

## 단기 크리프 실험을 이용한 PET 재활용 폴리머콘크리트의 장기 크리프거동 예측

조병완<sup>1)</sup> · 태기호<sup>1)\*</sup> · 김철환<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과

(2004년 2월 5일 원고접수, 심사완료 2004년 6월 28일)

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

Byung-Wan Jo<sup>1)</sup>, Ghi-Ho Tae<sup>1)\*</sup>, and Chul-Hwan Kim<sup>1)</sup>

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

(Received February 5, 2004, Accepted, June 28, 2004)

#### 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.

**Keywords :** recycled PET, polymer concrete, creep compliance, glassy, viscoelastic, shifted factor

## 1. 서 론

최근, 급속한 산업 발전으로 각종 폐기물로 인한 환경 파괴가 심각해지는 가운데 지속가능 개발형, 친환경 건설소재에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 이중 콘크리트 대체용으로 건설산업분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있는 폴리머콘크리트는 우수한 재료적 특성으로 건설 구조물에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 폴리머 콘크리트의 종류 중 폴리머와 골재를 혼합하여 제조되는 폴리머콘크리트는 기존의 시멘트 콘크리트에 비해 조기강도 발현, 수밀성, 내식성, 내약품성 및 동결융해 저항성이 뛰어날 뿐 아니라, 압축, 인장 및 휨강도가 우수한 것으로 보고되고 있다.(1) 폴리머콘크리트의 주성분인 액상레진은 결합재로써 불포화 폴리에스터 수지가 많이 사용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 폐플라스틱을 이용함으로써 자원환경을 보존하고, 폴리머콘크리트의 경제성 문제를 해결하고자 시도하였다.

본 연구에서 사용한 수지는 폐합성수지 중 하나인 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)로써 플라스틱 용기나 탄산음료병과 같은 것을 자원재활용하여 생산된 수지이다.

이러한 수지를 이용한 폴리머콘크리트를 구조적 부재로 활용하기 위한 재료적 연구는 조금 이루어지고 있으나, 수지의 특성이 고려된 시간의존적 거동, 즉 지속하중을 받는 크리프와 같은 연구는 아직 미흡한 실정이다. 크리프와 같은 장기 지속하중을 받는 구조부재의 거동을 파악하는 연구는 필수적이며, 구조부재 검토 시 반드시 이루어져야 할 부분이다. 그러나, 크리프거동은 단기간의 거동이 아닌 장기간의 실험기간이 소요되고 그 특성 파악도 많은 노력이 필요하다. 본 연구에서는 단기크리프 실험을 이용하여 PET 재활용 폴리머콘크리트의 장기 크리프거동을 예측하고 단기크리프 실험에서 얻어진 예측식의 신뢰성을 평가, 재료적, 실험적 변수에 의한 PET 재활용 폴리머콘크리트의 크리프거동 특성을 파악하고 PET 폴리머콘크리트의 장기 크리프거동을 파악할 수 있는 자료를 제시 하고자 한다.

## 2. 폴리머콘크리트의 점탄성 거동

### 2.1 점탄성 거동

크리프를 포함한 점탄성 변형은 분자의 시간의존적인 이동에 의해 발생한다. 이러한 변형은 응력 또는 변형률의 크기, 온도, 하중지속시간 그리고 수지의 종류에 영향

\* Corresponding author

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

E-mail : joycon@hanmail.net

을 받게된다. 폴리머의 점탄성 거동은 온도의 증가에 따라 서로 다른 거동을 보이며, 시간 역시 온도의 영향과 비슷한 점탄성 거동이 나타나게 된다.

단위 응력당 변형률을 나타내는 크리프 컴플라이언스  $D(t)$ 는 Fig. 1과 같이 시간과 온도의 함수로 표현되고, 각 단계는 glassy, transition, rubbery 그리고 linear로 정의된다<sup>1)</sup>. glassy 영역에서는 유리와 같은 취성적인 성질을 나타내고, Glassy 영역의 아래부분에 크리프 컴플라이언스가 도달했을 때를 glassy creep compliance,  $D_g$ 라 한다. 온도 또는 시간이 증가하면 폴리머의 가교결합의 강성이 약해지면서 크리프 컴플라이언스는 "rubbery modulus"  $D_e$ 에 도달하게 되지만, 가교결합을 하지 않는 폴리머의 경우에는 온도 또는 시간이 증가하면 "linear 영역"으로 계속 가게된다.

## 2.2 중첩이론

시간과 온도의 상호의존관계는 크리프 실험의 기간을 단축하여 여러 온도에서의 단기크리프실험에 의해서 장기 크리프컴플라이언스를 만들 수 있다. 온도  $T_1$ ,  $T_2$  그리고  $T_3$  세 개의 크리프 실험을 각각 24 시간에 걸쳐 Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 실시된 세개의 단기 크리프 실험에 대한 컴플라이언스를 log-time scale에 표현함으로써 장기크리프 특성을 예측할 수 있다<sup>2,4)</sup>.

먼저, 장기크리프실험을 실시할 때의 온도  $T_3$  를 기준 온도로 선택하고,  $T_2$  곡선은 아랫부분이  $T_3$  곡선의 윗부분에 중첩되도록 오른쪽으로 이동시키며,  $T_1$  곡선은 이동한  $T_2$  곡선의 새로운 위치에 일치하도록 이동시킨다. 이때, 기준온도  $T_3$  에서 만들어진 크리프컴플라이언스 곡선을 master curve라 한다.

Log time scale에서 수평축이동(horizontal shift)의 크기는  $\log a_T$  에 의해 주어진다.  $a_T$  또는  $\log a_T$  는 실험에 의해서 결정되는 것이 아니라 polymer에 따라 같게 주어진다. 그러므로 creep나 stress-relaxation 곡선들은 같은 크기로 이동한다. 만일  $T_g$ 가 기준온도(reference temperature)로 선택한다면 온도의존적인 대부분의 비결정질 polymer의 이동요소(shift factor)는

$$\log a_T = \frac{-C_1^g(T - T_g)}{C_2^g + T - T_g} \quad (1)$$

또는, 간략식으로 polymer의  $\Delta a$  값의 평균값인  $4.8 \times 10^4 K^{-1}$  을 적용하면 다음 식(2)와 같이 나타내어진다.

$$\log a_T = \frac{-17.4(T - T_g)}{51.6 + T - T_g} \quad (2)$$

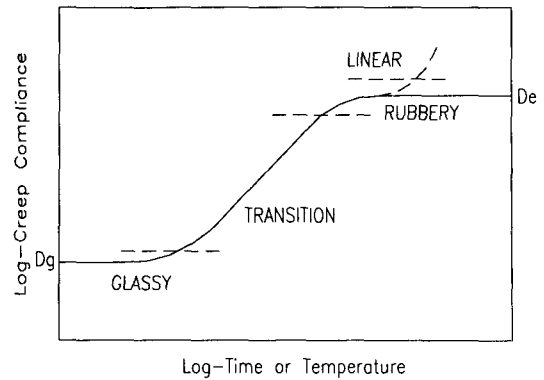


Fig. 1 The different regions of viscoelastic behavior<sup>1)</sup>

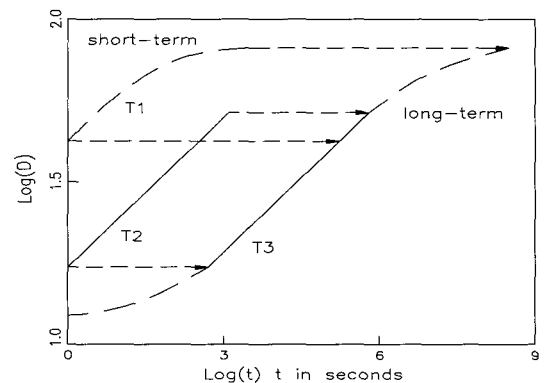


Fig. 2 Superposition on logarithmic scale

여기서,  $\Delta a$ 는 유리성질상태와 액체성질 사이의 용적 팽창계수의 차이이고 온도는 절대온도이다.

## 2.3 The Prony Series Equation

크리프거동은 Voight-Kelvin, 또는 일반화된 Voigt 모델에 의해 설명되어진다. Voigt 모델은 한 개의 스프링 요소와 한 개의 감쇠요소가 병렬로 구성되고 일반화된 Voigt 모델은 여러 개의 Voigt 모델의 연결로 구성된다. Fig. 3은 일반화된 Voigt 모델과 하나의 탄성요소로 구성된 크리프 모델을 보여 주고 있다<sup>4,5)</sup>. 크리프실험 시 응력  $f_0$  를 재하시키고 변형률을 측정 한 후, 크리프컴플라이언스  $D(t)$  를 구하기 위하여 총 변형률  $\epsilon(t)$  에서 재하응력을 고려하면, 하나의 Voigt 요소에서의 총 응력은 두 개의 기본요소인 스프링과 감쇠에 대한 응력의 합으로 표현할 수 있다. 이러한 Voigt 요소  $i$  에 대한 기초 방정식은 식(3)과 같다.

$$f_0 = E_i \epsilon_i(t) + \eta_i \frac{d\epsilon_i(t)}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $\tau_i$  는 감쇠의 점성인  $\eta_i$  와 스프링 계수  $E_i$  의 비율로써 지연시간으로 정의한다.

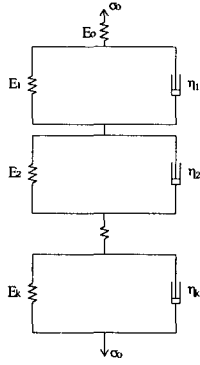


Fig. 3 Generalized Voigt creep model

Voigt 요소  $i$  에서의 총 변형률은

$$\epsilon_i(t) = \frac{f_0}{E_i} (1 - \exp^{-t/\tau_i}) \quad (4)$$

한 개의 spring 요소와  $k$ 개의 Voigt 요소로 구성된 크리프 모델의 총 변형률  $\epsilon(t)$  는 식(5)와 같고,

$$\epsilon(t) = \frac{f_0}{E_0} + \sum_{i=1}^k \frac{f_0}{E_i} (1 - \exp^{-t/\tau_i}) \quad (5)$$

위의 방정식에 응력  $f_0$  으로 나누어 크리프컴플라이언스를 구하면, 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_g + \sum_{i=1}^k D_i (1 - \exp^{-t/\tau_i}) \quad (6)$$

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

위에 표현된 방정식은 Prony series 팽창으로 크리프의 거동을 설명하는데 사용되어지는데, 이때 Glassy 크리프컴플라이언스  $D_g$ 는 순간 탄성변형률을 재하하중으로 나눠준 값이다.  $k$ 점에서의 크리프컴플라이언스 곡선에서 좌표  $D(t_j)$  와  $t_j$ 는 Prony series 팽창에서 지수항(exponential term)을 사용하기 때문에 log-time 간격과 거의 비슷하다. 따라서, 지연시간(retardation time)  $\tau_i$  는 시간  $t_j$  와 같게 함으로써 좌표  $D(t_j)$  와  $t_j$  는 다음 식(7)과 같이 최종적으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^k (1 - \exp^{-t_j/\tau_i}) D_i = D(t_j) - D_g \quad (7)$$

Table 4 Physical properties of aggregates

-	Size (mm)	Specific gravity	Bulk specific gravity	Ratio of Abrasion(%)	Unit weight (N/cm <sup>3</sup> )	Fineness modulus	Absorption (%)
Coarse	≤ 13	2.60	2.61	10.7	14,700	6.42	0.7
Fine	≤ 6	2.63	2.6	-	16,121	2.48	0.44

### 3. 크리프 실험

#### 3.1 개요

크리프 실험을 통한 폴리머콘크리트의 시간의존적 거동을 예측하기 위하여 Table 1과 같이 실험 변수에 따라 실험을 실시하였다. 폴리머콘크리트의 재료는 결합재로서 C회사에서 제조된 페 PET 재활용 불포화 폴리에스테르 수지를 사용하였고, 골재는 수분함유량을 무게대비 0.5%이하로 줄이기 위해 100 °C에서 24시간동안 건조시켜 사용하였으며, 충전재는 플라이애쉬와 중탄산칼슘으로 중량비를 0~30%까지 변화시키고, 응력비 0.2~0.4에 따라 실험을 실시하였다. 이에 사용된 재료들의 성질을 나타내면 Table 2 ~ 4와 같고, 사용된 재활용 PET 폴리머콘크리트의 배합비를 Table 5에 나타내었다. 이때 시험체의 양생과 제작은 ASTM C 1439의 규정을 참조하여 실험을 실시하였다.

#### 3.2 실험방법

일반적으로 PET 폴리머콘크리트의 크리프 실험에 적용할 수 있는 규정은 현재 제시되어 있지는 않다.

Table 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-C20-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 20%+Load 20%	Filler contents
F-C30-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 30%+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%	

Table 2 Chemical composition of fly ash, and CaCO<sub>3</sub> (%)

-	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig.loss
Fly ash	57.09	24.66	10.5	2.58	1.37	0.94	3.5
CaCO <sub>3</sub>	2.23	0.25	0.09	53.7	0.66	-	42.4

Table 3 Physical properties of fly ash and CaCO<sub>3</sub>

-	Specific gravity	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Moisture (%)	PH	Absorption (%)
Fly ash	2.2	3,765	0.2		
CaCO <sub>3</sub>	2.7	2,500~3,000	0.3	8.8	0.1

Table 5 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-C20-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 20%+load 20%	Filler contents
F-C30-L20	Binder+CaCO <sub>3</sub> 30%+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%	

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 °C로 결정하였으며, 각 변수에 따라 20 °C, 30 °C, 40 °C로 하였다. 항온실 내부의 온도를 20 °C, 30 °C, 40 °C로 일정 하게 유지하고 실험체의 온도를 원하는 수준까지 올리고 하중을 작용시키기 전에 실험체가 온도의 영향을 완전히 받을 수 있도록 항온실 내부를 8시간동안 일정한 온도로 예열하였다(Fig. 4). 하중은 재하 후 24시간동안 일정하게 재하시켰으며(Fig. 5), 변형률은 제작한 실험체에 콘크리트용 스트레인 게이지를 종방향으로 대칭되게 2개를 부착하여 변형률을 측정하여 평균값을 이용하였고, 변형률 측정은 하중을 재하시킨 즉시 측정된 후 처음 1시간은 10간격, 8시간까지는 30간격 그리고 24시간까지는 1시간 간격으로 측정하였다. 또한, 24시간이 지나면 하중을 제거한 후, 온도를 20 °C까지 줄이고 온도를 다음 단계로 올리기 전에 16시간동안 모든 크리프변형률이 회복되도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 장기크리프거동 예측

본 연구에서 PET 재활용 폴리머콘크리트의 장기크리프거동을 예측하기 위하여 단기크리프 실험을 이용하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 각각의 단기크리프 실험에 의해서 얻어진 크리프컴플라이언스 곡선은 다음 식 (8)과 같은 Prony series equation으로 표현된다

$$D(t) = D_g + D_1(1 - e^{-t/24}) \quad (8)$$

여기서, glassy creep compliance  $D_g$ 는  $t=0$ 에서의 값이고  $D(24)$ 는  $t=24$ 일 때의 값이다. Prony series

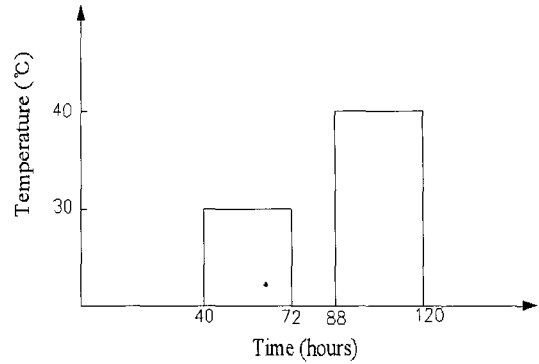


Fig. 4 Enclosure temperature for short-term test

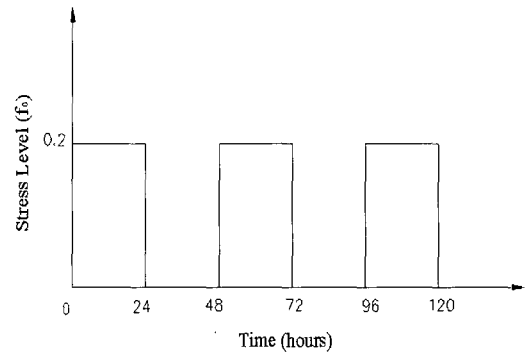


Fig. 5 Stress level for short-term creep test.

의 계수인  $D_g$ 와  $D_1$ 의 결과 값과 비 크리프비 (the ratio of the specific creep)인  $f(24)$ 는 Table 6에 보여지고 있다.

Table 6에 보여지는 Prony series의 계수 값들은 아래에 표현되는 20 °C에서의 장기크리프컴플라이언스를 예측하는 Prony series equation을 계산하는데 사용된다.

$$D(t) = D_g^{20} + D_1^{20}(1 - e^{-t/24}) + rD_1^{30}(1 - e^{-t/1000}) + rD_1^{40}(1 - e^{-t/6000}) \quad (9)$$

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

Time-temperature correspondence에 의하면 온도 또는 시간의 증가에 의해 크리프컴플라이언스가 증가함에 따라  $D_1$ 의 값이 증가한다. 그러므로 20 °C에서의 장기 크리프 곡선의 계수는  $D_2$ 와  $D_3$ 는 각각 30 °C와 40 °C 곡선의  $D_1$ 의 값으로 표현 할 수 있다.

$$D_2 = rD_1^{30} \quad (10), \quad D_3 = rD_1^{40} \quad (11)$$

여기서,  $r$ 은 크리프컴플라이언스 예측에 오차를 최소화 하기 위해서  $D_1$  값을 보정하는 요소이다.

$$r = \frac{D_1^{20}}{D_1^{30}} + \frac{D_1^{30}}{D_1^{40}} - f_{ave} \quad (12)$$

여기서,  $f_{ave}$ 는 비 크리프 비(ratio of specific creep)로 각각의 단기크리프 실험에 대한 값을 평균한 것이다.

$$f = [D(24) - D_g] / D_g \quad (13)$$

$$f_{ave} = [f^{20}(24) + f^{30}(24) + f^{40}(24)] / 3 \quad (14)$$

위에서 계산된 계수들을 이용하여 Prony series equation에 의해 얻어진 PET 재활용 폴리머콘크리트(F-C-L20)의 예측식은 아래와 같이 표현된다.

$$D(t) = 204.6 + 30.55(1 - e^{-t/24}) + 46.07(1 - e^{-t/1000}) + 99(1 - e^{-t/6000}) \quad (15)$$

#### 4.2 단기크리프 실험의 평가

Prony series 방정식을 이용하여 얻어진 예측식과 실험을 통해 얻어진 크리프컴플라이언스 곡선은 Figs. 6~8에 보여지고 있다. 실험값과 예측식에 의한 결과값의 오차는 20 °C에서의 단기크리프 곡선의 유리전이계수와 장기크리프의 유리전이계수값의 차이에서 발생한 것으로 생각된다. 실험값과 예측식을 비교해보면 1년 간 총 크리프변형률의 약 20%는 처음 2일 이내에 발생하고 20일 이내에 총 크리프변형률의 50%가 발생한다. 이는 약 7일 이내에 총 크리프변형률의 25%, 약 3개월 이내에 50%를 보이는 일반 시멘트 콘크리트에 비해 초기 변형률이 매우 크게 일어나는 것으로 보여진다.

Table 6 Results of short-term creep test ( $\mu\epsilon$ /kips)

PC system	Temp. (°C)	D(0)=D <sub>g</sub>	D(24)	D <sub>1</sub>	f(24)
F-C-L20	20	204.60	223.91	30.55	0.0094
	30	223.51	257.30	53.45	0.151
	40	260.00	332.60	114.85	0.279
F-Fa-L20	20	218.91	241.10	35.10	0.101
	30	240.98	275.85	55.16	0.145
	40	278.24	356.60	123.96	0.279
F-N-L20	20	328.79	369.67	64.67	0.124
	30	368.19	439.10	112.18	0.193
	40	437.36	592.70	245.74	0.355
F-C-L20	20	214.30	237.32	36.42	0.107
	30	237.89	276.86	61.65	0.164
	40	275.34	358.80	123.30	0.304
F-C-L40	20	247.34	277.32	47.43	0.121
	30	278.42	327.91	78.32	0.184
	40	322.30	431.91	173.40	0.340
F-C20-L20	20	200.11	219.30	30.37	0.096
	30	217.92	241.50	37.30	0.108
	40	239.67	280.20	64.12	0.169
F-C30-L20	20	195.58	211.50	25.19	0.081
	30	219.14	245.80	42.18	0.122
	40	243.14	284.80	65.91	0.171

Table 7에서는 예측식에 의한 비 크리프와 크리프컴플라이언스값을 실험 값과 수치적으로 비교하였다. 오차는 1년간의 결과 값을 백분율로 표현하였다. Table 8에서 알 수 있듯이 예측식에 의한 결과 값과 실험 값과의 오차는 모든 배합비에 걸쳐 5% 이내로 나타났다. 이는 단기 크리프 실험을 이용한 PET 재활용 폴리머콘크리트의 장기 크리프거동을 예측하는 방법이 매우 높은 정확도를 가지는 것으로 생각된다.

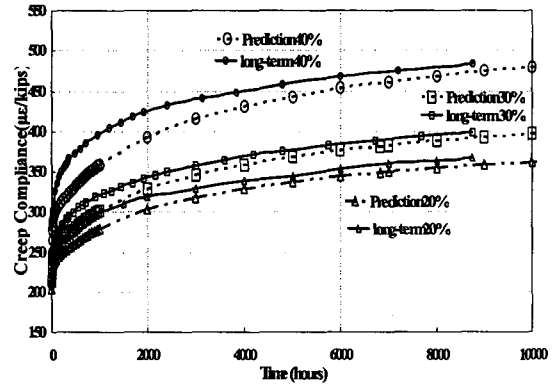


Fig. 6 The creep compliance curves on type of filler

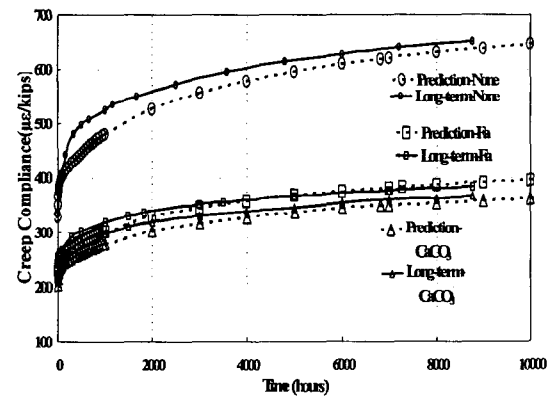


Fig. 7 The creep compliance curves on stress ratio

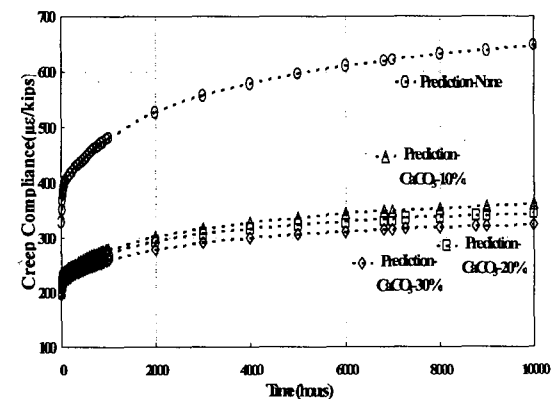


Fig. 8 The creep compliance curves on filler contents

**Table 7** The coefficient of Prony series equation ( $\mu\epsilon/\text{kips}$ )

PC system	r	$D_0^{20}$	$D_1^{20}$	$D_1^{30}$	$D_1^{40}$
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
F-C20-L20	1.272	200.11	30.37	47.45	81.56
F-C30-L20	1.110	195.58	25.46	46.82	73.16

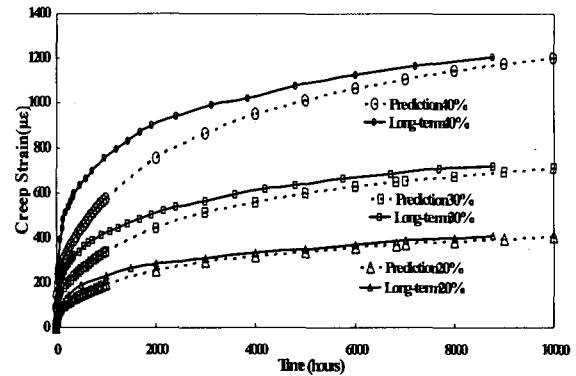
**Table 8** Comparison of the results

PC system	Creep compliance			Specific creep		
	Pred. $\mu\epsilon/\text{kips}$	Exp. $\mu\epsilon/\text{kips}$	Err. (%)	Pred. $\mu\epsilon/\text{kips}$	Exp. $\mu\epsilon/\text{kips}$	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

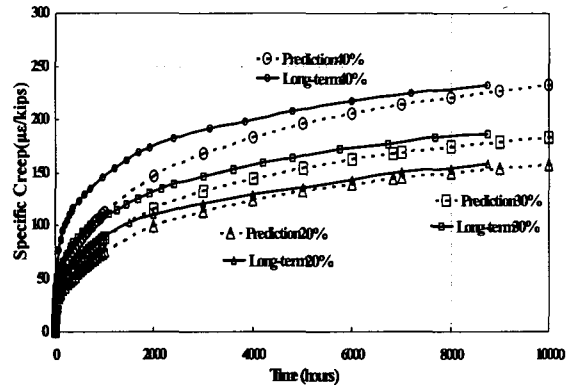
### 4.3 충전재 종류의 영향

폴리머콘크리트에서 충전재의 역할은 변형을 구속하는 역할을 한다. 충전재를 사용하는 주요 목적은 폴리머콘크리트를 배합할 때 단위 용적에 대한 수지 사용량을 줄이고, 점성을 증가시켜 큰 부착력을 얻는데 있다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 수지량과 응력비를 일정하게 유지하고 충전재의 종류를 변화시켰으며, 충전재 종류에 대한 크리프 변형률 곡선과 비 크리프 곡선 결과를 Figs. 9, 10에 나타내었다. 비교한 결과, 충전재를 중탄산칼슘을 사용한 경우가 플라이애쉬를 사용한 경우보다 크리프 변형률, 비 크리프 모두 더 작은 값으로 나타났다. 예측식에서도 충전재를 중탄산칼슘으로 사용한 경우 크리프 변형률은  $394.87 \mu\epsilon$ , 플라이애쉬를 사용한 경우에는  $433.9 \mu\epsilon$ 로 나타났다. 이는 중탄산칼슘이 플라이애쉬보다 비 표면적이 크기 때문에 더 큰 부착면적을 가지고 수지와 골재 사이의 부착력이 커져 변형을 구속하는 영향이라 생각되어진다. 충전재를 전혀 사용하지 않은 경우에는 크리프 변형률과 비 크리프 모두 충전재를 사용한 경우보다 매우 큰 값을 나타냈으며, 비 크리프의 경우에는 그 값이 약 2배 이상 큰 값으로 나타났다.



**Fig. 9** The creep strain curves on type of filler



**Fig. 10** The specific creep curves on type of filler

### 4.4 응력비의 영향

수지량과 충전재 함량을 일정하게 하고 응력비를 압축 강도의 20~40%로 변화시켜 크리프 실험을 진행하였다.

응력비의 영향에 대한 크리프 변형률 곡선과 비 크리프 곡선은 Figs. 11, 12에 보여지고 있다.

그 결과를 비교하면 응력비가 증가할수록 크리프 변형률과 비 크리프는 증가하지만 그 비율은 비례하지 않는다. 예측식과 실험값에서 응력비가 20%일 경우 크리프 변형률은  $394.87 \mu\epsilon - 408.53 \mu\epsilon$ , 30%일 경우에는  $689.35 \mu\epsilon - 722.0 \mu\epsilon$  그리고 응력비가 40%일 경우에는  $1166.65 \mu\epsilon - 1204.0 \mu\epsilon$ 로 측정되었다. 위의 결과를 수치적으로 비교하면 응력비를 50%로 증가했을 경우 크리프 변형률은 약 75%가 증가하였고, 응력비를 100% 증가했을 경우 크리프 변형률은 약 190% 증가하였다. 단위 응력에 대한 크리프 변형률을 나타내는 비 크리프의 경우에도 크리프 변형률과 비슷한 경향을 나타냈다.

위의 결과로 볼 때 PET 재활용 폴리머콘크리트의 크리프거동은 선형 점탄성 거동이 아닌 비선형 점탄성 거동을 하는 것으로 생각된다.

#### 4.5 충전재 함량의 영향

충전재의 종류와 수지량, 그리고 응력비를 일정하게 하면서 충전재의 함량을 0~30%로 변화시켜 충전재 함량이 페 PET 폴리머콘크리트의 크리프거동에 미치는 영향을 실험하였다. Figs. 13, 14에 충전재 함량에 따른 크리프변형률과 비 크리프 곡선이 보여지고 있다. 실험결과 충전재를 10% 사용한 경우 크리프변형률과 비 크리프는 394.87  $\mu\epsilon$ -140.43  $\mu\epsilon$ /kips, 20%를 사용한 경우 343.99  $\mu\epsilon$ -140.43  $\mu\epsilon$ /kips, 30%를 사용한 경우에는 341.27  $\mu\epsilon$ -125.17  $\mu\epsilon$ /kips로 측정되었다. 위의 결과를 볼 때 충전재의 함량이 10% 증가할 때마다 크리프변형률과 비 크리프 모두 약 10% 감소하였다. 하지만 충전재를 10% 사용한 경우와 비교했을 때 충전재를 전혀 사용하지 않은 경우에는 557.94  $\mu\epsilon$ -308.65  $\mu\epsilon$ /kips로 크리프변형률은 약 40%, 비 크리프의 경우는 약 2배 이상 작은 값을 나타냈다.

이는 충전재의 사용 유·무가 PET 재활용 폴리머 콘크리트의 크리프 변형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보여진다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 단기크리프 실험을 이용하여 PET 재활용 폴리머콘크리트의 장기크리프거동을 예측하고, 충전재의 종류, 응력비, 충전재의 함량에 따른 PET 재활용 폴리머콘크리트의 크리프 특성을 규명하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Pront series equation을 이용하여 단기크리프 실험을 통해 PET 재활용 콘크리트의 장기크리프 예측식은 기준 배합비의 경우 다음과 같으며 그 결과 오차가 약 5% 이내로 매우 작은 것으로 나타났다.

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

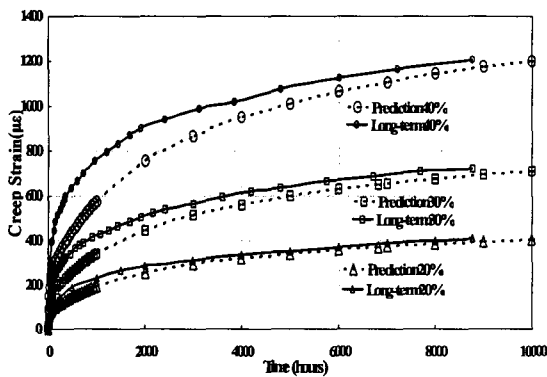


Fig. 11 The creep strain curves on stress ratio

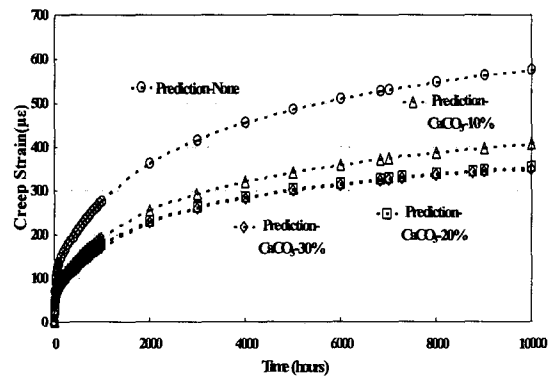


Fig. 13 The creep strain curves on filler contents

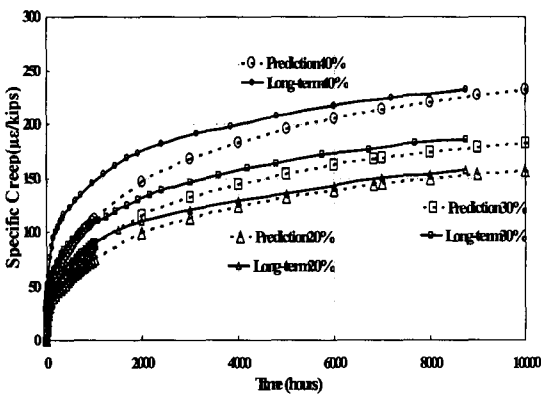


Fig. 12 The specific creep curves on stress ratio

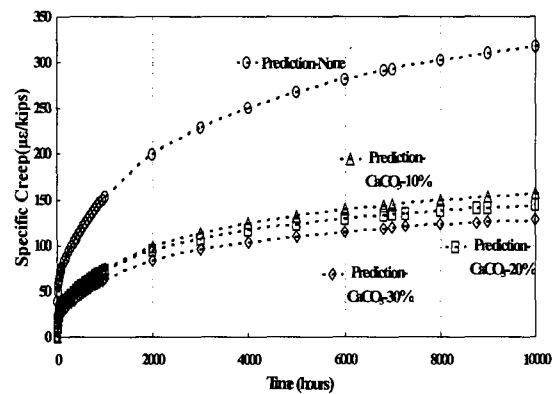


Fig. 14 The specific creep curves on filler contents

- 2) PET 재활용 폴리머콘크리트의 크리프변형률은 일반 포틀랜드시멘트에 비하여 초기변형이 다소 큰 것으로 나타났다.
- 3) 탄산계 충전재가 플라이애쉬를 사용한 경우보다 크리프변형률, 비 크리프 모두 더 작은 값을 나타냈다. 이는 탄산계 충전재의 비표면적이 플라이애쉬 보다 더 크기 때문에 부착력의 증가한 것으로 보인다.
- 4) 크리프변형률과 비 크리프는 응력비의 증가에 따라 증가하지만 그 값은 비례적으로 증가하지 않았다. 이는 PET 재활용 폴리머콘크리트의 크리프거동은 선형 점탄성 거동이 아닌 비선형 점탄성 거동을 하는 것으로 보여진다.
- 5) 충전재의 함량을 10% 증가시키면 크리프변형률, 비 크리프는 약 10% 감소한다. 그러나, 충전재를 사용하지 않은 경우에는 충전재를 10% 사용한 경우보다 크리프변형률의 경우 약 40%, 비크리프의 경우 약 100% 증가하였다.

## 참고문헌

1. Alkonis, J. J., Maxknight, W. J., and Shen, M., "Introduction to Polymer Viscoelasticity," Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, INC., New York, 1972, pp.55~63.
2. E. Riande, R. Diaz-Calleja, Margarita G. Prolongo, and Rosa M. Masegosa, "Catalina Salom Polymer Viscoelasticity Stress and Strain in Practice," Marcel Dekker, INC. New York, 2000, pp.350~366.
3. Hsu, M. and Fowler, D.W., "Creep and Fatigue of Polymer Concrete," Polymer Uses-Materials and Properties, ACI, SP 89-17, 1985, pp.323~343.
4. J.-P. Boehler, T. Dietl, and A. Millien, "Creep Law for Polymer Concrete in the Hardening State," Polymer in Concrete, Fourth ICPC, Germany, 1984, pp.487~494
5. John D. Ferry, "Viscoelastic Properties of Polymers, third edition," John Wiley & Sons, INC, 1980, pp.150~157.
6. K. Aniskevich and J. Hristova, "Aging and Filler Effects on the Creep Model Parameters of Thermoset Composites," Composite Science and Technology, Vol.62, 2002, pp.1097~1103.

## 요 약

일반적으로 페 PET 폴리머콘크리트는 일반포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 뛰어난 역학적 성질과 내구성을 가지고 있지만 열에 민감하고 변형이 큰 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 단기크리프 실험을 이용하여 페 PET 폴리머콘크리트의 장기크리프거동을 예측하고 재료적 변수와 실험적 변수에 대한 페 PET 폴리머콘크리트의 장기크리프거동의 특성을 정의하였다. 단기크리프 실험을 이용하여 장기크리프거동을 예측한 방법에서는 5%이내의 작은 오차를 보여 높은 정확도를 나타냈다. 크리프 변형률과 비 크리프 모두 중탄산칼슘을 충전제로 사용한 경우가 플라이애쉬를 사용한 경우보다 더 작은 값을 나타내었다. 응력비의 증가에 따라 크리프변형률, 비 크리프 모두 증가하였지만 비례하여 증가하지 않았다. 이는 페 PET 폴리머콘크리트의 크리프거동은 비선형 점탄성거동을 하는 것으로 나타났다. 충전재 함량이 10% 증가할수록 크리프변형률, 비 크리프 모두 약 10% 감소하였다. 하지만 충전재를 사용하지 않은 경우 그 값이 충전재를 10% 사용한 경우보다 크리프변형률은 약 40%, 비 크리프는 약 100% 이상 큰 값을 나타내었다. 이는 페 PET 폴리머콘크리트에서 충전재의 사용이 크리프거동에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**핵심어 :** 재생 PET, 크리프컴플라이언스, 응력비, 점탄성, 수평이동요소