

# 페플라스틱과 고탄소 플라이애쉬 경량골재를 이용한 경량 콘크리트의 역학적 특성

## The Mechanical Properties of Lightweight Concrete Using the Lightweight Aggregate Made with Recycled-plastic and high carbon fly ash

조 병 완\*

박 승 국\*\*

Jo, Byung Wan

Park, Seung Kook

### ABSTRACT

Synthetic lightweight aggregates are manufactured with recycled plastic and fly ash with 12 percent carbon. Nominal maximum-size aggregates of 9.5mm were produced with fly ash contents of 0 percent, 35 percent, and 80 percent by total mass of the aggregate. An expanded clay lightweight aggregate and a normal-weight aggregate were used as comparison. Mechanical properties of the concrete determined included density, compressive strength, elastic modulus, and splitting tensile strength. Compressive and tensile strengths were lower for the synthetic aggregates; however, comparable fracture properties were obtained. Relatively low compressive modulus of elasticity was found for concretes with the synthetic lightweight aggregate, although high ductility was also obtained. As fly ash content of the synthetic lightweight aggregate increased, all properties of the concrete were improved.

### 1. 서론

최근 경량콘크리트의 사용이 증가에 따라 경량골재의 수요가 증가하고 있으나 이것은 천연자원의 고갈 및 환경파괴를 일으키고 고온 소성에 따른 비용 문제 등으로 구조용 콘크리트 골재로서 광범위하게 사용되지 못하고 있다. 따라서 이를 대체하기 위해 재활용율이 아직 까지 미비한 페플라스틱과 석탄회에 대한 연구가 이루어지고 있다. 폐기물의 재활용 기술은 기술적인 면보다 경제적인 면에 더 좌우된다. 페플라스틱의 재활용의 경우 분리, 세척, 변환, 재처리 비용은 재활용의 용도에 달려있으며, 이러한 분리, 세척의 과정이 최소화 된다면 플라스틱 재활용의 경제성은 매우 향상될 것이다. 또한 fly ash의 경우에도 현재와 같이 미연소 탄소와 기타 물질의 정제 과정을 생략하여 콘크리트 혼화재나 시멘트의 원료로서 부적절한 미연 탄소, 암모니아, 유황등을 함유한 high-carbon fly ash상태로 재활용 된다면 경제성이 매우 향상될 것이다.

본 연구에서는 기계적 재활용성이 좋고 별다른 세척 및 재처리 과정을 거치지 않은 페플라스틱과 석탄회의 정제 과정을 거치지 않아 콘크리트등의 혼화재로서 사용이 부적절한 high-carbon fly ash를 사용하여 경제적인 인공 합성경량골재(synthetic lightweight aggregate, 이하 SLA로 표기)를 제조하였으며, SLA의 특성과 SLA를 사용한 경량콘크리트의 파괴·역학적 특성 실험을 실시하였다.

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

보통 포틀랜드 시멘트와 ASTM C33의 조건을 만족하는 조립률 2.72의 자연산 강모래를 잔골재로 사용하였으며, fly ash는 강열감량 12%의 미연소탄소가 함유된 high-carbon fly ash를 사용하였다. 비중(Bulk Specific Gravity, BSG)과 흡수률(AC)은 각각 ASTM C127과 C128에 의하여 구하였으며 표1에 결과를 나타내었다. 골재는 최대 골재치수 9.5mm의 자연산 화강암의 보통중량 골재(이하, NCA로 표기)와, 팽창점도 경량골재(이하, ECLWA로 표기) 및 세가지 SLA를 사용하였다. SLA는 fly ash와 페플라스틱의 함량비를 0/100(이하, SLA(0/100)으로 표기), 35/65(이하, SLA(35/65)으로 표기), 80/20(이하, SLA(80/20)으로 표기)으로 하여 제조하였다.

표2. 배합비

표1. 골재 특성

Property	Aggregate					
	FA	NCA	ECLWA	SLA(0/100)	SLA(35/65)	SLA(80/20)
BSG	2.47	2.66	1.56	0.91	1.09	1.60
AC(%)	1.1	1.4	10.9	0.3	1.2	19.3

Properties	Mixtures					
	NCA	ECLWA	0/100	35/65	80/20	M
cement(kg/m <sup>3</sup> )	428	415	418	428	402	617
water(kg/m <sup>3</sup> )	208	221	227	219	195	300
coarse aggregate	786	441	275	318	515	-
fine aggregate	901	875	873	893	856	1300
density(kg/m <sup>3</sup> )	2323	1953	1792	1858	1969	2217
w/c	0.49	0.53	0.54	0.51	0.49	0.49
slump(mm)	76	64	89	76	64	- <sup>a</sup>

### 2.2 실험방법

골재에 따라 다섯 타입의 콘크리트와 한 개 타입의 모르타르를 제작하였다. 모든골재는 자연건조 상태에서 사용하였으며, 목표 슬럼프를 50~100mm로 하고 모든배합의 워커빌리티를 동일하게 유지하기 위하여 배합되는 동안에 배합물량을 조절하였다. 콘크리트와 모르타르에 대한 배합비와 물-시멘트비는 표2와 같다. 시험체는 ASTM C192에 준하여 배합하였으며 압축과 탄성계수 시험에 100x200mm 원주형 공시체를 할렬인장시험에 100x150mm 원주형 공시체를 사용하였다. 모든시험체는 상대습도 100% 조건하에서 24시간후 탈형 하였으며, 28일간 습윤양생을 실시하였다. 또한 압축강도, 탄성계수 및 포와슨비는 ASTM C39, C469에 따라 실시하였고 응력-변형을 곡선은 최대 응력점을 지날 때 까지 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 콘크리트의 밀도

경화된 콘크리트의 밀도는 ASTM C642에 의해 구하였으며 표2와 같다. SLA의 fly ash 함유량이 증가할수록 SLA와 SLA를 사용한 콘크리트의 밀도는 증가하였다. ECLWA와 SLA(80/20)의 비중은 비슷하였으며 이를 사용한 콘크리트의 밀도도 비슷한 것으로 나타났다. SLA(0/100)를 사용한 콘크리트만이 ACI에서 제시하는 경량콘크리트의 밀도 기준인 1850kg/m<sup>3</sup>보다 작은 값을 보였으며 ECLWA, SLA(35/65) 및 SLA(80/20)은 기준을 상회하는 값을 나타내었다. 사용된 천연 잔골재도 합성경량 잔골재로 대체된다면, 콘크리트의 밀도는 매우 감소할 것이며 구조용 경량 콘크리트로서의 요구 밀도를 만족할 것으로 예상된다.

### 3.2 강도 특성

그림 1은 각 배합 변수에 대한 콘크리트 응력대 축방향 및 횡방향 변형률을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 SLA

에서 fly ash량이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도와 최대 하중에서 축방향과 횡방향 변형률 역시 증가함을 알 수 있다. 압축강도만을 고려시 SLA(0/100)과 SLA(35/65)를 사용한 콘크리트는 ACI의 경량구조 콘크리트는 28일 최소 강도 기준인 17.2MPa<sup>(3)</sup>에 미치지 못하고 있으나 물-시멘트비의 조정등 배합비의 조정으로써 ACI의 최소 요구강도를 충분히 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 압축 탄성계수 역시 골재속의 fly ash 함량이 증가함에 따라 증가하였다. ACI의 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ ) 식은 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

$$E_c = K_E W_c^{3/2} \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

여기서,  $W_c$  : 경화된 콘크리트의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $K_E$  : 0.043 MPa<sup>1/2</sup>/(kg/m<sup>3</sup>)<sup>3/2</sup>

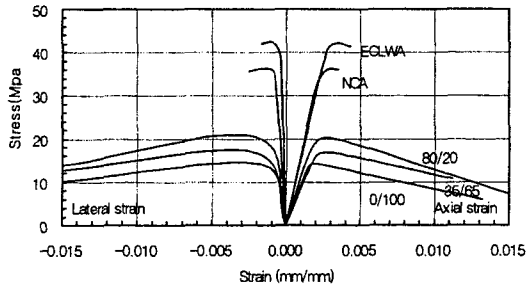


그림. 1 응력-축방향, 횡방향 변형률 곡선

표 3. 압축 및 할렬 인장 강도 시험 결과

Property	Mixtures					
	NCA	ECLWA	0/100	35/65	80/20	M
$f'_c$ (MPa)	35.5±1.0	42.5±0.4	14.2±0.5	16.7±0.6	20.1±0.2	38.3±0.6
$E_c$ (GPa)	21.8±0.1	22.1±0.2	12.6±0.8	13.0±0.3	14.4±0.5	26.3±0.0
$K_E$ (MPa <sup>1/2</sup> /(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>3/2</sup> )	0.033	0.039	0.044	0.040	0.037	0.041
$E_a$ (GPa)	14.3	15.0	3.7	3.9	4.8	-
$\nu$	0.20±0.01	0.20±0.01	0.26±0.00	0.24±0.01	0.24±0.01	0.21±0.01
$\epsilon_{uo}$ (%)	2624±3	2119±241	2091±65	2801±163	2742±86	2873±149
$\epsilon_{lo}$ (%)	-1734±303	-635±110	-1731±120	-2022±127	-2098±90	-1235±262
$\epsilon_{vo}$ (%)	-844±602	-848±22	-1370±265	-1244±91	-1454±111	-403±382
$f_{sp}$ (MPa)	3.4±0.3	4.4±0.0	2.1±0.1	2.4±0.1	2.5±0.1	-
$K_{sp}$ (MPa <sup>1/2</sup> )	0.57	0.67	0.56	0.59	0.56	-

$K_E$ 는 측정된 탄성계수, 밀도 압축강도로부터 각 콘크리트의 배합에 대해 계산할 수 있으며 표3과 같은 값을 나타내었다. 굵은골재의 탄성계수( $E_a$ )를 결정하기 위해서 Hirsch-Dougil 모델을 적용하였다.<sup>(4)</sup> Hirsch-Dougil 모델은 콘크리트를 모르타르와 굵은골재의 두가지 탄성 구성요소로 구분하고 있는 모델이며 다음 식으로 부터 NCA, ECLWA와 SLA의 탄성계수를 결정하였다.

$$\frac{1}{E_c} = X \left( \frac{1}{V_m E_m + V_a E_a} \right) + (1-X) \left( \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_a}{E_a} \right) \quad (4)$$

여기서,  $E_m$ ,  $E_a$  : 모르타르와 골재의 탄성계수

$X$  : 0.50(등방성으로 가정시)

$V_m$ ,  $V_a$  : 모르타르와 골재의 volume fraction = 0.7, 0.3

모르타르 공시체로 부터 구한  $E_m=26.3\text{GPa}$ 을 이용하여 5가지 골재에 대한 탄성계수  $E_a$ 를 계산하였고 표3에 나타내었다. 결과에서 보듯이 SLA가 NCA와 ECLWA 보다 현저히 낮은 탄성계수를 나타내고 있으며 SLA에서 fly ash의 함량이 증가함에 따라 탄성 계수도 증가하였다. 골재의 경우 일반적으로 프아송비가 0.3~0.4 이고 골재 제조에 사용된 HDPE는 0.2~0.3으로<sup>6)</sup> SLA를 사용한 콘크리트 보다 NCA와 ECLWA의 콘크리트가 더 높은 프아송비를 가져야 하나 SLA를 사용한 콘크리트의 프아송비가 더 큰 것으로 나타났다. SLA를 사용한 콘크리트의 프아송비는 SLA(0/100)가 가장 컸으며 fly ash 함량이 증가함에 따라 감소하였고 이는 모든 변수의 콘크리트가 균질하게 배합된 것을 의미한다. 골재와 매트릭스간의 결합력이 부족할 경우 재하 하중방향과 평행하게 골재와 매트릭스 사이에 분리가 일어나며 횡방향 변형률과 프아송비가 증가하게 된다. 이에 비추어 SLA는 매트릭스와의 결합이 약해지며 SLA의 fly ash 함량이 적을수록 그 결합이 약해짐을 알 수 있다. 할렐 인장 실험결과 NCA, ECLWA 및 SLA(80/20)를 사용한 콘크리트의 경우 골재의 파괴가 나타났으나 SLA(0/100)과 SLA(35/65)의 배합에서는 골재의 파괴보다는 골재와 모르타르사이 계면에서의 파괴가 주로 관찰되었다. 이는 NCA, ECLWA, SLA(80/20) 골재가 SLA(0/100)과 SLA(35/65)보다 표면의 조직이 거칠고,  $E_a$ 값이 크며 낮은 인성을 가지기 때문에 더 양호한 부착을 가지므로 골재와 모르타르 부착력이 인발에 저항하기에 충분하여 골재의 파괴를 유발하는 것으로 생각된다. 할렐 인장강도  $f_{sp}$ 는 표3에 나타내었다.

#### 4. 결론

- (1) 제조된 합성경량골재를 사용한 경량 콘크리트의 강도가 같은 배합의 일반적인 경량골재를 사용한 경량 콘크리트와 보통골재를 사용한 콘크리트와 비교시 낮은 강도와 탄성계수를 가졌으나 합성경량골재로써 경량콘크리트가 제조 될 수 있음을 확인 하였다.
- (2) 합성경량골재의 fly ash의 함량이 증가할수록 합성경량 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 탄성 계수 등이 모두 향상되었으며 골재와 모르타르의 부착력도 fly ash 함량이 증가함에 따라 증가되었다.
- (3) 합성경량골재는 도로 포장, 흙막이 구조물, 저강도 콘크리트 구조물 등에 사용할 수 있을 것이며, 낮은 탄성 계수는 포장의 연성을 증가시켜 균열의 감소 및 건조수축에 의한 구속응력을 감소시킬 것으로 판단된다
- (4) 합성경량골재 콘크리트의 내화와 장기간 안정성 및 골재의 내구성 등의 더 많은 특성에 대한 연구가 수행되어야 할 것이며, 다른 타입의 페플라스틱과 더 많은 탄소와 황, 암모니아 등을 함유하는 fly ash를 혼합한 합성경량골재의 제조 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Kowalsky, M. J., M. J. N. Priestly, and F. Seible. Dynamic Behavior of Lightweight Concrete Bridges. *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No.4, July-Aug. 2000, pp. 602-618.
2. ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995.
3. ACI Committee 213. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. In *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1998.
4. Hirsch, T. J. Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate. *ACI Journal*, Proceedings Vol. 57, No.3, Mar. 1962, pp. 427-451.
5. Malloy, R. *Plastic Part Design*. Hanser Publishers, Munich, Germany, 1994.