

고강도-경량콘크리트의 배합설계 방안 및 역학적 특성에 관한 연구

Study on the Mix Design Method and the Mechanical Proerties of High-Strenght Lightweight Concrete

The purpose of this study is to investigarte the mix design method and the mechanical properties of High-strength Lightweight Concrete (HSLC). In the experment, concrete mixing was conducted to select the optimum mix design for HSLC in laboratory. Also, concrete mixing in ready mixed concrete factory was conducted to get the fundamental data for utilization of HSLC using the optimum mix design. As a result, it is possible to establish the mix design of HSLC according to the using these experimental results ; the estimate equation for unit weight of HSLC, the relationship between W/C and compressive strength of HSLC and the fluidity of HSLC in the view of workability.

keywords : high-strength lightweight concrete, mix design, mechanical properties
키 워 드 : 고강도-경량콘크리트, 배합설계, 역학적 특성

강 훈

〈고려하이믹스(주) 기술 영업 이사〉

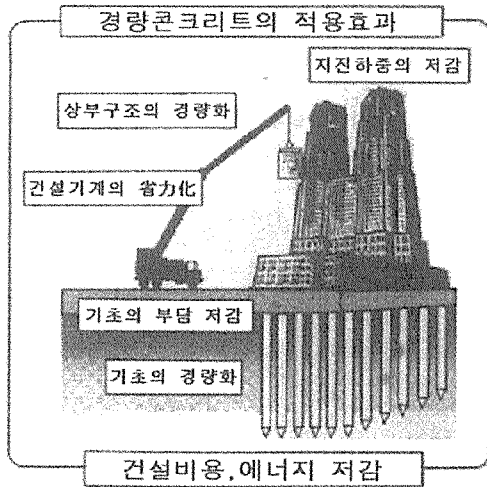
1. 서론

1.1 연구 배경

최근 국내에서는 토지비용 상승, 구조설계 기술 및 건축설비의 발달로 건축물의 초고층화가 급속히 진행되고 있으며, 전시장, 운동시설, 공항 등 대공간 구조물의 건설도 활발히 진행되고 있다. 이러한 경향은 철근 콘크리트(RC)조 건축물에서도 예외는 아니며, RC조 건축물을 보다 경제적으로 건립하기 위해서는 구조재료인 콘크리트의 고강도화 및 경량화가 절실히 필요한 실정이다.

콘크리트는 현대 구조물의 가장 보편화된 구조재료로서 폭넓게 활용되고 있으며, 그 성능이 비교적 우수한 것으로 평가되고 있으나, 비강도가 낮아서 자중이 증가하고 단면이 커지는 문제가 있다. 따라서 현대 구조물의 고층화 및 대형화, 프리캐스트화, 장스팬화, 에너지 절약 측면에서 비강도가 큰 구조용 경량콘크리트를 사용함으로써 구조물의 자중 감소, 경간확대, 하부지지구조의 단면축소 등의 이점을 얻을 수 있으며, 궁극적으로는 건설비용의 절감 효과를 얻을 수 있다. 또한, 천연골재의 고갈, 건설비용 상승이 심각한 문제가 되고

있는 현상에서 인공경량골재를 활용한 구조용 고강도-경량콘크리트의 필요성은 더욱 부각될 전망이다.



(그림 1) 경량콘크리트의 적용효과¹⁾

1.2 연구 필요성

구조용 경량콘크리트를 사용한 구조물의 경제성은 콘크리트의 단가상승에도 불구하고 자중감소에 의한 효과로 전체 건설비용이 줄어드는 데 있다. 즉, 경량콘크리트의 1m³당 가격은 보통중량콘크리트에 비해 비싸지만, 구조물의 자중을 줄임으로써 기둥이나 교각, 기초 등 하부지구조의 단면이 축소되고 철근 및 철골의 물량이 감소되어 전체 건설비용을 줄이게 된다.

구조물 경량화에 의한 경제성은 기본적으로 철근량의 감소에 의해 결정되는데, 특히 프리스트레스트 콘크리트에서는 prestressing force의 계산이 주로 구조물의 자중에 의해 결정되므로 자중감소의 효과가 매우 크게 나타난다

또한, 구조물의 자중감소로 지진하중이 줄어들게 되므로 내진구조부재의 크기도 줄일 수 있으며, PC부재에 적용할 경우 운송 및 양중기계의 용량감소로 시공비용이 절감되는 등의 효과를 얻을 수 있다.²⁾(그림1)

1.3 제조 및 시공방법

경량골재 내부에 무수한 공극을 형성하여 가벼운 반면, 높은 흡수율 때문에 배합직후의 슬럼프 저하를 유발하게 될 뿐만 아니라 펌프 압송시 작용하는 압력에 의한 가압흡수(加壓吸水)로 인해 압송전후의 콘크리트의 품질에 차이가 나게 되는 문제가 있다. 이 때문에 유럽 지역에서는 흡수율이 매우 작은 (5~8%) 경량골재를 사용하는 경우가 많으나 우리나라와 미국, 일본 등지에서는 흡수율이 높은 (일반적으로 10~30%) 경량골재를 1일에서 3일 정도 충분한 사전흡수 (prewetting) 과정을 거쳐서 경량콘크리트를 생산하는 방법을 이용하고 있다.

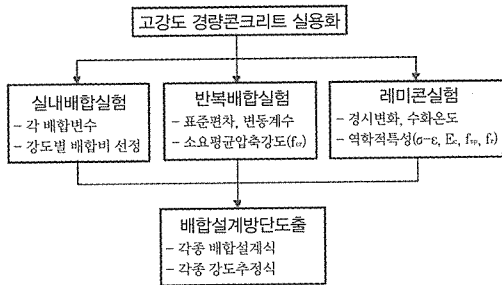
이러한 사전흡수는 경량골재의 흡수율을 낮추어 펌프압송중에 매트릭스 부분에서 수분이 경량골재로 이동하여 생기는 슬럼프 저하를 최소화시키는 반면, 콘크리트의 단위용적중량을 증가시킨다. 그러나 장기적으로는 양생과정에서 경량골재에서 수분을 조금씩 방출하여 내부양생(internal curing)의 효과와 함께, 기건단위용적중량을 낮추게 된다.

한편, 펌프카를 사용하여 지상에서 직접 콘크리트를 펌핑하는 수직높이의 한계는 150~160m 정도로 인식되어 왔으나, 최근에는 펌핑용 기기의 발전으로 인해 지상 250~300여 미터에 이르는 고소(高所)에까지 경량콘크리트를 직접 압송하여 시공한 사례(동경도청사, 랜드마크타워, Nations Bank 등)가 보고되고 있어서 초고층 건물에까지 적

용이 확대되고 있는 실정이다.

1.4 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 단위용적용량이 2.0 t/m³ 이 하이고 압축강도가 270~420 kg/cm²인 구조용 고강도 - 경량콘크리트의 실용화를 위하여 우선, 실험실 배합실험을 통해 배합설계에 필요한 자료와 레미콘 생산에 필요한 배합비를 도출하여 레미콘으로 대량생산하고, 응력 - 변형도관계, 탄성계수, 인장강도 등 재료의 역학적 특성을 규명하여 고강도 - 경량콘크리트의 제조 및 설계에 필요한 자료를 제시한다.



(그림 2) 본 연구의 구성

2. 실내 배합실험

2.1 개요

배합계획은 압축강도 270~350kg/cm², 기건 단위용적 중량 2.0t /m³ 이하를 목표로 하여, 단위결합재량과 물결합 재비를 각각 400~650kg/m³, 25~45% 범위의 변수로 하고, 단위결합재량의 일부(5~10%)는 플라이 애쉬와 실리카흙으로 치환하였다. 고성능감수제는 목표슬럼프(21±2cm)에 맞도록 각 배합 변수에 따라 달리 조정하였다.

실험은 중량배합으로 실시되었으며, 물과

고성능감수제를 제외한 각 재료의 전량 투입 건비법 30초→물+고 성능감수제 투입→40초 혼합→상태확인 후 20초 혼합→배출 후 실험을 실시하는 순서로 진행되었다.

굵은 골재로 사용된 팽창점토는 흡수율이 매우 커서 건조한 상태로 배합할 경우 급격한 슬럼프 손실이 발생하므로 배합전에 충분한 사전흡수(pre-wetting) 과정을 거쳐 표면건조 내부포수 상태로 실험을 실시하였다. 공시체 제작은 KS F 2403에 따라 실시하였으며, ϕ 100*200mm크기로 3일, 7일, 28일 압축강도 측정용으로 각조 3개씩 제작되었고, 24시간 후에 캡핑한 후 탈형하여 20±3℃의 항온수조에서 수중양생하고 연마후 재령별 압축강도 시험을 실시하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서는 고강도-경량콘크리트를 제조하기 위하여 굵은골재로 인공경량골재인 팽창점토를, 잔골재로는 모래를 사용한 sand lightweight concrete를 대상으로 하였다. 굵은골재로 사용된 팽창점토는 회전로(rotary kiln)에서 점토를 소성가공하여 만들어지는 인공경량골재로써 단위용적중량이 729kg/m³, 비중이 1.22, 조립율이 6.82이고 흡수율이 11.01%인 것을 사용하였으며, 최대 치수가 19mm이다.

골재 및 혼화재료의 화학조성과 물리적 특성이 표 1~표5에 나타나 있고, 입도분포곡선

(표 1) 골재의 물리적 성질

골재	단위용적중량 (kg/m ³)	비중 (표준)	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

은 [그림 2]에 나타나있다.

[표 2] 시멘트의 물리적 특성

분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	초결 (분)	종결 (분)	강도(kg/cm ²)		
				3일	7일	28일
3,556	0.09	292	487	220	286	373

[표 3] 플라이애쉬의 물리적 특성

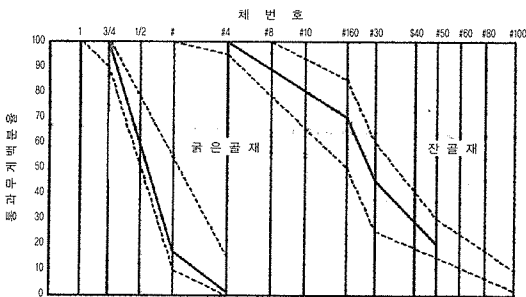
비중	비표면적 (cm ² /g)	단위수량비 (%)	압축강도비 (%)-28일
2.18	3,623	97	95.1

[표 4] 실리카흙의 화학조성 및 물리적 특징

SiO ₂ (%)	C (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Moisture Content	Specific Surface	Specific Gravity
92	1.2	2.4	1.3	0.1	1.2	0.4	0.10%	22m ² /g	2.1

[표 5] 고성능감수제의 물리적 특징

색상	형태	주성분	비중	ph	고형분
암갈색	액체	Naphthalene	1.22	7.5	38.8



[그림 3] 골재의 입도분포 곡선

2.3 실험결과

2.3.1 물성실험

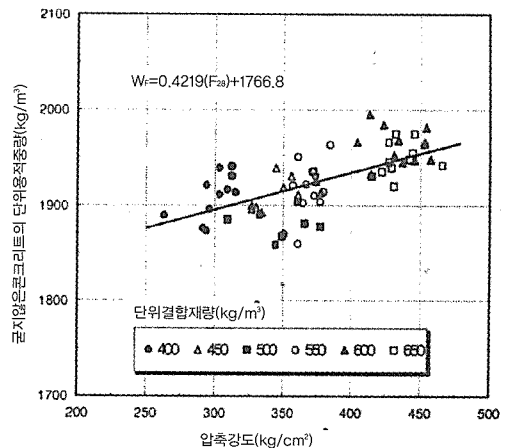
슬럼프는 각 배합변수에 따라 고성능감수제 투여량을조정하여 목표슬럼프 21±2cm 범위 내에 들도록 하였고, 슬럼프 23cm 이하로 고성능감수제량을 조절하면 경량골재의 부립없이

유동성 확보가 가능하였다. 공기량은 2.5~3.5% 정도로 나타났고, 공기량 증가를 위해서는 고성능 AE감수제의 사용이 필요할 것으로 사료된다.

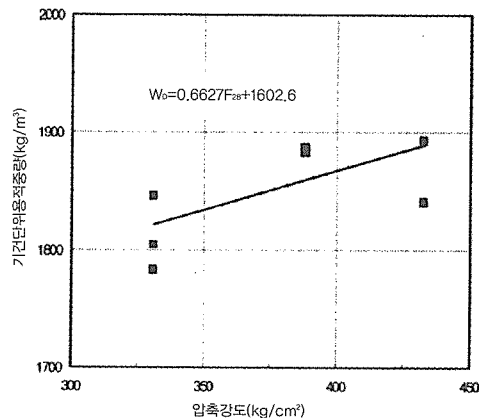
2.3.2 단위용적중량

(1) 단위용적중량과 압축강도

굳지않은 콘크리트의 단위용적중량은 1.85~2.0t/m³ 범위로 나타났고, 단위결합재량과 압축강도에 비례하여 증가하였다.(표6) 이 비례관계로부터 압축강도와 단위용적중량



[그림 4] 굳지않은 콘크리트의 단위용적중량과 압축강도



[그림 5] 기간단위용적중량과 압축강도

(표 6) 배합변수 및 실험결과

Batch Number	단위 결합재량 (kg/cm ²)	W/B (%)	S/A (%)	Fly Ash (%)	Silica Fume (%)	SP (%)	시 험 결 과							
							Slump (cm)	Slump Flow (cm)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)	압축강도 (kg/cm ²)			
											3일	7일	28일	
A1	400	40	45	0		1.2	23.5	46/48	2.6	1941	230	282	312	
A2				5		1.4	23	46/46	3.2	1881	207	306	333	
A3				10		1.3	24	48/49	2.5	1913	226	275	315	
A4			43	45	48	5	1.1	23	44/45	2.5	1931	226	278	312
A5					0	1	23	46/48	2.8	1939	220	271	304	
A6					5	1.1	23	44/46	3.4	1889	127	226	263	
A7		45	45	10		1.1	22.5	45/42	2.6	1916	217	265	309	
A8				48	5	0.9	22.5	44/47	3.5	1921	-	268	294	
A9				0	0.8	22.5	43/42	2.6	1869	229	268	296		
A10			45	45	5		0.9	23	46/48	3.2	1876	173	270	291
A11					10		0.9	22	42/42	2.5	1873	223	264	294
A12					48	5	0.7	22.5	44/46	3.4	1912	-	260	304
A13	450	34	45	5		1.7	23.5	52/53	2.7	1925	276	308	374	
A14				0	1.6	23.5	48/46	2.7	1919	279	315	350		
A15		35	45	5		1.6	23.5	48/48	3	1913	264	314	378	
A16				10		1.7	24	57/55	2.6	1939	267	292	345	
A17				48	5	1.5	23	44/42	2.8	1931	281	297	356	
A18		36	45	5		1.5	24.5	50/52	3.1	1912	262	313	361	
A19				0	0.8	23.5	46/48	2.8	1892	247	303	334		
A20		40	45	5		0.8	22	40/42	2.6	1900	244	285	327	
A21				10		0.9	22.5	42/43	2.5	1898	245	278	330	
A22				48	5	0.8	22	39/41	2.6	1896	252	307	327	
B1	500			35	45	0		1.5	22	39/38	4.2	1904	228	296
B2		5				1.3	21	36/37	4.1	1881	199	277	366	
B3		10				1.5	25.5	54/59	2.5	1878	277	342	377	
B4		40	45		0		0.5	21.5	42/40	4	1859	214	277	345
B5					5		0.7	13	43/41	4.4	1886	192	256	309
B6					10		0.7	21.5	41/40	2.5	1867	264	316	349
B7		33	42	0		1.5	24	53/56	2.7	1936	245	324	371	
B8				5		1.5	24	49/51	2.6	1922	257	323	367	
B9				10		1.3	23	43/43	2.4	1931	309	320	374	
B10			45	45	0		1.2	21.5	35/35	3.7	1904	252	304	377
B11					5		1.3	23	40/43	3	1914	241	307	380
B12					10		1.2	23	43/43	2.4	1963	325	338	384
B13		35	42	0		1.1	22.5	41/43	3.3	1860	232	292	361	
B14				5		1.2	22	40/41	3.6	1870	219	282	351	
B15				10		1.1	24	44/43	2.3	1921	284	306	357	
B16			45	45	0		1	20	35/36	3.7	1903	240	306	364
B17					5		1.2	22	37/38	3.3	1911	239	308	373
B18					10		1.1	23	40/41	2.3	1951	298	317	361
C1	600	25	43	5	5	2.2	22	36/36	2.2	1947	317	386	446	
C2				0	0	2.2	22.5	38/40	2.6	1985	319	389	423	
C3				5	5	2.3	22.5	40/40	2.4	1964	341	394	452	
C4			27	45	10	10	2.5	21.5	32/33	2.5	1948	333	397	457
C5					5	5	1.9	20.5	32/32	2.5	1945	356	370	437
C6					0	0	1.7	22.5	36/38	2.3	1995	351	368	413
C7		29	45	5	5	1.9	22	29/30	1.9	1982	336	380	454	
C8				10	10	2.1	19	29/28	1.9	1966	341	389	453	
C9				5	5	1.6	21.5	37/38	2.4	1933	308	357	414	
C10			45	45	0	0	1.4	22.5	38/38	2.1	1966	334	357	404
C11					5	5	1.6	21.5	34/35	2.8	1968	321	374	434
C12					10	10	2	22.5	37/37	2.4	1953	279	354	431
C13	650	25	43	5	5	1.98	14.5	-	2.3	1931	350	364	415	
C14				0	0	1.9	23	38/38	2.6	1975	352	392	446	
C15				5	5	2	16	-	2.4	1966	357	377	427	
C16		27	45	10	10	2.1	10	-	2	1942	344	396	466	
C17				5	5	1.7	22	34/32	2.1	1939	336	359	429	
C18				0	0	1.5	22.5	36/37	2.5	1945	340	364	427	
C19		29	45	5	5	1.8	22	41/41	2.3	1936	340	370	373	
C20				10	10	2	20	30/30	2	1920	337	376	431	
C21				5	5	1.3	20	34/34	2.5	1948	338	366	442	
C22	45	45	0	0	1.1	23	43/44	2.7	1975	352	373	432		
C23			5	5	1.4	19	32/32	2.6	1955	351	360	444		
C24			10	10	1.7	22.5	41/41	2.2	1936	346	364	422		

의 관계식을 구하였으며, 기건단위용적중량은 [표11]로부터 구한것이다.(그림 4, 5)

$$W_F = 0.4219 (F_{28}) + 1766.8 \quad (1-a)$$

$$W_D = 0.6627 (F_{28}) + 1602.6 \quad (1-b)$$

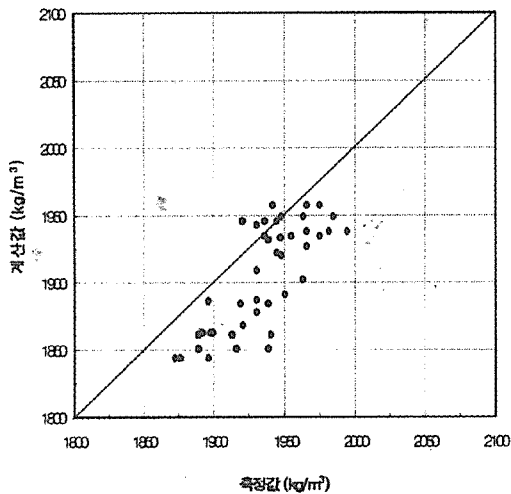
일반적인 경우, 경화한 경량콘크리트의 단위용적중량은 굳지않은 콘크리트보다 100kg/m³ 가량 줄어든다.

(2) 계획배합에 의한 단위용적중량 추정

건축공사표준시방서에서는 계획배합에 의해 경화전,후의 경량콘크리트에 대하여 단위용적중량을 추정하는 계산식을 다음과 같이 제시하고 있으며, 본 실험의 결과도 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.(그림6)

$$W_F = G_0 (1 + p_G / 100) + S_0 (1 + p_S / 100) + C_0 + W_0 \quad (2-a)$$

$$W_D = G_0 + S_0 + 1.25C_0 + 120 \quad (2-b)$$



(그림 6) 단위용적중량 추정식 평가

2.3.3 압축강도

(1) 양생재령에 따른 압축강도

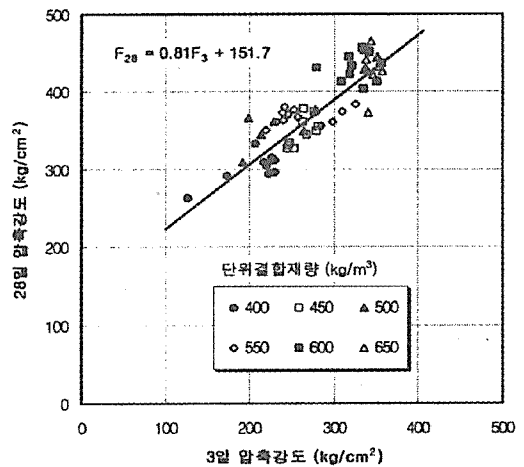
재령 3일과 7일 압축강도는 각각 평균적으로 28일 강도의 73.4%, 86.4%로써 높은 조

기강도 발현율을 보였으며, 3일, 7일 강도와 28일 강도의 관계식(식3)으로부터 초기재령에서 28일 강도를 추정할 수 있다.(그림7, 8)

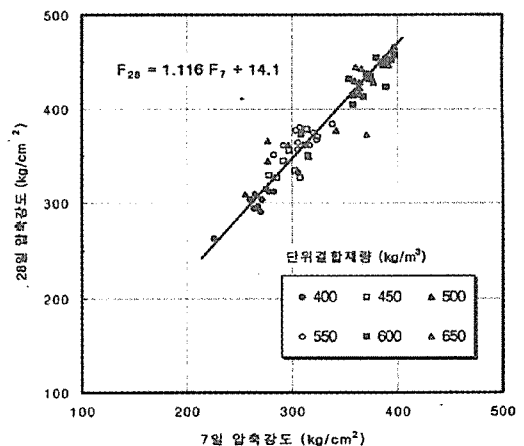
$$F_{28} = 0.81F_3 + 151.7 \quad (3-a)$$

$$F_{28} = 0.116F_7 + 14.1 \quad (3-b)$$

$$F_7 = 0.73F_3 + 122.1 \quad (3-c)$$



(그림 7) 3일강도와 28일 강도의 관계



(그림 8) 7일강도와 28일강도의 관계

(2) 물결합재비와 압축강도의 관계

압축강도는 물결합재비 감소에 따라 비례적으로 증가하게된다. 3일, 7일, 28일 강도 각각

에 대하여 물결합재비와의 관계식을 다음과 같이 도출하였으며, 이는 배합설계시 필요한 기본적 자료가 된다. (그림9)

$$F_3 = -8.05(W/B) + 548.2 \quad (4-a)$$

$$F_7 = -6.66(W/B) + 548.8 \quad (4-b)$$

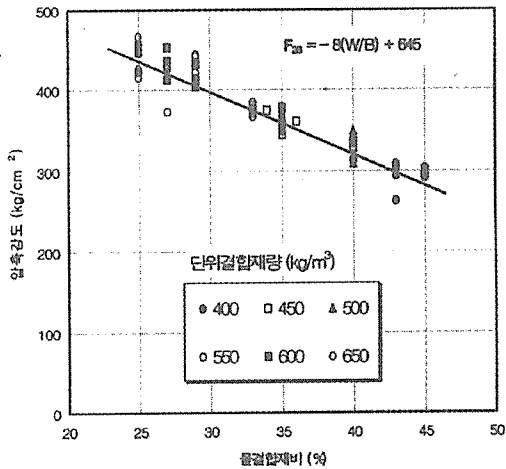
$$F_{28} = -8(W/B) + 645 \quad (4-c)$$

증가하게되며, 실험결과로부터 3일, 7일, 28일 강도 각각에 대하여 단위결합재량과의 관계식을 다음과 같이 도출하였다. (그림10)

$$F_3 = 0.5223(B) \quad (5-a)$$

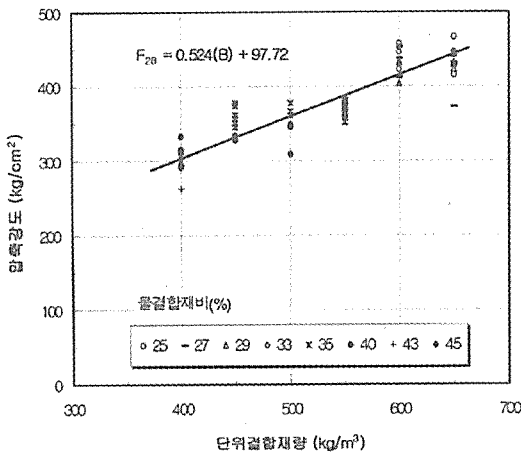
$$F_7 = 0.4291(B) + 96.36 \quad (5-b)$$

$$F_{28} = 0.524(B) + 97.72 \quad (5-c)$$



(그림 9) 압축강도와 물결합재비의 관계

(3) 단위결합재량과 압축강도의 관계
압축강도는 단위결합재량 증가에 비례하여



(그림 10) 단위결합재량과 압축강도

3. 레미콘 제조 실험

[표 7]은 실험실 배합실험 결과로부터 배합강도에 따라서 적정 배합비를 선정된 것이며, 본 배합비는 기존의레미콘 생산설비를 이용하여 대량생산하는데 사용되었다. 또한 경량골재는 호퍼에 투여한 다음 표면건조내부포수상태가 되도록 하기 위하여 1일 전부터 주기적으로 살수하여 사용하였다.

[표 7] 강도별 최적배합비 선정

목표강도 (kg/cm ²)	단위결합재량 (kg/cm ³)	W/B (%)	S/A (%)	Fly Ash (%)	Silica Fume (%)	고성능감수제 (%)
270	400	45	45	5	-	0.8~1.2
350	550	33	45	5	-	1.2~1.5
420	650	29	45	5	5	1.6~1.8

3.1 물성실험

[표 8]에는 레미콘으로 생산된 콘크리트의 물성 측정결과가 나타나 있고, [표 9]에는 압축강도가 350kg/cm²인 레미콘을 인근 현장으로 운송하여 경시변화를 측정된 것이다. 레미콘 생산 직후부터 현장도착시(40분소요), 그리고 100분 경과시의 슬럼프 손실을 측정된 결과 24→21.5→19cm로 나타나 현장 시공에 필요한 슬럼프 확보에는문제가 없는 것으로 확인되었다. 또한, 기건공시체의 무게로부터 측정된 기건단위용적중량은 1811~1884kg/m³범위로 나타나, 보통중량콘크리트에 비해 400kg

/m³이상 가벼운 것으로 나타났다.(표10)

[표 8] 레미콘 생산된 굳지않은 콘크리트의 물성

fc (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	슬럼프-플로우 (cm)	공기량 (%)
270	21.5	35/35	2.7
350	21	35/36	2.6
420	18	30/31	2.5

[표 9] 레미콘 운송에 따른 경시변화 측정결과 (f'c=350kg/cm²)

경과 시간	슬럼프 (cm)	슬럼프-플로우 (cm)	공기량 (%)	비고
0분	24	50/53	2.4	생산직후
40분	21.5	42/43	2.1	현장도착
100분	19	35/36	2	

[표 10] 기건단위용적중량

fc (kg/cm ²)	1회 (kg/cm ³)	2회 (kg/cm ³)	3회 (kg/cm ³)	평균 (kg/cm ³)
270	1804	1846	1783	1811
350	1887	1883	1884	1884
420	1893	1841	1893	1876

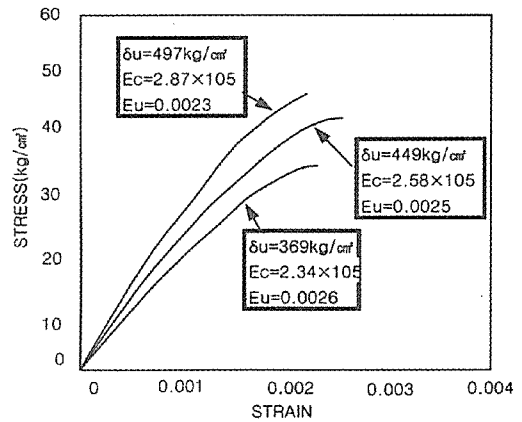
3.2 역학적 특성

[표 11] 활열인장강도 및 휨강도

구분	항목	압축강도 (kg/cm ²)					활열인장강도 (kg/cm ²)					휨/압축		휨강도 (kg/cm ²)					휨/압축	
		3일	7일	14일	28일	56일	3일	7일	14일	28일	56일	28일	56일	3일	7일	14일	28일	56일	28일	56일
I	수중	196	273	296	344	356	18	23.2	20.7	23.5	24.7	1/14.60	1/14.64	26.4	32.3	34.8	37.3	42.5	1/9.22	1/8.38
	기건	157	249	272	331	340	16.7	17.8	-	23	23.8	1/14.55	1/14.29	-	-	-	-	-	-	-
	코아	-	220	255	289	305	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	수중	294	364	390	404	434	24.4	27	28.3	28.7	33.8	1/14.08	1/12.84	35	45.2	54.6	55.2	55.1	1/7.32	1/7.88
	기건	249	337	375	388	439	22.5	23	-	28	28.6	1/14.30	15.35	-	-	-	-	-	-	-
	코아	-	336	357	373	392	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III	수중	358	406	428	477	477	32.4	30.5	31.4	37.5	37.5	1/12.72	12.7	40.1	54.7	53.2	56.5	58.2	1/8.2	1/8.20
	기건	341	374	420	443	478	25.7	27.3	-	35	35.8	1/12.66	1/13.35	-	-	-	-	-	-	-
	코아	-	391	418	419	442	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2.1 응력도-변형도 곡선

[그림 11]은 컴프레소메타를 이용하여 일축 압축응력을받을 때 고강도-경량콘크리트의 응력-변형도 관계를 나타낸 것이다. 압축강도가 증가할수록 취성도 증가하였고, 최대변형도(ϵ_u)는 0.0023~0.0026 범위로 나타났다.



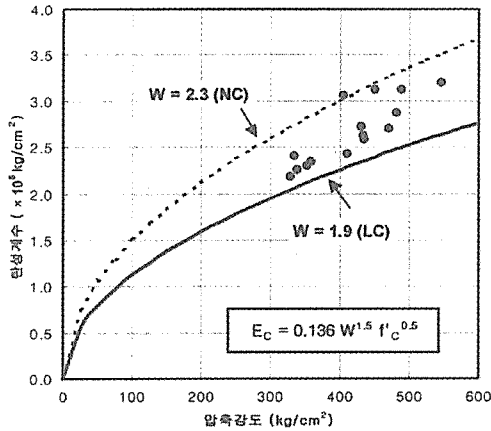
[그림 11] 응력도-변형도 곡선

3.2.2 탄성계수

국내 RC규준에서는 콘크리트의 단위용적 중량에 따라서 탄성계수가 $\sqrt{f'c}$ 에 비례하는

것으로 보고, 다음 식으로 계산하고 있다. 또한, [그림 12]는 $1/3\sigma_u$ 에서 구한 활성탄성계수를 나타낸 것으로, 계산식에 비해 상당히 안전측이다.

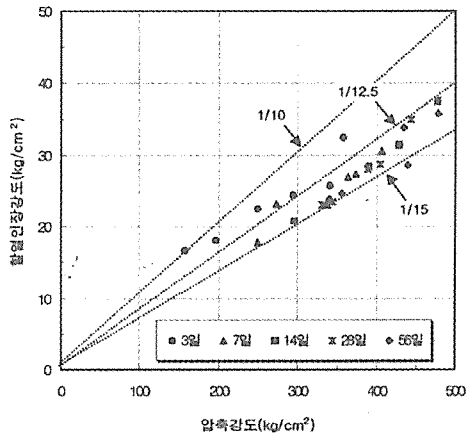
$$E_c = 0.136 W^{1.5} \sqrt{f' c}$$



(그림 12) 탄성계수

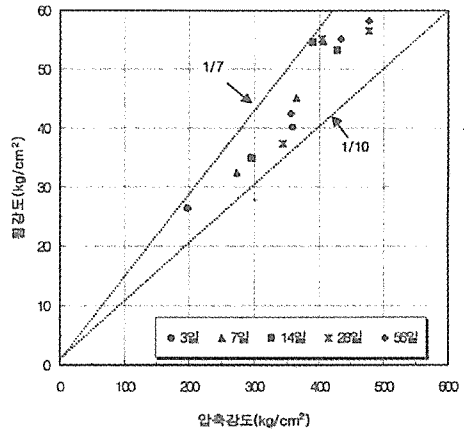
3.2.3 활열인장강도와 휨강도

활열인장강도는 압축강도의 1/10~1/15로써 보통중량콘크리트에 비해서 다소 작게 나타난 반면, 휨강도는 압축강도의 1/7~1/10

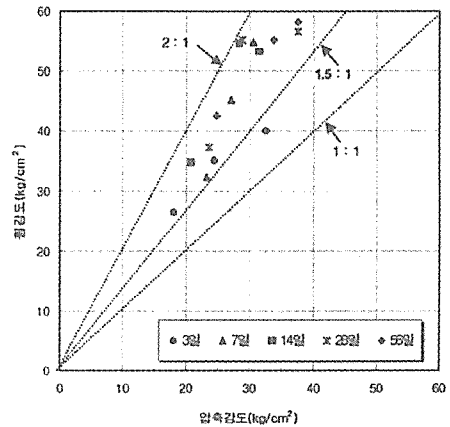


(그림 13) 활열인장강도

로써 보통중량콘크리트와 유사하게 나타났고 활열인장강도의 1.5~2배에 달한다. (그림 13-15)



(그림 14) 휨강도

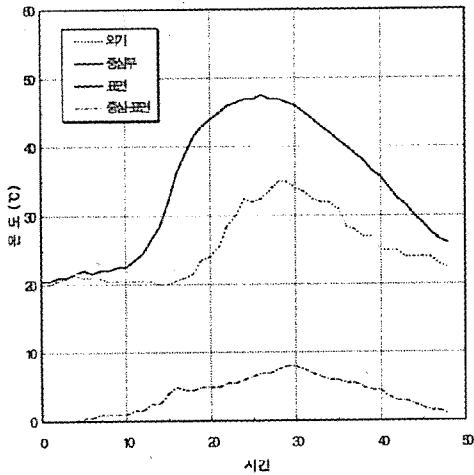


(그림 15) 활열인장강도와 휨강도의 관계

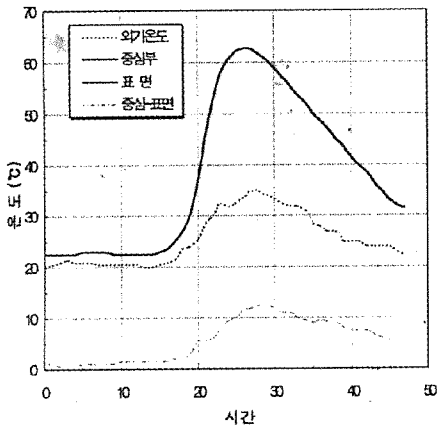
3.3 수화온도

고강도-경량콘크리트의 수화발열특성을 관찰하기 위해 50×50×50cm의 입방체를 제작하여 중앙부와 표면에서 각각 수화온도를 측정하여 비교하였다.

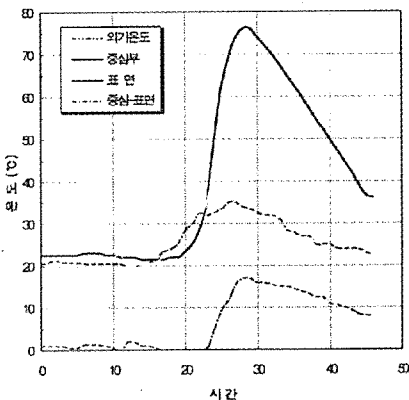
최고온도 도달시의 온도와 경과시간이 [표



(1) 압축강도 270kg/cm²



(2) 압축강도 350kg/cm²



(3) 압축강도 420kg/cm²

(그림 16) 수화온도

13]에 나타나있다. 지연형감수제의 사용으로 최고온도는 26~28시간 경과후에 나타났으며 이때 중앙부와 표면의 온도차는 각각 7, 12.5, 17℃로 나타나 수화열에 의한 문제는 없는 것으로 판단된다.(그림16)

그러나, 단위결합재량이 높을수록 중앙부와 표면의 온도차가 크게 나타나므로, 이를 매스가 큰 구조물에 사용하기 위해서는 플라이애쉬나 고로슬래그 등의 혼입율을높이고, 저발열 혼화제를 사용 등의 수화온도 저감대책이 마련되어야 한다.

[표 12] 수화온도 측정

fc (kg/cm ²)	중앙부		표면		대기온도	
	온도 (℃)	경과시간 (hr)	온도 (℃)	경과시간 (hr)	온도 (℃)	경과시간 (hr)
270	47.5	26	40.5	26	32.5	26
350	62.5	26	52	25	11.5	26
420	76	28	59	28	34	28

4. 반복 배합실험

4.1 개요

선정된 강도별 배합비(표7)에 대한 배합설계의 기초자료 제공을 위하여 배합조건(사용재료의 종류 및 물성)을 달리하여 각각 30회의 반복 배합실험을 실시하고, 실험결과를 통계적으로 분석하였다.

4.2 실험결과

4.2.1 표준편차와 변동계수

[그림 17]은 조간격을 20kg/cm²으로 하여 압축강도의분포를 나타낸 것이고, [그림 18]은 정규분포곡선으로 나타낸 것이다.

실험결과로부터 변동계수와 표준편차를 구

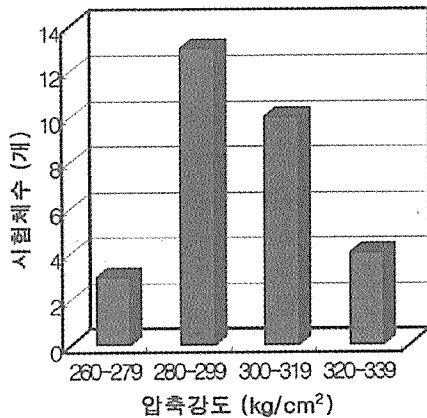
하여 식(7)에 의해 소요평균압축강도 f'_{cr} 을 구하였다.(표13)

[표 13] 반복 배합실험 결과(단위:kg/cm³)

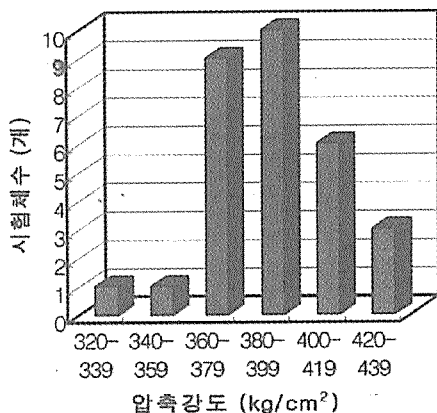
fc	표준편차s	변동계수V	F ₂₈ 평균	f' cr
270	17.22	5.76%	299	293
350	23.45	6.03%	389	381

3.3 소요 평균압축강도(f'_{cr})의 산정

콘크리트의 압축강도시험에 관련하여 극한



(1) 압축강도 270kg/cm²



(2) 압축강도 350kg/cm²

(그림 17) 압축강도 분포

강도 설계기준에서는 30회 이상이 연속시험을 하도록 권장하고 있으며, 콘크리트 배합선택의 기초로 사용되는 소요 평균압축강도 f'_{cr} 은 시험결과로부터 계산된 표준편차 s 를 이용하여 다음 값보다 크도록 규정하고 있다.

$$f'_{cr} = f_c + 1.34s \quad (7-a)$$

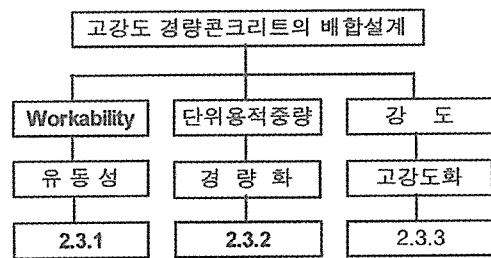
$$f_{cr} = f_c + 2.33s - 35 \quad (7-b)$$

5. 배합설계 방법

고강도 경량콘크리트의 배합설계를 위해서는 워커빌리티, 단위용적중량, 강도등의 고려되어야 한다. 본 실험에서는 고성능감수제의 사용으로 소요의 워커빌리티를 얻는데 필요한 유동성 확보는 충분히 가능하다.(2.3.1절)

고강도 경량콘크리트는 경량화를 목적으로 사용되므로 계획배합에 의해 단위용적중량을 추정하여 요구되는중량이하로 배합설계를 조절할 수 있다.(2.3.2절)

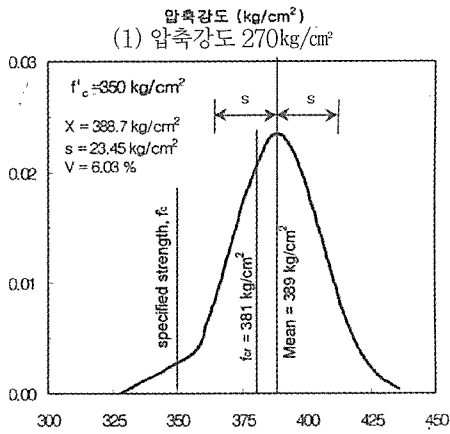
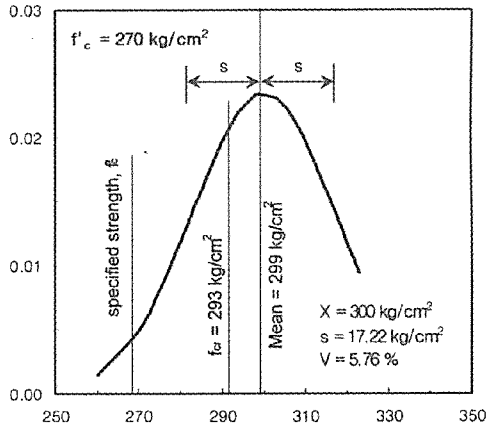
또한, 소요의 강도확보를 위해서는 물결합재비와 압축강도의 관계식 등을 사용하여 배합설계에 이용할 수 있다.(2.3.3절)



(그림 18) 배합설계 방안

6. 결론

고강도-경량콘크리트의 현장실용화를 위하여 실내 배합실험과 레미콘 제조실험을 통해서 배합특성과 역학적특성에 관한 연구를 수



(1) 압축강도 270kg/cm²
(2) 압축강도 350kg/cm²
(그림 19) 정규분포 곡선

행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 고강도 경량 콘크리트의 단위용적 중량은 기존의 단위용적 중량 추정식을 이용하여 산정할 수 있으며, 본 실험에서 고강도 경량콘크리트의 기건단위용적중량은 1.8~1.9t/m³ 범위로서 보통중량콘크리트보다 0.4t/m³ 정도 중량을 낮출 수 있다.
- 2) 설계기준강도 별로 고강도 경량콘크리트의 압축강도 및 물결합재비와의 상관관계식을 이용하여 고강도 경량콘크리트의

배합설계시 필요한 배합강도 산정식을 도출할 수 있었다.

- 3) 고강도 경량콘크리트의 배합설계에서 필요한 워커빌리티는 소요 슬럼프별로 경량골재의 부립이 생기지 않도록 적정량의 고성능 감수제를 사용함으로써 확보할 수 있다.
- 4) 금후, 고강도 경량콘크리트의 실용화를

(표 14) 결과 요약

● W/B와 압축강도의 상관식					
F3 = -8.05(W/B) + 548.2					
F7 = -6.66(W/B) + 548.8					
F28 = -8(W/B) + 645					
● 단위결합재량(B)과 압축강도의 관계					
F3 = 0.5223(B)					
F7 = 0.4291(B) + 96.36					
F28 = 0.524(B) + 97.72					
● 단위용적중량과 압축강도의 관계					
WF = 0.4219(F28) + 1766.8					
WD = 0.6627(F28) + 1602.6					
● 계획배합에 의한 단위용적중량 추정(건축공사표준시방서)					
WF = G0 (1 + rho G /100) + S0 (1 + rho S /100) + C0 + W0					
WD = G0 + S0 + 1.25C0 + 120					
● 28일 압축강도 추정식					
F28 = 0.81F3 + 151.7					
F28 = 0.116F7 + 14.1					
F7 = 0.73F3 + 122.1					
● 소요평균압축강도 f' cr (kg/cm ²)					
f' c	표준편차 s	변동계수 V	F28 평균	f' cr	
270	17.22	5.76%	299	293	
350	23.45	6.03%	389	381	
● 탄성계수					
Ec = 0.136W ^{1.5} √f' c					
● 할열인장강도					
fsp = (1/10~1/15) fc					
● 휨강도					
f' r = (1/7~1/10)fc					

위해서는 실제 공사현장에서의 펌핑 테스트 및 구조체 콘크리트의 강도관리 등의 데이터를 축적 할 필요가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. Mindess, J. F. Young, "Concrete", Prentice Hall, Newsersey, 1981, pp.581-599.
2. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, "Concrete Structure, Properties, and Materials", 2nd Ed., Prentice Hall, Newsersey, 1993, pp.358-367.
3. 岸谷孝一, "地上 243mへのコンクリートの壓送", 콘크리트工學 Vol. 29, No. 12, 1991.12, pp.51-61.
4. 岡本修一, "地上 296mへの輕量コンクリートの直接ポンプ壓送", 콘크리트工學, Vol.32, No.3, 1994. 3, pp.31-34.
5. 清水昭之, "高流動コンクリートの利用と高強度輕量コンクリートの高所壓送", 콘 크리트工學 Vol. 34, No. 9, 1996. 9, pp.13-19
6. 대한건축학회, "건축공사표준시방서", 1994, pp.169-173.
7. ACI Committee 363, "State-of-the Art Report on High-Strength Concrete", ACI Journal, 1984.
8. 일본건축학회, "건축공사표준시방서·동해설(JASS5)", 1997, pp.277-388.
9. 대한건축학회, "극한강도설계법에의한 철근콘크리트구조계산규준 및 해설", 기문당, 1994, pp29-30.
10. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(318-95)", ACI, Detroit, 1995, pp.131-138.
11. 岡本亨久外, "超輕量コンクリト", 콘크리트工學, 1998. 1., pp.48-52.
12. 신성우, 최명신, "구조용 경량콘크리트의 적용현황 및 전망", 콘크리트학회지 제 10권 4호, 1998. 8., pp.16-26.
13. 신성우, 최명신, 김철환, 안중문, 정진, 강훈, 이광수, "구조용경량콘크리트의 고강도화를 위한 기초적 실험연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제 17권 1호, 1997. 4., pp.625-630.
14. 신성우, 이재삼, 김정식, 강훈, 최명신, 안중문, "고강도-경량콘크리트의 실용화를 위한 기초적 실험연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제9권 2호, 1997. 11. pp.393-400.
15. 신성우, 최명신, 안중문, 강훈, 김정식, "고강도 경량콘크리트의 개발, 구조특성 및 실용화," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제10권 1호, 1998. 5., pp.37-44.
16. 신성우, 최명신, 김철환, 안중문, 강훈, 이광수, "고강도경량철근콘크리트 보의 전단거동 및 전단강도 예측에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제 17권 2호, 1997. 10., pp.1103-1110.
17. 姜勳, 申成雨, 李翰承, 金正植, 李在三, 鄭鎮, "高強度-輕量コンクリトの實用化のための基礎的な實驗研究1-研究計劃及び實驗室での實驗結果", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998. 9., pp.765-766.
18. 李翰承, 申成雨, 姜勳, 金正植, 李在三, 鄭鎮, "高強度-輕量コンクリトの實用化のための基礎的な實驗研究2-レミコン工場及び現場での實驗結果", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998. 9., pp.767-768.