

토목섬유의 신뢰성 평가

구현진, 김동환, 박주승*

FITI 시험연구원 신뢰성평가센터, *산업자원부 기술표준원 기술정보신뢰성과

1. 서 론

토목 시공에 사용되는 토목섬유 (geosynthetics)는 위생 매립장이나 성토 보강 구조물의 장기성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 이러한 위생 매립장 라이너 시스템에 적용되는 지오텍스타일 부직포는 차수재로 사용되어지는 지오멤브레인을 보호하여 매립장의 침출수 누출을 방지하며, 또한 성토 보강용 지오그리드는 사면이나 옹벽 등의 구조물을 지속적으로 유지시키는 보강재로 사용된다. 그러므로 토목섬유의 고장은 구조물의 파괴나 붕괴로 이어지므로 매우 높은 수준의 신뢰성이 필수적으로 요구된다.

신뢰성이란 “정해진 사용조건에서 의도하는 기간 중 정해진 기능을 발휘할 확률” 이라고 정의 할 수 있다[1]. 그러므로 제품의 품질은 일정시점에서의 정적인 품질, 즉 시간에 무관한데 비하여 신뢰성은 시간에 의존적이다. 따라서 시간적 품질인 신뢰성을 나타내기 위해서는 이것을 정량적으로 표현할 수 있는 척도가 있어야 하며, 이 척도로 신뢰도 (reliability), 수명(lifetime) 또는 고장률(hazard rate)을 사용하고 있다. 토목섬유와 같이 스트레스가 누적되어 발생하는 마모고장 메카니즘을 나타내는 섬유소재는 고장률 보다는 수명으로 신뢰성을 표현하며, 평균 수명 보다는 10%가 고장 나는 시점인 B_{10} 수명으로 표현한다. 이는 사용자가 제품이 50% 고장나는 시점인 평균수명(mean time to failure)을 수

명으로 인식하지 않고, 고장 나기 시작하는 시점을 수명이라고 인식하기 때문이다. 또한, 토목섬유 보다 높은 안전율이 요구되는 원자로나 비행기에 사용되는 부품들은 B_1 수명 또는 $B_{0.1}$ 수명 등이 사용되기도 한다. 그러므로 토목섬유의 신뢰성을 평가하기 위해서는 토목섬유의 사용 환경 조건과 사용기간의 척도 및 요구되는 기능 또는 고장모드를 규정해야 한다. 본 고에서는 가속수명시험(accelerated life test) 및 수명과 스트레스 모델, 통계적인 신뢰성 분석 및 추정 등의 신뢰성평가기법을 적용한 토목섬유의 신뢰성평가방법 및 사례를 소개하고자 한다.

2. 토목섬유의 고장모드 및 요구수명

토목섬유의 종류는 지오텍스타일(geotextiles), 지오멤브레인(geomembranes), 지오그리드(geogrids), 지오네트(goenets), 지오웹(geoweb), 지오드레인(geodrains), 지오매트(geomats), 지오파이프(geopipes), 토목섬유점토차수재(geosynthetic clay liners), 지오컴포지트(geocomposites) 등을 들 수 있다. 이러한 토목섬유는 모래, 자갈, 흙 등의 환경에 사용되는 고분자재료로 사용기간 동안 성능변화가 크게 발생할 경우 토목구조물의 안전성에 심각한 영향을 미치므로 품질 및 신뢰성 인증에 대한 기준의 마련이 시급히 요구되어 왔다. 그러므로 2002년부터 신뢰성향상사업을 통하여 “성토보강용 지오그리드 [2],” “위생매립장 라이너시스템용 지오텍스타일[3],”

와 “위생매립장 라이너시스템용 지오멤브레인-고밀도 폴리에틸렌 차수막[4],” 등 3개의 신뢰성평가기준이 제정되어 있고, 연약지반 개량용 지오드레인 등의 신뢰성 평가기준이 개발 중에 있다. 이러한 기준을 개발하는 과정에서 토목섬유의 사용환경, 요구구성, 사용수명 등을 정의해야 하는데, 그 내용은 다음과 같다.

2.1. 성토보강용 지오그리드

성토보강용 지오그리드의 고장모드(failure mode)는 사면 또는 옹벽에 시공된 후 시간이 경과함에 따라 시공 시 결함, 온도, 토압 등 여러 가지 요인에 의하여 지오그리드에 크리프 변형이 발생하여 구조물 형태의 변형(failure effects)이 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 지오그리드의 파괴 시 발생 할 수 있는 구조물의 변형 또는 붕괴에 이르기 전에 지오그리드 변형에 의하여 구조물이 변형될 수 있는 가능성을 일반적으로 10% 미만[5]으로 간주하고 있다. 따라서 신장률(변형률) 10%를 고장으로 정의하고, 성토 보강용 지오그리드의 수명은 크리프 변형률 10% 미만으로 유지될 수 있는 기간까지로 규정할 수 있다. 한편 대표적인 고분자성형 또는 섬유제 지오그리드의 소재는 폴리에틸렌(고밀도 폴리에틸렌, 폴리프로필렌)과 폴리에스테르이며 이에 대한 고장 발생은 소재 종류와 관계없이 신장률 10%로 규정할 수 있다. 또한, 성토보강용 지오그리드의 경우 현장에서 요구되는 수명은 토목구조물의 수명과 동등한 50년에서 100년 정도이다.

2.2. 위생매립장 라이너 시스템용 지오텍스타일

지오텍스타일은 연약지반의 보강과 분리 및 배수의 기능으로 사용되며 매립공사(쓰레기 매립장 등), 호안공사, 도로기초공사 등 많은 분야에 사용되고 있으며 직포형, 부직포형으로 용도와 기능이 다양하며 품질도 일반적으로 안정된 편이나 토목공사 구조물의 기능에 부합되는 초장기간의 성능유지가 보장되어야 함으로 기능별 가용수명을 예측할 수

있도록 내구성, 수리적 기능유지 등 실지 적응성을 종합평가 하여 용도별 신뢰성을 평가하여야 할 것이다. 위생매립장 라이너시스템용 지오텍스타일 부직포는 생활 폐기물에서 발생하는 침출수에 의한 침해에 매우 안정하여야 하며 침출수를 차단하기 위한 라이너 시스템을 보호하는 기능과 일정 수준의 침출수를 여과하는 기능을 매립이 시작되고 위생매립장이 안정화될 때까지의 기간 동안 안정적이고 지속적으로 성능을 발휘하여야 한다. 따라서 위생매립장의 요구수명과 동등한 수준의 총 50년의 기본적인 요구수명을 만족 시킬 수 있어야 한다. 위생매립장의 가장 일반적인 라이너시스템의 구성에서 상층부의 지오텍스타일 부직포는 폐기물에서 발생한 침출수를 여과하고 하층 지오텍스타일 부직포는 지반에 존재 할 수 있는 작은 암석들로부터 지오멤브레인을 보호하는 기능을 수행한다. 위생매립장 상부 라이너시스템에 사용되는 부직포의 경우 생활폐기물에서 발생하는 침출수 또는 매립 상층부로부터 유입되는 경우, 지하수를 여과하여 부직포 하부의 배수시스템을 통하여 배출시키는 기능의 저하와 지반에 존재할 수 있는 암석등에 의해 차수 라이너시스템을 보호하는 부직포가 꿰뚫리는 현상이 고장으로 간주될 수 있다.

2.3. 위생매립장 라이너 시스템용 지오멤브레인

위생매립장의 바닥면과 사면에 라이너시스템용 지오멤브레인중 고밀도 폴리에틸렌이 포설되었을 때 설계상 라이너시스템 전체에 부가되는 하중에 의해 파괴가 발생할 수 있으나 이는 설계 또는 시공상의 문제로 생각할 수 있다. 따라서 위생매립장의 환경적인 요소에 의하여 지오멤브레인의 성능 저하가 발생하여 차수 성능을 상실하는 것을 고장으로 정의할 수 있다. 대표적인 지오멤브레인 소재인 고밀도 폴리에틸렌이 태양광조사, 강우, 침출수 누출 등의 환경적 스트레스 요인에 의해 화학적 침해를 받아 화학적 분해를 초래하는 것으로 지오멤브레인의 고장 기구를 생각할 수 있다. 즉, 산화 방지제의 기

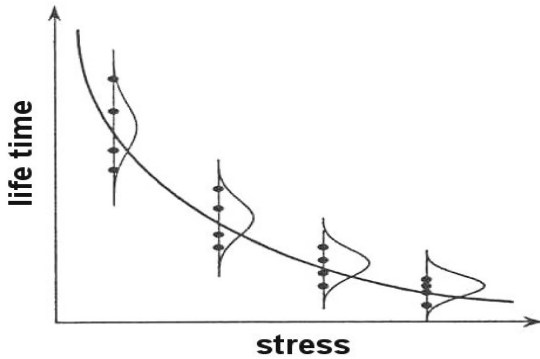


Figure 1. 수명과 스트레스와의 관계 및 수명분포.

능 상실이 시작되는 시점인 산화유도시간 유지율 10%[6]를 고장으로 정의할 수 있다. 또한 라이너 시스템용 지오멤브레인의 수명은 위생매립장의 수명과 동등한 50년 이상이 요구된다.

3. 토목섬유소재의 신뢰성 평가방법

앞 절에 정의된 사용환경에 따른 고장모드를 재현하고, 요구수명을 만족하는지 평가하기 위해서는 가속수명시험(accelerated life test) 및 수명과 스트레스 모델(life-stress model), 통계적인 신뢰성 분석 및 추정 등의 신뢰성평가기법을 적용한 토목섬유의 신뢰성평가방법의 개발이 요구된다. 즉, 토목섬유와 같이 현장에서 요구되는 수명이 최소 50년 이상인 소재의 신뢰성을 평가하기 위하여서는 단시간에 고장에 도달할 수 있는 가속수명시험을 실시한다. 토목섬유의 실사용조건보다 가혹한 조건(high stress level)에서 시험하여 고장을 촉진시키고, 가속조건에서 관측된 고장 시간으로부터 수명-스트레스 관계를 추정하여, 실사용 환경에서의 수명으로 외삽하기 위해서는 Figure 1과 같이 수명-스트레스 관계식규명 및 수명분포(lifetime distribution)를 추정하는 것이 필수적으로 수반되어야 한다.

3.1. 수명-스트레스와의 관계식

토목섬유의 경우 가장 많이 사용되는 가속인자는

온도이다. 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition)와 아레니우스 모델(arrhenius model)은 온도에 의한 가속수명시험에서 가장 널리 사용되는 수명-스트레스 모델로 다음과 같이 표시 된다.

3.1.1. 시간-온도 중첩 원리(Time-Temperature Superposition)

보강용으로 사용되는 토목섬유에 주로 적용되어지며, 토목섬유의 크리프 변형률을 가속 시험할 경우, 시간-온도 중첩원리(conventional TTS)를 이용하여 온도를 가속 인자로 하는 크리프 가속시험을 수행한다. 크리프 변형률에 대한 온도와 시간의 연관성은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E(T_0, t) = E\left(T, \frac{t}{\alpha_T}\right) \quad (1)$$

여기서, T_0 : 기준온도

T : 이동온도

α_T : 시간 t 에 따른 시간 축 이동인자로 가속계수의 역수

$$\alpha_T = \frac{t_T}{t_{T_0}},$$

$$\text{Log}_{10}\alpha_T = \text{Log}_{10}t_T - \text{Log}_{10}t_{T_0},$$

여기서, 기준온도에서 크리프 변형률 $x\%$ 에 도달하는데 걸리는 시간 (hr)

t_{T_0} : 이동온도에서 크리프 변형률 $x\%$ 에 도달하는데 걸리는 시간 (hr).

WLF(William-Landel-Ferry) 식에 의해 가속계수의 역수인 α_T 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\text{Log}_{10}\alpha_T = \frac{-C_1(T-T_g)}{C_2 + T-T_g}, \quad (2)$$

여기서, T_g : 기준온도로 사용된 유리전이온도

C_1, C_2 : 시간-온도 중첩에 사용되는 WLF 상수

최근에는 시간-온도 중첩원리의 몇 가지 단점을

보완하기 위하여 미국의 TRI(Texas Research International)에서 개발된 SIM(steped isothermal methods using time-temperature superposition)방법을 적용한 수명예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. SIM 방법의 정의는 “하나의 시료에 하중을 부여한 후 온도를 순차적으로 상승시킨 후 일정시간 유지시켜 가며 크리프 변형률을 측정하는 방법”으로 기존의 TTS와 비교할 때, 시험시간을 혁신적으로 단축시킬 수 있고, 시료간 편차와 이동인자로부터 발생하는 불확도(uncertainty)를 최소화시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 장기크리프시험 데이터가 없는 경우에 적용할 때는 많은 주의를 요한다.

3.1.2. 아레니우스 모델(Arrhenius Model)

온도를 가속인자로 하는 가속수명 모델로 가장 널리 사용되는 수명-스트레스 모델이다. 위생매립장 라이너 시스템에 적용되는 지오택스타일과 지오멤브레인의 경우 온도를 상승시켜서 꿔뚫림을 가속시키는 경우나 산화방지제의 손실을 가속시키는 경우에도 이 모델을 적용한다.

$$\tau = A \exp\left(\frac{E}{KT}\right), \tag{3}$$

τ : 고장시간,

A: 상수,

E: 활성화에너지(cal),

K: 기체상수(=1.9859 cal/mol · K)

T: 절대온도(K)

3.2. 수명분포(Lifetime Distribution)

가속수명시험에 의하여 얻어진 고장시간을 위의 수명-스트레스와의 관계를 적용하여 외삽에 의하여 실사용환경에서의 수명으로 전환하면, 여러개의 고장데이터를 얻을 수 있다. 이 고장시간을 분석하여 신뢰성 척도를 추정하기 위해서는 수명분포를 추정하여야 한다.

토목섬유의 고장은 스트레스 누적에 의한 증가형

고장률 함수(increasing failure rate)[7]를 나타내므로 와이블 분포(weibull distribution)를 가정하는 것이 바람직하며, 신뢰성을 평가할 수 있는 척도인 신뢰도 함수(survival function), 고장률(hazard function), B_{10} 수명은 다음과 같이 구한다.

$$\text{분포함수: } F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \tag{4}$$

$$\text{고장률: } h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \tag{5}$$

$$\text{평균수명: } MTTF = \Gamma(1 + 1/\beta)\alpha \tag{6}$$

$$B_{10} \text{ 수명: } B_{10} = -\alpha [\log(0.9)]^{1/\beta} \tag{7}$$

여기서, α : 척도모수(scale parameter) (시간)

β : 형상모수(shape parameter)

t: 수명 (시간)

또한, 와이블 분포의 형상모수(β)는 값이 1보다 작으면 감소형 고장률 함수(decreasing failure rate) 나타낼 수 있고, 1보다 크면 증가형 고장률 함수를 나타낼 수 있으며, 1이면 고장률이 일정한 우발고장을 나타내는 지수분포(exponential distribution)를 나타낼 수 있다. 그러므로 수명분포를 추정할 때 와이블 분포가 일반적으로 사용되며, 그 외에도 대수 정규 분포(lognormal distribution), 지수 분포(exponential distribution) 등이 수명분포 및 신뢰성 척도 추정에 사용된다.

3.3. 토목섬유의 신뢰성평가 방법

토목섬유의 장기내구수명을 예측하기 위하여, 신뢰성 기준 RS K 0008[2], 0009[3], RS M 0017[4] 이 개발되었다.

성도보강용 지오그리드의 신뢰성 평가는 시간-온도 중첩원리를 적용하여 온도를 가속 인자로 사용하여 크리프 변형률을 측정하였다. 시간-온도 중첩원리를 이용한 크리프 마스터 곡선 산출과 선형회귀분석에 의한 예측모델을 개발하여 크리프 변형률이 10% 발생하는 시간을 예측 수명으로 계산한다.

예상수명은 와이블 분포를 따르므로 와이블 분포의 형상모수와 척도모수를 추정하여, 90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명을 평가한다.

위생매립장 라이너 시스템용 지오텍스타일은 여과기능과 지오멤브레인의 보호기능을 수행하므로 수명평가 또한 두 가지 기능을 다 만족하는지 평가하여야 한다. 보호기능에 대한 수명평가는 폐기물을 매립 후 제품의 노화를 발생시키는 외부 스트레스 요인을 온도와 폐기물의 누적에 의한 압력으로 간주 할 수 있다. 보호수명은 꿰뚫림이 발생할 때까지의 시간으로 정의하는데, 품질평가 시험인 피라미드 꿰뚫림 강도 시험은 정속하중을 가해 꿰뚫림이 발생할 때까지의 하중을 측정하나 보호수명 시험에서는 정속하중 대신, 정하중을 가한상태에서 온도를 가속인자로 하여 시간에 따른 두께 변화를 측정하여 두께 감소율이 90%를 초과하는 시점을 고장시간으로 한다. 고장수명은 온도를 가속인자로 사용하였으므로 와이블 분포에 아레니우스 모델을 적용시킨, 와이블-아레니우스 모델을 적용하여 90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명을 추정한다. 여과수명은 압축 가속 투수성능 시험을 수행하여 시간에 따른 투수계수 변화를 측정한다. 온도를 가속인자로 하여 온도 증가에 따른 두께 감소에 의하여 구멍크기가 줄어들에 따라 여과성능의 가속 저하를 가져온다. 여과 성능저하에 대한 온도와 고장시간의 연관성은 아레니우스 모델을 적용하여 평가한다. 즉, 투수계수가 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 미만인 되는 시간을 예측한 후 고장시간에 와이블-아레니우스

스 모델을 적용시켜, 90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명을 평가한다. 앞의 주요내용을 요약하면 Table 1 과 같다.

4. 토목섬유소재의 신뢰성 평가 사례

현재 토목섬유 중 신뢰성 평가가 가장 활발히 진행되는 분야는 성토보강용 지오그리드로 RS K 0009[3]에 의하면 기존 시간-온도 중첩원리에 의한 가속크리프 시험을 적용한 수명평가법[8]을 소개하려고 한다.

성토보강용 지오그리드의 수명평가를 수행하기 위

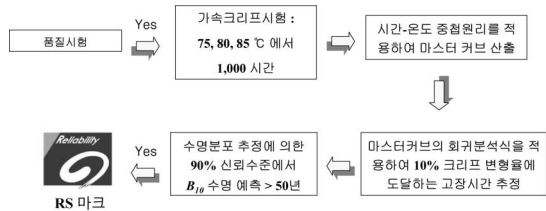


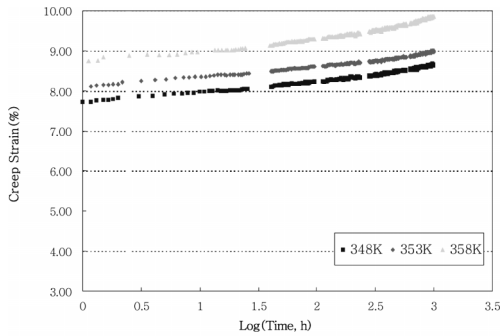
Figure 2. 성토보강용 지오그리드의 수명예측과정.



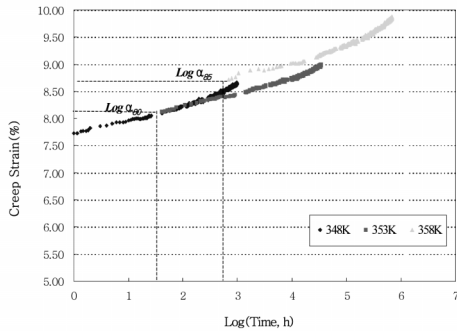
Figure 3. 크리프 시험장비.

Table 1. 토목섬유의 신뢰성 평가 기준 요약

평가항목		신뢰성 평가기준	수명-스트레스 모델 수명분포	고 장
지오텍스타일	여과 성능 수명 시험	90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명 50년 이상	와이블-아레니우스 모델	투수계수 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 미만
	보호 성능 수명 시험	90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명 50년 이상	와이블-아레니우스 모델	두께감소율 90% 초과
지오그리드		90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명 50년 이상	시간-온도 중첩원리 와이블 분포	크리프 변형률 10% 이상
지오멤브레인		90% 신뢰수준에서 B_{10} 수명 50년 이상	와이블-아레니우스 모델	산화유도시간 (OIT) 유지율 10% 미만



(a)



(b)

Figure 4. (a) 로그시간 Vs. 크리프 변형률 (b) WLF 이동인자를 이용한 크리프 커브의 중첩.

해서 우선 품질시험을 만족해야 신뢰성인증을 위한 평가를 실시할 수 있다. 신뢰성인증(RS Mark) 평가 과정은 Figure 2와 같이 진행된다. 폴리에스터 지오그리드의 경우 유리전이온도가 70 °C 내외이므로 시간-온도 중첩원리에 의한 마스터 커브를 얻기 위해 Figure 3과 같이 새로 디자인 된 크리프 시험 장비에서 75 °C를 기준온도로 하여 80 °C, 85 °C에서 1,000시간동안 가속크리프 시험을 실시한 후 시간에 따른 인장변형률을 Figure 4 (a)와 같이 측정한다. 시간-온도 중첩원리를 적용하기 위해 식(2)에 유니버설 상수 $C_1 = 17.44$, $C_2 = 51.6[6]$ 를 대입하여 이동인자를 구한 후 Figure 4(b)와 같이 크리프 커브를 75 °C 커브를 기준으로 이동시켜 중첩시켜 마스터 커브를 얻는다.

Figure 5의 마스터 커브의 회귀분석식을 이용하

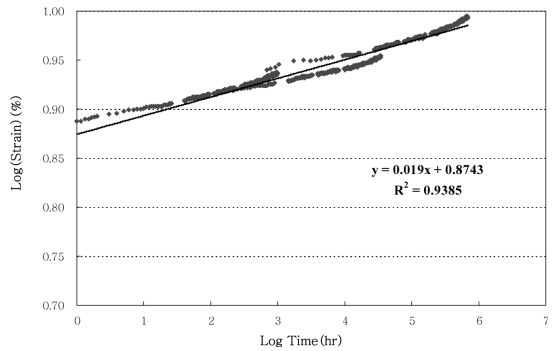


Figure 5. 마스터 커브와 회귀분석식.

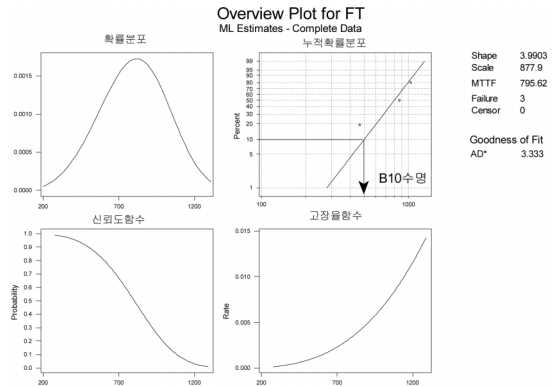


Figure 6. 지오그리드의 수명분포 및 신뢰성 척도.

여 10%의 크리프가 발생하는 고장시간을 계산한다. 시험편 3개를 반복 측정하여 계산한 고장시간의 수명분포를 추정하여, 지오그리드의 신뢰성을 평가하였고, 수명분포를 적용한 신뢰성 평가결과는 Figure 6에 보여준다. 추정된 와이블 분포의 형상모수 3.99와 척도모수 877년을 이용하여 B_{10} 수명을 예측하였다. 이때의 B_{10} 수명은 499년이고, B_{10} 수명의 90% 신뢰구간의 하한선이 316년이므로, 신뢰성 확보 기준시간인 50년을 만족한다. 이와 같이 기존의 TTS를 적용한 수명평가방법으로 지오그리드의 수명예측을 위한 마스터 커브를 산출하는데 걸리는 시간은 3,000시간인데 반하여 새로 개발된 SIM 방법으로 마스터 커브를 산출할 경우 16~32시간 정도가 소요되므로 SIM을 적용한 토목섬유 크리프 수명 산출법[9]에 관한 연구가 활발히 진행 중이다.

5. 토목섬유 신뢰성 평가의 향후 발전 방향

본 고를 통하여 토목섬유 신뢰성 평가방법에 대하여 방법론과 사례를 들어 정리하여 보았다. 이러한 평가기술이 우리나라에서는 최근에 정부주도로 개발된 기술이지만 이미 유럽 등 선진국에서는 이와 같은 수명평가방법들이 활발히 연구되고 있고, 현재 우리나라에서는 요구수명이 최소 50년이나, 유럽이나 미국에선 100년 또는 1,000,000시간(114년)의 수명을 현장에서 요구하고 있다.

향후, 국내에서 토목섬유의 신뢰성 평가 및 향상에 대한 연구와 개발을 지속적으로 수행한다면, 현재 토목섬유에 적용되고 있는 안전율(reduction factor of safety)에 대한 보다 정확한 데이터를 효과적으로 확보할 수 있고, 궁극적으로는 토목섬유 및 토목섬유가 적용되는 토목구조물의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이러한 방법론을 토목섬유 및 토목구조물 설계 및 시공에 적용한다면 그

과급효과가 극대화 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 신뢰성용어 해설서, 산업자원부, 기술표준원, p.10, p.99, 2003.
2. RS K 0008:2002 위생매립장 라이너 시스템용 지오텍스타일.
3. RS K 0009:2003 성토보강용 지오그리드.
4. RS M 0017:2004 위생매립장 라이너 시스템용 지오멤브레인 - 고밀도폴리에틸렌 차수막.
5. R. M. Koener, "Designing with Geosynthetics," 4th Edition., Prentice Hall, New Jersey, 1998.
6. Y. Grace Hsuan, Mengjia Li, Pressure Effects on the Oxidation of High Density Polyethylene, *Proceedings of the 17th GRI Conference*, p.304, 2003.
7. Nelson, Wayne, Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, John Wiley & Sons, NY, USA, p.63, 1990.
8. H. J. Koo and Y. K. Kim, Lifetime Prediction of Geogrids for Reinforcement of Embankments and Slopes, *Polymer Testing*, **24**(2), p.181, 2005.
9. 구현진, 김유겸, 김동환, SIM을 적용한 지오그리드의 수명에 측, *한국섬유공학회 학술발표회 논문집*, **37**(2), 120(2004).

저자 프로필



구 현 진

1989. 인하대학교 섬유공학과 졸업
 1993. North Carolina State University, Textile Technology & Management(M.S.)
 1996. North Carolina State University, Fiber & Polymer Science(Ph.D.)
 1996-1999. North Carolina State University, Dept. of Textile & Apparel Management & Technology, Post-Doctoral Fellow
 2002-현재. FITI 시험연구원 신뢰성평가 센터 선임연구원



김 동 환

1996. 건국대학교 섬유공학과 졸업
 1998. 건국대학교 섬유공학과(석사)
 2005. 건국대학교 섬유공학과(박사)
 1998-현재. FITI 시험연구원 신뢰성평가 센터 선임연구원



박 주 승

1986. 서울대학교 금속공학과 졸업
 1988. 서울대학교 대학원 금속공학과(석사)
 1994. 서울대학교 대학원 금속공학과(박사)
 1995-현재. 산업자원부 기술표준원 기술정보신뢰성과 공업연구관