

고강도 경량콘크리트의 개발, 구조특성 및 실용화

Development and Application of High-Strength Lightweight Concrete, and its Structural Properties

최 명 신 [*]	안 중 문 [*]	신 성 우 ^{**}
Choi, Myung Shin	Ahn, Jong Moon	Shin, Sung Woo
강 훈 ^{***}	김 정 식 ^{***}	이 재 삼 ^{***}
Kang, Hoon	Kim, Jung Shik	Lee, Jae Sam

ABSTRACT

The objective of this study is development of high strength lightweight concrete and application for structural use. For this, mix proportions for each strength level were selected from lab tests, and adapted to producing ready-mixed concrete in batcher plant.

It was very important to prewet the lightweight aggregates sufficiently for producibility and also workability.

Splitting tensile strength of high-strength lightweight concrete produced has lower values than that of normal weight concrete, but modulus of rupture and modulus of elasticity are not less than normal weight concrete.

The strength reduction factor(λ) for sand-lightweight concrete make higher than 0.85 present in structures using high-strength lightweight concrete. And It was showed that not parabola distribution but triangular distribution of stress in compression zone.

1. 서론

현대 구조물이 점차로 다기능화 하면서 초고층, 초대형, 장스팬, 특수구조물(해양구조 등) 등을 구현하기 위한 건설재료의 성능향상이 주요 관심사가 되고 있으며, 이에 따라 기존 콘크리트의 문제점을 개선하여 고강도·고내구성·초경량화 시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 콘크리트는 단위무게에 비하여 강도가 낮고, 자중이 무겁기 때문에 구조부재의 단면이 확대되고 사용면적이 감소하는 등의 문제점을 갖고 있다. 그리고 천연골재의 고갈 및 골재 채취에 따른 환경문제의 부각으로 인해 인공경량골재가 개발되어 구조물의 자중을 줄일 목적으로 경량콘크리트의 사용이 증가될 것으로 예상되나, 국내에서는 구조용으로는 경량콘크리트의 활용이 전혀 이루어지고 있지 않은 실정이다.

* 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정

** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

*** 정회원, 고려산업개발 주식회사 기술연구부

이에 따라 본 연구에서는 압축강도 270kg/cm² 이상을 갖는 구조용 고강도-경량콘크리트를 개발하고 이를 실용화하기 위하여 배합실험을 통해 레미콘 생산에 필요한 배합비를 선정하고, 이를 기초로 하여 기존의 레미콘 생산설비를 이용하여 대량생산을 시도하며, 개발된 재료의 역학적 특성과 구조적 성능을 평가하기 위한 실험을 병행하여 생산관리, 구조설계 및 현장 적용을 위해 필요한 전반적인 연구를 수행하였다.(그림 1)

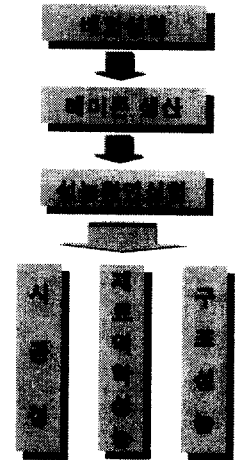


그림 1 연구의 추진 흐름

2. 배합실험

2.1 목표

레미콘 생산에 필요한 배합비 선정을 위하여 실험실에서 배합실험을 실시하였다. 단위무게는 1.8~1.9t/m³으로 보통중량콘크리트 보다 0.4~0.5t/m³ 정도 가벼운 경량콘크리트를 대상으로 하여, 목표 압축강도는 270~350kg/cm², 목표 슬럼프는 시공성 확보를 위해 18~21cm로하여 실험을 계획하였다.(표1)

표 1 배합실험의 목표

구 분	목 표
단 위 무 계	1.8 ~ 1.9 t/m ³
압 축 강 도	270 ~ 350 kg/cm ²
슬 럽 프	18 ~ 21 cm

2.2 사용재료

본 연구에서는 국내생산된 인공경량골재인 팽창점토를 굵은골재로, 잔골재로는 세척사를 사용하였다. (sand-lightweight concrete) 골재의 물리적 성질은 표 2에 나타나있다. 혼화재료로는 플라이 애쉬와 실리카 흙, 제올라이트를 사용하였고, 나프탈렌계 고성능 감수제를 혼화제로 사용하였다.

표 2 골재의 물리적 성질

구 분	단위중량 (kg/m ³)	비 중	흡 수 율 (%)	공 극 율 (%)	실 적 율 (%)	조 립 율 (%)
잔 골 재 (sand)	1612	2.59	0.78	-	-	2.73
굵은골재 (19mm)	729	1.22	11.01	40.2	59.8	6.82

2.3 실험변수

실험은 목표 압축강도를 2단계로 구분하여 1단계에서는 270kg/cm² 부터 300kg/cm²까지, 2단계에서는 350kg/cm²까지로 하여 단위결합재량과 물결합재비(W/B), 잔골재율

표 3 배합실험 변수계획

구 분	1단계 270~300kg/cm ²	2단계 300~350kg/cm ²
단위결합재량(kg/m ³)	400~420	500~550
물 결 합 재 비 (%)	36~45	33~45
잔 골 재 율 (%)	45~48	45
혼화재료 치환율(%)	5 (FA)	5 (FA, SF, ZL)

(S/A), 혼화재료 사용량 등을 달리하여 변수계획을 하였다. 배합실험 변수계획은 표3에 나타나 있고,

고성능감수제 사용량은 각 배합변수에 따라 목표 슬럼프에 맞도록 조절하였다.

2.4 실험결과

2.4.1 굳지않은 콘크리트

배합직후에 측정된 콘크리트의 물성치가 표4에 나타나있다. 경량골재의 흡수율이 높기 때문에(11%) 배합직후의 슬럼프치를 크게 하여 슬럼프 저하를 고려하였으며, 콘크리트의 반죽질기 및 골재분리 등을 고려할 때 23cm 정도의 슬럼프를 상한선으로 해야 할 것으로 보인다.

표 4 굳지않은 콘크리트 실험결과

구 분	1단계 270~300kg/cm ²	2단계 300~350kg/cm ²
슬 럽 프 (cm)	22 ~ 24	19 ~ 23
슬럼프 폴로우 (cm)	44 ~ 58	40 ~ 50
공 기 량 (%)	3.0 ~ 3.5	2.8 ~ 4.6
단 위 중 량 (kg/m ³)	1870 ~ 1910	1870 ~ 1940

2.4.2 압축강도

재령별 압축강도 측정결과가 표 5에 나타나 있다. 단계별 목표강도를 충분히 얻을 수 있었고, 3일에서 28일 강도의 63~65% 정도, 7일에서는 81~87% 정도로 높은 조기강도 발현을 나타내었다.

표 5 재령별 압축강도 실험결과

압 축 강 도 (kg/cm ²)	1단계 270~300kg/cm ²	2단계 300~350kg/cm ²
3 일	170 ~ 220	190 ~ 260
7 일	220 ~ 310	260 ~ 330
28 일	260 ~ 360	310 ~ 405
3 일 / 28일	0.65	0.63
7 일 / 28일	0.87	0.81

2.4.3 강도별 최적배합비 선정

레미콘 생산을 위한 강도별 배합비의 선정은 배합실험 결과를 기초로 하여 목표강도의 발현, 워커빌리티, 수화 온도 저감, 제조원가, 생산설비 등 고려하였

표 6 강도별 최적배합비 선정

목표강도 (kg/cm ²)	단위결합재량 (kg/m ³)	물결합재비 (%)	잔골재율 (%)	플라이애쉬 (%)	고성능감수제 (%)
270	400	45	45	5	0.8~1.5 (경량골재의 합수상태에 따라 조절)
300	420	36	45	5	
350	550	33	45	5	

고, 강도발현을 위한 실리카흙의 사용, 중점작용을 위한 제올라이트 사용이 검토되었으나, 플라이애쉬 만으로도 목표강도를 얻기에 충분하고, 별도의 중점재료의 사용도 불필요한 것으로 판단되어, 수화열 저감 및 경제성 측면에서 플라이 애쉬만을 혼입한 배합을 선정하였다.

3 레미콘 Mock-Up Test

표 6에서 선정된 배합중 설계압축강도가 270, 350kg/cm²인 두 종류를 대상으로 하여 레미콘 생산을

추진하였다. 경량골재는 호퍼에서 1일 전부터 주기적으로 살수하여 사전흡수된(rewetted) 상태로 사용하였다. 배합실험에서 선정된 배합비를 적용하였고 대량생산에 따른 생산관리 및 품질관리 방안을 검토함과 동시에 개발된 제품의 재료 및 구조역학 성능실험을 병행(실험체제작)하였다.

그림 2는 압축강도 350kg/cm²을 대상으로 레미콘의 운송시간을 고려하여 경시변화를 측정한 것으로써 경량골재를 충분히 사전흡수 시키고, 배합직후의 슬럼프도 크게 한 결과 90분 경과후 까지도 목표슬럼프 18cm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

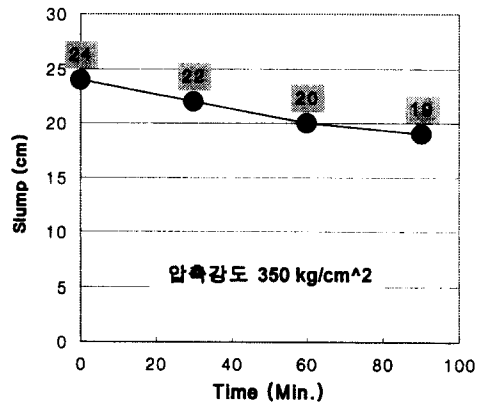


그림 2 레미콘 운송시간을 고려한 경시변화 측정(350kg/cm²)

4. 재료역학적 특성실험

4.1 일반사항

압축강도 270kg/cm², 350kg/cm²을 대상으로 하여 레미콘 Mock-Up Test와 함께 재료역학실험을 실시하였다. 실험 항목은 압축강도, 활열인장강도, 휨인장강도, 탄성계수, 수화온도 등이며, 양생방법은 수중과 기건양생을 병행하고, 슬래브타입의 Mock-Up 실험체를 제작하여 코아공시체를 채취하여 비교하였다.

4.2 기건단위중량

기건공시체의 무게로 부터 측정된 콘크리트의 단위중량은 1.81~1.88t/m³ 정도으로써, 보통중량콘크리트 보다 1m³ 당 0.4~0.5ton 정도의 자중감소 효과를 얻을 수 있어서 구조적으로나, 경제적으로 부가적인 이점이 많이 생길 것으로 보인다.(표7)

표 7 기건단위중량

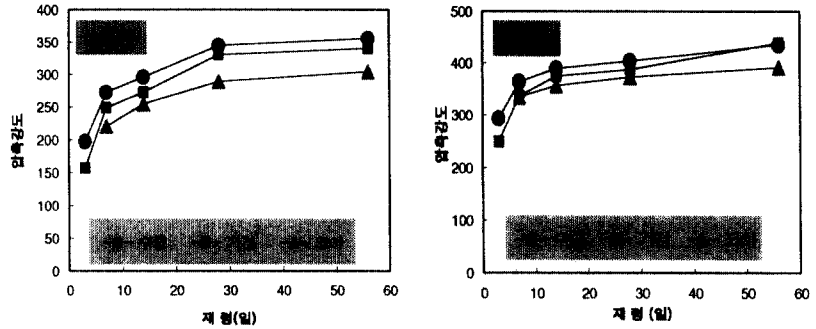
구 분	단 위 중 량 (kg/m ³)
1단계 (270kg/cm ²)	1811
2단계 (350kg/cm ²)	1884

4.3 압축강도

표 8 재령별 압축 및 인장강도 실험결과

구분	항목	압 축 강 도					인 장 강 도					휨인장강도					탄성 계수
		3일	7일	14일	28일	56일	3일	7일	14일	28일	56일	3일	7일	14일	28일	56일	
1단계 (270)	수중	196	273	296	344	356	18.0	23.2	20.7	23.5	24.7	26.4	32.3	34.8	37.3	42.5	2.17
	기건	157	249	272	331	340	16.7	17.8	-	23.0	23.8	-	-	-	-		
	코아	-	220	255	289	305	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2단계 (350)	수중	294	364	390	404	434	24.4	27.0	28.3	28.7	33.8	35.0	45.2	54.6	55.2	55.1	2.36
	기건	249	337	375	388	439	22.5	23.0	-	28	28.6	-	-	-	-		
	코아	-	336	357	373	392	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

압축강도는 양생방법에 따라 수중 > 기건 > 코아강도 순으로 크게 나타났고, 28일 강도에서 코아강도가 목표강도를 상회하는 것으로 나타났다.(그림2)



4.4 활열인장강도

활열인장강도는 양생방법에 따라 수중 > 기건강도 순으로

(1) 1단계(270kg/cm²)

(2) 2단계(350kg/cm²)

그림 3 재령법 압축강도 실험결과

나타났고 28일 강도를 기준으로 압축강도의 약 1/14정도로써, 보통중량콘크리트(약 1/10) 보다 다소 작게 나타났다.(표8) $\frac{f_{ct}}{\sqrt{f_c}}$ 은 1.3~1.4 정도로 보통중량콘크리트의 설계기준값인 1.8보다 작다.

4.5 휨인장강도

휨인장강도는 수중양생만 하였고 압축강도의 약 1/7 ~ 1/9정도 로써 보통중량콘크리트와 유사하게 나타났고, $\frac{f_r}{\sqrt{f_c}}$ 은 2.0~2.7 정도로써 보통중량콘크리트의 설계기준값인 2.0과 동등 이상인 것으로 나타났다.(표8)

4.6 수화온도

수화온도 측정을 위해 50×50×50cm의 입방체를 제작하여, 중앙부와 표면온도의 온도를 측정하였다. 중앙부와 표면의 온도차는 1, 2단계 각각 7℃, 10.5℃로 나타나, 슬래브 등에 사용될 때 수화온도에 의한 문제는 적을 것으로 판단된다.(그림4참조)

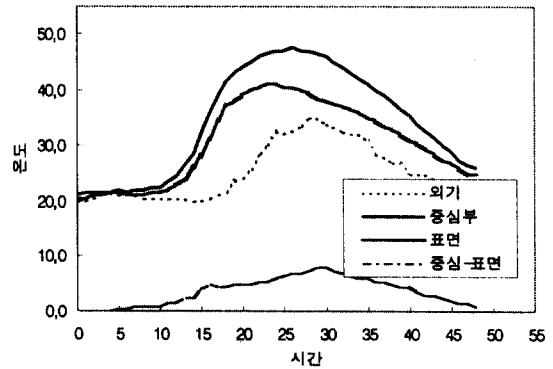


그림 4. 수화온도 측정결과(270kg/cm²)

5. 구조성능실험

현재 극한강도 설계기준에서는 경량콘크리트 사용시 보통중량콘크리트에 비해 구조적 성능이 떨어지는 것으로 보고 보정계수나 추가적인 강도저감계수를 도입하여 사용하도록 규정하고 있다. 그러나 이는 주로 보통강도 범위의 경량콘크리트를 대상으로 한 기존의 연구결과로부터 기인한 것이며, 고강도의 경량콘크리트에 대하여는 적용성을 재검토 할 필요가 있다.

5.1 철근과의 부착강도 실험

경량콘크리트의 고강도화에 따른 이형철근과의 부착성능을 평가하고 보정계수(0.85)를 재검토하기

위해 표 9에 나타난 변수로 직접인발형 실험(direct pull-out test)을 계획하였다.

표 9 부착실험 변수계획

구 분	변 수
콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	270, 350
콘크리트 피복두께 (cm)	3, 4, 5
철근의 직경	D13, D22
철근의 부착길이	4d _b , 5d _b

(1) 파괴양상

압축강도 270kg/cm²일 때는 피복두께 3.94d_b에서, 압축강도 350kg/cm²일 때는 3.15d_b이상일 때 뽑힘파괴(pull-out failure)가 일어났다.

(2) 부착용력

부착용력은 압축강도의 제곱근 및 피복두께비(C/d_b)에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

$$\mu = 1.6\sqrt{f_c} / \alpha \lambda$$

(C < 2.5d_b → α = 1, C > 2.5d_b → α = 2/3), (LWC → λ = 1.3)

(3) 부착강도 보정계수

극한강도 설계규준에서는 잔골재로 모래를 사용한 경량콘크리트를 사용할 경우 위 식과 같이 보정계수(λ=1.3)를 사용하도록 규정하고 있다. 그러나 고강도-경량콘크리트를 대상으로한 실험결과와 경량콘크리트의 고강도화에 따라 보정계수의 상향조정이 가능할 것으로 보인다. 그림5에서 실험결과와 하한치(lower bound)를 기준으로 할 경우 λ=1.0(NWC)에 가깝게 조정 할 수 있을 것으로 보인다.

표 10 피복두께에 따른 파괴유형

피 복 두 께	2.36d _b	3.15d _b	3.94d _b
270(kg/cm ²)	s	s	p
350(kg/cm ²)	s	p	p

* S : Splitting failure, P : Pull out failure

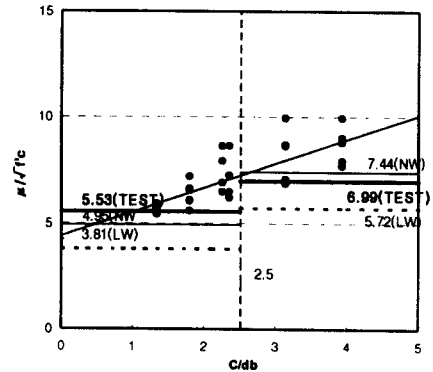


그림 5 피복두께비(C/d_b)에 따른 부착강도

5.2 보의 전단거동

경량콘크리트의 고강도화에 따른 보의 전단 성능을 평가하고 전단강도저감계수(λ=0.85)의 적용성을 재검토하기 위해 표 11에 나타난 변수로 18개의 실험체를 제작하였다.

표 11 보 전단실험 변수계획

구 분	변 수
콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	270, 350
전 단 스 펜 비 (a/d)	2.5, 3.5, 4.5
전 단 보 강 근 비 (ρ _b)※	0, 25, 50, 75, 100%

※전단보강은 f'c = 350kg/cm²을 대상으로 검토

(1) 전단강도 저감계수

보의 전단내력은 콘크리트의 전단내력과 전단철근의 전단내력을 합하여 구하여지며, 극한강도 설계규준에서는 경량콘크리트에 대한 전단강도저감계수를 λ=0.85(sand-lightweight concrete)로 하여 콘크리트의 전단내력을 보통중량콘크리트보다 15% 작게 보고 설계하고 있다. 그러나 이연구에서는 실험치가 계산치 보다 40% 이상 높게 나타나(그림6), 경량콘크리트를 고강도화 시킴에 따라서 전단강도저감

계수를 상향조정할 필요가 있는 것으로 나타났다.

(2) 전단보강근의 유효성 재평가

압축강도 350kg/cm²인 시리즈를 대상으로 전단보강비율을 0~1.0 ρ_{v,ACI}까지 변화시키면서 전단보강 효과를 검토하였다. 실험결과는 ACI나 BS규준과 같이 선형적인 비례관계가 아닌 제공근비례식 형태로 나타났다.(그림7)

- [ACI] $V_s = 1.0 (\rho_v f_y) bd$
- [B S] $V_s = 0.87 (\rho_v f_y) bd$
- [JAPAN] $V_s = 2.7 (\rho_v f_y)^{1/2} bd$

(3) 스테럽의 유효계수

다음 식과 같이 제공근 비례관계를 설정하고 스테럽의 유효계수를 구하여 전단보강근의 유효성을 반영하였다.(그림8)

- $$V_s = K (\rho_v f_y)^{1/2} bd$$
- a/d = 2.5 → K = 1.4
 - a/d = 3.5, 4.5 → K = 2.0

5.3 보의 휨강도 및 휨연성

극한강도 설계규준에서는 휨강도의 계산에 있어서는 경량콘크리트에 관한 별도규정이 없이 보통중량콘크리트와 동일하게 설계하도록 되어있어서, 경량콘크리트의 고강도화에 따른 직사각형 등가용력블럭의 적용성을 검토하고 연성확보에 필요한 철근비를 검토하기 위해 표 12에 나타난 변수로 10개의 실험체를 제작하였다.

(1) 휨강도

휨강도 실험결과는 ACI 등가용력으로 계산한 값보다 10% 가까이 작게 나타났으며, 이는 측정된 콘크리트의 압축용력분포가 삼각형에 가깝게 나타났기 때문인 것으로 보인다.(그림9)

(2) 휨연성

연성평가는 처짐연성지수를 기준으로 하여 인장철근 항복시의 처짐에 대한 최대하중 이후 0.8P_{max}에서의 처짐의 비로 그림 10에 나타내었다.

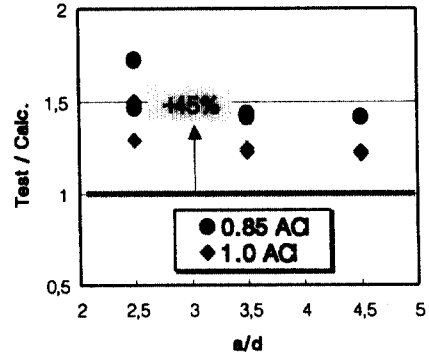


그림 6. 전단강도 실험결과

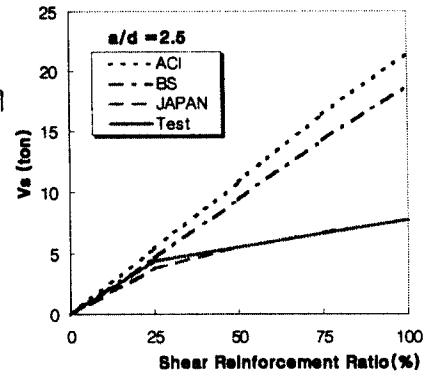


그림 7. 전단보강근의 전단내력

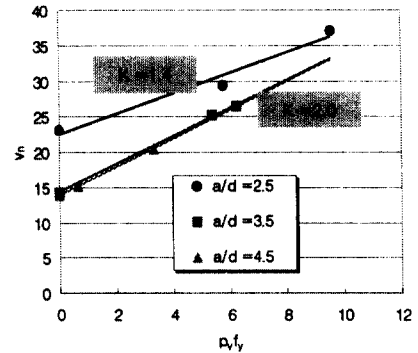


그림 8. 스테럽의 유효계수

표 12 보 휨실험 변수계획

구 분	변 수
콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	270, 350
주 인 장 철 근 비 (ρ/ρ _b)	0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 1.0

$$\mu_f = \frac{\Delta_f}{\Delta_y}$$

Δ_y : 인장철근 항복시 처짐

Δ_f : 최대하중 이후 0.8P_{max}에서의 처짐

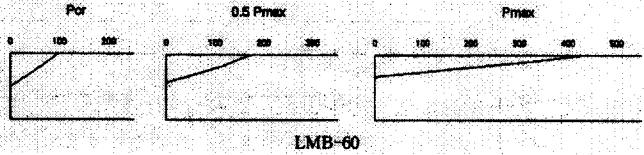


그림 9 압축응력분포

그림 10에서 보면 주철근비(ρ/ρ_b)

0.45 이하에서 연성지수 3을 만족하는 것으로 나타나, 보통중량 콘크리트에 비해 더 취성적인 것으로 보이며, 최대철근비 제한 (0.75 ρ_b)을 하향조정할 필요가 있는 것으로 사료된다.

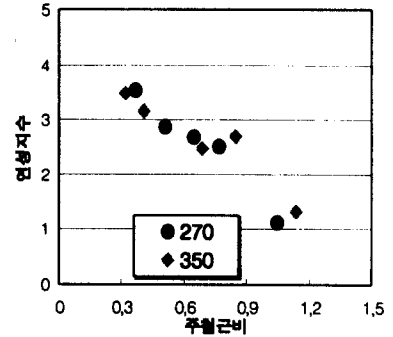


그림 10. 연성지수

6. 결론

압축강도 270kg/cm² 이상의 고강도-경량콘크리트를 개발하고, 이를 실용화하기 위한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배합실험 결과를 적용하여 기존의 레미콘 생산설비(B/P)를 이용하여 기존의 생산방식과 동일하게 대량생산(60m³/hr)이 가능하였다.
- 2) 경량골재의 높은 흡수율과 빠른 흡수속도 때문에 배합직후의 슬럼프 저하율이 증가될 우려가 있으므로, 생산관리 측면에서 경량골재는 사전흡수(pre-wetting)과정을 거쳐서(1일 정도 살수) 투입되어야 한다.
- 3) 시공성 확보 및 배합직후의 슬럼프 저하를 고려하여 슬럼프치를 다소 크게 할 필요가 있으며, 슬럼프 18~21cm 정도의 범위에서 반죽상태가 양호한 것으로 판단된다.
- 4) 재료의 역학적 특성은 동일한 압축강도를 갖는 보통중량콘크리트와 비교할 때, 할열인장강도는 다소 작고, 휨인장강도는 동등이상인 것으로 나타났다.
- 5) 수화온도는 표면과 중심부(25cm내부)의 온도차이가 7~10°C 정도로써, 슬래브 등에 사용될 경우 수화균열 등의 문제는 적을 것으로 판단된다.
- 6) 구조실험 결과, 부착강도와 전단강도 계산에 있어서 경량콘크리트의 사용에 따른 보정계수(강도저감계수 $\lambda=0.85$ for Sand-LWC)는 경량콘크리트가 고강도화 됨에 따라 상향조정이 필요한 것으로 판단된다.
- 7) 휨강도의 계산에서는 콘크리트의 압축응력 분포가 삼각형에 가까우므로 기존의 직사각형 등가응력 불력의 사용이 재검토 되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 '96년도 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 실시되었으며, 연구진행과정에서 많은 도움을 주신 한양대학교 초대형구조시스템연구센터와 고려산업개발(주)에 감사드립니다.