

## 폐플라스틱 재활용 폴리머콘크리트의 강도와 응력-변형률 특성

조병완<sup>1)\*</sup> · 구자갑<sup>1)</sup> · 박승국<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과

(2004년 4월 20일 원고접수, 2005년 5월 15일 심사완료)

### Properties of Strength and Stress-Strain of Recycled-Plastic Polymer Concrete

Byung-Wan Jo<sup>1)\*</sup>, Jakap Koo<sup>1)</sup>, and Seung-Kook Park<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received April 20, 2004, Accepted May 15, 2005)

#### ABSTRACT

The use of Polymer Concrete (PC) is growing very rapidly in many structural and construction applications such as box culverts, hazardous waste containers, trench lines, floor drains and the repair and overlay of damaged cement concrete surfaces in pavements, bridges, etc. However, PC has a defect economically because resin which be used for binder is expensive. Therefore the latest research is being progressed to replace existing resin with new resin which can reduce the high cost. Here, Polymer concrete using the recycled PET(polyethylene terephthalate) has some merits such as decrease of environmental destruction, decrease of environmental pollution and development of new construction materials. The variables of this study are amount of resin, curing condition and maximum size of coarse aggregate to find out mechanic properties of this. Stress-strain curve was obtained using MTS equipment by strain control. The results indicated that modulus of elasticity was increased gradually in an ascending branch of curve, as an increase of resin content. Compressive strength was the highest for resin content of 13%. And Compressive strength was increased as maximum size of coarse aggregate increases. The strain at maximum stress increases with an increase of resin content and size of coarse aggregate. For the descending branch of stress-strain curve the brittle fracture was decreased when it was cured at the room temperature compared to high temperature.

**Keywords :** stress-strain curve, polymer concrete, compressive strength, the strain at maximum stress, unsaturated polyester resin

## 1. 서 론

폴리머콘크리트는 시멘트 콘크리트와 비교하여 높은 강도와 내구적 성능 등 여러면에 있어 우수한 면을 가지고 있다. 즉 높은 인장·휨·압축강도, 양호한 내약품성, 내마모성, 방수성, 절연성, 접착성을 특징으로 하고 있으며, 내구성이 좋을 뿐만 아니라 고강도로서 단면의 치수를 줄일 수 있고, 중량 감소를 통해 재료비나 운반 설치비의 절감을 가져올 수 있다. 하지만 이런 여러 장점에도 불구하고, 폴리머콘크리트의 실용화에 있어 어려움이 따르는 것은 결합재로 사용되는 수지의 비용이 높아 경제적인 차원에서 불리한 점을 가지고 있기 때문이다. 결합재로 사용되는 수지에는 에폭시 수지, 불포화 폴리 에스터 수지, 비닐 에스터 수지 및 MMA 모노머인데 일반적으로 폴리머콘크리트용으로는 불포화 폴리 에스터 수지가 사용된다. 따라서

본 연구에서는 결합재로 사용하는 수지를 PET(Poly Ethylene Terephthalate)를 재활용한 불포화 폴리 에스터 수지로 대체하여 사용함으로써, 폴리머콘크리트의 경제성을 향상시키고, 폐플라스틱의 재활용을 증진시키고자 하였다. 또한, 현재까지 PET를 재활용한 폴리머콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구는 아직까지 기본적인 강도 측정 연구가 대부분으로 역학적인 특성에 대한 심도 있는 연구는 미흡한 실정이므로, 변형률을 제어한 압축실험을 실시함으로써, 수지의 변화량, 양생조건의 변화, 굵은 골재의 크기에 따른 역학적 특성과 응력-변형률 거동을 규명하는데 본 연구의 목적을 두었다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 불포화 폴리 에스터 수지는 코발트계 경화 촉진제가 첨가되어 있는 제품으로, Table 2와 같이

\* Corresponding author  
E-mail : joycon@hanmail.net  
©2005 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity (25°C)	Viscosity (mPas)	ACID valus (mg KOH/g)	Non volatile materials (%)
1.13	1,300	5	63

**Table 2** Unsaturated polyester resin(UP) formulation

Components	Recycled PET	Propylene glycol diethylene glycol dipropylene glycol	Terephthalic acid Maleic anhydride	Styrene monomer (SM)
Percent by weight	29.1 %	19.0 %	14.9 %	37 %

**Table 3** Physical properties of aggregates

Type	Size (mm)	Specific gravity	Fineness modulus	Absortion (%)
Coarse aggregate	8-19	2.69	6.24	0.80
Fine aggregate	0.1-0.6	2.60	2.48	0.35

**Table 4** Chemical compositions of Filler

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Ig.loss
2.23	0.25	0.09	53.7	0.66	42.4

**Table 5** Mixtures of specimens (unit : wt%)

Mixtures	Polymer concrete(wt.%)					
	UP*	Filler	Coarse agg. (mm)			Fine agg.(mm)
			8	13	19	
CL(H)-R9-G8	9	9	47			35
CL(H)-R9-G13				47		
CH-R9-G19					47	
CL(H)-R11-G8	11	11	45			33
CL(H)-R11-G13				45		
CH-R11-G19					45	
CL(H)-R13-G8	13	13	43			31
CL(H)-R13-G13				43		
CH-R13-G19					43	
CL(H)-R15-G8	15	15	45			29
CL(H)-R15-G13				45		
CH-R15-G19					45	

※ C X(X) R# - G#  
 X : L = Curing at room temperature(20°C), H = Curing at high temperature(80°C)  
 R# : Resin contents = 9%, 11%, 13%, 15%  
 G# : Maximum size of coarse aggregate = 8mm, 13mm, 19mm  
 UP\* = Unsaturated polyester resin

29.1%의 재활용 PET를 포함한 재생 PET 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였다. 또한 중량비율로서 37%의 스타이렌 모노머에 희석되어 있으며 수지 특성은 Table 1과 같다.

굵은골재는 최대치수가 8mm, 13mm, 19mm로, 강원도

춘천군 남면 광관리에서 생산되는 골재를 사용하였다.

충전재는 가격이 저렴하고 구입이 용이하며, 큰 비표면적을 가지고 있는 탄산칼슘계를 사용하였다. 사용된 골재 특성과 충전재(Filler) 성분은 Tables 3~4와 같다.

## 2.2 실험체 제작 및 실험방법

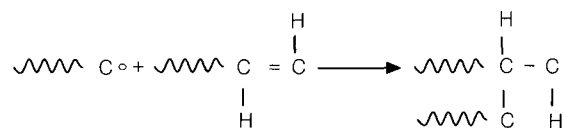
굵은골재와 잔골재, 수지와 충전재를 중량비로 하여 배합을 하였으며, 변수는 수지의 양과 양생온도, 굵은골재의 크기에 변화를 주어 공시체를 제작하였다. 배합된 재료는  $\phi$  75×150mm인 원형 몰드에 타설되었고 4시간동안 상온(20°C)에서 유지되었으며, 탈형 후, 양생조건(20°C와 80°C 양생)에 따라 양생을 하였다. 측정하기 24시간 전에 양생을 종결하였으며, U.T.M. 안에 공시체를 거치시킨 후, 0.003mm/sec의 속도로 변위제어를 하여, 압축실험을 실시하였다. 공시체의 측면위는 공시체의 중앙부에 설치된 750mm의 길이를 가진 Compressometer를 사용하여 측정하였다. Table 5는 PET재활용 폴리머콘크리트의 배합 타입을 나타낸 것이다. PET 재활용 폴리머콘크리트의 압축강도, 최대변형률, 탄성계수의 특성을 변수인 수지함량과 굵은골재의 최대치수, 양생조건에 따라 분석하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 압축강도 특성

Fig. 3은 배합에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 압축강도는 수지함량이 13%까지는 수지량의 증가에 따라 압축강도도 동시에 증가하였으며, 수지량이 15%일 경우에는 13%보다 낮거나 비슷한 압축강도를 보여 주었다. 또한, 수지의 함량이 13%일때가 가장 적절한 배합 비임을 말해준다. 이것은 수지함량이 부족하면, 결합재 간에 충분한 비빔효과가 발생하지 않기 때문이며, 수지함량이 많아지면, 골재 사이에 들어가는 수지량의 과다로, 수축응력이 잔존하거나 수축균열이 발생하여 강도에 영향을 주는 것으로 파악된다.

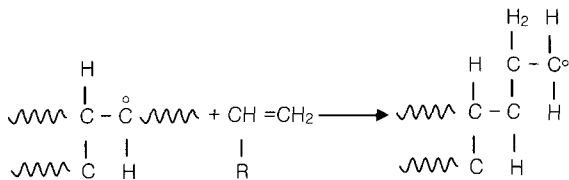
PET 재생 불포화 폴리에스터 수지는 불포화 결합에 대하여 모노머 래디칼 및 폴리머 래디칼의 부가 반응이 아래의 Fig. 1 과 같이 일어나게 된다. 이때 폴리머 래디칼에 모노머 분자가 반응하면 Fig. 2 와 같이 된다.



**Fig. 1** An additional reaction between a monomer radical and a polymer radical

**Table 6** Testing result

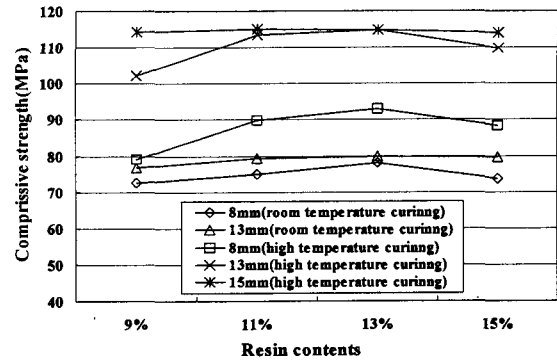
Mixtures	Compressive strength (MPa)	Modulus of Elasticity(GPa)	The strain at maximum stress(%)
CL-R9-G8	72.62	26.510	3.95
CL-R11-G8	74.62	28.699	4.05
CL-R13-G8	77.9	29.708	4.49
CL-R15-G8	73.5	30.379	4.65
CL-R9-G13	76.73	26.693	4.49
CL-R11-G13	79.28	28.629	4.82
CL-R13-G13	79.97	30.254	5.41
CL-R15-G13	79.58	30.508	5.78
CH-R9-G8	78.99	26.593	3.93
CH-R11-G8	89.96	28.661	4.07
CH-R13-G8	92.90	29.849	4.33
CH-R15-G8	88.30	30.627	4.63
CH-R9-G13	102.12	26.600	4.48
CH-R11-G13	113.39	28.547	4.83
CH-R13-G13	114.66	30.519	5.72
CH-R15-G13	109.76	30.403	5.81
CH-R9-G19	114.17	26.701	4.17
CH-R11-G19	114.95	28.726	5.27
CH-R13-G19	114.76	30.730	6.11
CH-R15-G19	113.88	30.710	6.28



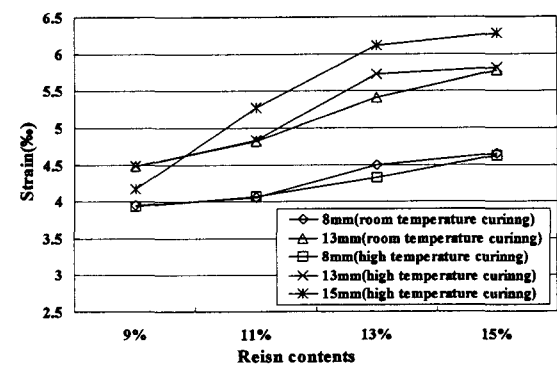
**Fig. 2** The reaction between a polymer radical and a monomer molecules

불포화 폴리에스터 분자쇄 중에는 불포화 결합이 1개 이상 존재하기 때문에 이 반응이 몇회 반복되면서 Fig. 1 과 Fig. 2 와 같은 매트릭스 형성이 종료되는데, 수지량이 어느량 이상 과다하면 매트릭스 형성을 지연시키는 것으로 판단된다.

동일한 조건의 배합에서 굵은골재의 최대치수 변화에 따른 압축강도의 변화를 살펴보면, 골재치수가 8mm에서 13mm로 증가하였을 때, 상온양생에서는 2-8%범위의 증가량을 보여주었으며, 고온 양생시에는 거의 25%정도의 증가량을 보여주었다. 이것은 골재의 최대치수가 증가함에 따라 상대적으로 골재사이에 들어가는 수지의 양이 증가함으로서 골재를 결합시켜주는 수지의 양이 충분한 부착효과를 발휘하기 때문인 것으로 고려된다. 한편, 상온양생보다 고온양생에서 압축강도의 증가량이 크게 나타난 것



**Fig. 3** compressive strength of specimens



**Fig. 4** The strains at maximum compressive stress

을 보면, PET재활용 폴리머콘크리트는 고온양생으로 고강도가 되면서, 골재최대치수의 영향이 증가하는 것으로 이해되어진다.

온도에 따른 실험결과, 골재최대치수가 8mm일 때는 8~20%정도의 압축강도 상승을 가져왔으며, 골재최대치수가 13mm에서는 압축강도 상승률이 33-47%의 값을 보여주었다. 이것은 폴리머콘크리트의 강도발현이 양생온도에 민감하게 반응하고 있음을 보여주며, 앞에서 언급한 골재최대치수변화에 따른 압축강도 그 증가량이 향상되었음을 알 수 있다. 이처럼 폴리머콘크리트가 고온일 때 강도의 증가율이 크게 나타나는 것은 결합재로 사용되는 수지가 유리전이온도에서 활발한 분자간의 운동으로 충분한 중합반응이 일어나 매트릭스를 형성함으로써 공극을 줄이고, 수지 결합정도가 강인하게 이루어지기 때문인 것으로 판단되었다.

### 3.2 최대 응력에서의 변형률

Fig. 4 와 같이, 수지함량이 증가함에 따라서 최대응력 부분에서의 변형률도 증가하고 있음을 보여준다. 이것은 수지의 연성적인 물성이 수지의 증가와 더불어 효과가 증가하기 때문인 것으로 파악된다. 그리고 그 값은 일반 콘

크리트가 0.002-0.003의 값을 갖는 것과 비교하면, PET재활용 폴리머콘크리트는 0.0039-0.063의 값을 보여줌으로서 더 큰 값을 나타내었다.

굵은골재 최대치수를 8mm에서 13mm로 변화하였을 때, 최대변형률은, 온도와는 상관없이, 13~24%의 변형률 증가량을 보였다. 이것 역시, 굵은골재의 크기가 커짐에 따라서, 상대적으로 골재를 결합시켜주는 수지가 충분히 확보되기 때문인 것으로 파악된다. 양생온도에 따른 최대응력시 변형률의 변화량은 0.2~ 5.7%로서 양생시 온도의 변화는 최대응력의 크기에는 영향을 미치나 최대응력시의 변형률에는 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

### 3.3 탄성계수

본 실험에서는 수지를 전체중량에 9,11,13,15%로 증가시켰으며, 그 결과, 수지함량이 증가함에 따라 탄성계수도 Fig. 3과 같이 증가하고 있음을 알 수 있다.( 그리고, 그 증가폭은 점점 줄어들었으며, 13%와 15%에서는 탄성계수가 유사한 값을 보여줌으로써, 13~15%의 수지함량에서 탄성계수가 최고치임을 나타내주고 있다.

PET재활용 폴리머콘크리트의 탄성계수는 양생방법과

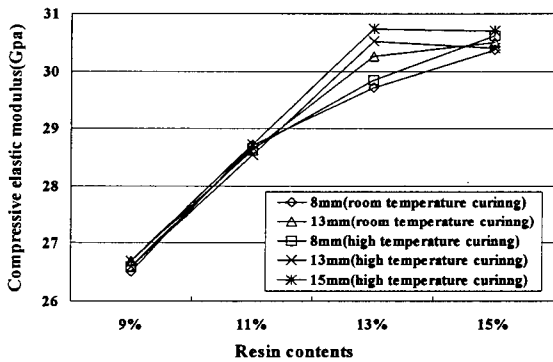


Fig. 5 Modulus of elastic

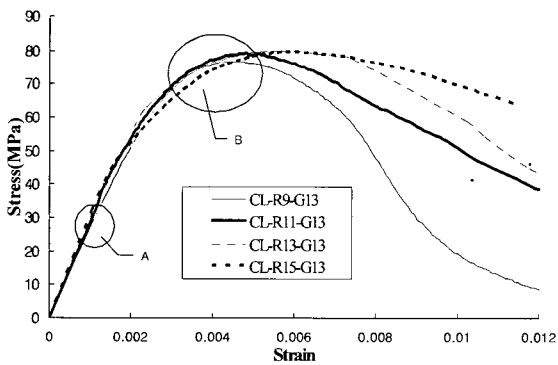


Fig. 6 Stress-strain curve with resin contents at curing at room temperature

굵은골재의 최대치수에 따라서는 상대적으로 크게 영향을 받지않고 비슷한 탄성계수를 유지하는 것으로 나타났다. 다시말해서, PET재활용 폴리머콘크리트의 탄성계수는 폴리머콘크리트의 결합재로 사용되는 수지의 함량에 따라서 그 값이 변화하는 것으로 나타났고, 양생과 골재크기 변화에 있어서는 상대적으로 작은 영향을 받았다.

### 3.4 압축 응력-변형률 곡선

Fig. 6은 수지함량에 따른 PET재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선을 보여주는 것으로, 곡선상의 상승부분인 A부분과 같이, 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 수지함량이 탄성계수에 영향을 끼침을 말해준다. 그리고 B부분은 최대변형률이 수지함량이 증가할수록 증가하는 양상을 보여준다(3.2절 참조). 하강부분에 있어서는 수지함량이 증가할수록 곡선의 기울기가 완만하게 감소함으로써, 콘크리트의 취성적인 경향을 저감시켜 주었다.

Figs. 7과 8은 굵은골재 최대치수에 변화를 준 것으로서, 상승부분의 기울기를 보면, 골재치수와는 상관없이 유사한 값을 보여주고 있으며, 정점부분에서는 압축강도와 최대변형률이 골재크기가 증가할수록 그 값은 증가하는

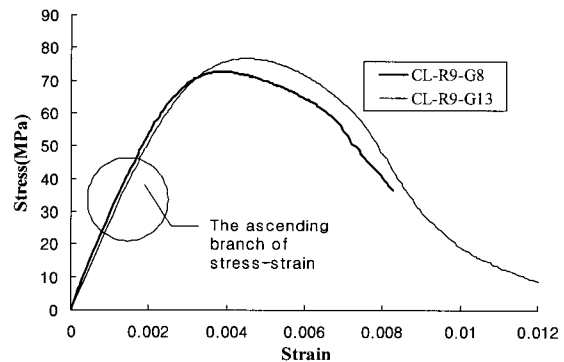


Fig. 7 Stress-strain curve with maximum size of coarse aggregate at curing at room temperature

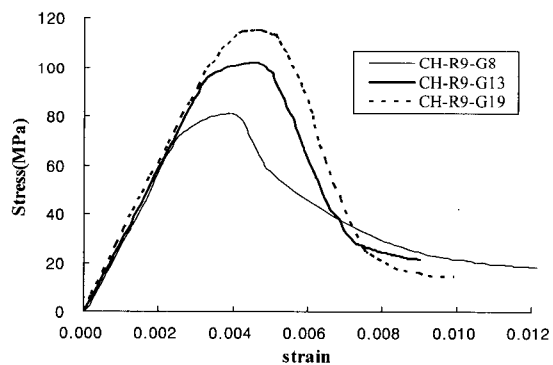


Fig. 8 Stress-strain curve with maximum size of coarse aggregate at curing at high temperature(80°C)

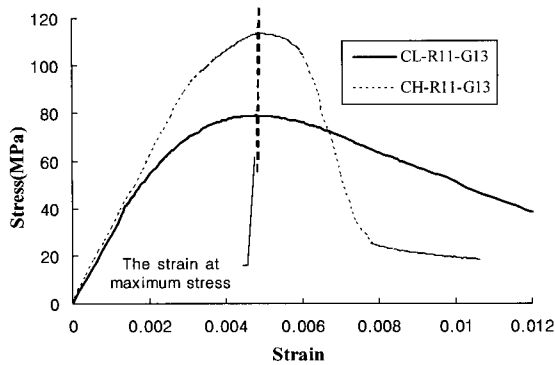


Fig. 9 Stress-strain curve with curing temperature

양상을 보여주었다. 한편 하강부분에 있어서는, 상온양생 일때는 기울기의 변화가 비슷하게 나타났으나, 고온양생일 때는, 골재의 크기가 증가하고 압축강도가 증가함에 따라서, 더 취성적인 경향을 보여주었다.

Fig. 9는 동일 공시체에 대해서 양생온도를 달리하여 얻어진 응력-변형률곡선으로 상승구간에서 탄성계수에는 큰 변화가 없이, 유사한 값을 보여주었다. 그리고 정점부분에 대해서는 압축강도는 증가하였고, 최대변형률은 크게 변화가 없었으며 이는 동일한 수지량을 사용한 효과로 판단된다. 하강곡선부분에 있어서는 고온양생일때 압축강도가 증가하면서 취성적인 경향을 보여주었다.

#### 4. 결 론

페플라스틱 재활용 폴리머콘크리트의 수지량, 양생온도, 굵은 골재 최대치수에 따른 강도와 응력-변형률 특성에 미치는 영향을 조사한바 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수지량, 양생온도, 굵은골재 최대치수가 증가할수록 압축강도는 증가하였으며, 특정한 수지량(13~15%)을 지나서는 압축강도의 큰 변화가 나타나지 않았다. 양생온도 증가는 골재사이 수지의 매트릭스 형성을 향상시킴으로써 압축강도가 증가한 것으로 판단된다.
- 2) 탄성계수의 변화는 수지량에 크게 영향을 받았으며 수지량에 따른 증가는 압축강도와 유사하였다.
- 3) 최대응력에서의 변형률은 수지량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 응력-변형률 곡선의 하강부는 수지량이 작을수록 양생온도가 상승할수록 취성적인 경향을 나타내었다.

- 4) 높은 압축강도를 얻기 위해서는 수지의 양을 증가시키기 보다는 고온의 양생과 최대치수가 큰 양질의 골재를 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단되었으며, 응력-변형률 곡선 하강구간에 대한 취성적인 파괴를 저감시키기 위해서는 고온양생보다는 상온에서의 양생이 효과적인 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 이장화 외 3인, “고강도 콘크리트의 실용화를 위한 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, vol.3 no.2, 1991, pp.140~145.
2. 장일영, 박훈규, “초고강도 콘크리트에 적합한 응력-변형률 모델과 응력분포 모델의 제안”, 콘크리트학회 논문집, 9권 5호, 1997, pp.197~206.
3. 장일영, 박훈규, 원종필, 윤영수, “고강도 및 초고강도콘크리트의 응력-변형률 모델 비교 평가 연구”, 콘크리트학회지, 9권 4호, 1997, pp.177~186.
4. 정영숙, “페비닐의 재활용에 있어서 무기성 Filler의 첨가에 따른 물성의 변화”, (사)신소재및부품개발연구회, 학술연구논문집, 2권, 1994, pp.4~17.
5. Hsu, H. T., *Flexural Behavior of Polymer Concrete Beams*, Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1984.
6. Martinez, A., Salla, J. M., Aros, M., and Saura, P., “Influence of Coupling Agents on Mechanical Properties of Polymer Concrete”, *Proceedings of the Fourth ICPIC*, 1984, pp.219~222.
7. Appa Rao, G. and Raghu Prasad, B. K., “Fracture Energy and Softening Behavior of High-Strength Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 2002, pp.247~252.
8. Salla, J. M. and Aguado, A., “The Effect of Addition Procedure of Silane Coupling Agents on the Behavior of Polymer Concrete”, *Proceeding of the Fifth ICPIC*, 1987, pp.219~222.
9. Tokyay, M. et. al., “Effect of Coarse Aggregate Size on Interfacial Cracking under Uniaxial Compression”, *Materials Letters*, 57, 2002, pp.828~833.
10. Yip, W. K., “Generic form of Stress-Strain Equations for Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.4, 1998, pp.499~508.

---

## 요 약

폴리머콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비해 강도와 내구적 성능 등 여러면에 있어 우수하여 건설현장에서의 벽체용 패널, 통선용 맨홀, 기계설비의 기초, 지하연결박스 등 다양한 용도로 개발되고 사용되어지고 있다. 그러나 폴리머콘크리트는 그 결합재로 쓰이고 있는 수지의 비용이 높아 경제적인 면에서 불리하여 기존 수지를 대체할 수 있는 결합재에 관한 연구가 필요하다. 여기서, PET를 재활용한 폴리머콘크리트는 산업폐기물을 재활용한 것이므로 경제적인 건설 소재가 될 수 있으며, 친환경적인 효과를 가져올 수 있기 때문에 현재 연구가 활발하게 이루어지고, 사용 영역이 확대 될 것으로 전망된다. 하지만 아직까지 PET재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 거동에 관해서는 기초적인 연구상태에 있다. 따라서, 본 연구에서는 폐 PET를 합성한 불포화 폴리에스터 수지를 폴리머콘크리트의 결합재로 이용하여 콘크리트를 제조하였으며, 수지량, 골재의 최대치수, 양생방법에 변화를 주었다. 그리고 변위제어가 가능한 M.T.S 장비를 사용하여 응력-변형률 곡선을 관찰하였다. 그 결과 PET 재활용 폴리머콘크리트의 압축강도는 수지의 함량, 굵은골재의 크기변화, 양생방법에 모두 영향을 받는 것으로 나타났다. 탄성계수의 변화는 수지의 함량이 크게 좌우하였으며, 굵은골재의 최대치수와 양생방법에서 크게 영향을 받지 않았다. 최대응력에서의 변형률은 수지의 함량과 굵은골재의 최대치수에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 응력-변형률 관계, 폴리머콘크리트, 압축강도, 변형률, 불포화 폴리에스테르 수지

---