

高強度 輕量콘크리트의 強度特性에 관한 實驗的 研究

吳 炳 煥

〈서울대학교 工科大学 助教授〉

엄 주 용

〈서울대학교 大學院〉

이 성 민

〈대우엔지니어링 技術연구소〉

1. 序 論

경량 콘크리트는 배합시 발포제등을 사용하여 인공기포를 발생시키는 기포 경량 콘크리트와 골재의 중량을 줄인 경량골재 콘크리트로 대별된다. 이중 비교적 강도가 높은 경량골재 콘크리트가 구조용 재료로서의 활용 가능성에 대한 연구가 수행되어 왔다.(이하 경량골재 콘크리트를 '경량콘크리트'라고 부른다.)

경량콘크리트는 제1차 세계대전 당시 미국의 바지선 제작에 최초로 구조용 콘크리트 재료로 사용되었는데 당시 기준으로 삼은 단위수량은 $1760\text{kg}/\text{m}^3$, 배합설계 강도는 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었다. 그후 그 효과를 인정받아 일반 건축구조물, 교량상판 등에 적용되었고 대전후 복구작업에서 본격적으로 사용되어 건축구조물의 골격구조, 프리캐스트 콘크리트구조물 등에 널리 보급되었다. 경량콘크리트는 1970년대 이후 각종 혼화제 및 혼화제의 개발에 힘입어 점차 고강도화 되어 초고층 빌딩 구

조물, 장기간 교량(Long span bridges), 프리스트레스트 프리캐스트부재 등의 육상구조물과 콘크리트 플랫폼, 원유저장시설 및 운반선, LNG선, 해상기지 등의 해양구조물에도 이용이 고려되고 있다.

본 연구에서는 앞으로 증가추세에 있는 고강도 경량콘크리트의 개발과 폭넓은 사용을 위하여 강도를 높일 수 있는 고강도 경량콘크리트의 제조방안을 실험적으로 연구하고, 이에 대한 역학적 특성을 분석하여 고강도 경량콘크리트의 사용과 설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험방법과 실험내용

2.1 실험의 범위

본 연구에서는 고강도 경량콘크리트의 기초적 실험연구를 3단계로 나누어 수행했다. 제1단계에서는 골재의 비중, 흡수율, 입도 등의 기본재료 물성시험을 수행하였고, 제2단계에서 강도발현에 큰 영향을 미치는 혼화제로서 Condensed-Silica Fume(CSF)과 이의 함유

표 1. 고강도 경량콘크리트의 특성 실험연구의 범위 및 목적

시 험 종 류	시 험 목 적	비 고
재료선정 및 품질시험	선정된 재료의 특성검토	KS 및 ASTM 시험규정
물탈강도시험	혼화제 최적 혼입량 및 이에 따르는 혼화제 첨가량 결정	시멘트 중량비로 혼화제 혼입율 결정
최적배합비시험	목표강도 및 단위중량 확보를 위한 최적배합비 결정	배합조건 조절 혼화재료 사용
강도특성시험	고강도 경량콘크리트의 강도 및 역학적 특성 파악	탄성계수, 포아송비 $\sigma-\epsilon$ 관계 휨 및 할렬인장 강도

량에 따른 유동성을 확보하기 위한 혼화제의 최적 혼입율을 결정하기 위한 모르타르실험을 수행하였다. 제3단계에서는 이러한 결과를 토대로 압축강도 $500\text{kg}/\text{cm}^2$, 단위수량 $1,850 \sim 2,000\text{kg}/\text{cm}^3$ 을 확보하기 위한 최적배합비 결정시험을 수행하였다. 경량 골재로서는 외국산과 국내생산의 두종류에 대하여 비교 검토하였다. 각 단계별 실험을 거쳐 고강도 경량콘크리트의 강도특성 및 역학적 특성을 규명하기 위한 실험을 아울러 수행하였다.

2.2 기본재료의 물성시험

2.2.1 시멘트

고강도 경량콘크리트에 일반적으로 사용되는 시멘트는 제1종(Type I)으로 분류되는 보통 포플랜드 시멘트이지만 콘크리트 해양 구조물 제작이나 프리캐스트 제작시 거푸집의 조기탈형이 요구되거나 Slip Form공법이 적용되는 경우에는 콘크리트의 조기강도발현이 중요시 되므로 제3종(Type III) 시멘트가 사용되기도 한다. 본 연구에서 사용된 우리나라 제3종 시멘트의 성분이 表2에 기술되어 있다.

2.2.2 골재

시험에 사용된 골재중 조골재는 혈암(shale)을 원료로 한 구조용 경량골재(국산, 외국산)

를 사용하였으며 세골재는 경량 세골재(국산, 외국산: All-Lightweight Concrete의 경우)를 사용하였다. 외국산 경량골재로는 구조용으로 비교적 사용실적이 많고 강도특성도 양호한 것으로 판명된 일본산 경량골재인 Mesalite를 사용하였으며, 국산의 경우는 국내에서 최근에 개발된 인공경량골재를 사용, 국산재료 대체성 검토시험을 수행하였다. 골재에 대한 품질시험은 KS 및 ASTM규정에 의거 체가름 시험, 비중 및 흡수율 시험, 표면수 측정시험을 수행하였으며 경량골재에 대해서는 구조용 골재로서의 내구성 검토를 위해 Los Angeles 마모시험을 추가로 시행하였다. 각 골재별 기본 물성내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 보통 세골재

준 경량콘크리트(Sand Lightweight Concrete)용 세골재에 요구되는 양호한 품질을 확보하기 위하여 시험결과 입도분포, 조립률 등에서 비교적 양호한 것으로 나타난 남한강 여주산 세골재를 선정하여 사용하였다.

① 체가름 시험 체가름 시험은 규정에 따라 진동 체가름 시험을 실시하였다. 입도분포는 그림에 표시하였고 조립률은 2.73으

表 2. 국산 포틀랜드 3종(Type III) 시멘트 성분표

항 목	구 분	KS L 5201(중)	
		A	B
1. 화학성분			
산화마그네슘(Mg O)	%	6.0이하	6.0이하
삼산화황(SO ₃)	%		
3CaO · Al ₂ O ₃ < 8%		3.5이하	3.5이하
3CaO · Al ₂ O ₃ > 8%		4.5이하	4.5이하
강열감량	%	3.0이하	3.0이하
알루미늄산화물(3CaO · Al ₂ O ₃)	%	15이하	15이하
2. 물리성능			
분말도			
비표면적 (Blaine)	㎠/g	—	—
표준제 88μ의 잔분	%	—	—
안정도			
오우토클레이브 팽창도	%	0.8이하	0.8이하
응결시간(길모어시험)			
초결	분	60이상	60이상
종결	시간	10이하	10이하
압축강도	kg · f/㎠		
1일		125이상	102이상
3일		245이상	197이상
7일		—	—
28일		—	—

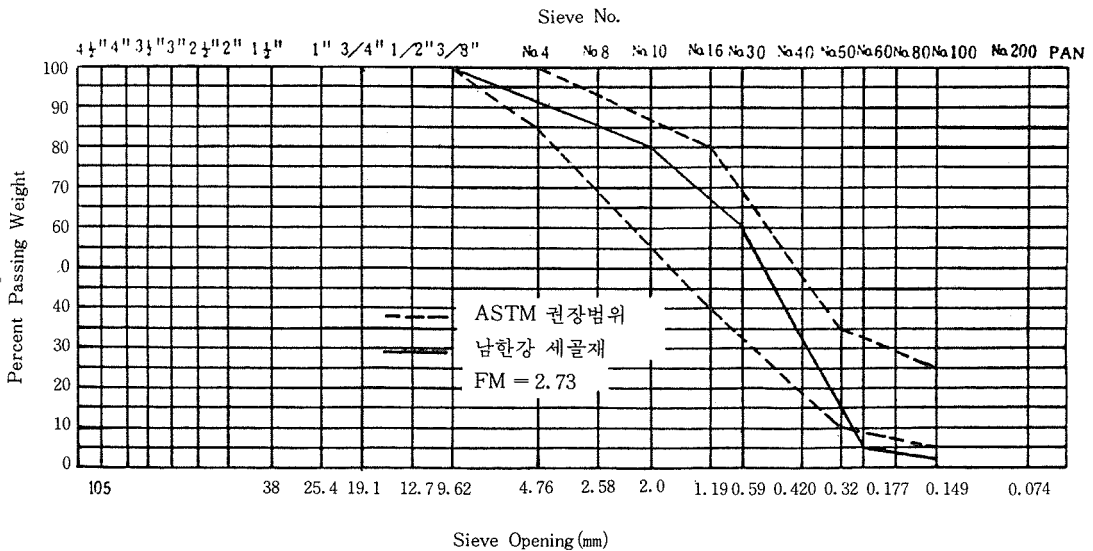


그림 1. 여주산 세골재의 입도분포

로 세골재 기준치 2.4~3.2 안에 들어오므로 적합한 것으로 판명되었다.

② 비중 및 흡수율 시험

세골재의 비중 및 흡수율시험은 콘크리트 단위중량과 강도발현특성에 영향을 미치는 요소로서 이를 결정하기 위해 ASTM C218에 따라 시험을 수행하였다. 비중시험은 측정결과 평균치 2.71t/㎥로 측정오차는 0.001로 허용기준치 0.002보다 작았다.

③ 표면수 측정시험

ASTMC 70의 중량법에 의거 수행하였다. 표면수 측정시험결과 시료를 적재한 초기에는 약 3.2%였으나 시일이 경과함에 따라 조금씩 감소되는 것이 관찰되어 배 배합시마다 표면수량을 결정하여 이로부터 단위수량을 보정한 수정배합을 실시하여 공시체를 제작하였다.

(2) 국산 경량세골재

본 시험에서 사용한 국산 경량세골재는 팽창혈암을 주 원료로 하여 Rotary Kiln 방식

으로 제조된 비조립형 경량골재로서 5mm이하체(No.4체)로 체가름을 실시한 후 입도를 조정된 시료를 사용하여 관련시험을 실시하였다.

① 체가름 시험

국산 경량세골재의 입도분포는 아래 그림2와 같으며 조립률은 4.2였다.

② 비중 및 흡수율 시험

평균 표적비중 2.12를 얻었으며 시험오차는 0.01로 허용오차 범위내에 들었다. 또, 흡수율 시험결과 평균 흡수율 5.39%를 얻었으며 24시간 동안 물 흡수율 특성을 보면 경량세골재는 Prewetting 4시간 후 90%이상의 흡수가 일어나 콘크리트 배합시 흡수율의 영향이 적어지므로 이때부터 배합 및 타설이 가능함을 알 수 있다.

(3) 외국산 경량세골재

① 체가름 시험

입도분포는 그림4와 같으며 이는 ASTM 권장범위를 약간 벗어났으며 조립율은 2.81

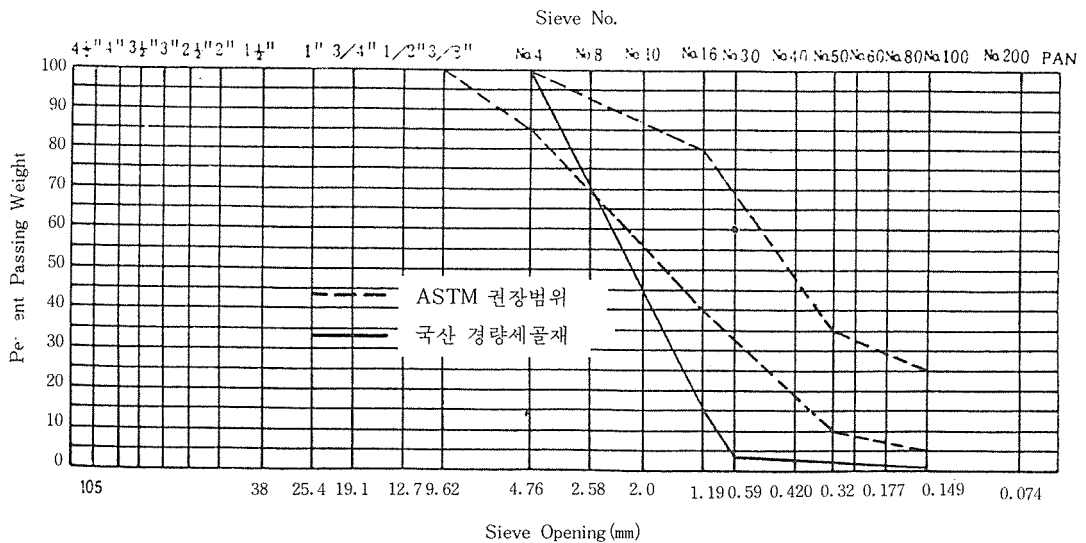


그림 2. 국산 경량세골재에 대한 입도분포

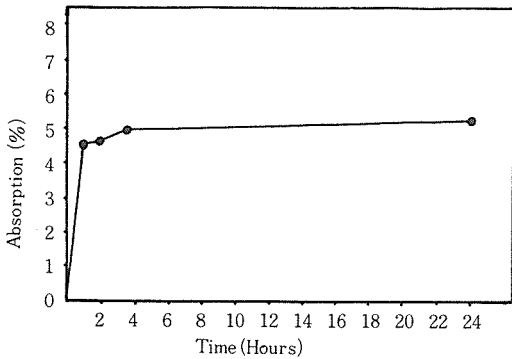


그림 3. 경량세골재의 흡수율 시험

이었다.

② 비중 및 흡수율 시험

ASTM C128 규정에 의거, 포건비중 1.60, 흡수율 12%를 얻었다.

(4) 국산 경량조골재

국산 경량조골재의 조립률은 6.0이었고, 포건비중은 1,304를 얻었다. 이는 외국산 경량조골재의 비중보다 작아 전체 콘크리트 단위 중량을 낮추는 데 유리함을 알 수 있었다. 또 흡수율은 평균 6.8%를 나타내 외국산 경

량조골재 10%의 경우보다 낮게 나타나 배합시 흡수율의 영향이 작은 것으로 나타났다.

(5) 외국산 경량조골재

국산의 경우와 마찬가지로 팽창혈암을 주원료로 하여 가공한 조립형 및 비조립형이 혼합된 것으로 조립률은 6.3이었다. 포건비중은 1.406이었고, 흡수율은 9.94%로서 국산골재보다 크게 나타났다.

(6) 경량 조골재의 마모시험

Abrasion에 대한 내구성을 검토하기 위하여 ASTM C330 규정에 의거 Los Angeles 마모시험을 수행하였다. 최대 골재치수가 19mm인 점과 이들의 입도분포 및 조립율 시험결과를 고려하여 전체 시료의 특징을 나타낼 수 있는 B등급을 선정하였다. 이때 무게 4.58kg의 철구 11개를 사용, 시험기는 33rpm으로 500회 회전시켰다. 총 시료량 470g에 대해 마모손실량 909.1g으로 마모율은 19.14%였다. 이는 구조용 경량골재의 한계치인 마모율 40%보다 훨씬 작은 값이었으며 일반자갈의 25%에 비해 마모저항이 우수하여 구조용으로 적합함을 알 수 있었다.

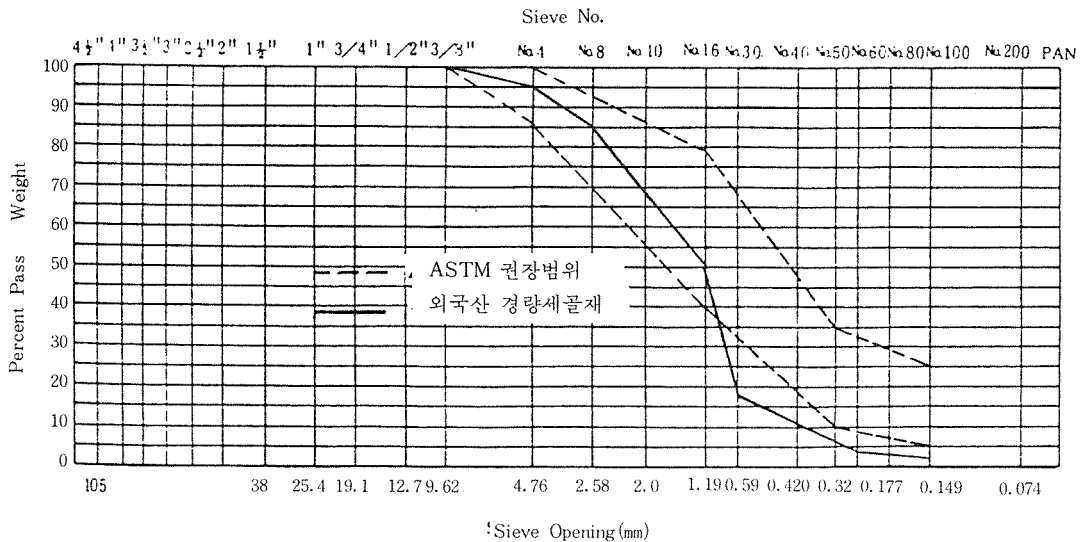


그림 4. 외국산 경량세골재의 입도분포

표 3. 시험에 사용된 세골재에 대한 품질시험 결과

종 류	산 지	품 명	표건비중	흡수율	F.M	비 고
일 반 세 골 재	국 내	모 래	2.71	0.82	2.73	
구조용 경량세골재	국 내	Shaleston	2.12	5.39	4.2	
	일 본	Mesalite	1.6	12.0	2.81	

2.2.3 혼화재료

고강도 경량콘크리트 실험연구를 위한 혼화재료로서는 콘크리트의 강도증진을 목적으로 그동안 국내에서비교적 사용실적이 많았던 고성능 감수제 M-100(Mighty 100)과 강도증진 및 장기강도 확보를 위해 최근 개발된 혼화제 CSF(Condensed Silica Fume)를 선정하였다.

(1) 혼화제

경량골재로 인한 강도 감소를 보충하기 위한 W/C와 혼화제의 첨가 등으로 낮아지는 분산성을 확보하기 위해 혼화제 M-100을 첨가하였다.

(2) 혼화제

본 시험에 사용된 혼화제(CSF)는 1976년 Norway에서 최초로 개발된 강력한 pozzolan 재료로서 pozzolan 반응이 극히 크며 입자의 비표면적이 매우 커서 강도증진과 장기강도 확보 및 내구성 증진에 좋은 재료로 알려져 있다. 특히, 경량 콘크리트에서의 또 다른 사용 이유는 이 혼화제를 넣었을 경우 시멘트의 수화반응시 생기는 유리 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여 불용성의 규소산화물을 만들어 줌으로써 수밀성이 높고 화학적 침식저항성도 증대되는 것은 물론 특히 비강도(Specific strength)가 콘크리트를 만들 수 있어 고강도를 얻기에 유리하기 때문이다.

2.3 Mortar 강도시험

이 시험의 목적은 몰탈압축강도 재령특성을 파악하기 위하여 선정된 혼화제(CSF)의 최적 혼입율(시멘트 중량비)을 결정하고 이

때 필요한 혼화제의 적정첨가량을 결정하기 위한 것이다. 사용되는 시멘트가 포플랜드 시멘트 TypeⅢ, 즉, 조강 시멘트이므로 압축 강도 재령변수를 1, 3, 7, 14, 28일로 정하고 이에 혼입되는 혼화재량 변수는 사용허용범위가 약 5~25%이므로 시멘트 중량비로 5, 10, 20%로 택하였고 강도발현특성 비교에 기준이 되는 0%인 경우를 추가 하였다. 배합조건은 시멘트량 500kg/m³, W/C는 0.35로 고정시켜 이때의 시멘트와 모래중량비는 1:2로 하였다. 몰탈의 Consistency를 유지하도록 하기 위해서 Flow test를 통해 Flow value가 첨가하였다. 시험 배합결과 혼화제 혼입량이 180±5mm가 되도록 혼화제를 적절히 커질수록 요구되는 혼화제 양이 커지는 것

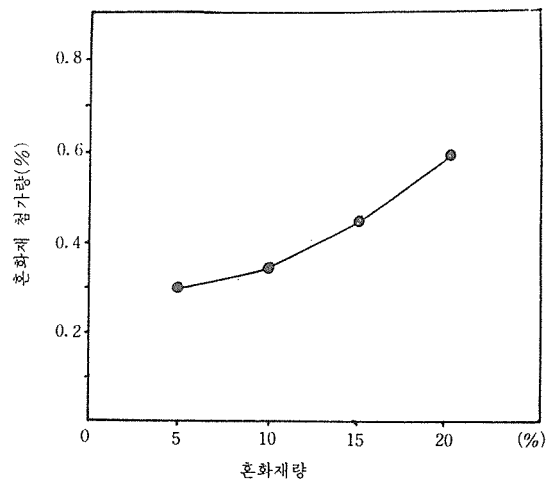


그림 5. Flow치를 180±5mm로 일정하게 유지한 경우 각 혼화제 혼입량에 따른 M-100의 첨가량

表 4. 시편의 구분과 배합 성분표

재료 공시체기호	시멘트 (g)	CSF (g)	모래 (g)	물 (g)	M-100 혼화제 (g)	플로우치 (mm)
SOM0	300	0	618.6	86.4	0	.
SOM3	"	0	"	"	0.9	.
S5	285	15	"	"	0.9	180.5
S10	270	30	"	"	1.05	185.25
S15	255	45	"	"	1.35	178.0
S20	240	60	"	"	1.8	185.5

로 나타났다. 각 경우별 시편의 구분과 배합조건 및 성분표는 아래 表4와 같다. 시편은 제작후 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생을 실시하였다.

혼화제에 의한 강도증진 효과는 재령 7일 전후해서 Chemical pozzolan activity에 의해 생성된 규산석회수화물이 안정되기 시작하면서 나타나고 또한 혼화제 혼입량이 많을

수록 늦어지고 있음을 알 수 있다. 즉, 혼화재량이 많을수록 강도가 늦게 나타나고, 결국 혼화제가 없는 경우보다 강도가 크게 발현되는 것을 알 수 있다. (그림6 참조)

이러한 결과로부터 본 시험기준 시멘트량 $500\text{kg}/\text{m}^3$, W/C 0.35 하에서 CSF의 혼입율이 10%인 경우가 최적혼입율로 판단되며 이때의 강도는 Plain Mortar에 비해 약 15%의 강도증진효과를 보였다.

2.4 콘크리트 최적배합비 실험

본 시험에서는 실험실 압축강도 $500\text{kg}/\text{cm}^2$, 단위중량은 준 경량콘크리트(Sand Lightweight Concrete)에 해당되는 $1.85 \sim 2.0\text{t}/\text{m}^3$ 을 목표로 하였다. 목표로 설정된 콘크리트의 최적배합비를 찾기 위하여 W/C, 단위시멘트량을 가장 중요한 변수로 하였고 골재 최대치수는 19mm 를 기준으로 하되 강도증진 효과관찰을 위해 15mm 의 경우도 고려하였다. 실리카 폼의 혼입율은 시멘트 모르타르 강도 시험결과 최적혼입율로 나타난 10%를 위주로 하였고 5%, 0%의 경우도 포졸란 효과를 알아보기 위해 고려하였다. 여기서고려한 W/C비와 시멘트량의 범위는 다음과 같다.

○ W/C비 ; 30%, 35%

○ 시멘트량 ; $450\text{kg}/\text{m}^3$, $500\text{kg}/\text{m}^3$, $550\text{kg}/\text{m}^3$
 예비배합설계에서 설정된 W/C비와 시멘트량의 배합으로는 충분한 Workability를 얻을

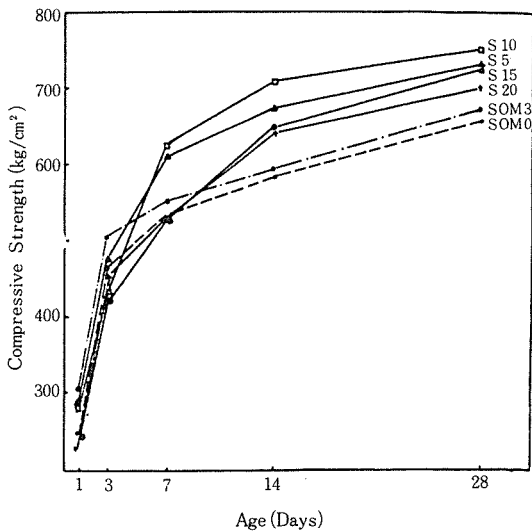


그림 6. 재령에 따르는 각 혼화제 혼입량별 몰탈압축강도

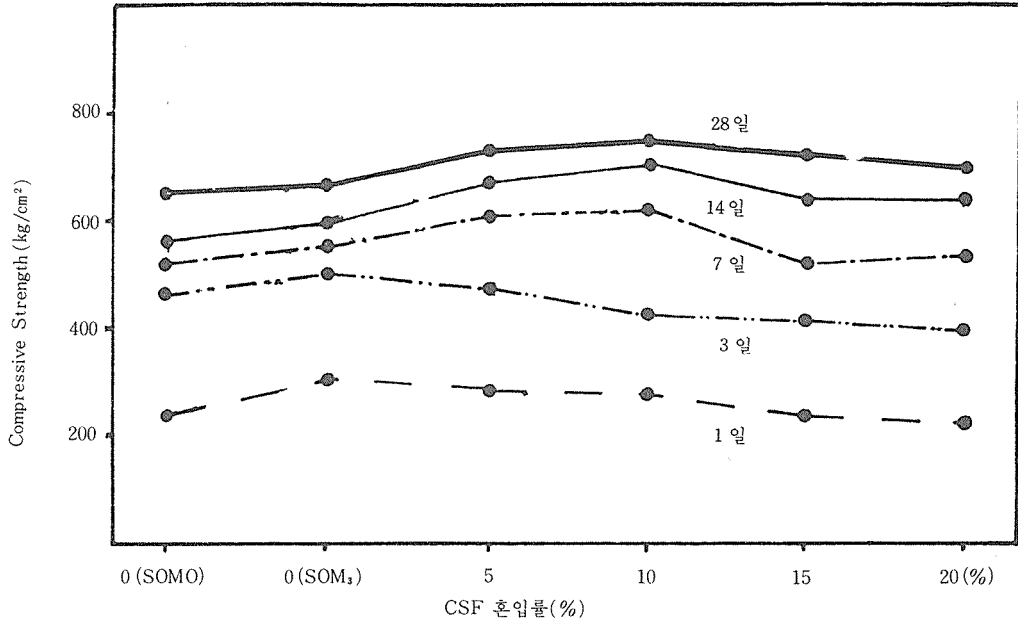


그림 7. CSF 혼입률에 따른 Mortar 강도변화

수 없으므로 시공성을 고려하여 기준 Slump 치인 10cm 가 되도록 혼화제 입량을 결정하였다. 슬럼프 시험과정에서 다음과 같은 특징적인 현상을 관찰할 수 있었다.

○ W/C비가 낮고 시멘트량이 많은 배합이어서 전단파괴가 자주 발생하였다.

○ 혼화제가 많이 들어갈 경우 (1.0% 이상) 다짐시 골재와 시멘트 페이스트가 주저앉는 현상이 나타났다.

이와 같은 현상에 대처하기 위하여 다음사 에 유의하여 수행하였다.

○ 혼화제의 계량은 0.05g까지 정확을 기하였다.

○ 흡습성이 있는 실험기구에 대해 습한 마포로 미리 닦아 배합수량의 감소를 막았다.

○ 전 작업을 2분 이내에 끝내도록 유의하였다.

강도시험을 하기 위한 각 경우별 배합설계표는 아래 表5와 같다.

상기의 각 경우에 대하여 재령별 강도시험을 한 결과는 다음과 같다.

(1) 시험결과와 분석

① 슬럼프치와 혼화재료

시험결과 혼화제의 혼입율이 일정할 경우 단위 시멘트 페이스트양에 대한 골재량이 증가할수록 혼화제의 양은 증가하였고 W/C비가 작을수록 첨가율의 증가경향은 더욱 큰 것으로 나타났다.

② 재령에 따르는 강도의 특성

본 실험에서 수행한 각 경우에 대한 재령별 강도증진효과는 아래 그림8과 같다.

③ 시멘트량, W/C와 강도발현특성

그림9에서 보는바와 같이 W/C=0.35인 경우 시멘트량에 따른 강도변화는 그다지 크지 않지만 W/C=0.30인 경우 시멘트량 50kg/m³ 변화에 따라 강도는 5%정도 변화하여 W/C가 낮아질수록 시멘트량에 따른 강도변화가 커지는 경향을 나타내었다.

④ 혼화제 혼입률에 따른 강도발현특성

그림10에서 볼 수 있는 바와 같이 장기재령에서 혼화제 혼입이 커질수록 강도가 증가되었고, CSF 10%에서 가장 좋은 강도발현특성을 나타냈다. 또, 단위 시멘트량이 많고 골

表 5. 각 경우별 배합설계 내용

(단위 kg/cm³)

시료번호	시멘트량		단위수량	세골재	조골재	단위중량
	시멘트	실리카				
IA-가1	405	45	158	725	564	1897
IB-가1	450	50	175	688	535	1898
IB-가1	475	25	175	693	545	1913
IC-가1	495	55	193	652	507	1902
IC-가2	495	55	193	652	507	1902
IC-나2	522	23	193	657	511	1911
IIA-가1	405	45	135	-	-	1920
IIB-가1	450	50	150	715	556	1921
IB-나1	475	25	150	720	560	1930
IIB-다1	500	0	150	725	564	1937
IIC-가1	495	55	165	681	530	1926
IIC-나2	522	28	165	686	534	1935
IIC-다2	550	0	165	692	538	1925
MM	450	50	150	398	557	AllLight Agg (1625)
NR	450	50	150	716	1,053	Normal Agg (2419)

주: I, II → W/C 비 35%, 30%
 가, 나, 다 → 실리카폼 혼입률 10, 5, 0%
 A, B, C → 시멘트량 450, 500, 550 kg/m³
 1, 2 → 굵은 골재 최대치수 19mm, 15mm

채치수가 작을수록 상대적으로 강도증진을 이 낮았으며 최적혼입율 10%의 강도발현이 지연되어 나타났다.

⑤ 기건단위중량

초기 배합시의 단위용적중량은 1900~2000 kg/m³의 범위에 있었으며 시멘트량이 증가할수록 W/C가 낮아질수록 커지는 경향을 나타냈다. 기건단위중량은 ASTM C567 방법에 따라 계산한 결과 만족스러운 범위내에 들어오는 것으로 나타났다.

2.5 국산 경량골재 시험

본 실험에서는 최근에 국내에서 개발된 국산 인공경량골재를 사용하여 실험을 수행하였으며, 외국산과 비교 검토하였다.

2.5.1 배합설계

앞 절 외국산 경량골재 콘크리트시험에서 최적으로 나온 배합비를 이용하였다. 즉, W/C=0.3, 시멘트량 550kg/m³, CSF 10%, 최대골재크기 15mm 등으로 배합변수를 정하였다. 단, 국산의 경우 ASTM 표준입도를 만족시

表 6. 각 경우별 재령에 따른 압축강도

(단위 kg/cm²)

재령 시료번호	3 일	7 일	14 일	28 일	비 고
IA-가1	321.5	382.0	439.3	452.2	가
IB-가1	324.7	382.5	427.5	460.0	나
IB-나1	352.0	396.8	418.3	440.9	다
IC-가1	336.3	394.7	426.5	459.8	라
IC-가2	345.6	428.2	456.0	480.0	마
IC-나2	375.4	408.2	427.1	469.3	바
IIA-가1	318.6	386.9	432.4	455.2	1
IIB-가1	311.2	407.5	417.0	478.8	2
IIB-나1	330.0	407.3	454.2	468.2	3
IIB-다1	331.0	356.7	375.6	400.0	4
IIC-가2	329.8	412.0	477.5	500.8	5
IIC-나2	381.0	423.8	484.6	510.1	6
IIC-다2	382.3	404.8	427.3	449.8	7
MM	1	348.0	1	396.6	8
NR	500.8	560.2	628.1	700.6	9

키기 위하여 보통 세골재를 50% 대체 사용하였다. 혼화제 첨가량은 외국산에 비해 25~30% 늘었고 준 경량의 경우보다 경량 콘크리트에서 더 많이 사용되었다.

2.5.2 시험결과 및 분석

재령별 습윤단위중량과 압축강도는 위 표 8과 같다.

(1) 단위중량

최적배합비로 제작된 고강도 경량콘크리트는 목표 기건단위중량 1.85~2.0t/m³을 매

우 잘 만족시킴을 알 수 있었다.

(2) 압축강도

외국 경량 골재를 사용한 경량, 준 경량 콘크리트의 압축강도보다 각각 5%, 15% 정도 큰 값을 나타내었다.

(3) 단위중량과 압축강도

단위용적중량 증가됨에 따라 압축강도가 증대되는 것으로 나타났으며, 그림 12에서 잘 나타나 있다.

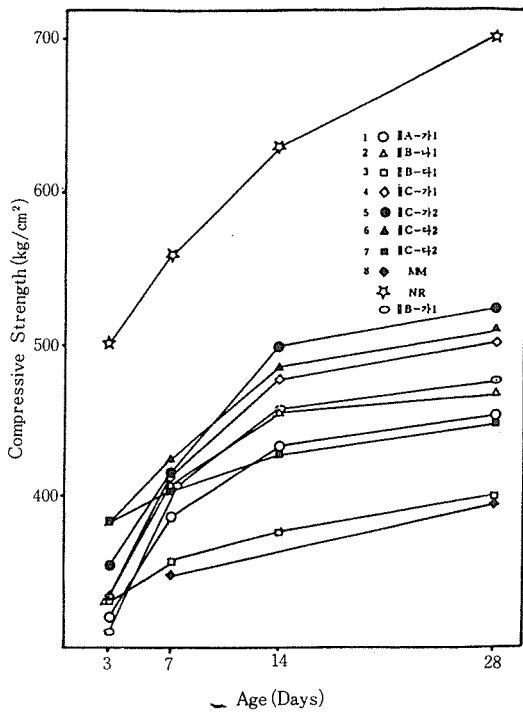


그림 8. 물 시멘트비 30%인 경우 CSF 혼입율, 최대골재치수, 시멘트량에 따른 재령별 강도

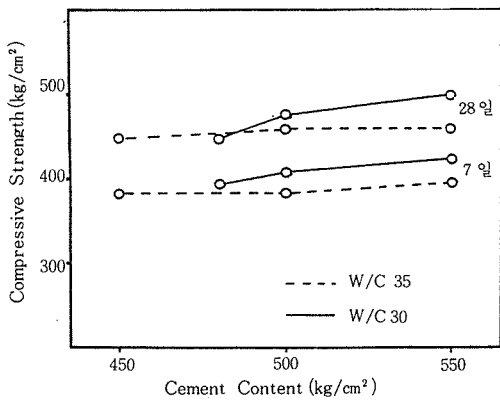


그림 9. 물 시멘트비 변화에 따른 단위 시멘트량별 재령강도

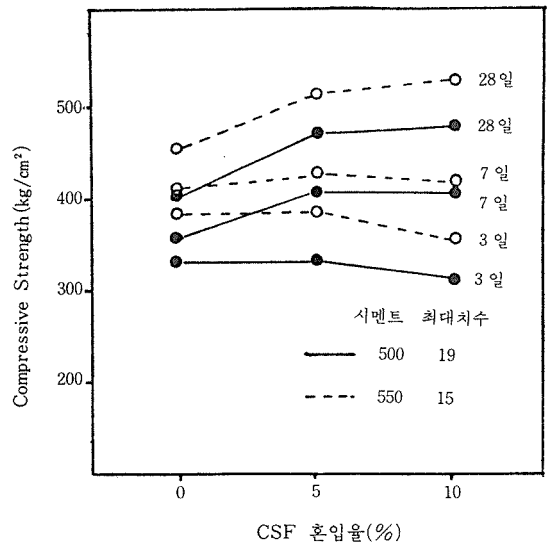


그림 10. 단위 시멘트량, 최대골재치수 변화에 따른 CSF 혼입율별 재령강도

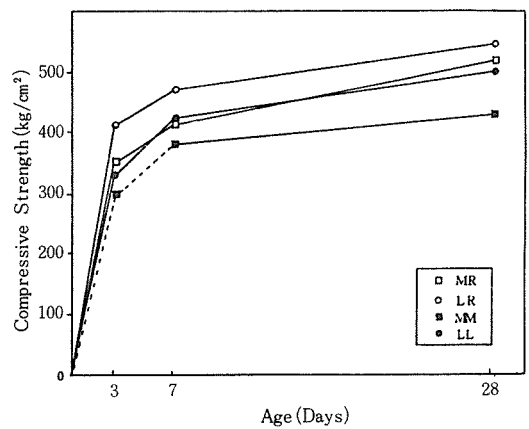


그림 11. 최적 배합비로 제작된 고강도 경량 콘크리트의 종류별 재령강도

7. 국산 경량골재 시험배합 내용

시료	콘크리트 Type	시멘트	실리카흙	조골재	세골재	단위 수량	혼화제 (%)	비고
MR	Sand Lightweight	495	55	530	681	165	0.4	· 골재 최대크기 15mm · s/a =40% *경량세골 재+Sand
LR				492	682		0.5	
MM	All Lightweight			530	404		0.45	
LL				492	*(268 +341)		0.6	

표 8. 국산재료 대체성 시험결과 재령별 습윤단위중량과 압축강도

시험종류	재령(일)	MR	LR	MM	LL	비고
단위중량 (kg/m³)	배합시	1,926	1,889	1,649	1,815	
	3	1,978	2,036	-	1,958	
	7	1,989	1,965	1,767	2,039	
	28	1,973	2,027	1,779	1,998	
압축강도 (kg/cm²)	3	353.3	413.8	-	333.6	
	7	415.7	469.0	380.0	426.5	
	28	522.8	544.6	433.0	501.0	

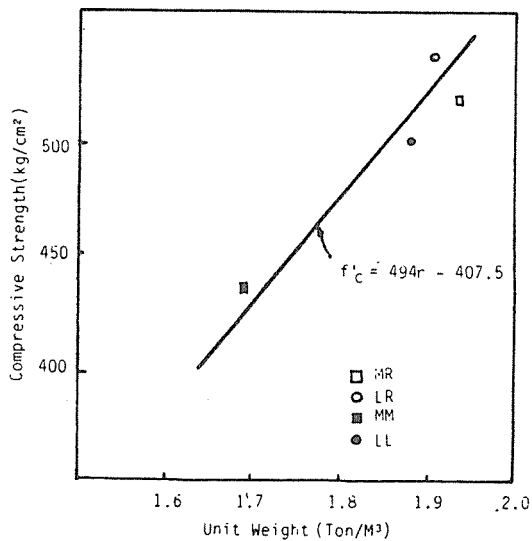


그림 12. 기건 단위중량과 압축강도

3. 강도및 역학적 특성시험

설계시 요구되는 콘크리트의 기초적 강도 특성및 역학적 시험을 수행하여 구조물 설계시의 활용방안검토및 설계자료 확보를 목적으로 역학적 특성시험이 필요하다.

3.1 역학적 특성시험

역학적 특성을 규명하기 위하여 정적탄성계수(E_c), 포아슨비(V), 음력변형도곡선($\sigma - \Sigma$)측정시험을 수행하였다.

(1)정탄성계수

최적배합비를 이용한 고강도 경량콘크리트의 정탄성계수는 같은 강도의 보통콘크리트값의 65%~75%로 작은 값을 나타내었다.

표 9. 정탄성계수 시험결과

시험결과		S ₁ (kg/cm ²)	S ₂ (kg/cm ²)	ε ₂	¹⁾ E _c (kg/cm ²)
W/C=30%	외 국 산	1.2	207	0.00103	229962
	국 산	36.2	218	0.00072	271343
W/C=35%	외 국 산	21.6	203	0.0008	241843

(주) 1) E_c = (S₂ - S₁) / (ε₂ - 0.000050)

표 10. 동탄성계수 시험결과

시험결과		D (sec ² /cm ²)	W (kg)	n' (Hz)	²⁾ E _{dyn} (kg/cm ²)
W/C=30%	외 국 산	7.6587 × 10 ⁻⁴	3.163	10,322	258,095
	국 산	7.6587 × 10 ⁻⁴	3.182	11,235	307,610
W/C=35%	외 국 산	7.6587 × 10 ⁻⁴	3.103	10,709	272,541

(주) 2) E_{dyn} = DW (n')²

(2) 동탄성계수

정탄성계수보다 10~15% 큰 것으로 나타났고 정탄성계수와의 관계는 R.N.Swammy (1975) 등이 제안한 이론식

E_c = 1.04E_{dy} - 41(GPa)에 상당히 근접했다.

(3) 응력 - 변형곡선

본 실험에서 얻어진 대표적인 응력 - 변형곡선은 그림 13과 같다.

(4) Poisson's ratio

외국산 경량골재의 경우 V=0.19~0.2, 국산의 경우 V=0.12로서, 일반적인 범위 0.11~0.21(R.N.Swammy)안에 들어오고 있다.

3.2 강도특성

최적배합비를 이용한 고강도 경량콘크리트의 강도특성을 파악하기 위하여 휨 강도 f_r 과 할별인장강도 f_{sp}' 측정결과를 표 11 그림 14,

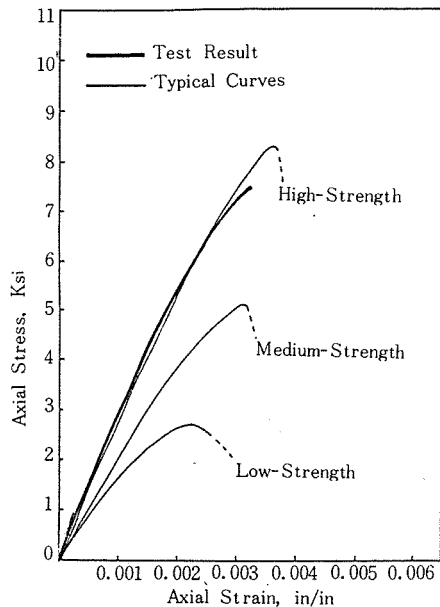


그림 13. Typical axial stress-strain curves (w/c=0.3, f'c = 518kg/cm² (7400psi))

표 11. 휨강도, 할렬인장강도에 관한 관련 규정치와 실험결과치 비교

	Normal Concrete	*ACI318-83	F.* O. slate	**시험결과치	비 고
휨 강도	$7.5\sqrt{f'_c}$	$5.6\sqrt{f'_c}$	$6.5\sqrt{f'_c}$	$6.7\sqrt{f'_c}$	* All lightweight concrete
할렬강도	$6.5\sqrt{f'_c}$	$5\sqrt{f'_c}$	$5\sqrt{f'_c}$	$6.1\sqrt{f'_c}$	** Sand lightweight concrete

15에서 ACI시방서 기준값과 Slate가 제안한 값등과 비교하였다. 측정된 휨 강도값은 $6.7\sqrt{f'_c}$ 로서 ACI 318-83의 규정치 $5.6\sqrt{f'_c}$ 과 F.O.Slate의 수정식 $6.5\sqrt{f'_c}$ 보다 약간 큰 값을 나타냈고 측정된 할렬인장강도 값도 $6.1\sqrt{f'_c}$ 으로서 ACI 318-83과 Slate의 규정치 $5\sqrt{f'_c}$ 보다 약간 큰 경향을 나타냈다.

4. 결론

본 연구는 고강도 경량콘크리트를 개발하고 그 역학적 특성을 규명하기위한 연구로써 각 단계마다 다음과 같은 결론을 얻을수있다.

(1) 혼화재 CSF의 혼입량이 많아짐에 따라 첨가되는 혼화재 M-100의 양은 증가하고 초기강도는 떨어지고 있으며 이들의 관계는 비 선형적이다.

(2) 혼화재 CSF에 의한 강도증진 효과는 재령 7일전후에서 Chemical pozzolan 반응에 의해 생성된 규산석회 수화물이 안정됨에 따라 나타나고 또한 혼입량이 많을수록 늦어지고 있다.

(3) 초기 강도 증진효과는 주로 사용된 혼화제에 의한 것이며 이 효과는 재령에 따라 감소한다.

(4) CSF 반응은 W/C가 클수록, 빈배합질수록 활발해지고 이는 혼입량에 비례하지만 낮은 W/C에서의 최적 혼입량은 일정한 관계가 없다.

(5) 본 시험 조건에서의 최적 CSF 혼입량은 10%이며 경제성 고려시 사용 권장범위는 5%~9%이다.

(6) 단위 시멘트량이 증가할수록 골재 최대크기가 작아질 수록 상대적으로 강도증진율이 낮아졌으며 혼화재 CSF의 양이 0.5%~10%로 커짐에 따라 강도발현 특성이 몰탈 경우보다 늦게 나타났으며 또한 몰탈에서 선정된 최적 혼입율 10%는 콘크리트에서도 거의 비슷하게 적용되었다.

(7) 골재 최대크기를 줄임으로서 시멘트 페이스트와 경량골재의 부착력 증가와 더불어 경량골재의 상대강도가 커짐에 따라 압축강도를 10%정도 증가 시킬수 있다.

(8) 국산 경량골재를 사용한 경우 압축강도는 경량 및 준경량 콘크리트 모두 목표강도 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 넘었을 뿐만 아니라 외국산의 것보다 5~15%정도 큰 값을 나타내어 강도 측면에서는 성능이 어느 정도 우수한 것으로 나타났다.

(9) 본 시험결과 얻은 최적 배합비를 위한 배합변수의 추천 Range는 강도가 큰 경량골재가 개발된다면 단위시멘트량이나 혼합재 혼입량이 줄어드는 등 수정이 필요한 것이며 구조물 제작 및 설계를 위한 Guide Line을 설정하기 위해서는 Creep, shrinkage등 Long term 특성에 대한 실험 연구와 철근 콘크리트 부재실험 현장에서의 품질관리 문제등에 대한 지속적인 연구로 좀 더 보완되어져야 할 것이다.*

<참고문헌>

- 1) American Concrete Institute(1977), ACI Standard Building Building Code Require-

- ments for Reinforced Concrete (ACI 318-77) Detroit Michigan.
- 2) S. P. Shah. Shuaib H. Ahmad (1985) "Structural Properties of High-Strength Concrete and its Implications for precast prestressed Concrete" PCI Journal pp 92-119.
 - 3) Neville, A.M.(1981), properties of concrete, Pitman.
 - 4) Branson, D.E.(1977), Deformation of Concrete, McGraw Hill, pp 2-84.
 - 5) Magne Maage(1986), "Strength and Heat Development in Concrete : Influence of Fly Ash and Condensed Silica Fume" Journal of American Concrete Institute Special Publication 91.VO12, pp 923-940.
 - 6) Malvin Sandvik(1986). Effect of CSF on the strength development of Concrete, International Conference, ACI.
 - 7) Theodor A.Bügo(1983), 14,000 Psi in 24 hours, Concrete international.
 - 8) Y.Halse(1984), Development of Micro structure and other properties in Fly ash OPC systems Cement and Concrete Reseach.
 - 9) V. M. Malhotra (1984), Use of mineral admixtures for Specialized Concretes, Concrete International.
 - 10) 문한영(1984), 건설재료학, 동명사
 - 11) 한국표준공업협회(1980), 구조용 경량골재(KSF2534)
 - 12) 오창희(1979), 인공경량골재를 이용한 경량콘크리트의 활용에 관한 연구
 - 13) 홍사천(1975), 개흙과 점토를 원료로 한 소성경량골재의 특성에 관한 실험적 연구. 대한건축학회 창립30주년 기념논집
 - 14) 김생빈(1981), 고강도 콘크리트의 내구성에 관한 연구, 대한 토목 학회지
 - 15) 清永昭(1980), '새로운 콘크리트 공법' -土木技術(日本)
 - 16) R.N.Swamy(1985), High-strength Concrete Material Properties and structural behavior -SP-87 ACI
 - 17) D.L.Kantro(1981), Influence of Water-Reducing Admixtures on properties of cement paste -Portland cement association.
 - 18) S.E.Swartz(1985), Structural bending Properties of Higher strength concrete -SP87 ACI.