

# PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동 예측

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

조병완\* · 태기호\*\* · 박종화\*\*\* · 박성규\*\*\*\*

Cho, Byung Wan · Tae, Gi Ho · Park, Jong Hwa · Park, Sung Kew

### ABSTRACT

Polymer concrete using wastes PET recycled resin that is, in general, more excellent mechanical properties than portland cement concrete. A lot of works are carried out about short-term properties of polymer concrete, however, little work has done to define their long-term properties, that is, sustain load such as creep.

In this study will show the data that can long-term behavior of polymer concrete by short term creep test of polymer concrete that was affect to the temperature and the time to predict to long-term creep behavior. Then prediction equation was similar tendency that was comparing to short-term creep test and long-term creep test.

### 1. 서 론

폴리머 콘크리트는 우수한 역학적 특성을 갖고 있어 구조용 부재에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 폴리머 콘크리트의 단기적 특성에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있지만 크리프와 같은 장기 지속하중을 받는 경우에 대해서는 아직 연구가 미비하다. 따라서 본 연구에서는 장기 크리프 거동을 예측하기 위하여 온도와 시간의 영향을 받는 폴리머 콘크리트의 단기 크리프 실험을 실시하여 장기 크리프를 예측함으로써 폴리머 콘크리트의 장기거동을 파악할 수 있는 자료를 제시 하고자 한다.

### 2. 크리프 모델 및 이론

#### 2.1 The Prony Series Equation of the Creep Compliance

크리프 컴플라이언스  $D(t)$  를 구하기 위하여 총 변형률  $\epsilon(t)$  에서 재하응력을 나뉘준다. 이러한 Voight 요소  $i$  에서의 총 변형률은

$$\epsilon_i(t) = \frac{f_0}{E_i} (1 - \exp^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

$k$ 개의 Voight 요소로 구성된 크리프 모델의 총 변형률  $\epsilon(t)$  에 재하응력  $f_0$  로 나누어 크리프 컴플라이언스를 얻을 수 있다

\* 정희원, 한양대학교 도시건설환경공학부 정교수

\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정, (주)현대건설

\*\*\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정

$$D(t) = D_g + \sum_{i=1}^k D_i(1 - \exp^{-t/\tau_i}) \quad (2)$$

$$\text{여기서, } D_g = \frac{1}{E_0} \text{ and } D_i = \frac{1}{E_i}$$

위에 표현된 방정식은 Prony series expansion으로 크리프 컴플라이언스의 한 부분이나 전체 곡선의 표현하는데 사용된다. k점에서의 크리프 컴플라이언스 곡선에서 좌표  $D(t_i)$  와  $t_i$  는 Prony series expansion에서 지수항(exponential term)을 사용하기 때문에 log-time 간격과 거의 같다.  $\tau_i$  는 시간  $t_i$  와 같게 한다. 좌표  $D(t_i)$  와  $t_i$  는 위의 방정식 대신 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^k (1 - \exp^{-t_i/\tau_i}) D_i = D(t_i) - D_g \quad (3)$$

## 2.2 Superposition

시간과 온도의 상호의존관계는 크리프 실험의 기간을 조절하여 여러 온도에서의 단기 크리프 실험에 의해서 장기 크리프 컴플라이언스를 만들 수 있다.

온도  $T_1$ ,  $T_2$  그리고  $T_3$  세 개의 크리프 실험을 각각 24시간에 걸쳐 실시한다. 기준 온도는 장기 크리프 실험을 실시할 때의 온도  $T_3$  를 선택하여  $T_2$  곡선은 아랫부분이  $T_3$  곡선의 윗 부분에 중첩되도록 오른쪽으로 이동시킨다. 이 때  $T_1$  곡선은 이동한  $T_2$  곡선의 새로운 위치에 일치하게 이동한다. Log time scale에서 수평축이동(horizontal shift)의 크기는  $\log a_T$ 에 의해 결정된다.  $a_T$  또는  $\log a_T$ 는 실험에 의해서 결정되는 것이 아니라 polymer의 종류에 따라 같게 주어진다. 그러므로 creep나 stress-relaxation 곡선들은 같은 크기로 이동한다. 만일  $T_g$ 가 기준온도(reference temperature)로 선택한다면 온도 의존적인 대부분의 비결정질 polymer의 이동 요소(shift factor)는 다음과 같다.

$$\log a_T = \frac{-C_1^g(T - T_g)}{C_2^g + T - T_g} = \frac{-17.4(T - T_g)}{0.025/\Delta\alpha + T - T_g} \quad (4)$$

## 3. 실험

실험체의 제작은 KS F 2481 폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 실험방법에 따라 제작하였으며 실험체 크기는  $\Phi 7.5 \times 15$ cm 원주형 실험체를 사용했다. 실험체를 제작, 탈형 후 70°C의 오븐에 7일간 양생하였다. 단기 크리프 실험은 24시간동안 서로 다른 온도에서 실행되었고 각 변수마다 총 4개의 실험체를 사용하였다. 3개의 실험체는 하중을 재하시켰고 나머지 1개는 온도와 경화수축 변위량을 측정하였다. Short-term creep test의 온도변화 단계는 온도의 영향을 주기 위해 10°C로 결정하였으며, 각 변수에 따라 20°C, 30°C, 40°C 총 3번 실시되었다. 하중은 재하 후 24시간동안 일정하게 재하시켰으며, 변형률 측정은 하중을 재하시킨 즉시 측정한 후 처음 1시간은 10분씩, 8시간까지는 30분씩 그리고 24시간까지는 1시간씩 측정하였다.

## 4. 결 과

Prony series expansion은 단기 크리프 컴플라이언스 곡선을 설명하는데 사용된다.  $t=0$  과  $t=24$ 에 서 크리프 컴플라이언스의 값은 식(4)에 의해서 결정한다. 지연시간  $\tau_1$  은  $t=24$  와 같게 하고  $\tau_2$  와

$\tau_3$  는 각각 1000과 6000이다.  $D_1$ 는 온도가 증가함에 따라 증가한다. 시간-온도 응답 이론에 의하면 온도 또는 시간의 증가에 의해 크리프 컴플라이언스가 증가함에 따라  $D_1$ 의 값이 증가한다. 그러므로  $D_2$ 와  $D_3$ 는 각각 30°C와 40°C곡선의  $D_1$ 의 값으로 표현 할 수 있다

$$D_2 = rD_1^{30}, \quad D_3 = rD_1^{40} \quad (5), (6)$$

여기서,  $r$ 은 크리프 컴플라이언스 예측에 오차를 최소화하기 위해서  $D_1$  값을 보정하는 요소이다.

$$r = \frac{D_1^{20}}{D_1^{30}} + \frac{D_1^{30}}{D_1^{40}} - f_{ave} \quad (7)$$

여기서,  $f_{ave}$ 는 비 크리프 비(ratio of specific creep)로 단기 크리프 실험에 대한 값을 평균한 것이다. 다음과 같은 장기 크리프 컴플라이언스 예측식으로 표현된다.

$$D(t) = D_g^{20} + D_1^{20}(1 - \exp^{-t/24}) + rD_1^{30}(1 - \exp^{-t/1000}) + rD_1^{40}(1 - \exp^{-t/6000}) \quad (8)$$

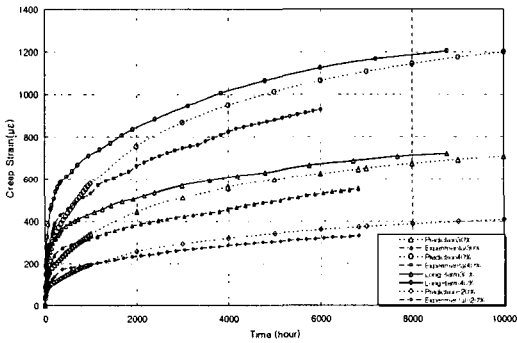


그림 1 응력비에 따른 크리프 변형률 곡선

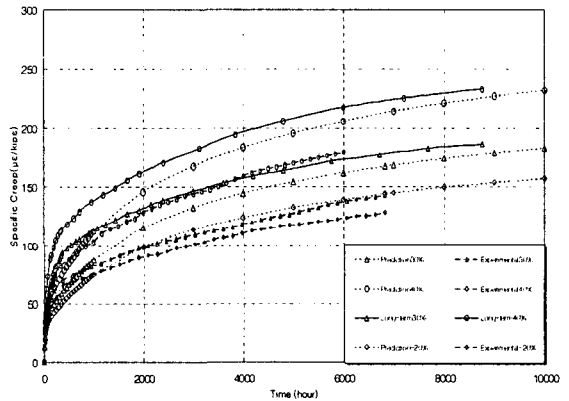


그림 2 응력비에 따른 비크리프 곡선

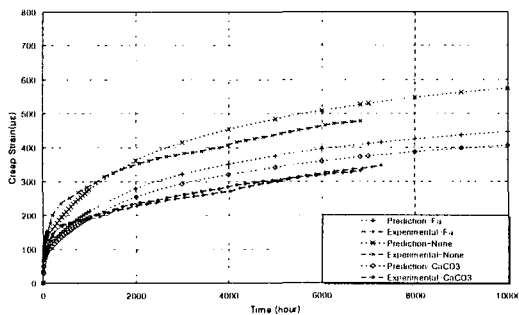


그림 3 축전재의 연령에 따른 크리프 변형률 곡선

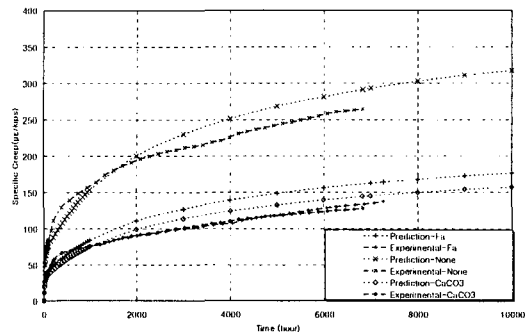


그림 4 축전재에 영향을 따른 비크리프 곡선

Prony series equation과 단기 크리프 실험을 이용하여 예측한 장기 크리프 곡선에 대한 결과는 그림 1~4에 보여지고 있다. 그림 1은 응력비에 따른 크리프 변형률을 나타내고 있다. 응력비는 압축강도의

20, 30, 그리고 40%로 하였다. 6500시간에 대한 예측식과 단기 크리프 실험에 의한 크리프 변형률은 20%일 때 365-320( $\mu\epsilon$ ), 30%일 때 628-530( $\mu\epsilon$ ), 그리고 40%에서는 1063-927( $\mu\epsilon$ )로 나타났다. 응력의 증가는 1.5, 2배로 증가하였지만 크리프 변형률은 예측식에서는 1.72, 2.91배로 증가하였고 단기 크리프 실험에 의한 예측에서도 1.66, 2.9배 증가하였다. 장기 크리프 실험의 결과에서도 응력이 1.5배 증가하였을 때 크리프 변형률은 1.67배 증가하여 유사한 경향을 나타내었다. 그림 2는 단위응력에 대한 크리프 변형률을 나타내는 비 크리프(Specific Creep) 곡선을 나타내었다. 여기서 적용하중이 20%일 때 예측식과 단기 크리프 실험에 의한 비 크리프는 20%일 때 139.06-123( $\mu\epsilon/kips$ ), 30%는 161.96-137( $\mu\epsilon/kips$ ), 40%는 205.51-179.16( $\mu\epsilon/kips$ ), 그리고 장기 크리프 실험의 경우 응력비 30%와 40%일 때 각각 173( $\mu\epsilon/kips$ ), 217.22로 나타났다. 이는 응력비가 증가할수록 단위하중에 의한 크리프 변형률이 더 크게 증가한다는 것을 보여주고 있다.

그림 3와 4는 충전재의 영향에 따른 크리프 변형률 곡선을 보여주고 있다. 충전재는 중탄산칼슘( $CaCO_3$ ), 플라이애쉬(Fly-ash) 각 11%(wt.) 그리고 나머지 한 개는 충전재를 넣지 않았다. 그림 5에서 보여지듯이 충전재를 넣지 않은 실험체의 크리프 변형률은 예측식에서 약 38% 크게 나타났다. 단기 크리프 실험에서도 42%정도 큰 값을 나타내었다. 폐 PET 재생 불포화 폴리에스터 수지는 고분자 화합물로 불안정한 상태이므로 자체의 변형이 크게 일어난다. 이러한 변형을 구속해주는 역할을 충전재가 하므로 이러한 경향을 나타내는 것으로 생각된다. 그림 6에서는 이러한 경향이 더욱 확연하게 나타나고 있다. 중탄산칼슘과 플라이애쉬를 넣은 실험체의 비 크리프는 예측식에서 143.83-161.32( $\mu\epsilon/kips$ ), 단기 크리프 실험에서는 128.0-133.39( $\mu\epsilon/kips$ )이지만 충전재를 넣지 않은 실험체의 비크리프는 290.95-263.91( $\mu\epsilon/kips$ )로 약 2배정도 큰 값을 나타내었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 시간-온도 응답(Time-Temperature correspondence)에 의한 중첩이론을 통해 단기 크리프 실험과 Prony series equation을 이용하여 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 거동을 예측하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단기 크리프 실험과 Prony series equation의 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 장기 크리프 예측은 장기 크리프 실험에 의한 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.
2. PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 변형률은 응력비의 증가에 따라 증가하였지만, 크리프 변형률의 증가량은 응력비의 증가량보다 더 크게 나타났다.
3. PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 변형률은 충전재의 영향을 크게 받는다. 이는 그림 4 충전재의 영향에 따른 비크리프 곡선에서 보여주듯이 충전재의 유무에 따라 2배정도의 차이를 나타낸다.

## 참고문헌

1. John D. Ferry (1980) Viscoelastic properties of polymers, third edition, John Wiley & Sons, Inc.
2. Lawerence E. Nielsen, Robert F. Landel, (1994) Mechanical properties of polymers and composites, second edition, John Wiley & Sons, Inc.
3. Michael Hsu, David W. Fowler Creep and fatigue of polymer concrete, ACI SP 89-17, pp. 323~351
4. K. Aniskevich, J. Hristova (1998) Prediction of creep of polymer concrete, Journal of applied polymer science, Vol.71, pp. 1949~1952.