

## Sherby-Dorm Plots에 의한 지오그리드의 한계크리프변형률 해석 Interpretation of Limit Creep Strain of Geogrids by Sherby-Dorm Plots

전한용<sup>1)</sup>, Han-Yong Jeon, 목문성<sup>2)</sup>, Mun-Sung Mok, 진용범<sup>3)</sup>, Yong-Bum Jin, 임지혜<sup>4)</sup>, Ji-Hye Lim

<sup>1)</sup> 인하대학교 나노시스템공학부 교수, Professor, Division of Nano Systems Eng., Inha University

<sup>2)</sup> 전남대학교 대학원 섬유공학과 공학박사, Ph.D., Dept. of Textile Eng., Chonnam National University Graduate School

<sup>3)</sup> 인하대학교 대학원 섬유공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Textile Eng., Inha University Graduate School

<sup>4)</sup> 인하대학교 대학원 섬유공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Textile Eng., Inha University Graduate School

**SYNOPSIS** : New procedure for evaluation of creep reduction factor using performance limit strain concept was introduced and confirmed through the creep test results. To determine the performance limit strain of the textile geogrid used in this study, the Sherby-Dorm Plots were applied and the results were compared with the results that applied existed limit strain criteria (GRI test method GG-4). The limit creep strain of the geogrid samples that determined by using the Sherby-Dorm Plots were all 11%. This value is more higher than the existed criteria as 10%. From this 11% limit strain the creep reduction factors were calculated at 100,000 hours design. It was resulted in 1.45 for all of the geogrid samples(8t/m, 10t/m). Finally, when it was compared with the creep reduction factors that using 10% criteria, there were some decrease of reduction factor values about 0.06~0.14.

**Key words** : Long-term property, Allowable strength, Creep strain, Limit creep strain, Sherby-Dorm Plots, Isochronous curve

### 1. 서 론

토목구조물 특히 보강구조물에서 보강용도로 적용되는 지오그리드는 최초로 강철보강재를 대신해서 사용되었다. 일반적으로 고분자물질을 이용하여 제조되는 지오그리드의 경우 강철과는 판이한 인장-변형의 거동을 보이게 된다. 그러나 이러한 지오그리드를 이용한 구조물의 설계에서는 기존의 강철보강재를 이용한 설계방법을 대부분 수정 없이 사용하고 있는 것이 현실이다. 지오그리드는 강철보강재와는 달리 점탄성체이기 때문에 인장-변형률의 거동이 점탄성적인 거동을 보이게 된다. 다시 말해, 인장초기에는 응력과 변형률이 서로비례관계인 탄성 거동을 유지하다 항복상태 이후에는 소성거동을 보이게 된다. 따라서 일반적으로 수명이 몇 십 년에서 반영구적인 구조물에서의 지오그리드의 적용 시 단기와 장기의 지오그리드의 인장거동이 달라진다. 그러므로 이러한 장기 인장거동의 명확한 이해를 통한 구조물의 설계의 반영이 반드시 수반되어야 한다. 이러한 지오그리드를 이용한 설계에서는 최초의 최대인장강도에(UTS) 재료의 성능수행 시 사용 수명에 따른 감소인자들을 적용시켜 최종적으로 설계 강도(=설계 시 허용강도)를 산출하여 설계에 반영하는 개념이 도입되고 있다.

현재 세계적으로 널리 이용되고 있는 감소계수의 평가항목으로는 시공 시 손상, 크리프, 화학 및 미생물에 대한 저항성 등이다. 이러한 감소인자들 중 지오그리드의 구조물에서의 장기 인장거동과 밀접한 관계가 있는 항목은 크리프 특성이며 실제로 지오그리드를 이용한 설계 시 가장 중요하게 평가되고 있는 항목이다. 크리프에 의한 감소계수 산출방법은 GRI(geosynthetics research institute)에서 제시한  $T_{LT} = 10\%$ 의 개념을 모든 지오그리드에 공히 적용시키고 있다. 그러나 현재 보강재로 이용되고 있는 지오그리드의 경우에는 매우 다양한 원료와 형태로 제조되고 있기 때문에 모든 지오그리드의 제품의 크리프 감소계수의 평가 시 한계변형률을 10%로 적용하는 것은 다소 광범위한 적용이 된다. 다양한 제조 방법과 원료로 제조된 지오그리드의 경우에는 재료마다 특정 한계변형률을 지니게 마련이며, 따라서 크리프에 의한 감소계수 평가 시 적용되는 지오그리드 자체의 한계 변형률 값을 실험을 통하여 결정하는 것이 바람직하다고 판단되어진다.

따라서 본 연구에서는 현재 국내에서 널리 이용되고 있는 직물형 지오그리드에 대하여 실험을 통하여 한계크리프변형률을 결정하였으며, 이때 이용된 방법이 Sherby-Dorm Plot을 이용한 방법이다. 또한 이렇게 결정된 값을 바탕으로 크리프에 의한 감소계수를 산출하였다. 마지막으로 새롭게 적용된 산출법을 토대로 산출된 감소 계수 값과 기존의 방법( $T_{LT} = 10\%$ )을 이용하여 산출한 값을 서로 비교 검토하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 장기허용강도 결정법

#### 2.1.1 감소계수 적용법

지오그리드를 이용한 설계에서는 앞서 언급한 바와 같이 지오그리드의 index test를 통하여 획득된 최대인장강도의 값이 그대로 적용되는 것이 아니라 적용분야에서 고려되는 인장강도의 감소요인을 고려한 보정계수를 적용하게 된다. 이렇게 적용된 보정계수를 통하여 획득된 값을 장기허용강도라고 하며 설계 시 적용강도라고도 한다. 현재 지오그리드를 이용한 모든 공법의 설계에서 물질계수를 적용하는 방법과 감소계수를 이용하는 방법이 주로 적용되고 있으며, 국내에서는 주로 감소계수를 적용하는 방법을 이용하고 있다. GRI에서 제안된 시험법(GRI test method GG-4 (a), (b))에서는 이러한 감소계수의 산출방법에 대해 기술하고 있다. 지오그리드의 강도감소를 유발할 수 있는 인자의 영향을 고려하여 장기허용강도를 산출하는 방법으로, 이때의 보정계수를 감소계수(reduction factor)라 하며, 고려되는 감소계수의 종류는 적용분야에 의해 좌우되나 지오그리드의 경우 일반적으로 다음과 같은 형태를 취하고 있다.

$$T_{allow} = T_{ult} \left[ \frac{1}{(IRRF)} \right] \tag{1}$$

$$= T_{ult} \left[ \frac{1}{(RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CD} \times RF_{BD} \dots)} \right]$$

여기서,  $T_{ult}$ ; 최대인장강도,  $T_{allow}$ ; 설계 시 허용강도,  $RF_{ID}$ ; 시공 시 손상에 의한 감소계수,  $RF_{CR}$ ; 크리프에 의한 감소계수,  $RF_{CD}$ ; 화학적 분해에 의한 감소계수,  $RF_{BD}$ ; 생물학적 분해에 의한 감소계수

#### 2.1.2 크리프에 의한 감소계수 산출법

지오그리드의 크리프에 의한 감소계수,  $RF_{CR}$ 은 식 (2)와 같은 방법으로 산정된다.

(2)

여기서,  $T_{ST}$ : 단기 인장시험을 통한 최대인장강도(t/m),  $T_{LT}$ : 10년 설계 강도로써 크리프에 의한 변형률이 10%에 접근하는 강도(t/m)

현재 크리프시험에 의한 한계변형률의 기준 값을 모든 지오그리드 제품에 대하여 10%로 GRI test method GG-4에서는 명시하고 있으나, 원료 및 제조방식의 차이에 의한 다양한 지오그리드 제품이 제조되고 있는 현실에서는 이 값은 다분히 유동적인 값으로 판단되어진다.

## 2.2 지오그리드 크리프특성의 기본개념

일반적으로 미 연신 배향된 고분자 재료는 그림 1과 같은 인장-변형률 특성을 보인다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 최초 재료에 응력이 부가됨과 동시에 이에 비례하여 변형이 일어나는 탄성영역을 거친 후 항복점을 지나 응력이 더 이상 증가하지 않아도 변형이 계속 발생하는 변형연화 과정을 거치게 된다. 이 때 재료에 추가 변형이 발생되면 변형과 동시에 재료의 경화가 진행되어 최종적으로 파괴에 이르는 변형경화 이후 파괴의 과정을 거친다. 이 때 그림 1을 통하여 발견할 수 있는 중요한 요점은 재료의 파괴는 응력의 증가에 기인된 것이 아니라 한계변형률 이상으로 변형이 발생되었을 경우에 일어난다는 점이다. 따라서 재료의 인장거동, 특히 장기 인장거동의 평가에서는 정확한 크리프 변형특성의 평가가 매우 중요하다. 또한 고분자 재료는 압출이후 연신 배향 과정을 거침으로써 그림 1에서의 소성영역(plastic region)이 짧아지게 되며, 결과적으로 재료의 파괴 시 변형률이 감소하게 된다. 바꾸어 말하면 파괴 시 변형률이 작을수록 연신에 의한 분자쇄의 배향이 완전배향단계에 근접했음을 알 수 있다. 일반적으로 보강용도로 이용되는 지오그리드의 경우에는 일반적인 고분자 압출재료보다 연신에 의한 배향이 잘 이루어진 재료로써 고 강력 저 신도의 특성을 지니는 것이 일반적이다.

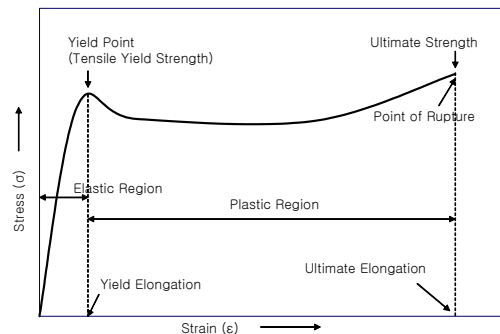


그림 1. 고분자 재료의 일반적인 응력-변형률 곡선

이러한 고분자재료의 일반적인 크리프 변형곡선의 형태는 그림 2와 같다. 크리프(creep)라 함은 재료에 일정한 응력 또는 하중을 부가하였을 때 일정기간동안 재료에서 발생하는 변형량을 측정하는 것을 의미한다. 대부분의 재료의 경우 그림 2와 같은 크리프 변형거동을 보이게 된다.

그림 2에서 보는 바와 같이 크리프 모델은 크게 4 부분의 변형영역과 3 부분의 시간영역으로 나뉘어 지게 된다. 최초 하중부가와 동시에 발생하는 초기변형(initial deformation)부분, 초기에 급격한 변형을 보이다 시간이 경과함에 따라 선형적인 변형거동을 보이는 1차 변형(primary deformation)부분, 선형적인 변형거동을 보이는 2차 변형(secondary deformation) 그리고 최종적으로 재료의 크리프 파괴가 일어나는 부분인 3차 변형(tertiary creep deformation)부분으로 나뉘어 지게 된다. 재료의 적용의 측면에서 본다면 3차 변형이 발생할 경우 더 이상 재료의 성능을 수행할 수 없으므로 일반적으로 2차 변형까

지의 거동한도 내에서 재료를 적용하게 된다.

다시 말하면 재료를 가장 효율적인 이용하기 위해서는 3차 변형이 시작되기 이전까지의 변형이 발생 될까지를 설계에 반영하는 것 이라고 판단된다. 그러므로 일반적인 크리프에 의한 감소계수 산출 시 에 는 재료의 설계수명 한도 안에서 3차 변형이 시작되기 직전의 변형에 이르는 부가응력을 계산하는 것이 일반적이다. 현재 GRI test method GG-4에서는 모든 지오그리드에 대하여 3차 변형이 시작되는 변형 률의 한계점을 10% strain으로 권장하고 있다. 그러나 이러한 통합적인 적용은 앞서 언급한 바와 같이 한계변형률이 달라질 수 있는 재료에 대해서는 매우 비합리적인 적용이 될 것으로 판단되어진다.

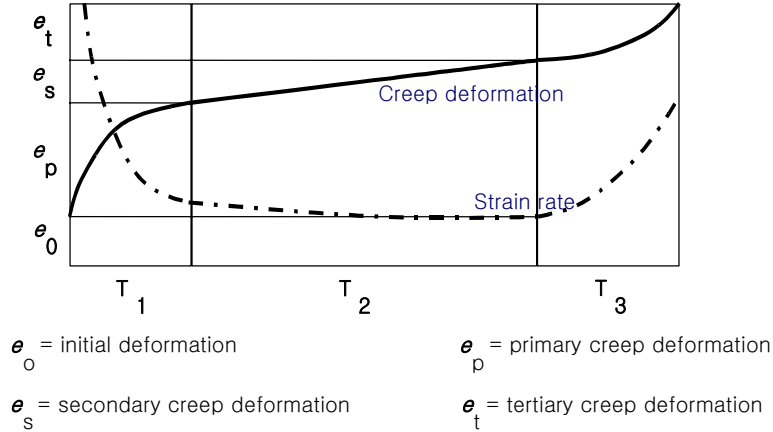


그림 2. 크리프 변형의 일반적인 모델

### 2.3 한계크리프변형률의 결정

실제 지오그리드를 이용한 설계에서는 감소계수의 평가와 허용강도를 산출을 통하여 이루어지게 된다. 이때 정확한 감소계수의 평가가 경제성에 중요한 영향을 미치게 된다. 예를 들면 크리프에 의한 감소계수 산출 시 한계크리프 변형률을 정확하게 결정하지 않을 경우(3차 변형의 시작점이 12%인 재료를 현재의 10%로 적용할 경우), 설계 시 최적 조건의 반영이 이루어지지 않게 되며 그만큼의 경제적 손실을 유발할 수도 있게 된다. 따라서 크리프에 의한 감소계수의 평가 시에는 재료 자체별의 정확한 한계 크리프변형률의 결정이 매우 중요하고 이는 매우 시급한 상황이다. 한계크리프 변형의 결정은 그림 2를 통하여 이루어 질 수 있다. 일반적으로 크리프 변형의 곡선을 통하여 2차 변형에서 3차 변형으로 바뀌는 지점을 정확하게 결정하기가 매우 힘든 상황이다. 이러한 경우에는 이러한 전환점의 평가를 위해서 변형률 속도 곡선이 이용된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 2차 변형에서 3차 변형으로 전환되는 지점에서는( $T_2 \rightarrow T_3$ ) 변형률 속도 곡선에서의 기울기의 변화가 발생됨을 쉽게 관찰할 수 있게 된다. 결과적으로 한계크리프변형률의 결정을 위해서는 변형률속도 곡선이 이용되며, 이러한 개념을 바탕으로 획득된 변형률 속도와 변형률의 관계를 나타내는 sherry-dorm plots을 주로 이용하게 된다(그림 3). 그림 3에서 보는 바와 같이 2차 변형에서 3차 변형으로 전환되는 지점은 P5곡선에서 나타나게 되면 이때의 특정 변형률(strain)이 한계크리프변형률로 결정됨이 매우 타당하다. 실제로 각각의 지오그리드 제품은 이 한계크리프변형률이 매우 다양하며 재료마다의 결정이 합리적이 판단된다.

### 2.4 크리프에 의한 감소계수법에 대한 새로운 제안

앞서 언급한 바와 같이 현재의 크리프에 의한 감소계수의 산출에서는 한계변형률을 GRI test method에서 제시한 10%로 보고 일정 설계기간동안 이 한계변형률에 근접하거나 평행을 이루는 부가하중을  $T_{LT}$ 로

결정하여 최종적으로 감소계수를 산출하였다. 본 연구에서는 보다 합리적인 감소계수 산출을 위하여 sherby-dorm plots을 도입하여 한계크리프변형률을 결정한 후 최종적으로 isochronous 그래프를 통한 선형회귀 그래프를 이용하여  $T_{LT}$ 를 결정하는 모델을 제안하였으며, 대략적인 순서는 그림 4와 같다.

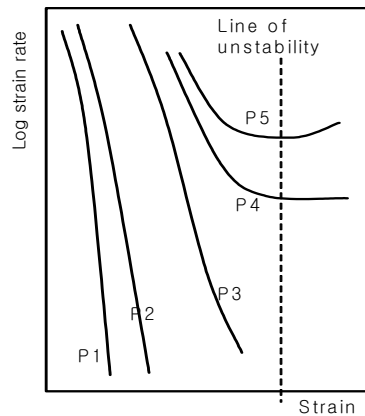


그림 3. 한계크리프 변형률을 결정하기 위해 이용되는 Sherby-Dorm Plots

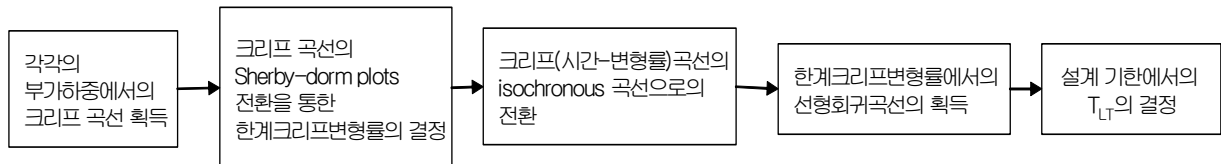


그림 4. 제안된 크리프 감소계수 산출방법

### 3. 지오그리드의 크리프 특성 평가

본 연구에서는 다양한 형태의 지오그리드 중에서 국내에서의 사용량이 가장 많은 직조형 지오그리드에 대한 단기와 장기 인장거동평가를 실시하였다. 사용된 시료는 8, 10t/m의 직조형 지오그리드이며, 일 방향 보강에 이용되는 제품이다. 크리프 시험 시 부가하중 결정에 필요한 단기인장강도 측정을 위하여 광폭인장강도시험(wide-width strip tensile strength test)을 실시하였다. 광폭인장강도 시험은 ASTM D4595에 규격화 되어 있으며, 표준시험방법은 변형제어식(CRE; constant rate extension type) 인장시험기의 상하부에 붙어있는 클램프 사이의 거리를  $10 \pm 0.3$ cm로 조절하고, 폭 20cm의 지오그리드 시료를 장착하고, 시료가 파단 될 때까지  $10 \pm 3\%$ /min의 속도로 인장하여 인장변형에 따른 인장강력을 측정하게 된다. 크리프 변형시험(unconfined tension creep)은 ASTM D6992(standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method)에 의거하여 실시하였다. 이때 부가되는 하중은 광폭인장강도를 통하여 획득된 최대인장강도의 30, 40, 50, 60, 70, 80%이며, 단계별 온도조건은 20, 34, 48, 62, 76℃이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 단기인장특성

그림 5에서는 2종류의 지오그리드 샘플에 대한 광폭인장강도 시험결과를 그래프로 나타내고 있다. 그

림에서 알 수 있듯이 각각의 지오그리드 샘플은 최초의 제품강력 이상의 인장강력을 유지하고 있으며, 이로부터 추가 안전율의 개념이 제품의 제조단계에서부터 내포되어있음을 유추할 수 있다. 또한 샘플의 파단강력에서의 인장변형률이 약 11~12%를 나타내고 있어, 단기인장시험의 결과만을 고려할 경우 상당히 우수한 인장특성을 보유하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 지오그리드의 보강부재로 이용되고 있는 PET 고강력사의 제품 자체특성이 매우 우수함에서 기인된 것으로 판단된다.

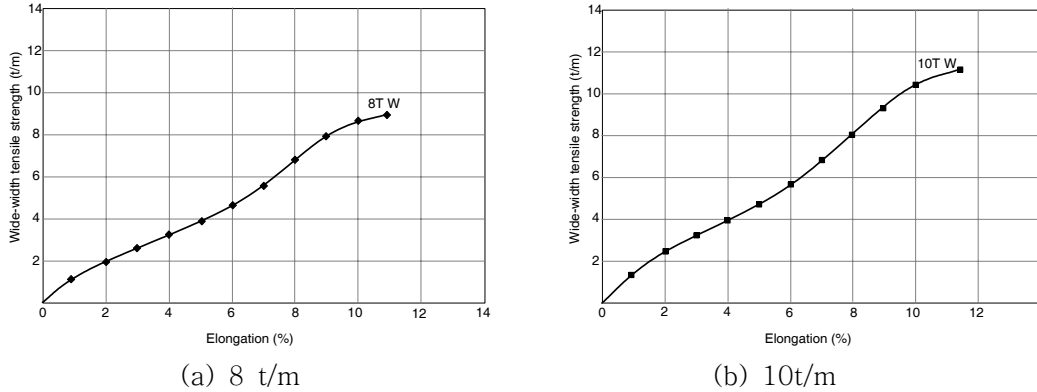


그림 5. 지오그리드의 단기 광폭인장특성

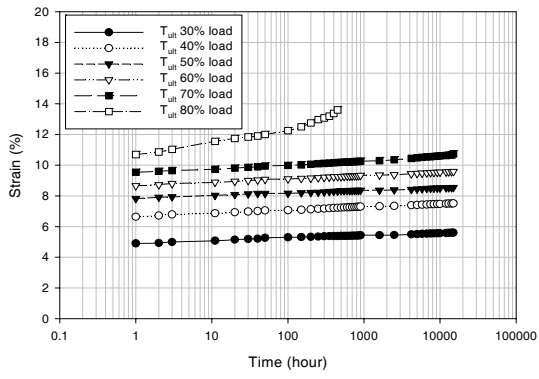
## 4.2 장기크리프 변형거동

각각의 지오그리드 샘플에 대한 단기속성크리프시험에 의한 장기크리프거동 그래프가 그림 6에 나타나 있다. ASTM D5262에서는 부가하중의 최대범위를 60%로 규정하고 있지만 본 연구에서는 80%까지의 부가하중을 시료에 적용하여 크리프결과를 얻어내었다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 각각의 샘플 모두 10,000 시간에서 10%이하의 변형률을 보이고 있어 우수한 장기인장특성을 지니고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 부가하중 70%에서도 재료의 파괴가 일어나지 않음을 확인할 수 있으며 이로부터 본 연구에서 이용된 지오그리드의 경우에는 한계크리프변형률이 10%를 초과할 것으로 판단되어진다.

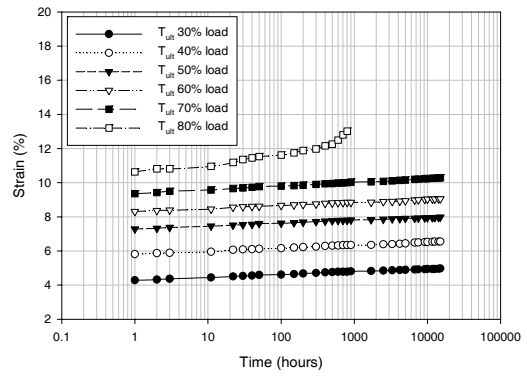
## 4.3 한계크리프변형률의 결정 및 $T_{LT}$ 의 산출

본 연구에서는 한계크리프변형률을 결정하기 위하여 단기속성시험을 통하여 얻어진 크리프시험결과그래프를 이용하여 sherby-dorm plots을 획득할 수 있었으며, 그 결과를 그림 7에서 나타내고 있다.

그림 7에서 보는바와 같이 8t/m와 10t/m의 경우 모두에서 비슷하게 약 12% 부근에서 변형률속도가 변하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 본 연구에서 이용된 직물형 지오그리드의 경우에는 한계크리프 변형률이 불확실성을 고려하여 11%로 결정되었으며 이 값은 기준값으로 사용되어온 10%와 1%정도의 차이를 나타내고 있다. 이렇게 결정된 한계크리프변형률값을 토대로 최초의 크리프결과는 isochronous curves를 거쳐 최종적으로 한계크리프변형률에서의 선형회귀곡선으로 변화되었으며(그림 8), 이 후 각각의 지오그리드 샘플에 대하여 설계수명 100,000시간에서의  $T_{LT}$ 를 산출하였으며 그 결과를 그림 9에서 나타내고 있다. 본 연구에서 산출된  $T_{LT}$ 의 경우 한계크리프변형률기준을 10%로 하느냐 11%로 하느냐에 따라 최종적으로 크리프감소계수값이 차이를 보였다. 먼저 8t/m의 경우 10%로 할 경우는 1.59, 11%로 할 경우 1.45의 감소계수값을 나타내었으며, 10t/m의 경우 기준을 10%로 할 경우와 11%로 할 경우에 각각 1.51, 1.45의 값을 나타내었다. 이로부터 두 샘플 모두에서 최종적으로 감소계수 값이 최초의 값보다 0.06~0.14 정도 낮추어 졌음을 확인할 수 있었으며 결과적으로 정확한 감소계수의 평가로 인한 경제적 이득이 발생될 것으로 판단되어진다.

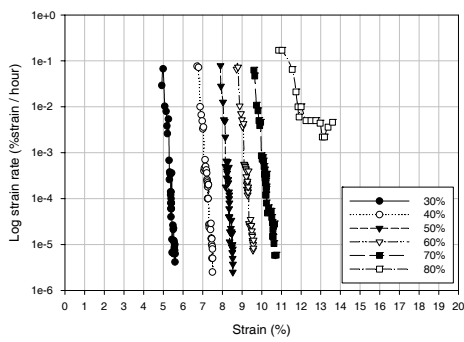


(a) 8 t/m

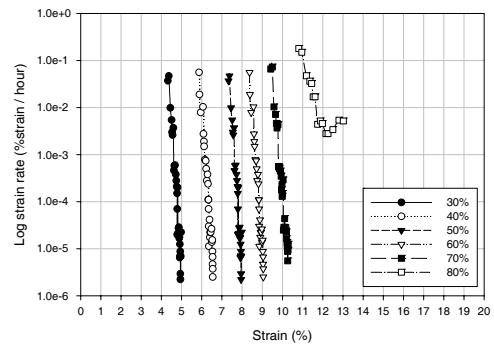


(b) 10 t/m

그림 6. 지오그리드의 단기속성 크리프 변형거동

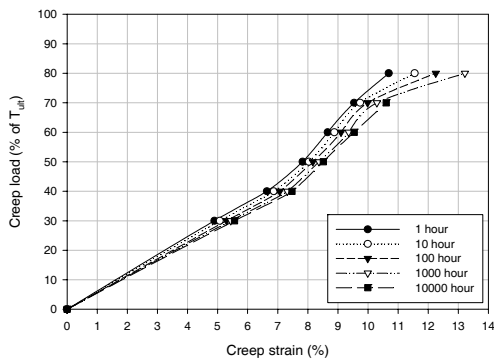


(a) 8 t/m

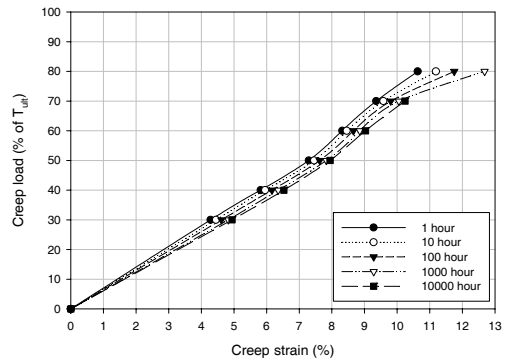


(b) 10 t/m

그림 7. Sherby-Dorm Plots을 이용한 한계 크리프 변형률



(a) 8 t/m



(b) 10 t/m

그림 8. Isochronous curves of creep deformation

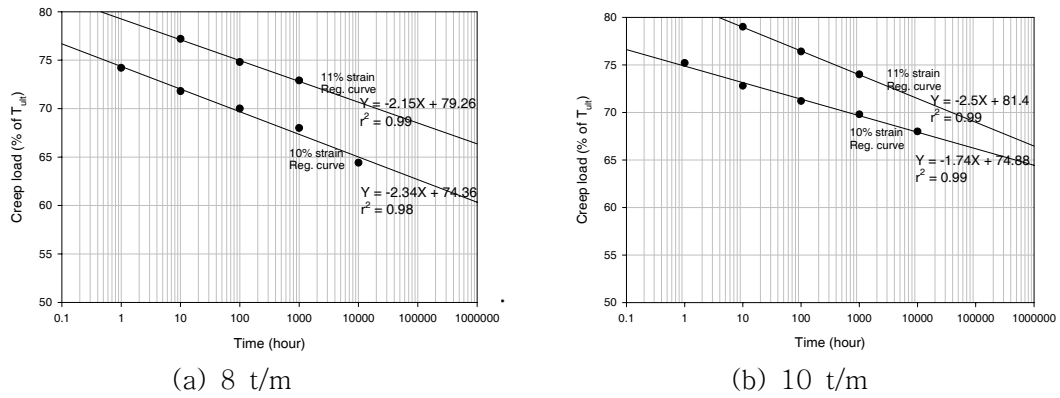


그림 9. 한계크리프변형률에서의 선형회귀곡선

## 5. 결 론

본 연구에서는 보강용도로의 목적으로 적용되고 있는 지오그리드에 대하여 내구성 장기 설계 강도 산출 시 가장 중요한 항목인 크리프시험을 통한 감소계수의 평가를 실시하였다. 대략적인 연구결론은 다음과 같다.

- (1) 광폭인장강도시험결과 각각의 샘플은 제품강력을 상회하는 강력을 유지하고 있어 재료 자체에 추가 안전율이 내포되었음을 확인할 수 있었다. 또한 재료의 파단 시 변형률이 11~12%를 나타내고 있어 매우 우수한 인장-변형특성을 보유하고 있음을 예측할 수 있었다.
- (2) 단기속성시험을 통한 장기크리프거동평가결과 각각의 샘플 모두 부가하중이 60%인 경우 10,000시간에서 크리프변형률이 10%를 초과하지 않는 우수한 장기인장특성을 지니고 있음을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서 제안된 Sherby-Dorm Plots을 이용한 한계크리프변형률의 평가결과 불확실성을 감안하여 두 샘플모두 11%로 결정되었으며, 이 값은 현재 기준 값으로 사용되고 있는 10% 보다 약간 높은 값을 확인하였다.
- (4) 결정된 한계크리프변형률을 토대로 산출된 크리프에 의한 감소계수의 결과 값은 기존의 10% 규준을 적용 했을 때와 비교하여 0.06~0.14정도 낮아졌으며, 이 값을 설계에 적용할 경우 재료의 정확한 적용이 가능해지며 최종적으로 합리적인 설계로 인한 경제적 이득이 과생될 것으로 판단되어진다.

## 참고문헌

1. J. S. Thornton(1999), "The Relationship of Creep Curves to Rapid Loading Stress-Strain Curves for Polyester Geogrids", *Proc. of Geosynthetics '99*, pp.735-744.
2. M. Koutsourais(1995), "Correlation the Creep-Strain Component of the Total Strain as a Function of Load-Level for High-Tenacity Polyester Yarns Geogrids and Geotextiles", *Proc. of Geosynthetics '95*, pp.989-1002.
3. P. Orsat(1998), "Study on Creep-Rupture of Polyester Tendons : Full Sacle Tests", *Proc. of 6th International Conference on Geosynthetics*, pp.675-678.
4. T. L. Baker(2001), "Comparison of Results Using the Stepped Isothermal and Conventional Creep Tests on a Woven Polypropylene Geotextile", *Proc. of Geosynthetics Conference 2001*, pp.729-740.