

## 지오신세틱스 전단거동의 해석학적 고찰

### Interpretational Consideration of Geosynthetic Shear Behaviors

전한용<sup>1)</sup>, Han-Yong Jeon, 김초롱<sup>2)</sup>, Cho Rong Kim

<sup>1)</sup> 인하대학교 나노시스템공학부 교수, Professor, Div. of Nano-Systems Engineering, Inha University

<sup>2)</sup> 한국생산기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

**SYNOPSIS** : 2 types of geogrids and geotextiles was used to evaluate shear behaviors after installation damage test. Shear behaviors were compared after installation damage test and coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) was estimated by theoretical shear analysis. Shear strength of damaged geogrid decreased under high normal stress of 150kPa and shear strength of geotextile decreased with increasing normal stress. It is seen that  $f_{ds}$  values after installation damage decreased than before installation damage through comparison calculated  $f_{ds}$  by direct theoretical shear analysis.  $f_{ds}$  values to be calculated by theoretical shear analysis were changed with before and after installation damage.

**Keywords** : shear behaviors, installation damage, coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ), shear strength, normal stress, theoretical shear analysis

## 1. 서 론

현장에서 사용하는 지오그리드의 경우, 시공 시 손상의 발생은 불가피한 실정이다. 우선, 지오그리드가 다짐작업을 동반하는 흙 구조물에 적용되면 다짐에 의한 손상이 유발될 수 있고 시공 시 장비에 의한 손상 발생 또한 가능하기 때문이다. 시공 시 다짐에 의한 손상과 장비에 의한 손상은 변화된 성질 변화를 초래하기 때문에 따라서 적절한 시공 시 손상 평가 방법을 바탕으로 변화된 장·단기 거동 특성 변화의 예측이 가장 중요하며 이를 바탕으로 설계할 경우 절적인 반영이 필요하다. 또한 지오그리드를 현장에서 시공 시 발생하는 손상에 따라 변화된 강도 감소에 관한 설계 모델은 제시되었지만 시공 시 발생하는 손상에 따라 변화된 마찰 특성 중 전단 거동의 변화에 대한 명확한 모델은 제시되지 않았다. 특히 사면보강에서 전단 특성은 토목구조물의 장기적 성능을 결정하는 중요한 인자이기 때문에 시공 시 다짐 작업과 장비에 의한 손상을 고려하여 성능 변화를 예측한 설계 모델을 제시해야 한다. 그러므로 현장 시공 시 불가피하게 발생하는 지오그리드의 손상을 고려한 시공 전 설계 과정에서 이를 감안하여 현장에 적합한 설계 모델의 결정이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 내시공성 실험 후 중형직접전단시험기를 이용하여 측정된 토목합성재료의 전단거동 결과를 바탕으로 손상에 의한 전단 거동을 해석하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 시료의 준비

본 실험에서 사용된 지오그리드는 직포형으로 사용하였으며, 각각 6T GG, 8T GG로 표시하였다. 지오그리드의 원사는 폴리에스테르이며 코팅재료는 PVC로 Table 1에 그 규격을 나타내었다. 지오텍스타일

은 직포형과 부직포형으로 각각 폴리에스테르와 PET 재생사를 원료로 사용하였으며, Woven GT, Nonwoven GT로 각각 표시하여 Table 2에 그 규격을 나타내었다.

Table 1. Specifications of geogrids.

Material	Thickness (mm)		Aperture size (mm)	Design strength (ton/m)
	Warp	Weft		
6T GG	0.8	1.9	24.0×24.6	6
8T GG	1.3	2.3	25.0×2.3	8

Table 2. Specifications of geotextiles.

Material	Thickness (mm)	Area weight (g/m <sup>2</sup> )	$\tau_{ult}^*$ (kgf)
Woven GT	0.70	480	859.24
Nonwoven GT	1.51	204	29.20

\* $\tau_{ult}$  : Ultimate tensile strength Table 1 shows the specifications of HDPE GMs used in this study.

## 2.2 내시공성 시험

내시공성 시험에 사용된 채움재는 실제 현장에서 채취한 흙으로써, 내시공성 시험을 통한 손상을 극대화하기 위해 입경이 5mm 이상인 입자로 이루어진 흙을 사용하였다. 채움재에 사용된 흙은 통일분류법상 GW(입도분포가 양호한 자갈)로 분류할 수 있다. 한편, ISO 10722에 의거하여 내시공성 시험을 실시하였다. 내시공성 시험기의 다짐상자에 토목합성재료를 포설한 후 채움재를 넣고 다짐장비에 의한 다짐 후, 진동 다짐기를 사용하여 진동수 1Hz로 5±5kPa ~ 900±10kPa의 조건으로 200회 다짐작업을 하였다.

## 2.3 직접전단시험

직접전단시험에 사용된 채움재는 실제 현장의 흙으로써, Figure 1에 채움재의 입도분포를 나타내었다. 채움재에 사용된 흙은 통일분류법상 SW(입도분포가 양호한 모래)로 분류할 수 있다. ASTM D5321-08(Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method)에 의거, 중형직접전단시험장치를 사용하여 각 계면에서의 직접전단강도를 측정하였다.

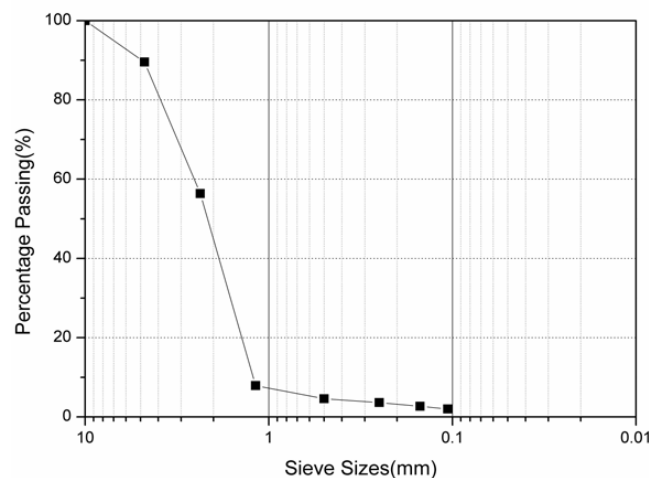


Figure 1. Grain size distribution of test soils.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 내시공성 시험 전후의 전단거동

지오그리드와 지오텍스타일의 내시공성 시험 전 후 전단거동을 각각 다른 수직하중에 따라 비교한 그래프를 Figure 2~5에 각각 나타내었다. Figure 2는 50kPa의 수직응력에서 지오그리드의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하여 나타내었다. peak 강도와 peak 강도가 나타나기 전까지 변위 내의 전단거동은 흡사했으나 post-peak 강도의 거동에서는 차이를 보였다. 내시공성 시험 전 지오그리드는 post-peak 강도는 감소 후 비교적 일정하게 유지되고 있지만 내시공성 시험 후 지오그리드는 증가하는 거동을 보이고 있다. Figure 3은 50kPa의 수직응력에서 지오텍스타일의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하여 나타내었다. peak 강도가 나타나기 전까지 변위 내의 전단거동은 흡사하나 peak 강도는 내시공성 시험 전에 비하여 시험 후에 다소 높게 나타났다. 또한, 내시공성 시험 전 지오텍스타일은 30mm이내의 전단변위에서 peak 강도를 보였으며 post-peak 강도는 감소 후 일정하게 유지되었지만, 내시공성 시험 후 post-peak 강도 거동은 상이하였다. Nonwoven GT인 경우 post-peak 강도는 점차 증가하는 거동을 보였지만, Woven GT인 경우 post-peak 강도는 점차 감소하는 거동을 보였다

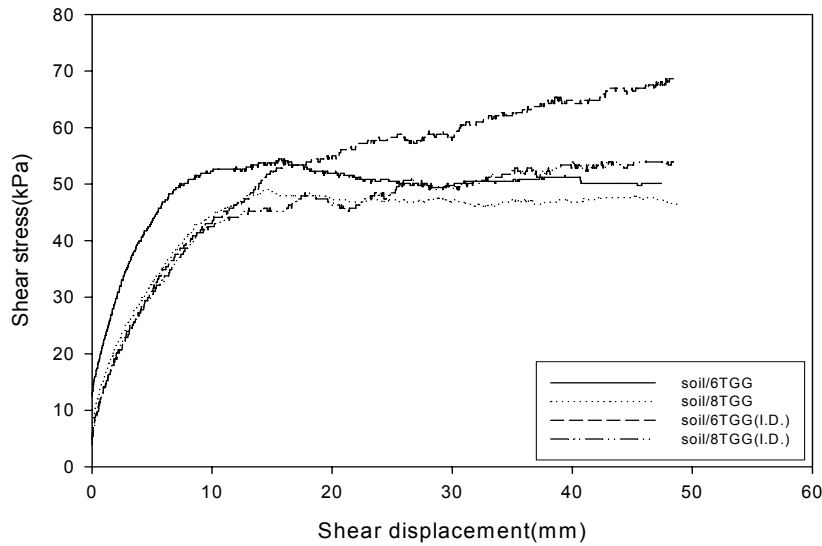


Figure 2. Stress-strain behavior of soil/geogrids interfaces under a normal loading of 50kPa.

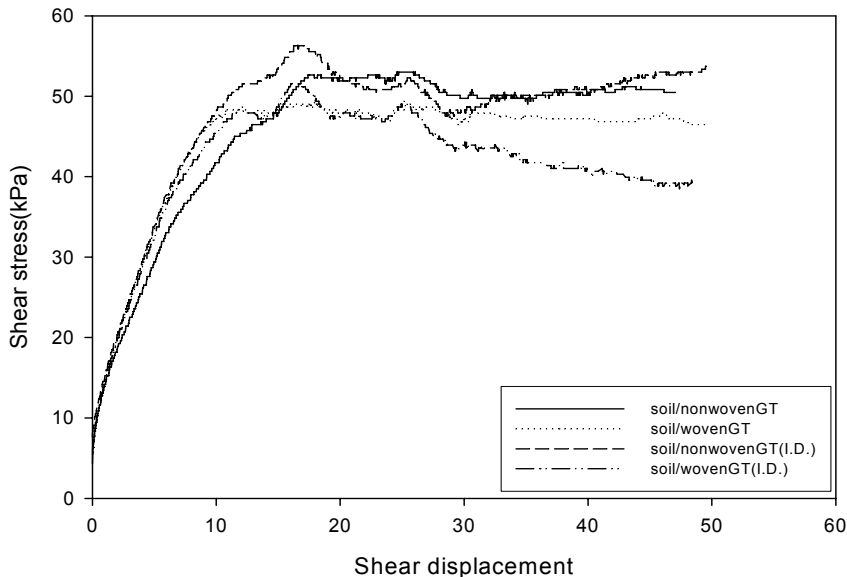


Figure 3. Stress-strain behavior of soil/geotextiles interfaces under a normal loading of 50kPa.

Figure 4는 100kPa의 수직응력에서 지오그리드의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하였으며,

50kPa의 수직응력에서 비교한 전단거동그래프에 비하여 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 앞서 50kPa의 수직응력에서의 전단거동과 유사하게 내시공성 시험 전 지오그리드는 peak 강도 이후 일정하게 유지되는 post-peak 강도의 거동을 보였지만 내시공성 시험 후 지오그리드는 post-peak 강도의 거동이 점차 증가하는 것을 분명하게 확인할 수 있다. Figure 5는 100kPa의 수직응력에서 지오텍스타일의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하여 나타내었다. 내시공성 시험 전에 비하여 peak 강도는 감소하였고 post-peak 강도의 거동은 Nonwoven GT일 경우 peak 강도 이후 일정하게 유지되었지만 Woven GT는 점차 감소하는 거동을 보이고 있다.

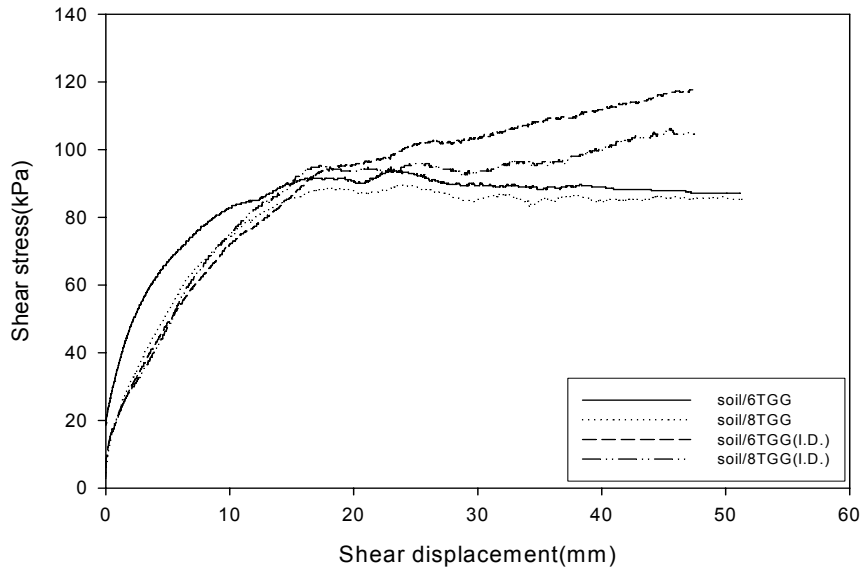


Figure 4. Stress-strain behavior of soil/geogrids interfaces under a normal loading of 100kPa.

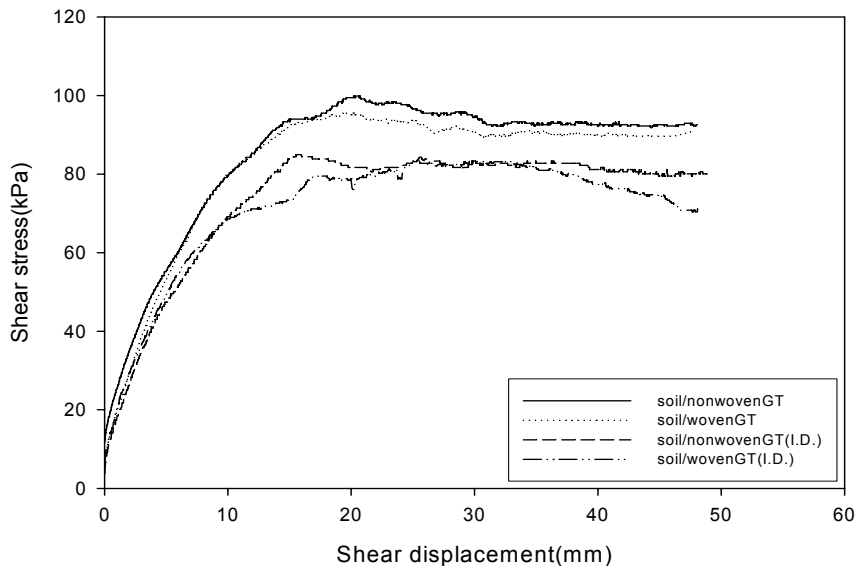


Figure 5. Stress-strain behavior of soil/geotextiles interfaces under a normal loading of 100kPa.

Figure 6은 150kPa의 수직응력에서 지오그리드의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하여 나타내었다. 내시공성 시험 전에 비하여 peak 강도는 증가하였고 post-peak 강도의 거동은 점차 증가하는 현상을 보이고 있다. peak 강도가 나타나기 이전 전단변위 내에서 전단강도 증가 역시 내시공성 시험 이

전에 비하여 급격히 증가하는 현상을 나타내고 있다.

Figure 7은 150kPa의 수직응력에서 지오텍스타일의 내시공성 시험 전 후의 전단거동을 비교하여 나타내었다. 100kPa의 수직응력에 따른 전단거동결과와 마찬가지로 내시공성 시험 전에 비하여 peak 강도는 감소하였지만, post-peak 강도의 거동은 점차 감소함을 알 수 있었다.

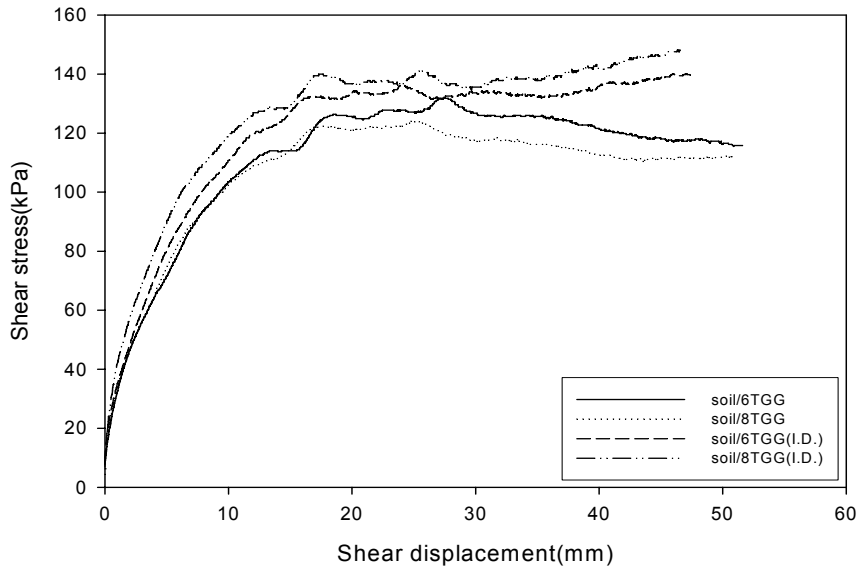


Figure 6. Stress-strain behavior of soil/geogrids interfaces under a normal loading of 150kPa.

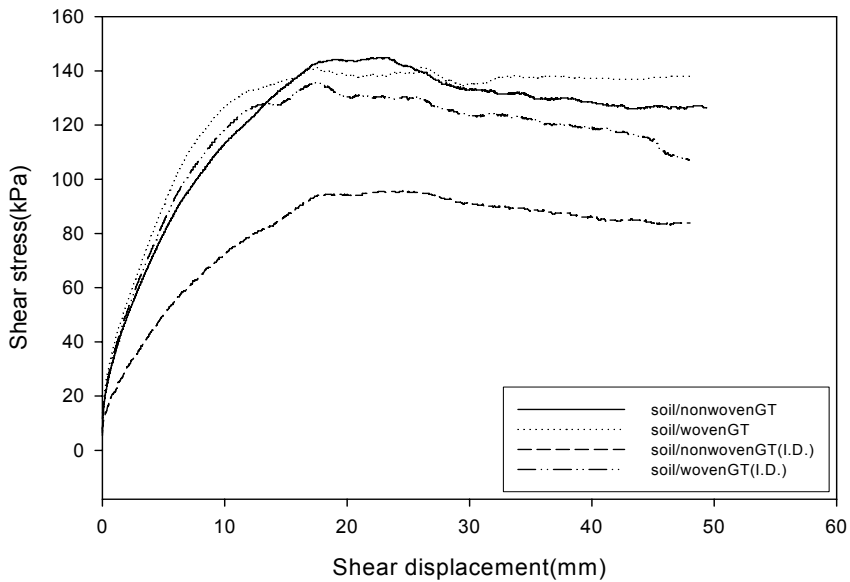


Figure 7. Stress-strain behavior of soil/geotextiles interfaces under a normal loading of 150kPa.

### 3.2 직접전단거동의 해석학적 고찰

#### 3.2.1 이론적 배경

Jewell 외 3인(1984)은 토목합성재료와 흙, 토목합성재료/토목합성재료 사이 접촉면에 대한 연구를 발표

하였는데 각각 계면간의 마찰저항력에 대하여 다음 식 (1)과 같이 제안하였다

$$f_{ds} \tan \Phi_{ds} = a_{ds} \tan \delta + (1 - a_{ds}) \tan \Phi_{ds} \quad (1)$$

여기서,  $f_{ds}$  : 흙/토목합성재료의 마찰저항력,  $\phi_{ds}$  : 직접전단시험으로부터 얻어지는 흙의 내부마찰각,  $\delta$  : 흙/토목합성재료 사이의 마찰각,  $a_{ds}$  : 토목구조물의 단위폭당 토목합성재료의 포성비율이다.  $a_{ds}$ 가 0이면 흙과 흙 사이의 전단을 의미하고,  $a_{ds}$ 가 1이면 흙과 토목합성재료의 전단을 의미한다. 이때 흙과 흙 사이의 마찰저항이 흙과 토목합성재료의 마찰저항보다 항상 크며,  $a_{ds}$ 가 클수록 토목합성재료의 마찰저항은 작아진다.  $f_{ds}$ 는 식 (1)을 재정리하여 다음으로 나타낼 수 있다.

$$f_{ds} = 1 - a_{ds} \left( 1 - \frac{\tan \delta}{\tan \Phi_{ds}} \right) \quad (2)$$

Jewell 외 3인(1984)에 의해 제시된 모델은 실험 데이터에 맞는 분석을 통한 기초로 이용하였다. 첫 번째, 흙/토목합성재료 접촉면에 대한 이론적인  $f_{ds}$  값을 식 (2)을 (3)으로 변형하였다.

$$f_{ds} = 1 - a_{ds} \left( 1 - \frac{\tau_{soil/plane\ reinforcement}}{\tau_{soil}} \right) \quad (3)$$

식(2)를 변형한 식(3)에서,  $\tau_{soil}$  : 흙 내부 시험을 통해 얻어진 흙의 내부 전단강도,  $\tau_{soil/plane\ reinforcement}$  : 흙/토목합성재료간의 전단 강도로 시험을 통한 직접적인 결과를 반영하였다.

$a_{ds}$ 는 내시공성 시험 전과 후에 변형하여 해석하였다. 내시공성 시험 후, 전과 비교하여 발생한 손상에 따른 표면변화에서 흙과 접촉하는 면적이 증가하는 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 임의로 내시공성 시험 전 시료에  $a_{ds}$ 값을 1로 설정하고 내시공성 시험 후에는 내시공성 시험 전의  $a_{ds}$ 값에 토목합성재료 면적의 10% 감소를 반영한 결과로  $a_{ds}$ 값을 0.9로 예측하여 계산하였다.

### 3.2.2 내시공성 시험전

Jewell 외 3인(1984) 이론 모델을 바탕으로 마찰저항력( $f_{ds}$ )을 계산하였다. Table 3에 내시공성 시험 전 지오그리드의  $f_{ds}$ 을, Table 4에 지오텍스타일의  $f_{ds}$ 을 나타냈으며, Figure 8에 계산한  $f_{ds}$ 에 대한 분포를 나타내었다. Table 3과 4에 나타난 결과로는 수직응력의 증가에 따른 마찰저항력( $f_{ds}$ )의 변화에 대한 영향은 크지 않은 걸로 판단할 수 있다. 지오그리드의 경우, 수직응력이 50kPa일 때 보다 150kPa일 경우  $f_{ds}$ 값이 더 작게 나온 것을 볼 수 있다. 또한, 설계강도와 무관하게 작용한다는 것을 알 수 있다. 한편, 지오텍스타일의 경우, Woven GT 보다 Nonwoven GT의  $f_{ds}$ 값이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

Table 3. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) of soil/geogrid interfaces under different loadings.

Normal loading	$f_{ds}$	
	6T GG	8T GG
50kPa	1.079	0.971
100kPa	1.036	0.984
150kPa	0.981	0.924

Table 4 Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) of soil/geotextile interfaces under different loadings.

Normal loading	$f_{ds}$	
	Woven GT	Nonwoven GT
50kPa	0.971	1.050
100kPa	1.015	1.100
150kPa	1.051	1.078

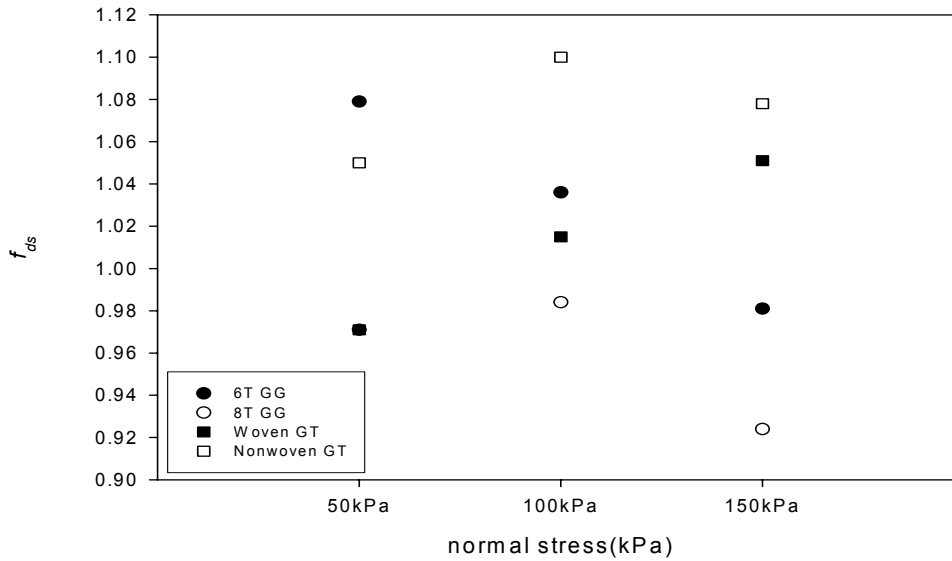


Figure 8. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) for different interfaces under different loadings.

### 3.2.3 내시공성 시험후

시료에 내시공성 시험 후 제시된 이론을 바탕으로 마찰저항력( $f_{ds}$ )을 계산하였다. Table 5에 내시공성 시험 전 지오그리드의  $f_{ds}$ 을, Table 6에 지오택스타일의  $f_{ds}$ 을 나타냈으며, Figure 9에 계산한  $f_{ds}$ 에 대한 분포와 Figure 26에 내시공성 시험 전과 후를 비교한 분포를 나타내었다.

Table 5와 6에 나타난 결과는 앞서 내시공성 시험 전 결과와 마찬가지로 수직응력의 증가에 따른 마찰저항력( $f_{ds}$ )의 변화에 대한 영향은 크지 않은 걸로 판단할 수 있다. 지오그리드의 경우, 앞서 결과에 언급했듯이 설계강도와는 무관하게 작용하였다. 하지만, 앞서 결과에서는 두 지오그리트 모두 수직응력이 50kPa 일 때 보다 150kPa 일 경우  $f_{ds}$ 값이 더 작았지만 8T GG의 경우 50kPa 보다 150kPa의 경우 더 큰 값을 가진다. 한편, 지오택스타일의 경우, 앞의 결과와 차이가 있음을 나타내었다. Nonwoven GT의 경우, 수직응력이 증가할수록 급격히  $f_{ds}$ 값이 감소하였고 Woven GT 또한 내시공성 시험 전에는  $f_{ds}$ 값이 증가하였으나, 내시공성 시험 후에는  $f_{ds}$ 값이 점차 감소함을 확인 할 수 있었다.

Figure 10에 내시공성 시험 전과 후를 비교한 분포를 살펴보면 우선, 각각의 수직응력에서 Nonwoven GT의  $f_{ds}$ 값이 커짐을 알 수 있었다. 또한, 대부분의 결과를 비교해 볼 때, 내시공성을 가하기 전  $f_{ds}$ 값이 비교적 큰 값을 가짐을 확인할 수 있었고 이 중 가장 낮은  $f_{ds}$ 값은 내시공성 시험 후의 Nonwoven GT로 내시공성 시험 전과 비교해볼 때 확연히 감소한  $f_{ds}$ 값이 뚜렷하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 5. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) of soil/installed geogrid interfaces under different loadings.

Normal loading	$f_{ds}$	
	6T GG	8T GG
50kPa	1.062	0.964
100kPa	1.029	1.045
150kPa	1.012	1.038

Table 6. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) of soil/installed geotextile interfaces under different loadings.

Normal loading	$f_{ds}$	
	Woven GT	Nonwoven GT
50kPa	1.013	1.104
100kPa	0.935	0.942
150kPa	1.007	0.740

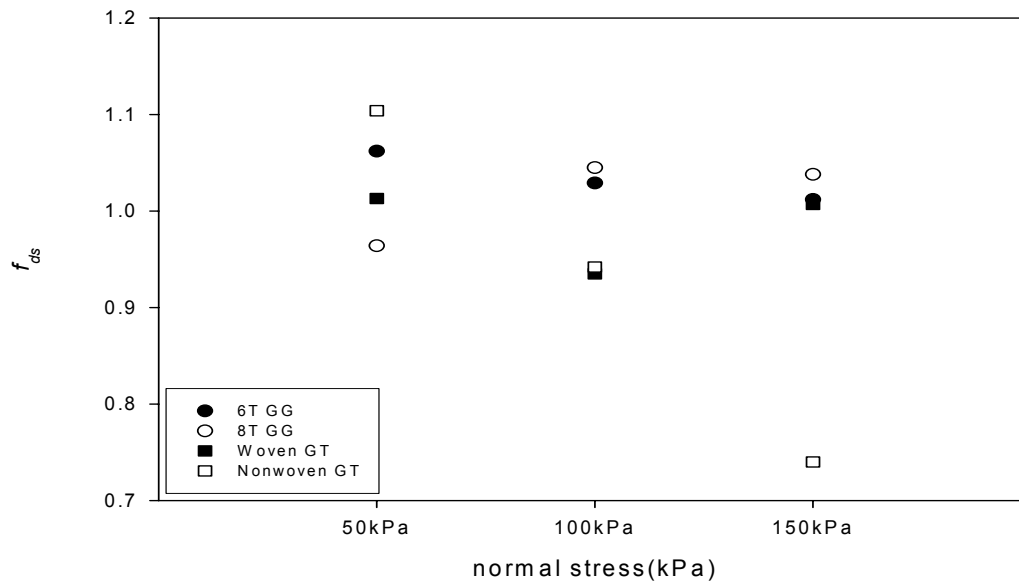


Figure 9. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) for different interfaces under different loadings.



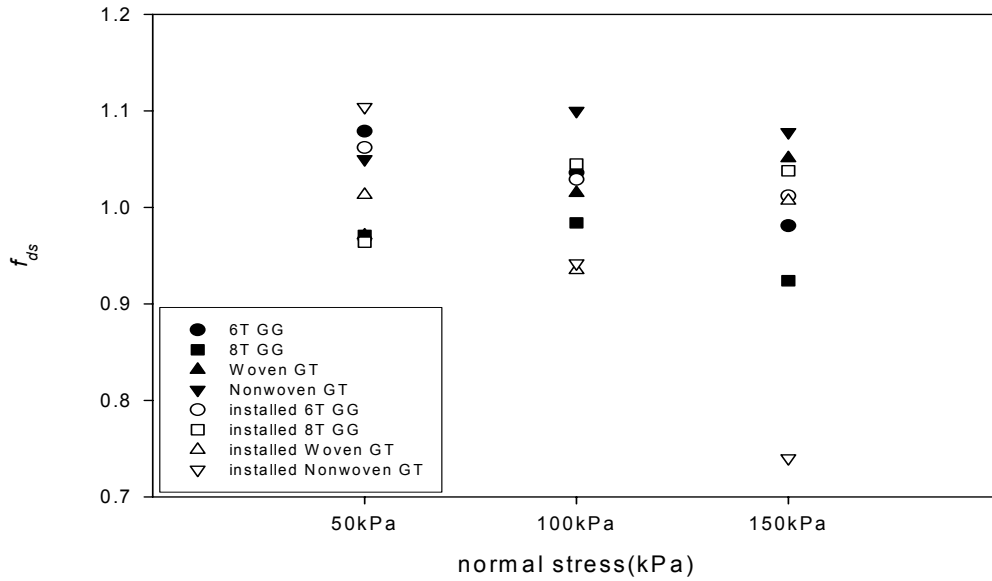


Figure 10. Coefficient of resistance to direct sliding( $f_{ds}$ ) for different interfaces.

#### 4. 결론

내시공성 시험을 통해 토목합성재료의 전단거동을 측정된 결과 시료의 종류에 따라 다양한 결과를 나타내었다. 지오그리드의 내시공성 시험 전과 후의 경우 50,100kPa의 수직응력에서는 전단강도의 차이가 보이지 않았지만, 150kPa의 수직응력과 같은 큰 수직응력에서는 감소하는 차이를 보였다. 지오그리드의 내시공성 시험 시료의 post-peak 강도 거동은 내시공성 시험을 가하기 전과 비교하여 점점 증가하는 경향을 보였다. 지오텍스타일의 내시공성 시험 전과 후를 비교해 본 결과, 수직응력이 증가할수록 강도의 감소차이가 더욱 뚜렷하게 발생하였다. 직접전단해석 모델로 부터 계산한 마찰저항력( $f_{ds}$ )값을 비교해 볼 때, 내시공성 시험 전에 대하여 내시공성 시험 후의  $f_{ds}$ 값이 감소하였다.

이상의 결과에 따르면, 내시공성 시험을 가한 지오그리드의 post-peak 강도 거동에 주목할 만하다. 내시공성 시험 전 지오그리드의 post-peak 강도 거동은 peak 강도 이후 감소하지만, 내시공성 시험 후 지오그리드의 post-peak 강도 거동은 점점 증가하는 경향을 보였다. 이는 지오그리드의 형태학적 특징인 공극 내 토립자간 상호작용력이 작용함과 동시에 내시공성 시험에 의한 지오그리드 표면에 생겨난 손상에 토립자가 응집되면서 토립자간 상호작용력이 발생하는 영역이 증가하는 것으로 보인다. 또한, PVC 코팅이 된 지오그리드 표면은 매끄러우나 내시공성 시험 후 표면의 거칠기가 발생하면서 마찰력이 더 크게 발생한 것으로 판단된다. 직접전단 해석 이론으로 산출된 마찰저항력( $f_{ds}$ )값은 내시공성 전과 후의 값이 달라지는데 이는 흙과 접촉하는 면적의 감소를 10%로 제한한 점에서 오는 결과로 생각한다. 내시공성 시험 전과 비교하여  $f_{ds}$ 값이 증가한 결과를 살펴보면, 실제 내시공성 시험 후 시료의 표면 손상에 의한 면적의 감소는 크게 작용하지 않는 것으로 판단된다.

따라서 본 실험 결과로 부터 지오그리드의 손상에 대한 전단거동이 실제 시공의 경우와 유사하다고 판단되지만, 기존의 연구에 의하면 내시공성 시험 후에는 시료의 강도가 저하되므로 이 또한 고려할 부분이라고 생각한다.

본 연구에서는 내시공성 시험 과정 중, 다짐횟수를 200회로 제한하였는데 이는 대부분 토목합성재료의 표면에 대한 손상에만 국한될 수 있기 때문에 향후 다짐횟수를 다양하게 변형하여 시료 물성 변화와 관련한 시험·연구한다면 더욱더 현장시공조건과 적합한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. Chia-Nan Liu, Yu-Hsien Ho, Jian-Wen Huang, "Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 27, pp.19-30.
2. Ennio Marques Palmeira(2009), "Soil - geosynthetic interaction: Modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 27, pp.368 - 390.
3. M.-H. Li and R. B. Gilbert(2006), "Mechanism of post-peak strength reduction for textured geomembrane-nonwoven geotextile interfaces", *Geosynthetics International*, Volume 13, Issue 5.
4. R. M. Koerner(2005), **Designing with Geosynthetics**, 5<sup>th</sup> Edition, Pearson Education Inc., New Jersey, USA.
5. 전한용, 박영목, 이광열, 정진교, 정연인, 장용채(2005), **지오신세틱스(Geosynthetics)**, 보성각.
6. 백영식(2007), **토질역학**, 구미서관.
7. 전한용, 김홍택, 유한규, 유중조(2001), **토목합성보강재**, 전남대학교 출판부
8. 목문성(2005), **Durability evaluation of various geogrids by index and performance tests**, 박사학위논문, 전남대학교 대학원.