

## 띠형 섬유보강재의 크리프 특성 평가

### Assessments of Creep Properties of Strip Type Fiber Reinforcement

전 한 용\*<sup>1</sup> Jeon, Han-Yong

유 중 조\*<sup>2</sup> Yuu, Jung-Jo

김 홍 택\*<sup>3</sup> Kim, Hong-Taek

김 경 모\*<sup>4</sup> Kim, Gyung-Mo

김 영 윤\*<sup>5</sup> Kim, Young-Yoon

#### Abstract

Geosynthetic reinforced earth wall was introduced about 20 years ago and many structures have been constructed. Especially, segmental concrete panel facing and friction tie system are the most popular system in Korea, and this friction tie was composed of high tenacity PET filament and LDPE(Low Density Polyethylene) sheath. Due to the lack of direct-test results, design coefficients of friction tie (creep reduction factor) had been determined by quoting the previous and the foreign reference data. This is an unreasonable fact for the use of friction ties. In this study, the creep tests were performed to evaluate the creep behavior of friction tie, and the reduction factor of creep was calculated for the correct design of geosynthetic reinforced earth retaining walls. From the test results, finally it was found that the allowable creep strength of friction tie is 60% of Tult during service life, and creep reduction factor is 1.67 for each grade of friction ties.

#### 요 지

국내에 보강토 옹벽이 도입된지 20여 년이 다 되어가고, 많은 구조물들이 시공되었다. 특히, 콘크리트 패널식 전면체와 섬유보강재를 적용하는 시스템은 국내에 가장 널리 알려진 공법이다. 이 공법의 섬유보강재는 고강도 폴리에스테르 섬유와 LDPE 피복층을 갖는 구조를 가지고 있으며, 섬유보강재를 이용한 설계에서는 몇가지 합리적이지 못한 부분이 존재해 왔다. 설계인자의 결정이 선행된 외국데이터를 기준으로하여 간접적인 방법에 의해 이루어졌으며 보강재의 장기크리프 거동에 대해서도 마찬가지로 인용된 자료를 이용하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 실내시험을 통하여 직접적으로 섬유보강재의 설계인자를 도출하고자 하였으며, 그 결과, 설계연한동안 예상되는 크리프 허용강도는 최대파단강도의 약 60%였으며 크리프 감소계수는 1.67로 나타났다.

**Keywords :** Creep, Friction tie, Geosynthetic, Reduction factor, Reinforced earth, SIM

#### 1. 서 론

1980년대 초 국내에 도입된 콘크리트 패널식 보강토

조립식 옹벽은 경제성과 기술적 혁신성으로 널리 보급되었으며 지금까지 수많은 구조물이 시공되었다. 이 패널식 보강토 옹벽 공법에 적용된 보강재는 고강도 폴리에

\*1 정회원, 전남대학교 응용화학공학부 교수 (Member, Prof., Faculty of Applied Chemical Eng., Chonnam National, Univ., hyjeon@chonnam.ac.kr)

\*2 정회원, 보강기술(주) 기술연구소, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, E&S ENG. Co., Ltd.)

\*3 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Eng., Hongik Univ.)

\*4 정회원, 보강기술(주) 기술연구소, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, E&S ENG. Co., Ltd.)

\*5 정회원, 보강기술(주) 대표이사 (Member, President, E&S ENG. Co., Ltd.)

에스테르 섬유를 이용한 띠형 섬유보강재가 적용되고 있는데 그 설계에 적용된 설계계수와 크리프 특성은 기존 외국자료에 의한 데이터에 기초하여 왔다(Mitchell & Villet, 1987). 그러나, 국내 토목합성재료의 도입초기에는 설계인자의 결정은 외국문헌을 기초하여 인용된 값을 그대로 적용하여 왔다. 이는 당시까지 정립된 시험법의 미비와 국내 시험장비의 준비가 미비하였기 때문이다.

한편, 이렇게 인용된 설계인자에 의한 설계결과값에 대해서 국내 섬유산업의 기술력이 외국과 견주어 손색이 없기 때문에 그간 외국데이터의 사용으로 인한 문제는 크게 발생하지 않았다고 판단된다. 그러나 실제 설계에 적용되는 값이 과대하여 보수적 설계가 이루어지고, 또한 섬유보강재의 크리프 변형거동에 대한 신뢰성있는 데이터가 점점 요구되고 있다.

이 섬유보강재는 토목합성재료의 독특한 형태의 제품으로 기존의 지오그리드나 지오택스타일과는 다른 형태의 보강재이다. 섬유보강재는 구성 형상적인 부분에서 차이점은 있으나 실제 인장부재 역할을 하는 고강도 폴리에스테르 섬유는 기존의 직포형 지오그리드나 직포 지오택스타일과 같은 품질의 제품이 사용되고 있다. 따라서 토목합성보강재의 특성평가와 동일한 평가법의 적용이 가능하다고 볼 수 있다. 이 섬유보강재는 기존의 토목합성보강재의 성능평가법에 제시된 규격제품이 아니므로 동일한 시험장비의 적용이 불가하고 제품의 형상적 특징에 맞는 시험장비의 변형이 필요하다. 그리고 그 동안 시험 규정의 미정립과 시험장비의 미비로 정확한 평가 시험이 곤란하였으나, 시험법의 규격화와 시험설비 기술의 발달 등으로 고강도의 섬유보강재에 대한 실내 시험이 가능하게 되어 섬유보강재의 크리프 특성평가가 가능하게 되었다.

본 연구에서는 섬유보강재의 크리프 특성평가에 대한 데이터의 빈약과 설계인자 적용의 합리성과 신뢰성을 확보하기 위해 국내 보강토옹벽공법에 적용되는 띠형 섬유보강재의 크리프 특성을 평가하였으며 적용되는 설계인자로서 크리프 감소계수를 도출하였다.

## 2. 크리프 특성의 이론

### 2.1 크리프 거동

일반적인 크리프 거동은 모두 4구간으로 분류하여 설

명할 수 있으며 크리프 거동을 해석함에 있어서는 크리프 파괴가 나타나는 구간의 전 단계인 일정하중에서 1차원적인 상태로 선형점탄성 거동이 나타나는 구간까지를 논하는 것이 타당하다. 따라서 점탄성체의 경우 부가한 일정한 응력을  $\sigma_0$ , 이로 인해 발생하는 시간  $t$ 에 따르는 변형률을  $e(t)$ 라고 하면  $e(t)$ 는  $\sigma_0$ 에 비례하므로

$$e(t) = \sigma_0 J(t) \quad (1)$$

라 놓을 수 있다. 여기에서  $J(t)$ 를 크리프 콤플라이언스(creep compliance)라고 한다. 일반적으로 변형률  $e(t)$ 는  $e_0$ ,  $e_p$  및  $e_s$ 의 3성분으로 되어 있다. 즉,

$$e(t) = e_0 + e_p + e_s \quad (2)$$

이때  $e_0$ 는  $\sigma_0$ 를 가해줌과 동시에 생기는 순간적인 완전탄성변형으로서

$$e_0 = \sigma_0 J_0 \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.  $e_p$ 는 지연탄성변형(delayed elastic deformation) 또는 1차 크리프(primary creep)라고도 불리는 것으로서 응력을 부가한 순간 즉,  $t = 0$ 에서는 0이며, 시간이 경과함에 따라 점차 증가되나 어느 한도에서 평형값에 도달된다. 즉  $e_p$ 는

$$e_p = \sigma_0 J \varphi(t) \quad (4)$$

로 표시된다. 여기서  $\varphi(t)$ 는 0에서 1까지 점차 증가되는 함수로서 지연 콤플라이언스라 하고  $J$ 는 평형콤플라이언스라 한다.  $e_s$ 는 Newton의 점성법칙을 만족시키는 점성액체의 변형과 일치하는 Newton의 점성유동에 상당되며, 시간에 비례하여 증가되는 성분으로서

$$e_s = \sigma_0 t / \eta \quad (5)$$

로 표시된다. 이  $e_s$ 는 비회복성 변형으로서 2차 크리프(secondary creep) 또는 영구변형(permanent deformation)이라 한다.

상온에서 강직성을 지닌 고분자 물질 또는 가교고분자들의 경우에는 값을 무시할 수 있으며, 선형 무정형 고분자 물질의 경우에는  $T_g$ (유리전이온도) 이상의 온도에서는  $e_s$ 만이 존재하고 저온에서는  $e_0$ 와  $e_p$ 값에 의해 지배된다. 또한 온도가 띠형 섬유보강재와 같은 고분자 재료의 물성에 미치는 영향은 온도증가와 더불어 분자 재

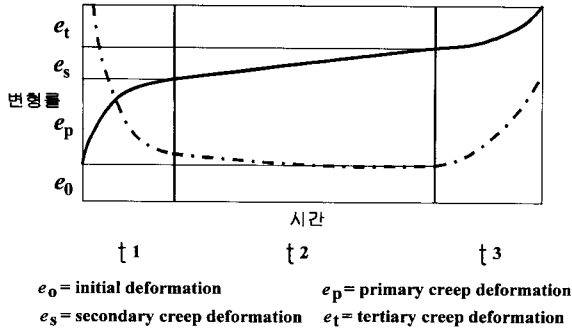


그림 1. 크리프 거동의 일반적 경향

배열 빈도가 증가하므로 아주 저온에서는 고무가 유리처럼 거동하고 고온에서는 유리가 고무처럼 유연한 거동을 하게된다(Aklonis, 1983). 그림 1은 일반적인 크리프 변형의 경향을 나타낸 것으로 실선으로 도시된 부분은 시간에 따른 크리프 변형을 나타낸 것이고 점선으로 도시된 부분은 크리프 변형률의 시간에 따른 변화를 표현한 것이다.

## 2.2 크리프 특성의 해석을 위한 이론

### 2.2.1 시간-온도 중첩 원리

점탄성체의 기계적 물성을 완벽하게 측정하기 위해서는 일반적으로 매우 넓은 범위의 시간동안 측정해야 한다. 대부분의 고분자의 경우 요구되는 시간범위는  $10^{14}$ 에 상당하는 시간범위이므로 이를 실제적으로 측정하기란 거의 불가능하다. 그러나 시간-온도 중첩원리에 의해 측정시간은 일정하게 고정하고 측정온도를 몇 십도 정도만 바꾸어 실험을 하게 되면 이로부터 본래 원하던 넓은 시간범위의 실험값을 구할 수 있게 된다. 가장 간단한 모델인 Maxwell 모델을 대상으로 시간-온도 중첩 원리를 설명하면, Maxwell 모델에서의 탄성률은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = E_0 \exp(-t/\tau) \quad (6)$$

한편, 탄성률과 완화시간은 다음과 같이 표현될 수 있는데

$$E = \rho RT / (3M) \quad (7)$$

$$\tau = 6\eta M / (\pi^2 p^2 \rho RT) \quad (8)$$

여기서  $\eta$  = 정상상태흐름정도;  $M$  = 분자량;  $p$  = 자유회전사슬수;  $\rho$  = 밀도;  $\eta$  = 점성계수;  $T$  = 온도이다.

만약 물체의 온도가 초기온도  $T_0$ 에서 새로운 온도  $T$ 로 바뀐다면 본래의 것에 대한 새로운 탄성률, 완화시간의 비는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{E(T)}{E(T_0)} = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} \quad (9)$$

$$\frac{\tau(T)}{\tau(T_0)} = \frac{\eta \rho_0 T}{\eta_0 \rho T_0} = a_T \quad (10)$$

식 (10)에서 완화시간의 비는 무차원인 이동계수(shift factor)  $a_T$ 로 정의하게 되며 이는 온도만의 함수이고 Maxwell 모델에서의 스프링과 dashpot의 물성과는 무관하다.

그림 2와 같이 서로 다른 온도에서 측정한 탄성률 실험값이 있다고 할 때, 이 세 가지의 실험값이 다른 것은 단지 서로 다른 온도에서 측정하였기 때문에 각각의 완화시간의 차이에 의해서라고 판단할 수 있다. 따라서 측정온도가  $T_1, T_2, T_3$ 의 순으로 낮아짐에 따라 완화시간은  $\tau(T_1), \tau(T_2), \tau(T_3)$ 의 순서로 증가한다. 한편 주어진 응력에 대응하여 완화하는데 필요한 실제시간인  $t$ 는 완화시간에 비례할 것이므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$a_T = \frac{\tau(T)}{\tau(T_0)} = \frac{t_T}{t_{T_0}} \quad (11)$$

Ferry(1980)는 이러한 이동계수를 많은 선형 비결정성 고분자의 실험값에 적용하였을 경우 각 실험값들은 1개의 합성곡선(master curve)에 일치하는 것을 발견하였다. 그 결과로 구한 이동계수는 다음과 같은 WLF 식으로 표시할 수 있다.

$$\log a_T = \frac{-c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \quad (12)$$

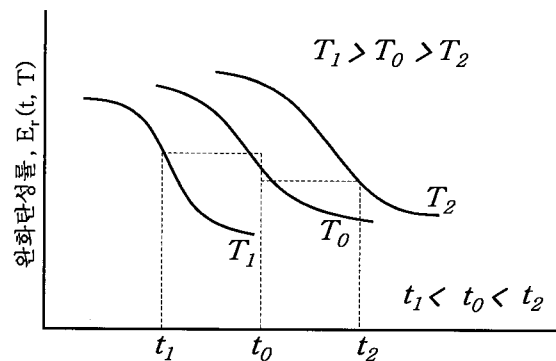


그림 2. 서로 다른 온도에서 측정한 완화 탄성률과 이의 이동원리

여기서  $c$ 는 상수이며 첨자 0이 붙은 것은 이동(shift)의 기준이 되는 온도, 그리고 첨자가 붙지 않은 온도는 이동이 시작된 온도이다.

이동계수  $\log a_T$ 는 -4에서 5 사이의 값을 가지며, 이 범위는 시간으로 따져  $10^9$ 에 해당하는 이동이다. 즉, 온도를 바꾸어줌으로써 시간으로 따져서는  $10^9$ 에 해당하는 변화를 줄 수 있음을 의미한다. 각각의 고분자는 고유의 이동계수를 갖고 있으나, 어느 특정범위, 즉 기준온도와 이동온도 사이가  $-40 \sim 80^\circ\text{C}$  사이에서는 일종의 범용이동계수곡선을 얻을 수 있다.

그림 3은 이것을 도시한 것이며 올바른 기준온도를 사용할 경우에는 이 그림으로부터 구한 이동계수는 고분자의 종류나 온도에 무관하게 적용된다. 적절한 기준온도는 주어진 고분자의 유리전이온도와 다음과 같은 관계를 지니고 있다.

$$T_s = T_g + 50 \pm 0.5^\circ\text{C} \quad (13)$$

만약  $T_0$ 로서  $T_s$ 를 사용할 경우에는, WLF식은 다음과 같은 형태를 가지며,

$$\log a_T = \frac{-8.86(T - T_0)}{101.6 + (T - T_0)} \quad (14)$$

직접 유리전이온도인  $T_g$ 를 사용하였을 경우에는 다음 식을 사용해야만 한다.

$$\log a_T = \frac{-17.4(T - T_0)}{51.6 + (T - T_0)} \quad (15)$$

일반적인 토포합성재료의 경우에는 그 기준온도가  $T_g$ 보다 낮기 때문에 그 값을 보정하여 이용한다. 폴리에스

터 고강력사의 경우 이러한 보정을 위해 Takaku(1980)가 실험적으로 제시한 보정식을 적용하는데 그 식은 아래와 같다.

$$C_1^g = \frac{C_1 C_2}{(C_2 + T_g - T_0)} \quad (16)$$

$$C_2^g = C_2 + T_g - T_0 \quad (17)$$

위 보정식을 이용하여 이동인자를 구하는 식은 다시 아래와 같이 표현할 수 있으며 이때의  $\log a_T$ 를 이용하여 합성곡선을 얻어낸다. 본 연구에서는 고강도 폴리에스터 필라멘트가 보강성분인 피형 섬유보강재의 크리프 특성에 관하여 연구하였으므로 폴리에스터의  $T_g$ 는  $80^\circ\text{C}$ 이고 기준온도는  $26^\circ\text{C}$ 를 사용하였으므로 보정식을 이용하여  $C_1^g$ ,  $C_2^g$ 의 값을 각각 8.50와 105.6으로 구하였다. 이러한 시간-온도 중첩원리를 통해 속성조건에서 실시한 시험한 결과를 시간축으로 이동하는 원리가 그림 4에 개괄적으로 묘사되어 있다.

### 2.2.2 Stepped Isothermal Method(SIM)

시간-온도 중첩원리와 유사한 방법으로 시간-온도 중첩원리에서는 각각 별개의 온도 조건에서 행한 시험데이터를 시간 축 외삽을 행함에 반해 이 방법에서는 하나의 시료에 단계적으로 온도를 등온으로 증가시켜 얻은 데이터를 각 온도 조건별로 실시간 수치화 하여 시간축 외삽을 행하는 것이 그 차이점이라 할 수 있다.

단계적 등온법(SIM) 방법은 전통적인 크리프 시험 수행 시 폴리에스터 재료에 나타나는 한계점 즉, 예를들면 PET 지오그리드의 크리프 변형률의 변화경향이 시간에 따라 0.1~0.2% 범위의 값을 지니고 하중과 변형에 관

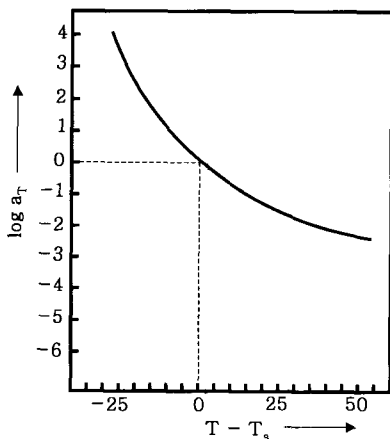


그림 3. WLF식에 사용되는 범용이동계수

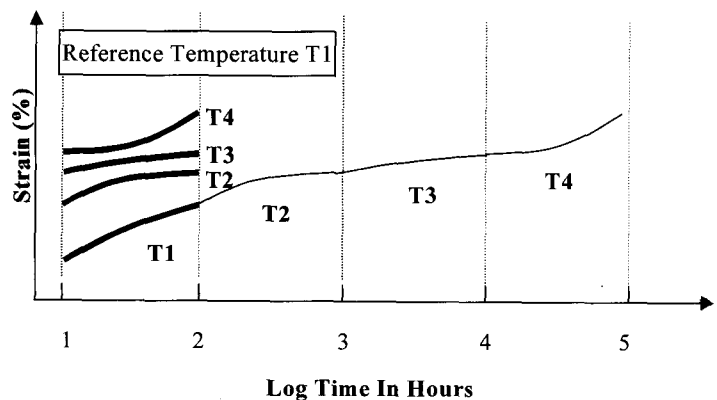


그림 4. 시간-온도 중첩원리를 이용한 합성곡선 유도도의 모식도

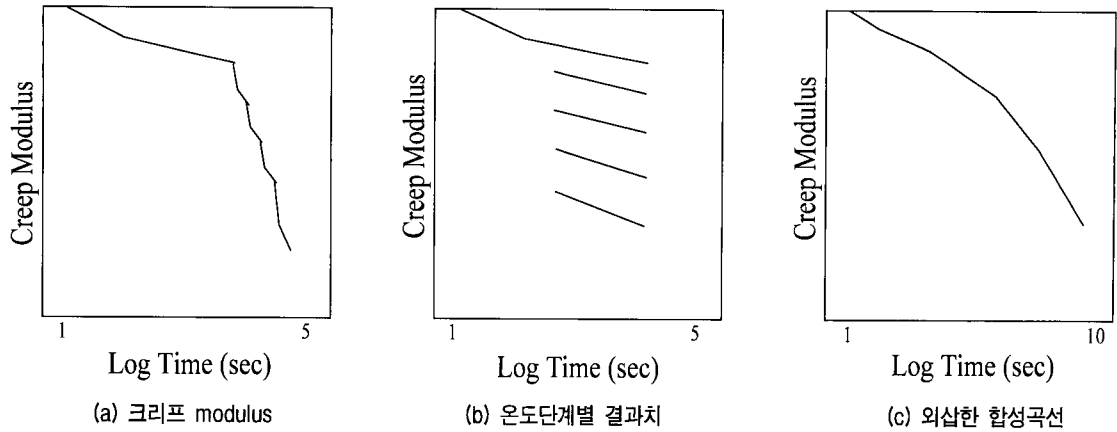


그림 5. SIM법을 이용한 합성곡선 유도 모식도

계된 시료 편차가 매우 크고 온도에 의한 크리프 곡선의 영향이 상대적으로 적은 점들로 인해 시간-온도 중첩원리 과정을 통한 크리프분석의 불확실성 제거를 위해서는 많은 시료가 필요하게 되는 단점을 보완할 수 있다. SIM법은 하나의 시료에 단계적으로 온도를 증가시켜 합성곡선을 만들어 내므로 실험의 효율성이 나타나고 시간과 비용의 절감 효과를 가져올 수 있게 한다.

SIM법은 TRI/Environmental Inc.에서 최초로 수행되었고 그에 관한 연구가 Thorton 등(1998)에 의해 98 International Geosynthetic Society에 보고된 이후 현재 GRI Test Method GS-10(Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using Stepped Isothermal Method)으로 자리잡게 되었다.

전체적인 진행과정은 단계적으로 온도를 증가시켜 일정시간 크리프 변형을 측정 후 이 값을 이용하여 합성 곡선을 얻는 방법으로 총 5단계로 각각의 단계에서 10,000초의 시험시간을 설정하여 수행하며 최초 26℃에서 각각의 단계에서 14℃씩 승온시킨다. 실시간 실험으로 얻은 데이터를 각 온도 단계별로 나타난 실시간 축으로 표현한 후 다시 이동인자를 이용하여 합성곡선을 산출해 낸다(Thorton & Parague, 1999). 그림 5는 SIM법의 전체적인 진행과정을 개괄적으로 보여주고 있다.

### 3. 섬유보강재의 크리프 특성 시험

#### 3.1 시료의 준비

보강기술(주)에서 생산하고 있는 띠형 섬유보강재를 사용하였으며, 생산과정중에서 일정 로트를 취하여, 동

표 1. 띠형 섬유보강재의 일반특성

섬유보강재	설계강도 (kN/전폭)	전폭 (mm)	두께 (mm)
보강재 A	50	90±3	3.0±0.3
보강재 B	100	90±3	5.0±0.3

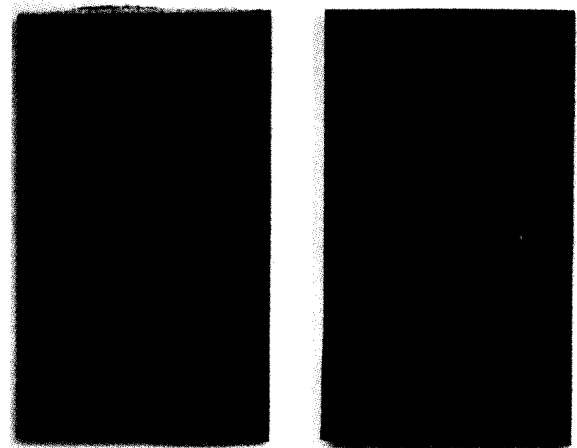


그림 6. 띠형 섬유보강재

일 로트에서 나온 시료에 대해 인장시험과 크리프 평가 등을 실시하였다. 표 1에 본 연구에서 사용된 섬유보강재의 일반적인 특성을, 그림 6에 두 가지 띠형 섬유보강재를 각각 나타내었다.

#### 3.2 인장특성시험

인장특성시험은 성토 및 지반 보강공법의 설계시에 필요한 띠형 섬유보강재의 설계인장강도를 산출하는데 기초가 되는 최대인장강도와 인장 변형률 등의 인장에 관련된 특성을 평가하기 위하여 수행하는 시험으로 ASTM

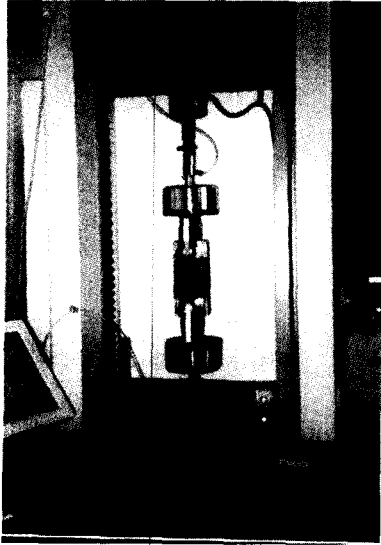


그림 7. 인장특성시험 장치

에서 규정한 ASTM D 4595에서 제시한 시험방법에 의거하여 시험을 행하였다.

시험방법은 변형제어식 인장시험기의 상·하에 장착된 클램프(clamp)사이의 거리를  $100 \pm 3\text{mm}$ 로 조절한 후 90mm 폭의 띠형 섬유보강재를 장착하고 시험기를 가동, 시료의 파단이 발생하는 시기까지  $10 \pm 3\%/min$ 의 속도로 인장을 하여 인장변형에 따른 인장하중을 측정한다. 그림 7에 인장특성시험 장치를 나타내었다.

### 3.3 크리프 시험

#### 3.3.1 장기 크리프 시험

크리프 시험(unconfined tension creep test)은 일정한 온도조건에서 지속적인 인장하중이 작용할 때 띠형 섬유보강재의 불구속 인장 크리프 거동을 평가하여, 장기 설계 인장강도 산정시 고려되는 크리프에 대한 인장강도 감소계수(RFCR; reduction factor)를 결정하기 위하여 수행한다. 이 시험은 ASTM D5262(standard test method for evaluating the unconfined tension creep behavior of geosynthetics)에 규격화되어 있다. 표준시험방법은 크리프 시험기에 고정되어 있는 상부 클램프와 하중재하 장치가 붙어있는 하부 클램프 사이에 띠형 섬유보강재 시료를 파지하고, 시료 중심부에 인장변형 측정장치를 설치한 후 하중을 재하하여 시간경과에 따른 인장변형을 측정한다. 크리프 특성평가를 위한 재하하중으로는 띠형 섬유보강재의 최대인장강도에 대한 20%, 30%, 40%, 60%의 하중을 추천하고 있으며, 인장변형 측정은



그림 8. 크리프 시험장치

자동계측 시스템을 사용하여 10,000시간(약 1년 3월)까지 하는 것을 추천하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 각각의 띠형 섬유보강재에 대하여 50%, 60%에 대한 장기 크리프 시험을 1,000시간 동안 실시한 후 10,000시간까지 외삽하여 10,000시간에서의 크리프 거동을 평가하였다. 그리고, 높이 2m, 길이 2m, 폭 0.8m의 강재 프레임에 4개의 시료를 동시에 시험할 수 있는 크리프 시험장비를 이용하여 크리프 시험을 수행하였으며, 시료 중심부에 LVDT를 부착하여 시간경과에 따른 인장변형을 자동으로 측정하였다. 그림 8에 장기크리프 시험장치를 나타내었다.

#### 3.3.2 SIM법에 의한 단기 속성 크리프 시험

본 연구에서는 10,000시간에서 크리프 변형률값이 10%에 근접한 부가하중을 결정하기 위하여 GRI Test Method GS-10의 시험방법에 따라 단기 속성 크리프 시험을 실시하였다. 시험을 위해서 본 연구에서는 항온 챔버(chamber)를 제작하여 온도를 조절할 수 있는 온도조절장치를 부착하여 온도를 컨트롤하면서 시험을 수행하였다. GRI GS-10 방법에 따르면 폴리에스터의 경우는 기준온도가  $26^\circ\text{C}$ 이며, 온도 구배는  $14^\circ\text{C}$ 로, 각각의 온도 구간의 시험시간이 10,000초로 규정되어지고 있다. 또한 GRI GS-10에서는 각각의 온도구간에 대한 크리프시험 데이터에 대한 시간축으로의 이동인자값을 제시하고 있다.

표 2에 SIM법에 의한 크리프 시험의 개요를, 표 3에 각각의 온도에서의 이동인자값을 나타내었다.

표 2. SIM법에 의한 단기 속성 크리프 시험의 개요

항 목	내 용
시 험 기	인장 크리프 시험기
시험온도	26, 40, 54, 68, 82℃ (5단계)
온도구배	14℃
재하하중	최대인장강도의 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%
단계별 시험시간	10,000초 (총 50,000초)
평가항목	크리프 변형률

표 3. 온도에 따른 이동인자값(SIM)

Temperature(℃)	Shift factor(log ar)
26	0
40	-1.22
54	-2.48
68	-3.70
82	-4.95

3.3.3 샘플링(sampling)의 위치와 조건에 따른 크리프 변형률 편차의 평가

일반적으로 GRI Test Method GS-10에서는 지오그리드의 경우 크리프 시험 시 시료간의 편차를 최대한 줄이기 위해서 단일리브(rib)에 대해서 시험을 실시 할 것을 권장하고 있다.

따라서 본 연구에서도 각각의 띠형 섬유보강재의 시료채취 시 한 가닥의 strand 만을 채취하여 크리프 시험을 실시하였다. 그러므로, 각각의 샘플링 조건에서 기인되는 최종 크리프 변형률값의 편차의 정도를 평가하기

표 4. 띠형 섬유보강재의 샘플링 조건

시료종류	샘플링 위치	Strand 개수
50kN/전폭	중앙부, 좌측, 우측	1, 2, 4개
100kN/전폭	중앙부, 좌측, 우측	1, 2, 4개

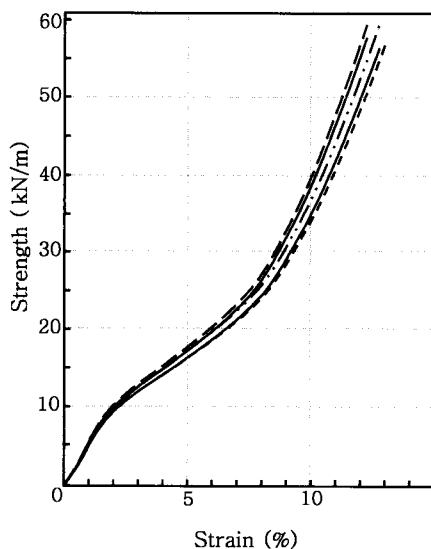
위하여 표 4와 같은 샘플링 조건을 설정하여 부가하중 60%에서 추가 시험을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

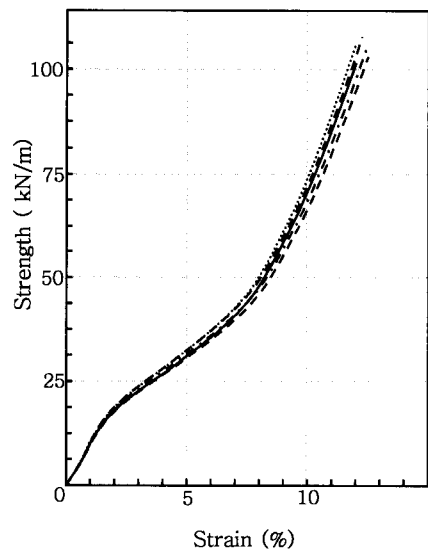
4.1 띠형 섬유보강재의 특성평가 결과

4.1.1 인장특성

띠형 섬유보강재의 설계인장강도를 산정 하는데 기초가 되는 최대인장강도와 인장변형률을 평가하기 위해, 2종의 보강재를 대상으로 하여 수행한 인장강도 시험의 결과를 표 5에 나타내었으며, 최대인장강도는 90mm 폭의 시료의 strand 수에 대한 m당 strand수의 비율을 고려하여 단위 m당 인장강도로 환산한 값이다. 여기서 2종의 보강재의 경우 제조업체에서 설정한 제품 규격의 인장 강도 보다 ±2% 이내의 공차를 가지며 실제 인장 강도가 5~10%정도 크게 설계·제조되어있어, 그 값만큼의 추가 안전율이 내포되어 있어 양호한 인장변형 특성을 보여주고 있다. 그림 9에 각각의 띠형 섬유보강재의 인장강도 시험에 의한 인장강도-인장변형률 곡선을 나타내었다.



(a) 섬유보강재 - 50kN/전폭



(b) 섬유보강재 - 100kN/전폭

그림 9. 인장강도-인장변형률 곡선

표 5. 띠형 섬유보강재의 인장강도 시험결과

시험횟수	50 kN/m		100 kN/m	
	최대인장강도(kN/m)	인장변형률(%)	최대인장강도(kN/m)	인장변형률(%)
1	55.96	12.81	102.71	12.59
2	57.92	12.46	107.43	12.54
3	55.88	12.55	104.68	12.68
4	57.69	12.22	106.91	12.64
5	56.98	12.89	105.89	12.68
평균	56.89	12.58	105.52	12.63

4.2 크리프 특성

4.2.1 장기 크리프 특성

본 연구에서는 각각의 띠형 섬유보강재에 대하여 ASTM D 5262를 바탕으로 각각의 최대인장강도의 50, 60%의 부가인장하중에서 1,000시간동안 크리프 시험을 실시한 후 크리프 변형률 결과를 10,000시간까지 외삽하였다.

그림 10과 11에 각각의 띠형 섬유보강재의 장기 크리프 특성을 나타내고 있다. 여기서 알 수 있듯이 최대인장강도의 60% 하중에서도 시간에 따른 크리프 인장변형률이 완만하게 증가하며 10% 미만의 변형에 수렴되어가는 형태를 보이며 10,000시간의 예측치도 에서 크리프 변형률이 10% 이하의 값을 나타내고 있다. 이것을 통하여 장기적으로 10% 변형률을 벗어나지 않는 안정한 크리프 특성을 가질 것으로 예상된다. 이러한 장기 크리프 시험 결과는 시간온도 중첩원리를 바탕으로 한 SIM법을 이용하여 장기 크리프 거동을 추정한 단기 크리프 가속시험 결과와도 유사하게 나타났음을 알 수 있다.

4.2.2 SIM법에 의한 크리프 특성

SIM 시험방법을 통한 각각의 띠형 섬유보강재의 실시간 속성 시험의 크리프 변형률 결과값을 그림 12~19에 나타내었다. 온도의 증가에 따라 크리프 변형률의 증가가 관찰되며 이는 띠형 섬유보강재를 구성하고있는 폴리에스터 고강력사 고분자 사슬의 유동성이 증가하기 때문이다. 온도조건의 상승 시점의 초기에 폴리에스터에서 볼 수 있는 온도에 대한 일시적 수축 현상이 크리프 변형률의 미소한 감소를 나타내는데 이러한 온도조건의 상승 시점의 초기 나타나는 크리프 변형률의 감소 부분은 외삽의 과정에서 제거된다.

또한 50kN/전폭의 경우 재하하중이 20%에서 점차로 증가함에 따라 하중에 따른 초기의 변형률값도 점차로 증가하며 재하하중이 70%를 넘어서면 10,000시간이후의 크리프변형률값이 10%를 초과하는 것을 알 수 있다. 재하하중이 80%이상일 경우에는 시험도중 시료가 파단되는 결과가 나타났으며 파단 시 크리프 변형률은 12.77%로 띠형 섬유보강재의 최대인장강도에서의 변형률값과 거의 유사하였다. 100kN/전폭의 경우도 50kN/전폭의 경우와 거의 유사한 크리프변형경향

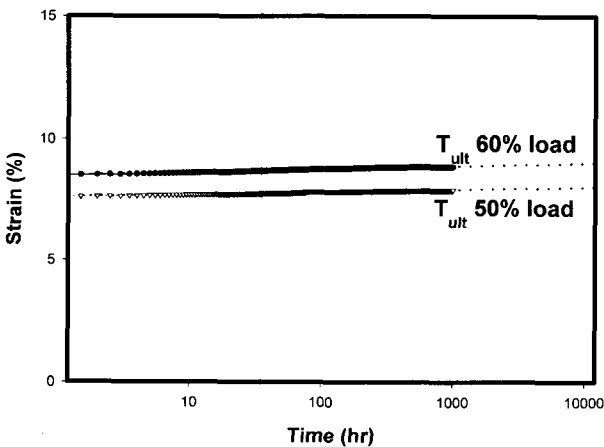


그림 10. 띠형 섬유보강재의 장시간 크리프 변형률 곡선(50kN/전폭)

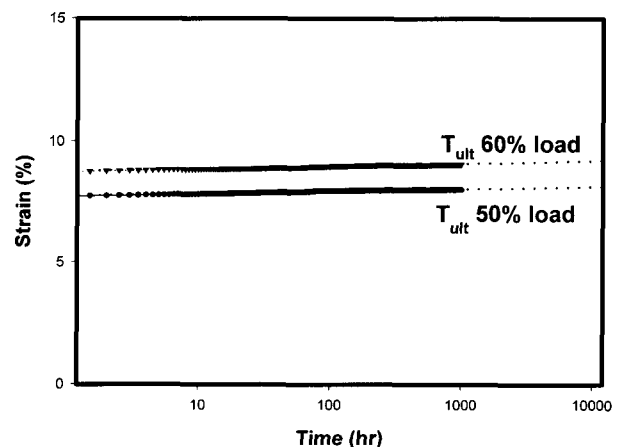


그림 11. 띠형 섬유보강재의 장시간 크리프 변형률 곡선(100kN/전폭)



을 보이고 있으며, 역시 재하하중이 70% 이상일 때 10,000시간에서의 크리프변형률이 10%를 초과하는 것을 관찰할 수 있었으며, 80% 이상일 때는 시험도중 시료가 파단되었다. 따라서, 50kN/전폭과 100kN/전폭의

경우 10,000시간에서 크리프변형률 10%이하값을 만족하는 재하하중은 모두 최대인장강도의 60%임을 확인할 수 있었다.

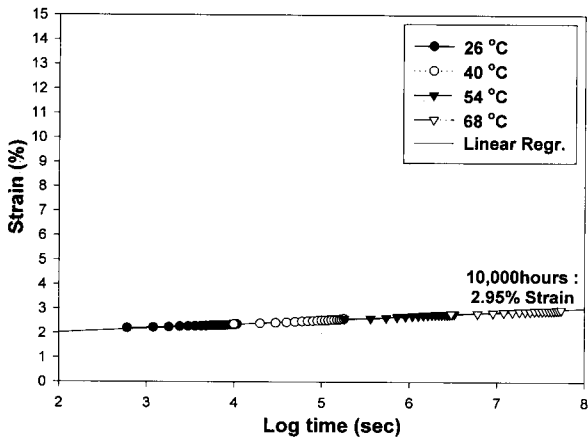


그림 12. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(50kN Tult 20% load)

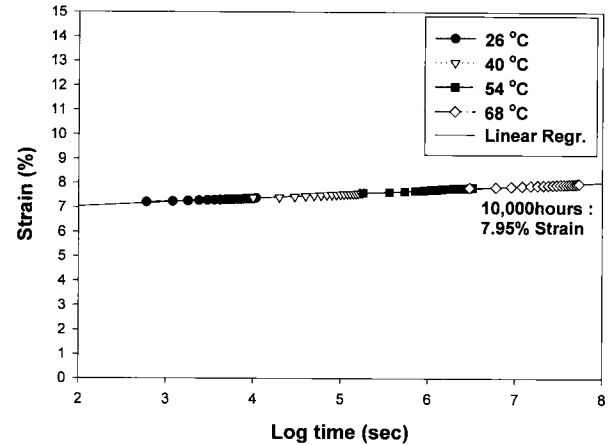


그림 13. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(50kN Tult 50% load)

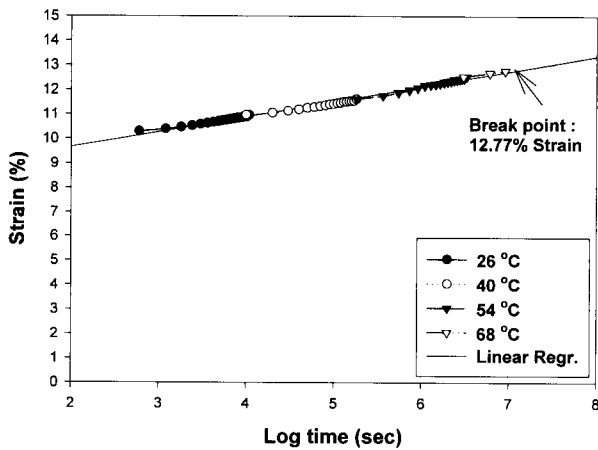


그림 14. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(50kN Tult 80% load)

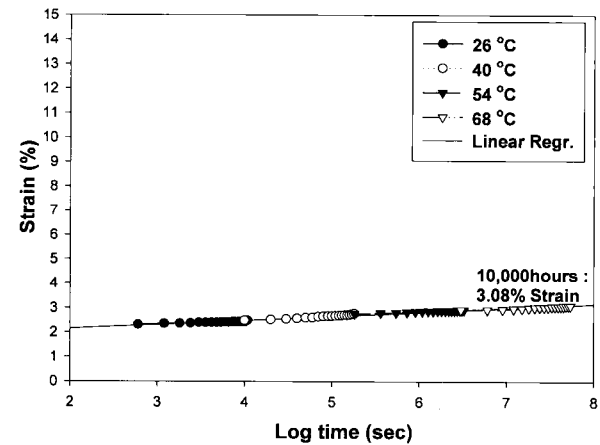


그림 15. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(100kN Tult 20% load)

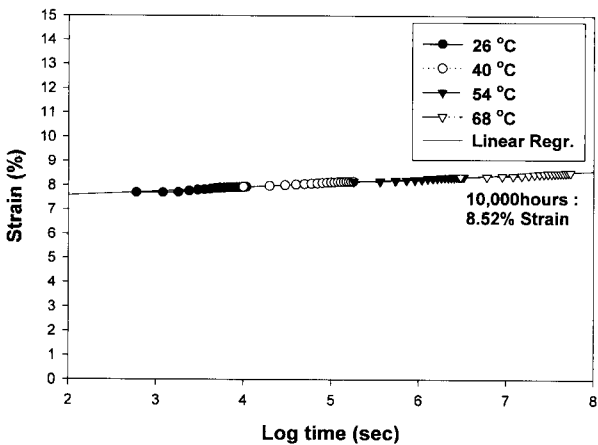


그림 16. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(100kN Tult 50% load)

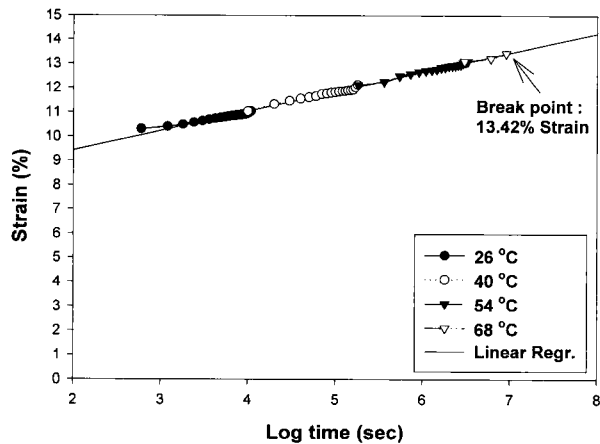


그림 17. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(100kN Tult 80% load)

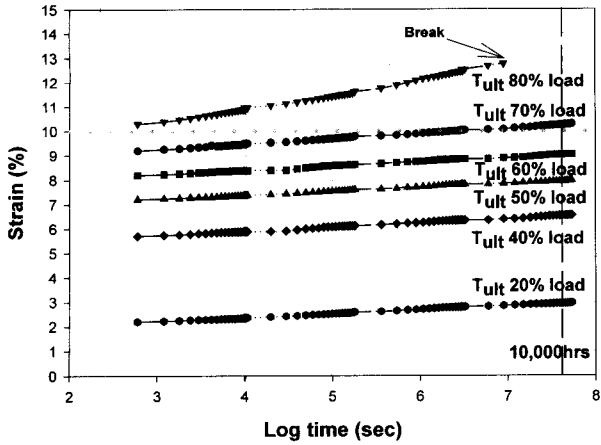


그림 18. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(50kN)

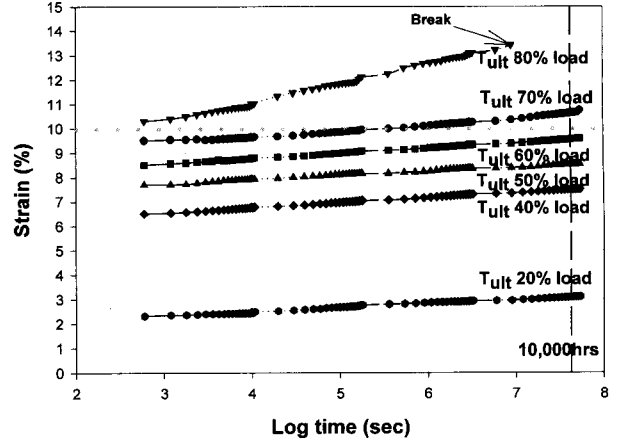


그림 19. SIM법에 의한 크리프 변형률 곡선(100kN)

#### 4.2.3 샘플링 위치와 조건에 따른 편차

샘플링 위치와 조건에 따른 크리프 변형률 값의 편차 값에 대한 시험결과를 그림 20~23에 나타내었다. 각각의 띠형 섬유보강재에 대하여 재하하중을 최대인장강

도의 60%로 설정하고 SIM법에 의해서 시험을 수행하였다. 시험결과 각각의 띠형 섬유보강재 모두 샘플링 위치에 따른 크리프 변형률 결과값의 편차는 오차범위 안에 포함됨을 확인할 수 있으며 이로부터 샘플링위치에

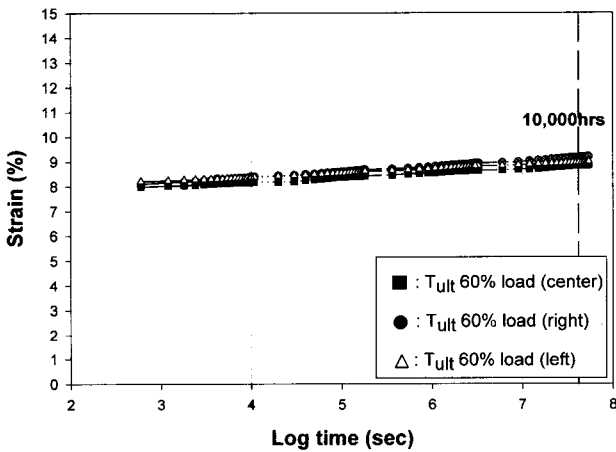


그림 20. 샘플링 위치에 따른 크리프 변형률 곡선(50kN/전폭)

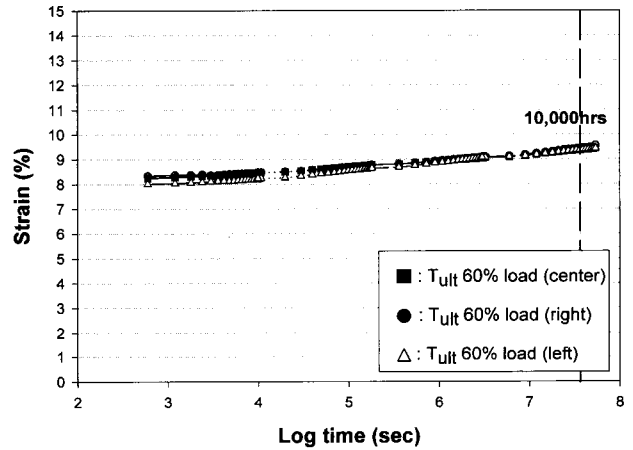


그림 21. 샘플링 위치에 따른 크리프 변형률 곡선(100kN/전폭)

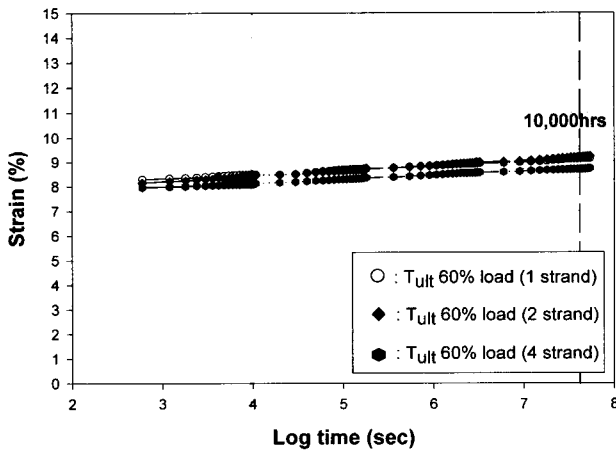


그림 22. Strand 개수에 따른 크리프 변형률 곡선(50kN/전폭)

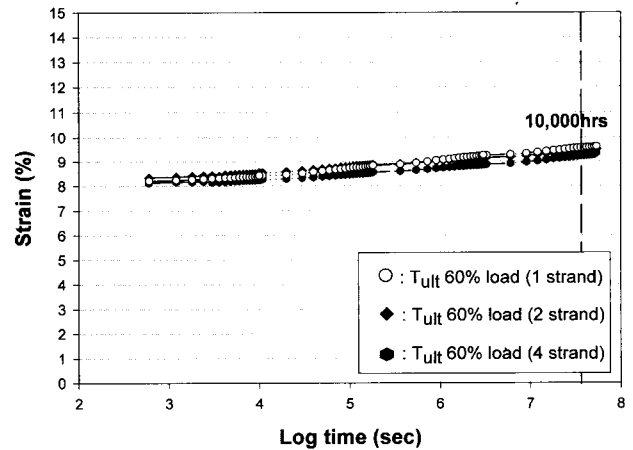


그림 23. Strand 개수에 따른 크리프 변형률 곡선(100kN/전폭)

따른 편차는 없는 것으로 판단되어진다. 또한, strand 개수에 따른 크리프 시험결과 역시 편차가 거의 없는 것이 확인되었다. 이로부터, 여러 가닥의 strand로 구성된 띠형 섬유보강재의 크리프 시험에 있어서 시료의 편차는 거의 없다고 판단되어진다.

### 5. 띠형 섬유보강재의 크리프 감소계수 결정

GRI Test Method GG-4 방법에 의하면 지오그리드의 크리프 감소계수(크리프에 의한 감소계수), RFCF은 식 (18)과 같이 산정한다(Koerner, 1994).

$$RF_{CR} = T_{ult} / T_{10} \quad (18)$$

여기서,  $T_{ult}$  = 지오그리드의 최대인장강도(kN/m);  $T_{10}$  = 시간-크리프 변형률 곡선에서 10,000시간에서 10% 이하의 크리프 변형률에 접근하게 되는 최대 재하하중을 고려한 인장강도(kN/m)이다.

인장부재가 폴리에스테르 고강력사인 띠형 섬유보강재의 경우도, 폴리에스테르 고강력사로 제조된 지오그리드와 같은 형태의 크리프 거동을 보이며 같은 시험방법을 따르고 있으므로, GRI Test Method GG-4를 이용하여 크리프에 의한 감소계수를 산출하였다.

크리프 특성 시험 결과를 토대로 띠형 섬유보강재의  $T_{10}$ 를 구해보면, 그림에서 보듯이 각각의 띠형 섬유보강재 모두 최대인장강도의 60%를 최대 크리프 재하하중으로 고려할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 2종의 띠형 섬유보강재에 대한 크리프 감소계수를 산정한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 띠형 섬유보강재의 크리프 감소계수

종 류	50kN/전폭	100kN/전폭
크리프 감소계수	1.67	1.67

### 6. 결 론

띠형 섬유보강재를 대상으로 공학적 특성인 인장특성, 크리프특성 등을 시험, 평가하고, 크리프에 의한 감소계수를 산정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 띠형 섬유보강재의 최대인장강도에서의 인장변형률은 12~13% 범위로, 양호한 인장특성을 보여주고

있다.

- (2) 시간-온도 중첩의 원리를 바탕으로 한 SIM법에 의한 크리프 시험결과로부터 장기간 후의 크리프특성을 예측해 보면, 띠형 섬유보강재는 최대인장강도의 60% 하중에 대하여도 장기적으로 10% 크리프 변형률을 벗어나지 않는 매우 우수한 크리프 특성을 보여주고 있다.
- (3) 크리프특성에 의한 띠형 섬유보강재의 크리프 감소계수는 50kN/전폭과 100kN/전폭 제품의 경우에 모두 1.67로서 상당히 우수한 공학적 특성을 나타내는 것으로 평가되었다.

### 참 고 문 헌

1. Aklonis J. J. and Macknight W. J.(1983), *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, John Wiley and Sons, 2nd edition, New York, pp. 36-56.
2. ASTM D 5262, Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep Behavior of Geosynthetics, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA.
3. Ferry J. D.(1980), *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd edition, New York, pp.273-290.
4. GRI GG-4, *GRI Test Method & Standards*, Geosynthetic Research Institute, Philadelphia, USA.
5. GRI GS-10, *GRI Test Method & Standards*, Geosynthetic Research Institute, Philadelphia, USA.
6. Koerner R. M.(1994), *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 328-393.
7. Mitchell, J. K. and Villet, W. C. B.(1987), *Reinforcement of earth slopes and embankments*, National Research Council, Washington, D.C., pp.153-163.
8. Orsat, P. and Khay, M.(1998), Study on Creep-Rupture of Polyester Tendons : Full Scale Tests, *Geosynthetics 98*, IFAI, Atlanta, pp.675-678.
9. Takaku A.(1980), "Effect of Temperature on Creep Fracture of Polypropylene Fibers", *J. of Applied Polymer Science*, Elsevier Science, Shannon, Vol.25, pp.1861-1866.
10. Thorton, J. S.(1998), Conventional and Stepped Isothermal Methods for Characterizing Long Term Creep Strength of Polyester Geogrid, *Geosynthetics 98*, IFAI, Atlanta, pp.691-698.
11. Thorton, J. S. and Allen, S. R.(1998), "The Stepped Isothermal Method for Time-Temperature Superposition and Its Application to Creep Data on Polyester Yarn", *Geosynthetics 98*, IFAI, Atlanta, pp.699-706.
12. Thorton, J. S. and Sprague, C. J.(1999), "The Relationship of Creep Curves to Rapid Loading Stress-Strain Curves for Polyester Geogrids", *Geosynthetics 99*, IFAI, Boston, pp.735-744.

(접수일자 2003. 3. 19, 심사완료일 2003. 4. 16)