

## 일축 하중을 받는 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형을 모델의 제안

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

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과

(2004년 3월 24일 원고접수, 2004년 6월 28일 심사완료)

### A Proposal of Stress-Strain Relations Model for Recycled-PET Polymer Concrete under Uniaxial Stress

Byung-Wan Jo<sup>1)</sup>, Rin-Gon Moon<sup>1)</sup>, and Seung-Kook Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-709, Korea

(Received March 24, 2004, Accepted, June 28, 2004)

#### ABSTRACT

Polymer concrete shows excellent mechanical properties and chemical resistance compared with conventional normal cement concrete. The polymer concrete is drawing a strong interest as high-performance materials in the construction industry. Resins using recycled PET offer the possibility of a lower source cost of materials for making useful polymer concrete products. Also the recycling of PET in polymer concrete would help solve some of the solid waste problems posed by plastics and save energy. The purposed of this paper is to propose the model for the stress-strain relation of recycled-PET polymer concrete at monotonic uniaxial compression and is to investigate for the stress-strain behavior characteristics of recycled-PET polymer concrete with different variables(strength, resin contents, curing conditions, addition of silane and ages). The maximum stress and strain of recycled-PET polymer concrete was found to increase with an increase in resin content, however, it decreased beyond a particular level of resin content. A ascending and descending branch of stress-strain curve represented more sharply at high temperature curing more than normal temperature curing. Addition of silane increases compressive strength and postpeak ductility. In addition, results show that the proposed model accurately predicts the stress-strain relation of recycled-PET polymer concrete

**Keywords :** recycled polyethylene terephthalate, polymer concrete, stress-strain model

#### 1. 서 론

폴리머는 고성능 재료로 평가됨에 따라 건설산업분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있으며 각종 제품이나 구조물에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 폴리머콘크리트는 종래의 시멘트 콘크리트에 비해 용도에 따라 경화시간 및 가사시간을 제어할 수 있고 조기에 고강도 발현이 가능하며 수밀성, 접착성, 내식성, 및 동결융해성 등이 우수할 뿐만 아니라 압축, 인장 및 휨강도 역시 현저히 높아 단면을 감소시킬 수도 있다. 폴리머콘크리트의 결합재료 가장 많이 사용되고 있는 재료중의 하나는 불포화 폴리에스터수지(Unsaturated Polyester Resin)이며 주로 버진(Virgin) 수지가 많이 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 가격이 비싼 단점이 있어 폴리머콘크리트의 사용을 제한

받고 있는 실정이다. 그런 이유로 최근에는 수지 사용량을 줄이면서 고강도를 유지하거나 폐기물을 이용해 값싼 재생 수지를 결합재료 이용하여 제조단가를 절감하는 연구가 진행되고 있다. 이런 폐합성수지 중의 하나가 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)이다. PET의 재활용 방법은 여러 가지가 있지만, 특히 화학적 방법을 통해 불포화 폴리에스터수지로 합성할 수 있어 폴리머콘크리트를 제조하는 결합재료 사용할 수 있다. PET는 주요 원료가 테레프탈산이므로 기존의 폴리머콘크리트에 사용되는 올소프탈산계의 수지에 비하여 기계적 특성 및 내식성이 우수하며, 제조 단가의 절감, 폴리머의 우수한 화학적 특성의 유지 등의 이점이 있다. 또한 폐기되는 PET를 정제할 필요가 없고 색에 의해 재료를 분리할 필요 없이 재활용할 수 있으므로 오랜 기간 동안 폐 PET를 안정적으로 처리하여 자원 재활용 측면에서도 매우 경제적이며 환경 보호의 이점도 있다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 PET 재활용 폴리머콘크리트는 새로운 건설재료로서 그에 대한 기초적

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-0327 Fax : 02-2292-0321

E-mail : hasup00@hanmail.net

자료가 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 공장제품 및 구조부재료의 응용과 자원의 재활용을 목적으로 PET 재생 불포화 폴리에스터수지를 이용하여 고강도의 폴리머 콘크리트를 제조하고, 이에 대한 강도 및 재령에 따른 모델식을 실험적 결과와 이론적 근거를 바탕으로 개발, 실험 결과와 기존 모델식과의 비교·검증을 통하여 그 객관성을 살펴보고자 하였다.

## 2. PET 재활용 폴리머콘크리트

### 2.1 PET 재생 불포화 폴리에스터수지

불포화 폴리에스터수지를 합성하기 위해서는 먼저 PET 및 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 만들어진 탄산음료 용기를 수거하여 세척하고, 분쇄기를 이용해 작은 조각으로 분쇄한다. 분쇄된 PET와 HDPE의 조각은 서로 밀도가 다르기 때문에 비중차에 의해 쉽게 분리되어질 수 있으며 분리된 PET는 진공오븐에서 건조된다. 수지의 합성 과정은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 PET 재활용 폴리머콘크리트 강도 특성

일반 콘크리트의 물-시멘트비가 강도 지배의 주요소라면 PET 재활용 폴리머콘크리트는 수지의 사용량이 강도를 지배하는 주성분이다. 수지의 사용량이 증가할수록 기계적 강도는 증가하지만 분자쇄구조를 형성한 후의 강도 증가는 거의 없거나 오히려 감소하기도 한다. 또한 수지사용량을 늘리는 것은 제품 단가 상승에 원인이 되므로 적정 수준의 수지 사용량을 유지하는 것이 경제적이다. 기계적 강도는 재령에 따라 증가하며 일반적으로 28일에 비해

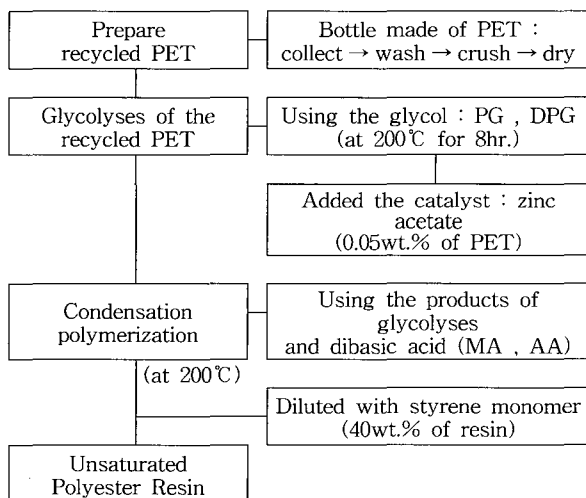


Fig. 1 Flow chart for products of unsaturated polymer based on recycled PET

재령 1일의 강도 발현율이 80%이상으로 초기 강도발현이 우수하며 수지의 화학적 특성상 경화시 수축을 일으키기도 한다. 테레프탈산이 이용되는 PET 재활용 폴리머콘크리트는 기존의 일반 수지를 사용한 폴리머콘크리트에 비해 내식성 및 내화학성, 기계적 강도가 우수하며 휨 및 인장강도와의 강도비 역시 우수하게 평가되고 있다<sup>3)</sup>.

## 3. 응력-변형률 곡선

### 3.1 개요

기존의 콘크리트 응력-변형률 곡선 모델은 선탄성-완전소성 모델, 비선형탄성-완전소성모델 및 다절선모델 등으로 분류할 수 있으며, 곡선의 형상을 표현하는 방법에 따라 상승부와 하강부를 하나의 수식으로 표현하는 확정·가변 단일곡선식, 상승부와 하강부를 서로 다른 수식으로 표현하는 확정·가변 복수곡선식으로 분류할 수 있다. 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 수식화에 대한 연구는 1960년대에 많은 모델이 제시되어 일반적인 형태의 응력-변형률 거동이 수식으로 정량화 되었다<sup>4)</sup>.

### 3.2 기존의 응력-변형률 곡선식

#### 3.6.1 Carreira and Chu Model

Carreira & Chu의 모델식은 Popovics가 제안한 모델에 고강도콘크리트에서 발생하는 최대응력 이후 하강부의 급격한 기울기를  $k$ 를 통해 반영하였다. 즉, 상승부의  $k$ 값은 1로 보았으며 그 이후는 식(2)를 따르도록 하였다. 이 모델은  $k, n$ 으로 표현되어 식이 단순하고 응력-변형률 곡선의 일반적인 형상을 잘 나타내고 있다<sup>5)</sup>.

$$f_c = \frac{n(E_o)(\epsilon_c)}{n-1 + (\epsilon_c/\epsilon_{cu})^{nk}} \quad (1)$$

$$k = 0.67 + \frac{f_{cu}}{62}, \quad n = 0.8 + \frac{f_{cu}}{17} \quad (2)$$

여기서,  $f_{cu}$  : 최대 응력,  $\epsilon_{cu}$  : 최대 응력점 변형률,  
 $E_o$  :  $f_{cu}/\epsilon_{cu}$

#### 3.6.2 Desayi and Krishnan Model

식(4)는 Desayi & Krishnan의 제안식으로 상승부와 하강부를 구분하지 않았으며 Popovics가 제안한 모델식(식(3))의  $E_c/E_o = n/(n-1)$ , 즉 할선탄성계수의 비를 2로 나타내었다. Tulin & Gerstle은 식(3)의  $n$ 값에 3을 대입함으로써 모델식을 제안하였는데 이 두 모델의 곡선은 상승부의 거의 유사하며 하강부에서 다소 차이를 나타낸다<sup>6)</sup>.

$$f_c = \frac{n E_o \epsilon_c}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^n} \quad (3)$$

$$f_c = \frac{2(E_o) (\epsilon_c)}{1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} \right)^2} \quad (4)$$

여기서,  $f_{cu}$  : 최대 응력,  $\epsilon_{cu}$  : 최대 응력점 변형률,  
 $E_o$  :  $f_{cu}/\epsilon_{cu}$

## 4. 실험방법 및 결과분석

### 4.1 실험방법

#### 4.1.1 실험재료

##### (1) PET 재생 불포화 폴리에스터수지

PET 재생 불포화 폴리에스터수지는 취급이 쉽고 경화성이 뛰어나 상온에서 자유롭게 경화시킬 수 있으며, 다른 열경화성 수지에 비하여 기계적 성질 및 내약품성이 우수하다. 본 실험에서는 코발트계 경화 촉진제가 첨가되어 있는 C사의 제품을 사용하였다.

##### (2) 개시제(Initiator)

PET 재생 불포화 폴리에스터수지가 경화되려면 경화 촉진제와 개시제가 첨가되어야 하며 촉진제가 첨가된 수지는 개시제만 첨가되면 경화반응이 일어난다. 개시제는 메틸에틸케톤퍼옥사이드(MEKPO)를 사용하였다.

##### (3) 골재(Aggregate)

K사의 제품으로서 굵은골재는 쇄석을, 잔골재는 규사를 사용하였으며 골재의 수분 흡수는 수막을 형성시켜 결합재와 골재간의 접착력을 약화시키므로 함수량이 0.1% 이하가 되도록 건조한 후 냉각시켜 사용하였다.

##### (4) 충전재(Filler)

충전재 사용의 주목적은 단위체적당 수지의 사용량을 감소시키고 점성을 증가시켜 부착력을 크게 하는 것이다. 본 연구에서는 가격이 저렴하고 구입이 용이할 뿐만 아니라 큰 비표면적을 가진 중탄산칼슘을 충전재로 사용하였다.

##### (5) 가교제

폴리머콘크리트는 고분자인 폴리머와 무기재료인 골재와의 화학적 결합이기 때문에 골재 계면에서 결합력이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 가교제인 실란(Silane)을 사용하는데 이는 강도 증진에도 우수한 효과를 나타낸다. 본 연구에서는 D사의 LD5711 제품을 사용하였다.

### 4.1.2 실험체 제작

KS F 2419에 준하여  $\phi 75 \times 15$ cm의 실험체를 제작하였으며 그 배합 및 양생방법은 Table 3와 같다. 실험체는 골재 및 충전재를 계량하여 2분간 건비빔한 후 준비된 PET 재생 불포화 폴리에스터수지에 개시제를 첨가하여 3분간 비빔하였으며 다짐은 봉다짐과 진동다짐기를 병행하였다.

### 4.1.3 실험방법

각 배합에 따라 제작된 공시체는 재령 12시간, 1일, 7일, 14일, 28일에 대하여 압축파괴 실험을 실시하였다. 압축파괴 실험은 MTS 815 Concrete test system 장비를 이용하여 변위 제어 방식으로 하였으며 그 속도는 0.018 mm/min로 유지하였고 75 mm 길이를 가진 Compressometer를 공시체의 양쪽 중앙부에 설치하여 축방향 변위를 측정하였다.

## 4.2 결과분석

### 4.2.1 배합 및 양생방법에 따른 응력-변형률 곡선

배합 및 양생조건에 따른 각 실험체별 응력-변형률 곡선은 재령 28일을 기준으로 하여 관찰하였으며 Fig. 2는

Table 1 Physical properties of aggregate

Type	Size (mm)	Specific gravity	Fineness modulus	Absorption (%)
Coarse agg.	≤8	2.63	6.42	0.70
Fine agg.	0.1~0.6	2.60	2.48	0.44

Table 2 Properties of methacrylate silane

Density (20/4℃)	Boiling Point (℃)	Refractive index (20℃)	Flash point (℃)	Purity (%)
0.99	>159	1.4125	46	Min 98.0

Table 3 Mixture and curing conditions

Section	Batch	Classification (unit : kg/m <sup>3</sup> )					Curing temp. (℃)
		Binder	Coarse agg.	Fine agg.	CaCO <sub>3</sub>	Silane	
Type	9L	234	1066	1066	234	0	20±4
	13L	338	962	962	338		
	17L	442	858	858	442		
	9H	234	1066	1066	234		
	13H	338	962	962	338	70	
	17H	442	858	858	442		
	9HS	234	1066	1066	234		2.34
	13HS	338	962	962	338		3.38
	17HS	442	858	858	442		4.42

※ Mark - #XY

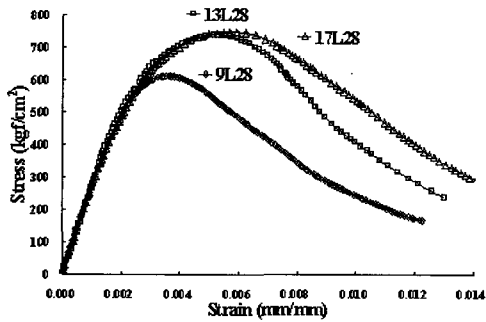
# : Resin content, 9%, 13%, 17%

X : Curing conditions, L=room temp., H=high temp.

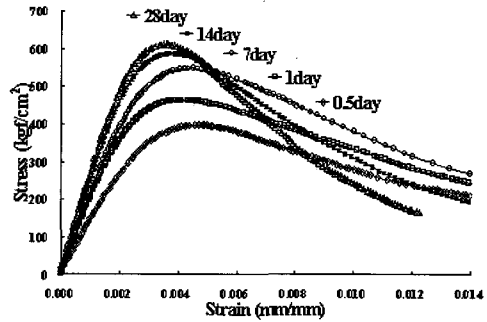
Y : S=silane treated batch, 1% of resin content

양생방법 및 실란 첨가시의 수지 사용량에 따른 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 수지 사용량을 증가시키면 모든 실험체에서 동일하게 최대 응력점 변형률이 다소 증가하였으며 압축강도는 수지 사용량이 늘어날수록 증가하지만 13%와 17%인 실험체들의 압축강도 차이는 비교적 작았고 고온양생시에는 17%에서 13%보다 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 하강부에서는 수지량이 증가할수록 연성적인 경향을 나타내었다. 이는 불포화 수지가 가지는 특성으로 수지량이 증가할수록 경화시 가교밀도가 저하되고 분자 사이의 간격이 상대적으로 증가하였기 때문인 것으로

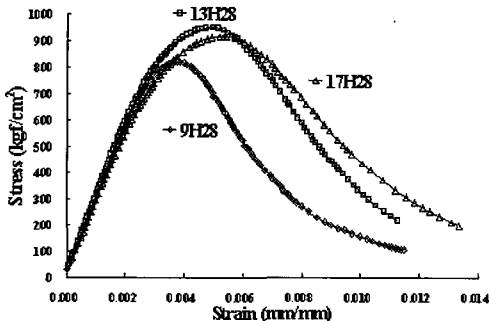
판단된다. (a)와 (b)를 비교하면 상온양생보다 고온양생의 경우가 15% ~ 30% 정도의 강도증진 효과가 있었으며 탄성계수 또한 증가하였다. 또한 곡선의 하강부에서는 고온양생을 한 경우가 더욱 취성적인 경향을 나타내었다. (c)는 실란을 첨가하여 고온 양생한 경우로서 고강도임에도 불구하고 하강부 기울기의 급격한 증가는 나타나지 않았으며 (b)와 비교하여 압축강도가 10% ~ 15% 증가하였다. 이는 가교제인 실란이 PET 재활용 폴리머콘크리트의 파괴원인인 결합제와 골재 계면의 결합력을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다.



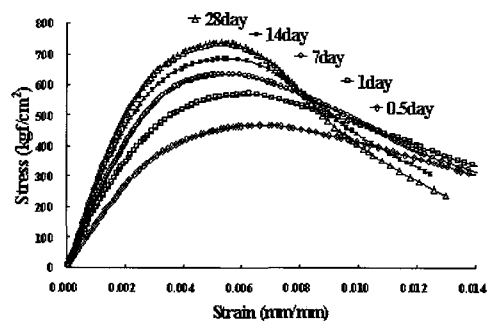
(a) Compressive stress vs. strain of L-series



(a)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 9L at various ages



(b) Compressive stress vs. strain of H-series



(b)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 13L at various ages

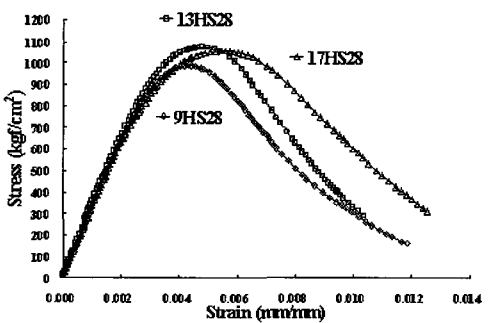


Fig. 2 (c) Compressive stress vs. strain of HS-series

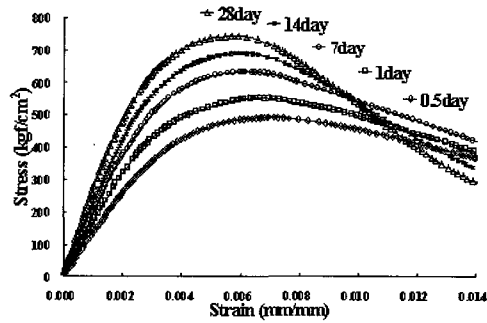


Fig. 3 (c)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 17L at various ages

#### 4.2.2 강도 및 재령에 따른 응력-변형률 곡선

상온 양생의 경우 재령 1일의 압축강도가 재령 28일의 압축강도에 약 77~87%를 나타내어 초기재령에서의 강도발현이 우수함을 알 수 있었다.

Fig. 3에서와 같이 상온양생의 경우 각 재령별 최대 응력점의 변형률은 재령이 증가하여 강도가 발현됨에 따라 점점 작아짐을 알 수 있었고, 압축강도와 응력-변형률 곡선의 상승구간 탄성계수도 꾸준히 증가하는 경향을 나타냈다. 수지 사용량이 증가할수록 최대응력점의 기울기가 완만하게 나타났고 강도가 증가함에도 불구하고 최대 응력점 이후의 압축 연화거동 현상은 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이것은 배합시 수지 사용량의 증가는 강도 증진에 일정부분 기여 할 뿐만 아니라 콘크리트의 연성 파괴 현상을 증가시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한 재령의 증가에 따른 최대 응력점에서의 변형률 감소는 수지량이 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4는 재령별 고온 양생 결과를 나타내는데 재령 1일 압축강도가 28일의 83%~92%로 강도발현이 급격하게 진행됨을 알 수 있으며 13H에서 17H보다 초기재령 강도발현이 우수하였다. 이는 17H에 사용된 수지가 필요 이상으로 과다하여 폴리머 래디칼 부가반응과 같이 재령에 따라 발생하는 수지의 매트릭스 형성 종료를 지연시켜 발생한 것으로 판단되며 따라서 초기재령에서 목표하는 고강도를 얻고자 할 때에는 수지량을 적절히 조절할 필요가 있을 것이다.

Fig. 5는 실란을 결합제인 수지 사용량의 1% 첨가하여 고온 양생 결과를 나타낸다. 가교제인 실란의 첨가를 통해 압축강도가 9~17% 증가하였으며 수지사용량 9%인 9HS에서 강도 증가폭이 가장 크게 나타났다. 또한 재령에 따라 하강부의 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며 상승부 기울기는 재령에 따라 꾸준히 증가하였으며 재령 7일 이후에는 증가가 감소하였다.

### 5. PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선식

#### 5.1 기본 모델식 선정

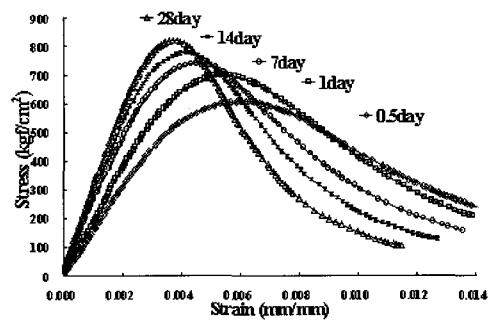
향후 구조물에 적용되는 콘크리트의 강도는 더욱 높아질 것으로 판단되며 이를 위해서는 PET 재활용 폴리머 콘크리트와 같은 고강도 재료의 역학적 특성이 구명되어야 한다. 기존의 모델식 중에서 Carreira and Chu 모델은 응력-변형률 곡선의 일반적인 모델형이며 식이 단순하고 고강도 콘크리트의 곡선형태를 잘 표현할 수 있어 본 연구에서는 이 모델의 기본적인 형태를 바탕으로 하였다. Carreira & Chu 모델에서  $n$  대신  $\beta$ 가 쓰이기도 하는데, 이는 응력-변형률 곡선형상을 나타내는 재료적 요소로 특

히 하강부 표현에 유용하다. 이를 이용하여 제안된 식을 정리하면 다음과 같다<sup>5,7)</sup>.

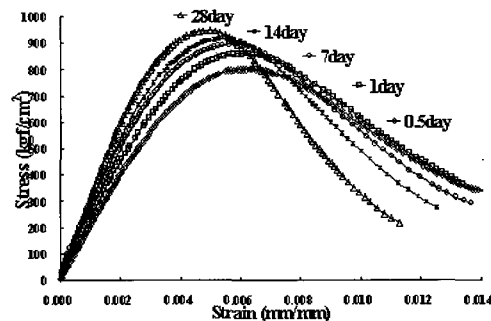
$$f_c = \frac{\beta E_o \epsilon_c}{\beta - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cu})^\beta} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{E_o}{E_{ci}}} \quad (6)$$

여기서  $f_{cu}$  : 최대 응력,  $\epsilon_{cu}$  : 최대 응력점 변형률  
 $E_o$  :  $f_{cu} / \epsilon_{cu}$ ,  $E_{ci}$  : 초기접선탄성계수



(a)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 9H at various ages



(b)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 13H at various ages

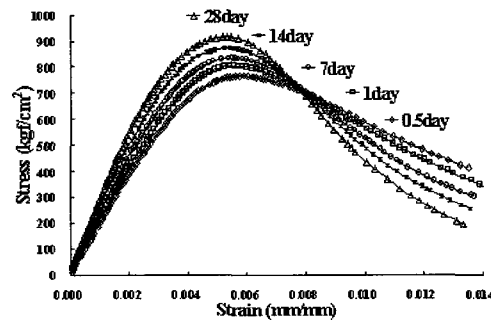
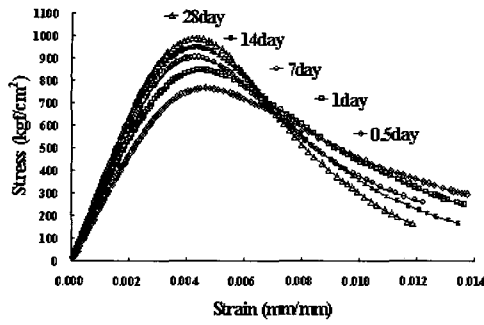
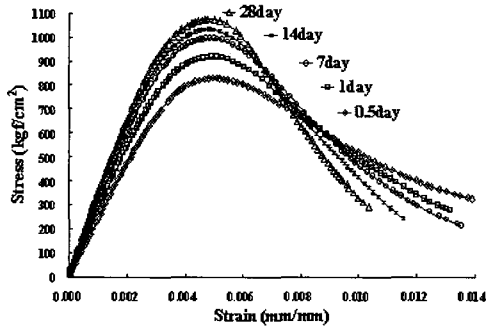


Fig. 4 (c)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 17H at various ages



(a)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 9HS at various ages



(b)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 13HS at various ages

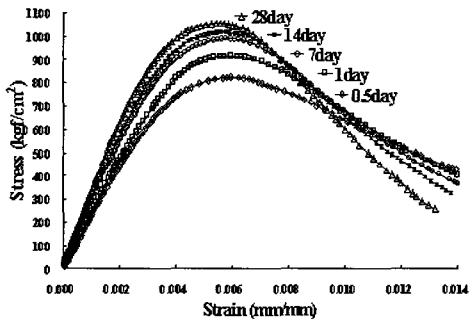


Fig. 5 (c)  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of 17HS at various ages

## 5.2 수정 모델식 개발

앞에서 언급한 Carreira & Chu Model을 기본식으로 하여 상승구간과 하강구간을 하나의 수식으로 하는 단일 응력-변형률 곡선으로 모델링하였으며 실험결과를 통해 구한 각 구간의 영향인자를 달리하여 실제적으로는 복수 곡선식이 되게 함으로써 하강구간에 나타나는 오차를 최소화하였다.

### 5.2.1 상승 구간(Ascending branch)

위의 식(6)을 활선탄성계수( $E_o$ )와 탄성계수( $E_c$ )를 이용하여 방정식의 형태로 표현하면 식(7)과 같다.

Table 4 Relation factors for ascending branch

Batch	Age(day)	0.5	1	7	14	28
9L	A	0.584	0.573	0.574	0.625	0.649
	$\beta_u$	2.316	2.253	2.254	2.596	2.789
13L	A	0.532	0.532	0.526	0.501	0.499
	$\beta_u$	2.042	2.043	2.017	1.918	1.908
17L	A	0.558	0.524	0.507	0.499	0.500
	$\beta_u$	2.168	2.009	1.940	1.910	1.913
9H	A	0.621	0.647	0.660	0.678	0.727
	$\beta_u$	2.563	2.770	2.881	3.051	3.599
13H	A	0.629	0.616	0.582	0.591	0.605
	$\beta_u$	2.622	2.524	2.300	2.356	2.447
17H	A	0.662	0.698	0.633	0.615	0.602
	$\beta_u$	2.899	3.260	2.658	2.522	2.430
9HS	A	0.697	0.676	0.696	0.708	0.711
	$\beta_u$	3.254	3.037	3.236	3.374	3.406
13HS	A	0.699	0.673	0.645	0.638	0.650
	$\beta_u$	3.273	3.006	2.756	2.696	2.799
17HS	A	0.606	0.633	0.618	0.613	0.579
	$\beta_u$	2.459	2.653	2.539	2.502	2.286

$$0.4A^\beta - \beta(A-1) - 1 = 0 \quad (7)$$

여기서,  $A : E_o/E_c$

식(7)의  $\beta$ 와 수지의 사용량 및 재령에 따른 활선탄성계수비를 영향인자로 하고 최대응력  $f_{cu}$ 와 그때의 변형률  $\epsilon_{cu}$ 를 이용하여 응력-변형률 곡선 상승부에 적용하였다. 상승부의  $\beta$ 값은  $\beta_u$ 로,  $E_o/E_c$ 를 A로 표현하였으며 각 배합 및 양생방법, 재령에 따라 Table 4로 나타내었다.

Fig. 6은 각 실험체에 대한  $\beta_u$ 와 A의 상관관계를 나타낸 것으로 식(8)과 같이 log를 이용한 분수함수로 표현하였으며 그 상관관계 또한 만족할 만한 수준이었다.

$$\beta_u = 0.4419 - \frac{1.0123}{\ln A} \quad (8)$$

이처럼 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선 상승부는 최대 응력점에서의 활선탄성계수와 탄성계수의 비를 포함한 매개변수로서 표현할 수 있었으며 초기재령에서 고강도를 발현하는 특성 또한 잘 나타낼 수 있었다.

### 5.2.2 하강 구간(Descending branch)

응력-변형률 곡선 하강부의 기울기는 Martinez의 하강부 모델식과 Scott의 하강부 모델식을 이용하여 최대 응력점( $f_{cu}$ )과  $0.85f_{cu}$ 의 응력점의 활선계수, 그리고 최대 응력점과  $0.20f_{cu}$ 의 응력점의 활선계수의 비를 매개변수

로 하여 나타내었다. 상승부의  $\beta_d$  값을 통해 하강부를 비교한 결과 재령에 따라 그 차이가 확인하였으며 수지 사용량의 증가에 따른 하강부 곡선의 변화를 나타내지 못하여 그 영향을 표현할 수 있는 할선계수들의 비를 통해 하강부의  $\beta_d$  값을 구하였다. 먼저  $0.85f_{cu}$ 에서의 할선계수를 X로  $0.20f_{cu}$ 에서의 할선계수를 Y로 표현하였으며 이들의 비  $Y/X$ 를 B로 나타내었다.

$$X = \frac{0.15f_{cu}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{0.85}}, \quad Y = \frac{0.80f_{cu}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{0.20}} \quad (9)$$

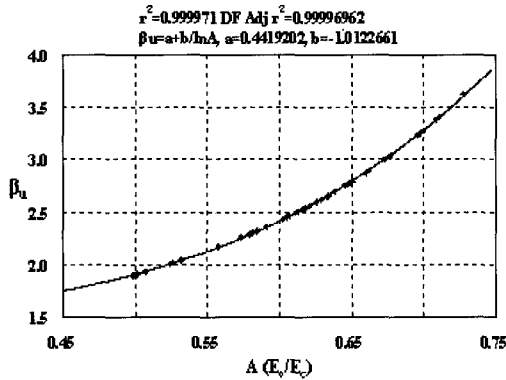
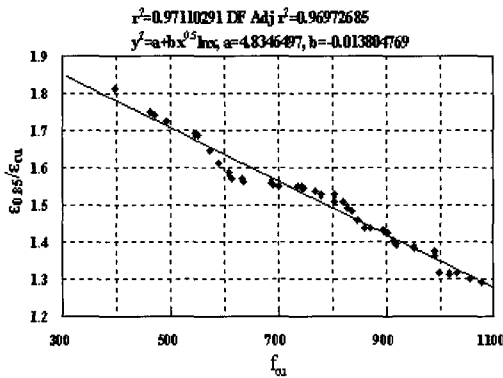


Fig. 6 Relationship between  $\beta_u$  A at ascending



(a) Relationship T with  $f_{cu}$

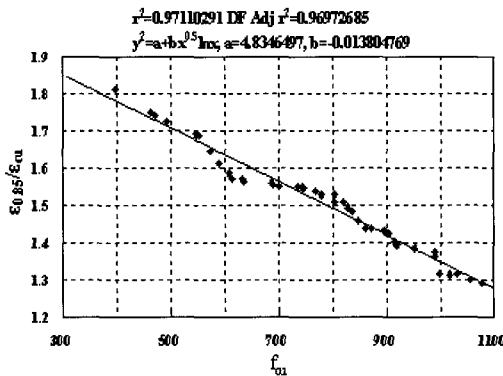


Fig. 7 (b) Relationship S with  $f_{cu}$

$$B = 6 \left( \frac{1 - \epsilon_{0.85}/\epsilon_{cu}}{1 - \epsilon_{0.20}/\epsilon_{cu}} \right) \quad (10)$$

$\epsilon_{0.85}$ ,  $\epsilon_{0.20}$ 는 Martinez와 Scott의 제안식에<sup>4,7)</sup> 나타난 것과 같이 최대응력  $f_{cu}$ 와 변형률  $\epsilon_{cu}$ 의 상관관계가 존재하므로 회귀분석을 통하여 고찰한 결과 Fig. 7과 같이 나타냈다.

$$T^2 = \left( \frac{\epsilon_{0.85}}{\epsilon_{cu}} \right)^2 = 4.835 - 0.014(\ln f_{cu})\sqrt{f_{cu}} \quad (11)$$

$$S^2 = \left( \frac{\epsilon_{0.20}}{\epsilon_{cu}} \right)^2 = -34.451 + 1263.337/\sqrt{f_{cu}} \quad (12)$$

여기서, 변형률의 비는 각각 T, S로 표현하였으며 이상의 과정을 통해 얻은 B와 하강부의 실험결과를 통하여 얻은  $\beta_d$  값을  $\beta_d$ 로 표현하여 Table 5 및 Fig. 8로 나타내었다.

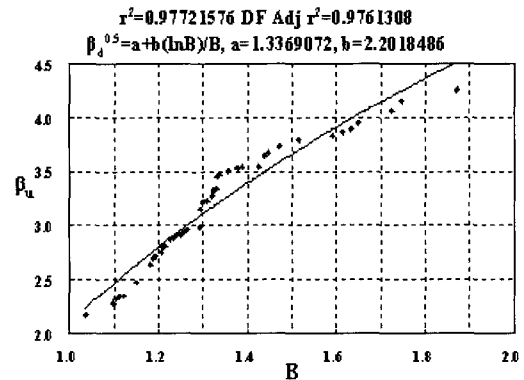


Fig. 8 Relationship  $\beta_d$  with B at descending

Table 5 Relation factors for descending branch

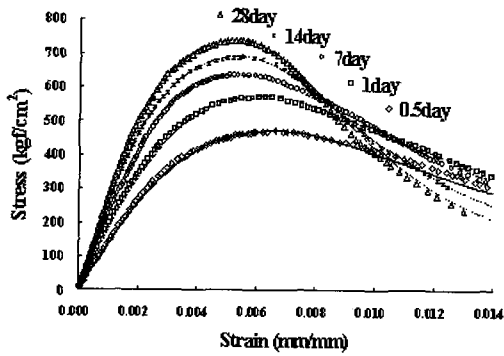
Batch	Age(day)	0.5	1	7	14	28
9L	B	1.104	1.112	1.150	1.191	1.238
	$\beta_d$	2.316	2.342	2.475	2.718	2.899
13L	B	1.181	1.187	1.254	1.310	1.438
	$\beta_d$	2.639	2.693	2.932	3.225	3.643
17L	B	1.036	1.099	1.121	1.208	1.293
	$\beta_d$	2.168	2.279	2.345	2.801	2.986
9H	B	1.323	1.331	1.356	1.615	1.746
	$\beta_d$	3.333	3.456	3.510	3.863	4.152
13H	B	1.329	1.425	1.471	1.650	1.869
	$\beta_d$	3.342	3.541	3.739	3.950	4.256
17H	B	1.213	1.249	1.336	1.447	1.726
	$\beta_d$	2.811	2.916	3.470	3.677	4.056
9HS	B	1.206	1.264	1.319	1.388	1.633
	$\beta_d$	2.753	2.962	3.278	3.540	3.897
13HS	B	1.225	1.299	1.377	1.590	1.872
	$\beta_d$	2.874	3.218	3.536	3.831	4.259
17HS	B	1.232	1.295	1.323	1.377	1.515
	$\beta_d$	2.889	3.149	3.319	3.531	3.793

재령에 따라 B와  $\beta_d$ 는 꾸준히 증가하여 이들간에 어떤 상관관계가 존재함을 알 수 있으며 곡선의 하강부 기울기와 관련된  $\beta_d$ 를 B에 관한 함수로 표현할 수 있었다.

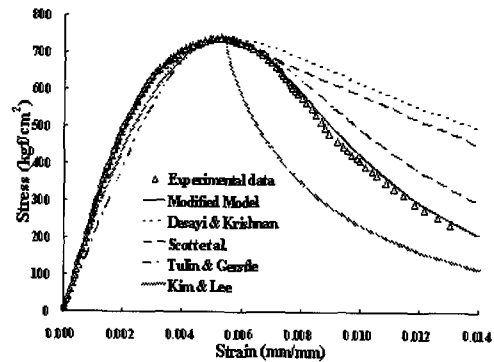
$$\beta_d^{0.5} = 1.3369 + 2.2018 \frac{\ln B}{B} \quad (13)$$

이상의 과정을 통하여 Carreira & Chu Model를 기본 식으로 하는 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선의 수정 모델식을 개발하였으며 이는 식(14)와 같다.

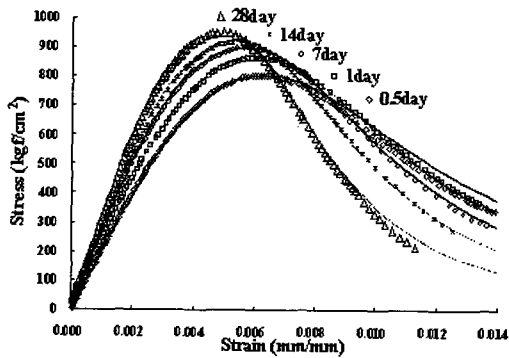
$$f_c = \frac{\beta(E_o)(\epsilon_c)}{\beta - 1 + (\epsilon_c/\epsilon_{cu})^\beta} \quad (14)$$



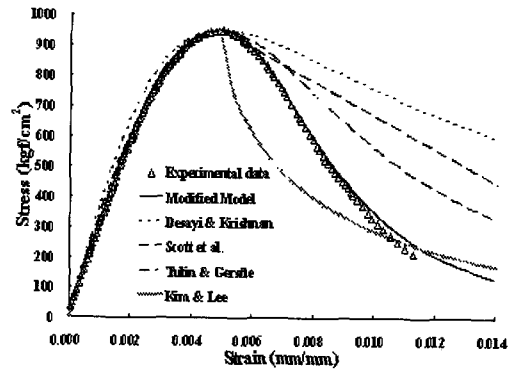
(a) Comparison of modified model with experimental results for 13L



(a) Comparison of modified model with previous model for 13L



(b) Comparison of modified model with experimental results for 13H



(b) Comparison of modified model with previous model for 13H

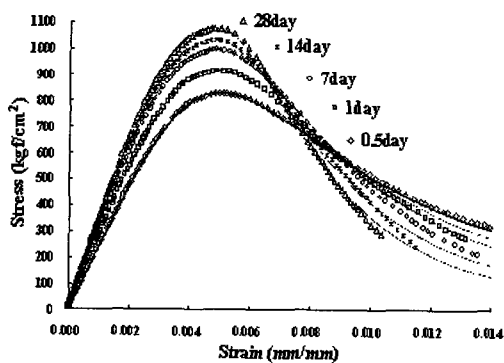


Fig. 9 (c) Comparison of modified model with experimental results for 13HS

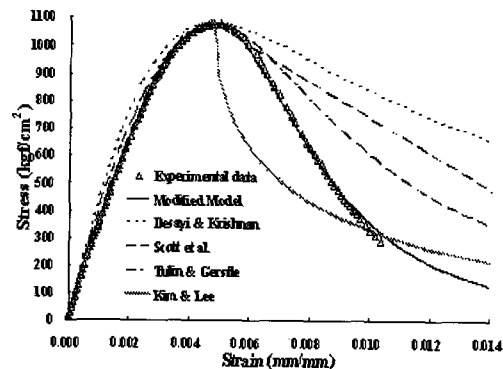


Fig. 10 (c) Comparison of modified model with previous model for 13HS



$$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \text{에서 } \beta = \beta_u, \beta_u = 0.4419 - \frac{1.0123}{\ln A}$$

$$\epsilon_c > \epsilon_{cu} \text{에서 } \beta = \beta_d, \beta_d^{0.5} = 1.3369 + 2.2018 \frac{\ln B}{B}$$

여기서,  $E_o = f_{cu} / \epsilon_{cu}$ ,  $A = E_o / E_c$ ,  $B = 6 \left( \frac{1-T}{1-S} \right)$

$$T^2 = 4.835 - 0.014 (\ln f_{cu}) \sqrt{f_{cu}}$$

$$S^2 = -34.451 + 1263.337 / \sqrt{f_{cu}}$$

### 5.3 수정 모델식의 검토

#### 5.3.1 실험결과에 대한 검토

Fig. 9는 식(14)의 수정 모델식에 의한 응력-변형률 곡선과 실험결과를 비교한 것으로 재령에 따른 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선을 효과적으로 표현하고 있음을 알 수 있다. 상승부는 거의 일치하였고 하강부는 실험결과와 기울기가 대체적으로 더 급격하였으며 재령에 따라 기울기의 차이가 더욱 커지는 경향을 나타냈으나 어느 정도의 오차 내에서 비교적 정확히 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 5.3.2 기존 모델식에 대한 검토

본문에서 제안한 수정 모델식과 기존 모델식과의 비교는 재령 28일을 기준하여 수지 사용량이 13%인 실험체에 대하여 실시하였다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 각 모델식에 대한 상승부의 기울기는 유사한 경향을 보이는 반면 하강부의 기울기는 기존 모델식과 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델식은 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 거동을 예측하는데 만족할 만한 수준인 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

일축 압축 하에서의 응력-변형률 실험을 통한 결과 분석과 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선의 수정 모델식 분석결과 일정 범위 내에서 정확히 예측하였다.

- 1) 수지 사용량의 증가에 따라 최대 응력은 점차 커지지만 17%를 사용한 경우 13%를 사용하였을 때 보다 그 증가폭이 비교적 작거나 오히려 감소하였고 응력-변형률 곡선의 하강부는 연성적인 경향을 나타내었다.
- 2) 20 °C의 상온 양생보다 70 °C로 고온 양생을 실시한 경우 15 ~ 30 % 정도의 강도증진 효과가 있었으며, 이에 따라 취성파괴 현상을 나타내며 응력-변형률 곡선의 하강부는 더욱 큰 기울기를 나타내었다.

- 3) PET 재활용 폴리머콘크리트의 고강도, 취성파괴 경향을, 골재 계면에 적절한 가교제를 사용함으로써, 결합력을 증가시켜, 안정적인 응력-변형률 곡선의 하강부와 함께, 취성 파괴 현상을 다소 완화시켰다.
- 4) 최대 응력점 변형률은 재령이 증가함에 따라 점차 작아지며 수지 사용량이 증가할수록 커지는 경향을 나타냈다.
- 5) 수정 모델식은 상승구간과 하강구간을 하나의 수식으로 하는 단일 응력-변형률 곡선식으로 하였으나 상승부와 하강부의 매개변수를 실험결과를 통하여 따로 반영함으로써 실제적인 복수 곡선식이 되도록 함으로써 하강구간의 오차를 최소화 하였다.
- 6) 본 연구에서 제안한 수정 모델식은 재령 및 수지 사용량에 따른 거동과 초기재령에서 고강도를 발현하는 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선 특성을 정확히 예측하였다.

### 참고문헌

1. ACI Committee548, "Guide for the Use of Polymers in Concrete," American Concrete Institute, 1997.
2. V. V. Lakshmi Kanta Rao and S. Krishnamoorthy, "Influence of Resin and Microfiller Proportions on Strength, Density, and Setting Shrinkage of Polyester Polymer Concrete," *ACI Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.153~162.
3. Karim S. Rebeiz, Sungchul Yang, and David W. Fowler, "Polymer Mortar Composites Made with Recycled Plastics," *ACI Journal*, Vol.91, No.3, 1994, pp.313~319.
4. Sadatoshi, O. and Hannant, D. J., "Modeling the Stress- Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composite," *ACI Journal*, Vol.91, No.3, 1994, pp.306~312.
5. Yip, W. K., "Generic Form of Stress-Strain Equations for Concrete," *Cement Concrete Research*, Vol.28, No.4, 1998, pp.499~508.
6. Kabaila, A., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve by Prakash Desayi and S. Krishnan," *ACI Journal*, Vol.61, No.3, 1964, pp.1227~1239.
7. Carreira, D. J. and Chu, K. H., "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," *ACI Journal*, Proceedings, Vol.82, 1985, pp.797~804.
8. Shane, M. P. and Daniel, C. J., "Postpeak Strain-Stress Relationship for Concrete in Compression," *ACI Journal*, Vol.98, No.3, 2001, pp.213~219.

---

## 요 약

폴리머콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비해 강도와 내구성에 탁월한 성능을 가지고 있기 때문에 건설현장에서도 다양한 용도로 개발되어 널리 사용되고 있다. 그러나 폴리머콘크리트는 그 결합재로 쓰이는 수지의 비용이 높아 경제적인 면에서는 다소 불리하여 기존의 수지를 대체할 수 있는 결합재에 관한 연구가 진행되고 있다. PET를 재활용한 폴리머콘크리트는 산업폐기물을 재활용하여 경제적인 건설 신소재를 개발할 수 있어 그 영역이 점차 확대 될 것으로 전망된다. 본 연구에서는 프리캐스트 제품 및 구조부재로의 응용과 자원 재활용을 목적으로 PET 재생 불포화 폴리에스터수지를 이용하여 고강도의 폴리머콘크리트를 제조하고 이에 대한 응력-변형률 거동 특성을 파악하여 실험결과와 이론적 근거를 바탕으로 PET 재활용 폴리머콘크리트의 응력-변형률 곡선의 모델식을 얻고자 하였다. 실험 결과 수지 사용량의 증가에 따라 최대 응력과 최대 변형률이 함께 증가하였으나 증가폭에 한계가 있는 것으로 나타났으며 응력-변형률 곡선의 기울기는 상온보다는 고온양생이 더 크게 나타났다. 실란의 첨가는 강도증진의 효과뿐만 아니라 최대하중 이후의 압축 연화거동에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 위와 같은 응력-변형률 거동 특성을 통하여 PET 재활용 폴리머콘크리트 응력-변형률 곡선의 수정 모델식을 제안하였으며 PET 재활용 폴리머콘크리트의 특성을 정확히 예측하였다.

**핵심용어 :** PET, 폴리머콘크리트, 응력-변형률 모델

---