

# PET 재활용 폴리머 콘크리트의 응력-변형률 특성

## Stress-Strain Properties of recycled-PET Polymer Concrete

조 병 완\*  
Jo, Byung Wan

박 종 화\*\*  
Park, Jong Hwa

박 승 국\*\*  
Park, Seung Kook

### ABSTRACT

Resins using recycled PET offer the possibility of a lower source cost of materials for making useful polymer concrete products. The purpose 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. In addition, results show that the proposed model accurately predicts the stress-strain relation of recycled-PET polymer concrete

### 1. 서론

폴리머는 고성능 재료로 평가됨에 따라 건설산업분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있으며 각종 제품이나 구조물에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 가격이 비싼 단점이 있어 최근에는 수지 사용량을 줄이면서 고강도를 유지하거나 폐기물을 이용해 값싼 재생 수지를 결합재로 이용하여 제조단가를 절감하는 연구가 진행되고 있다. 이런 폐합성수지 중의 하나가 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)이다. PET 재활용 폴리머 콘크리트는 새로운 건설재료로서 그에 대한 기초적 자료가 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 공장제품 및 구조부재로의 응용과 자원의 재활용을 목적으로 PET 재생 불포화 폴리에스터 수지를 이용하여 고강도의 폴리머 콘크리트를 제조하고, 이에 대한 강도 및 재령에 따른 모델식을 실험적 결과와 이론적 근거를 바탕으로 개발, 실험결과와 기존 모델식과의 비교·검증을 통하여 그 객관성을 살펴보고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 실험재료

본 실험에 사용한 불포화 폴리에스터 수지는 코발트계 경화촉진제가 첨 되어 있는 제품을 사용하였다. 개시제제로서는 메틸에틸케톤퍼옥사이드(MEKPO)를 사용하였다. 충전제는 CaCo<sub>3</sub>를 사용하였고, 굵은 골재는 쇄석을, 잔골재는 규사를 사용하였다. 실험에 앞서 골재의 수분은 함수량이 0.1% 이하가 되도록 건조로에서 24시간 건조시킨 후 냉각시켜 사용하였다. 또한 폴리머와 골재와의 화학적 결합력을 강화시키기 위해 가교제인 실란(Silane)을 사용하였는데 본 연구에서는 D사의 LD5711제품을 사용하였다.

#### 2.2 실험체 제작

KS F 2419에 준하여  $\phi 7.5 \times 15$ cm의 실험체를 제작하였으며 그 배합 및 양생방법은 표 1과 같다.

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정

표1 배합과 양생조건

| Section | Batch | Classification (unit : kg/m <sup>3</sup> ) |             |           |                   |        | Curing Temp. (°C) |
|---------|-------|--|-------------|-----------|-------------------|--------|-------------------|
|         |       | 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               |        | 70                |
|         | 13H   | 338  | 962         | 962       | 338               |        |                   |
|         | 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

### 2.3 실험 방법

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

### 3. 실험 결과

#### 3.1 강도 및 재령에 따른 응력-변형을 곡선

그림 1은 상온 양생시의 곡선으로 최대 응력점은 초기재령에서 매우 크다가 재령이 증가하여 강도가 발현됨에 따라 다소 작아짐을 알 수 있었다. 또한 수지량이 증가할수록 강도가 증가함에도 불구하고 최대응력점 이후의 압축연화 거동은 더욱 뚜렷하게 나타났다. 그림 2는 재령별 고온 양생 결과를 나타내는데 초기재령 강도가 28일 강도의 80%~90%로 강도발현이 급격하게 진행되었고, 13H에서 17H보다 초기 재령 강도 발현이 우수하였다. 그림 3은 실란을 결합재인 수지 사용량의 1% 첨가하여 고온 양생 결과를 나타내는데 재령에 따라 하강부의 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며 상승부의 기울기는 재령에 따라 꾸준히 증가하였다.

#### 4. PET 재활용 폴리머 콘크리트의 응력-변형을 곡선식

##### 4.1 기본 모델식 산정

PET 재활용 폴리머 콘크리트와 같은 고강도 재료의 역학적 특성을 규명하기 위해 기존의 모델식 중에서 Carreira and Chu 모델은 응력-변형을 곡선의 일반적인 모델형이며 식이 단순하고 고강도 콘크리트의 곡선형태를 잘 표현할 수 있어 본 연구에서는 이 모델의 기본적인 형태를 바탕으로 하였다. Carreira & Chu 모델에서 제안된 식을 정리하면 다음과 같다.<sup>(2),(4)</sup>

$$f_c = \frac{\beta E_o \epsilon_c}{\beta - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cu})^\beta} \quad (1) \quad \beta = \frac{1}{1 - \frac{E_o}{E_{ci}}} \quad (2)$$

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

##### 4.2 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. 위의 식 (1), (2)를 이용하여 상승구간을 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$0.4A^{\beta} - \beta(A-1) - 1 = 0 \quad (3) \quad \text{여기서 } A: E_o/E_c$$

그림 4는 각 실험체에 대한  $\beta_u$ 와  $A$ 의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림 5는 Martinez와 Scott의 제안식에 나타난 것과 같이 최대응력  $f_{cu}$ 와 변형률  $\epsilon_{cu}$ 의 상관관계가 존재하므로 회귀분석을 통하여 고찰한 결과를 나타내었다. 여기서 변형률의 비는 각각 T, S로 표현하였으며 이상의 과정을 통해 얻은 B와 하강부의 실험결과를 통하여 얻은  $\beta$ 값을  $\beta_d$ 로 표현하여 그림 6으로 나타내었다.<sup>(3),(5)</sup> 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.

$$\beta_d^{0.5} = 1.3369 + 2.2018 \frac{\ln B}{B} \quad (4)$$

이상의 과정을 통하여 Carreira & Chu Model를 기본 식으로 하는 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 수정 모델식을 개발하였으며 이는 식(5)와 같다.

$$f_c = \frac{\beta(E_o)(\epsilon_c)}{\beta - 1 + (\epsilon_c/\epsilon_{cu})^{\beta}} \quad (5) \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \text{에서 } \beta = \beta_u, \quad \beta_u = 0.4419 - \frac{1.0123}{\ln A}$$

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

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

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

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

## 5. 결론

- (1) 수지 사용량의 증가에 따라 최대 응력은 점차 커지지만 증가폭은 비교적 적은 것으로 나타났으며 고온양생을 실시한 경우가 20%정도 강도 증진의 효과가 있었으며, 골재 계면에 적절한 가교제를 사용함으로써 결합력을 증가시켜 안정적인 응력-변형률 곡선의 하강부와 함께 취성 파괴 현상을 다소 완화 시켰다.
- (2) 최대 응력점 변형률은 재령이 증가함에 따라 점차 작아지며 수지 사용량이 증가할수록 커지는 경향을 나타내었다.
- (3) 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.

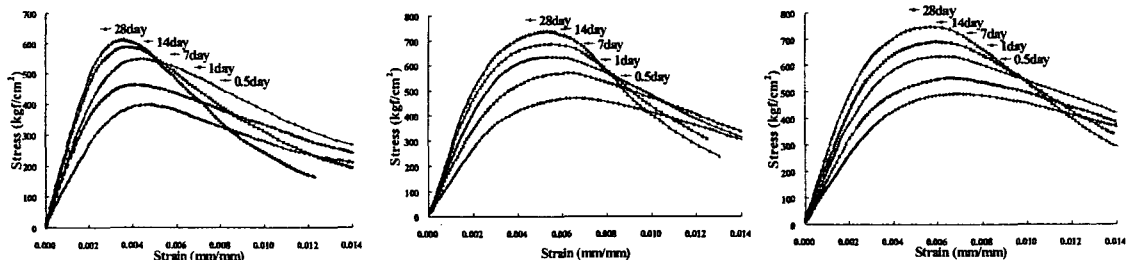


그림 1 (a) 9L의 재령별 응력-변형률 곡선 (b) 13L의 재령별 응력-변형률 곡선 (c) 17L의 재령별 응력-변형률 곡선

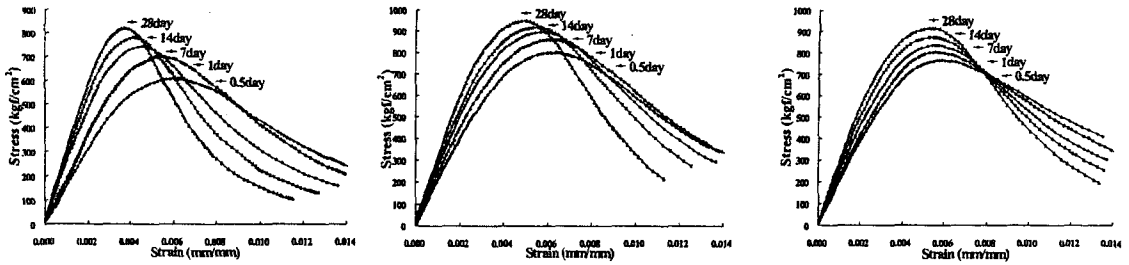


그림 2 (a) 9H의 재령별 응력-변형률 곡선 (b) 13H의 재령별 응력-변형률 곡선 (c) 17H의 재령별 응력-변형률 곡선

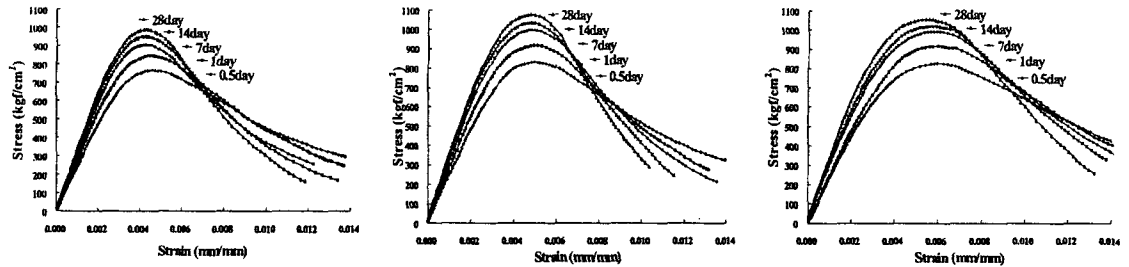


그림 3 (a) 9HS의 재령별 응력-변형률 곡선 (b) 13HS의 재령별 응력-변형률 곡선 (c) 17HS의 재령별 응력-변형률 곡선

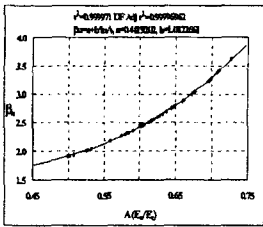


그림 4 상승구간의  $\beta_u$ 와 A와의 관계

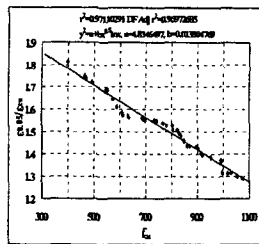
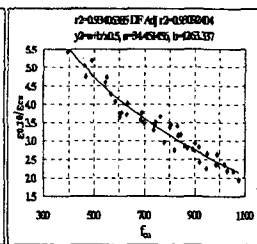


그림 5 (a) T와  $f_{cu}$ 의 관계



(b) S와  $f_{cu}$ 의 관계

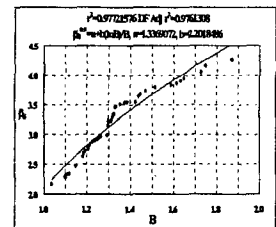


그림 6 하강구간의  $\beta_d$ 와 B의 관계

### 참고문헌

1. ACI Committee548, "Guide for the Use of Polymers in Concrete," American Concrete Institute, 1997.
2. Sadatoshi, O., Hannant, D. J., "Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composite," ACI Journal, Vol.91, No.3, pp.306~312, 1994.
3. Yip, W. K., "Generic Form of Stress-Strain Equations for Concrete," Cement Concrete Research, Vol.28, No.4, pp.499~508, 1998.
4. Kabaila, A., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve by Prakacsh Desayi and S. Krishnan," ACI Journal, Vol.61, No.3, pp.1227~1239, 1964.
5. Carreira, D. J., Chu, K. H., "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," ACI Journal, Proceedings, Vol.82, pp.797~804, 1985.