

# 재생콘크리트의 휨 변형과 파괴 특성

## Flexural Strain and Fracture Toughness of Recycled Concrete

김 광 우\* · 김 주 인\*\* · 김 기 성\*\*  
Kim, Kwng Woo · Kim, Joo In · Kim, Ki Sung

### Summary

The recycled concrete, average compressive strength of which was 210kg/cm<sup>2</sup> or higher with slump range of 14~18cm, was prepared by replacing 25% and 50% by weight of coarse aggregate with recycled aggregate from waste concrete. Mix design method for crushed aggregates was used and all specimens were cured by normal moisture curing method. A plasticiser and a fly ash were added to the mix to improve performance of recycled concrete. Flexural strength, stress-strain relationship and fracture toughness were evaluated by comparing with those of normal concretes.

Recycled concrete showed, in general, lower flexural strength and fracture toughness, and higher strain under the same stress level. Fly ash in the concrete had an effect of reducing the strength and fracture toughness on both normal and recycled concretes. Since fly ash is known to improve many properties of concrete, while reducing strength properties, decision for using fly ash should be made carefully depending on the intended usage of the recycled concrete.

### I. 서 론

우리 나라에서는 대략 1,000만톤의 건설고형폐기물이 매년 발생하는 것으로 추정되고 있다. 한편 유럽 공동체 (EEC)에서 매년 철거되는 폐 콘크리트의 량은 약 5,000만 톤으로 추산되고 있으며 그중 영국에서만 매년 1,100만톤, 불란서에서 매년 1,300만톤, 벨기에에서 약 300만톤 등의 콘크리트가 철거되고

있다. 한편 미국에서의 그 물량은 약 6,000만 톤으로 추산되며 일본도 약 2,300만톤 이상의 콘크리트가 철거되고 있는 것으로 알려지고 있다. 하지만, 전세계적으로 볼 때 그중 매우 소량만이 재활용 되고 있으며 그것도 콘크리트 구조용 고급 골재로 재활용 되기 보다는 대부분 매립용 막석 대용이나 도로의 기층 또는 보조기층 등 저급재료로 사용될 뿐 나머지는 그냥 사토장에 버려진다<sup>1)</sup>. 덴마크의 Ha-

\* 강원대학교 농과대학

\*\*농어촌진흥공사 강원지사

키워드 : 재생콘크리트, 재활용, 폐콘크리트, 재생골재, 휨변형, 파괴 인성, 플라이 애쉬 유동화제.

nsen<sup>3)</sup>에 의하면 서기 2000년의 세계적 콘크리트 철거 물량은 1980년대의 약 3배가 될 것이라고 추산하고 있다. 따라서 이 물량의 처리는 심각한 문제로 대두될 것이고 결국 재활용만이 가장 중요한 해결책이 될 것이다.

최근에 와서 콘크리트를 포함한 각종 건설쓰레기의 폐기 처분은 점차 어려워지고 있다. 처분 장소의 제한 때문에 처분에 따른 막대한 비용 증가는 골재 자원의 고갈로 새로운 골재를 구입하는데 있어서 비용 증가와 함께 건설업계에 2중고를 유발한다. 또한 폐기 처분장소를 구해도 처분 물량과 입자의 크기를 제한하므로 파쇄 후 폐기해야 하는 경우가 대부분이다. 하지만 이런 상황에서도 그간은 국내 규정의 미비로 대부분 매립지에 적당히 처리되어 왔다.

그간 국내 폐기물 관리법에 의하면 건설폐기물을 공사업자가 자가 처리하거나 처리업자에게 위탁 처리하도록 되어 있었다. 따라서 매립 이외에 대안이 없는 국내의 실정에서 폐콘크리트는 대부분이 단순 건설쓰레기로만 취급되어 처리업자에게 위탁 처리되어 재활용보다 매립에 의존해왔다. 그러나 건설교통부 및 환경부 통합고시 '94.1 (건설폐재 배출업자의 재활용 준수 지침)의 발효로 재활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 나아가 가까운 장래에 이 재활용 규정은 의무화 조항으로 되어, 해당현장에서 발생하는 폐기물은 자체적으로 처리하지 않으면 안되도록 되므로 각건설회사는 물론 건설교통부, 환경부 등은 산하의 각종 연구기관을 통하여 재활용의 실용화를 위한 많은 연구·노력을 기울이고 있다.

한편 외국에서의 경험에 의하면 폐콘크리트의 재활용은 경제적으로도 이득이 있는 것으로 알려져있다. 하지만 국내의 경우 아직 폐콘크리트의 수거, 분리 및 재생골재 생산 체계의 미정립, 장비의 실용화 부족 등 때문에 실제적인 경제성 분석이 어렵다. 그러나 콘크리트

구조물을 철거하여 운반, 파쇄, 폐기처분하는 과정에서 소요되는 비용과 아울러 천연골재를 구입하는 등 2중 비용이 소요되는 현재 국내의 상황으로 보아 재생골재의 사용은 충분한 경제성이 있을 것임을 간접적으로 인지할 수 있다.

이에 본 연구는 그간의 폐콘크리트 재활용의 실용화 연구<sup>7, 8, 9, 10, 11, 13)</sup>의 일환으로 본 연구진에 의해 폐콘크리트를 일정량 혼입하여 28일 압축강도가 210kg/ccm<sup>2</sup> 이상으로 개발된 재활용 콘크리트(Recycled Concrete)의 휨강도 및 휨 변형 그리고 파괴특성을 고찰하는 목적으로 수행되었다. 휨강도 및 변형 특성은 보와 같은 구조부재의 설계시 중요한 요소이며 파괴특성은 그 부재의 흠에 대한 민감성과 급속파괴에 대한 저항성을 나타내는 중요한 지수이다. 이를 위하여 산업부산물로 콘크리트의 특성개선에 가장 많이 쓰이는 경제적 재료인 Fly Ash를 적정량 혼입하고 또한 고유동화제를 사용하여 물-시멘트비를 0.35로 낮추어 제조한 재활용 콘크리트의 휨강도, 변형 및 파괴특성 등을 규명하여 실용성 여부를 점검하였다.

## II. 실험

### 1. 재 료

#### 가. 골 재

본 연구에서는 약 25년 된 건물의 슬래브 부분 폐콘크리트를 수집하여 소형 파쇄기로 파쇄하여 재생골재(Recycled Aggregate)를 만들었다. 파쇄된 재생골재를 #4체로 재생굵은골재와 재생잔골재로 나누어 각각 체가름 시험을 하였고, 굵은골재 최대치수는 25mm로 제한하였다.

사용된 재생골재의 물리적 성질은 Table-1과 같으며 이 결과는 외국의 연구자들<sup>1, 3, 12)</sup>과 비교하여볼 때 유사하였다. 또한 각종 문

현조사와 현재까지 본 연구팀이 수행한 연구에 의하면 재생 잔골재의 혼입은 재활용 콘크리트의 제조과정 및 경화된 콘크리트의 물리·화학적 성질에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 그간의 연구경험을 토대로 재생 잔골재는 본 연구에서 제외하고 재생 굵은골재만을 사용키로 하였다.

재활용 콘크리트의 제조 시 혼합용 및 일반 콘크리트 (Normal Concrete) 와 Control 제조용으로 천연 굵은골재 (Virgin Coarse Ag-

gregate)와 천연 잔골재 (Virgin Fine Aggregate)를 준비 하였다. 천연 굵은골재로는 레미콘 제조용 쇄석을, 천연 잔골재로는 강원도 춘천시 하상의 강모래를 사용하였다. 천연 잔골재 및 굵은골재에 대한 물리적 성질은 Table-1과 같고, 입도 분포는 재생굵은골재와 함께 표 2에 제시하였다. 재생골재에 대한 규정은 일반적으로 천연 골재에 대해서 적용되는 무근 콘크리트용 골재 입도 규정을 적용하였다.

**Table-1. Physical Properties of Virgin and Recycled Aggregates**

Aggregate	Apparant SG	SSD SG	Absorption (%)	F.M.	Abrasion (%)
Virgin Fine Agg.	2.67	2.59	1.94	2.86	—
Virgin Coarse Agg.	2.68	2.64	0.81	—	18.0
Rec. Fine Agg.	2.57	2.30	10.57	—	—
Rec. Coarse Agg.	2.53	2.40	5.29	—	43.2

**Table-2. Gradation of Virgin and Recycled Aggregates**

Aggregate	Percent Passing in Sieve Size									
	No.	100	50	30	16	8	4	10mm	19mm	25
Virgin Fine Agg.		8	22	43	70	84	97	100		
Virgin Coarse Agg.							3	36	100	
Recycled Coarse Agg.							2	22	94	100

**나. 시멘트 및 혼화재료**

시멘트는 일반적으로 많이 쓰이는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 혼화재료는 값이 싸고 취급이 용이하며 선진국의 연구에서 가장 많이 이용된 Fly Ash를 사용키로 선정하였다. Fly Ash는 일반적으로 알려져 있듯이 유연탄을 1400-1500°C 연소할 때 가벼운 무기물이 고온의 연소가스와 더불어 굴뚝에 날아가는 도중 전기 집진기에 의하여 채취된 재이다. Fly Ash는 내구성과 알칼리골재 반응을

줄이는 효과를 가져오며 적절한 양생시 수밀성을 증진시키고 일정량의 시멘트 대신 결합재로 사용될 때 수화열을 감소시키는 효과도 가져온다. Fly Ash는 특히 도로포장 콘크리트에 성공적으로 이용되고 있다. 미국 캔사스주에서의 한 경우는 맵균열 (Map Crack)을 줄이는 결과를 낳았다. 그리고 Fly Ash로 일정량의 시멘트를 대체하므로 경제적인 콘크리트가 얻을 수 있다. 본 연구에 사용된 Fly Ash에 대한 성질은 Table-3.과 같다.

**Table-3. Chemical Composition and Physical Properties of the Fly Ash**

Chemical Composition (%)					Physical Property	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig Loss	Specific Gravity	Fineness
89.8	0.3	0.2	1.0	4.5	2.23	3200cm <sup>2</sup> /g

물-시멘트비(w/c)를 낮추고 작업성(Wor- kability) 증진을 위하여 유동화제(Plasticiz- er)를 사용하였는데 이 유동화제는 국내 K사

제품인 나프탈렌 셀포네이트 나트륨계 제품이 며 그 성질은 Table-4.와 같다.

**Table-4. Chemical Composition and Physical Properties of the Plasticizer**

Solid Intensity	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> Intensity	pH	Specific Gravity	Cl- Intensity	Ion	Solubility
41%	1.2%	8.0	1.21	< 500ppm	Negative	Dissolved in Water

## 2. 배합설계 및 시험방법

### 가. 배합

재활용 콘크리트의 배합은 재생 굵은골재와 천연 잔골재 및 천연 굵은골재를 사용하여 수행 되었다. 재생골재의 배합비율은 문헌조사 및 그간의 연구<sup>7, 8, 9, 10, 11, 13</sup>)를 토대로 하여 25%와 50% 두 종류로 하였으며, 유동화제의 사용량은 슬럼프 값으로부터 결정하였다. 즉, 현장에서 실제 타설시의 적정 작업성을 슬럼프값 14-18cm로 보고 28일 210kg/cm<sup>2</sup>의 압

축강도가 얻어지면서도 이 범위안의 슬럼프가 유지되는 유동화제량을 결정하였다. 따라서 총 배합조건 수는 Table-5에서와 같이 3-배합 (Mix), 3-Fly Ash (FL) 비율로 9가지이며 각 배합조건당 한가지 비율의 유동화제 (PC)를 사용하였다. 이 재생골재의 배합비를 유지하며 강도발현을 위하여 물-결합재비 [물/(시멘트+Fly Ash)]를 35%로 고정시켜 강도와 함께 작업성을 고려하였다.모든 배합 설계는 쇄석골재 사용시의 조건으로 수행되었다.

**Table-5. Mix Proportion of Normal Concrete and Recycled Concrete Mixtures**

Mix	W/(C+F)	FL	PC	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				
				C	FL	FA	CA	RCA
Normal	35%	0%	1.0%	500	0	643	964.5	0
		10%	1.0%	450	50	643	964.5	0
		20%	1.0%	400	100	643	964.5	0
Recycled (25%)	35%	0%	1.3%	500	0	643	723.4	241.1
		10%	1.5%	450	50	643	723.4	241.1
		20%	2.0%	400	100	643	723.4	241.1
Recycled (50%)	35%	0%	1.5%	500	0	643	482.3	482.3
		10%	2.2%	450	50	643	482.3	482.3
		20%	2.7%	400	100	643	482.3	482.3

C=Cement, FL=Fly Ash, PC=Plasticizer, FA=Fine Aggregate, CA=Coarse Aggregate, RCA=Recycled Coarse Aggregate

### 나. 시험 방법

휨강도 측정을 위하여 폭 9, 높이 12, 길이 52cm (지간 48cm)의 빔 공시체를 제조하였으며 공시체의 수는 각 배합조건 당 5개씩이며,

모든 공시체는 25°C에서 수중양생시켜 28일 만에 강도측정에 사용하였다. 휨 강도는 보 공시체에 대하여 3점 휨 재하시험으로 측정하였으며 모든 시험에서 최저치와 최고치를 제

외한 값들만 분석에 사용하였다.

파괴인성(Fracture toughness)시험을 위하여 각 처리조건 별로 5개씩 초기균열(Notch)이 있는 보를 제작하였으며 분석시에는 역시 최저치와 최고치를 제외한 3개의 데이터 만을 사용하였다. 공시체의 크기는 휨강도 공시체와 같았으나 모든 공시체에 공히 3mm 폭의 초기균열비 0.3의 균열을 보의 중앙 하변에 만들었고 지간(S)대 보 높이(W) 비는 4로 하였다. 양생은 상기와 같은 방법으로 하였으며 재령 28일에 3점 휨 시험방법에 의하여 재하 속도 2.6kg/sec의 정하중을 재하 하였다. 이때 보 중앙의 처짐을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 보 하단 초기균열의 양쪽끝에 대각선으로 설치하였으며 파괴된 공시체에 대하여 보의 높이와 초기균열 길이를 측정하였다 (Fig.1).

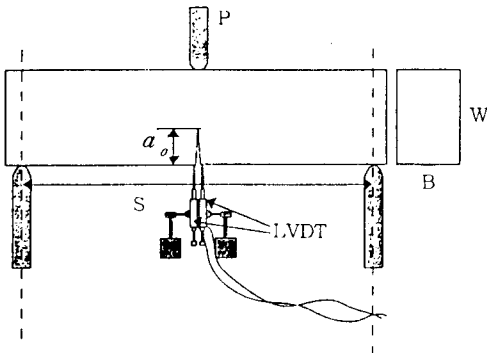


Fig. 1. Illustration of instrumentation for 3-point bend test

하중-처짐 곡선으로부터 Fig.2에서와 같이  $P_i$ ,  $P_{max}$ ,  $d_{p_i}$ ,  $d_{p_{max}}$ 를 구하였으며 이 값들과 식 1~3을 이용하여 파괴인성을 구하였다. 이 식은 유효응력모델(Effective Crack Model)<sup>2, 4, 5)</sup>에 의하여 일반판크리트의 파괴인성치 계산을 위하여 제시된 식으로 곡선에서 ( $P_i$ ,  $d_{p_i}$ )까지를 선형구간으로, 그리고 그 이후 ( $P_{max}$ ,  $d_{p_{max}}$ )까지를 비선형 구간으로 보며, 이 비선형

형 구간은 균열이 진전되며 응력이 이완되는 과정에서 비선형 거동을 보이며 일정길이의 유효균열을 형성하는 과정으로 본다.

곡선의 기울기 변화로 나타나는 보의 강성 감소는 안정균열의 성장과 가시적인 균열 전방의 불연속적인 성장지역(Process zone) 형성의 결과이다. 하지만 이 두 사항을 정확히 구분하기는 힘들다. 따라서 임계균열길이  $a_e$ 는 균열길이  $a_0$ 를 가진 보의 감소된 강성과 같은 강성(E에 비례)을 띠는 한 균열길이  $a_e$ 를 가진 가상의 보를 도입함으로써 계산할 수 있다고 가정한다. 즉,

$$d_{p_{max}} = \frac{P_{max}}{4BE} \left( \frac{S}{W} \right)^3 \left[ 1 + \frac{5wS}{8P_{max}} + \left( \frac{W}{S} \right)^2 \left( 2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_{max}} - 0.84 \left( \frac{W}{S} \right)^3 \right) \right] \dots (1)$$

$$+ \frac{9}{2} \frac{P_{max}}{BE} \left( 1 + \frac{WS}{2P_{max}} \right) \left( \frac{S}{W} \right)^2 F_2(a_e)$$

여기서, B, W, S 는 그림 1에 주어졌으며, E와 w는 각각 탄성계수와 보의 단위길이 당 중량이며,  $F_2(a_e)$ 는

$$F_2(a_e) = \int_0^{a_e} BF_1^2(\beta) d\beta \dots \dots \dots (2)$$

이다. 또한,  $a_e = a_0/W$  로 유효균열길이 대 보의 높이 비이며,  $F_1(\beta) = A_0 + A_1 + A_2\beta^2 + A_3\beta^3 + A_4\beta^4$ 이다. 이 계수  $A_1$ 는  $(S/W) = 4$ 와 8에 대하여 문헌6에 주어졌다.

이  $a_e$ 는 식 1을 푸는 과정에서 시산법에 의하여 계산된다. E의 초기치는 식 1로부터  $a_e$ 에  $a_0 = a_0/W$ 를 이용하고  $P_{max}$ 와  $d_{p_{max}}$ 를  $P_i$ ,  $d_{p_i}$  대입한 후 양변에 E를 곱하고  $d_{p_i}$ 로 나누어 구한다. 실험으로부터 얻은  $P_{max}$ ,  $d_{p_{max}}$ 와 E 그리고 식 2로 구한  $F_2(a_e)$ 를 식 1에 넣고 새로운 E (즉,  $E_1$ )를 구한다. 시산 과정은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 균열길이 증가비를  $\Delta a = 0.001$  만큼씩 증가시키며  $E_1 = E \pm \epsilon$  ( $\epsilon = 0.05\%$ )

될 때까지 계속한다. 그래서 최종  $\alpha$ 값을  $\alpha_e$ 로 취하고 이때의 균열길이  $a_e$ 를 유효균열 길이라 한다. 이  $a_e$ 와  $F_1(\alpha_e)$  그리고  $\sigma_n$ 을 이용하여 파괴인성은 식 3으로 계산된다.

$$K_{IC} = 1.13782\sigma_n\sqrt{a_e}F(a)$$

여기서,  $\sigma_n = 6M/(BW^2)$ , 이며 이때  $M = (P_{max} + uS/2)S/4$ 이다. 또한 상수 1.13782는 정밀한 임계응력확대계수(파괴인성)를 구하기 위해 균열전방의 실응력 상태를 고려하기 위하여 여러 실험자료에 대한 회귀분석을 통하여 얻어진 값이다<sup>2, 4)</sup>.

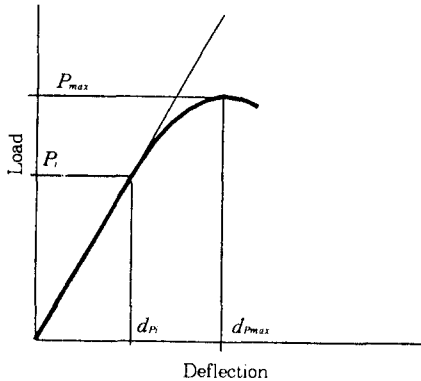


Fig. 2. Description of load-deflection information<sup>2)</sup>

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 휨 강도

Fig-3은 Fly Ash 비에 따라 재활용 콘크리트의 경우 적정 유동화제 량인 2, 2.2, 2.7% 넣고, 일반콘크리트의 경우 유동화제를 모두 1% 넣은 콘크리트에 대한 휨강도를 나타내었다. 휨강도는 Fly Ash 0, 10% 사이에서는 거의 그 함량차이 때문에 보이는 차이는 없었으며 Fly Ash 20% 경우는 앞의 두 경우보다 다소 차이를 보였다. 또한 재활용 콘크리트는 전반적으로 일반콘크리트보다 낮은 값들을 보

였으며 재생골재 25% 첨가보다는 50% 첨가 시 더 낮은 강도를 보였다.

Fly Ash 첨가는 본 연구에서는 물론 일반적으로도 강도저하를 가져오는 것으로 보고되어 있다. 이는 근본적으로 결합재인 시멘트를 Fly Ash로 대체하므로 인한 단위 시멘트 량의 감소에 기인한 것이다. 하지만 Fly Ash 첨가는 그 외에 공극이 큰 재활용 콘크리트 내부에서 일종의 미세충전제(Micro filler) 역할을 하는 등 많은 이점이 있는 것으로 알려져 있고, 또한 Fly Ash의 첨가는 단위 시멘트 량을 절감하여 생산단가를 낮추는 이점도 있다. 따라서 재령 28일에 소요수준 이상의 강도를 얻을 수 있는 경우 Fly Ash의 첨가는 상기 사항을 고려할 때 유리한 것으로 알려져 있다.

#### 2. 휨 변형

일반콘크리트와 재활용 콘크리트의 휨응력-변형을 곡선을 Fig-4, 5, 6에서 보여주고있다. Fig-4에서 보는바와 같이 일반콘크리트의 경우 초기에는 두 곡선의 기울기가 약간의 차이만 있을 뿐 비슷 하였으나 비교적 높은 응력수준 (약 30kg/cm<sup>2</sup> 이상)에 이르러서는 Fly Ash 10%를 혼입한 콘크리트의 기울기가 급격히 커지고, 극한하중 근처에서는 미끄럼 현상을 보이며 변형이 급격히 증가하였다. 또

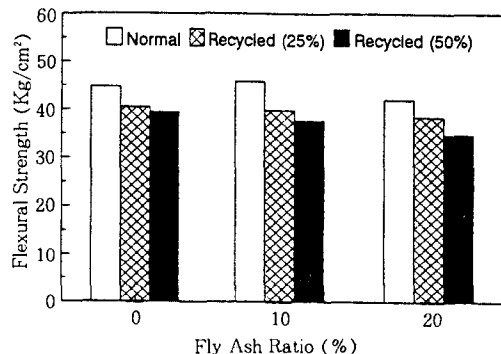


Fig. 3. Flexural strength of normal and recycled concretes

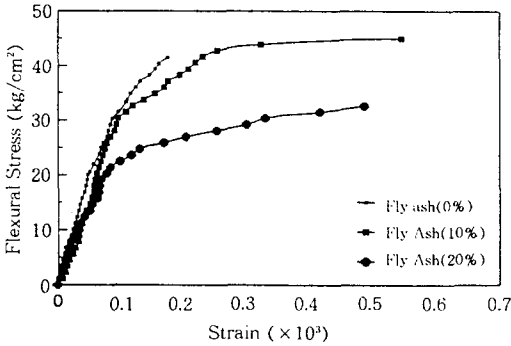


Fig. 4. Flexural stress-strain curve for normal concrete

한 Fly Ash 20% 첨가의 경우는 초기에 변형이 증가하여 비교적 낮은 응력상태에서 파괴에 이르렀다. 반면 Fly Ash를 첨가하지 않은 콘크리트는 거의 기울기의 변화없이 낮은 변형율에서 파괴에 이르렀다.

Fig-5에서 보는바와 같이 25% 재활용 콘크리트의 경우 일반콘크리트와 약간 다른 현상을 보였으나 초기 Fly Ash 0, 10% 두 곡선 기울기의 유사함이 극한하중 근처에 까지 이어졌다. 그러나 Fly Ash 20% 경우는 초기부터 기울기도 다소 낮고 극한하중 근처에서는 매우 큰 변형을 보였다. 따라서 휨 변형에 있어서는 Fly Ash의 혼입이 일반콘크리트는 물론 재활용 콘크리트에도 영향을 미쳐 같은 응력수준에서 더 큰 변형을 증가를 가져오는 것으로 판정되었다. 하지만 Fly Ash의 첨가가 전체적인 휨응력-변형률곡선에 차이를 보여 주나 비교적 낮은 응력수준에서는 그 차이가 미세하였다.

Fig-6에서 보는바와 같이 50% 재활용 콘크리트의 경우 극한응력의 약 40% 수준까지는 앞의 경우와 큰 차이가 없었으나 그 이후부터 기울기가 저하되기 시작하였고 최대응력 수준도 앞의 경우보다 낮아졌다. 하지만 Fly Ash 10%의 경우 하중증가에 따라 변형이 서서히 증가하여 극한하중에서는 25% 재활용 콘크리트 경우와 별 차이가 없었다. 이상과 같

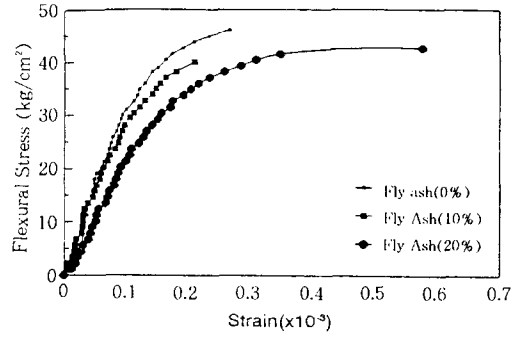


Fig. 5. Flexural stress-strain curves for recycled concrete (25%)

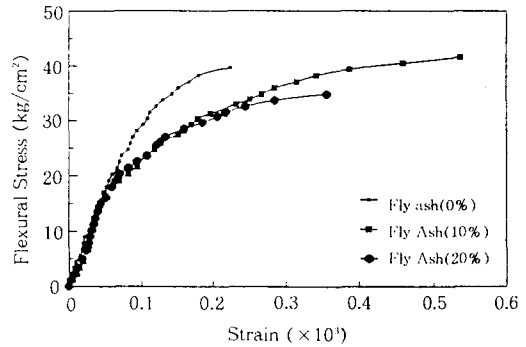


Fig. 6. Flexural stress-strain curves for recycled concrete (50%)

은 재활용 콘크리트의 휨 변형 특성은 기 연구(10, 11)에서 나타난 압축변형 및 낮은 탄성계수 등과도 일치하는 점이다.

### 3. 파괴 인성

25% 및 50% 재활용 콘크리트는 휨 강도 및 변형거동 등에서 Fly Ash의 첨가에 따라 성능상에 큰 차이를 보이지 않으므로 파괴인성 측정에서는 경제적으로 유리한 50% 재활용 콘크리트만을 비교·고찰하였다. 재활용 콘크리트의 파괴인성 ( $K_{IC}$ )을 조사하기 위하여 초기균열( $a_0$ )을 낸 보에 대하여 하중처짐을 측정하여 식 1~3을 풀기 위하여 개발된 컴퓨터 프로그램에 입력시켜 얻어진 결과를 Table-6에 나타내었다. 그리고 대표적인 하중처짐 곡선을 Fig-7, 8에 도시하였다. 그림에

서 알 수 있듯이 재생골재 콘크리트의 하중-처짐 곡선의 기울기는 일반콘크리트보다 현저히 낮으며, 이는 낮은 탄성계수와 높은 변형율로부터 이미 예견되었던 사실이다. 또한 극한하중도 낮아 Table-6에서 볼 수 있듯이 이

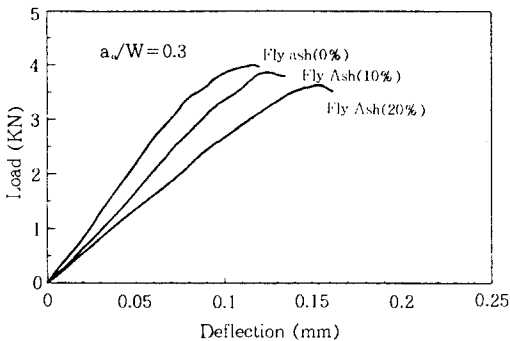
모든 결과는 결국 낮은 파괴인성치로 나타났다. 파괴인성치는 재료가 급속파괴(Fast fracture)에 대하여 견디는 힘을 나타내는 지수이므로 재활용 콘크리트는 일반 콘크리트보다 낮은 파괴저항력을 지님을 알 수 있었다.

**Table-6. Results of 3-point bending test for fracture toughness**

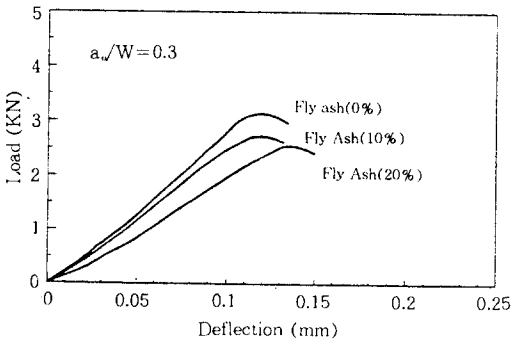
Concrete Type	Normal			Recycled (50%)		
Fly Ash (%)	0	10	20	0	10	20
Mean $K_{IC}$ ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )	1,023	0.962	0.948	0.864	0.749	0.616

한편 Fly Ash의 첨가는 재활용 콘크리트는 물론 일반 콘크리트의 파괴인성도 저하시키는 역할을 하였다. Fly Ash의 첨가는 일반콘크리

트의 경우 파괴인성치가 92-94% 정도로 낮아지는 반면 재활용 콘크리트는 71%-87% 정도로 그 수준이 더 낮아졌다. 이는 앞의 휨강도의 저하와 비슷한 현상으로 Fly Ash의 첨가는 강도 및 파괴인성 측면에서는 재활용 콘크리트에 좋은 영향을 주지는 못하는 것으로 나타났다.



**Fig. 7. Load-Deflection Curves for Normal Concrete**



**Fig. 8. Load-Deflection Curves for Recycled Concrete(50%)**

#### IV. 결 론

본 연구는 폐콘크리트로부터 얻어진 재생골재를 혼입하여 제조한 28일 강도가  $210kg/cm^2$  이상이 얻어지는 재활용 콘크리트의 휨 및 파괴특성을 일반콘크리트와 비교하여 고찰한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재활용 콘크리트는 비록 압축강도가 일정수준 이상이나 일반 콘크리트에 비하여 휨강도가 낮고 휨 변형이 현저히 커 일반 구조물 휨 부재에 실용화를 위해서는 이를 개선하기 위한 연구가 필요한 것으로 보여진다.

2. 재활용 콘크리트의 파괴인성은 일반 콘크리트의 파괴인성치보다 전반적으로 낮은 것으로 나타나 재활용 콘크리트가 내부 흠(Flaw) 등에 민감하여 급속 파괴에 대한 저항력이 낮음을 알 수 있었다.

3. Fly Ash의 첨가는 여러 가지 장점이 있는 것으로 알려져 있으나 전반적으로 휨강도



및 파괴인성의 저하를 유발하여 강도 및 파괴인성의 향상에 Fly Ash는 도움이 되지 못하는 것으로 밝혀졌으므로 Fly Ash의 첨가 여부 및 그 비율은 콘크리트의 용도에 따라 신중히 고려하여 선택해야 할 것으로 보여진다.

4. 향후 이와 같은 연구를 보다 발전시키고 실용화하기 위하여는 보다 다양한 여러가지특성을 규명하고, 폐콘크리트로부터 얻어진 재생골재의 첨가비율을 증가시키는 연구, 그리고 시범시공을 통한 경제성 및 실용성 분석 연구 등이 필요할 것으로 보여진다.

### 참 고 문 헌

1. Buck, A. D., "Recycled concrete as a source of aggregate," ACI Journal, Title No. 74-22, May, 1977, pp. 212-219
2. "Fracture mechanics test methods for concrete," Report of technical committee 89-FMT, RILEM, Ed. by S. P. Shah and A. Carpinteri, 1991, pp. 22-35
3. Hansen, T. C. and Narud H., "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," Concrete International, Jan. 1983, pp. 79-83.
4. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 19, 1989, pp. 603-610
5. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "Effective crack model for the determination of fracture toughness ( $K_{IC}^e$  of concrete," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 4/5, 1990, pp. 637-645.
6. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "Fracture toughness of plain concrete from three-point bend specimens," Materials and Structures, Vol. 22, 1989, pp. 185-193.
7. 김광우, 박제선. "폐 콘크리트의 재활용-미국 FHWA 시범 프로젝트 (DP#47)의 소개," 대한토목학회지 1992. 10.
8. 김광우, 박제선, 이봉학, 연구석, "콘크리트 재활용 실태 및 연구동향," 콘크리트학회지, 제6권 6호, 1994. 12., pp. 51-65.
9. 김광우, 연구석, 이병덕, "재생콘크리트의 강도특성상의 문제점," 한국콘크리트학회가을 학술발표대회 논문집, 1992. 10.
10. Kim, K. W., Lee, B. H., Park, J. S. and Doh, Y. S.. "Performance of Crushed Waste Concrete as Aggregate in Structural Concrete," Proceedings of the ASCE National Convention, Ed. by H. I. Inyang and K. L. Bergeson, New York, 1992.
11. 김광우, 이봉학, 도영수, "재생콘크리트의 동결융해 저항성과 변형특성," 콘크리트학회논문집, 제 4권 4호, 1992.
12. Kobayashi, S. and Kawano, H., "Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete," Reuse of Demolition Waste, Proceedings, 2nd International Symposium by RILEM, Kasai, Y. Ed., Chapman and Hall, 1988, pp. 547-556.
13. 이봉학, 김광우, 박제선, 김진영, "재생 폐 콘크리트의 성능향상에 관한 연구," 콘크리트학회 논문집, 제 7권 2호, 1995. 4., pp. 136-144.

(접수일자 : 1995년 5월 28일)