

# 석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성

## Mechanical Properties of Reinforced High-Strength Concrete Using Fly-ash Artificial lightweight Aggregate

박완신*	한병찬*	성수용*	윤현도**	정수영**
Park, Wan-shin	Han, Byung-Chan	Sung, Soo-Young	Yun, Hyun-Do	Chung, Soo-Young

### Abstract

Concrete has excellent characteristics as building material and functions relatively well; but it has many problems concerning too heavy weight of the structures. Accordingly, it is the assignment for study in the part of building materials to lighten and high strengthen the weight of concrete structures in order to improve those weak points; and it seems one of the representative solutions to develop the high strength lightweight aggregate concrete.

Based on the experimental results presented, the following conclusions are drawn. The concrete with unit weight of 1.96~2.03t/m<sup>3</sup>, compressive strength of 322~431kgf/cm<sup>2</sup> was gained. So, it appears that the lightweight aggregate concrete will be useful for low unit weight and high strength lightweight aggregate concrete. In the end, to manufacture artificial lightweight aggregate concrete for construction work is necessary to develop artificial aggregate which has improved performances physically.

### 1. 서 론

최근 환경보호 차원의 일환으로 그린라운드협약 및 그린피스운동을 전개하는 등 환경오염물질을 줄이는데 국내외적으로 총력을 기울이는 현 시점에서 산업 폐기물의 재활용 및 실용화 방안에 관한 연구가 부각되고 있으며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 콘크리트는 경제성과 우수한 성능을 가지고 있음에도 불구하고 자중의 증대라는 기본적인 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 문제점을 개선하기 위해서는 콘크리트의 경량화가 시도되고 있으나, 경량화에 따른 강도 저하로 경량골재를 구조부재로 사용하려면 경량콘크리트의 고강도화가 필수적이다. 또한, 경량 콘크리트 사용시 경량골재는 일반적으로 흡수율이 크고 흡수시간에 의해서 흡수량이 다르기 때문에 24시간 이상 수중에 침수시켜 사용하도록 규정하고 있으나, 현실적으로 경량골재 콘크리트의 현장적용시 프리웨팅(rewetting)이 곤란하여 이에 대한 문제가 시급히 해결해야 할 실정이다<sup>1)2)</sup>. 그러므로 본 연구에서는 콘크리트 물 시멘

\* 정회원, 충남대 대학원 박사과정

\*\* 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

트비(0.40, 0.45, 0.50) 및 골재의 함수상태(표건, 기건, 절건)를 주변수로 하여 석탄회 인공경량골재(석탄회 경량 조골재 100%)를 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성과 시공성 변화(경사 Slump치 변화)를 규명함으로써 산업부산물인 석탄회 인공경량골재를 구조부재 제작을 위한 콘크리트에의 적용가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L에 규정된 보통포틀랜드 규격품으로서 화학적 성질은 표1과 같다.

표 1 시멘트의 화학성분

비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		강열감량 (%)	안전성	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결	종결			3일	7일	28일
3.15	3,200	4:50	7:05	-	양호	183	250	350

#### 2.1.2 골재

본 실험에 사용한 굵은 골재는 일본산 석탄회경량골재(전북익산 송학기업에서 수입)이고 세골재는 심척산 강모래를 사용하였으며 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 골재의 물리적 성질

골재	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	비중	흡수율 (%)	공극율 (%)	실적율 (%)	조립율 (%)
석탄회	850	1.36	23.5	38	62	6.46
강모래	1,590	2.65	1.01	37.89	62.11	2.64

#### 2.1.3 혼화재료

본 실험에서 사용한 혼화재료는 슬럼프 값 18±2cm를 얻기 위해 고성능 감수제를 사용하였으며 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제의 종류	유형	색상	주성분	고형분	독성	pH	비중
고성능감수제	액상	암갈색	Copolymer	41±1%	무	8-10	1.20±0.05

## 2.2 실험계획

본 실험의 배합조건은 단위시멘트량을 400kg/m<sup>3</sup>으로 고정시키고 물시멘트비를 40%, 45%, 50%로, 동일 물시멘트비 50%에서는 골재의 함수상태에 따라 표건, 기건, 절건상태를 주 변수로 계획하였으며 표 4와 같다.

표 4 실험인자

물시멘트비	S/a	골재의 함수상태	SP제 첨가량 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	절대용적배합 (l/m <sup>3</sup> )			단위중량배합 (kg/m <sup>3</sup> )		
					C	S	G	C	S	G
0.40	0.40	표건	0.3	160	127	285	428	400	756	582
0.45	0.40	표건	0.2	180	127	269	403	400	713	549
0.50	0.40	표건, 기건, 절건	0, 절건 (0.7)	200	127	253	380	400	671	517

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 실험결과

강모래와 석탄회 인공 경량골재를 사용한 고강도 경량콘크리트의 역학적인 성능을 규명하기 위하여 압축 및 쪼개인장강도 시험을 실시한 결과 표 5와 같은 시험결과를 얻었다.

표 5 시험결과

공시체	W/C (%)	S/A (%)	S.P. 제 혼입율 (%)	골재상태	중량배합(kg/m <sup>3</sup> )				슬럼프값 (cm)	단위용적중량 (t/m <sup>3</sup> )	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
					시멘트	물	조골재	세골재				
I-A-1	40	40	0.3	표건	400	160	549.18	713.40	18.2	2.01	280.6	27.8
I-A-4	40	40	0.3	표건	400	160	549.18	713.40	18.2	1.98	395.5	29.8
I-A-8	40	40	0.3	표건	400	160	549.18	713.40	18.2	2.01	405.7	30.6
I-B-1	45	40	0.2	표건	400	180	532.86	692.20	19.8	2.01	242.9	25.0
I-B-4	45	40	0.2	표건	400	180	532.86	692.20	19.8	2.00	379.1	27.7
I-B-8	45	40	0.2	표건	400	180	532.86	692.20	19.8	2.01	382.8	29.0
I-C-1	50	40	0.0	표건	400	200	516.54	671.00	18.6	1.97	189.6	21.0
I-C-4	50	40	0.0	표건	400	200	516.54	671.00	18.6	1.99	300.4	22.3
I-C-8	50	40	0.0	표건	400	200	516.54	671.00	18.6	1.97	321.7	28.1
II-C-1	50	40	0.0	기건	400	200	516.54	671.00	22.0	1.98	224.3	21.3
II-C-4	50	40	0.0	기건	400	200	516.54	671.00	22.0	2.00	322.6	29.5
II-C-8	50	40	0.0	기건	400	200	516.54	671.00	22.0	1.99	355.7	32.6
III-C-1	50	40	0.7	절건	400	200	516.54	671.00	18.4	1.99	335.9	26.8
III-C-4	50	40	0.7	절건	400	200	516.54	671.00	18.4	2.00	426.5	31.1
III-C-8	50	40	0.7	절건	400	200	516.54	671.00	18.4	1.98	431.0	33.5

#### 3.2 슬럼프

그림 1은 물시멘트비에 따른 슬럼프 경시변화를 나타낸 것으로 물시멘트비가 40%인 경우 슬럼프 값이 초기에 급격하게 감소하는 경향을 보이다가 30분 후에 다소 완만하게 감소하는 경향을 보였고, 45%인 경우에는 15분 경과 후에 슬럼프 값이 급격히 저하되는 현상을 보였으며 50%인 경우에는 초기부터 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 그림 2는 동일한 조건에서 함수상태에 따른 슬럼프값을 나타낸 것으로 표건, 기건상태에서는 유사한 경시변화를 보이고 있으나 골재의 습윤상태가 절건상태인 경우 골재의 습윤으로 인하여 급격히 슬럼프값이 감소하는 경향을 보였다.

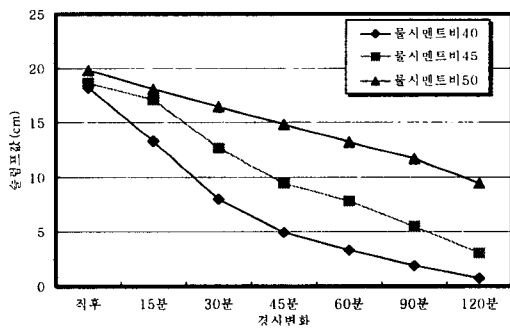


그림 1 물시멘트비별 슬럼프 경시변화

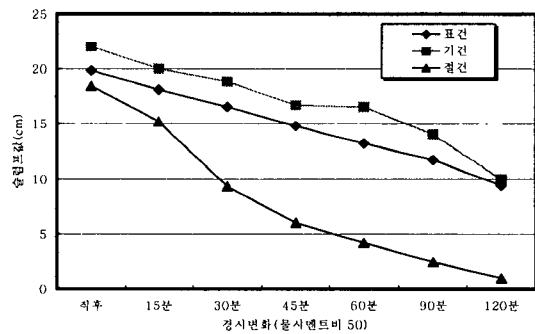


그림 2 골재의 습윤상태에 따른 슬럼프 경시변화

### 3.3 인장강도

본 실험의 경우, 석탄회 경량골재를 사용한 콘크리트의 인장강도는 21.0~33.5kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 나타내어 압축강도의 1/10~1/13로 보통콘크리트(1/9~1/15)와 대등한 결과를 보였다. 표 5에 나타난 바와 같이 물시멘트비가 감소함에 따라 인장강도가 증가하는 경향을 보였으나, 재령 56일에 이르러서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 동일한 조건에서 절건, 기건상태의 골재를 사용한 콘크리트가 표건상태의 콘크리트 보다 각각 19.2%, 16.01%의 강도증가 현상을 보여주었다. 이는 골재가 수분을 흡수함으로써 콘크리트내에 유효 물시멘트비가 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4 압축강도

본 실험의 경우 콘크리트의 압축강도는 물시멘트비 40%인 경우 평균 406kgf/cm<sup>2</sup>, 45%인 경우 평균 383kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 동일한 물시멘트비 50%인 경우 표건상태에서는 322kgf/cm<sup>2</sup>, 기건상태에서는 356kgf/cm<sup>2</sup>, 절건상태에서는 431kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타냈다. 그림 3은 재령에 따른 압축강도변화를 나타낸 것으로 재령 28일의 압축강도는 7일 강도의 약 41~59% 정도로 초기재령이 높은 경향을 보였고, 재령 56일 강도는 28일 강도보다 약 1.5~11.23%로 장기재령은 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 4는 동일한 조건에서 골재의 함수상태에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 절건, 기건상태의 콘크리트 압축강도가 표건상태의 콘크리트 강도보다 8주 강도에서 약 10~34%의 강도증가를 보였다.

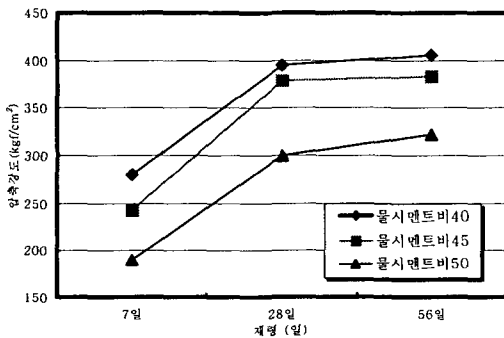


그림 3 재령일에 따른 압축강도

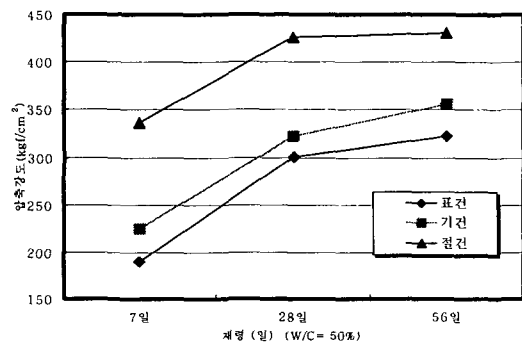


그림 4 재령일에 따른 압축강도

### 3.5 탄성계수

그림 5는 압축강도와 탄성계수와의 상관관계를 나타낸 것으로서 탄성계수는 압축강도 시험시 측정된 중량콘크리트의 용력-변형을 관계곡선상에서 할선탄성계수(원점과 0.5f<sub>ck</sub> 점을 이은 선분의 기울기)를 나타낸다. 그림에서 표현된 실선은 국내 콘크리트 구조설계기준에 명시된 경량콘크리트의 탄성계수 값이며, 파선은 물시멘트비에 따른 탄성계수 값의 평균치를 나타낸 것으로 석탄회를 사용한 경량콘크리트의 탄성계수가 대체적으로 규준식의 값보다 낮게 나타났으며 안전성에 대한 문제점을 내포하고 있어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.6 단위용적중량

본 실험의 경우 석탄회를 사용한 경량콘크리트의 단위용적중량은 1.96~2.03t/m<sup>3</sup>으로 나타났으며 이는 천연골재를 사용한 콘크리트(2.3t/m<sup>3</sup>)의 단위용적중량보다 작게 나타났다.

그림 6은 물시멘트비와 골재의 함수상태에 따른 단위용적중량을 나타낸 것으로 물시멘트비가 증가할수록

대체적으로 단위용적중량이 감소하는 현상이 나타났다. 물시멘트비가 50%이고 골재의 함수가 증가함에 따라 단위용적중량이 증대하는데 이는 골재와의 내부 함수상태의 차이가 원인이 것으로 판단된다. 즉 경량 골재자체가 다공질구조로 높은 흡수성이 있으며 일반골재의 경우 흡수한 수분은 골재의 내부로 흡수되어 콘크리트 혼합수로서 이용이 곤란할 뿐만 아니라, 일단 골재내부로 흡수된 수분은 외부로의 이동이 곤란하여 골재 자체의 내구성 저하와 함께 단위용적중량의 증대가 초래되기 때문으로 판단된다.

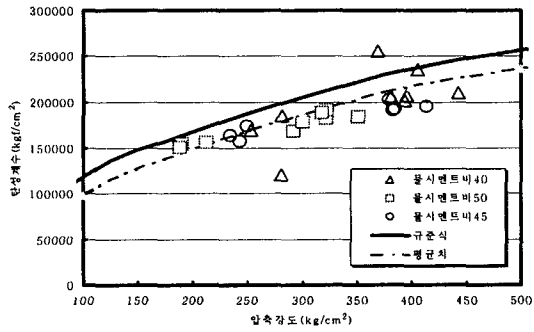


그림 5 콘크리트 탄성계수와 압축강도와의 관계

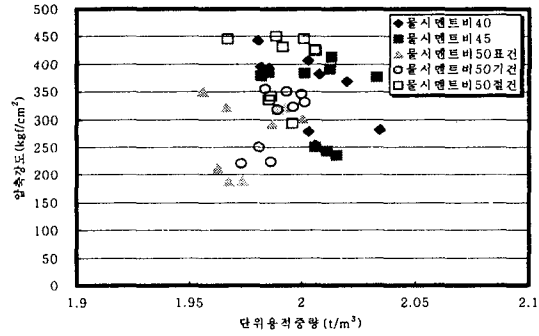


그림 6 콘크리트 압축강도와 단위용적중량

### 3.7 휨강도 (파괴계수)

그림 7, 8은 물시멘트비 및 골재함수상태에 따라 압축강도의 제곱근에 대한 휨강도를 무차원화한 값으로 물시멘트비가 0.45, 0.50에서는 실험값이 철근콘크리트 구조설계 기준식 값을 상회하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 조건에서 골재의 함수상태가 기건, 절건인 경우에 표건상태의 값보다 높게 나타났는데 이는 골재표면에 수분이 침투하여 골재와 페이스트의 부착력이 증대했기 때문으로 판단된다.

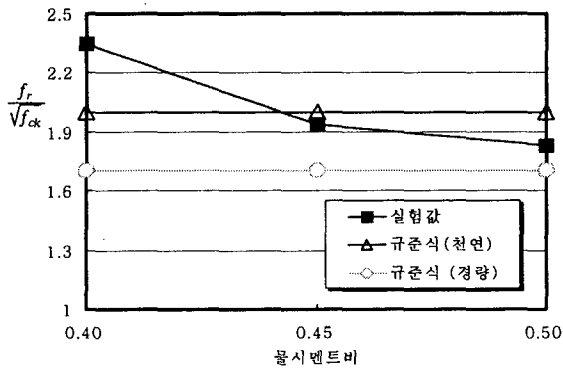


그림 7 변수별 무차원화한 휨강도 변화

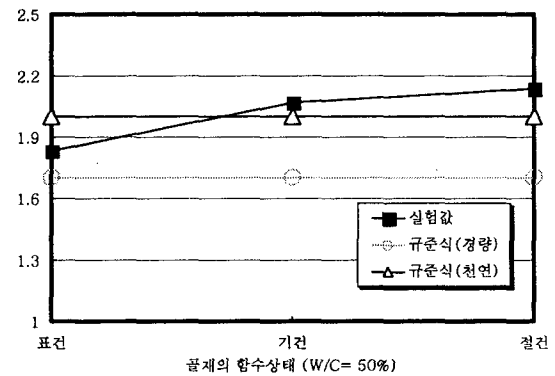


그림 8 변수별 무차원화한 휨강도 변화

### 3.8 전단강도

그림 9, 10은 물시멘트비 및 골재함수상태에 따라 콘크리트 압축강도의 제곱근에 대한 전단강도를 무차원화하여 계산된 값으로 모든 실험체에서 실험값이 극한강도 설계법에서 적용하는 기준식의 값을 상회하고 있어 이는 본 실험의 범위 안에서는 기존의 기준식보다 상당히 큰 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

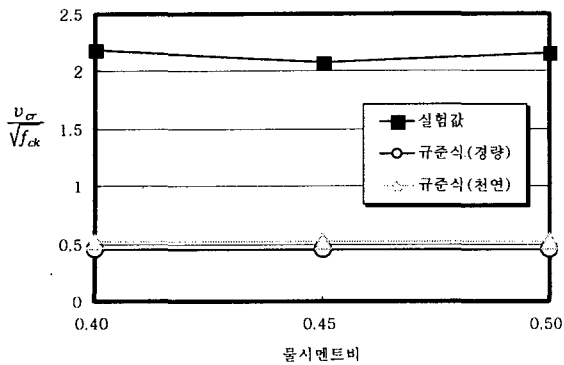


그림 9 변수별 무차원화한 전단강도 변화

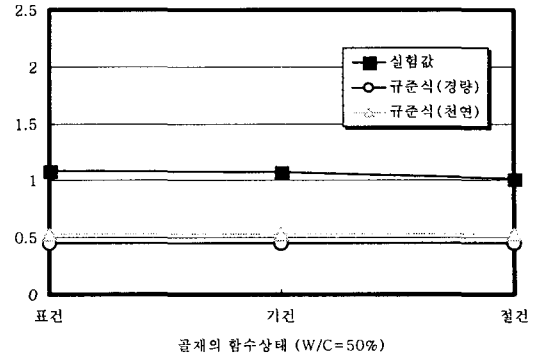


그림 10 변수별 무차원화한 전단강도 변화

## 5. 결론

석탄회 사용한 고강도 경량콘크리트의 역학적인 특성과 시공성변화(경시 Slump치 변화)를 규명하기 위하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 물시멘트비 40%에서는 고성능 감수제를 0.3%, 물시멘트비 45%에서는 0.2%, 물시멘트비 50%에서는 0%, 동일한 물시멘트비 50%인 경우 절건상태에서 0.7%로 혼입하여 현장에서의 적용 가능한 목표 슬럼프 값  $18 \pm 2\text{cm}$ 을 확보할 수 있었다.
- 2) 압축강도는 물 시멘트가 높을수록, 골재의 함수상태가 많을수록 압축강도가 감소현상이 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있었다.
- 3) 석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 경량콘크리트의 인장강도는  $21.0 \sim 33.5\text{kgf/cm}^2$ 으로 압축강도의  $1/10 \sim 1/13$ 로 보통콘크리트와 대등한 경향을 보이고 있었다.
- 4) 석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 경량콘크리트의 탄성계수는 기준식에 의해 과소평가되는 경향을 보였으며 안전성에 대한 문제점을 내포하고 있어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 경량콘크리트의 단위용적중량은  $1.96 \sim 2.03\text{t/m}^3$ 으로 이는 물시멘트비가 증가할수록 대체적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 동일한 조건에서 골재의 함수 상태에 따라 단위용적중량이 증대하는데 이는 골재와의 내부 함수상태의 차이가 원인이 된 것으로 판단된다.
- 6) 석탄회 인공경량골재 콘크리트의 휨 및 전단강도는 기준식보다 상회하고 있어 석탄회 인공경량골재 콘크리트에 적용 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Shideler, J.J "Lightweight-Aggregate Concrete for structural use". pp. 299-328
2. S. Mindess, J. F. Young, "Concrete", Prentice Hall, New Jersey, 1981, pp.581-599
3. Hongest, E. Elatner, R.C and Hanson, J .A "Shear Strenghtof Reinforced Structural Lightweight Reinforced Concrete Slab". ACI Journal. V. 61, No. 6. June 1964 pp.643-656
4. ACI Committee 213, "guide for Sturctural Lightweight Aggregate Concrete", ACI Journal, Aug. 1967, pp. 433-469