

섬유 구성인자에 의한 지오텍스타일의 수리학적 특성 평가

Assessments of Hydraulic Properties of Geotextiles with Fiber Composition Factors

*1 전한용 Jeon, Han-Yong

*2 정진교 Chung, Jin-Gyo

*3 장용채 Chang, Yong-Chai

Abstract

The effects of fiber composition factors of 14 geotextiles which are thickness, porosity, fiber length and diameter etc. on the transmissivity were examined and in-plane permeability of geotextiles under thickness change, transmissivity, confined load were analyzed by the constitutive equations. And the effects of laminar structure on the permittivity of laminar geotextile composites which were manufactured with fiber packing densities were assessed. Transmissivities were increased with thickness of geotextiles and in-plane permeability coefficients were increased with porosity and fiber diameter. The effects of porosity were decreased with normal stress and slightly increased with fiber length. Transmissivities were increased with fiber diameter and showed same tendency for the same fiber length. Permittivities of laminar geotextile composites were influenced by the waterhead loss in the inner interface and the connection shape of these composites to water path was interpreted as bell mouth type or soft flux pipe type.

요 지

14가지 니들펀치 부직포 지오텍스타일의 섬유구성인자인 두께, 기공도, 섬유장 및 직경 등이 수평투수성에 미치는 영향을 평가하였으며, 두께변화, 수평투수도, 압축 하중 하에서의 수평투수성을 구성방정식에 의해 분석, 평가하였다. 그리고 섬유 패킹 밀도가 다른 라미나(laminar) 지오텍스타일 복합재료를 제조하여 라미나 구조가 수직투수성에 미치는 영향을 평가하였다. 수평투수도는 부직포 지오텍스타일의 두께가 증가할수록 커졌으며, 기공도와 섬유직경이 커질수록 수평투수계수는 증가하였다. 수직응력이 증가할수록 기공도의 영향은 감소하였으며, 섬유장이 길수록 수평투수계수는 약간 크게 나타났다. 구성섬유의 직경이 클수록 수평 투수계수는 커지며, 직경의 비슷할수록 유사한 투수계수를 나타내었다. 라미나 지오텍스타일의 수직 투수성은 내부 경계면에서의 손실 수두에 영향을 받으며, 경계면에서 투수로의 연결형상은 bell mouth 형이거나 부드러운 유입관 형태로 평가되었다.

Keywords : Fiber composition factors, Porosity, Transmissivity, Permittivity, Laminar geotextile composites, Inner interface, Bell mouth type or soft flux pipe type

*1 정회원, 전남대학교 공과대학 응용화학공학부 교수(Member, Professor, Faculty of Applied Chemistry, Chonnam National University.)

*2 정회원, 부산정보대학, 건설계열 조교수(Member, Assistant professor, Group-Dept. of Architecture and Civil Eng. Pusan College of Information Technology)

*3 정회원, 조교수, 목포해양대학교 해양시스템공학부(Member, Assistant Professor, Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University)

1. 서론

지오텍스타일의 기능은 보호/보강, 분리, 배수, 여과기능 등이 있으며, 이 중에서 배수기능은 콘크리트나 지오텍스브레인 같은 투수성이 낮은 토목재료 등과 함께 설치하여 지오텍스타일의 수평방향으로 물을 흐르게 하는 기능이다^{1~3)}. 배수용 지오텍스타일은 토양/지오텍스타일 시스템에서 토양유실 방지와 지오텍스타일의 수평방향으로 적당한 유체의 흐름을 가져야 하며 지오텍스타일의 유효구멍크기(AOS, Apparent Opening Size)와 중량, 두께 및 압축성과 관련된 물리적 특성이 있다^{4~7)}.

일반적으로, 부직포 지오텍스타일의 배수능력은 수평투수도에 의해서 평가되고 부직포 지오텍스타일에서 섬유가 랜덤하게 배열되어 형성된 기공의 크기와 양에 의해서 결정된다. 또한 지오텍스타일의 배수능력은 섬유직경과 부직포 제조공정에도 영향을 받으며, 니들펀치 부직포 지오텍스타일은 스펀본딩 부직포 지오텍스타일이나 열융착 부직포 지오텍스타일에 비해 우수한 수평투수도를 보인다. 이것은 니들펀치 부직포 지오텍스타일이 물이 흐르는 수로와 기공의 수가 더 많기 때문이며 이러한 이유 때문에 니들펀치 부직포 지오텍스타일은 배수재로 널리 사용되고 있다^{8~10)}.

한편, 니들펀치 부직포 지오텍스타일은 어느 방향에서나 단섬유의 무질서한 엉킴 구조가 있기 때문에 기계와 교차방향 사이에서의 기계적인 특성과 큰 차이가 없으며, 액체를 통과시키고 토양을 유지하는 배수, 정제 기능이 매우 탁월하다. 그러나 니들펀치 부직포 지오텍스타일의 배수성은 섬유의 엉킴 상태와 섬유의 구성, 두께 등에 의해 영향을 받으며, 거시적인 관점에서 배수성은 형태학적 구조에 영향을 받는다.

본 연구에서는 14가지의 니들펀치 부직포 지오텍스타일을 사용하여 두께, 기공도, 섬유장 및 직경 등의 지오텍스타일 구성인자가 수평투수성에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 두께변화, 수평투수도, 압축 하중 하에서 수평투수성은 구성방정식에 의해 분석, 평가되었다.

끝으로, 섬유 패킹 밀도가 다른 라미나(laminar) 지오텍스타일 복합재료를 제조하여 라미나 구조가 수직투수성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기공도

지오텍스타일의 기공도(porosity)는 전체 부피에 대한 공극 부피의 비로 정의된다. 이는 액체가 지오텍스타일을 통과하여 흐르는 투수성과 연관되어 있으나, 직접적으로 측정하기는 힘들어 지오텍스타일의 다른 특성들에 의해 계산된다.

$$n = 1 - \frac{m}{\rho t} \quad (1)$$

여기서, n = 기공도

m = 단위 면적 당 중량

ρ = 전체 지오텍스타일의 밀도

t = 지오텍스타일의 두께

위 식에서와 같이 지오텍스타일의 무게, 밀도 그리고 기공도는 지오텍스타일의 두께와 직접적인 관련이 있고 두께는 수직하중과 관련이 있다.

2.2 수평투수성

배수기능에서 이용되는 지오텍스타일의 경우, 지오텍스타일에 나타나는 투수 경향은 지오텍스타일의 평면과 동일한 방향으로 나타나며 이때 고려할 사항이 지오텍스타일의 두께이다. 수평 투수도(transmissivity)는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$q = k_p i A = k_p i (W \times t)$$

$$k_p = \theta = \frac{q}{i W} \quad (2)$$

여기서, θ = 지오텍스타일의 수평투수도(m²/s)

k_p = 지오텍스타일의 수평투수계수(m/s)

t = 지오텍스타일의 두께(m)

q = 투수량(m^3/s)
 W = 지오텍스타일의 폭(m)
 i = 동수경사 (= $\Delta h/L$)
 Δh = 수두 차(m)
 L = 지오텍스타일의 길이(m)

h = 시료 양면의 수두차
 T = 시료 두께
 K_1, K_2 = 각각 상, 하층 지오텍스타일의 수직투수계수

만약 투수액체가 물이 아니라 밀도와 점도 등이 식 5에 포함되어 상용될 수 있다. 또한 식 2에서 θ 와 q/W 는 똑같은 단위를 가지나 동수경사가 1일 때에만 동일하게 취급되는 점에 주의하여야 한다.

한편, 지오텍스타일을 통해 방사형 흐름이 발생하여 하부에서 배수가 이루어지는 경우에는 다음 식으로 수평투수도를 나타낼 수 있다.

$$q = k_p i A = k_p \frac{dh}{dr} (2\pi r t)$$

$$2\pi (k_p t) \int_{r_1}^{r_2} dh = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$(k_p t) = \theta = \frac{q \ln(R_2/R_1)}{2\pi \Delta h} \quad (3)$$

여기서, r_1 = 지오텍스타일의 외부 반경
 r_2 = 지오텍스타일의 내부 반경

배수기능을 요하는 적용분야에서는 두꺼운 부직포 지오텍스타일이 가장 적합하나 상대적으로 상부 하중에 의해 압축경향이 크게 나타나 수평투수도의 감소가 발생하게 된다.

2.3 라미나 지오텍스타일의 일반적인 투수이론

라미나 지오텍스타일의 투수 모형은 각 층의 기공 크기 변화를 고려하여, 단면의 크기가 다른 관형 모세관이 연결된 구조로 가정할 수 있으며, 이러한 라미나 지오텍스타일의 투수성은 Darcy의 식을 이용하여 식 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Q}{A} = \frac{h}{\frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2}{K_2}} \quad (4)$$

여기서, Q = 지오텍스타일의 단위 시간당 투수량
 A = 라미나 지오텍스타일의 투수 단면적

식 4를 이용하여 수직투수계수, K 를 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$K = \frac{T_1 + T_2}{\frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2}{K_2}} \quad (5)$$

또한, 식 5로부터 수직투수도, Ψ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\Psi} = \frac{1}{\Psi_1} + \frac{1}{\Psi_2} \quad (6)$$

식 6에서 라미나 지오텍스타일의 내부 경계면에서의 손실 수두율(f_i)을 고려하면, 수직투수도, Ψ' 는 다음과 같다.

$$\frac{1}{\Psi'} = \frac{1}{\Psi_1} + \frac{1}{(1 - f_i) \cdot \Psi_2} \quad (7)$$

식 7에서 손실 수두율(f_i)을 계산하면 다음과 같다.

$$f_i = 1 - \frac{1}{\Psi_2 \cdot \left(\frac{1}{\Psi'} - \frac{1}{\Psi_1} \right)} \quad (8)$$

3. 실험

본 연구에서는 부직포 지오텍스타일의 배수능력에서 유효인자를 시험하기 위해 14가지의 다른 부직포 지오텍스타일을 사용하여 실험하였고, 섬유 패킹 밀도가 다른 라미나 지오텍스타일 복합재료를 만들어 라미나 구조가 수직투수성에 미치는 영향을 실험하였다.

3.1 시료의 준비

3.1.1 지오텍스타일

14가지의 다른 부직포의 배수능력에서 유효인자

를 시험하기 위해 선택하였으며, Table 1에 각각의 시료를 나타내었다.

3.1.2 라미나 지오텍스타일 복합재료

라미나 지오텍스타일 복합재료를 설명하기 위해서 지오텍스타일의 섬유 패킹 밀도를 각기 다르게 하였다. 라미나 지오텍스타일 복합재료를 제조하기 위해서 6가지 타입의 섬유를 사용하였다.

6가지 라미나 지오텍스타일 복합재료의 구성과 특성을 각각 Table 2와 3에 나타내었다.

섬유 패킹 밀도가 다른 라미나 지오텍스타일 복합재료는 니들펀칭 공정으로 제조되었으며, Fig. 1에서 처럼 위 부분의 섬유패킹 밀도가 아랫부분보다 더 작다.

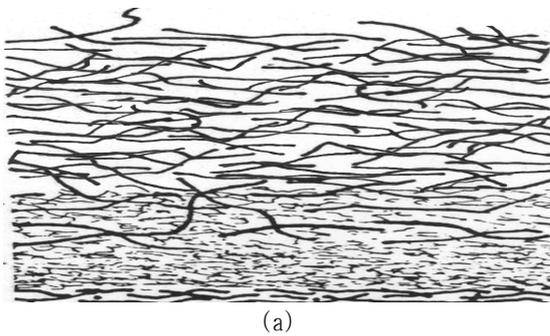


Table 2. Characteristics of specimens for manufacturing laminar geotextile composites

| Laminar Geotextile Composite | Type of Yarn | weight (g/m ²) | Thickness (mm) |
|------------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| A | Staple fiber | 510 | 4.14 |
| B | " | 240 | 1.88 |
| C | " | 390 | 2.86 |
| D | " | 535 | 3.96 |
| E | Slit film yarn | 700 | 1.15 |
| F | " | 220 | 0.68 |

Table 3. Specifications of laminar geotextile composites

| Geotextile Composite | A-B | A-C | A-E | A-F | A-D | D-C |
|----------------------------|------|------|-------|------|-------|------|
| Thickness (mm) | 6.02 | 7.00 | 5.29 | 4.82 | 8.10 | 6.82 |
| Weight (g/m ²) | 750 | 800 | 1,210 | 730 | 1,050 | 830 |

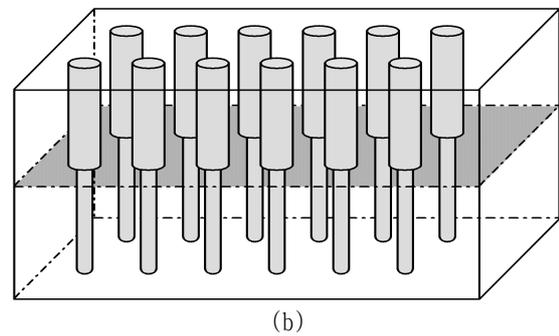


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) laminar geotextile composites, (b) structural model of tube with different fiberpacking densities

Table 1. Specifications of nonwoven geotextiles for drainage

| Nonwoven Geotextile | Fiber Type | Weight (g/m ²) | Thickness (mm) | Fiber Diameter (μm) | Porosity (at 2 KPa) |
|---------------------|---------------|----------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| F1 | Filament Yarn | 220 | 1.99 | 25.0 | 0.919 |
| F2 | " | 420 | 4.22 | 25.1 | 0.924 |
| S1 | Staple Fiber | 155 | 1.51 | 15.9 | 0.888 |
| S2 | " | 200 | 1.92 | 23.7 | 0.924 |
| S3 | " | 300 | 3.08 | 20.5 | 0.894 |
| S4 | " | 305 | 3.07 | 15.9 | 0.891 |
| S5 | " | 450 | 4.61 | 15.9 | 0.893 |
| S6 | " | 460 | 4.21 | 23.7 | 0.921 |
| S7 | " | 510 | 4.36 | 45.0 | 0.870 |
| S8 | " | 530 | 4.55 | 42.2 | 0.872 |
| S9 | " | 625 | 4.55 | 48.2 | 0.850 |
| S10 | " | 720 | 4.96 | 28.1 | 0.840 |
| S11 | " | 1060 | 6.48 | 31.7 | 0.919 |
| S12 | " | 1180 | 7.02 | 31.7 | 0.815 |

3.2 배수특성 평가

압력에 대한 지오텍스타일의 수평 투수계수 및 수평 투수성 등을 측정하기 위하여 Fig. 2의 (a)와 같은 수평 투수장치를 사용하였다. 투수장치는 지름 113 mm인 시료(단면적 100cm²)를 사용할 수 있도록 설계되었고, 압축력은 압축 실린더에 의해 시료에 0~249kg까지 부과 할 수 있도록 설계되었다. 수두의 높이는 일정하게 유지되도록 장치되었으며 지오텍스타일로 물의 유입은 투수 셀(cell)의 중심에 있는 지름 30mm의 원형 배출구로부터 유입된다.

한편, 라미나 지오텍스타일의 수직투수성을 평가하기 위하여 Fig. 2의 (b)와 같은 수직투수장치를 사용하였다. 외경 100mm, 내경 87mm인 아크릴 원통을 사용하였으며, 투수 원통은 상하부 원통으로 분리되어 있으며, 상부 원통에는 일정한 수두를 유지할 수 있도록 설계되어 있고 하부 원통에는 시료의 처짐을 방지하기 위해 사이가 넓은 망이 고정되어 있다. 원하는 수두차를 유지하며 시험하기 위해 투수 배수구의 높이는 자유롭게 조정할 수 있도록 고안되었으며, 또한 수두차를 측정하기 위해 내경 6mm인 플라스틱 관이 상부 투수원통과 투수 배수구에 각각 연결

되어 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 지오텍스타일 구성인자의 영향

4.1.1 두께의 영향

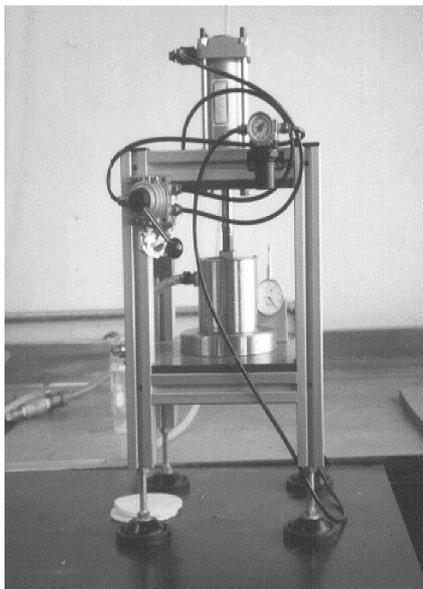
지오텍스타일의 두께는 기계적 성질과 수리적 성질에 관련된 중요한 인자이다. Fig. 3은 수직응력의 적용 시 두께에 의한 니들펀치 부직포 지오텍스타일의 수평투수계수 변화를 나타낸 것이다.

여기서 지오텍스타일의 두께가 2~3배로 증가하지만 투수계수의 차이는 없으며, 그 이유는 수평 투수계수가 단위 면적 당 수평투수성을 나타내기 때문이라 생각된다.

Fig. 4에서 수평투수도는 부직포 지오텍스타일의 두께가 증가할수록 비례적으로 증가하며, 따라서 수평투수도는 부직포 지오텍스타일의 두께를 고려하는 것이 바람직하다.

4.1.2 기공도의 영향

부직포 지오텍스타일은 3차원 구조의 섬유집합체



(a)



(b)

Fig. 2. Photographs of (a) radial-flow type transmissivity test apparatus and (b) permittivity test apparatus for geotextiles

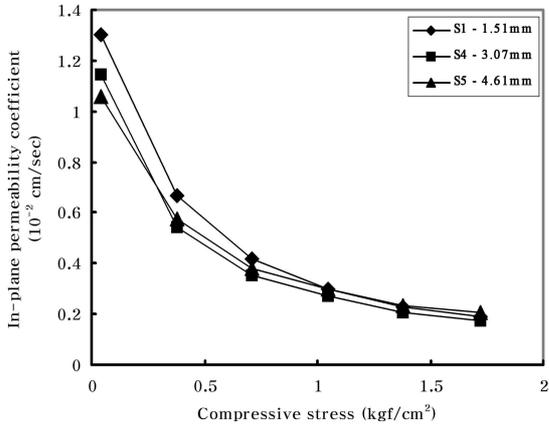


Fig. 3. In-plane permeability coefficient vs. applied normal stress with thickness of geotextiles

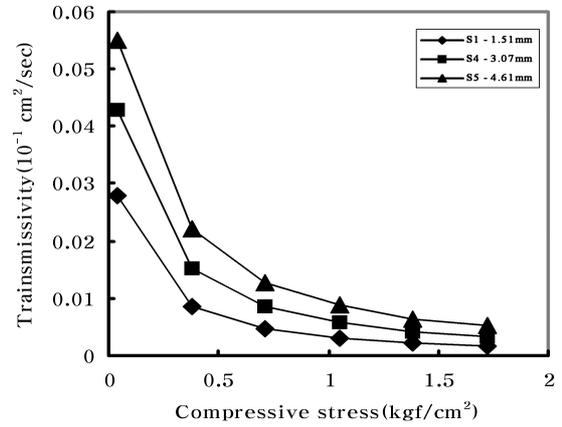


Fig. 4. Transmissivity vs. applied normal stress with thickness of geotextiles

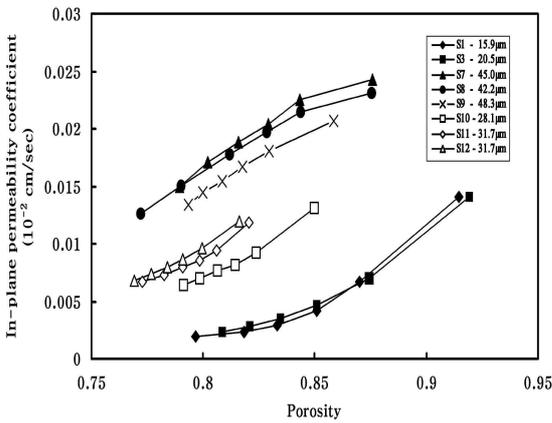


Fig. 5. In-plane permeability coefficient vs. applied normal stress with porosity

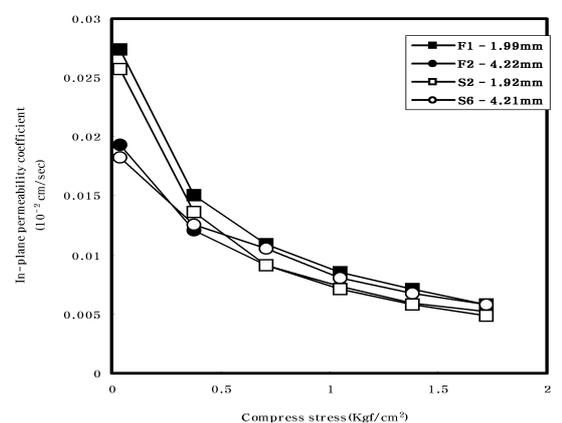


Fig. 6. In-plane permeability coefficient vs. applied normal stress with fiber length

로서 높은 기공도를 갖는 다공성 제품이다. 상재하중이 작용되지 않는 경우, 부직포 지오텍스타일의 기공도는 0.7~0.9 정도로써 제조방법에 따른 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 5에 기공도와 수평 투수계수의 관계를 나타내었으며, 낮은 수직응력에서의 기공의 영향은 크게 나타나지만 수직응력이 증가할수록 기공의 영향은 감소한다.

이러한 이유는 기공도가 클수록 수직응력에 의해 보다 쉽게 압축되기 때문이라 생각된다. 그러므로, 수평 투수도는 부직포 지오텍스타일의 기공도를 평가하는 것이 바람직하다.

4.1.3 섬유장의 영향

부직포 지오텍스타일에서 구성섬유의 길이는 기계적인 특성뿐만 아니라 지반공학의 응용에서 수리

적 특성과 관계하는 중요한 인자 중에 하나이다.

Fig. 6에 장섬유 및 단섬유로 제조된 니들펀치 부직포 지오텍스타일의 수평투수계수를 나타내었으며, 큰 차이를 보이지 않는다. 장섬유 지오텍스타일의 수평투수계수는 단섬유 지오텍스타일보다 약간 크게 나타나는 것은 장섬유가 물이 흐르는 수로의 수평방향으로 더 많이 배열되어 있기 때문이다. 그러므로, 수평 투수도는 부직포 지오텍스타일의 구성섬유의 길이의 영향을 고려하는 것이 적당할 것이다.

4.1.4 섬유 직경의 영향

부직포 지오텍스타일의 구성섬유의 직경은 기계적 특성과 수리적 특성과 관계하여 중요한 인자이자, 같은 기공도를 갖는 경우 구성섬유의 직경이 클수록 기공의 지름도 큰 값을 가지게 되고, 이러한 기공의

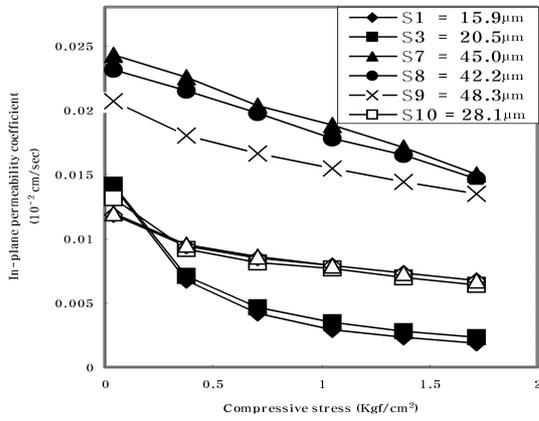


Fig. 7. In-plane permeability coefficient vs. applied normal stress with fiber diameter

큰 지름은 물의 유동 마찰을 작게 한다. 또한 부직포 지오텍스타일의 구성섬유의 직경은 수평투수성의 압축영향과 관계가 있으며 구성섬유에 대한 부직포 지오텍스타일의 수평 투수계수를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 구성섬유의 직경이 클수록 수평 투수계수가 큰 값을 가지며, 비슷한 직경의 시료는 비슷한 투수계수를 가짐을 볼 수 있다. 그러므로, 수평 투수도는 부직포 지오텍스타일의 구성섬유직경의 치수를 고려해야 할 것이다.

4.2 라미나 지오텍스타일 복합재료의 수직 투수성

Table 4에 식 7과 8에 의해 얻어진 이론 값과 6가지 라미나 지오텍스타일 복합재료의 수직투수도와 수직투수계수를 나타내었으며, Fig. 8에 수직투수도와 수직투수계수의 역수를 나타내었다. 여기서 투수 현상을 설명하기 위해서는 수직 투수계수보다 수평 투수도를 이용하는 것이 투수성을 결정하는데 더 효율적이므로 라미나 지오텍스타일 복합재료 투수성의 이론 값은 실험 값보다 더 크다. 그 이유는 지오텍스타일 복합재료의 안쪽 경계면에서의 기공 영역의 변화로 야기된 손실 수두의 효과 때문이다.

4.3 라미나 지오텍스타일 복합재료의 손실 수두율

Fig. 9에 손실 수두율과 연관된 라미나 지오텍스타일 복합재료의 내부 경계면의 입구 모양을 나타내었으며, 라미나 지오텍스타일의 다양한 다공성 영역의 경우에서 손실 수두율과 수직투수도를 Table 5에 나타내었다. 여기서 수직투수도와 수직투수계수

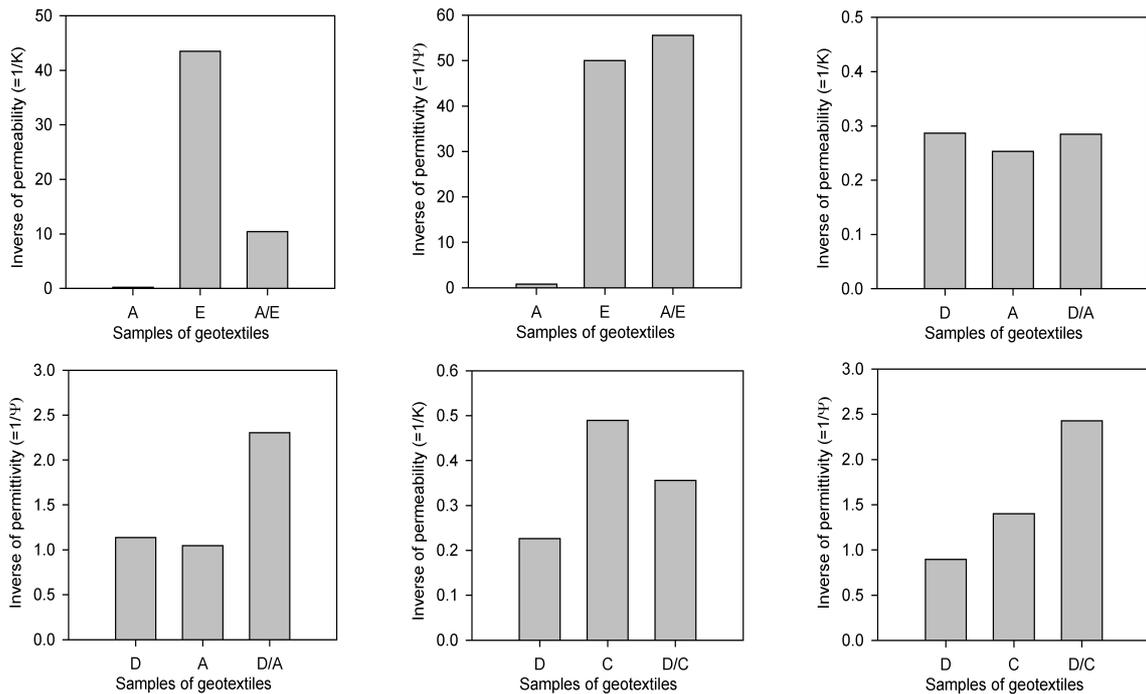


Fig. 8. Inverse values of normal permeability and permittivity for geotextiles

Table 4. Permeability coefficient and permittivity of laminar geotextile composites

| Laminar Geotextile Composite | Permeability Coefficient(cm/sec) | | | | Permittivity(sec ⁻¹) | | | |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|------------|-------|----------------------------------|-------------|------------|-------|
| | Upper Layer | Lower Layer | Composites | Eq(7) | Upper Layer | Lower Layer | Composites | Eq(8) |
| A-B | 4.951 | 2.364 | 3.576 | 3.757 | 1.173 | 1.258 | 0.578 | 0.607 |
| A-C | 4.441 | 2.125 | 2.828 | 3.039 | 1.086 | 0.743 | 0.411 | 0.441 |
| A-E | 4.914 | 0.023 | 0.096 | 0.105 | 1.193 | 0.020 | 0.018 | 0.020 |
| E-A | 0.023 | 4.914 | 0.091 | 0.106 | 0.020 | 1.193 | 0.017 | 0.020 |
| A-F | 5.033 | 0.029 | 0.185 | 0.199 | 1.193 | 0.042 | 0.038 | 0.041 |
| D-A | 3.487 | 3.956 | 3.513 | 3.712 | 0.881 | 0.956 | 0.434 | 0.458 |
| D-C | 4.427 | 2.042 | 2.812 | 2.972 | 1.118 | 0.714 | 0.412 | 0.436 |
| C-D | 2.042 | 4.427 | 2.860 | 2.972 | 0.714 | 1.118 | 0.419 | 0.436 |

Table 5. Loss rate of hydraulic pressure of laminar geotextile composites

| Laminar Geotextile Composite | Permittivity(sec ⁻¹) | | | Loss Rate of Hydraulic Pressure(f _i) |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|-----------|--|
| | Upper Layer | Lower Layer | Composite | |
| A-B | 1.173 | 1.258 | 0.578 | 0.095 |
| A-C | 1.086 | 0.743 | 0.411 | 0.111 |
| A-E | 1.193 | 0.020 | 0.018 | 0.087 |
| E-A | 0.020 | 1.193 | 0.017 | 0.144 |
| A-F | 1.193 | 0.042 | 0.038 | 0.066 |
| D-A | 0.881 | 0.956 | 0.434 | 0.105 |
| D-C | 1.118 | 0.714 | 0.412 | 0.085 |
| C-D | 0.714 | 1.118 | 0.419 | 0.091 |

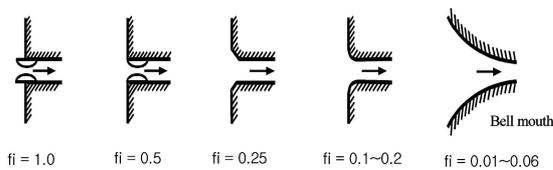


Fig. 9. Inlet forms of inner interface of laminar geotextile composites

값이 작을수록 손실 수두율은 더 커지며, 따라서 라미나 지오텍스타일 복합재료의 내부 경계면의 유입구 형상이 bell mouth형이거나 부드러운 유입관 형에 기인한 것으로 생각된다.

5. 결 론

여러 가지 부직포 지오텍스타일의 환경인자에 의

한 배수성을 평가하기 위하여, 수평투수시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 부직포 지오텍스타일의 수평투수성 평가에서 가장 크게 영향을 미치는 유효인자로는 두께, 기공도, 섬유직경 등이 있다.
2. 수평투수도는 부직포 지오텍스타일의 두께가 증가할수록 비례적으로 증가하였으며, 기공도와 섬유직경이 커질수록 수평투수계수는 증가하였다.
3. 낮은 수직응력에서의 기공도의 영향은 크게 나타났지만 수직응력이 증가할수록 기공도의 영향은 감소하였다.
4. 섬유장이 긴 장섬유로 제조된 지오텍스타일의 수평투수계수가 단섬유로 제조된 지오텍스타일보다 약간 크게 나타났다.

5. 구성섬유의 직경이 클수록 수평 투수계수가 큰 값을 가지며, 비슷한 직경의 시료는 비슷한 투수계수를 나타내었다.
6. 라미나 지오텍스타일의 수직 투수성은 내부 경계면에서의 손실 수두에 의해 실험치가 약간 작은 경향을 보이고 있으며, 내부 경계면에서 투수로의 연결형상은 bell mouth형이거나 부드러운 유입관 형태로 연결된 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. Bhatia, S. K., Smith, J.L., and Christopher, B.R. (1996), "Geotextile Characterization and Pore Size Distribution: Part III. Comparison of Methods and Applications to Design." *Geosynthetics Intl.*, Vol.3, No.3, pp.301~328.
2. FHWA (1989), *Geotextile Design & Construction Guidelines*, U.S. Dept. of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA HI-90-001, pp.24~46.
3. ICI Fibers. Ltd. (1995), *Designing with Terram, design brochure*, Gwent, U.K.
4. ASTM Committee D-35, Philadelphia, PA., U.S., pp.53~56.
5. Ingold, T. S. (1994), *The Geotextiles and Geomembranes Manual*, First Edition, Elsevier Advanced Technology, Oxford, pp.299~474.
6. Koerner, R. M., and Bove, J. A. (1983), "In-Plane Hydraulic Properties of Geotextiles", *Geotechnical Testing J.*, Vol. 6, No.4, pp.190~195.
7. Koerner, R. M., and Bove, J. A., and Martin, J. P. (1984), "Water and Air Transmissivity of Geotextiles", *J. Geotextiles and Geomembranes*, Vol.1, No.1, pp.57~73.
8. McGown, A. W. (1976), "The Properties and Uses of Permeable Fabric Membranes", *Residential Workshop on Materials and Methods for Low Cost Roads and Reclamation Works*, Leura, Australia, pp.663~710.
9. R. D. Holtz, B. R. Christopher and R. R. Berg (1995), *Geosynthetic Design and Construction Guidelines*, U.S. Dept. of Transportation Federal highway Administration, Publication No. FHWA HI-95-038, pp.27~105.
10. R. M. Koerner (1998), *Designing with Geosynthetics*, 4th Ed., Prentice Hall, New Jersey, pp.116~126, pp.69~314, 387~414.
11. R. V. Zanten et al. (1996), *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*, John Wiley and Sons, New York, pp. 7~36.