

## 합성경량골재(SLA)를 사용한 경량콘크리트의 파괴, 역학적 특성 및 내구성

조병완<sup>1)\*</sup> · 박승국<sup>1)</sup> · 박종빈<sup>1)</sup> · 데니엘 C. 젠슨<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 캘리포니아 폴리테크닉 주립대학교 토목환경공학과

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 10월 30일 심사완료)

### The Fractural-Mechanical Properties and Durability of Lightweight Concrete Using the Synthetic Lightweight Aggregate

Jo, Byung-Wan<sup>1)</sup>, Park, Seung-Kook<sup>1)</sup>, Park, Jong-Bin<sup>1)</sup>, and Daniel C. Jansen<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Civil and Environment Engineering, California Polytechnic State University

(Received February 5, 2004, Accepted October 30, 2004)

#### ABSTRACT

Recycling of waste materials in the construction industry is a useful method that can cope with an environment restriction of every country. In this study, 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, 35, and 80% by the total mass of the aggregate. An expanded clay lightweight aggregate and a normal-weight aggregate were used as comparison. Gradation, density, and absorption capacity are reported for the aggregates. Five batches of concrete were made with the different coarse aggregate types. Mechanical properties of the concrete were determined including density, compressive strength, elastic modulus, splitting tensile strength, fracture toughness, and fracture energy. Salt-scaling resistance, a concrete durability property, was also examined. 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. Excellent salt-scaling resistance was obtained with the synthetic lightweight aggregate containing 80 percent fly ash.

**Keywords :** synthetic lightweight aggregate, fly ash, recycled plastic, mechanical property, fracture properties

#### 1. 서 론

경량콘크리트는 건축물의 대형화 추세와 교량 구조물에서의 사용증가에 따라 사용이 늘어가고 있으며, 이에 따른 경량골재의 수요가 증가하고 있다. 경량골재는 일반골재에 비하여 자중의 감소효과, 높은 단열성 및 방음성등의 높은 물리적 특성으로 콘크리트에 사용시 매우 유용한 장점이 있다. 그러나 수요증가에 따른 천연자원의 고갈 및 환경과 파괴를 일으키고 있으며, 현재 암석과 광물의 고온소성에 의해 생산되는 일반적인 경량골재는 고에너지 투입에 따른 낮은 경제성, 골재의 저장도와 고풍수율에 의한 낮은 품질 등의 이유로 구조용 콘크리트 골재로서 건설현장 전반에서 광범위하게 사용되지 못하고 있다. 따라서 다양한 방법

의 연구가 이루어지고 있으며 더불어, 폐플라스틱, 석탄회 등과 같은 폐기물을 이용한 건설소재 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐플라스틱의 경우 2000년에 320만톤이 발생하였으나, 매립 88.1%, 소각 10.6%으로 처리하고 있으며 단지 1.3%를 재활용하고 있어 재활용률이 매우 낮다. 석탄회의 경우 2000년도에 약 440만톤이 발생하였고, 콘크리트 및 시멘트 생산 등에 사용이 증가 추세에 있으나, 석탄회의 미연소된 탄소와, 암모니아, 유황등과 같은 혼합물을 제거하여 사용하고 있으며, 현재 미국에서는 산화질소(NOx)의 방출을 엄격히 규제하는 1990년 Clean Air Act Amendment에 의해, 불완전 연소된 탄소, 암모니아, 유황 혼합물을 포함하는 석탄 연소 부산물은 더 높은 환경 규제를 따르도록 하고 있다<sup>3)</sup>. 폐기물의 재활용 기술은 기술적인 면보다 경제적인 면에 더 좌우된다. 폐플라스틱의 재활용의 경우 분리, 세척, 변환, 재처리 비용은 재활용의 용

\* Corresponding author

E-mail : joycon@hanmail.net

©2005 by Korea Concrete Institute

도에 달려있으며, 이러한 분리, 세척의 과정이 최소화된다면 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 폐플라스틱과 석탄회의 정제 과정을 거치지 않아 콘크리트등의 혼화재로서 사용이 부적절한 high-carbon fly ash를 사용하여 경제적인 인공 합성 경량골재(synthetic lightweight aggregate, 이하 SLA로 표기)를 제조하였으며, SLA의 특성과 SLA를 사용한 경량콘크리트의 파괴·역학적 특성과 내구성 실험을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

보통 포틀랜드시멘트와 ASTM C33의 조건을 만족하는 조립물 2.72의 자연산 강모래를 잔골재로 사용하였으며, fly ash는 강열감량 12%의 미연소탄소가 함유된 high-carbon fly ash를 사용하였다. 밀도(Bulk Density, BD)와 흡수율(AR)은 각각 ASTM C127과 C128에 의하여 구하였으며 Table 1에 결과를 나타내었다. 골재는 최대 골재치수 9.5mm의 자연산 화강암의 보통중량 골재(이하, NCA로 표기)와, 팽창점토 경량골재(이하, ECLWA로 표기) 및 세가지 SLA를 사용하였다. SLA는 fly ash와 폐플라스틱의 질량비를 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. SLA는 열에 의해 용융된 폐플라스틱과 fly ash를 두 개의 스크류를 가진 압출기로 성형한 뒤 수조속으로 압출하여 냉각후 분쇄기에 의해 제조하였다. SLA(0/100)과 SLA(35/65)와 같이 fly ash 함량이 적은 SLA는 더 각진 입형을 나타냈으며, 플라스틱의 연성에 의해 부드러운 곡선의 표면을 나타내었다. 80%의 fly ash가 혼입된 SLA(80/20)의 경우 압출후 절단기에 의해 잘려지기 보다 깨지는 것이 더 많았고 내부의 작은 공극이 많았으며 상대적으로 모서리가 둥글고 표면조각이 거친 것으로 나타났다. 굵은 골재인 NCA, ECLWA 및

SLA(0/100)는 ASTM C33의 입도조건을 만족하였으며, SLA(35/65)과 SLA(80/20)은 파쇄시 미립자의 함량이 높았으나 ASTM C33의 입도조건을 만족시키기 위하여 체에 의해 입도를 조정하였다. Table 1에서 보듯이, SLA(80/20)에서 가장 높은 흡수율이 나타난 것은 골재내의 갭 공간과 높은 공극률에 의한 것으로 판단되며, 높은 흡수율에 비하여 fly ash의 밀도가 폐플라스틱 보다 크기 때문에 fly ash의 함량이 증가할수록 SLA의 밀도는 증가하였다. SLA(80/20)의 밀도는 ECLWA와 비슷한 값을 나타내었다.

### 2.2 실험체의 배합과 제작

골재에 따라 5종류의 콘크리트와 1종류의 모르타르를 제작하였다. 모든 골재는 자연건조 상태에서 사용하였으며, NCA는 자연산 보통중량의 굵은골재를 사용하였고 ECLWA, SLA(0/100), SLA(35/65) 및 SLA(80/20)는 NCA와 동일한 용적비로 사용하였다. M(모르타르) 타입의 배합은 굵은골재를 사용하지 않은 것을 제외하고는 NCA와 동일한 배합비로 하였다. 모든 타입의 콘크리트에 대해 시멘트와 잔골재의 중량비는 동일하였고 굵은골재의 부피비는 0.30을 유지하였다. 목표 슬럼프를 50~100mm로 하고 모든 배합의 워커빌리티를 동일하게 유지하지 위하여 배합되는 동안에 단위수량을 조정하였다. 콘크리트와 모르타르에 대한 배합비와 물-시멘트비는 Table 2와 같다. 시험체는 ASTM C192에 준하여 배합하였으며, 압축과 탄성계수 시험 및 할렬인장시험에  $\Phi 100 \times 200$  mm 원주형 공시체를 사용하였고, 파괴시험에는 560x130x50 mm의 보시험체를, 표면박리 저항성(salt scaling resistance) 시험에는 200x250x90 mm의 시험체를 사용하였다. 모든 시험체는 상대습도 100% 조건하에서 24시간후 탈형 하였으며, 28일간 습윤양생을 실시하였다.

### 2.3 실험방법

ASTM C39, C469에 따라  $\Phi 100 \times 200$  mm 크기의 공시체로 압축강도, 탄성계수 및 푸아송비를 측정하였으며 응력-변형률 곡선의 최대 응력점을 지날 때 까지 측정하였다. 할렬인장강도는 ASTM C496에 따라  $\Phi 100 \times 200$  mm 크기의 공시체로 제작하여 시험하였다.

휨파괴시험체는 시험전에, 휨시험체 가운데 아랫부분에 다이아몬드날을 사용하여 40mm 길이의 노치를 미리 만들었으며 Jenq-Shah의 two-parameter 파괴모델<sup>7)</sup>의 RILEM 실험 절차에 따라 시험하였다. 파괴특성 평가에 사용된 콘크리트 비선형 파괴모델은 임계 응력확대계수  $K_{IC}$ 와 임계 균열선단 개구변위  $CTOD_c$ 의 이 두가지 파괴인자로서 콘크리트의 비선형 파괴특성을 규명할 수 있는 Jenq-Shah의 two-parameter 모델을 사용하였다<sup>8)</sup>.

**Table 1** Aggregate properties

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

파괴시험은 Fig. 1와 같이 3점 재하 시험을 하였고 휨 시험체 노치(notch) 개구부의 면에 클립게이지를 설치하여 균열선단 개구변위(CMOD)를 측정하였다. 하중 재하속도는 CMOD 기준으로 최대 하중까지 0.024 mm/min가 되도록 재하하였으며 최대하중 이후 보시형체 최대 강도의 95% 시점에서 하중을 제거하였다. ECLWA와 SLA(80/20)의 하중-CMOD의 그래프는 Fig. 1과 같다. 휨 파괴 시험으로 부터의 측정된 초기 컴플라이언스  $C_i$ 를 이용하여 탄성계수  $E_{cf}$ 를 구하였고  $C_i$ 는 탄성하중 범위에서의 단위하중당 CMOD변화량을 의미한다. 임계균열길이  $a_c$ 는 최대 강도 이후 하중 제거시의 단위하중당 CMOD의 변화를 의미하는 하중제거 컴플라이언스  $C_u$ 를 측정후 이 값을 사용하여 구하였다.  $a_c$ 와 최대하중  $P_{max}$ 를 사용하여  $K_{IC}$ 와  $CTOD_c$ 를 구할 수 있었으며  $E_{cf}$ ,  $a_c$ ,  $K_{IC}$  및  $CTOD_c$ 를 구하기 위하여 사용한 방정식은 RILEM 위원회와 Jenq-Shah의 two-parameter 모델에서 제시된 방정식을 사용하였다<sup>7,8)</sup>. 또한 파괴에너지와 인장강도  $f_t$ 도 Jenq-Shah의 모델에 의해 식(1)~(2)와 같이 구하였다.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}}{E_{cf}} \quad (1)$$

$$f_t = 1.4705 \frac{K_{IC}^2}{E_{cf}(CTOD_c)} \quad (2)$$

본 연구에서 사용된 골재별 콘크리트 표면의 제빙염과 동결융해에 의한 표면박리 저항성을 측정하기 위하여 ASTM C672에 따라 표면박리 저항성 시험을 실시하였다. 시험체를 염화칼슘 수용액에 침지시킨채로 매 5사이클 마다 외관조사 및 표면에서 박리되는 콘크리트량을 측정하였다. 표면에서 박리된 콘크리트는 75 $\mu$ m크기의 체로 걸러 건조시킨 후 중량을 확인하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 콘크리트의 밀도

경화된 콘크리트의 밀도는 ASTM C642에 의해 구하였으며 Table 2와 같다. SLA의 fly ash 함유량이 증가할수록 SLA와 SLA를 사용한 콘크리트의 밀도는 증가하였다. ECLWA와 SLA(80/20)의 밀도는 비슷하였으며 이를 사용한 콘크리트의 밀도도 비슷한 것으로 나타났다. SLA (0/100)를 사용한 콘크리트만이 ACI에서 제시하는 경량콘크리트의 밀도 기준인 1850 kg/m<sup>3</sup>보다<sup>9)</sup> 작은 값을 보였으며 ECLWA, SLA(35/65) 및 SLA(80/20)은 기준을 상회하는 값을 나타내었다. 사용된 천연 잔골재도 합성경량 잔골재로 대체된다면, 콘크리트의 밀도는 상당히 감소할 것이며 구조용 경량 콘크리트로서의 요구 밀도를 만족할 것으로 예상된다.

Table 2 Mix proportions

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 (kg/m <sup>3</sup> )	786	441	275	318	515	-
Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	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	-

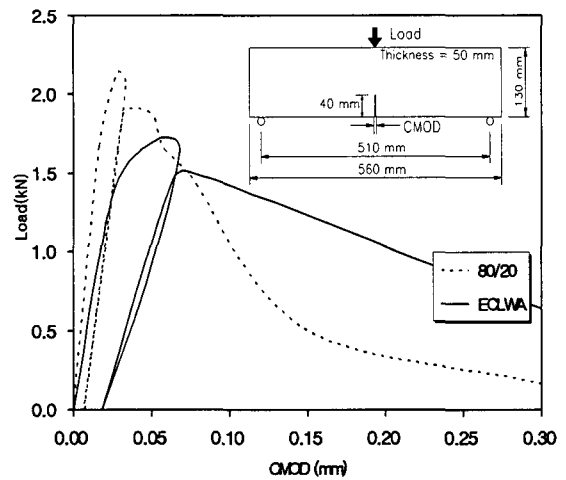


Fig. 1 Load versus CMOD for batches ECLWA and SLA(80/20)

#### 3.2 강도 특성

Fig. 2는 각 배합 변수에 대한 콘크리트 응력 대 축방향 및 횡방향 변형률을 나타내며 SLA에서 fly ash량이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도와 최대하중에서 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>9)</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 함유량이 증가함에 따라 증가하였다. ACI의 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ ) 식은 다음과 같다<sup>10)</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>

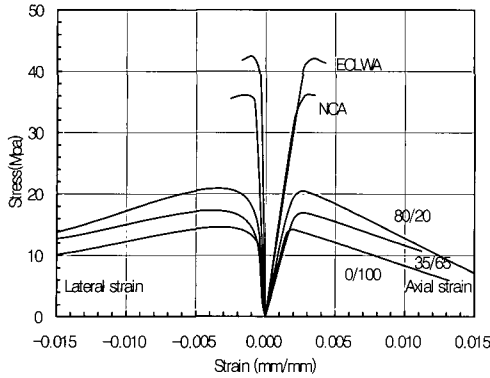


Fig. 2 Compressive stress versus axial and lateral strain

$K_E$ 는 측정된 탄성계수, 밀도, 압축강도로부터 각 콘크리트의 배합에 대해 계산할 수 있으며 Table 3과 같은 값을 나타내었다.  $K_E$  값은 NCA를 제외하고는 ACI의 권장값과 비슷하였다. NCA를 사용한 콘크리트의 압축강도가 ECLWA 보다 낮았고 탄성계수 역시 낮은 값을 나타내었다. 가장 주목할만한 결과는 Fig. 2에서 보듯이 SLA(0/100), SLA (35/65), SLA(80/20)의 낮은 압축강도에 동반되는 연성거동이며 각각의 최대하중의 약 50% 지점에서 약 1~2%의 변형률을 얻을 수 있었다. 굵은골재의 탄성계수( $E_a$ )를 결정하기 위해서 Hirsch-Dougil 모델을 적용하였다<sup>11)</sup>. Hirsch-Dougil 모델은 콘크리트를 모르타르와 굵은골재의 두가지 탄성 구성요소로 구분하고 있는 모델이며 다음 식으로부터 NCA, ECLWA와 SLA의 탄성계수를 결정하였다.

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

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 공시체로부터 구한  $E_m=26.3$  GPa을 이용하여 5가지 골재에 대한 탄성계수  $E_a$ 를 계산하였고 Table 3에 나타내었다. 결과에서 보듯이 SLA가 NCA와 ECLWA 보다 현저히 낮은 탄성계수를 나타내고 있으며 SLA에서 fly ash의 함량이 증가함에 따라 탄성계수도 증가하였다. 골재의 경우 일반적으로 푸아송비가 0.3~0.4 이고 골재 제조에 사용된 HDPE(High Density Polyethylene)는 0.2~0.3으로<sup>14)</sup> SLA를 사용한 콘크리트 보다 NCA와 ECLWA의 콘크리트가 더 높은 푸아송비를 가져야 하나 SLA를 사용한 콘크리트의 푸아송비가 더 큰 것으로 나타났다. SLA를 사용한 콘크리트의 푸아송비는 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 재하하중 방향과 평행하게 골재와 매트릭스 사이에 분리가 일어나며 횡방향 변형률과 푸아송비가 증가하게 된다. 이에 비추어 SLA는 매트릭스와의 결합이 약해지며 SLA의 fly ash 함량이 적을수록 그 결합이 약해짐을 알 수 있다.

할렬 인장 실험결과 NCA, ECLA 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

Table 3 Results of compressions, splitting tension, and fracture beam tests

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
$\frac{K_E}{(MPa^{1/2}/(kg/m^3)^{3/2})}$	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
$\epsilon_{ao}$ ( $\mu\epsilon$ )	2624±3	2119±241	2091±65	2801±163	2742±86	2873±149
$\epsilon_{lo}$ ( $\mu\epsilon$ )	-1734±303	-635±110	-1731±120	-2022±127	-2098±90	-1235±262
$\epsilon_{vo}$ ( $\mu\epsilon$ )	-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	-
$K_{IC}$ (N/mm <sup>3/2</sup> )	35.7±5.0	25.1±2.6	18.3±2.3	22.6±0.8	24.5±0.2	-
$CTOD_c$ (mm)	0.026±0.007	0.013±0.005	0.025±0.003	0.030±0.004	0.024±0.001	-
$G_{IC}$ (N/m)	52.3	27.4	27.8	39.6	39.2	-
$f'_t$ (MPa)	2.99	3.17	1.67	1.94	2.36	-
$E_{ct}$	24.4±1.8	23.0±1.5	11.6±0.6	12.9±0.7	15.3±0.9	-
$E_{ct}/E_c$	1.12	1.04	0.92	0.99	1.06	-

모르타르 부착력이 인발에 저항하기에 충분하여 골재의 파괴를 유발하는 것으로 생각된다. 할렬 인장강도  $f_{sp}$ 는 Table 3에 나타내었다. SLA 콘크리트의 경우 SLA의 낮은 탄성계수와 부착강도 때문에 낮은 강도가 나타났으며 SLA의 fly ash 함량이 증가함에 따라 할렬 인장강도가 증가하였다. ACI에서 경량 콘크리트의 할렬 인장강도 예측식은 아래와 같으며 여기서  $K_{sp}$ 는  $0.56 \text{ MPa}^{1/2}$ 로 ACI에서 규정한 경험 상수이다.

$$f_{sp} = K_{sp} \sqrt{f_c} \quad (5)$$

Table 3에서 알 수 있듯이 ECLWA에 대해 측정된  $K_{sp}$ 는 0.67로 ECLWA의 사용시 ACI의 값은 보수적인 것으로 나타났으며 SLA 콘크리트의  $K_{sp}$ 는 ECLWA에 비해 작았으며 ACI와 비슷하였다. ECLWA와 SLA 콘크리트의 상이한  $K_{sp}$ 는 골재 타입의 차이보다는 압축강도의 큰 차이에 의한 것으로 판단된다.

### 3.3 파괴 특성

노치를 가진 보시험체의 파괴시험 결과는 Table 3에 ECLWA와 SLA(80/20)의 하중-CMOD 관계는 Fig. 1과 같다. ECLWA 콘크리트의 초기 기울기가 큰 것은 ECLWA 콘크리트의 상대적으로 높은 탄성계수  $E_c$ 에 기인하는 것으로 나타났다. ECLWA 콘크리트의 최대하중 이전의 상대적인 하중-CMOD 곡선의 선형성은 Table 3에서 알 수 있듯이 임계 균열선단 개구변위인  $CTOD_c$ 가 작고 임계상태에 도달하기 전의 균열 성장량이 작음을 의미한다. 파괴의 형태는 할렬인장시험과 비슷하게 NCA, ECLWA 및 SLA(80/20) 콘크리트에서 골재의 파괴를 관찰할 수 있었으며 SLA(0/100)과 SLA(35/65) 콘크리트에서는 주로 골재와 모르타르의 계면에서 파괴가 일어났다. 균열에 대한 저항성의 지표인 파괴인자  $K_{Ic}$  측정값의 차이는 중요한 의미를 가지고 있으며 NCA 콘크리트가 가장 큰 것으로 나타났다. SLA 콘크리트는 골재의 fly ash 함량이 증가할수록  $K_{Ic}$ 가 증가하였고 SLA(80/20)과 ECLWA의  $K_{Ic}$  값이 비슷하였다. ECLWA 콘크리트의 인장강도가 가장 높았으나  $G_{Ic}$ 는 가장 작아 가장 취성적인 것으로 나타났다. Fig. 2에서 보듯이 SLA(80/20) 콘크리트는 연성적인 반면에 ECLWA의 경우 균열 개구변위가 커짐에 따라 빠른 하중감소를 보이고 있다. 또한 ECLWA의 낮은 연성은 다른 콘크리트와 비교해서 가장 작은 값으로도 알 수 있으며 균열진전영역 즉 파괴진행대의 크기가 작음을 의미한다. 새로운 파괴면을 형성하기 위해 필요한 파괴에너지  $G_{Ic}$ 는 콘크리트에 사용된 굵은골재의 종류에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 모르타르와 굵은골재 사이의 완전한 부착이 이루어지면 노치를 가진 보시험체로 부터

측정된  $E_{cf}$ 와 압축시험에 의해 측정된  $E_c$  값은 동일값 즉 두가지 값의 비가  $E_{cf}/E_c=1$ 을 가지게 된다. 또한 부착이 불충분 할수록  $E_c$ 는 SLA(0/100)과 SLA(35/65) 콘크리트 처럼  $E_c$ 가  $E_{cf}$ 보다 크므로  $E_{cf}/E_c < 1$ 이 될 것이다.  $E_{cf}/E_c$ 의 비교값은 Table 3에 나타나있으며 결론적으로 SLA(0/100) SLA(35/65)는 콘크리트의 탄성영역에서도 모르타르와 골재의 부착이 불충분한 것을 알 수 있으며 푸이송비 값으로도 이러한 결과를 충분히 설명할 수 있다.

### 3.4 표면박리 저항성 실험 결과

표면박리 저항성을 측정하기 위해 각 실험 변수별로 Table 4와 같이 ASTM C672에 의해 육안검사 등급기준으로 분류하였으며, 단위 면적당 박리된 중량( $\text{kg}/\text{m}^2$ )을 누적손실 중량으로서 Fig. 3와 같이 구하였다. 모르타르와 골재의 결합력과 상관없이, SLA(80/20) 콘크리트가 표면박리 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났으며 NCA가 그 다음으로 우수하였다. Table 4와 Fig. 3와 같이 SLA

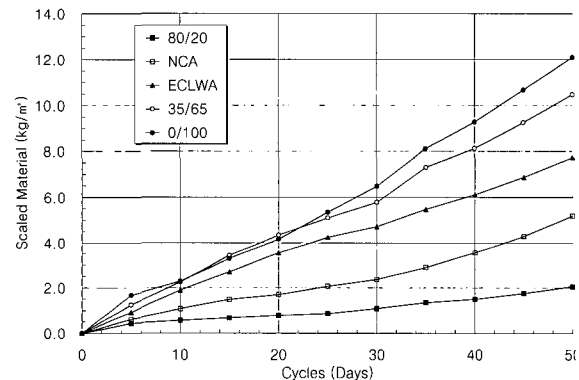


Fig. 3 Salt-scaling performance of the concretes

Table 4 Salt-scaling visual inspection ratings [ASTM C672]

Cycles	Specimen				
	NCA	ECLWA	SLA(0/100)	SLA(35/65)	SLA(80/20)
5	1	2	2.5	2	1
10	1	2.5	3	3	2
15	2	3	4	3	2
20	2	3.5	5	4	2
25	3	4.5	5	5	2
30	3	5	5	5	3
35	3	5	5	5	3
40	4	5	5	5	4
45	4	5	5	5	4
50	4	5	5	5	4

0 : No scaling, 1 : Very slight scaling  
 2 : Slight to moderate scaling, 3 : Moderate scaling  
 4 : Moderate to severe scaling, 5 : Severe scaling

(80/20)는 물과 염소이온을 통과시키지 않는 낮은 투과성을 가지고 있어 표면박리 저항성을 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 SLA(80/20) 골재속의 플라스틱의 소수성(疎水性)에 의한 물과 염화물의 차단 효과에 의한 것으로 판단된다. NCA 콘크리트는 일반적인 표면박리 저항성을 나타내었다.

ECLWA, SLA(35/65), SLA(0/00) 공시체들은 표면박리 저항성이 매우 약한 것으로 나타났다. 표면박리 저항성에 있어서 중요한 모르타르와 골재의 부착력은 골재속의 열팽창계수가 큰 플라스틱의 함량이 중대한 영향을 미침을 SLA(0/100)과 SLA(35/65)의 결과에서 보듯이 알 수 있으며, 표면박리 저항성에 중요한 요소임을 알 수 있다. 냉각시에 골재의 수축에 의한 모르타르와 골재의 약한 경계면은 물과 염화이온의 이동 경로 역할을 하였으며 결과적으로 낮은 표면박리 저항성의 원인으로 판단된다.

ECLWA 공시체는 모르타르와 골재의 강한 부착력에도 불구하고 골재 자체의 높은 흡수율이 물과 염화물의 침투를 허용하여 낮은 표면박리 저항성을 나타내었다.

#### 4. 결 론

12% 탄소를 함유한 fly-ash와 폐플라스틱를 이용하여 합성경량골재를 개발하고, 이를 이용한 콘크리트의 압축 및 활렬인장거동, 파괴특성, 표면박리 저항성을 실험하여 합성경량골재의 가능성 및 합성경량골재의 콘크리트 실용화 가능성을 분석하였다.

- 1) 제조된 합성경량골재를 사용한 경량 콘크리트의 강도가 같은 배합의 일반적인 경량골재를 사용한 경량 콘크리트와 보통골재를 사용한 콘크리트와 비교시 낮은 강도를 가졌으나 합성경량골재로써 경량 콘크리트가 제조될 수 있음을 확인하였다.
- 2) 합성경량골재 콘크리트는 상대적으로 낮은 탄성계수를 가졌으나 높은 압축 연성을 나타내었다.
- 3) 합성경량골재의 fly ash의 함량이 증가할수록 합성경량골재를 사용한 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 탄성계수, 파괴특성등이 모두 향상되었으며 골재와 모르타르의 부착력도 fly ash 함량이 증가함에 따라 증가되었다.
- 4) SLA(35/65)와 SLA(80/20) 콘크리트의 파괴특성은 ECLWA 콘크리트 보다 우수하거나 비슷하였다.
- 5) 합성경량골재 콘크리트의 탄성계수와 활렬인장강도의 ACI 예측식을 제안할 수 있었다.
- 6) 합성경량골재의 fly ash 함량이 증가 할수록 표면박리 저항성이 향상 되었으며, SLA(80/20) 콘크리트는 골재의 낮은 투수성과 골재와 모르타르의 강한 부착력에 의해 NCA와 ECLWA 콘크리트에 비해 우수한 표면박리 저항성을 나타내었다.

- 7) 합성경량골재는 도로 포장, 흙막이 구조물, 저강도 콘크리트 구조물등에 사용할 수 있을 것이며, 낮은 탄성계수는 포장의 연성을 증가시켜 균열의 감소 및 건조수축에 의한 구속응력을 감소시킬 것으로 판단된다.
- 8) 합성경량골재 콘크리트의 내화와 장기간 안정성 및 골재의 내구성등의 더 많은 특성에 대한 연구가 수행되어야 할 것이며, 다른 타입의 폐플라스틱과 더 많은 탄소와 황, 암모니아 등을 함유하는 fly ash를 혼합한 합성경량골재의 제조 연구가 진행되어야 할것으로 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, 2000, pp.602~618.
2. American Coal Ash Association, "CCP Production and Use Survey 1998," American Coal Ash Association International, Oct. 1997, pp.120-135. <http://www.acaa-usa.org>. Accessed July 31, 2000.
3. "Nitrogen Oxides Reduction Program: Final Rule for Phase II (Group 1 and Group 2 Boilers)," U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/air/markets/arp/nox/phase2.html>. Accessed July 31, 2000.
4. Resin Report. "Modern Plastics", Vol. 76, No. 1, 1999, pp. 49-80.
5. State of Plastics Recycling in the United States. "Plastics Resource," Nov. The American Plastics Council, 1999, <http://www.plasticsresource.com>. Accessed July 31, 2000.
6. Ehrig, R. J., ed., "Plastic Recycling," Hanser Publishers, N. Y., 1989, pp.59-85.
7. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods., "Determination of the Fracture Parameters( $K_{Ic}$  and  $CTOD_c$ ) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests," *Materials and Structures*, Vol.23, 1990, pp.457~460.
8. Jenq, Y. and S. P. Shah., "Two-Parameter Fracture Model for Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.111, No.10, Oct. 1985, pp.1227~1241.
9. ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. In *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1*," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1998, pp.213R-1-27.
10. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995, pp.318R81-82.

11. 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.
12. Dougill, J. W., O. Ishai, P. Adrian, B. L. Meyers, and T. J. Hirsch. Discussion of a Paper by T. J. Hirsch, "Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate," *ACI Journal*, Proceedings Vol.59, No.9, Sept. 1962, pp.1363~1366.
13. Vilardell, J., A. Aguado, L. Agullo, and R. Gettu. "Estimation of the Modulus of Elasticity for Dam Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.1, Jan. 1998, pp.93~101.
14. Malloy, R., "Plastic Part Design," Hanser Publishers, Munich, Germany, 1994, pp.123-148.
15. Jansen, D. C., S. M. Palmquist, C. Swan, D. Al-Mufarrej, B. Arya, and C.D'Annunzio, "Physical Properties of Concrete with Vitrified Coarse Aggregate," *ACI Materials Journal*, Vol.97, No.3, May-June 2000, pp.360~366.

## 요 약

페플라스틱과 fly ash를 건설분야에서 재활용하는 것은 환경오염의 방지와 함께 경제적인 건설 신소재를 개발할 수 있어 각종 환경규제 속에 대처할 수 있는 훌륭한 방안이다. 본 연구에서는 12% 탄소를 함유한 fly-ash와 페플라스틱을 이용하여 합성경량골재를 제작하였다. 최대치수 9.5mm의 골재는 fly ash 함유량을 0%, 35%, 80% 으로 제조하였다. 팽창 점토 경량골재와 보통 중량 골재를 비교군으로 사용하였다. 골재의 입도, 비중, 흡수율을 실험하였으며 골재종류별로 다섯 변수의 콘크리트 공시체를 제조하였다. 합성경량골재 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 밀도, 압축강도, 탄성계수, 할렬인장강도, 파괴인성, 파괴 에너지등을 구하였다. 또한 콘크리트 내구성을 알 수 있는 표면박리 저항성 실험을 하였다. 실험결과 압축강도와 인장강도는 보통중량 골재와 일반적인 점토 경량골재를 사용한 콘크리트 보다 합성경량골재의 경우가 더 낮았으나 상대적으로 우수한 파괴특성을 나타내었다. 합성경량골재 콘크리트는 상대적으로 낮은 압축 탄성계수를 가졌으나 높은 연성을 나타내었다. 합성경량골재의 fly ash 함유량이 증가함에 따라, 콘크리트의 모든 특성이 향상되었다. fly ash 함유량 80%의 합성경량골재를 사용한 콘크리트가 표면박리 저항성이 가장 우수하였다.

**핵심어 :** 합성경량골재, 플라이 애쉬, 페플라스틱, 역학적 특성, 파괴 특성, 표면박리 저항성