

지오신세틱스의 응력완화거동 해석

Analysis of Stress Relaxation Behaviors of Geosynthetics

전 한 용^{1*} Jeon, Han-Yong

ABSTRACT

In this study, stress relaxation behaviors of nonwoven geotextile and geomembrane which have protection, filtration and drainage, water barrier functions, respectively were examined. 'Theory of transition phenomena' was applied to interpretate the stress relaxation behaviors of two geosynthetics. The initial and later relaxation times for stress relaxation behaviors of geosynthetics were derived from the constitutive equations. The initial relaxation behaviors of these geosynthetics were dependent on the additional strains and were especially faster with temperature. Finally, both relaxation times of geosynthetics were shorter with additional strain and temperature and the reduction of relaxation times of nonwoven geotextile were larger than those of geomembrane.

요 지

본 연구에서는 보호, 여과, 차수기능을 갖는 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 응력완화거동을 각각 고찰하였다. “두 가지 지오신세틱스 제품의 응력완화거동을 해석하는데 ”전이현상이론“이 적용되었다. 이들 지오신세틱스 제품의 응력완화거동에서 초기 및 후기 완화시간은 구성방정식으로부터 구하였다. 이들 지오신세틱스 제품의 초기완화거동은 부가변형률에 대한 의존성이 있으며, 특히 온도가 증가 할수록 증가하였다. 끝으로, 이들 지오신세틱스 제품의 초기 및 후기 완화시간은 부가변형률 및 온도가 커질수록 짧아졌으며, 완화시간 감소는 지오멤브레인보다 부직포 지오텍스타일의 경우가 더 큼을 알 수 있었다.

Keywords : Stress relaxation, Additional strain, Theory of transition phenomena, Relaxation time

1. 서 론

토목합성재료(Geosynthetics) 중 보호(Protection), 여과 및 배수(Filtration and Drainage), 차수(Water Barrier)기능을 갖는 재료 중 부직포 지오텍스타일(Nonwoven Geotextiles) 과 지오멤브레인(Geomembranes)의 공통점은 항복변형 이후 파단점까지의 변형률이 크다는 점이다. 이는 항복거동 이후부터는 변형회복이 불가능한 소성변형에 의해 Fracture Mechanism이 지배됨을 의미한다.

일반적으로 보강기능을 갖는 지오그리드(Geogrids)의 Fracture Mechanism은 부가하중에 의한 변형거동 즉, 크립 변형거동에 의해 좌우되지만, 보호(Protection), 여과 및 배수(Filtration and Drainage), 차수(Water Barrier)기능

을 갖는 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인 등의 Fracture Mechanism은 부가되는 변형에 의한 Time-Dependent behavior 인 응력감소현상(Stress Decay Phenomena)이 중요한 영향을 미치게 된다. 그리고 만일 이들 재료에 충분히 오랜 기간 즉, 재료의 사용기간 동안 변형에 의한 응력을 유지 하려면, 사용 및 노출조건-온도, 부가변형률 등-에 의해 발생하는 응력완화거동(Stress Relaxation Behaviors)에 대한 규명이 수반되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 부가변형에 의한 Time-Dependent behavior인 응력감소현상(Stress Decay Phenomena)이 중요한 영향을 미치는 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 응력완화거동을 해석하기로 한다.

^{1*} 정희원, 인하대학교 나노시스템공학부 교수 (Member, Professor, Division of Nano-Systems Engineering, Inha University, E-mail: hyjeon@inha.ac.kr)

2. 응력완화의 평형이론

토목합성재료의 응력완화 현상은 평형상태(변형부가 전) → 비평형상태(변형부가 후) → 평형상태(응력완화 진행 과정)로의 전이현상으로 간주될 수 있으며 이와 같은 “전이현상의 평형이론” 도입하면 완화거동을 좀 더 구체적으로 설명할 수 있다.

여기서 “전이현상의 평형이론”이란 Figure 1에 나타난 바와 같이 계가 비평형상태에서 평형상태로 전이될 때 응력이 이완되는 방향으로 유동이 진행되어 에너지 장벽을 넘어 새로운 평형위치로 상대적인 변위가 발생하는 현상을 의미한다.

그리고 Figure 1의 (a)는 변형부가에 의해 평형상태로부터 변위된 segments의 전이를 나타내며 이 segments들에 의해 둘러 쌓인 부분을 완화좌석으로 간주한다. 또 (b)는 이 segments들이 에너지장벽을 넘어 평형에 도달하는 전이과정을 완화좌석에 적용되는 응력을 고려하여 모식적으로 나타낸 그림이다.

한편 완화좌석의 크기는 완화좌석의 단면적 $\lambda_1 \lambda_2$ 와 평형위치사이의 거리 λ , 위치에너지 장벽 μ 의 곱으로 표시된다. 그리고 응력완화과정 중 작용하는 응력에 의해 평형상태로의 전이가 진행되는 데 이때의 전이속도상수를 k_f 라 하면, 완화응력 $\sigma(t)$ 와 관련시켜 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\frac{d \log \sigma(t)}{dt} = K_f \cdot [\exp(\alpha_1 \cdot \sigma(t) / \sigma(0)) - \exp(\alpha_2 \cdot \sigma(t) / \sigma(0))] \quad (1)$$

여기서 α_1 은 정반응이 진행될 때의 완화좌석, α_2 는 정반응진행중에 발생하는 recovery term으로 에너지 장벽의 변화에 의한 완화좌석의 크기를 나타내며 각각 $\alpha_1 = \mu \cdot \lambda \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_2 / kT$, $\alpha_2 = (1 - \mu) \lambda \lambda_2 \lambda_3 / kT$ 로 표시할 수 있다. (k : Boltzmann 상수)

그런데 응력완화 후기과정은 비교적 느리게 진행되어 직선거동을 나타내므로 단순 Maxwell-모형의 적용으로 해석이 가능하지만 빠르고 복잡한 완화 거동을 나타내는 응력완화 초기과정에서는 “전이현상의 평형이론”을 적용시켜 정반응만 진행된다고 가정하면 식 (1)의 우변 괄호 안의 제2항인 recovery term이 무시되어 다음과 같이 된다.

$$-\frac{d \log \sigma(t)}{dt} = k_f \exp[\alpha \cdot \sigma(t) / \sigma(0)] \quad (2)$$

한편, 응력완화실험에서 나타나는 완화거동은 완화속도가 빠르고 완화응력이 비교적 작은 완화기구(완화초기)와 완화속도가 느리고 완화응력이 큰 완화기구(완화후기)의 합으로 표시할 수 있다.

이러한 경우 응력완화의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \sigma_1 \exp(-\gamma_f \cdot t) + \sigma_2 \cdot \exp(-\gamma_b \cdot t) \quad (3)$$

$$= \sigma_1 \exp(-t / \tau_1) + \sigma_2 \cdot \exp(-t / \tau_2) \quad (4)$$

$$(\tau_1 = \frac{1}{r_f}, \tau_2 = \frac{1}{r_b})$$

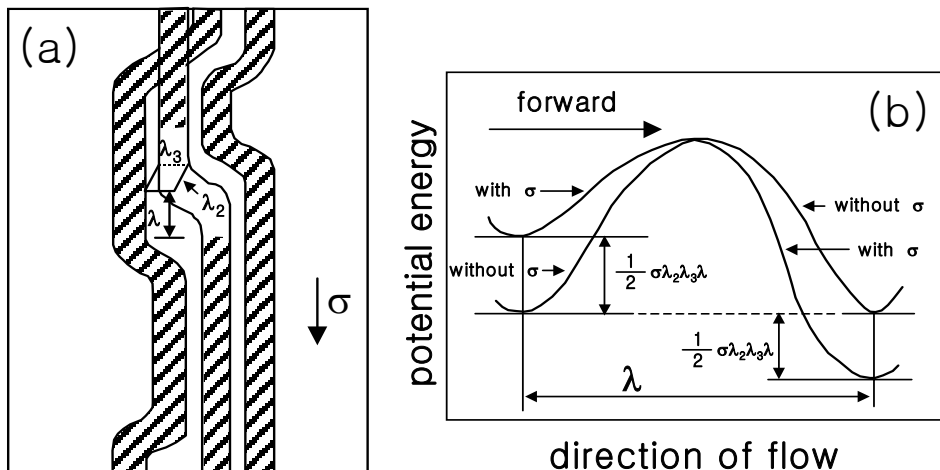


Fig. 1. Schematic diagram of equilibrium theory of transition phenomena

- (a) simplified representation indicating voids or holes into which segments of molecules can jump, thus relaxing stress.
- (b) diagram indicating how an applied stress alters potential energy barrier a flowing molecular segment must surmount as it flows from one equilibrium position to the next.

그런데 완화속도가 빠르고 복잡한 완화초기거동의 해석에 있어서 완화속도상수 r_f 보다는 “전이현상의 평형이론”의 전이속도상수 k_f 를 적용시키는 것이 합리적이다.

3. 실험

3.1 시료의 준비

보호(Protection), 여과 및 배수(Filtration and Drainage) 기능을 갖는 중량 $1,200\text{g/m}^3$ 의 부직포 지오텍스타일을, 차수(Water Barrier)기능을 갖는 두께 2mm 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 지오멤브레인(Geomembranes)을 각각 사용하였다.

3.2 응력-변형률 실험

HDPE 지오멤브레인이 가지고 있는 응력-변형률특성을 파악, 응력완화에 필요한 초기변형률의 설정 및 기타 시험조건의 결정을 위하여 ASTM D638의 형태 IV에서 제시한 크기로 절단한 후, AGS-500D 시리즈 만능시험기로 50mm/min의 속도(strain rate)에서 일축 인장성질을 측정하였다.

3.3 응력완화 실험

3.2의 일축인장 시험과 같은 형태의 시료에 변형률을 부가하여 응력완화실험을 실시하였는데, 지오텍스타일의 경우 항복변형률의 2, 5, 8%에 해당하는 변형률을, 지오멤브레인의 경우 항복변형률의 20, 30, 45%에 해당하는 변형률을 각각 적용하였다. 또한, 응력완화 온도조건은 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85°C로 하였는데, 이는 일반적으로 쓰레기 매립장의 내부온도를 고려한 온도범위이다. 사용된 응력완화 측정장치는 Shimadzu사에서 제조된 heating chamber인 TCL-C220이 부착된 AGS-500D 시리즈 만능시험기를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 응력-변형률 거동

Figure 2에 부직포 지오텍스타일의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 여기서 항복변형률은 약 50% 정도임을 알 수

있으며, 이로부터 응력완화거동 해석에 필요한 부가변형률을 설정할 수 있었다.

지오멤브레인의 경우 응력-변형률 곡선을 Figure 3에 나타내었으며, 항복변형률은 8% 정도임을 알 수 있으며, 부직포 지오텍스타일의 경우와 마찬가지로 응력완화거동 해석에 필요한 부가변형률을 설정할 수 있었다.

4.2 응력완화거동

부직포 지오텍스타일의 응력완화거동을 Figure 4에 나타내었다. 여기서 응력완화거동은 부가변형률이 커질수록 빠른 초기완화거동을 나타내고 있으며, 온도가 올라갈수록 빠른 초기완화거동을 나타내고 있다. 한편, 후기완화거동은 부가변형률에 무관하게 거의 비슷한 경향을 보이고 있지만, 초기완화거동과 마찬가지로 온도가 올라감에 따라 약간씩 빨라짐을 나타내고 있다.

지오멤브레인의 응력완화거동을 Figure 5에 나타내었으며, 부직포 지오텍스타일의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다.

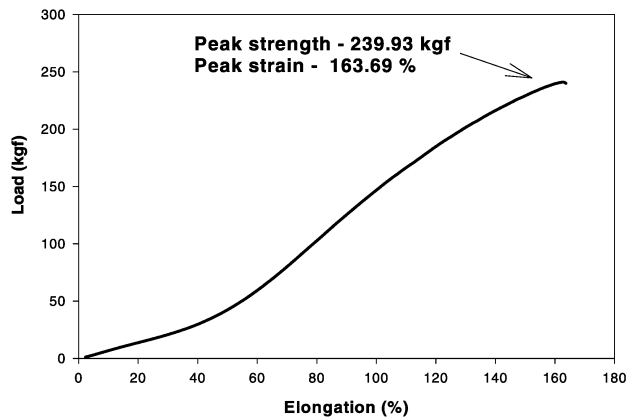


Fig. 2. Load-elongation curve of nonwoven geotextile

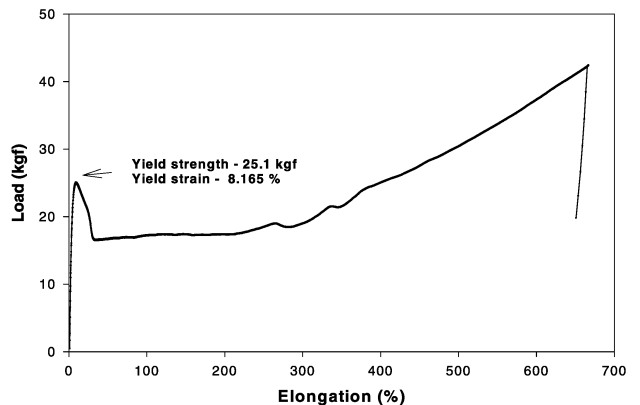
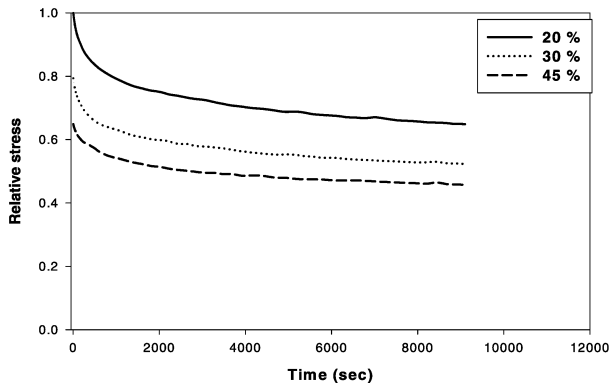
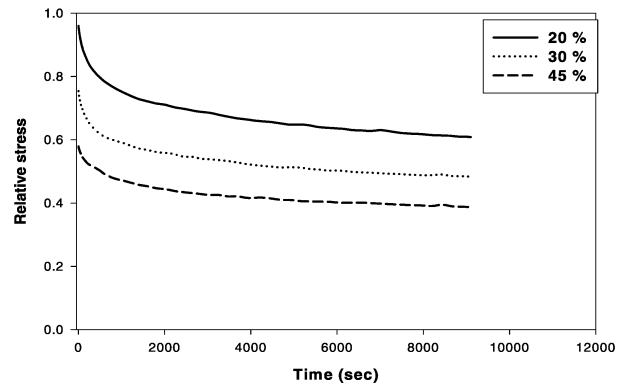


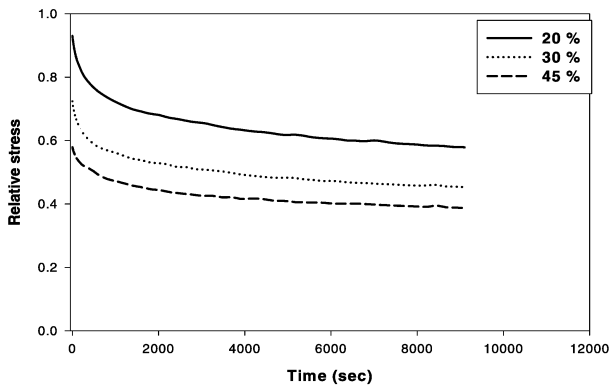
Fig. 3. Load-elongation curve of HDPE geomembrane



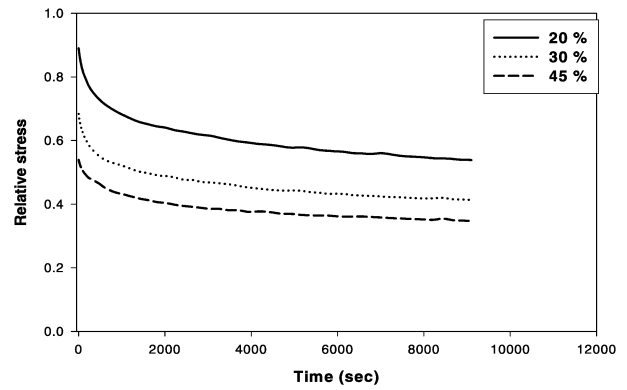
(a) 25°C



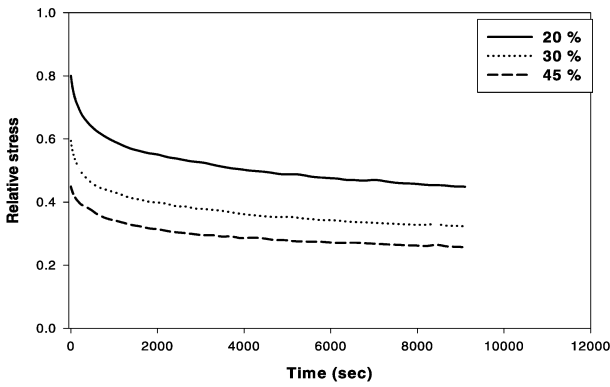
(b) 35°C



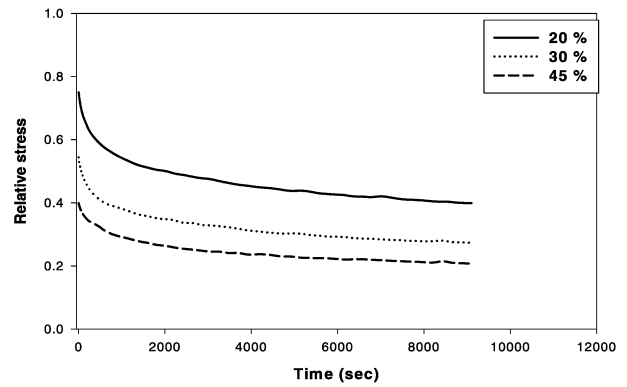
(c) 45°C



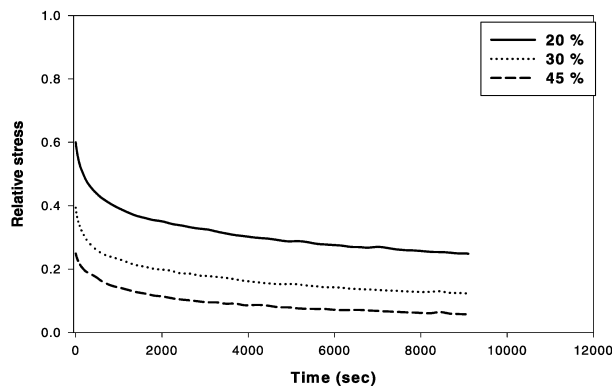
(d) 55°C



(e) 65°C

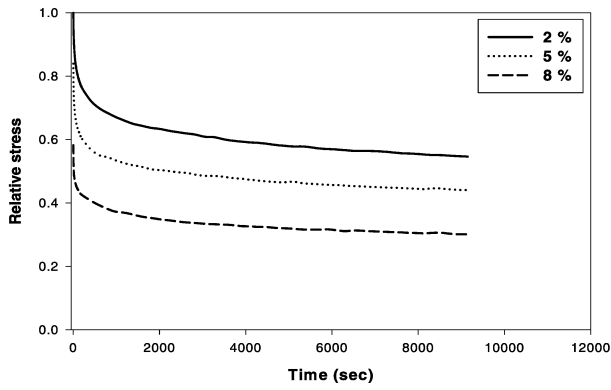


(f) 75°C

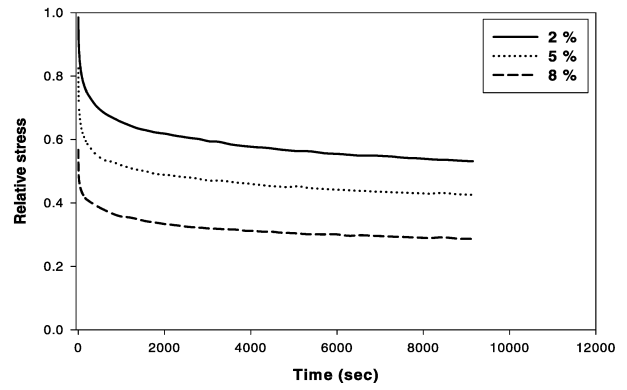


(g) 85°C

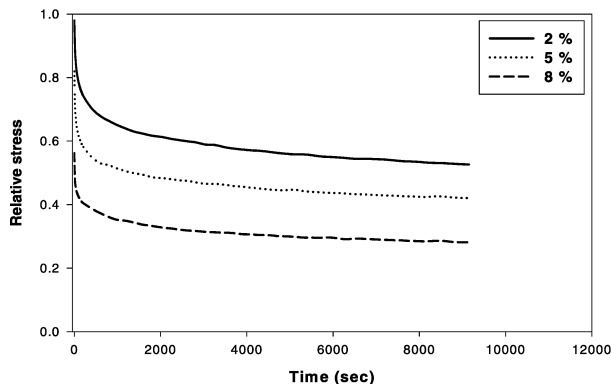
Fig. 4. Stress relaxation curves of nonwoven geotextile with additional strains



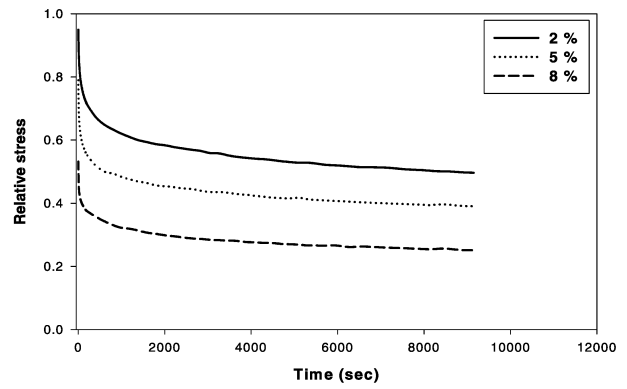
(a) 25°C



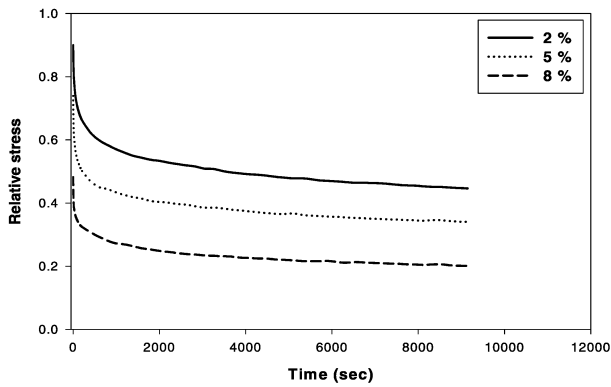
(b) 35°C



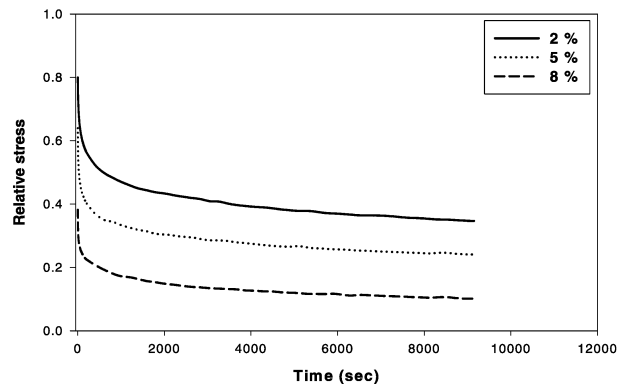
(c) 45°C



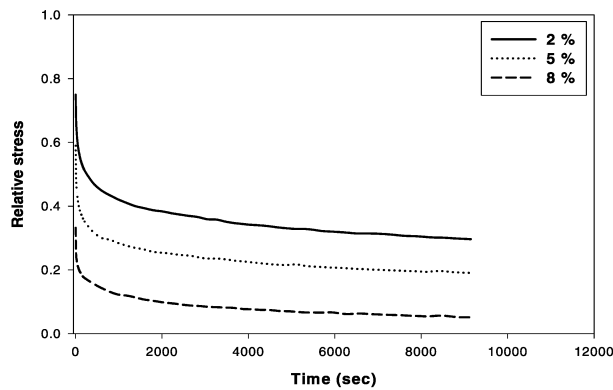
(d) 55°C



(e) 65°C



(f) 75°C



(g) 85°C

Fig. 5. Stress relaxation curves of geomembrane with additional strains

Table 1. Stress relaxation times of geosynthetics

Geosynthetics	Additional Strain (%)	τ_1 (min)			τ_2 (min)		
		25°C	55°C	85°C	25°C	55°C	85°C
Nonwoven Geotextile	2	6.7	6.1	5.2	357.4	351.5	343.6
	5	6.3	5.7	4.7	354.7	347.3	339.6
	8	5.8	5.2	4.2	352.3	342.8	332.7
Geomembrane	20	1.8	1.2	0.6	133.4	131.5	130.4
	30	1.2	0.8	0.4	131.7	130.4	130.1
	45	0.8	0.5	0.2	130.4	130.2	129.9

4.3 응력완화시간

식 (4)와 응력완화실험 데이터를 이용하여 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 응력완화시간을 구한 다음 Table 1에 나타내었다.

여기서, 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 경우 앞의 응력완화거동에서 고찰한 바와 같이 부가변형률 및 온도에 따라 초기 및 후기 완화시간이 단축됨을 알 수 있었으며, 부직포 지오텍스타일의 완화시간 단축이 크게 나타나는 이유는 구성섬유간의 Slippage현상이 크기 작용하기 때문이라고 생각된다.

5. 결론

보호(Protection), 여과 및 배수(Filtration and Drainage), 차수(Water Barrier)기능을 갖는 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 응력완화거동을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토목합성재료의 응력완화 현상은 평형상태(변형부가 전) → 비평형상태(변형부가 후) → 평형상태(응력완화 진행과정)로의 전이현상으로 간주, 해석할 수 있다.
2. 부직포 지오텍스타일 및 지오멤브레인의 응력완화거동은 부가변형률이 커질수록 빠른 초기완화거동을 나타내었으며, 온도가 올라갈수록 빠른 초기완화거동을 나타내었다. 한편, 후기완화거동은 부가변형률에 무관하

게 거의 비슷한 경향을 보였으며, 초기완화거동과 마찬가지로 온도가 올라감에 따라 약간씩 빨라졌다.

3. 부직포 지오텍스타일과 지오멤브레인의 경우 부가변형률 및 온도에 따라 초기 및 후기 완화시간이 단축되었으며, 부직포 지오텍스타일의 완화시간 단축이 크게 나타났다.

참고문헌

1. A. Salman, V. Elias, I. Jurean, S. Lu & E. Pearce (1997), "Durability of Geosynthetics based on Accelerated Laboratory Testing", *In Proc. of '96 geosynthetics conference*, Long Beach, California, pp.217-234.
2. J. D. M. Wisse, C. J. M. Broose and W. H. Boels (1990), *In Geotextiles, Geomembranes and Related Products (G. D. Hoedt Ed.)*, pp.697-702.
3. K. Z. Andrews, A. McGown and R. T. Murray (1986), "The load-strain-temperature behavior of geotextiles and geogrids", *In Proc. 3rd Int. on Geotextiles*, Vol.3, Vienna, pp.707-712.
4. R. L. Clough, N. C. Billingham and K. T. Gillen (1996), "Polymer Durability", American Chemistry Society, pp.557-575.
5. R. M. Koerner (1989), "Durability and Aging of Geosynthetics", Elsevier Applied Science, London/New York, pp.1-47, 136-230.
6. S. M. Merry and J. D. Bary (1997), "Temperature-dependant Multi-axial Creep Response of HDPE Geomembrane", *In Proc. of Geosynthetics'97*, pp.163-176.
7. T. Y. Soong (1995), "Effects of Four Experimental Variables on the Stress Relaxation Behavior of HDPE Geomembranes", *In Proc. of Geosynthetics'95 Conference*, Nashville, pp.1139-1147.

(논문접수일 2006. 9. 4, 심사완료일 2006. 9. 15)