

# PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 거동 예측

## The Prediction of Long-Term Creep Behavior of Recycled PET Polymer Concrete

조병완\*                      태기호\*\*                      권오혁\*\*  
Jo, Byung Wan              Tae, Gi Ho              Kwon, Oh Hyuk

---

### ABSTRACT

In general, polymer concrete has more excellent mechanical properties and durability than Portland cement concrete, but very sensitive to heat and has large deformations. In this study, the long-term creep behaviors was predicted by the short-term creep test, and then the characteristic of creep of recycled-PET polymer concrete was defined by material and experimental variables. The error in the predicted long-term creep values is less than 5 percent for all polymer concrete systems. The filler carry out an important role to restrict the creep strains of recycled PET polymer concrete. The creep strain and specific on using the CaCO<sub>3</sub> were less than using fly-ash. The creep increases with an increase in the applied stress, but not proportional the rate of stress increase ratio. The creep behavior of polymer concrete using recycled polyester resin is not a linear viscoelastic behavior.

---

### 1. 서론

최근, 급속한 산업 발전으로 각종 폐기물로 인한 환경파괴가 심각해지는 가운데 지속가능 개발형, 친 환경 건설소재에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 이중 콘크리트 대체용으로 건설산업분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있는 폴리머 콘크리트는 우수한 재료적 특성으로 건설 구조물에 대한 응용 연구가 활발히 이루어지고 있다. 폴리머 콘크리트의 종류 중 폴리머와 골재를 혼합하여 제조되는 폴리머 콘크리트는 기존의 시멘트 콘크리트에 비해 조기강도 발현, 수밀성, 내식성, 내약품성 및 동결융해 저항성이 뛰어날 뿐 아니라, 압축, 인장 및 휨강도가 우수한 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 단기크리프 실험을 이용하여 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동을 예측하고 단기크리프 실험에서 얻어진 예측식의 신뢰성을 평가, 재료적, 실험적 변수에 의한 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 거동 특성을 파악하고 PET 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동을 파악할 수 있는 자료를 제시 하고자 한다.

---

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정

## 2. 크리프 실험

### 2.1 개요

크리프 실험을 통한 폴리머 콘크리트의 시간의존적 거동을 예측하기 위하여 표 1과 같이 실험 변수에 따라 실험을 실시하였다. 충전재는 플라이애시와 중탄산칼슘으로 중량비를 0~30%까지 변화시키고, 응력비 0.2~0.4에 따라 실험을 실시하였다.

본 실험에서 사용된 수지는 페 PET 불포화 수지로써 이에 대한 배합비를 나타내면 표 2와 같다. 또한, 골재는 건조로에 100. C 로 24시간 동안 건조를 시킨 후 상온에서 감열시켰고, 함수를 중량비 0.5%이하로 하였다. 이때 시험체의 양생과 제작은 ASTM C 1439의 규정을 참조하여 실험을 실시하였다.

### 2.2 실험 방법

일반적으로 PET 폴리머 콘크리트의 크리프 실험에 적용할 수 있는 규정은 현재 제시되어 있지는 않다. 따라서, 본 연구에서는 일반 시멘트 콘크리트의 압축 크리프 실험에 관한 규정 ASTM C 512 규정을 참조하였다.

단기크리프 실험은 온도를 일정하게 24시간동안 유지하고, 각 변수마다 총 4개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 4개의 실험체 중 3개의 실험체는 하중을 재하시켰고 나머지 1개는 온도와 경화수축 변위량을 측정하였다.

단기크리프 실험의 온도변화 단계는 온도의 영향을 파악하기 위해 10℃로 결정하였으며, 각 변수에 따라 20℃, 30℃, 40℃로 하였다. 항온실 내부의 온도를 20℃, 30℃, 40℃로 일정 하게 유지하고 실험체의 온도를 원하는 수준까지 올리고 하중을 작용시키기 전에 실험체가 온도의 영향을 완전히 받을 수 있도록 항온실 내부를 8시간동안 일정한 온도로 예열하였다. 하중은 재하 후 24시간동안 일정하게 재하시켰으며, 변형률은 제작한 실험체에 콘크리트용 스트레인 게이지를 종방향으로 대칭되게 2개를 부착하여 변형률을 측정하여 평균값을 이용하였고, 변형률 측정은 하중을 재하시킨 즉시 측정한 후 처음 1시간은 10간격, 8시간까지는 30간격 그리고 24시간까지는 1시간 간격으로 측정하였다. 또한, 24시간이 지나면 하중을 제거한 후, 온도를 20℃까지 줄이고 온도를 다음 단계로 올리기 전에 16시간동안 모든 크리프 변형률이 회복되도록 하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 장기 크리프 거동 예측

본 연구에서 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동을 예측하기 위하여 단기 크리프 실험을 이용하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 각각의 단기 크리프 실험에 의해서 얻어진 크리프 컴플

표 1 Variables and names of specimens

Names	Variables	Factors
F-C-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 20%	Type of filler
F-Fa-L20	Binder+Flyash 10%+Load 20%	
F-N-L20	Binder+filler 0%+Load 20%	
F-C-L30	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 30%	Stress ratio
F-C-L40	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 40%	

표 2 Variables on Test

PC System	Classification	Change Factor
F-C-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 20%	Type of filler
F-Fa-L20	Binder+Flyash 10%+Load 20%	
F-N-L20	Binder+filler 0%+Load 20%	
F-C-L30	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 30%	Stress ratio
F-C-L40	Binder+CaCO <sub>3</sub> 10%+Load 40%	

라이언스 곡선은 다음 식(1)과 같은 Prony series equation으로 표현된다.

$$D(t) = D_g + D_1(1 - e^{-t/24}) \quad (1)$$

여기서, glassy creep compliance  $D_g$ 는  $t=0$ 에서의 값이고  $D(24)$ 는  $t=24$ 일 때의 값이고,  $f(24)$ 는 비크리프비(the ratio of the specific creep)이다.

Prony series의 계수 값들은 아래에 표현되는 20°C에서의 장기 크리프 컴플라이언스를 예측하는 Prony series equation을 계산하는데 사용된다.

$$D(t) = D_g^{20} + D_1^{20}(1 - e^{-t/24}) + rD_1^{30}(1 - e^{-t/1000}) + rD_1^{40}(1 - e^{-t/6000}) \quad (2)$$

여기서,  $D_g^{20}$ 와  $D_1^{20}$ 는 20°C,  $D_1^{30}$ 는 30°C,  $D_1^{40}$ 는 40°C에서 각각의 단기 크리프 곡선에 의해 얻어진 Prony series equation의 계수 값들이다.

표 3에서 계산된 계수들을 이용하여 Prony series equation에 의해 얻어진 PET 재활용 폴리머 콘크리트(F-C-L20)의 예측식은 아래와 같이 표현된다.

$$D(t) = 204.6 + 30.55(1 - e^{-t/24}) + 46.07(1 - e^{-t/1000}) + 99(1 - e^{-t/6000}) \quad (3)$$

### 3.2 단기 크리프 실험의 평가

Prony series equation을 이용하여 얻어진 예측식과 실험을 통해 얻어진 크리프 컴플라이언스 곡선은 그림. 1, 2, 3에 보여지고 있다.

실험값과 예측식을 비교해보면 1년 간 총 크리프 변형률의 약 20%는 처음 2일 이내에 발생하고 20일 이내에 총 크리프 변형률의 50%가 발생한다. 이는 약 7일 이내에 총 크리프 변형률의 25%, 약 3개월 이내에 50%를 보이는 일반 시멘트 콘크리트에 비해 초기 변형률이 매우 크게 일어나는 것으로 보여진다.

표 3 The coefficient of Prony series equation ( $\mu\epsilon$ /kips)

PC System	r	$D_g^{20}$	$D_1^{20}$	$D_1^{30}$	$D_1^{40}$
F-C-L20	0.862	204.60	30.55	46.07	99.00
F-Fa-L20	0.906	218.91	35.10	49.97	112.30
F-N-L20	0.811	328.79	64.67	90.98	199.30
F-C-L20	0.865	214.30	36.42	53.33	114.44
F-C-L40	0.842	247.34	47.43	65.95	146.00

표 4 Comparison of the results

PC System	Creep Compliance			Specific Creep		
	Pred. $\mu\epsilon$ /kips	Exp. $\mu\epsilon$ /kips	Err. (%)	Pred. $\mu\epsilon$ /kips	Exp. $\mu\epsilon$ /kips	Err. (%)
F-C-L20	358.1	366.9	2.5	152.6	157.9	3.5
F-Fa-L20	390.2	383.9	-1.6	171.3	169.5	-1.1
F-N-L20	650.2	650.0	2.1	308.7	316.4	2.5
F-C-L30	391.9	397.5	1.4	177.6	186.0	4.7
F-C-L40	482.7	482.7	2.1	225.5	232.7	3.2

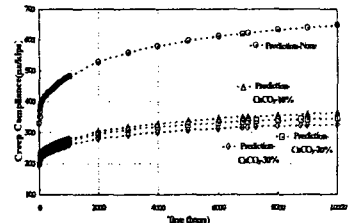
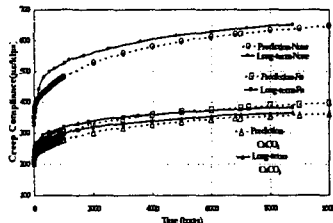
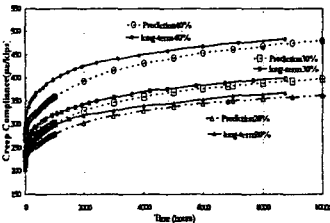


그림. 1 creep compliance curves on type of filler    그림. 2 The creep compliance curves on stress ratio    그림. 3 The creep compliance curves on filler contents

### 3.3 응력비의 영향

수지량과 충전재 함량을 일정하게 하고 응력비를 압축강도의 20~40%로 변화시켜 크리프 실험을 진행하였다. 응력비의 영향에 대한 크리프 변형률 곡선과 비 크리프 곡선은 그림. 4과 5에 보여지고 있다. 그 결과를 비교하면 응력비가 증가할수록 크리프 변형률과 비 크리프는 증가하지만 그 비율은 비례하지 않는다. 단위 응력에 대한 크리프 변형률을 나타내는 비 크리프의 경우에도 크리프 변형률과 비슷한 경향을 나타냈다.

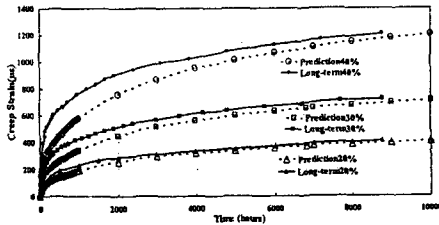


그림. 4 The creep strain curves on stress ratio

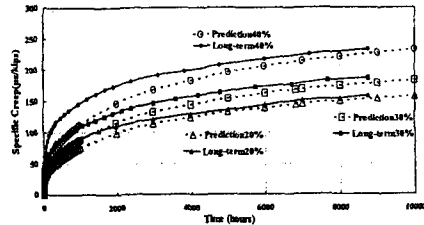


그림. 5 The specific creep curves on stress ratio

## 4. 결 론

본 연구에서는 단기 크리프 실험을 이용하여 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동을 예측하고, 충전재의 종류, 응력비에 따른 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 특성을 규명하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) Pront series equation을 이용하여 단기 크리프 실험을 통해 PET 재활용 콘크리트의 장기 크리프 예측식은 기준 배합비의 경우  $D(t) = 204.6 + 30.55(1 - e^{-t/24}) + 46.07(1 - e^{-t/100}) + 99(1 - e^{-t/6000})$  로 나타났으며 그 결과 오차가 약 5% 이내로 매우 작은 것으로 나타났다.
- (2) PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 변형률은 일반 포틀랜드 시멘트에 비하여 초기 변형이 다소 큰 것으로 나타났다.
- (3) 탄산계 충전재가 플라이애쉬를 사용한 경우보다 크리프 변형률, 비 크리프 모두 더 작은 값을 나타냈다. 이는 탄산계 충전재의 비표면적이 플라이애쉬 보다 더 크기 때문에 부착력의 증가한 것으로 보인다.
- (4) 크리프 변형률과 비 크리프는 응력비의 증가에 따라 증가하지만 그 값은 비례적으로 증가하지 않았다. 이는 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 거동은 선형 점탄성 거동이 아닌 비선형 점탄성 거동을 하는 것으로 보여진다.

### 참고문헌

1. Alkonis, J. J., Maxknight, W. J., Shen, M., Introduction to Polymer Viscoelasticity, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, INC., New York, 1972.
2. E. Riande, R. Diaze-Calleja, Margarita G. Prolongo, Rosa M. Masegosa, Catalina Salom Polymer Viscoelasticity Stress and Strain in Practice, Marcel Dekker, INC. 2000.
3. Hsu, M., Fowler, D.W, Creep and Fatigue of Polymer Concrete, Polymer Uses-Materials and Properties, ACI, SP 89-17, pp. 323~343, 1985.