

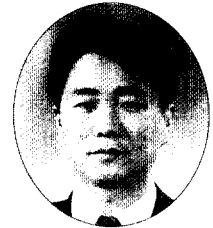
구조용 경량콘크리트

## 구조용 경량콘크리트의 연구동향

### Research Trends of Structural Lightweight Concrete



곽윤근\*



장일영\*\*

#### 〈편집자주〉

콘크리트구조물이 날로 고층화, 대형화하는 현대에 있어서 콘크리트 재료의 고강도화와 경량화는 필수적이다. 이러한 현실에서 구조용 경량콘크리트는 현대의 건설여건에 만족시킬 수 있는 좋은 건설재료라 할 수 있겠다. 실제로 경량콘크리트는 건축물의 고층하중을 감소시켜 공사비를 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라 자중감소로 인하여 지진 등에 대해서도 적절히 대응할 수 있는 재료이다. 최근의 콘크리트품질 개선을 위한 각종 혼화재의 발달과 인공경량골재의 대량생산은 구조용 경량콘크리트의 발전을 가속화시켜 왔다. 국내의 경우에는 구조용 경량콘크리트에 대한 연구가 이제 시작하는 단계이나 외국에서는 40년이상 각종 실험을 통하여 구조 및 재료적 특성을 연구해 왔고 실제 적용을 해 왔다. 국내에서는 경량콘크리트를 구조용으로 사용하는 것에 대하여 아직 인식이 부족하고 실제 적용사례도 적어 건설기술자들의 이해를 돕기 위해 이번 특집에서 마련하였다.

바쁘신 중에도 집필해 주신 필자 여러분께 감사하며 이번 특집기사가 건설관계에 종사하는 모든 분들께 많은 도움이 되기를 바란다.

(특집주간: 금오공과대학교 건축공학과 곽윤근 교수)

\* 정회원, 금오공대 건축공학과 교수

\*\* 정회원, 금오공대 토목환경시스템공학부 교수

#### 1. 서론

일반적으로 구조용 경량콘크리트에 사용되는 경량골재는 sintered pulverized fuel ash, pelletized slag, expanded clay, shale 또는 slate 등이 있다. 구조용 경량콘크리트로는 단위중량 1,400~2,000kg/m<sup>3</sup>, 강도는 25~50 Mpa 정도가 주로 쓰인다. 자중감소로 인하여 보통콘크리트에 비해 약 10~20%의 건설비용을 감소시킬 수 있으며, 많은 구조적 장점을 발휘하는 것으로 알려져 있다.

1918년 세계최초로 경량골재 제조를 개시한 미국은 경량골재의 사용용도가 콘크리트조적용 64%, 콘크리트구조용 23%, 아스팔트콘크리트용 6% 그리고 기타가 7%로서 블록용이 과반수를 차지하고 있으며, 구조용중에서는 PC용이 많은 것이 특징이다. 미국 및 캐나다의 인공경량골재 제조업자는 E.S.C.S.I(Expanded Shale, Clay

and Slate Institute)를 설립하여 ACI, PCI등과 공동으로 인공경량골재 콘크리트 및 그 구조물의 연구, 개발을 진행하고 있다. 구조용경량콘크리트에 대한 규준은 ACI 318-95에 규정되어 있다.

유럽에 있어서의 구조용 인공경량골재는 아직 개발도상 단계에 있다. 그러나 단열구조용 및 단열콘크리트용 골재의 사용은 매우 많으며 제조업자의 협회는 영국의 ALAM, 영국을 제외한 유럽에는 ELAPA가 설립되어있다. 구조용 인공경량골재 콘크리트에 대한 규준은 영국의 경우 BS8110 및 BS5400에 나타나 있다.

일본의 경우 제2차세계대전후 천연의 경량골재가 주로 건축구조용 콘크리트로서 사용되어 왔으며, 60년대에 비로서 고품질의 구조용경량콘크리트를 만들기 위한 인공경량골재의 연구개발 노력이 활발히 진행 되어 1964년에 처음으로 제조 및 판매가 시작되었다.

토목분야에 있어서의 인공경량골재 및 콘크리트의 연구 및 실시공은 1950년대 후반부터 있었으며, 일본토목학회에서는 1966년에 인공경량골재 콘크리트 설계시공지침을 제정하였고, 일본국영철도에서는 1964년에 인공경량골재 콘크리트 설계시공기준을 제정하였다. 적용구조물로서는 철근콘크리트상판, PC철도교교량의 주형, 보도교, 굴뚝, 용수로, 합성 및 비합성의 상판, 교량의 하부구조, 아스팔트콘크리트, 항만구조물, 해양구조물, 해양부상구조물 등에 널리 사용하게 되었다. 토목에 있어서의 인공경량골재의 최대용도는 수도고속도로공단 및 한신고속도로공단 등에 의한 고가도로의 철근콘크리트 상판용이다. 여기에 사용되어진 인공경량골재콘크리트의 사용실적으로서의 특징은, 동시에 시공된 보통콘크리트에 비해서 균열발생이 매우 적다는 결과가 나타났고 이러한 사실은 양 관리공단의 실태조사에서 입증되었다.

건축분야에 있어서의 인공경량골재 사용또한 1964년에 건설성규준 {인공경량골재를 사용하는 철근경량콘크리트조 구조기준}이 제정된 이후 본격적으로 생산하여 사용되었다. 그러나 1968년

에 일어난 十勝沖지진에 의해 학교건물등의 철근콘크리트조 중저층 건축물이 심각한 전단파괴 양상을 보임에 따라 내진설계법의 강화, 그리고 70년대의 석유위기에 따른 인공경량골재 가격상승 등의 영향에 의해 일본에서의 인공경량골재의 수요는 큰 증가추세를 보이지 못했다. 그러나 80년대 이후의 도시 인구집중에 따른 주택난과 그에 대한 초고층아파트의 건립 필요성이 거론되기 시작했으며, 또한 양질의 골재자원이 고갈되면서부터 인공경량골재의 연구개발이 건설성과 학회 등을 중심으로 꾸준히 진행되었다. 그결과 SRC형식의 건축구조물에 설계기준강도 210-240kg/cm<sup>2</sup> 정도의 인공경량골재가 사용되었으나 최근에는 설계기준강도 360kg/cm<sup>2</sup> 정도의 고강도 인공경량골재가 사용되어 지고 있다. 또한 북극해에서의 부상원유채취선 크리그베스가 일본에서 생산된 인공경량골재를 이용하여 건조되어, 경량성, 고강도 및 내동해성 등에서도 주목할만한 연구성과를 거두고 있으며 앞으로의 비약적인 사용증가가 예상된다.

## 2. 연구동향

구조용 경량콘크리트에 대한 연구는 1950년대 후반 포틀랜드 시멘트협회에서 시작되었다. 이 연구의 일환으로 Shideler<sup>(1)</sup>는 압축강도( $f_c'$ ) 8400psi를 가진 경량콘크리트의 제조와 특성에 대해 발표하였고, 1958년 Hanson<sup>(2)</sup>은 압축강도 8100psi를 가진 경량콘크리트보의 전단강도에 대한 연구를 발표하였다.

1964년 Hognestad<sup>(3)</sup>은 구조용 경량콘크리트 슬래브의 전단거동에 대해 발표하였고, 1967년 Ivey<sup>(4)</sup>은 전단스팬비와 주철근비에 따른 경량콘크리트부재의 전단거동에 대해 발표하였다. 1973년 Atan<sup>(5)</sup>등은 2축하중을 받는 구조용경량콘크리트의 응력-변형도관계를 구하여 보통 콘크리트의 값과 비교하였다. 1976년 Riva<sup>(6)</sup>는 5종류의 경량콘크리트시험체로 부착성능을 연구하였다.

1978년 Wang<sup>(7)</sup>은 압축강도 8,000psi 경량콘크리트의 특성에 관해 발표하였으며, 압축하에

서의 응력-변형도 곡선의 이론식을 제안하였다.

이어서 Kaar<sup>(8)</sup>은 압축강도 12,500psi를 가진 경량콘크리트부재의 응력-변형도 관계, 휨응력 분포에 관해 발표하였다.

1980년 Hamadi<sup>(9)</sup>은 전단스팬비가 같은 5개의 보통중량콘크리트보와 5개의 경량콘크리트보 등 10개의 구조실험을 통하여 보통콘크리트와 경량콘크리트보의 전단거동에 대하여 비교 연구하였고, 1981년 Berge<sup>(10)</sup>는 전단보강된 시험체와 보강하지 않은 시험체를 대상으로 경량콘크리트보의 전단실험을 하였으며, BS8110에 의한 추정값과 비교하였다. 또한 인발시험으로부터 부착강도를 측정하였다.

1982년 Lambert<sup>(11)</sup>는 주철근비와 전단스팬비에 따른 경량콘크리트 T형보의 전단실험을 하여, 실험값과 BS8110에 의한 추정값의 비가 1.08~2.3의 값을 나타내었으며, 1982년 Trinch<sup>(12)</sup>는 경량콘크리트와 보통콘크리트의 부착시험을 통하여 부착강도는  $\sqrt{f_c'}$ 에 비례함을 발표하였다. 1985년 日本土木學會<sup>(13)</sup>에서는 인공경량콘크리트의 설계시공 매뉴얼을 편찬하면서 경량콘크리트의 전반적인 역학적 특성에 대해서 정리 요약하였으며, 1986년 友澤<sup>(14)</sup>은 초고층건축물에 적용할 수 있는 경량콘크리트의 기본적 역학적특성을 조사하였고, 보통콘크리트와의 비교 결과를 정리하여 발표하였다. 1986년 Nilson<sup>(15)</sup>은 단위중량 1440kg/m<sup>3</sup>~1650kg/m<sup>3</sup>, 압축강도 60Mpa 고강도 경량콘크리트의 시험체를 가지고 탄성계수, 포와송비, 시험체크기효과, 재령에 따른 강도, 할렬인장강도 등을 구하여 보통콘크리트와 비교 분석하였고, 1987년 Clarke<sup>(16)</sup>는 경량골재콘크리트의 전단강도를 실험하여 BS8110에 의한 추정값과 비교하였다.

1988년 日本건축센터<sup>(17)</sup>에서는 인공경량골재콘크리트를 이용한 기둥 53개, 내진벽 7개에 대한 실험을 수행하여 전단내력식의 비교 검토 결과를 발표하였다.

1989년 Ahmad<sup>(18)</sup>는 콘크리트의 압축강도, 전단스팬비, 전단보강여부를 변수로 한 구조실험을

통하여 경량콘크리트보의 전단거동에 대해 발표하였고, 1991년에는 고강도 경량콘크리트보의 휨거동<sup>(19)(20)</sup>에 대해 발표하였다. 1993년 Clarke<sup>(21)</sup>는 경량콘크리트의 부착성능 시험을 하였고, 1994년 G. C. Hoff<sup>(22)</sup>는 해양구조물에 대한 고강도 경량콘크리트의 피로거동에 대하여 발표하였다.

다음은 구조용 경량콘크리트에 대한 연구중 일부를 몇 개의 주제로 나누어 정리한 것이다.

### 3. 전단거동

Ahmad<sup>(18)</sup>는 콘크리트 압축강도 ( $7800 < f_c' < 10,000$ psi), 전단스팬비( $a/d=0.52, 1.56, 2.59, 3.63$ ), web보강여부를 변수로 하여 고강도 경량콘크리트보의 전단실험을 수행하였다. 실험결과,  $a/d > 3.63$ 이고  $f_c' > 10,000$ psi인 전단보강하지 않은 경량콘크리트보의 경우 ACI 11-3식이 적절하지 않고,  $a/d > 2.59$ 이고  $f_c' > 10,000$ psi인 전단보강된 경량콘크리트보에서는 ACI 11-3식, 11-6식이 적절하지 않음을 확인하였다. 실험값과 ACI 11-3식, 11-6식과 비교한 것이 다음표 1에 나타나 있다. ACI추정값은 보통콘크리트의 전단강도식에 0.85를 곱한 것이다.

Clarke<sup>(16)</sup>는 전단보강된 경량콘크리트보와 전단보강하지 않은 보를 비교대상으로 전단 실험을 하였으며, BS8110 기준값과 비교하였다. 전단보강하지 않은 보의 경우 추정값에 대한 실험값의 비가 1.03~1.84(평균값은 1.33)이고, 전단보강한 보의 경우는 1.03~1.68(평균값은 1.36)로 나타났다(표2참조). 여기서 Clarke는 전단보강하지 않은 경량콘크리트보의 경우, 보통콘크리트에서의 저감계수 0.8을 0.9로 상향시키고, 전단보강한 보에서는 계수를 적용하지 않는 것이 바람직하다고 발표하였다.

Hanson등에 의한 실험값을 BS8110 기준에 의한 추정값과 비교한 것이 그림1에 나타나 있다. 44개 시험체의 추정값에 대한 실험값의 평균비율이 1.56으로 비교적 안정적이다. 그이유는 BS8110기준에서 경량콘크리트의 전단응력은 보

통콘크리트의 전단응력식에 0.8을 곱하도록 되어 있다. Hamadi등<sup>(9)</sup>은 5개의 보통콘크리트보와 5개의 경량콘크리트보를 이용하여 전단보강된 T형보의 전단실험을 하였는데, 추정값에 대한 실험값의 비가 보통콘크리트보에서는 평균 1.33의 값을 나타내고 경량콘크리트보에서는 1.22의 값을 나타내었다.

Berge<sup>(10)</sup>는 단위중량 1150kg/m<sup>3</sup>~1900kg/m<sup>3</sup>인 전단보강한 보와 보강하지 않은 경량콘크리트보의 전단실험을 수행하였다. BS8110규준에 의한 추정값에 대한 실험값의 비가 1.16~1.35(평균 1.23)의 값을 나타내었으며, 전단보강하지 않은 시험체에서는 보통콘크리트식에 대한 감소계수 0.8을 곱하는 것이 타당하다고 발표하였다.

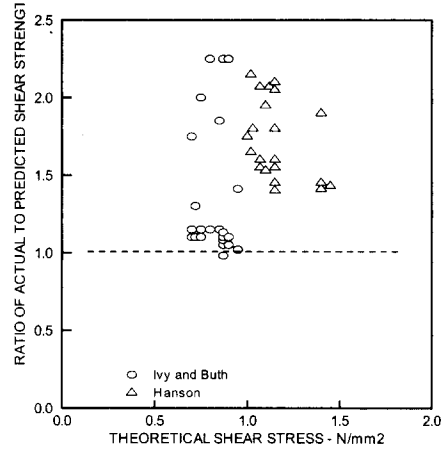


그림 1 Comparison of shear strengths with BS8110 predicted values.

표 1(a) Experimental results - Beams without shear reinforcement.

Beam specification	$f'_c$ , psi	ACI Eq. (11-3), kips	ACI Eq. (11-6), kips	Exp. $V_{cr}$ , kips	$V_{cr}$ exp/ACI Eq. (11-3)	$V_{cr}$ exp/ACI Eq. (11-6)
LR-0.52-NS	7960	4.0	12.0	10.5	2.63	
LR-1.56-NS	8200	4.1	4.5	8.5	2.07	1.89
LR-2.59-NS	8200	4.1	4.2	5.0	1.22	1.19
LR-3.56-NS	7960	4.1	4.1	4.5	1.13	1.10
HR-0.52-NS	10,200	4.5	13.5	20.0	4.44	
HR-1.56-NS	10,410	4.6	5.0	9.0	1.96	1.80
HR-2.59-NS	10,210	4.5	4.7	4.5	1.00	0.96
HR-3.63-NS	10,540	4.6	4.6	3.5	0.76	0.76

표 1(b) Experimental result - Beams with Shear reinforcement

Beam specification	$f'_c$ , psi	ACI Eq. (11-3), kips	ACI Eq. (11-6), kips	Exp. $V_{cr}$ , kips	$V_{cr}$ exp/ACI Eq. (11-3)	$V_{cr}$ exp/ACI Eq. (11-6)
LR-0.52-WS	7960	4.0	12.0	10.5	2.63	
LR-1.56-WS	8200	4.1	4.5	7.3	1.78	1.62
LR-2.59-WS	8200	4.1	4.2	4.7	1.15	1.12
LR-3.56-WS	7940	4.1	4.1	4.4	1.10	1.07
HR-0.52-WS	10,200	4.5	13.5	19.8	4.40	
HR-1.56-WS	10,410	4.6	5.0	7.6	1.65	1.52
HR-2.59-WS	10,210	4.5	4.7	4.0	0.89	0.85
HR-3.63-WS	10,540	4.6	4.6	3.5	0.76	0.76

Lambert<sup>(11)</sup>는 주철근비와 전단스팬비를 변수로 하여 경량 T형보의 전단실험을 하였으며, BS8110규준에 의한 추정값과 실험치를 비교한 것이 그림2에 나타나 있다.

보통콘크리트의 전단응력에 대한 ACI규준식과 BS8110규준식은 다음과 같다.

$$ACI\ 11-3 : v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$$

$$ACI\ 11-6 : v_c = 0.5\sqrt{f'_c} + 176\rho_w \frac{V_u d}{M_u}$$

BS 8110 :

$$v_c = 0.79(100A_s/b_v d)^{1/3} (400/d)^{1/4} (f_{cu}/25)^{1/3} / \gamma_m$$

경량콘크리트의 전단강도는 보통콘크리트의 전단강도에 0.85를 곱한값으로 ACI에서는 규정하고 있으며 BS규준에서는 0.8을 곱하는 것으로 규정되어 있다.

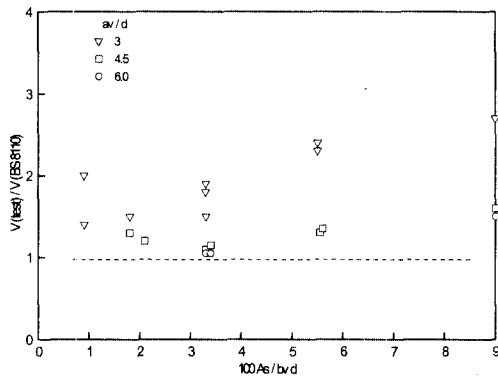


그림 2 Tests by Lambert

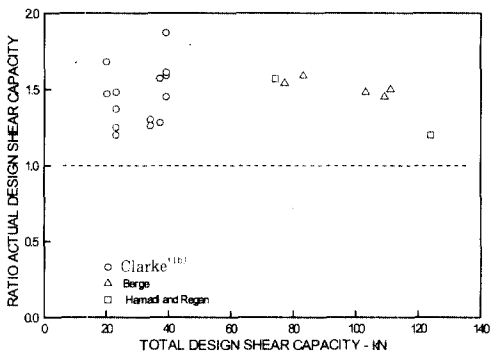


그림 3 Comparison with design shear capacity without 0.8 reduction factor.

표 2 Comparison of predicted and actual shear capacity of beams without links.

Beam No.	Shear capacity (kN)		Actual Predicted
	Predicted	Actual	
1B	19.4	35.2	1.81
2B	19.4	24.8	1.28
3B	19.4	25.0	1.29
4B	15.6	18.8	1.21
4B	15.6	20.3	1.30
5B	21.9	28.3	1.29
6B	21.9	28.8	1.32
9B	19.4	24.0	1.24
10B	19.4	24.3	1.25
P1B	19.4	25.0	1.29
P2B	19.4	23.6	1.22
P5B	19.4	20.0	1.03
P6B	19.4	35.6	1.84
P7B	21.9	24.8	1.13
P8B	21.9	25.0	1.14
PUM 1B	17.4	25.8	1.48
PUM 2B	18.4	27.5	1.49
PUM 3B	20.3	28.5	1.40
PUM 4B	17.2	21.2	1.23
PUM 6B	20.2	29.3	1.45

표 3 Comparison of predicted and actual shear capacity of beams with links.

Beam No.	Shear capacity (kN)		Actual Predicted
	Predicted	Actual	
5A	41.7	70.0	1.68
6A	41.7	62.3	1.49
9A	24.8	28.4	1.15
10A	24.8	35.2	1.42
P5A	24.8	30.0	1.21
P6A	24.8	32.8	1.32
P7A	41.7	63.3	1.52
P8A	41.7	57.4	1.38
PUM 1A	22.8	32.2	1.41
PUM 2A	38.2	44.8	1.17
PUM 3A	40.1	58.3	1.45
PUM 4A	22.6	36.3	1.61
PUM 5A	37.6	46.6	1.24
PUM6A	40.0	48.5	1.21
60	82.3	120	1.46
61	113.9	153	1.34
63	89.2	140	1.57
64	119.2	162	1.36
65	120.2	162	1.35
L2	95.7	118.5	1.24
L4	146.3	150	1.03

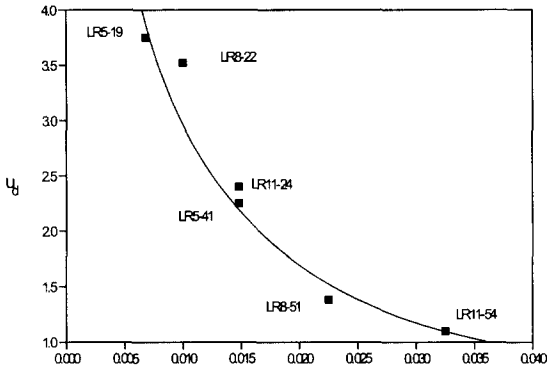


그림 4 Effect of the reinforcement ratio  $\rho$  on displacement ductility

한편, 1992년 日本建築學會<sup>(23)</sup>에서 발표된 고강도 인공경량골재 콘크리트를 이용한 건축물의 설계와 시공지침에 의하면, 적절히 전단보강된 경량콘크리트 보 및 고강도 철근을 이용한 경량콘크리트 보의 전단강도는, 기존의 보통콘크리트를 이용한 전단강도식과 같이 평가해도 된다는 결론을 도출하고 있다.

#### 4. 휨거동

Ahmad<sup>(19)</sup>는 고강도 경량콘크리트보의 휨거동에 관한 실험결과를 통하여 휨설계에 대한 현 ACI 규준식이 고강도 경량콘크리트에 대해서도 적합한지를 검토하였다. 이실험은 콘크리트 강도 ( $5,200\text{psi} < f'_c < 11,000\text{psi}$ )와 평형철근비에 대한 인장철근비 ( $0.18 < \rho/\rho_b < 0.54$ )를 변수로 하였으며, 실험결과 그림4와 같이 철근비가 증가할수록 연성은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나,  $\rho > 0.025$ 일 경우의 연성은 철근비의 증가에 비교적 영향을 적게 받는다.

또한 콘크리트강도가 증가할수록 연성은 감소하며, 이것은 콘크리트강도가 증가할수록 평형철근비가 증가하기 때문이다.

$\rho/\rho_b$ 가 일정할 때 연성은  $f'_c$ 의 증가에 따라 감소하며,  $\rho/\rho_b \geq 0.5$ 에서는  $f'_c$ 의 효과를 무시할 수 있음을 나타내었다. (그림5참조)

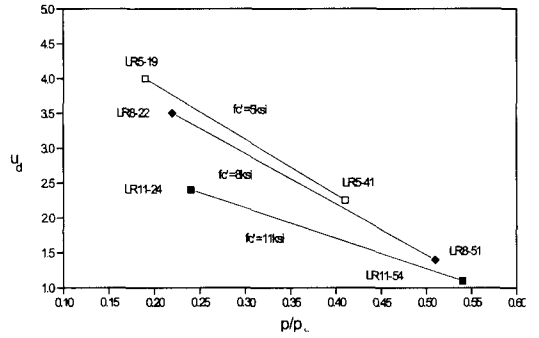


그림 5 Effect of the reinforcement ratio  $\rho/\rho_b$  on displacement

ACI규준식에 의한 휨강도와 실험값을 비교한 것이 표4이다. ACI추정값에 대한 실험값의 비율이 1.01~1.12로 나타났다. 실험결과  $f'_c$ 가 11,000psi를 넘지않고  $\rho/\rho_b$ 가 0.54를 넘지 않는 범위에서는 보통콘크리트에 대한 ACI등가응력블럭은 경량콘크리트에 대해서도 적합함을 나타내었다. 또한 Ahmad<sup>(20)</sup>는 콘크리트강도(6700psi  $< f'_c < 11060$  psi)와 평형철근비에 대한 인장철근비 ( $0.16 < \rho/\rho_b < 0.47$ )를 변수로 하여, 전단보강된 복근 고강도경량콘크리트보의 휨거동에 대하여 연구하였다.

실험결과 앞의 논문과 마찬가지로 연성의 감소는  $\rho < 0.025$ 일 때 가장 명확하고  $\rho > 0.025$ 일 때는 비교적 철근비의 증가에 영향을 받지 않는다. (그림6참조)

표 4 Measured and predicted values of the ultimate moment capacity

Beam	Mn(measured) ft-kips (N-m)	Mn (ACI) ft-kips (N-m)	Mn (measured) Mn (ACI)
LR5-19	21.98(29800)	19.60(26572)	1.121
LR5-41	36.88(50000)	33.53(45458)	1.100
LR8-22	33.19(45000)	30.23(40984)	1.098
LR8-51	54.08(73319)	51.10(69279)	1.058
LR11-24	43.02(58304)	42.50(57619)	1.012
LR11-54	72.52(98319)	70.94(96177)	1.022

$\rho/\rho_b$ 가 같을 경우는  $f'_c$ 가 증가할수록 연성변위는 감소하며, 또한 콘크리트강도가 같을 경우는

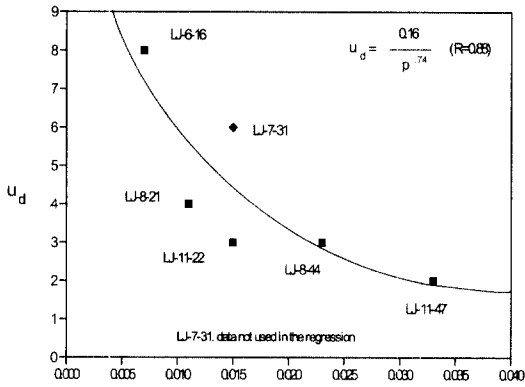


그림 6 Effect of the reinforcement ratio on displacement ductility

$\rho / \rho_b$ 가 클수록 연성변위는 감소한다(그림7참조).

극한 모멘트에 대한 ACI 추정값과 실험값을 비교한 것이 표5에 나타나 있다. ACI추정값에 대한 실험값의 비율이 1.2~1.46으로 나타났으며, 이것은 보통콘크리트에 대한 ACI 등가응력블럭이 고강도 경량콘크리트에 대해서도 적절히 적용됨을 나타낸 것이다.

또한  $\rho / \rho_b$ 가 0.54보다 적고 강도가 11,000psi를 초과하지 않는 경우에는 보통콘크리트에서의 극한변형도 0.003이 경량콘크리트에서도 적절함을 확인하였다.

日本建築學會의 경우도 이와 비슷한 결론을 도출 하고 있다.

## 5. 부착강도

Robins등<sup>(24)</sup>은 경량콘크리트의 부착거동에 있어서, 할열파괴강도는 보통콘크리트의 85~90%이고, 원통형의 전단파괴(Shearing failure)는 65%정도로 나타났다.

Berge등<sup>(10)</sup>은 인발시험을 통하여 경량콘크리트의 부착강도는 보통콘크리트값의 90%정도라고 발표하였다. Trinh등<sup>(12)</sup>은 경량콘크리트와 보통콘크리트의 부착실험을 통하여 부착강도는  $\sqrt{f'_c}$ 에 비례하고 경량콘크리트의 부착강도는 보통콘크리트의 약 85%라고 발표하였다. Riva등<sup>(6)</sup>은 5종류의 경량콘크리트시험체로 부착성능을 연구하였

는데 경량콘크리트의 부착강도는 보통콘크리트의 약 60%~115%로 변하는 것을 확인하였다.

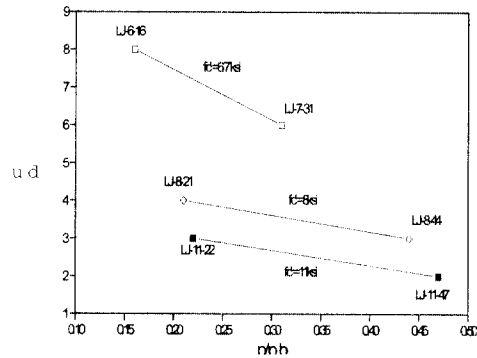


그림 7 Effect of the reinforcement ratio  $\rho / \rho_b$  on displacement ductility

표 5 Measured and predicted values of ultimate moment capacity

Beam	Mn (1), experimental kips-in.	Mn(2) ACI, kips-in.	Ratio (1)/(2)
LJ6-16	306.8	216.0	1.42
LJ7-31	531.0	361.9	1.46
LJ8-21	398.3	322.6	1.23
LJ8-44	634.3	530.3	1.20
LJ11-22	545.8	454.5	1.20
LJ11-47	885.0	734.0	1.20

龜田등은 고강도 전단보강근의 정착실험을 통하여 Hook정착의 경우 경량콘크리트는 보통콘크리트에 비해 15~19%정도 부착강도가 저하하므로, 정착길이는 보통콘크리트가 6d일 경우 경량콘크리트를 8d 이상으로 할 것을 발표하였다.

## 6. 응력-변형도 관계

Hanson<sup>(8)</sup>등은 고강도콘크리트의 응력-변형도특성에 대하여, 6500psi <  $f'_c$  < 14,850psi의 보통콘크리트와 3560psi <  $f'_c$  < 12,490psi의 경량콘크리트시험체를 가지고 실험하였다. 보통콘크리트와 경량콘크리트로 만든 공시체 실험에서 Hognessad등에 의해 정의된(그림8참조) 응력분포계수  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 값 및 탄성계수를 아래표6과 같이 구하였다.

그림8에서와 같이 강도설계에 필요한 3개의 응력-변형률 특성은  $k_1 k_3$ ,  $k_2/k_1 k_3$ ,  $\epsilon_u$ 이다. 이 값들을 콘크리트강도의 함수로서 나타낸 것이 아래 그림9 ~ 그림12에 나타나 있다.

그림9 에서와 같이 보통콘크리트의 경우에는  $\beta_1 = 0.65 \sim 0.85$ 이나 경량콘크리트의 경우에는 모든 강도에 대해  $\beta_1 = 0.65$ 로 제안하였다.

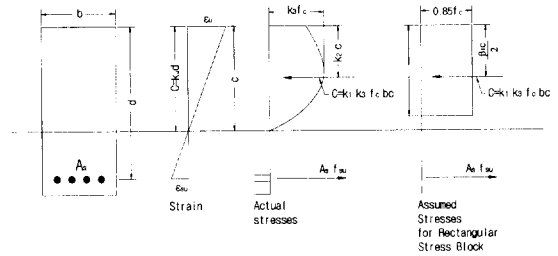


그림 8 Conditions at ultimate load.

표 6 Strength Factors-Lightweight Concrete

Specimen number	Cylinder strength, psi	$k_1 k_3$	$k_3$	$k_2 / k_1 k_3$	$\epsilon_u$	$k_1$	$k_2$	Modulus of elasticity	
								By compressometer test, ksi	By stress-strain curve, ksi
Lightweight Aggregate E and Elgin Sand									
E4	4,240	0.76	1.16	0.46	0.0024	0.66	0.35	2,810	3,230
E6	6,440	0.66	0.92	0.71	0.0052	0.61	0.47	3,130	3,140
E8	8,210	0.66	0.99	0.55	0.0038	0.67	0.36	3,330	4,000
E8P	8,450	0.57	0.84	0.81	0.0037	0.68	0.46	3,520	3,480
E10	11,330	0.61	1.06	0.54	0.0037	0.58	0.33	4,270	4,250
E12	12,490	0.47	0.75	0.79	0.0031	0.63	0.37	4,210	4,230
E12P	11,950	0.58	0.97	0.59	0.0036	0.60	0.34	3,930	4,360
Lightweight Aggregate C and Elgin Sand									
C4	3,630	0.77	1.03	0.56	0.0036	0.75	0.43	2,510	2,460
C4P	3,560	0.74	0.95	0.59	0.0051	0.77	0.44	2,270	2,560
C6	6,010	0.61	0.96	0.69	0.0035	0.64	0.42	2,820	2,710
C8	8,210	0.57	0.94	0.60	0.0030	0.61	0.34	3,290	3,460
C8P	8,150	0.56	0.96	0.68	0.0030	0.58	0.38	3,170	3,440
C10	9,570	0.61	1.06	0.56	0.0032	0.57	0.34	3,520	3,900
C12	9,680	0.64	1.20	0.61	0.0029	0.53	0.39	4,170	4,390
C12P	9,990	0.53	1.19	0.81	0.0029	0.45	0.43	4,230	4,890

Wang<sup>(7)</sup> 등은 압축을 받는 보통과 경량콘크리트의 응력-변형도곡선에 대해 연구하였다. 실험결과로부터의 보통콘크리트와 경량콘크리트의 응력-변형도곡선에서 보듯이 보통콘크리트의 경우는 최고점의 변형과 변곡점에서의 경우는 최고점의 변형과 변곡점에서의 변형이 압축강도의 증가와 함께 변하지 않는 반면 경량콘크리트의 경우는 압축강도의 증가와 함께 최고점에서의 변형이 선형점으로 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 경량콘크리트의 경우는 압축강도의 증가와 함께 최고점에서의 변형이 선형점으로 증가하는 것을 알 수 있다. 파괴이후 응력-변형도곡선의 기

울기가 보통콘크리트에 비해 매우 급하여 취성과 파괴의 성향을 나타냈다

Atan<sup>(5)</sup> 등은 2축압축을 받는 구조용경량콘크리트의 연구에서 경량콘크리트와 보통콘크리트의 파괴응력을 비교하였다.

모든 곡선들이 주응력비  $R(\sigma_2/\sigma_1) = 0.4 \sim 0.6$ 의 응력조합에서 25~30%의 최대강도증가를 나타냄을 알 수 있다. 또 2축에서 경량과 보통콘크리트의 파괴응력곡선의 형태는 일반적으로 유사함을 나타냈다.



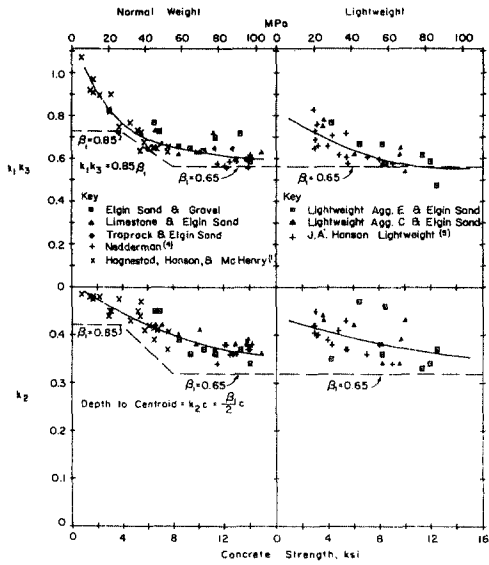


그림 9 Values of  $k_1k_3$  and  $k_2$  versus concrete strength

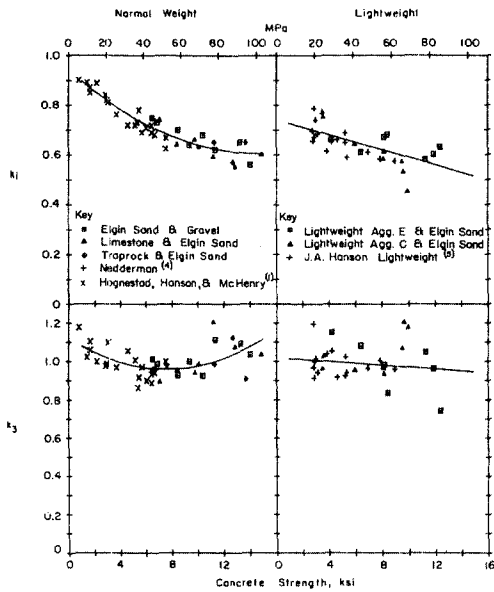


그림 11 Values of  $k_1$  and  $k_3$  versus concrete strength

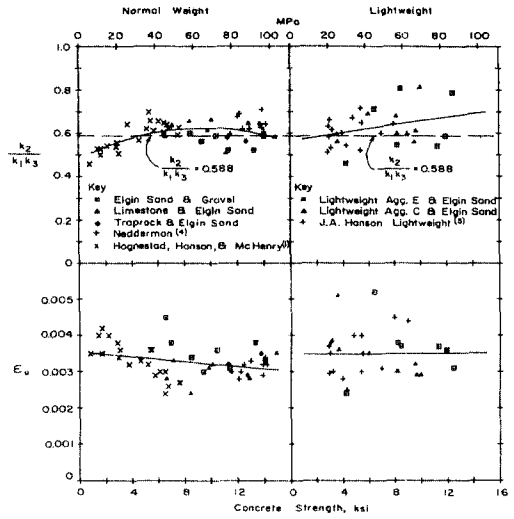


그림 10 Values of  $k_2/k_1k_3$  and  $\epsilon_u$  versus concrete strength

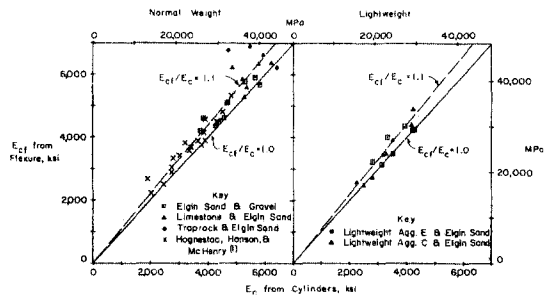


그림 12 Flexural versus compressive moduli of elasticity

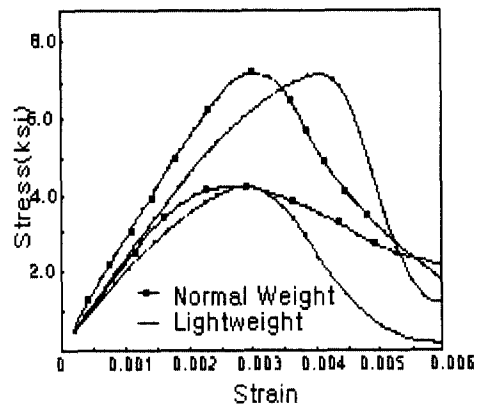


그림 13 Stress-strain curves for lightweight concrete

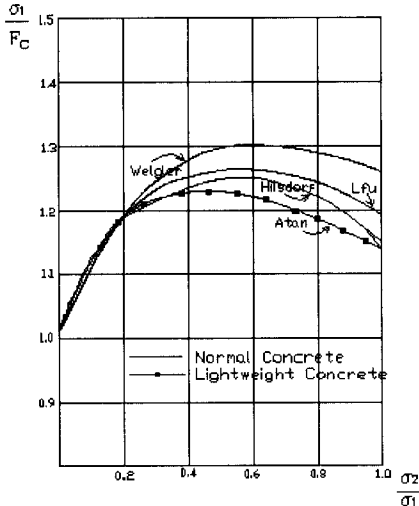


그림 14 Comparison of failure stress envelopes under biaxial compression obtained by various authors.

## 7. 결론

이상에서 보듯이 1950년대 후반부터 미국과 일본 및 유럽을 중심으로 구조용경량콘크리트에 대한 연구가 진행되어 왔다. 경량콘크리트를 구조용으로 사용하기 위한 연구가 얼마나 진행되었는가를 알기 위해 외국학자들에 의해 연구되었던 실험 결과등을 소개하였다. 경량콘크리트를 구조용으로 사용시 보통콘크리트에 대한 현행규준식에 일정치의 감소계수를 적용하므로서 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 우리나라의 경우에는 최근에야 구조용 경량콘크리트에 대한 구조적 특성에 관한 연구가 시작되고 있다. 그러나, 현재에는 수요미비로 인하여 구조용 경량골재로 사용할 만한 조골재도 없는 실정이다.

구조용 경량콘크리트의 우수한 장점을 이해하고 앞으로 더 많은 연구와 실제적용을 바라면서 글을 맺는다.

1. Shideler, J. J. "Lightweight-Aggregate Concrete for structural use", ACI Journal, V. 54, No. 4, Oct. 1997, pp.299 - 328.
2. Hanson, J. A., "Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams", ACI Journal , V. 55, No. 3, Sep. 1958, pp.387-403.
3. Hognestad, E., Elstner, R. C. and Hanson, J. A. "Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs", ACI Journal, V. 61, No. 6, June 1964, pp. 643-656.
4. Ivey, D. L. , and Buth, E. , "Shear Capacity of Lightweight Concrete Beam", ACI Journal, Vol. 64, No. 6, June 1964, pp. 643-656.
5. Atan, Y. and Slate, F. O. "Structural Lightweight Concrete under Biaxial Compression", ACI Journal, Vol. 70, No. 17, March 1973, pp. 182-186.
6. Riva G. , "Tests to determine the Bond between Concrete and Steel in Lightweight Reinforced Concrete", Industria Italiana del cemento, No. 5, May 1976, pp. 325-330.
7. Wang, P. T., Shah, S. P., Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression", ACI Journal , Vol. 75, No.11, Nov. 1978, pp. 603-613.
8. Kaar, P. H. : Hanson, N. W. : and Capell, H. T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete", Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete institute, Detroit, 1978, pp. 161-185.
9. Hamadi, Y. D. and Regan, P. E., "Behaviour of Normal and Lightweight Aggregate Beams with Shear Cracks", The Structural Engineer, V. 54B, No. 4, Dec 1980, pp. 71-79.
10. Berge, O., "Reinforced Structures and Behavior of Structural Lightweight (Lyttag/sand) Concrete", Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1981, pp. 373.
11. Lambert, G. H., Properties and Behavior of Structural Lightweight(Lyttag/sand) Concrete. PhD Thesis, Sheffield University, 1982.

12. Trinh J. and Arrieta F. J. , "Experimental Study of the Bond between Reinforcement and Lightweight Concrete", Annales de L'Inshitut Technique du Batiment et des Travaux Publics, No. 405, 1982, pp. 124-132.
13. 土木學會:人工輕量콘크리트設計施工マ ニュアル, 1985
14. 友澤史紀ほか2人:高強度輕量콘크리트造研究開發プロジェクト研究成果報告書1編, 1988.8
15. State. F. O. : Nilson. A. H. : and Martinez, Salvador, "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete", ACI Journal, V. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 606-613.
16. Clarke. J. L., "Shear Strength of Lightweight Aggregate Concrete Beams: Design to BS 8110", Magazine of Concrete Research, V. 39, No. 141, Dec. 1987, pp. 205-213.
17. 日本建築センター:高層壁式ラーメン鐵筋콘크리트造研究開發プロジェクト研究成果報告書1編, 1988.8
18. Ahmad. S. H. , and Salamdra. M. A. , "Shear Capacity of Reinforced Lightweight High Strength Concrete Beams", ACI Journal, Vol. 86, No. 6, Nov.-Dec. 1989, pp. 697-704.
19. Ahmad. S. H., and Barker Roy, "Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams", ACI Journal, V. 88, No. 1, Jan-Feb. 1991, pp. 69-77.
20. Ahmad. S. H. and Batts. J., "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement", ACI Journal, V. 88, No. 3, May-June, 1991, pp. 351-358.
21. Clarke. J. L., "Bond Strength Tests for Ribbed Bars in Lightweight Aggregate Concrete", Magazine of Concrete Research, V. 45, No. 163, 1993, pp. 79-87.
22. Hoff, G. C., "Observations on the Fatigue Behavior of High-Strength Lightweight Concrete", High-Performance Concrete, 1994, pp. 785-822.
23. 日本建築學會, 高強度人工輕量骨材콘크리트を用いた建築物の設計と施工 1992
24. Robins P. J. and Standish I. G. , "Effect of Lateral Pressure on Bond of Reinforcing Bars in Concrete", Bond in Concrete, 1982, pp. 262-272.
25. 박윤근, 신종렬, 권우현, 권기혁, 노희일, "경량고강도 콘크리트보의 전단거동에 관한 연구", 콘크리트학회지 제8권 4호, 1996. 8, pp. 149 - 159.
26. 박윤근, 권우현, 오창륜, 노희일, "전단보강이 없는 고강도 경량콘크리트보의 전단거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 제13권 제6호, 1997. 6, pp 255-266.
27. 박윤근, 오창륜, 김재식, "전단보강된 고강도경량콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 10권 1호, 1998. 5, pp. 513-518.
28. 박윤근, 이호경, "경량콘크리트보의 비선형유한요소 해석", 콘크리트학회지 제10권 3호, 1998. 6, pp. 219-226.
29. 박성무, 김진수, "고강도경량콘크리트보의 전단성능에 관한 실험적 연구" 대한건축학회논문집 제10권 제5호, 1994. 5, pp. 149-158.
30. 정헌수, 유영기, 배지윤, "고강도 경량콘크리트를 사용한 철근콘크리트부재의 전단 및 부착성상에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 제12권제12호, 1996. 12, pp.217-226.
31. 최명신, 김철환, 안중윤, 강훈, 이광수, 신성우, "고강도 경량철근콘크리트보의 전단거동 및 전단강도에 측에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제17권 2호, 1998. 4, pp. 1103-1110. 