

# 온도 및 구속응력을 고려한 토목섬유의 크리프거동에 관한 연구

## A Study on Creep Behavior of Geosynthetics Considering Effect of Temperature and Confining Stress

방 윤 경\*<sup>1</sup> Bang, Yoon-Kyung

김 홍 택\*<sup>2</sup> Kim, Hong-Taek

### Abstract

The effect of temperature and soil confining stress on geosynthetic creep behaviour was studied by performing the temperature dependent confined creep tests for HDPE geogrid and geomembrane specimen. The visco-elastic creep coefficients of the geosynthetics were evaluated by the test results and it was proposed that the simple expressions for the instantaneous and limit creep strain of geosynthetics was considered as a function of temperature and confining stress on geosynthetics. Based on the time-temperature superposition principle, a master curve has been drawn for extrapolating tensile creep strains to longer time intervals( $1 \times 10^7$  min. ~  $1 \times 10^{10}$  min.). By using this master curves, the shift factors which can be used in establishing master curve considering confining stress on geosynthetics were carried out. Each tests was performed during 8,000 ~ 12,000 min., with temperature ranging between 5°C and 40°C and with confining stress ranging between 0 t/m<sup>2</sup> and 9t/m<sup>2</sup>.

### 요 지

본 연구에서는, 토목섬유의 크리프시험시 온도 및 토목섬유에 가해지는 구속응력을 제어할 수 있도록 고안된 온도 제어 구속크리프시험(Temperature Dependent Confined Creep Test)을 수행하였다. 시험결과를 토대로, 시험온도 및 구속응력의 크기가 토목섬유의 크리프특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 장기적인 크리프변위를 예측하기 위하여 시간-온도 중첩원리를 이용한 합성곡선을 작도하여,  $1 \times 10^7$  min.(Geomembrane D) ~  $1 \times 10^{10}$  min.(Geogrid T) 까지의 크리프변위를 예측하였다. 본 합성곡선에 의해, 토목섬유에 가해지는 구속하중에 따른 토목섬유의 이동계수(shift factor)를 도출하였다. 온도제어 구속크리프시험은 시트형 지오그리드와 지오멤브레인을 대상으로 하였으며, 시험온도는 5~40°C의 범위로, 구속하중의 크기는 0~9t/m<sup>2</sup>의 범위로 하였다.

**Keywords :** Creep, Geosynthetics, Master curve, Shift factor, Time-temperature superposition

### 1. 서 론

토목섬유는 대부분 합성고분자(synthetic polymer)로서, 모든 종류의 중합체는 온도에 따라 공학적인 특성 등이 변화하는 것으로 알려져 있다(Koerner, R. M.,1994).

보강토공법에 적용되는 토목섬유의 온도분포에 관한 연구결과(Murray & Farrar,1988 ; Merry & Bray, 1997 ; 김홍택, 방윤경, 2003), 지중에서 토목섬유의 온도는 계절에 따라 매우 다양한 분포로 변화하는 것으로 보고되고 있다. 예를 들어 보강토옹벽의 경

\*1 정회원, 대원과학대학 토목과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Daewon Science College, ykbang@daewon.ac.kr)

\*2 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

우, 뒷채움 내부에서 보강재의 온도가 연간 약 20℃ 이상의 차이로 변화하는 것으로 보고된 바 있으며(Murray & Farrar, 1988 ; 김홍택, 방윤경, 2003), 폐기물 매립장에 쓰이는 지오멤브레인의 경우에는 토목섬유 상부의 복토 두께에 따라 대기온도 혹은 그 이상의 온도에 노출되는 것으로 나타났다(Merry & Bray, 1997). 이는 토목섬유가 시공되는 지역의 기후조건 및 계절에 따라 매우 다양한 온도로 변화하며, 온도 변화에 따라 토목섬유의 제반 특성도 다양하게 변화할 수 있음을 의미한다. 한편, 보강토공법 시공시 토목섬유의 장기적인 크리프특성을 설계에 반영하기 위해서는 크리프시험을 수행하여야 한다. 크리프시험은 보통 표준크리프시험(ASTM D5262, GRI GG4)방법에 의하여  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 대기중에서 1,000시간 까지 수행하고, 이를 초과하는 경우에는 시험이 종료될 때 까지 500시간 간격으로 크리프변형률을 측정하도록 규정하고 있다. 대부분의 고분자의 경우 크리프변위에 요구되는 시간 범위는  $10^4$ 에 상당하므로 이를 실제적으로 측정하기란 거의 불가능하다(전한용 등, 2003). 따라서, 장기적인 크리프시험에 따른 시간적 제약이 문제되는 경우, 단기간의 크리프시험에 의해 장기적인 크리프변위를 예측하여야 하며, 이러한 경우 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition principle)에 의한 장기 크리프변형 예측기법 등이 이용되고 있다. Cazzuffi & Sacchetti(1999), Bush(1990) 등은 다양한 대기온도에서의 크리프시험을 수행하고, 시간-온도 중첩원리를 이용하여 토목섬유의 장기 크리프변위를 예측한 바 있다.

본 연구에서는, 크리프시험시 온도 및 토목섬유에 가해지는 구속응력을 제어할 수 있도록 고안된 온도제어 구속크리프시험(Temperature Dependent Confined Creep Test)을 수행하였다. 시험결과를 토대로, 시험온도 및 구속응력의 크기가 토목섬유의 크리프특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 즉, Standard Linear Solid (SLS) model(Williams,1980)에 적용되는 점탄성계수인 순간변형률(instantaneous strain) 및 한계변형률(limit strain) 값을 구하고, 이를 시험온도 및 구속응력의 함수로 표현하였다. 장기적인 크리프변위를 예측하기 위하여 시간-온도 중첩원리를 이용한 합성곡선을 작도하여,  $1 \times 10^7 \text{ min.}$ (Geomembrane D) ~  $1 \times 10^{10} \text{ min.}$ (Geogrid T)까지의 크리프변위를 예측하였다. 본 합성곡선에 의해, 토목섬유에 가해지는 구속하중에 따른 토목섬유의 이동계수(shift factor)를 도출하였다. 온도제어 구속크리프

시험은 시트형 지오그리드와 지오멤브레인을 대상으로 하였으며, 시험온도는 5℃~40℃의 범위로, 구속하중의 크기는 0~9t/m<sup>2</sup>의 범위로 하였다.

## 2. 온도제어 구속크리프시험

### 2.1 시험장치

본 연구에서 사용된 온도제어 구속크리프시험장치는, 크리프시험시 토목섬유에 가해지는 구속하중 및 토목섬유의 온도를 자유롭게 조절할 수 있도록 고안하여 제작하였다(그림 1). 구속상자의 내부 크기는 450×400×200mm(길이×폭×높이)이고, 흡사료에 구속응력을 재하하기 위한 고무멤브레인이 구속상자의 상·하에 설치되어 있다. 시험시 구속상자 내부의 온도는 토목섬유 상·하층 모래의 내부에 온도조절장치를 설치하여 5℃~40℃의 범위로 일정하게 유지하도록 하였다. 시험에 사용한 토목섬유의 전체 크기는, 200(폭)×600(길이)mm로, 이중 클램프에 걸속되는 부분을 제외한 크리프시험용 시료만의 크기는 200(폭)×100(길이)mm이다. 유동학적 점탄성모델인 SLS 모델(Williams,1980)에 적용되는 점탄성계수를 도출하기 위하여, 시험시 크리프하중은 김홍택, 방윤경, 조용권(2003)의 인장시험 결과를 바탕으로, 최대인장강도의 30% 이내인 0.5ton을 적용하였다. 시험시 토목섬유의 전체 길이방향 모두에 걸쳐서 인장력이 고르게 분포할 수 있도록 구속상자 하부에 롤러(roller)를 부착하는 방법(Yuan et al., 1998)을 이용하였다. 시험기구의 클램프는, 다수의 예비시험 결과를 토대로하여 우레탄(urethane)을 피복한 클램프를 사용하여 시험중 토목섬유에 미끄러짐이 발생하지 않음을 확인하였다.

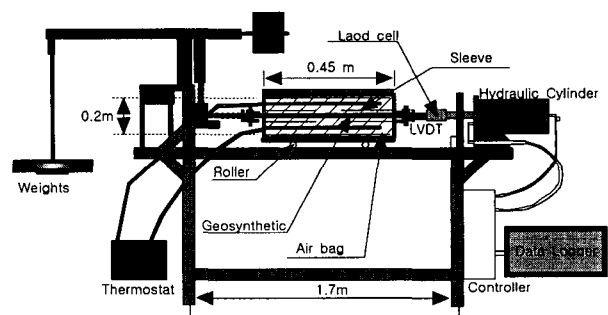


그림 1. 온도제어 구속크리프시험장치

## 2.2 시험방법 및 사용 흙시료의 제원

구속상자 내부의 모래는 토목섬유의 상·하 흙시료를 대상으로 직접전단시험시와 동일한 단위체적중량이 되도록 조성하였다. 즉, 각 층에 필요한 중량 만큼의 시료를 할당하는 중량-체적 할당법(weight-volume allocation) (Alfaro et al.,1995)을 사용하였다. 다짐은 직접 손으로 하거나 소형 다짐봉을 사용하여 층다짐을 실시하였다. 시험시 변위는 LVDT에 의해 자료수집기(data logger)를 이용해 측정하였다. 토목섬유의 상·하부 모래층의 중앙에 온도조절용 열선을 설치하였고, 토목섬유와 모래의 접촉면에 설치한 열센서는 온도 자동조절기에 연결하여 시험시 토목섬유의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 시험시 토목섬유의 온도는 보강토옹벽 보강재의 온도측정 결과(Murray & Farrar, 1988 ; 김홍택, 방운경, 2003)를 참고로 하여,  $5 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  및  $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 세가지로 하였다. 토목섬유에 가해지는 구속응력의 크기는 보강토옹벽 성토시 성토체의 자중을 감안하여  $0$ ,  $3\text{t/m}^2$  및  $9\text{t/m}^2$ 으로 하였다. 흙시료는 주문진 지역에서 채취되는 주문진규사(SP)를 함수비 2.0~3.0%의 자연함수비 상태로 사용하였으며, 흙시료의 비중은 2.63, 직접전단시험에 의한 모래의 내부마찰각은  $36.5^\circ$ , 점착력은  $0.1\text{ t/m}^2$ 이다. 시험에 사용된 토목섬유의 제원은 표 1과 같다.

## 3. 크리프해석

### 3.1 SLS 모델

일반적으로 크리프 거동의 변형 단계는, 크리프하중을 재하함과 동시에 발생하는 순간적인 탄성변형인 초기변형(initial deformation) 혹은 순간변형(instantaneous strain), 시간이 경과함에 따라 변형이 점차 증가하고, 어느 한계에서 변형율이 완화 혹은 평형값에 도달하게 되는 1차 크리프변형(primary creep), 시간경과에 따라

변형률이 비교적 완만히 진행되는 2차 크리프변형(secondary creep) 및 비교적 큰 크리프하중하에서 변형률이 급격히 증가하게 되는 3차 크리프변형(tertiary creep)으로 구분된다. 비교적 낮은 수준의 크리프하중이 재하되는 경우, 크리프곡선은 시간이 경과함에 따라 변형률이 거의 변화하지 않는 형태로 나타나며, 3차 크리프변형은 발생하지 않게된다. 즉, 크리프하중 재하시 토목섬유에는 크리프 순간변형이 발생하고, 시간경과에 따라 크리프곡선은 점근선에 이르게 되며, 추가적인 크리프곡선의 변화는 없다. Sawicki(1998) 등은 낮은 수준의 크리프하중 재하시, 유동학적 점탄성모델인 Standard Linear Solid(SLS) model(Williams,1980)을 적용하여 토목섬유 보강토옹벽의 크리프거동을 해석한 바 있다. SLS 모델의 일차원 구성방정식은 다음과 같으며, 이를 도식화하면 그림 2와 같다.

$$\frac{1}{E_1} \left[ \frac{d}{dt} + \frac{E_1 + E_2}{\eta} \right] \sigma = \left[ \frac{d}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \right] \epsilon \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$  : 보강재의 단위폭당 응력,  $\epsilon$  : 전체 변형률,  $t$  : 시간 이고, 파라미터  $E_1, E_2, \eta$ 는 시험을 통해 구할 수 있는 계수이다. 크리프하중  $\sigma$ 를 재하하여 크리프시험을 수행하면, 식 (1)은 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{E_1 + E_2}{\eta E_1} \sigma = \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \epsilon \quad (2)$$

토목섬유의 크리프변형률  $\epsilon$  및 보강재의 유동학적 특성치  $\varphi^*(t)$ 는,

$$\epsilon = \sigma \varphi^*(t) \quad (3)$$

$$\varphi^*(t) = \frac{1}{E^*} - \frac{1}{E_2} \exp\left(-\frac{E_2}{\eta} t\right) \quad (4)$$

여기서,  $E^* = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ ,  $E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ ,  $E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_\infty - \epsilon_0}$ 를 각각 의미한다.  $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ 는 각각 순간변형률(instantaneous strain), 한계변형률(limit strain)(그림 2 참조)을

표 1. 시험용 토목섬유의 제원(판매사 제공)

| 명 칭           | 재 질  | 두께 (mm) | 중량 (g/m <sup>2</sup> ) | 파단인장강도 (ASTM D 4595)       |       | 비 고       |
|---------------|------|---------|------------------------|----------------------------|-------|-----------|
|               |      |         |                        | 인장강도                       | 신율(%) |           |
| Geogrid T     | HDPE | 1.0~3.5 | 300                    | 4.6t/m <sup>*</sup>        | 11.5  | 시트형 지오그리드 |
| Geomembrane D | HDPE | 2.0     | 1,920                  | 299.6kg/cm <sup>2</sup> ** | 20 이하 | 지오멤브레인    |

\* : ASTM D 4595에 의한. \*\* : KPSM 6000에 의한.

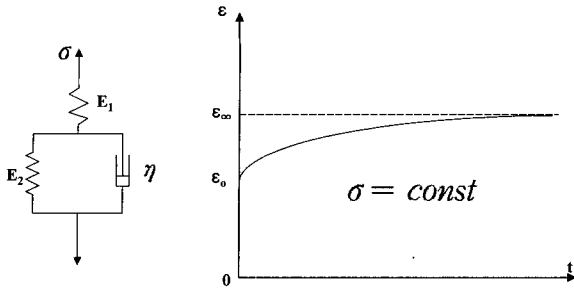


그림 2. SLS 모델(Williams,1980)

의미하며, 점성계수  $\eta$  값은 크리프시험 결과와 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다. SLS 모델에 의한 크리프특성의 해석은 1차 크리프에 국한된다. 본 연구에서는, 온도제어 구속크리프시험 결과를 토대로, Williams(1980)의 SLS 모델에 적용되는 점탄성계수인 순간변형률(instantaneous strain) 및 한계변형률(limit strain)을 구하였으며, 변형률 값을 구속응력의 크기 및 시험온도를 변수로 하는 다변수회귀분석에 의한 상관식으로 표현하였다.

### 3.2 시간-온도 중첩원리

영구구조물에서의 토목섬유 적용시 구조물의 존치기간(일반적으로 120년 정도, Cazzuffi and Sacchetti, 1999) 동안 응력 및 변형률이 허용한도를 초과하지 않아야 하며, 이를 위해 표준크리프시험 결과를 반영하여 적절한 안전율을 설계에 적용하고 있다. 표준크리프시험(ASTM D5262, GRI GG4)에서는 보통 1,000시간 까지 수행하고, 이를 초과하는 경우에는 시험이 종료될 때 까지 500시간 간격으로 크리프변형률을 측정하도록 규정하고 있다. 그러나 대부분의 고분자재료의 경우 요구되는 시간범위는  $10^{14}$ 에 상당하는 시간범위이므로 이를 실제적으로 측정하기란 거의 불가능하다(전한용 등, 2003). 따라서, 장기적인 크리프시험에 따른 시간적 제약이 문제시되는 경우, 단기간의 크리프시험에 의해 장기적인 크리프변위를 예측하여야 하며, 이러한 경우 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition principle)에 의한 장기 크리프변형 예측기법 등이 이용되고 있다. 그간 여러 연구자들(Ferrag, 1998; Muller-Rocholz et al., 1996; Rimoldi et al., 1993)에 의해 보외법에 의한 크리프변형 예측기법들이 제시된 바 있으며, 시간-온도 중첩원리도 이러한 예측기법들중의 하나이다. 시간-온도 중첩원리는 각기 다른 온도에서 수행된 크리프곡선을 이용하여 매우 긴 시간동안의 크리프변위를 예측할 수 있는 기법

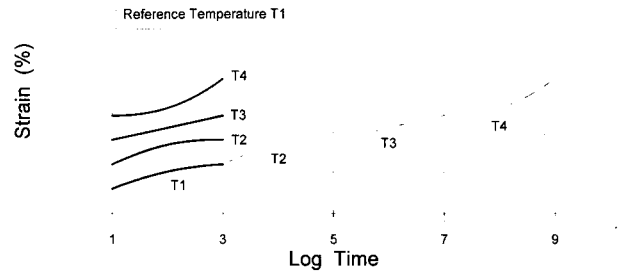


그림 3. 시간 - 온도 중첩원리를 이용한 합성곡선 유도(전한용 등, 2003)

이다. 즉, 각기 다른 온도에서 크리프시험을 수행하여 크리프곡선을 작도하고, 각 크리프곡선을 이동계수(shift factor)를 이용하여 설계온도에서의 합성곡선(master curve)에 일치시킴으로서 장기 크리프곡선을 작도하게 된다. Ferry(1980)는 이러한 이동계수를 다양한 고분자의 실험값에 적용하였을 경우 각 실험값들은 한 개의 합성곡선에 일치하는 것을 발견하였다. 그림 3에는 시간-온도 중첩원리의 개요를 나타내었으며, 이동계수  $a_T$ 는 다음 식 (5)로 정의된다.

$$\epsilon(T_0; t) = \epsilon(T; \frac{t}{a_T}) \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 크리프변위,  $T_0$ 는 이동의 기준이 되는 온도(설계온도),  $T$ 는 시험온도 ( $T > T_0$ )이다. 본 연구에서는 온도제어 구속크리프시험 결과를 토대로 시간-온도 중첩원리를 이용한 합성곡선을 작도하고, 구속하중 변화에 따른 토목섬유의 이동계수(shift factor)를 도출하였다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 크리프 특성

그림 4에는, 온도제어 구속크리프시험 결과 나타난 토목섬유의 변형률-시간 관계를 나타내었다. 그림 4를 살펴보면, Geogrid T와 Geomembrane D 두 가지 토목섬유의 크리프곡선 형상에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 두 가지 토목섬유 모두 구속응력이 증가함에 따라 변형률은 감소하는 것으로, 또한 시험온도가 상승할수록 크리프변형률이 급속히 증가하는 것으로 나타나, 토목섬유 크리프특성에 미치는 온도의 영향에 관한 Cazzuffi & Sacchetti(1999), Muller & Kirschner(1990),

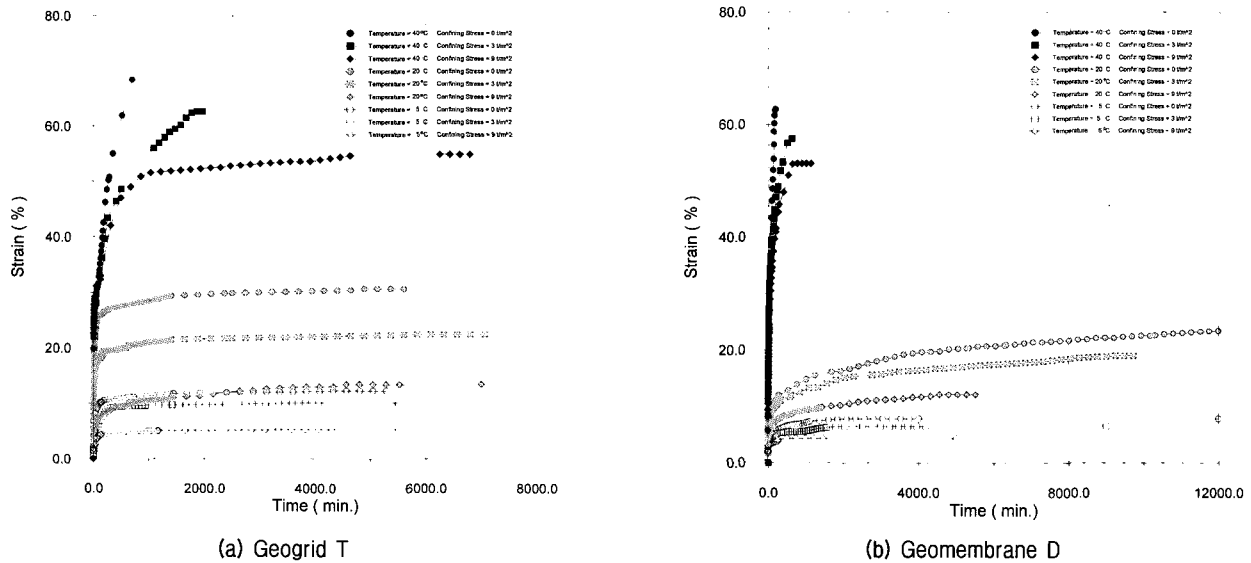


그림 4. 온도제어 구속크리프시험에 의한 변형률-시간 관계

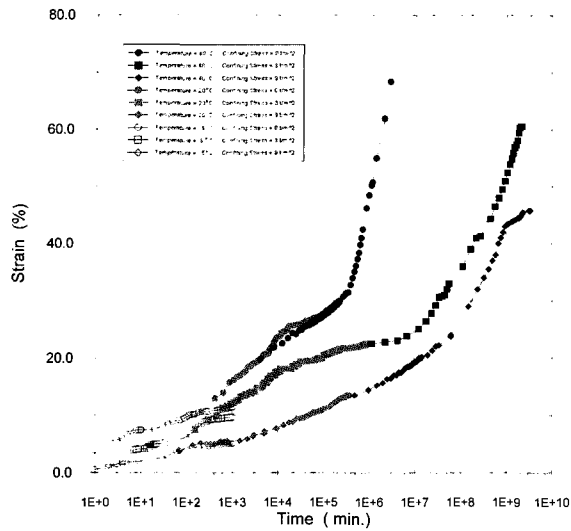
Merry & Bray(1997) 등의 연구와 부합되는 결과를 나타내었다. 이는 현장에서 다양한 온도와 구속응력의 영향을 받는 토목섬유의 크리프특성은, 대기온도  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 수행되는 크리프시험(ASTM D5262, GRI GG4) 결과와 많은 차이가 있음을 의미한다. 한계변형률에 미치는 구속응력의 영향을 분석하면, 구속응력이  $9\text{t/m}^2$ 로부터  $0\text{t/m}^2$ 으로 감소함에 따른 한계변형률의 증가는 Geogrid T의 경우에 약 24.4%( $40^\circ\text{C}$ 인 경우)~127.8%( $5^\circ\text{C}$ 인 경우)의 범위로, Geomembran D의 경우 약 18.1%( $40^\circ\text{C}$ 인 경우)~77.3%( $5^\circ\text{C}$ 인 경우)의 범위로 나타나, Geogrid T의 경우에 상대적으로 구속응력에 따른 크리프특성 변화가 큰 것으로 나타났으며, 두 가지 토목섬유 모두 이러한 구속응력의 영향이 시험온도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 분석결과를, 한계변형률에 미치는 구속응력 및 온도의 영향을 한계변형률의 증가율로서 비교분석한 결과로서, 그림 4를 살펴볼 때 시각적으로 분석내용과 일치하지 않는 것으로 나타날 수 있다. 시험온도가  $5^\circ\text{C}$ 에서  $40^\circ\text{C}$ 로 상승함에 따른 한계변형률의 증가율을 살펴보면, Geogrid T의 경우에 약 122.8%(구속응력이  $0\text{t/m}^2$ 인 경우)~918.5%(구속응력이  $9\text{t/m}^2$ 인 경우)의 범위로, Geomembran D의 경우 167.9%(구속응력이  $0\text{t/m}^2$ 인 경우)~1106.8%(구속응력이  $9\text{t/m}^2$ 인 경우)의 범위로 각각 나타나, 구속응력에 비하여 온도변화가 크리프변형률에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 두 가지 토목섬유를 비교하면, 상대적으로 Geomembrane D의 경우에 온도변화에 따른 크리프특성 변화가 크게 나타났으며, 두

가지 토목섬유 모두 온도의 영향이 구속응력이 감소함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 한계변형률에 도달하는데 소요되는 시간은 약 2,000min.~4,000min. 이상의 범위로, 시험온도가 높아질수록 증가하는 경향을 나타내었고, Geogrid T에 비하여 Geomembrane D에서 소요시간이 다소 크게 나타났다. 특히 시험온도  $40^\circ\text{C}$ 인 경우에는, 약 2,000min. 이내에서 변형률이 급격히 증가하면서 대부분 토목섬유에서 파단이 발생하여, 두 가지 토목섬유 모두 온도가 높은 경우 크리프변형에 매우 취약한 것으로 나타났다.

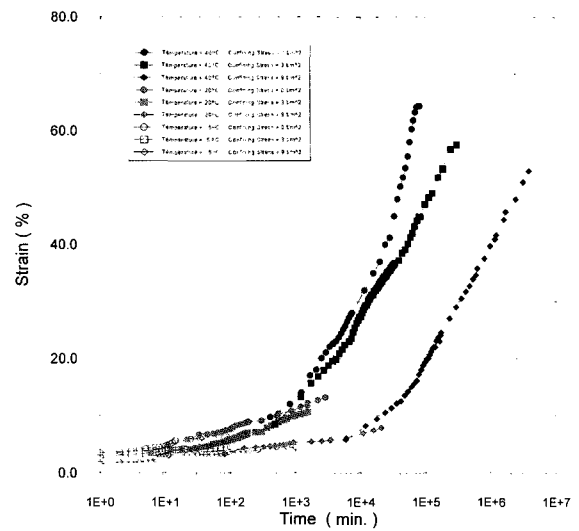
#### 4.2 시간 - 온도 중첩원리에 의한 크리프곡선

본 연구에서는 온도제어 구속크리프시험 결과를 토대로 온도-중첩원리를 이용한 합성곡선을 작도하고, 구속하중 변화에 따른 토목섬유의 이동계수(shift factor)를 구하였다. 각각의 온도에서의 크리프시험은 8,000min.(Geogrid T)~12,000min.(Geomembrane D) 동안 수행되었으며, 합성곡선은  $5^\circ\text{C}$ 에서 각기 다른 구속하중 재하시의 크리프곡선을 작도하고,  $20^\circ\text{C}$ 에서의 크리프곡선과  $5^\circ\text{C}$ 에서의 크리프곡선의 크리프변형률이 일치하는 시간만큼  $20^\circ\text{C}$ 에서의 크리프곡선을 이동하여 작도하여, 최종적으로  $40^\circ\text{C}$ 에서의 크리프곡선을 동일한 방법에 의해 이동 작도하였다.

그림 5에는 합성곡선을 나타내었다. 즉, 각기 다른 온도에서 수행된 8,000min.(Geogrid T)~12,000min.(Geomembrane D) 동안의 크리프시험 결과를 토대로 합성곡



(a) Geogrid T



(b) Geomembrane D

그림 5. 온도제어 구속크리프시험에 의한 합성곡선

표 2. 온도제어 구속신장시험에 의한 토목섬유의 이동계수

| Geosynthetic Type | Confined Stress (t/m <sup>2</sup> ) | Shift Factors |      |       |
|-------------------|-------------------------------------|---------------|------|-------|
|                   |                                     | 5°C           | 20°C | 40°C  |
| Geogrid T         | 0                                   | 1             | 200  | 20    |
|                   | 3                                   | 1             | 150  | 7,330 |
|                   | 9                                   | 1             | 70   | 6,900 |
| Geomembrane D     | 0                                   | 1             | 10   | 40    |
|                   | 3                                   | 1             | 10   | 50    |
|                   | 9                                   | 1             | 80   | 70    |

선을 작도하므로써 약  $1 \times 10^7$  min.(Geomembrane D) ~  $1 \times 10^{10}$  min.(Geogrid T) 까지의 크리프거동을 나타내었다. 그림 5를 살펴보면, 두 가지 토목섬유 모두 시간의 흐름에 따라, 특히 구속응력의 크기가 작을수록 크리프 변형률은 더욱 증가하며, 구속응력이 변형률에 미치는 영향이 시간이 흐름에 따라서 더욱 커지는 경향을 보이고 있다. 두 가지 토목섬유를 비교하면, Geogrid T의 경우 재하시간이 약  $10^5$ (구속하중  $0t/m^2$ 인 경우) ~  $10^9$ (구속하중  $9t/m^2$ 인 경우)min.에서 토목섬유의 파단(rupture)현상이 발생하였으며, Geomembrane D의 경우 재하시간이 약  $10^3$ (구속하중  $0t/m^2$ 인 경우) ~  $10^4$ (구속하중  $9t/m^2$ 인 경우)min.에서 파단되어, Geomembrane D의 경우에 상대적으로 짧은 시간에 크리프에 의한 파단현상이 발생하였고, 두 가지 토목섬유 모두 구속하중의 크기가 증가함에 따라 파단이 지연되는 현상을 나타내었다. 크리프 변형률의 크기를 비교하면, 시험기간이 약 1,000min. 이내의 초기를 제외하고는 Geogrid T의 크리프변형률이

비교적 작게 나타났다. 표 2에는 그림 5의 합성곡선으로부터 얻어진 이동계수를 나타내었다. 표 2를 살펴보면, 이동계수는 구속하중이 없는 경우에 Geogrid T의 경우 약 20~200의 범위로, Geogrid D의 경우 약 10~40의 범위로 각각 나타났으며, 구속하중이 작용하는 경우 이동계수값이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 구속하중이 증가함에 따라서 이동계수가 증가하는 경향의 원인 중 하나는, 위에서 기술한, 「구속하중의 크기가 증가함에 따라 파단이 지연되는 현상」과 관련이 있을 것으로 판단되며, 아울러 구속하중 증가에 따라 합성곡선의 기울기가 완만하게 나타나는 현상(그림 5 참조), 구속하중 및 온도에 따른 크리프변형률의 차이 등에 그 원인이 있을 것으로 판단된다. 참고적으로, Cazzuffi, D. and Sacchetti, M.(1999)는 HDPE 및 폴리에스테르 재질의 지오그리드와 지오택스타일 시료를 대상으로 시험온도를 10~40°C로 달리하여 표준 크리프시험을 수행하고, 이를 토대로 지오그리드의 경우 30~400(HDPE), 25~100(폴리에스테르)의 범위로, 지오택스타일의 경우 10~100의 범위로 이동계수를 제시한 바 있다.

#### 4.3 토목섬유 할선계수 - 온도 - 구속응력 관계식의 제시

그림 6 및 7에는, 온도 및 구속응력에 따른 크리프 변형률의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여, 본 연구의 온도제어 구속크리프시험 결과를 토대로 토목섬유에 가해지는 구속응력과 크리프변형률 사이의 관계(그림 6) 및 시험시 토목섬유의 온도와 크리프변형률 사이의

관계(그림 7)를 각각 나타내었다. 크리프변형률은 SLS 모델에 적용되는 점탄성계수인 순간변형률  $\epsilon_0$  및 한계 변형률  $\epsilon_\infty$ 로 구분하여 나타내었다. 그림 6 및 그림 7로부터, 토목섬유의 크리프변형률은 구속응력의 크기가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며, 또한 토목섬유의 온도가 상승함에 따라 비선형적으로 증가하는 두드러진 특징을 나타내었다. 참고적으로, Tsuboi(1998)는 그의 연구에서, 온도변화에 따른 지오멤브레인의 인장력-변형률 거동 실험결과, 토목섬유 인장력과 할선계수를 각각 온도를 변수로 하는 선형비례관계식과 지수함수식으로 표현한 바 있다.

그림 6으로부터, 구속응력 증가에 따른 크리프변형률

의 감소율은 구체적으로, Geogrid T의 경우에 한계변형률은 약 23.0%(40°C인 경우)~56.1%(5°C인 경우)의 범위로, 순간변형률은 약 21.7%(40°C인 경우)~64.2%(20°C인 경우)의 범위로 나타났으며, Geomembrane D의 경우에는 한계변형률은 약 15.3%(40°C인 경우)~50.0%(20°C인 경우)의 범위로, 순간변형률은 약 16.3%(40°C인 경우)~64.5%(5°C인 경우)의 범위로 각각 나타났다. 이는 온도가 강하할수록 구속응력이 크리프변형률에 미치는 영향이 커지는 현상을 의미하며, 변형률의 감소율은 토목섬유의 종류에 따라 큰 차이가 없고, 한계변형률과 순간변형률간의 감소율의 차이 또한 미미한 것으로 나타났다. 계속해서 그림 7로부터 온도 상승에 따른 크리프변형

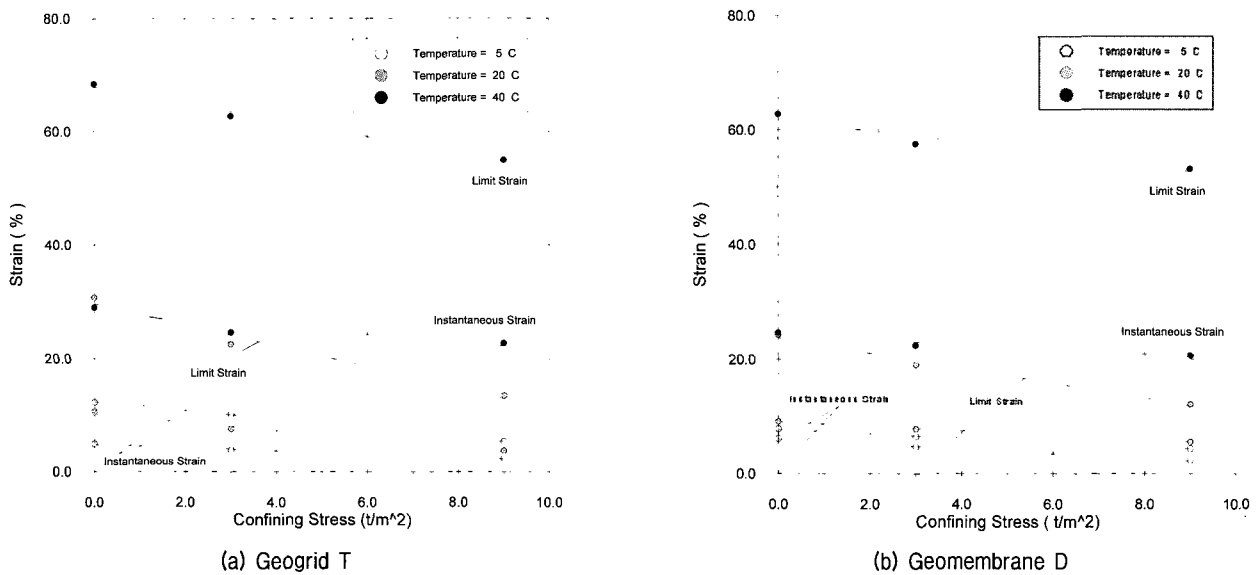


그림 6. 구속응력- 크리프변형률 관계

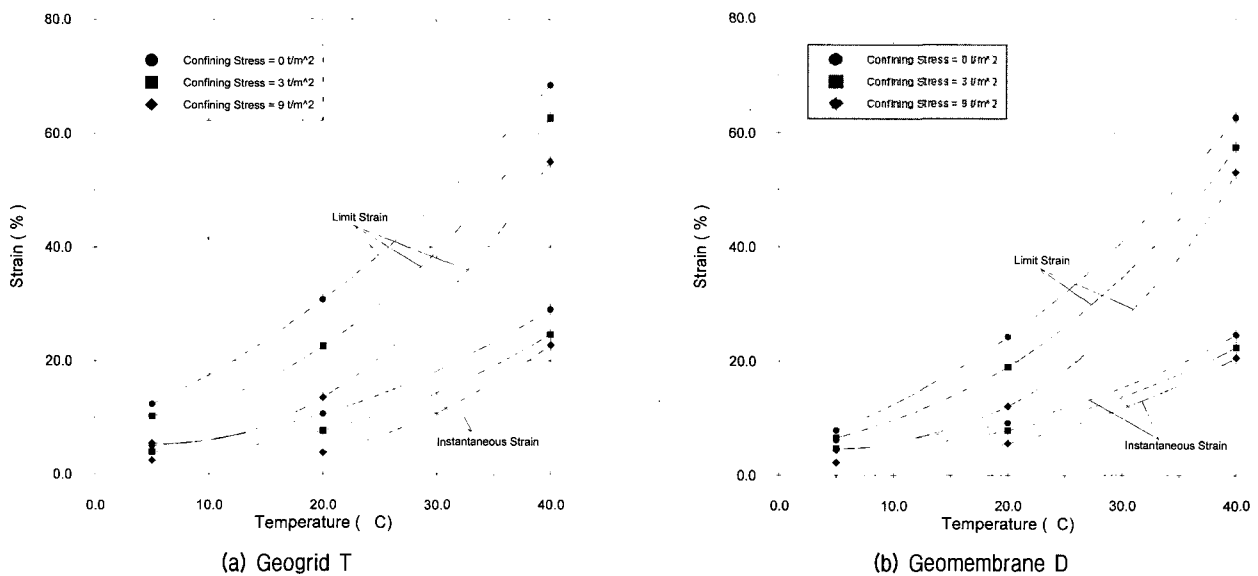


그림 7. 온도-크리프변형률 관계

표 3. 식 (6)의 상수값

| 토목섬유          | 변형률                   | 다항식의 상수값 |        |       |        | 상관계수  |
|---------------|-----------------------|----------|--------|-------|--------|-------|
|               |                       | a        | b      | c     | d      |       |
| Geogrid T     | $\epsilon_0$ (%)      | 6.706    | -0.556 | 0.019 | -0.239 | 0.995 |
|               | $\epsilon_\infty$ (%) | 13.656   | -1.361 | 0.032 | 0.0579 | 0.997 |
| Geomembrane D | $\epsilon_0$ (%)      | 6.508    | -0.415 | 0.016 | -0.177 | 0.999 |
|               | $\epsilon_\infty$ (%) | 9.075    | -0.903 | 0.033 | -0.011 | 0.997 |

률의 변화를 구체적으로 살펴보면, Geogrid T의 경우에 한계변형률은 약 456.1%(구속응력이 0t/m<sup>2</sup>인 경우)~918.5%(구속응력이 9t/m<sup>2</sup>인 경우)의 범위로, 순간변형률은 약 480.0%(구속응력이 0t/m<sup>2</sup>인 경우)~845.8%(구속응력이 9t/m<sup>2</sup>인 경우)의 범위로 증가하였으며, Geomembran D의 경우에는 한계변형률이 약 703.9%(구속응력이 0t/m<sup>2</sup>인 경우)~1106.8%(구속응력이 9t/m<sup>2</sup>인 경우)의 범위로, 순간변형률은 약 300.0%(구속응력이 0t/m<sup>2</sup>인 경우)~836.4%(구속응력이 9t/m<sup>2</sup>인 경우)의 범위로 증가하였다. 즉, 두 가지 토목섬유 모두 구속응력의 크기가 증가할수록 온도가 크리프변형률에 미치는 영향이 커지는 현상을 나타내었으며, 변형률의 증가율은 Geomembrane D의 한계변형률이 다소 크게 나타는 이외에는 특이한 차이가 없으며, Geomembrane D의 경우에 한계변형률과 순간변형률간의 증가율 차이가 두드러지게 큰 것으로 나타났다.

그림 6 및 그림 7의 분석 결과를 토대로, 토목섬유 크리프변형률의 크기를 토목섬유에 가해지는 구속응력 및 온도를 변수로 하는 관계식으로 나타내면 식 (6) 및 표 3과 같다.

$$\epsilon = a + b \cdot \sigma_v + c \cdot T^2 + d \cdot T \quad (6)$$

여기서, T는 온도(°C),  $\sigma_v$ 는 연직응력(t/m<sup>2</sup>)을 각각 의미하며, 표 3에 나타낸 바와 같이 상관계수는 약 0.995 이상으로 매우 높게 나타났다. SLS 모델 적용시, 상기의 식 (6)에 의한 점탄성계수  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_\infty$ 를 직접 적용하므로써 토목섬유 보강토공법 크리프거동의 모델링이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는, 토목섬유에 가해지는 구속응력 및 온도를 제어할 수 있도록 고안된 온도제어 구속크리프시험(Temperature Dependent Confined Creep Test)을 수행

하였다. 시험결과를 토대로, 시험온도 및 구속응력의 크기가 토목섬유의 크리프특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 시간-온도 중첩원리를 이용한 합성곡선을 작도하여 장기적인 크리프변위를 예측하였다. 합성곡선을 토대로 토목섬유에 가해지는 구속응력에 따른 토목섬유의 이동계수(shift factor)를 도출하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 두 가지 토목섬유 모두 구속응력의 크기가 작을수록 크리프변형률은 증가하였으며, 구속하중의 크기가 증가함에 따라 파단(rupture)이 지연되는 현상을 나타내었다. 구속응력이 크리프변형률에 미치는 영향은 시간이 흐름에 따라서 더욱 커지는 경향을 나타내었다.
- (2) 구속응력의 영향에 비하여 온도변화가 크리프변형률에 미치는 영향이 매우 크게 나타났으며, 상대적으로 Geomembrane D의 경우에 온도변화에 따른 크리프특성 변화가 크게 나타났다.
- (3) 시험온도가 40°C인 경우에는 약 2,000min. 이내에서 변형률이 급격히 증가하면서 대부분 파단이 발생하여, 두 가지 토목섬유 모두 온도가 높은 경우 크리프 변형에 매우 취약한 것으로 나타났다.
- (4) 각기 다른 온도에서 수행된 본 온도제어 크리프시험 결과를 토대로 합성곡선을 작도하므로써, 약  $1 \times 10^7$ min.(Geomembrane D)~ $1 \times 10^{10}$ min.(Geogrid T)까지의 크리프거동 예측이 가능하였다.
- (5) 이동계수(shift factor)는 구속하중이 없는 경우에 Geogrid T의 경우 약 20~200의 범위로, Geogrid D의 경우 약 10~40의 범위로 각각 나타났으며, 구속하중이 작용하는 경우 이동계수값이 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- (6) 토목섬유의 크리프변형률은 구속응력의 크기가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 것으로, 또한 토



목섬유의 온도가 상승할수록 비선형형태로 증가하는 것으로 각각 나타났으며, 이를 토대로 순간변형을 및 한계변형률을 토목섬유의 온도 및 구속응력의 함수로 표현하였다.

- (7) 토목섬유 보강토공법의 유한차분해석 등에 본 연구 결과를 적용하므로써, 크리프변위 해석시 온도변화에 따른 보강재의 특성변화를 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
- (8) 본 연구에서는 SLS 모델에 적용 가능한 점탄성계수를 도출하였으며, 이를 위하여 낮은 수준의 크리프 하중을 적용하여 온도제어 구속크리프시험을 수행하였다. 추후, 보다 다양한 하중강도를 토대로 한 분석 및 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김홍택, 방윤경, 조용권(2003), 온도제어 구속인장시험에 의한 토목섬유 보강토옹벽의 변위해석, 한국지반공학회 논문집 제19권 2호, pp.97-106.
2. 김홍택, 방윤경, 조용권, 남현우(2003), 토목섬유 보강토벽체의 온도변화에 따른 크리프변위, 한국지반환경공학회 특별심포지엄 논문집, pp.15-24.
3. 전한용, 유중조, 김홍택, 김경모, 김영윤(2003), 락형 섬유보강재의 크리프특성 평가, 한국지반공학회 논문집 제 19권 2호, pp. 279-289.
4. Alfaro, M. C., Miura, N. and Bergado, D. T.(1995), "Soil-Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.2, pp.157-167.
5. ASTM D 5262-92(1992), "Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep Behavior of Geosynthetics", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia, PA, USA.
6. Bush, D. I.(1990), "Variation of Long Term Design Strength of

- Geosynthetics in Temperatures", *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Balkema, pp.673-676.
7. Cazzuffi, D. and Sacchetti, M.(1999), "Temperature Effects on Tensile Creep Behaviour of High Strength Geosynthetics", *Geosynthetics '99 Conference Proceedings*, Vol.2, pp.723-733.
8. Farrag, K.(1998), "Development of an Accelerated Creep Testing Procedure for Geosynthetics-Part II : Analysis", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.21, No.1, pp.38-44.
9. Ferry, J. D.(1980), "*Viscoelastic Properties of Polymers*", John Wiley & Sons, Inc., 3rd ed., New York, pp.273-290.
10. GRI Standard Practice GG4(1995), "Determination of the Long Term Design Strength of Stiff Geogrid", *Geosynthetic Research Institute Standard Test Method*, GRI, Philadelphia, PA, USA.
11. Koerner, R. M.(1994), *Designing with Geosynthetics*, third ed. Prentice-Hall Inc., pp.148-159.
12. Merry, S. M. and Bray, J. D.(1997), "Temperature Dependent Multi Axial Creep Response of HDPE Geomembranes", *Geosynthetics '97 Conference Proceedings*, Vol.1, pp.163-176.
13. Muller-Rochholz, J. and Kirschner, R.(1990), "Creep of Geotextiles at Different Temperatures", *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Balkema, pp.657-659.
14. Murray, R. T. & Farrar, D. M.(1988), "Temperature Distributions in Reinforced Soil Retaining Walls", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.7, pp.33-50.
15. Rimoldi, P. and Montanelli, F.(1993), "Creep and Accelerated Creep Testing for Geogrids", *Geosynthetics '93 Conference Proceedings*, Vol.2, pp.773-787.
16. Sawicki, A. et al.(1998), "Creep Behaviour of Geosynthetics", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, pp.365-382.
17. Tsuboi, M., Imaizumi, S. and Miyaji, H.(1998), "Effect of the Temperature on Tensile Behavior of Geomembranes", *6th Int. Conference on Geosynthetics*, pp.201-204.
18. Williams, J. G.(1980), *Stress Analysis of Polymers*, 2nd edition, Ellis Horwood Ltd.(Chichester) and John Wiley and Sons, New York.
19. Yuan et al.(1998), "Soil Confinement Effect on Stress-Strain Properties of Geosynthetics", *6th Int. Conf. on Geosynthetics*, pp.523-528.

(접수일자 2003. 7. 9, 심사완료일 2003. 9. 2)