

# 재생 폐콘크리트의 성능향상에 관한 연구

## Improving Performance of Recycled Waste Concrete

이봉학\*

김광우\*\*

박제선\*\*\*

김진영\*\*\*\*

Lee, Bong-Hak, Kim, Kwang-Woo Park, Je-Seon, Kim, Jin-Young

### 요 약

본 연구는 천연 굵은골재 50%를 재생골재로 대체시켜 제조한 재생콘크리트를 일반 구조물에 사용할 수 있도록 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 쇄석골재 사용시의 배합설계 방법으로 콘크리트를 제조하였고 일반적인 수중양생으로 공기체를 양생하였다. 재생콘크리트의 성능향상을 목적으로 유동화제와 플라이애쉬를 첨가하였다. 압축강도 등 각종강도와 파괴인성 등을 측정하여 이를 일반콘크리트와 비교한 결과 재생콘크리트는 강도와 탄성계수가 낮고 변형율이 크며 파괴인성도 낮았다. 그러나 유동화제의 사용으로 물-시멘트비를 35%까지 낮추므로써 슬럼프 16±2cm 에서 일반 구조물에 소요 압축강도 보다 높은 225kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 얻었다. 하지만 재생콘크리트를 일반 구조물에 사용을 위해서는 탄성계수와 변형율에 대한 향상이 필요하다. 또한 플라이애쉬의 사용은 장기 강도 증진 효과를 보이는 반면 강도 저하를 유발했다.

### Abstract

A method for improving strengths of recycled concrete was studied to make use of it in normal concrete structures. Recycled concrete was prepared by replacing 50% by weight of coarse aggregate with recycled aggregate. Mix design method for crushed aggregates was used and 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. Compressive strength, flexural strength, tensile strength, elastic modulus, stress-strain relationship, long-term compressive strength and fracture toughness were evaluated and compared with those of normal concretes. Recycled concrete showed, in general, lower compressive strength than normal concretes. It also showed lower elastic modulus, lower tensile and flexural strengths, and higher strain under the same stress level. However, by reducing w/c ratio down to 35% using the plasticiser, average compressive strength( $\sigma_{28}$ ) of recycled concrete was reached, with slump of 16±2cm, to 225kg/cm<sup>2</sup> or higher, which is an acceptable strength level for normal structural concrete. However, elastic modulus and strain should be improved further for practical use of recycled concrete in normal structure. Fly ash addition in both concretes showed an effect of improving long-term compressive strength and reducing strengths.

**Keywords :** recycled concrete, recycled aggregate, fly ash, fracture toughness

\* 강원대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원, 강원대학교 농공학과 조교수  
\*\*\* 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\* 동명기술단 엔지니어

• 본 논문에 대한 토의는 1995년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1995년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

철거되는 노화된 구조물의 콘크리트를 건설재료로서 재활용 하는 것은 폐콘크리트를 처분해야 하는 어려움을 해소하고 자원절약과 환경보존도 이룰 수 있는 좋은 방안이다<sup>(2,3,4,5)</sup>. 1970년대부터 미국등 구미에서는 골재의 수요와 공급관계 및 콘크리트 폐기물을 골재로서 이용키 위한 포괄적인 연구<sup>(3,8,10)</sup>가 수행되었으며 골재의 대체물로 폐콘크리트를 재 이용하는 문제에 대한 필요성을 지적하고있다. 유럽의 RILEM(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)은 '콘크리트 재활용'에 관한 1차 국제학술회를 유럽철기협회와 공동으로 1985년 Rotterdam에서, 2차 국제학술회의<sup>(6)</sup>를 1988년 동경에서, 그리고 3차 국제학술회의<sup>(7)</sup>를 1993년 덴마크에서 개최하였으며 이제 그들은 실용화 연구를 수행하는 단계에 있다<sup>(9)</sup>. 또한 미국토목학회는 1992년 건설재료 재활용에 관한 분과를 학술대회에 포함시켜 콘크리트뿐 아니라 건설폐기물 전분야에 대한 국제적인 학술회의를 개최하였다<sup>(27)</sup>.

선진국의 이러한 추세에 비추어 볼 때 자원이 부족한 우리 나라에서는 이 분야에 보다 많은 관심을 가질 필요가 있다. 국내에서 천연골재 자원의 고갈은 심각한 지경에 이르고 있다. 천연골재의 주를 이루던 하천골재의 비중은 전체 골재 공급량의 54.2%(1988년)에서 28.4%(1997년 추정)으로 저하되고 있으며, 반면 인공(쇄석)골재는 같은 기간 동안 26.5%에서 41.8%(추정)로 개발이 증가되고 있다. 또한 수요량도 1988년 9,800만 m<sup>3</sup>에서 1993년에는 2배인 18,500만 m<sup>3</sup>로 급속히 증가하여 이러한 현상은 더욱 심화될 것으로 예측된다<sup>(15)</sup>.

그간 선진국은 물론 국내의 문헌<sup>(17-23)</sup>조사 및 본 연구팀의 실험 결과에 의하면 폐콘크리트로부터 파쇄하여 얻은 재생골재(recycled aggregate)는 흡수율이 크고 비중이 낮으며 이를 넣어 제조한 재생콘크리트(recycled concrete)는 단위중량과 강도가 일반콘크리트보다 낮으며 제조 시 작업성도 떨어지는 편이다. 따라서 본 연구의 목적은

폐콘크리트 재활용의 실용화 일환으로 재생콘크리트를 일반 콘크리트 구조물에 사용할 수 있도록 품질을 향상시키기 위한 연구를 수행하는 것이다. 즉 폐콘크리트를 도로의 기층재료 등 저급재료로만 사용하는 것이 아니라, 현장에서 필요한 작업성을 확보하면서도 콘크리트 구조물에 필요한 소요 강도수준의 재생콘크리트를 얻기 위한 실험적 연구를 수행하는 것이다. 이를 위하여 일반적으로 콘크리트외 특성개선에 가장 많이 쓰이는 산업부산물이며 경제적 재료인 플라이애쉬를 적정량 혼합하고 또한 유동화제를 사용하여 물-시멘트비를 낮추면서도 소요의 작업성(workability)을 확보하여 콘크리트를 제조하는 방안을 연구하였다. 그리고 이로부터 얻어진 경화된 콘크리트의 구조재료로서의 중요한 특성인 강도, 변형 및 파괴특성 등을 일반 콘크리트와 비교하여 규명함으로써 실용성 여부를 점검하여 본 논문에 그 결과를 제시했다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

#### 2.1.1. 골재

본 연구에서는 약 25년 된 건물의 슬래브 부분 폐콘크리트를 수집하고 실험실에서 소형 파쇄기로 파쇄하여 재생골재(recycled aggregate)를 만들었다. 이렇게 얻어진 재생골재를 재생굵은골재와 재생잔골재로 나누어 각각 체가름 시험을 하였고, 굵은골재 최대치수는 25mm로 제한하였다.

사용된 재생골재의 물리적 성질을 대표적인 외국의 연구들<sup>(3,10,24)</sup>과 비교하여 표 1에 기록하였다. 본 연구(표 1의 Current)는 물론 타 연구에서도 재생 잔골재는 흡수율이 매우 높았고, 재생 굵은골재도 흡수율이 천연 굵은골재 보다 높았다. 또한 각종 문헌조사와 현재까지 본 연구팀이 수행한 연구에 의하면 재생 잔골재의 혼입은 재생콘크리트의 제조과정 및 경화된 콘크리트의 물리 화학적 성질에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 그간의 연구경험을 토대로 재생 잔골재는 본 연구에서 제외하고 재생 굵은골재만을 사용키

로 하였다.

재생콘크리트의 제조 시 혼합용 및 일반콘크리트(normal concrete)와 대조구(control) 제조용으로 천연 굵은골재(virgin coarse aggregate)와 천연 잔골재(virgin fine aggregate)를 준비 하였다. 천연 굵은골재로는 레미콘 제조용 채석을 천연 잔골재로는 강원도 춘천시 남산면에서 생산된 강모래를 사용하였다. 천연 잔골재 및 굵은골재에 대한 물리적 성질은 표 2와 같고, 입도 분포는 재생 굵은골재와 함께 표 3에 제시하였다. 재생골재에 대한 규정은 일반적으로 천연 골재에 대해서 적용되는 부탄 콘크리트용 골재 입도 규정을 적용하였다.

Table 1 Physical properties of recycled aggregates<sup>(3, 10, 24)</sup>

Aggregate Type	SSD Specific Gravity				Absorption (%)			
	Buck	Hansen	Kobayashi	Current	Buck	Nansen	Kobayashi	Current
RFA	2.32 <sup>1</sup>	N/A	2.38 <sup>2</sup>	2.30	8.45 <sup>1</sup>	N/A	7.20 <sup>2</sup>	10.57
RCA	2.47 <sup>1</sup>	2.42 <sup>1</sup>	2.42 <sup>1</sup>	2.40	4.27 <sup>1</sup>	6.03 <sup>1</sup>	4.49 <sup>1</sup>	5.29

RFA : Recycled Fine Aggregate,

RCA : Recycled Coarse Aggregate,

1 average of given data,

2 average of medium strength concretes

3 average of size 4.31mm aggregates for medium strength concretes

4 average of maximum size 25mm

Table 2 Physical properties of virgin aggregates

Aggregate	Apparant SG	SSD SG	Absorption	F.M.
Fine Agg.	2.67	2.59	1.94	2.86
Coarse Agg.	2.68	2.64	0.81	-

Table 3 Gradation of virgin and recycled aggregates

Aggregate	No.	Percent Passing in Sieve Size								
		100	50	30	16	8	4	10mm	19mm	25
Virgin Fine Agg.	8	22	43	70	84	97	100			
Virgin Coarse Agg.						3	96	100		
Recycled Coarse Agg.						2	22	94	100	

### 2.1.2. 시멘트 및 혼화재료(fly ash, 유동화제)

시멘트는 일반적으로 많이 쓰이는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 혼화재료는 값이 싸고 취급이 용이하며 선진국의 연구에서 가장 많이 이용된 플라이애쉬를 사용하기로 하였다. 국내의 한 유연탄사용 화력발전소산 플라이애쉬를 사용하였으며 이에 대한 성질은 표 4와 같다.

Table 4 Chemical composition and physical properties of the fly ash

Chemical Composition (%)					Physical Property	
SiO <sub>2</sub> (70.7%)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	lg Loss	Specific Gravity	Fineness
89.8	0.3	0.2	1.0	4.5	2.23	3200cm <sup>2</sup> /g

플라이애쉬는 콘크리트의 내구성향상, 알칼리 골재 반응 감소, 수밀성을 증진, 수화열 감소 및 펌핑 작업성 향상, 동결융해에 따른 내구성 향상, 블리딩 감소, 장기강도 증진, 화학부식 저항성 증진, 건조수축 감소 등의 장점도 보인다. 또한 제설제비용 임분하에서 표면 박리(scaling)를 줄이며, 특히 도로포장 콘크리트에 성공적으로 이용되고 있다<sup>(1)</sup>. 그리고 플라이애쉬로 일정량의 시멘트를 대체하므로 경제적인 콘크리트가 얻을 수 있다.

w/c를 낮추고 작업성의 증진을 위하여 유동화제(plasticizer)를 사용하였는데 이 유동화제는 국내 K사 제품인 나프탈렌 셀포네이트 나트륨계 제품이며 그 성질은 표 5와 같다.

Table 5 Chemical composition and physical properties of the plasticizer

Solid Intensity	SO <sub>4</sub> Intensity	pH	Specific Gravity	C- Intensity	Ion	Solubility
> 41%	< 1.2%	8.0	1.1	< 500ppm	Negative	Dissolved in Water

## 2.2. 배합설계 및 시험방법

### 2.2.1. 배합 설계

앞서 언급하였듯이 재생콘크리트 제조 시 재생 잔골재는 제외하였으며, 재생 굵은골재의 배합비율은 본 연구팀이 그간의 연구에서 시도하여온 50%를 섞는 것을 목표로 하였으며, 총 배합은 대조구를 포함하여 모두 7가지로 분류하였다. 유동화제의 사용량은 슬럼프 값으로부터 결정하였다. 즉, 현장에서 실제 타설시의 적정 작업성을 슬럼프 값 14-18cm로 보고 실험을 통하여 이 범위안의 슬럼프가 얻어지는 유동화제의 량을 결정하기 위하여 각각의 배합에 대하여 3가지 유동화제 량을 시멘트 중량에 대한 비율로 사용하였다. 따라서 총 배합조건 수는 표 6에서 보듯이 대조구를 제외하고 2-Mix, 3-FL, 3-PC로 18가지이다.

상기의 재생골재의 배합비를 유지하며 강도발현을 위하여 물-결합재 [비 물/(시멘트+플라이애쉬)비]를 35%로 고정시켜 강도와 함께 작업성을 고려하였다. 대조구는 상기 천연골재로 첨가제 없이 28일 압축강도 210 kg/cm<sup>2</sup>을 얻기 위한 배합이며, 모든 배합설계는 채석골재 사용시의 조건으로 수행되었다. 이에 따른 상세한 배합비는 표 6과 같다.

Table 6 Mix proportion to select optimum mix-design of normal concrete and recycled concrete mixtures

Mix	W/ (C+FL)	FL	PC			Unit Weight(Kg/m <sup>3</sup> )				
			C	FL	FA	CA	RCA			
Control	4%	0%	0%	404	0	761	985.6	0		
				500	0	643	964.5	0		
Normal	3%	10%	0.5	1.0	1.5%	500	0	643	964.5	0
			0.5	1.0	1.5%	500	100	643	964.5	0
			0%	1.2	1.5	2.0%	500	0	643	1023
Recycled	3%	10%	2.0	2.2	2.5%	450	50	643	1023	1023
			2.0	2.2	2.5%	450	50	643	1023	1023
			2.5	2.7	3.0%	400	100	643	1023	1023

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

### 2.2.2. 시험 방법

원통형 공시체 (10 x 20cm)를 각 배합조건 별로 7개씩 제조하여 압축강도를 측정하였으며, 분석시에는 보다 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해 최저치와 최고치를 제외하였다. 제조된 공시체는 1일 후 탈형 하여 25°C의 물에 수중양생 시켜 28일 강도를 측정하였다. 압축강도 시험으로부터 결정된 최적의 유동화제 비율 만큼 각 플라이애쉬 함량마다 사용하여 휨 및 인장강도를 측정하였으므로 이에 대한 배합조건은 2-Mix, 3-FL, 1-PC로 총 6가지이다.

휨강도 측정을 위하여 폭 9, 높이 12, 길이 52cm(지간 48cm)의 빔 공시체를 제조하였으며 그 수는 각 배합조건 당 5개씩이며, 인장강도 측정을 위해서는 같은 수의 원통형 공시체 (10 x 20cm)를 제조하였다. 모든 공시체는 같은 방법으로 양생 시켜 28일만에 강도측정에 사용하였다. 또한 재생콘크리트의 장기강도 특성을 비교 관찰하기 위하여 적정 플라이애쉬를 10% 혼입한 콘크

리트와 플라이애쉬를 혼입하지 않은 콘크리트의 원통형 공시체를 5개씩 제조하여 7, 14, 28, 90일 후에 압축강도 증가 경향을 분석하였다.

휨 강도는 보 공시체에 대하여 3점 휨 재하시험으로, 인장강도는 원통형 공시체에 대한 할열인장 시험(KS F 2423)으로 그리고 탄성계수는 원통형 공시체의 압축강도 시험시 KS F 2438에 의하여 측정하였다. 이 모든 시험에서도 최저치와 최고치를 제외한 값들만 분석에 사용하였다.

파괴시험을 위한 공시체의 크기는 휨강도 공시체와 같으나 모든 공시체에 공히 3mm 폭의 초기 균열비 0.3의 균열을 보의 중앙 하변에 만들었고 보높이대 지간(S/W) 비는 4를 기준으로 하였다. 양생은 상기와 같은 방법으로 하였고 재령 28일에 3점 휨 시험방법에 의하여 재하속도 2.6kg/sec의 정하중을 재하 하였다. 이때 보 중앙의 처짐을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 보하단 초기균열의 양쪽에 그림 1과 같이 설치하였으며, 공시체 파괴 후 초기균열의 길이를 정확히 재었다.

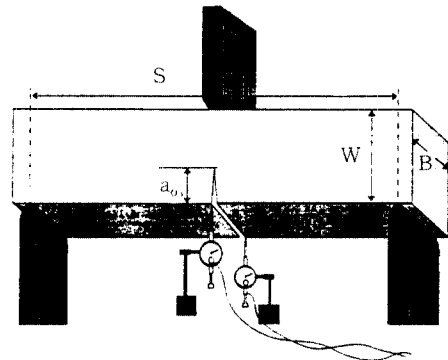


Fig. 1 Illustration of instrumentation for 3-point bend test

하중-처짐 곡선으로부터 그림 2에서와 같이  $P_i$ ,  $P_{max}$ ,  $d_{P_i}$ ,  $d_{P_{max}}$ 를 구하였으며 이 값들과 유효 균열모델(Effective Crack Model : ECM)을 이용하여 파괴인성( $K_{IC}$ )을 구하였다.

식 1은 Karihaloo와 Nallathambi에 의하여 개발된 ECM 식으로 문헌 9, 11, 12, 13에 보다 상세히 제시되었다.

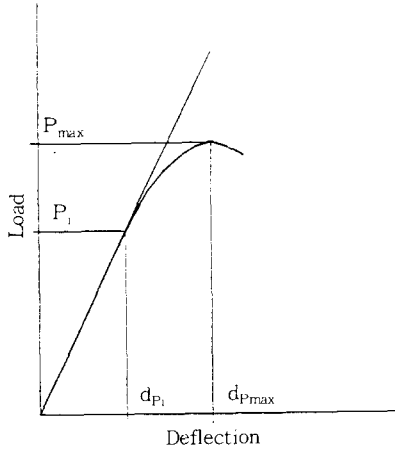


Fig. 2 Description of load-deflection information(after Karihaloo & Nallathambi)<sup>(12)</sup>

$$K_{IC} = 1.13782 \sigma_n \sqrt{a_e} F_1(\alpha_e) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_e = a_e/W$ 로 보 높이에 유효균열길이 비,  $a_e$ 는 유효균열길이를 최대하중시까지 진전된 균열길이이며,  $\sigma_n = 6M/(BW^2)$ 이고 이때  $M = (P_{max} + wS/2)S/4$ 이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 강도

그림 3은 일반콘크리트, 그림 4는 재생콘크리트에 대한 플라이애쉬와 함께 유동화제를 사용하였을 때 작업성 변화에 따른 강도변화를 나타내었다. 그림에서 막대위의 숫자 중 위의 것은 슬럼프 측정치(cm)이고 아래 수치는 유동화제 첨가량(%)이다. 슬럼프 값 14cm~18cm에서 플라이애쉬를 0, 10% 첨가한 일반콘크리트는 300kg/cm<sup>2</sup> 이상의 강도를 보인 반면 같은 조건의 재생콘크리트는 250~300kg/cm<sup>2</sup>의 강도를 보였다. 한편 플라이애쉬 20% 첨가는 일반콘크리트나 재생콘크리트 모두 플라이애쉬 10%에 비해 상대적으로 훨씬 낮았으며 재생콘크리트의 경우 대조구보다 조금 낮은 강도를 보였다.

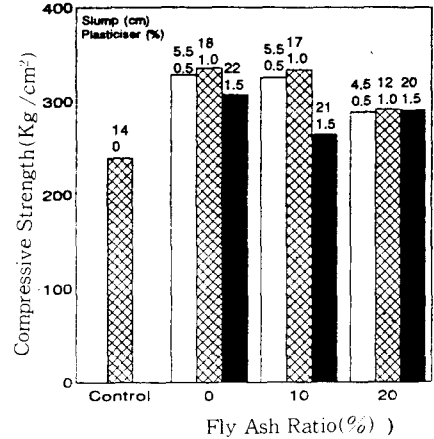


Fig. 3 Compressive strength of normal concrete based on slump controlled by plasticiser

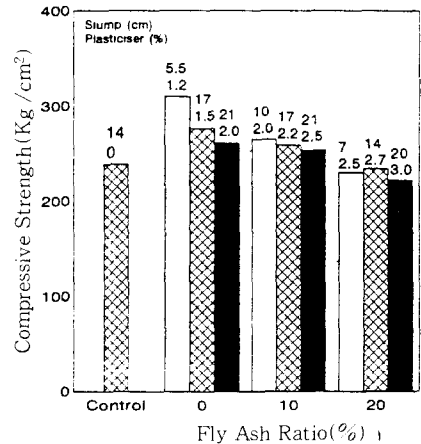


Fig. 4 Compressive strength of recycled concrete based on slump controlled by plasticiser

한편 그림에서 알 수 있듯이 같은 수준의 슬럼프 값을 얻기 위하여 재생콘크리트에는 보다 많은 양의 유동화제를 첨가하여야 했다. 이는 재생콘크리트가 훨씬 워커빌리티가 나쁘다는 것을 나타내는 증거라 할 수 있다. 또한 재생콘크리트는 유동화제의 첨가량에 의해 슬럼프 값이 크게 변함에도 강도에 큰 영향을 받지 않았다.

그림 5, 6, 7은 플라이애쉬비에 따라 재생콘크리트의 경우 적정 유동화제 량인 2, 2.2, 2.7% 넣고, 일반콘크리트의 경우 유동화제를 모두 1% 넣은

콘크리트에 대한 휨강도, 인장강도 및 탄성계수를 나타내었다. 플라이애쉬 0, 10% 사이에서는 그 함량차이 때문에 휨강도와 인장강도 모두 별 차이를 보이지 않았으나 20%는 앞의 두 경우보다 다소 차이를 보였다. 또한 재생콘크리트는 전반적으로 일반콘크리트보다 낮은 값을 보였다.

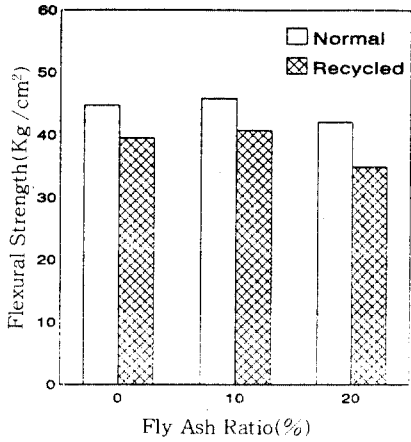


Fig. 5 Flexural strength of normal and recycled(50%) concretes

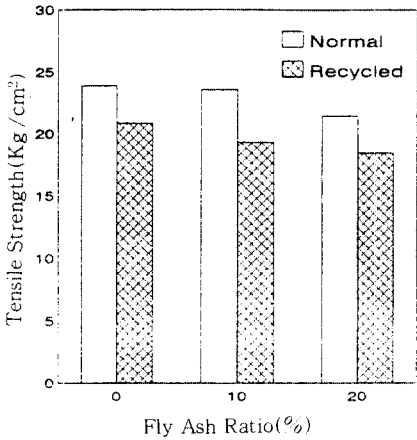


Fig. 6 Tensile strength of normal and recycled(50%) concretes

그림 7에서 보듯이 일반콘크리트의 탄성계수는 플라이애쉬의 함량 증가에 따라 현저히 낮아지는 경향을 보였으나 재생콘크리트에서는 도리어 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 플라이애쉬

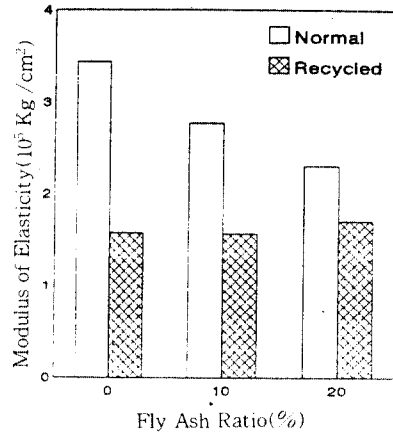


Fig. 7 Elastic modulus of normal and recycled(50%) concretes

가 재생콘크리트의 탄성계수에는 거의 영향을 미치지 않던가 또는 향상효과를 가져오는 것으로 나타났다.

일반적으로 재생콘크리트는 그 탄성계수가 경우에 따라 일반 콘크리트의 1/2 정도까지도 매우 낮게 나타나는데, 이는 비교적 연약하며 공기함량이 높은 재생 물탈부분의 존재 때문인 것으로 분석되고있다<sup>(3,16,17)</sup>. 하지만 플라이애쉬 함유 재생 콘크리트가 같이 플라이애쉬를 섞은 일반 콘크리트에 비해 탄성계수 저하가 없는 현상은 이것이 공극이 큰 재생콘크리트 내부에서 일종의 미세충전재(micro filler) 역할을 하기 때문인 것으로 보여진다.

콘크리트에 플라이애쉬 첨가는 강도저하를 가져오는데 이는 근본적으로 결합재인 시멘트를 플라이애쉬로 대체하므로 인한 단위 시멘트 량의 감소에 기인한 것이다. 하지만 플라이애쉬 첨가는 그 외에 많은 이점이 있는 것으로 알려져있고, 또한 단위 시멘트 량을 절감하여 생산단가를 낮추는 이점도 있다. 따라서 재령 28일에 소요수준 이상의 강도를 얻을 수 있는 경우 플라이애쉬의 첨가는 상기 사항을 고려할 때 유리한 것으로 볼 수 있다.

또한 유동화제 량의 조정과 플라이애쉬의 사용으로 기존의 쇄석골재를 사용한 배합설계 방법을 이용하여 재생콘크리트 배합시 소요의 작업성을

얻을 수 있었다. 따라서 다음절부터는 일반콘크리트 구조물의 소요강도 수준인 대조구 이상의 강도를 얻은 플라이애쉬0, 10%와 유동화제 2, 2.2% 혼입된 재생콘크리트를 제조하여 제 특성을 비교 고찰 하였다.

### 3.2. 장기 강도

재생콘크리트의 장기강도특성을 고찰하기 위하여 플라이애쉬를 10% 혼입한 콘크리트와 무 혼입 콘크리트의 7, 14, 28, 90일 후에 압축강도 경향을 분석하였다. 그림 8의 각 점은 각각의 재령에서 평균값이며 각 곡선은 이 점들에 대한 power regression을 통하여 얻어진 것이다.

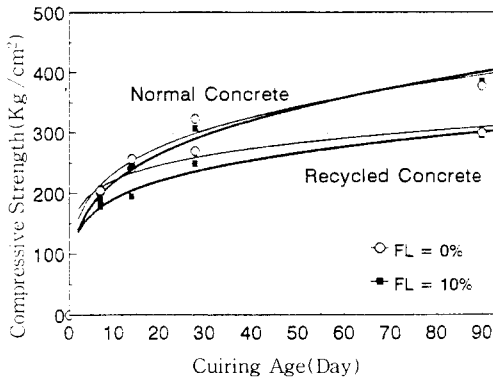


Fig. 8 Change of compressive strength by curing day

일반콘크리트의 경우 플라이애쉬가 10% 섞인 콘크리트는 초기에 다소 낮은 압축강도를 보였으나 재령 90일에는 더 높은 강도를 보여 시간이 지남에 따른 강도의 증가 비율이 더 큼을 보여 주었다. 재생콘크리트에서도 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 초기에 비하여 시간이 갈수록 강도 증가폭이 더 커짐을 보여주고 있다. 하지만 재령 90일까지도 플라이애쉬를 혼입하지 않은 것이 다소 높은 강도를 보였으나 그 차이가 점차 줄어들어 가는 것을 알 수 있다.

따라서 플라이애쉬의 사용은 장기적으로 일반 콘크리트는 물론 재생콘크리트의 압축강도도 증가 시키는 것을 알 수 있어 앞서 언급한 특성결과도

일치한다. 하지만 본 연구는 연구기간의 제한 등으로 최대 90일에 대하여 시행되어 보다 긴 기간의 장기강도 측정이 필요한 것으로 보여진다.

### 3.3. 응력-변형률 거동

재생콘크리트의 응력-변형률 거동을 규명하기 위하여 압축응력의 변화에 따른 변형률을 측정하였다. 압축응력-변형률 측정에서 얻어진 응력-변형률 곡선의 대표적인 것을 그림 9에 보여주고 있다. 플라이애쉬를 첨가하지 않은 일반콘크리트는 초기에 기울기가 훨씬 더 커서 강성(stiffness)이 높게 나타났으나 일정수준 이후에 기울기가 낮아지는 현상을 보였다. 반면에 플라이애쉬를 10% 혼입한 콘크리트는 처음에는 기울기가 낮아 강성이 낮았으나, 끝까지 그 기울기를 유지해 높은 응력수준에서도 상대적으로 강성을 유지하는 특성을 보였다.

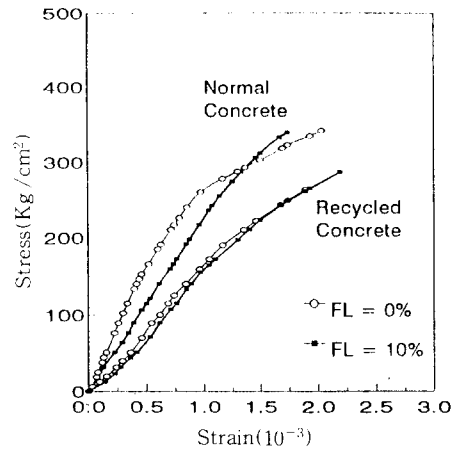


Fig. 9 Compressive stress-strain curves

재생콘크리트의 경우 플라이애쉬의 혼입에 따른 차이가 일반콘크리트에 비하여 매우 적었으나, 전체적인 곡선의 기울기는 일반콘크리트에 비하여 낮았다. 이는 재생콘크리트가 같은 응력수준에서의 일반콘크리트에 비해 변형이 상대적으로 크다는 것을 나타내는 것이다. 이와 같은 결과는 기존의 연구<sup>(16,17)</sup>를 통하여도 보여졌으며, 두 곡선이

매우 흡사한 것은 플라이애쉬가 재생콘크리트의 변형특성에 어떤 영향을 미치지 못함을 보여주는 증거라 하겠다. 이와 같은 현상은 이미 앞의 탄성계수 변화에서도 나타났던 사실을 확인한 것이라 하겠다.

### 3.4. 파괴 인성

재생콘크리트의 파괴인성( $K_{IC}$ )을 일반 콘크리트와 비교 조사하기 위하여 초기균열( $a_0$ )을 낸 후에 대하여 파괴시험을 수행 하였으며 대표적인 하중 처짐 곡선을 콘크리트 종류 및 플라이애쉬 첨가비를 별로 그림 10에 도시하였다. 두 콘크리트 모두 초기에 선형부분을 보였으며 초기균열의 끝에서 균열이 생성되기 시작 하면서 비선형을 보였고 최고점을 지나 얼마 후 보는 치명적 파괴(catastrophic fracture) 모드를 보이며 두 동강으로 파괴되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 재생골재 콘크리트의 하중처짐곡선의 기울기는 일반콘크리트보다 현저히 낮게 나타났으며, 이는 탄성계수가 낮고 변형율이 높은 사실에 기인한다. 극한하중도 표 7에서 볼 수 있듯이 일반콘크리트에 비하여 낮아 결과적으로 낮은 파괴인성치로 나타났다.

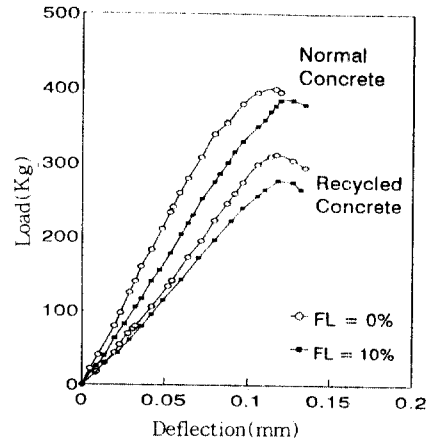


Fig. 10 Load-deflection curves from fracture test

파괴인성치는 재료가 급속파괴(fast fracture)에 대하여 견디는 힘을 나타내는 지수이므로 재생콘크리트는 일반 콘크리트보다 낮은 파괴저항력을 지닐 것을 알 수 있었다. 한데 이 낮은 파괴인성은 Kim 등<sup>(16)</sup>이 제시 하였듯이 재생골재와 새로운 몰탈의 시멘트 풀과의 낮은 접착력에 기인한다. 즉 두 재료간의 낮은 접착력은 미세균열의 진행을 저지하는 효과가 약하므로 적은 파괴에너지로 균열이 쉽게 진전되게 하여 낮은 하중에서 파괴되는

Table 7 Results of 3-point bending test for fracture toughness

Concrete Type	Fly Ash (%)	Beam dimension(mm)			$a_0/W$	$P_i$ (Kg)	$P_{max}$ (Kg)	$d_{P_i}$ (mm)	$d_{P_{max}}$ (mm)	$K_{IC}$ (Kg/m <sup>3/2</sup> )
		S	B	W						
Normal	0	480	88.5	120.0	0.300	267.6	357.4	0.047	0.088	0.1115
	0	480	89.0	121.0	0.298	289.8	387.3	0.110	0.157	0.0929
	0	480	89.0	121.0	0.298	389.7	405.0	0.140	0.177	0.1086
	Mean									0.1043
"	10	480	91.5	121.5	0.296	259.8	365.8	0.065	0.177	0.0993
	10	480	89.0	122.0	0.295	249.8	384.7	0.072	0.120	0.0918
	10	480	90.0	121.5	0.296	336.3	421.7	0.121	0.170	0.1031
	Mean									0.0981
Recycled	0	480	89.0	120.3	0.293	319.8	389.2	0.094	0.124	0.0906
	0	480	88.0	121.5	0.296	279.8	332.8	0.086	0.130	0.0933
	0	480	87.0	121.5	0.296	294.8	312.3	0.095	0.115	0.0805
	Mean									0.0881
"	10	480	91.0	121.5	0.296	250.8	297.3	0.152	0.218	0.0774
	10	480	89.0	122.0	0.295	191.6	221.5	0.086	0.120	0.0587
	10	480	88.0	121.0	0.298	325.0	371.7	0.294	0.308	0.0931
	Mean									0.0764



원인이 된다. 이는 Ong 등<sup>(25)</sup>의 결과와도 일치하며 따라서 재생콘크리트의 파괴저항력 향상을 위해서는 재생원재가 콘크리트 내부에서 집착이 잘 되도록 하는 방법과 재생원재 사용 비율을 조절하는 방법을 생각할 수 있다.

한편 플라이애쉬의 첨가는 재생콘크리트는 물론 일반 콘크리트의 파괴인성도 저하시키는 역할을 하였다. 즉 플라이애쉬 10% 첨가된 일반콘크리트에서 약 6%, 재생콘크리트는 약 13% 파괴인성이 저하되었으며 이는 압축강도에서와 유사한 결과이다. 따라서 플라이애쉬의 첨가는 강도 및 파괴인성 측면에서는 재생콘크리트에 좋은 영향을 주지는 못하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구는 폐콘크리트로부터 얻어진 재생원재를 50% 혼입·제조하는 재생콘크리트의 작업성 향상 및 강도증진을 위하여 유동화제와 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트를 제조하였으며, 각종 특성을 일반콘크리트와 비교하여 그 실용성 여부를 고찰한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재생콘크리트에 유동화제를 사용하여 물-시멘트비를 35% 까지 낮추어도 기존의 배합설계의 수정없이 좋은 작업성(슬럼프= $\pm 16\text{cm}$ )을 얻었으며, 이때 플라이애쉬 첨가 없이 28일 압축강도를  $280\text{kg}/\text{cm}^2$  이상 얻었다. 또한 플라이애쉬를 10% 첨가한 경우는  $250\text{g}/\text{cm}^2$  이상, 플라이애쉬 20%의 경우  $220\text{kg}/\text{cm}^2$  이상의 28일 강도가 얻어진 재생콘크리트로 일반 구조물에 필요한 콘크리트의 강도를 얻을 수 있음을 보여주었다.

2. 재생콘크리트는 각종 강도와 파괴인성이 일반콘크리트보다 낮았고 특히 탄성계수는 일반콘크리트에 비하여 현저히 낮았으며 또한 같은 응력 상태에서 큰 변형율을 보였다.

3. 플라이애쉬의 사용은 일반콘크리트와 재생콘크리트 모두에 있어서 장기강도를 보다 더 증진시키는 효과를 보여주었다. 또한 플라이애쉬의 사용이 일반콘크리트에서는 탄성계수의 감소와 변형율의 증가를 보였으나 이와 달리 재생콘크리트에서는 그러한 변화가 일어나지 않았다.

4. 결국 플라이애쉬의 첨가는 일반적으로 알려진 여러 가지 장점을 가져옴에 비하여 각종 강도 및 파괴인성 등에 있어서는 저하를 유발하므로 플라이애쉬의 첨가여부 및 그 비율은 신중히 고려해 선택해야 할 것으로 보여진다.

5. 상기의 결과 재생콘크리트로부터 일반구조물에 필요한 압축강도를 얻을 수 있었으나 낮은 탄성계수, 높은 변형율 등은 아직 문제시 되었다. 또한 보다 일반화된 결과는 다양한 재료에 대한 실험을 통하여 이루어 질 수 있으며, 현장에의 적용을 위하여는 각 현장에 사용될 재료에 대한 사전 시험을 통하여 이루어져야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 1993년도 학술진흥재단 지방대학중점육성과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 226, "Use of fly ash in concrete," (ACI 226.3R-87), ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 5, Sept.-Oct. 1987, pp 381-409
2. Akhtaruzaman, A. A. and Hasnat, A., "Properties of concrete using crushed brick as aggregate," Concrete International, Feb. 1983, pp. 58-63.
3. Buck, A. D., "Recycled concrete as a source of aggregate," ACI Journal, Title No. 74-22, May, 1977, pp. 212-219
4. Bairagi, N. K., Vidyadhara, H. S. and Ravende, K., "Mix design procedure for recycled aggregate concrete," Construction & Building Materials, Vol. 4, No.4, Dec. 1990, pp. 188-193.
5. Bauchard, M., "The use in roads of aggregates made from demolition materials," Reuse of Demolition Waste, Proceedings, 2nd International Symposium by RILEM, Kasai, Y. Ed., Chapman and Hall, 1988, pp. 719-725.
6. "Demolition and reuse of concrete and masonry," Vol. 2, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium, Ed. by Y. Kasai, Tokyo, Japan, Nov. 1988.

7. "Demolition and reuse of concrete and masonry," Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Ed. by E. K. Lauritzen, Odense, Denmark, Oct. 1993.
8. Forster, S. W., "The use of recycled PCC as aggregates in PCC pavements," FHWA, Office of Engineering and Highway Operation Research Development, Washington, D.C., 1985.
9. "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
10. Hansen, T. C. and Narud H., "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," Concrete International, Jan. 1983, pp. 79-83.
11. 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
12. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "Effective crack model for the determination of fracture toughness( $K_{fC}$ ) of concrete," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 4/5, 1990, pp. 637-645.
13. 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.
14. 김광우, 박제선. "폐 콘크리트의 재활용-미국 FHWA 시범 프로젝트(DP #47)의 소개," 기술기사, 대한토목학회지 1992. 10., PP. 42-47
15. 김광우, 박제선, 이봉학, 연규석, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 기술기사, 콘크리트학회지, 제6권 6호, 1994. 12., pp. 51-65.
16. 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, PP. 1992, 332-343
17. 김광우, 이봉학, 도영수, "재생콘크리트의 동결융해 저항성과 변형특성," 콘크리트학회논문집, 제4권 4호, 1992, PP. 115-122
18. 김무한 외. (1986), 잔 골은골재로서 폐기콘크리트를 사용한 콘크리트에 관한 실험적 연구(제1보-제4보), 대한건축학회 학술발표회 논문집 제6권 제1호.
19. 김진만, 유광우, 남상일, 김무한. (1993), 재생골재 콘크리트의 구조체 적용성에 관한 실험적 연구(제 2보), 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.
20. 남상진, 이상수, 유광우, 박정일, 김진만, 김무한. (1993), 재생골재 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적 연구(제 2보), 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.
21. 윤기원, 김기철, 한철규, 김무한. (1993), "재생골재 콘크리트의 강도조기추정 및 비 파괴시험 적용성에 관한 연구(I)-제2보 비 파괴시험," 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.
22. 이상수, 최민수, 김진만, 남상일, 김무한. (1993), 재생골재 콘크리트의 구조체 적용성에 관한 실험적 연구(제 1보), 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.
23. 최진성, 윤병수, 임정수, 김진만, 남상일, 김무한. (1993), 재생골재 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적 연구(제 1보), 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 8집, 건국대학교.
24. 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.
25. Ong, K. C. G. and Sri Ravindrarajah, R. "Mechanical properties and fracture energy of recycled aggregate concrete," SEM/RILEM Int'l Conf. on Fracture of Concrete and Rock, Houston, TX, Ed. by Shah and Swartz, June 1987, pp. 150-158
26. Pauw, C. D. and Lauritzen, E. K., "Disaster planning, structural assesment, demolition and recycling," Report of Task Force 2 of RILEM Technical Committee 121-DRG, Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E & FN Spon, London, 1994
27. "Utilization of waste materials in civil engineering construction," Proceedings of the ASCE National Convention, Ed. by H. I. Inyang and K. L. Bergeson, New York, 1992

(접수일자 : 1995. 1. 25)