

점탄소성 모델을 이용한 ETFE 막재의 장기 크리프 거동 예측기법 연구

Prediction Method of Long Term Creep Behavior for ETFE Foil by Using Viscoelastic-Plastic Model

김재열*
Kim, Jae-Yeol

Abstract

Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE) has been widely used in long-span buildings because of its light weight and high transparency. This paper studies the short and long term creep behaviour of ETFE foil. A series of short-term creep and recovery tests were performed, in which the residual strain was observed. A long-term creep test of the ETFE foil was also performed over 110 days. A viscoelastic-plastic model was then established to describe the short-term creep and recovery behaviour. The model contains a traditional multi-Kelvin part and an added steady-flow component to represent the viscoelastic and viscoplastic behaviour, respectively. The model successfully fit the data for three stresses and six temperatures. Additionally, time-temperature equivalency was adopted to predict the long-term creep behaviour of ETFE foil. Horizontal shifting factors were determined from the process of shifting creep-curves at six temperatures. The long-term creep behaviours at three temperatures were predicted. Finally, the long-term creep test showed that the short-term creep test at identical temperatures insufficiently predicted additional creep behaviour, and the long-term test verified the horizontal shifting factors derived from the time-temperature equivalency.

Keywords : *ETFE Foil, Creep Test, Recovery Test, Long-Term Creep Test, Viscoelastic-Plastic Model, Time-Temperature Equivalency*

1. 서론

건축가들과 구조 엔지니어들에게 많은 관심을 받고 있는 ETFE 막재는 가벼운 무게와 높은 투명도, 환경친화적 특징 때문에 장경간의 빌딩에 적합하다.¹⁾ Eden Project(2001), 베이징 국립 수영장(2008)²⁾과 같은 많은 건물들이 ETFE 막재를 사용하여 성공적으로 건설되었다. ETFE 막재의 기계적 특성과 ETFE 쿠션의 구조적 특성은 실험과 수치적 분석을 통해 조사되어왔다.

김재열과 강주원은 ETFE 막재의 단축과 쌍축 인장 특성을 분석하였고³⁾, Wu는 모델 실험을 통해 ETFE 쿠션의 구조적 특성을 연구하였다.^{4),5)}

ETFE 막구조물의 디자인수명은 일반적으로 5~25년이며, 막 표면의 주름을 피하기 위해서 ETFE 막재는 수명기간 동안 인장이 유지되어 있어야 한다. 또한 ETFE 막재는 고분자물질로서 팽창 시 상당히 늘어나며, 이러한 신장 특성은 건물의 안전성을 감소시킬 수 있다. ETFE 막재의 크리프 특성에 대한 연구에는 Wu와 Kawabata의 단기 크리프 실험^{6),7)}, Kawabata의 점성과 유연성 모델이 포함되어있다.⁸⁾ 그러나 이 연구들은 단기에 수행되어 추가적인 수치적 시뮬레이션과 함께 단기 크리프 실험에 초점을 맞추었다. ETFE 막재의 장기 크리프 특성은 여전히 뚜렷하지 않다.

고분자물질 연구에서 점탄성의 크리프 특성은 Boltzmann의 중첩 가중의 원리와 Leaderman의 수정 중첩원리에 의해 설명될 수 있다.⁹⁾ 압력과 온도의 비선형성을 설명하기 위해서 Schapery는 열역학

* 정회원, 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Hyungsung Univ., Dept of Architectural Engineering
Tel: 031-299-0758
E-mail: jykim@uhs.ac.kr

이론들에서 나온 단적분 구성방정식을 사용하였다.^{10),11),12)} Papanicolaou는 Shapery의 방정식을 FRP에 성공적으로 사용하였다.¹³⁾ Polak과 Penlidis는 구성방정식을 결정하기 위해 실용적인 방법을 제시했다.¹⁴⁾ 또한 그들은 변수들의 관계를 분석하기 위하여 정밀한 통계적 기술을 사용하였다.¹⁵⁾ 고분자물질의 점탄성 모델은 단기 크리프 실험의 데이터와는 일치하지만, 장기 크리프 특성의 예측과는 종종 일치하지 않는다. 이 문제를 제시하기 위해 Williams, Landel, Ferry는 이완시간과 표준온도의 관계를 찾아서 WLF 방정식을 만들었다.¹⁶⁾ Crissman은 시간-온도 중첩원리를 두 종류의 폴리에틸렌에 성공적으로 응용하였다.¹⁷⁾ Popelar는 수평과 수직 이동을 통하여 이완계수의 원리를 밝혀냈다.¹⁸⁾ Sain은 Rice husk-HDPE beam의 압력, 시간, 온도 관계를 연구하여 온도의 압력 균등 가능성을 보였다.¹⁹⁾

본 연구에서는 상기 참고된 기존연구에서 다루어진 일반적인 점탄성 이론들을 ETFE 막재에 응용하여, ETFE 막재의 점소성 크리프-변형도를 고려한 단기 크리프-회복 특성을 설명하기 위하여 수정된 크리프 모델을 제시하였다. 시간-온도 등 비율 조건은 후의 크리프 특성을 예측하기 위하여 채택되었으며, ETFE 막재의 수평이동 요소는 다른 온도에서 시행되는 여러 크리프 실험를 통해 결정된다. 마지막으로 장기 크리프 예측을 위하여 110일 이상의 장기 크리프 실험을 수행하였다.

2. 장단기 크리프 실험

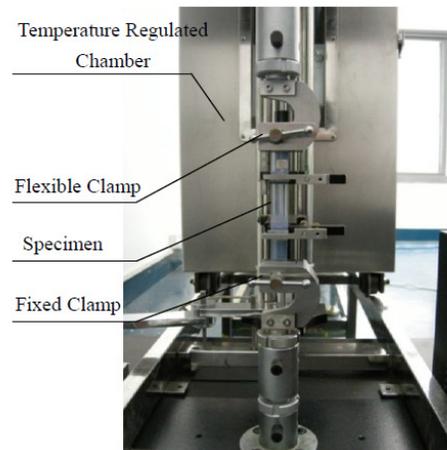
2.1 단기 크리프와 회복 실험

ETFE 막재의 단기 크리프와 회복 실험이 다른 압력과 다른 온도에서 여러 번 시행되었다. 이 실험들에서 ETFE 막재의 두께는 실무에서 널리 쓰이는 0.25mm로 하였고, 시편들은 세로 150mm, 가로 15mm의 직사각형 모양이다. 세로방향에서 시편들의 두 개변은 클램프로 고정되었고, 클램프 사이의 시편들의 변형은 먼저 체크되었다. 실험 중의 시편들은 일정한 환경 조건을 유지하기 위하여 온도 조절이 가능한 곳에 보관하였다. 실험용 기기는 <Fig.

1>과 같은 METM(Microcomputer Electronic Testing-Machine)이다. 기록되는 변형의 정확도는 ± 0.001 mm이고, 힘들의 정확도는 ± 0.5 %이다.

단기 크리프와 회복 실험이 짧은 시간 안에 수행될 수 있게 하기 위하여, 시편들은 우선 1.8 MPa/s의 속도로 크리프 실험 σ_c 까지 인장되었고, 크리프 실험은 24시간 동안 수행되었다. 시험 동안의 크리프 응력은 일정하게 유지되었다. 시험을 마친 후 응력은 1.8 MPa/s의 제하율(Unloading rate)과 함께 0으로 감소하였다. 마지막으로 회복실험은 응력을 0으로 유지하여 24시간 진행되었고, 시편의 변형은 위의 과정과 같이 기록되었다.

세 개의 대표적인 응력에 대한 단기 크리프와 회복 실험은 23°C에서 수행되었다. 크리프 실험 시편의 응력들은 각각 ETFE 막재 구조에서 널리 쓰이는 3 MPa, 6 MPa, 9 MPa이다. 아울러, 6개의 단기 크리프-회복 실험이 다른 온도에서 추가적으로 수행되었다. 시험에서 사용된 온도는 각각 23°C, 28°C, 35°C, 41°C, 46°C, 51°C이다. 이 온도는 ETFE 막재 구조의 일반적인 환경온도부터 극한의 온도이며, 수십 년간의 장기 ETFE 막재 특성 예측에 사용하였다. 이 크리프 실험들의 응력은 6 MPa로 동일하다.

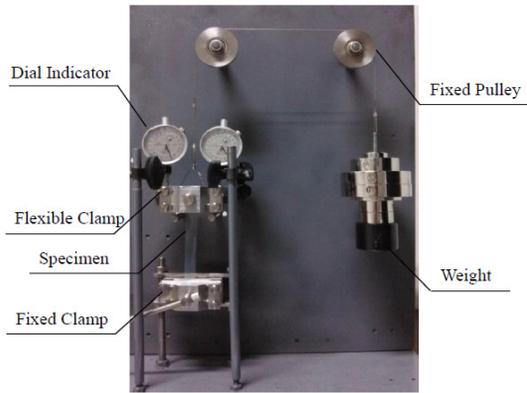


<Fig. 1> Short-term creep simulator

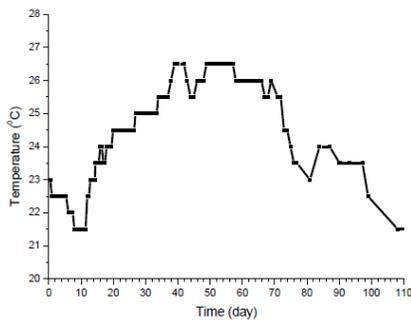
2.2 장기 크리프 실험

ETFE 막재의 특성을 평가하기 위해 110일 이상의 장기 크리프 실험을 수행하였다. 시편은 2.1절에

서 설명된 것과 동일하다. 이 실험을 위해 설계 제작된 실험 기기는 <Fig. 2>와 같다. 실험기의 일정한 응력을 발생시키기 위해 무게를 더했고, 시편의 변형을 기록하기 위한 두 개의 다이얼 게이지를 사용하였다. 다이얼 게이지의 정확도는 0.001mm이고, 시험 동안에 일정하게 유지되는 시편의 실험 응력은 6MPa이다. 크리프 특성에 상당한 영향을 끼치는 온도의 변동은 <Fig. 3>과 같다. 실험 중의 온도는 4절에서 설명하는 바와 같이 대략 23°C 정도에서 변화하였다.



<Fig. 2> Long-term creep simulator



<Fig. 3> Changes of temperature for long-term creep test

3. 이론적 배경

3.1 점탄소성 모델

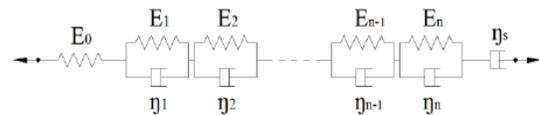
물질의 점탄소성 특성을 설명하기 위해 널리 쓰이는 Schapery의 비선형 방정식은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.¹⁰⁾

$$\epsilon(t) = g_0 D_0 \sigma + g_1 g_2 \Delta D(\Psi) \sigma \quad (1)$$

t 는 시간, $\epsilon(t)$ 는 변형도, σ 는 응력, D_0 은 최초 유연도 값, $\Delta D(\psi)$ 는 일시적 성분이며, g_0, g_1, g_2 와 a 는 응력과 온도에 관한 계수이다. 이 식에서 ψ 는 감소된 시간을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\Psi = \int_0^t \frac{dt'}{a} \quad (2)$$

일반화 된 Kelvin 모델은 $\Delta D(\psi)$ 식을 얻기 위하여 수정되었다. 수정된 모델은 ETFE 막재의 점탄성 거동을 나타내기 위하여 일반화된 Kelvin 모델을 사용하고, 점소성 특성을 나타내기 위하여 정류요소 (Steady-flow component)를 추가하였다. 식 (1)의 구성방정식은 식 (3)으로 다시 표현된다. 본 연구에서는 일반적인 점탄성 모델을 ETFE 막재에 응용한 <Fig. 4>와 같은 물리적 모델을 도입하였다.



<Fig. 4> Physical model of constitutive equation about ETFE membranes

$$\epsilon_c(t) = [g_0 D_0 + g_1 g_2 \sum_{r=1}^N D_r (1 - e^{-\frac{\Psi}{\tau_r}}) + g_1 g_2 D_s \Psi^n] \sigma \quad (3)$$

여기서, N 은 일반화된 Kelvin 요소의 개수, D_r 은 Kelvin 모델의 계수, τ_r 은 Kelvin 모델의 지연시간, D_s 는 완충 계수, n 은 완충장치의 재료상수이다.

식 (3)의 오른쪽 첫 번째 항은 최초 컴플라이언스를 뜻한다. 이 항은 물질적 모델에서 스프링으로 간단화 되어있고 하중 제거 후 즉시 회복 할 수 있다. 식 (3)의 두 번째 항은 컴플라이언스의 일시적인 구성요소의 한 부분이다. 이 항은 일반화된 Kelvin 모델에서 나타나고 주어진 시간이 지나면 완전히 회

복할 수 있다. 식 (3)의 마지막 항은 수정된 힘의 법칙이다. 이 항은 물리적 모델에서 완충장치로 간단화 되어있고 회복 불가능한 변형도를 나타낸다. 수정된 모델은 점탄성, 점소성 특성을 둘 다 가지고 있기 때문에 점탄소성 모델이라고 불린다.

식 (3)의 계수들은 단기 크리프와 회복 실험에서 나오는 결과에 따라 결정된다. 크리프 특성은 점탄성, 점소성 크리프의 합이라고 가정되며, 회복 특성은 점소성 크리프가 일어나지 않는 점탄성 크리프 과정의 역이라고 가정된다.

계수들의 계산을 간단하게 하기 위해 $\tau_r = 10^r$, $a = 1$, $N = 5$ 라고 가정하자. 시편들은 동일한 비율의 인장을 받고 있기 때문에 g_2 는 1로 간단화 될 수 있다. 따라서 크리프 특성과 회복 특성은 각각 식 (4)와 식 (5)로 나타내어질 수 있다.

$0 \leq t \leq T$ (크리프 특성)일 때:

$$\epsilon_c(t) = [g_0 D_0 + \sum_{r=1}^5 g_1 D_r (1 - e^{-\frac{t}{10^r}}) + g_1 D_s t^m] \sigma_c \quad (4)$$

$T \leq t \leq 2T$ (회복 특성)일 때:

$$\epsilon_r(t) = [\epsilon_c(T) - g_0 D_0 + \sum_{r=1}^5 g_1 D_r (1 - e^{-\frac{(t-T)}{10^r}})] \sigma_c \quad (5)$$

T 는 크리프 특성과 회복 특성에 대한 사이클이며, 단기 크리프 실험과 회복 실험 모두에서 $T = 24h$ 이다.

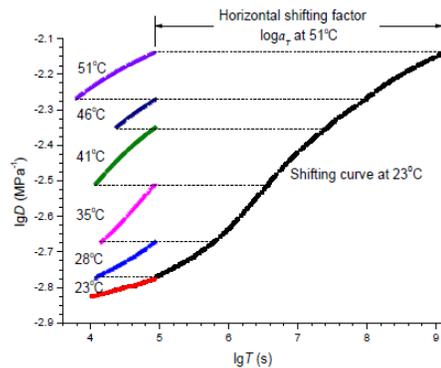
3.2 시간-온도 등가 가정

고분자물질의 장기 크리프 특성을 예측하기 위해서 WLF 식으로 부터 이완시간과 기준온도의 관계를 구축하였다.¹⁶⁾ 장기 크리프 특성은 각기 다른 온도에서의 곡선을 기준온도에서 하나의 주 크리프 곡선으로 이동하여 예측한다. 기본적으로 시간-온도의 등비율 수평이동 가정으로부터 ETFE 막재의 장기 크리프 특성, 고분자물질의 형태를 예측할 수 있

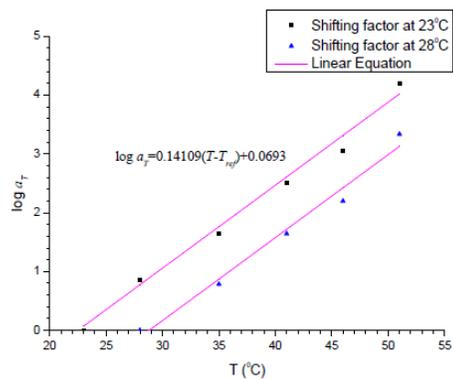
다. 2.1절의 크리프 실험에서 얻어진 다른 온도에서의 크리프 곡선들이 사용되었다. 수평이동 과정은 <Fig. 5>와 같으며, D 는 컴플라이언스, T 는 시간을 의미한다. <Fig. 5>에서 기준온도는 23°C이다. 높은 온도에서의 곡선은 낮은 온도에서의 곡선 끝을 따른 최초의 부분들과 함께 움직인다. <Fig. 5>의 주 크리프 곡선은 23°C에서 발생한다. 다른 주 크리프 곡선은 비슷한 과정을 통해 28, 35, 41, 46°C에서 얻어질 수 있다. 이 이동과정으로부터 다른 온도에서의 평행이동 인자가 얻어진다. 예를 들어 23°C와 28°C에서의 인자들은 <Fig. 6>과 같다. 식 (6)은 <Fig. 6>과 같이 분산된 데이터를 선형으로 보간하여 구해진다.

$$\log a_t = 0.14109(T - T_{ref}) + 0.06930 \quad (6)$$

T_{ref} 는 기준온도(섭씨)이다.



<Fig. 5> Process of parallel displacement



<Fig. 6> Factor of parallel displacement

4. 결과 및 검토

4.1 단기 크리프 실험의 결과와 시뮬레이션

〈Fig. 7〉에서 다른 응력에서의 단기 크리프와 회복 실험의 결과를 변형도(y축)-시간(x축)으로 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 실험 이후의 시편의 잔류 변형도는 특히 높은 크리프 응력에서 크다. 소성 변형은 크리프 변형도의 일부분으로서 응력의 증가와 함께 중요해진다는 것을 알 수 있다.

전통적인 점탄성 모델로는 설명될 수 없는 점소성 크리프 변형도를 더 잘 고려하기 위해, 3.1절의 점탄소성 모델이 데이터 시뮬레이션에 사용되었다. 식 (4)와 식 (5)의 계수를 계산하기 위하여 최소자승 평가식이 사용되었다. 다른 응력하의 3개 크리프와 회복 실험의 계수는 〈Table 1〉과 같다.

〈Table 1〉 Creep coefficient in respect of 3 stress

Stress	3 MPa	6 MPa	9 MPa
g_0D_0	1.156E-3	1.171E-3	1.205E-3
g_1D_1	6.085E-5	6.330E-5	1.146E-4
g_1D_2	3.895E-5	4.767E-5	1.658E-4
g_1D_3	5.742E-5	7.837E-5	3.600E-4
g_1D_4	5.020E-5	8.295E-5	4.045E-4
g_1D_5	4.986E-5	6.204E-5	3.237E-4
g_1D_s	1.371E-6	1.383E-6	1.911E-6
n	0.3621	0.4345	0.6099

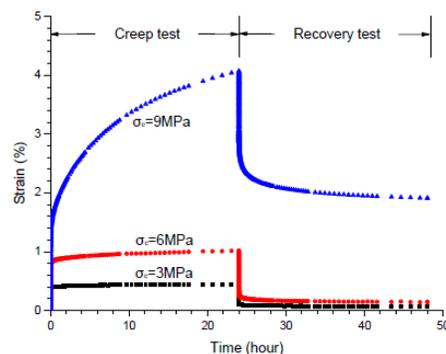
점탄소성 모델의 정확도를 측정하기 위해서 실험과 시뮬레이션 결과 곡선이 〈Fig. 8〉에 나타나 있다. 이 모형은 점탄소성 모델이 3개의 대표 응력에 대한 실험 데이터에 잘 일치하고, 수정된 모델은 크리프 특성 뿐 아니라 회복특성을 모두 잘 표현하고 있다.

다른 온도에서의 크리프와 회복 실험 결과는 〈Fig. 9〉와 같으며, 앞서 설명한 응력 6MPa를 기준으로 하고 있다. 점탄성, 점소성 변형은 온도가 증가하면서 함께 증가한다. 이 실험들을 시뮬레이션 하기 위해 수정된 모델이 사용되었다. 각 온도에 따른 모델의 계수는 〈Table 2〉와 같다. 〈Fig. 10〉은 응력 6MPa가 기준인 실험과 시뮬레이션 곡선 결과를 보여주고 있다. 이 모형은 점탄소성 모델이 다

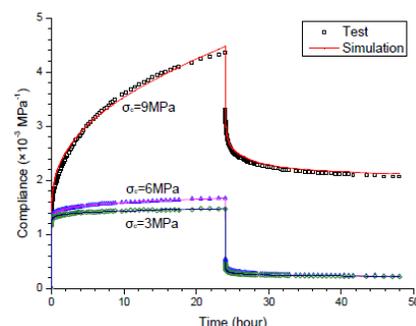
른 온도에서의 크리프와 회복 특성도 설명할 수 있음을 보여주고 있다.

〈Table 2〉 Creep coefficient in respect of 6 temperatures

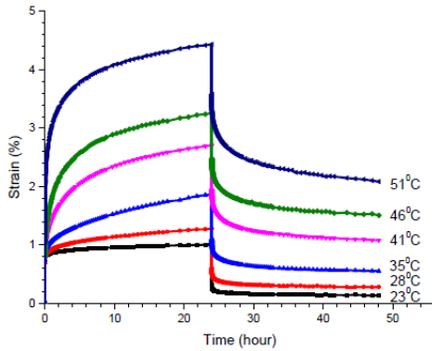
Temperature	23°C	28°C	35°C	41°C	46°C	51°C
g_0D_0	1.171 E-3	1.163 E-3	1.234 E-3	1.291 E-3	1.324 E-3	1.738 E-3
g_1D_1	6.437 E-5	1.142 E-4	1.039 E-4	1.115 E-4	1.171 E-4	1.439 E-4
g_1D_2	4.603 E-5	5.801 E-5	1.108 E-4	1.289 E-4	1.366 E-4	1.748 E-4
g_1D_3	7.891 E-5	1.502 E-4	2.392 E-4	3.272 E-4	3.450 E-4	5.682 E-4
g_1D_4	8.247 E-5	1.515 E-4	3.323 E-4	5.383 E-4	6.365 E-4	9.254 E-4
g_1D_5	6.198 E-5	1.040 E-4	2.300 E-4	5.183 E-4	6.038 E-4	1.050 E-3
g_1D_s	1.400 E-6	6.078 E-8	2.826 E-8	1.515 E-5	8.798 E-5	7.046 E-4
n	0.433 8	0.781 8	0.924	0.423 1	0.296 6	



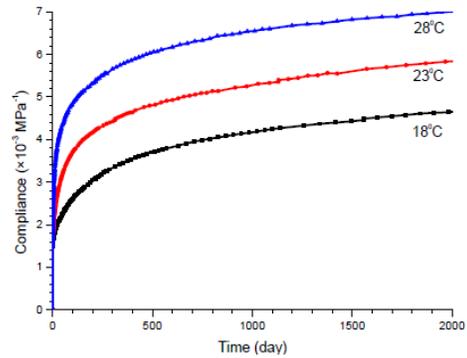
〈Fig. 7〉 Creep and recovery behaviour of each stress



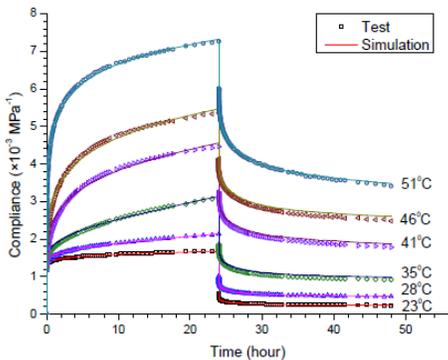
〈Fig. 8〉 Test of 3 stress and simulating result



〈Fig. 9〉 Creep and recovery behaviour of each temperature



〈Fig. 11〉 Long-term creep behavior in 5 years



〈Fig. 10〉 Test of stress and simulating result

4.2 장기 크리프 거동 예측

3.2절에서는 6개 온도에서의 시간-온도 등비율 이동 관계와 단기 크리프 실험을 통해 23°C에서의 하나의 주 곡선이 구해졌다. 본 논문에서 채택한 다양한 온도에서의 결과를 기준으로 한 이동곡선으로부터 23°C에서는 거의 40년 이상(109 초)의 ETFE 막재 장기 크리프 특성을 예측할 수 있다. 비슷하게 18°C와 28°C 크리프 특성은 시간-온도 등비율 이동 관계를 통해 예측되며, 예측시간은 ETFE 빌딩의 일반적 디자인 수명인 대략 5년 (2000일)이다. 이 3개 온도에서의 크리프 곡선은 〈Fig. 11〉과 같다. 여기서, 주 크리프 컴플라이언스는 첫 해에 발생하는 반면 추가적인 크리프 컴플라이언스는 시간이 지나며 정해진 일정치에 도달하거나 유지하지 않고 점차적으로 발생한다. 이 시간 의존성은 ETFE 막재의 크리프 특성이 긴 시간(적어도 5년)이 흘러도 완전히 정지하지는 않을 것이라는 것을 나타낸다.

4.3 장기 크리프 예측의 타당성

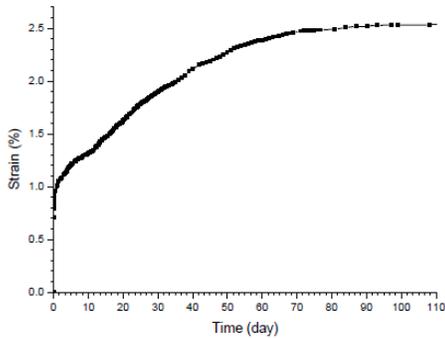
110일 이상 시행된 장기 크리프 실험의 결과(시간-변형도 관계)는 〈Fig. 12〉와 같으며, 변형도의 기울기는 시간과 함께 감소하지만 0에 도달하지는 않는다. 따라서 4.2절에서 예측된 바와 같이 크리프 컴플라이언스는 시험이 끝난 후에도 여전히 발전하고 있다.

〈Fig. 11〉에 있는 예측결과를 시험하기 위하여, 〈Fig. 13〉에 4.2절에서의 예측과 평균 23°C에서의 장기 크리프 실험으로부터의 크리프 곡선을 비교하고 있다. 〈Fig. 13〉에서 보여진 바와 같이 실험 곡선은 처음 단계에서 예측된 결과와 가깝지만, $\lg T$ 가 6.2~7.0에서는 예측으로부터 벗어난다. 이 편차는 주로 〈Fig. 9〉에서 보여진 크리프 특성에 상당한 영향을 끼치는 장기 크리프 실험에서의 온도 변동 때문이다.

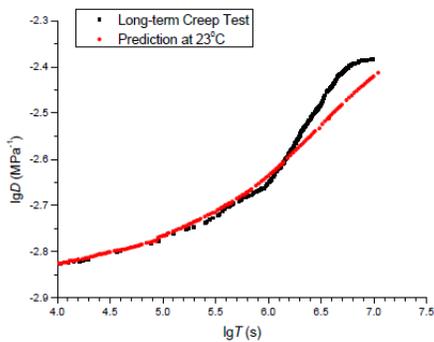
온도의 영향을 고려하기 위해 장기 실험의 크리프 곡선은 식 (6)에서의 평행이동 함수에 따라 23°C의 일정한 온도로 이동된다. 23°C 하에서 장기 크리프 실험 이동 곡선과 예측 곡선과의 관계가 〈Fig. 14〉에 나타나 있다. 두 곡선은 넓은 범위에서 일치하며, 이것은 〈Fig. 11〉의 예측 곡선의 정확성과 식 (6)의 평행이동 인자의 타당성을 나타내는 것이다.

아울러, 〈Fig. 7〉에 있는 23°C에서의 단기 크리프 곡선은 〈Fig. 14〉와 같이 110일로 연장된다. 이 그림으로부터 연장된 곡선은 장기 크리프 실험의 $\lg T$ 값이 5.0- 7.2에서 편차를 보인다는 것을 알 수 있

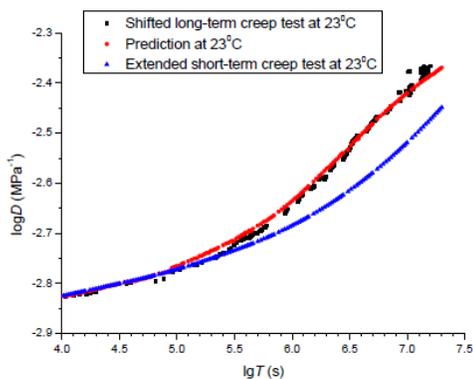
다. 이 편차는 동일한 온도에서의 단기 크리프 실험은 더 진행된 크리프 특성을 예측하기에는 불충분하다는 것을 나타낸다.



〈Fig. 12〉 Long-term creep behavior



〈Fig. 13〉 The result of experiment for Long-term creep and expected curve at 23 degrees



〈Fig. 14〉 Compare long-term creep curves at 23 degrees

따라서 다른 온도에서 시간-온도 등비율 이동 관

계에 따라 시행한 여러 차례의 단기 크리프 실험을 이용한 ETFE 막재의 장기 크리프 특성의 예측은 실용적이지만, 그 예측은 동일한 온도의 단기 크리프 실험으로는 얻어질 수 없다. 식 (6)의 평행이동 함수는 평행이동 과정에서도 유효하며 중요하다.

5. 결 론

본 연구는 ETFE 막재의 단기 크리프와 회복 특성을 설명하기 위한 수정된 크리프 모델과 그의 장기 크리프 특성을 예측하기 위한 실용적인 접근방법을 제시하였다.

3개의 응력과 6개의 온도에서의 단기 크리프 및 회복 실험으로부터, 잔여 변형도는 크리프 거동에서 보다 컸다는 것을 보였다. 일반화된 Kelvin 모델은 점탄성과 점소성 크리프 변형 둘 다를 설명하기 위해 수정되었다. 이 모델은 전통적인 Multi-Kelvin 부분과 정상류 요소를 가지고 있다. 수정된 점탄소성 모델은 모든 단기 크리프와 회복 실험에 적절하다고 본다.

시간-온도 등비율 이동 관계는 ETFE 막재의 장기 크리프 특성을 예측하기 위하여 적용되었다. 평행이동 인자들은 다른 온도에서 6개의 단기 크리프 곡선의 평행이동 과정에서 결정되었다. ETFE 막재의 몇몇 장기 크리프 특성 결과가 제시되었다.

References

1. S. Robinson-Gayle, M. Kolokotroni, A. Cripps, Tanno S, "ETFE foil cushions in roofs and atria", Constr build Mater, No.15(7), pp.323-7, 2001
2. A. LeCuyer, "ETFE technology and design. Basel: Birkhauser" 2008
3. 김재열, 강주원, " ETFE 막재에 대한 인장실험과 크리프 실험," 한국공간구조학회지논문, No,10(3), pp.57-64, 2010.9

4. M. Wu, J. Liu, "Experimental studies on ETFE cushion model", In: Proceedings of the IASS Symposium, Mexico, 2008.
5. M. Wu, Y. Wu, J.Y. Kim, "ETFE foil spring cushion structure and its analytical method", Thin Wall Struct, No.49(9), pp.1184-90, 2011
6. M. Kawabata, F. Moriyama, "Study on Viscoelastic Characteristics and Structural Response of Film Membrane Structures", In: Proceedings of the IASS Symposium, Beijing, 2006.
7. M. Wu, T. Mu, J. Liu, "Cycle loading and creep tests of ETFE foil", J Build Mater, No.11(6), pp.690-4, 2008
8. M. Kawabata, "Viscoplastic properties of ETFE film and structural behavior of film cushion", In: Proceedings of the IASS Symposium, Venice, 2007
9. R. Lakes, "Viscoelastic Materials" New York: Cambridge University Press, 2009
10. R.A. Schapery, "On the characterization of nonlinear viscoelastic materials", Polym Eng Sci, No.9(4), pp.295-310, 1969
11. Y.C. Lou, R.A. Schapery, "Viscoelastic characterization of a nonlinear fiber-reinforced plastic", J Compos Mater, No.5, pp.208-34, 1971
12. J. Smart, J.G. Williams, "A comparison of single-integral non-linear viscoelasticity theories", J Mech Phys Solids, No.20, pp.313-24, 1972
13. G.C. Papanicolaou, S.P. Zaoutsos, A.H. Cardon., "Further development of a data reduction method for the nonlinear viscoelastic characterization of FRPs", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, No.30(7), pp.839-48, 1999
14. H. Liu, M.A. Polak, A. Penlidis, "A practical approach to modeling time-dependent nonlinear creep behavior of polyethylene for structural applications", Polym Eng Sci, No.48(1), pp.159-67, 2008
15. J.J. Cheng, M.A. Polak, A. Penlidis, "An alternative approach to estimating parameters in creep models of high-density polyethylene", Polym Eng Sci, No.51(7), pp.1227-35, 2011
16. M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry, "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids", J Am Chem Soc, No.77(14), pp.3701-7, 1955
17. J.M. Crissman, "Creep and recovery behavior of a linear high density polyethylene and an ethylene-hexene copolymer in the region of small uniaxial deformations", Polym Eng Sci, No.26(15), pp.1050-9, 1986
18. C.F. Popelar, C.H. Popelar, V.H. Kenner, "Viscoelastic material characterization and modeling for polyethylene", Polym Eng Sci, No.30(10), pp.577-86, 1990
19. A. Pramanick, M. Sain, "Temperature-stress equivalency in nonlinear viscoelastic creep characterization of thermoplastic/agro-fiber composites", J Thermoplast Compos, No.19(1), pp.35-60, 2006

(접수일자 : 2014년 08월 08일)

(심사완료일자 : 2014년 09월 02일)

(게재확정일자 : 2014년 09월 11일)