 판단된다.

압축강도는 [그림 8]에 나타난 바와 같이 양생조건별로는 수중>기건>코아공시체의 순으로 높은 강도를 나타내고 있으며, 28일강도를



[그림 8] 시험체의 재령별 압축강도 발현

기준으로 3일강도는 63%, 7일강도는 81%로 높은 조기강도 발현율을 보이고 있다.

### (2) 쪼갬인장강도와 휨강도 추정

기존 연구의 실험식에 의하여 고강도 경량콘크리트의 압축강도에 의한 쪼갬인장강도와 휨강도에 대한 추정결과가 [표 5]에 나타나 있다. 추정된 수중 및 기건 상태에서 거의 동일하게 쪼갬인장강도는 고강도 경량콘크리트의 압축강도의 1/14 정도로 추정되었다. 또한, 수중상태에서 휨강도는 약 1/7 정도로 나타났다.

[표 5] 압축강도에 따른 쪼갬인장강도 및 휨강도 (단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

항목 구분	f <sub>c</sub> (28일)	쪼갬인장강도			휨강도		
		f' <sub>sp</sub>	f' <sub>sp</sub> /f' <sub>c</sub>	f' <sub>sp</sub> /√f' <sub>c</sub> *	f' <sub>r</sub>	f' <sub>r</sub> /f' <sub>c</sub>	f' <sub>r</sub> /√f' <sub>c</sub> **
수중	404	28.7	1/14.08	1.43	55.2	1/7.32	2.75
기간	400	28.0	1/14.30	1.40	-	-	-

\* f'<sub>sp</sub> = 1.8 √f<sub>c</sub> (for Normal Weight Concrete)

\*\* f'<sub>r</sub> = 2.0 √f<sub>c</sub> (for Normal Weight Concrete)

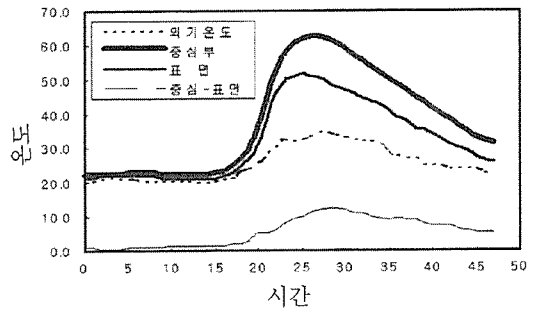
### (3) 수화온도 경시변화

고강도 경량콘크리트의 내부 수화온도를 측정하기 위해 500×500×500 mm의 정방형 시험체를 제작하여 중앙부와 표면에서 각각 수화온도를 측정하여 비교하였다. 시간이 경과함에 따른 경량콘크리트의 각 부위의 온

[표 6] 수화온도 측정결과

구분	중앙부		표면		대기온도*	
	온도 (°C)	경과 시간 (h)	온도 (°C)	경과 시간 (h)	온도 (°C)	경과 시간 (h)
단위결합 재량 550kg/m <sup>3</sup>	62.5	26	52.0	25	11.5	26

\* 대기온도는 중심부 온도에 대응하는 값임.



[그림 11] 수화온도 경시변화

도가 대기온도와 함께 [표6]에 나타나 있다. 최고온도는 26시간 경과후에 나타났으며 이때 중앙부와 표면의 온도차는 [그림 11]에 나타난 바와 같이 각각 10.5°C로 나타났다.

## 5. 결론

고강도 경량콘크리트의 실용화를 위하여 위에서 논의된 기초적 실험결과를 토대로 구조용 고강도 경량콘크리트를 레미콘 공장에서 대량생산하여 현장적용을 시도하게 되었다. 사전에 현장모의실험(Mock-Up Test)을 실시한 결과 펌프압송을 통한 시공에 어려움이 있어 버킷으로 양중하여 현장타설을 시도하였다. 슬래브 중 일부에 고강도 경량콘크리트를 사용함으로써 시험 생산된 콘크리트의 시공성과 품질관리에 대한 전반적인 기초자료 검토를 수행할 수 있었다. 고강도 경량콘크리트 대량생산을 위하여 레미콘공장에서 미리 함수시킨 인공경량골재를 사용하여 생산함으로써 실용화하였다.

고강도 경량 레미콘 제조를 통하여 단위결합재량 500kg/m<sup>3</sup>, 550kg/m<sup>3</sup>에 대하여 재령 28일 압축강도 실험결과 목표강도 350kg/m<sup>3</sup> 이상으로 나타났다. 측정된 기건공시체의 무게로부터 고강도 경량 레미콘을 실제 구조물에 사용함으로써 1m<sup>3</sup>당 약 400kg 이상의 자

중감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

레미콘 운반시간에 따른 슬럼프 경시변화를 측정할 결과 100분 경과후 까지도 적절한 작업성 확보가 가능하였다. 제조된 고강도 경량콘크리트는 점성이 커서 보통중량콘크리트에 비하여 작업성이 다소 저하되고, 타설시 경량골재의 부립현상이 나타나 표면 마감작업은 타설 후 일정시간 경과 후 실시해야 하는 것으로 나타났다.

이상의 기초실험이 향후 더욱 발전된 연구나 레미콘업계에 작은 도움이되길 바란다.

### 참고문헌

- 1) S. Mindess, J. F. Young, "Concrete", Prentice Hall, Newsersey, 198, pp.581-599.
- 2) 김태섭, "혼화제에 의한 경량콘크리트의 고강도화에 관한 실험적 연구", 한양대학교 박사학위논문, 1993.
- 3) ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete". Concrete International, August 1980, pp.47-64.
- 4) ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete", ACI Journal, Aug. 1967, pp.433-469.
- 5) 신성우 등, "구조용경량콘크리트의 고강도화를 위한 기초적 실험연구", 대한건축학회발표논문, Vol.7, No.13, 1997. 4, pp.625-630.

