

## 디지털 이미지 분석을 이용한 지오텍스타일 공극 분포의 정량화

### Quantitative Evaluation of Geotextile Void Structures Using Digital Image Analysis

김두환<sup>1\*</sup>

Duhwan Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Manager, Samsung C&T Corporation, Civil ENG Center, Seoul, 137-956, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper presents results from a study undertaken to quantitatively evaluate the geotextile pore sizes using optical image analysis. The evaluation was conducted by observing surfaces of coupons cut from resin-impregnated specimens of geotextile-geomembrane layered under various load conditions. Stereological concepts were applied to collect representative specimens from a series of laboratory tests. The sizes of voids enclosed by filaments were expressed in terms of the largest inscribing opening size (LIOS) distribution. The opening diameter corresponding to the 50% cumulative frequency decreased by about 45mm as the load increased from 10 to 300kPa and recovered to about 90% of its initial state on unloading back to 10kPa. The average void size was reduced by 32 and 16.5% as the geotextile was sheared against a textured geomembrane under normal stresses of 100 and 300kPa, respectively. The results showed how the LIOS distribution varied as a function of normal stress and interface shear displacement against a smooth and a textured geomembrane surfaces.

#### 요 지

본 논문에서는 지오텍스타일 공극 크기 분포를 이미지 분석방법을 이용하여 정량적으로 산출하였다. 연구과정은 실내시험을 통해 지오텍스타일-지오멤브레인 층으로 된 재료를 에폭시 레진으로 포화시킨 후, 양생, 절단하여 그 표면을 디지털 광학 현미경으로 관찰하고 정량화함으로 이루어졌다. 여기서는 재료공학에서 주로 사용하는 공간학(stereology)의 개념을 사용하였으며, 지오텍스타일 필라멘트에 의해 둘러싸인 공극의 크기를 최대내접공극크기분포(LIOS)로 표현하였다. 지오텍스타일 내부 축적빈도 50%에 해당하는 공극직경이 압축응력이 10kPa에서 300kPa로 증가함에 따라 45 $\mu$ m가량 감소하였으며, 다시 압축응력을 10kPa로 되돌렸을 경우 초기치의 90%정도 수준으로 회복하였다. 마찰형 지오멤브레인 표면에서 연직응력 100, 300 kPa을 받으며 전단되었을 경우 평균 공극의 크기가 각각 32, 16.5% 감소하였다. 본 논문의 시험 및 분석 결과는 지오텍스타일 내부의 최대내접공극 크기분포가 표면거칠기가 다른 지오멤브레인 표면에서 압축 및 인터페이스 전단됨에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다.

**Keywords :** Digital Image Analysis, Geotextile, Geomembrane, Interface Shear, Largest Inscribing Opening Size, Void

#### 1. 서 론

재료내부 공극(void)의 크기와 분포는 여러 산업재료의 공학적 특성파악, 거동 예측 및 분석을 위한 자료로서 유용하게 사용되어왔다. 지반공학에서는 여러 학자들이 삼

축압축시험 중 발생하는 모래입자구조의 변화를 정량화하기 위한 방법으로 공극률 분포를 이용하고자 노력하였다 (Bhatia et al., 1990; Ibrahim et al., 1991; Frost and Kuo, 1996, Frost and Park, 2003). 토목섬유 분야에서는 필라멘트(filament)를 니들핀칭하여 만드는 부직포(nonwoven textile) 구조를 정량화하려는 시도가 있어왔다. 대표적인 시도로 Rigo et al.(1990)이 이용한 체분석법(ASTM D 4751), Bahatia et al.(1996)이 도입한 수은 주입법(mercury intrusion porosimetry), Rebenfeld and Miller(1995)가 시도한

Received 10 Jan. 2013, Revised 20 Mar. 2013, Accepted 24 Mar. 2013

\*Corresponding author

Tel: +82-2-3669-0462; Fax: +82-2-2145-6630

E-mail address: duhwany.kim@samsung.com (D. Kim)

공기압 주입에 의한 물의 유속 변화측정(ASTM D 6767) 등을 들 수 있다. 그러나, 이러한 시도들은 섬유를 구성하는 기늘고 섬세한 필라멘트 구조(필라멘트의 직경은 모래 입자에 비하여 일반적으로 1/10 또는 이하임)가 교란되는 것을 피하기 어려우며, 이에 따라 시험결과치의 신뢰성에 의문을 가질 뿐만 아니라 같은 재료를 이용하더라도 시험 방법에 따라 매우 상이한 결과를 나타내는 것으로 알려져 왔다(Bhatia et al., 1996). 따라서, 이와 같이 기존의 시험 방법으로 극복하지 못한 재료의 교란문제를 최소화하며 지오텍스타일에 내재된 공극의 크기를 관찰하는 새로운 방식이 요구된다. 이 논문에서는 실내 시험과 이미지 분석을 통해 실제 공극 크기를 측정하는 방법과 그 결과에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 최대내접 공극크기의 개념

Lombard et al.(1989)은 열융착(heat bonded)한 부직포의 공극크기를 계산하기 위한 이론식을 발표하였다. Fig. 1은 임의로 분포된 직선에 의해 이루어진 다각형의 내접원 일부를 보여준다. 이 방식은 포이슨(Poisson)의 다각이론(polyhedron theory)에 근거하며 아래에 나타낸 바와 같이 요약할 수 있다.

포이슨 라인 네트워크(line network)에서 다각형에 내접하는 원의 반지름 분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(r) = (\pi^2 \lambda^2 r^2 + 2\pi \lambda r + 1) \exp(-2\mu \lambda r) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ : 포이슨 라인 네트워크의 밀도  
 $r$ : 내접하는 가장 큰 원의 반지름  
 $\mu$ : 지오텍스타일의 단위면적당 질량( $g/m^2$ )

반지름  $r$ 보다 작은 공극의 발생 빈도  $F(r)$ 을  $1 - G(r)$ 로 나타낼 수 있으며, 포이슨 라인 네트워크 단위면적당 선 길이의 합을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \pi \lambda \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$ : 라인 네트워크 단위면적당 선 길이의 합  
 따라서,

$$F(r) = 1 - [(\sigma^2 r^2 + 2\sigma r + 1) \exp(-2\sigma r)] \quad (3)$$

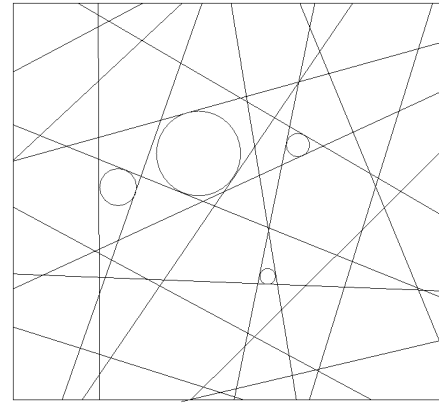


Fig. 1. Poisson line network

필라멘트 직경이  $D_f$ 인 경우,

$$\sigma = 8\mu / (\pi T_g D_f \rho_f) \quad (4)$$

여기서,  $T_g$ : 폴리머 두께  
 $\rho_f$ : 폴리머 밀도  
 $D_f$ : 필라멘트 직경

결과적으로  $d$ 보다 작거나 같은 직경을 갖는 공극의 누적 분포 확률(cumulative probability)을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 이 방법을 통하여 구한 결과는 구형입자를 체 분석하여 입도분포를 얻는 방식과 유사하다고 할 수 있다 (Rigo et al., 1990).

$$F(d) = 1 - [(4\mu d / (\pi T_g D_f \rho_f) + 1)^2 \exp(-8\mu d / (\pi T_g D_f \rho_f))] \quad (5)$$

여기서,  $F(d)$ : 공극직경의 누적분포확률  
 $T_g$ : 폴리머 두께, 여기서는 지오텍스타일 두께(mm)  
 $\rho_f$ : 폴리머 밀도, 여기서는 지오텍스타일의 단위체적중량( $kg/m^3$ )  
 $d$ : 공극 직경( $\mu m$ )  
 $D_f$ : 필라멘트 직경( $\mu m$ )

본 연구에서는 공극크기 분포를 정량화하기 위하여, 지오텍스타일-지오�멤브레인 층을 이룬 시료를 대표하는 이미지로부터 계산한 최대내접공극크기(largest inscribing opening size, LIOS)의 분포로 나타내었다. 분석과정은 Java 프로그램을 이용한 이미지 분석기법을 사용하였으

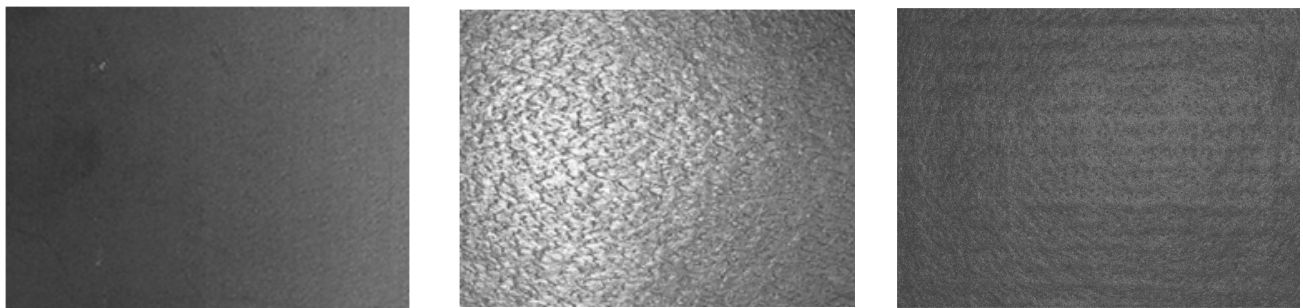
며, 이 과정을 통해 구한 실험치와 이론에 바탕을 둔 계산치를 비교하여 이루어졌다.

### 3. 실내 시험

#### 3.1 시험 재료

실내시험 재료로써 2종의 지오멤브레인과 4종의 지오텍스타일을 사용하였으며, 본 논문에서는 이 중 일반형 지

오멤브레인(smooth geomembrane, GM-S), 마찰형 지오멤브레인 (textured geomembrane, GM-T), 니들펀칭된 부직포(needle punched nonwoven, NPNW) 형식 지오텍스타일 각 1종을 이용한 압축 및 인터페이스 전단시험 상태에서의 이미지 분석 결과를 나타내고자 한다(Fig. 2, Table 1, Table 2). 여기서 지오멤브레인의 표면 거칠기는 프로필로미터(profilometer)를 이용하여 측정하였으며, Dove and Frost(1996)이 제안한 방법에 의해 분류하였다. 사용한 지오텍스타일은 폴리프로필렌 재질로서 단위면적당



(a) Smooth geomembrane (16cm x 12cm) (b) Textured geomembrane (16cm x 12cm) (c) Geotextile (12cm x 8cm)

Fig. 2. Plan images of the specimens

Table 1. Summary of geotextile properties

Property	GT	Test Method
Material	Polypropylene	-
Fiber type	Staple	-
Mass per Unit Area, $g/m^2$	270	ASTM D 5216
Grab Tensile Strength, $N$	955	ASTM D 4632
Grab Elongation, %	50	ASTM D 4632
Puncture Strength, $N$	525	ASTM D 4833
Trapezoidal Tear Strength, $N$	420	ASTM D 4632
Apparent Opening Size, mm	0.180	ASTM D 4751
Permittivity, $sec^{-1}$	1.50	ASTM D 4491
Permeability, $cm/sec$	0.30	ASTM D 4491

Table 2. Summary of geomembrane properties

Property	GM-S	GM-T	Test Method
Surface Topography	Smooth	Textured	-
Thickness (mm)	1.4 (nominal)	1.4 (nominal)	ASTM D 5199
Density ( $g/m^3$ )	0.94	0.94	ASTM D 1505
Carbon black (%)	2.0	2.0	ASTM D 1603
Strength at Break (N/mm-width)	43	16	ASTM D 6693
Strength at Yield (N/mm-width)	23	23	ASTM D 6693
Elongation at Break (%)	700	150	ASTM D 6693
Elongation at Yield (%)	13	13	ASTM D 6693
Tear Resistance (N)	187	187	ASTM D 1004
Puncture Resistance (N)	530	480	ASTM D 4833

중량이  $270g/m^2$ (ASTM D 5261), 그랩인장강도 955N (ASTM D 4632)인 제품을 사용하였다. 지오멤브레인은 HDPE(high density polyethylene)재질로 카본블랙 2%를 함유하며, 공칭 두께는 1.5mm, 항복인장강도는 23N/mm 이다. GM-T 지오멤브레인의 표면 거칠기는 공압출(coextruding) 과정을 통하여 만들어졌으며, 이는 용융된 레진에 첨가된 기포 발생제(blowing agent)의 온도가 내려가는 과정에서 재료내 버블이 터지면서 거친 표면을 만드는 방법이다(Hebeler et al., 2005). Table 1, 2는 사용한 재료의 공학적 특성을 요약한 것이다(지오텍스타일, 지오멤브레인의 일반적 제조공정, 특성 등 기타 정보는 Koerner,1998 참고).

### 3.2 인터페이스 전단시험

본 연구에서는 인터페이스 전단시험동안 지오텍스타일의 인장을 허용 또는 제한할 수 있는 시험기를 설계/제작하여 사용하였다(Fig. 3). 지오멤브레인 시료는 200mm 폭, 290mm 길이로 재단하여 지오멤브레인 제조기계방향(machine direction)과 전단방향이 동일하도록 설치하였다. 전단프레임(shear frame)을 양측에 강성재료 만든 축(shaft)에 연결하여 일반적으로 발생하는 전단상자(또는 전단프레임)와 하부재료(본 논문에서는 지오멤브레인)가 닿아서 발생하는 오차를 사전에 제거하였다. 또한 전단판(shear platform)이 움직일때 발생하는 기계적 마찰을 최소화하기 위하여 마찰계수가 0.001 ~ 0.002인 리니어 베어링

(linear bearing)을 적용하였다(Fig. 3). 연직응력이 400kPa 이상일 경우 지오텍스타일 크게 압축되고 이에따라 필라멘트 밀도가 증가됨에 따라 재료를 절단할 경우 지오텍스타일 필라멘트가 조밀한 부분이 국부적으로 파손되는(에폭시 레진과 함께 뽑혀 나옴) 등의 문제가 발생하여 시료를 만드는 것이 용이하지 않았다. 따라서 본 논문의 결과는 연직응력이 100, 200, 300kPa일 경우에 대해서만 기술하는 것으로 한정하였다. 전단 속도는 분당 1mm로 시험 중 일정(constant strain control)하게 적용하였다.

### 3.3 지오텍스타일-지오멤브레인의 압축 및 인터페이스 전단 거동

지오텍스타일 압축시험은 단계적으로 재하-제하(load-unloading)하는 방법을 사용하였다. 재하 하중 100, 200, 300kPa을 가한 후 10kPa로 제하하였을 경우 회복되지 않은 소성변형이 각각 56.3, 57.5, 52.0% 이었다. 마찰형 지오멤브레인과 지오텍스타일의 인터페이스 전단시험의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 연직응력이 증가함에 따라 최대전단강도시 변형율이 증가한 것을 알 수 있다(Fig. 4a). 압축시험에서와 같이 전단시험시 최대전단강도, 잔류전단상태(residual shear state)에서 지오텍스타일을 양생시켜 디지털이미지 분석을 위한 시료를 준비하였다. 여기서 주목해야 할 것으로 연직응력이 10kPa일 경우 인터페이스 전단시 시료가 초기에 약간 압축된 후 팽창(Fig. 4b A2~A3)하는 다일레이션 현상을 보인 것으로 연직하중의 구속력에 비하여 지오텍스타일 필라멘트와 거친 지오멤브레인

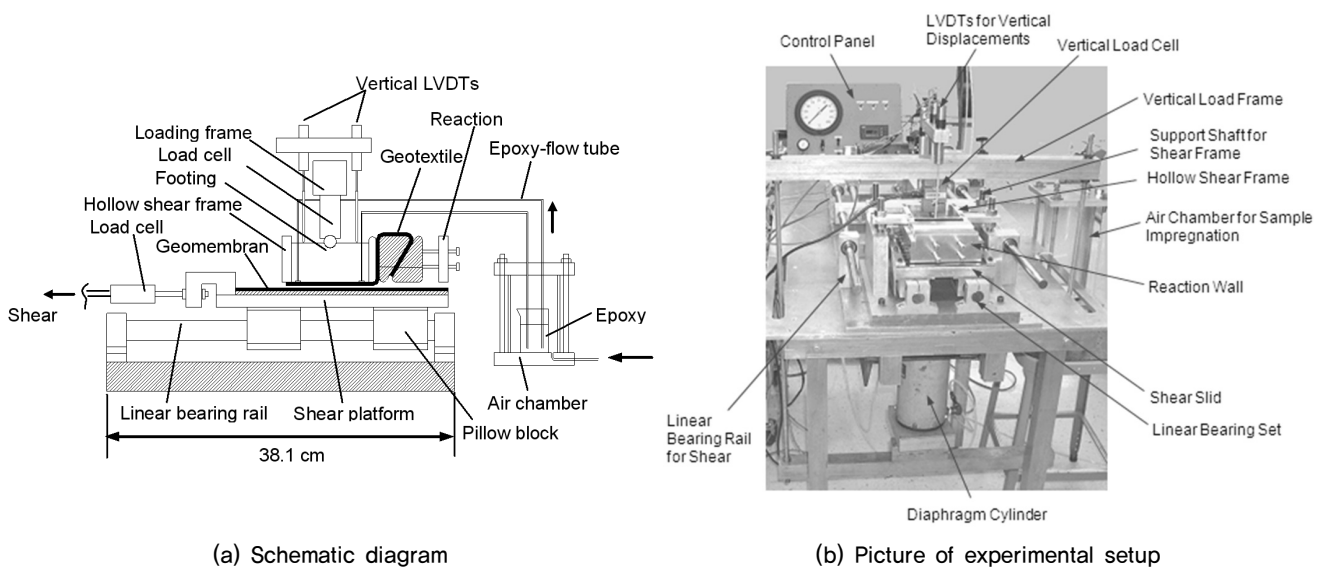
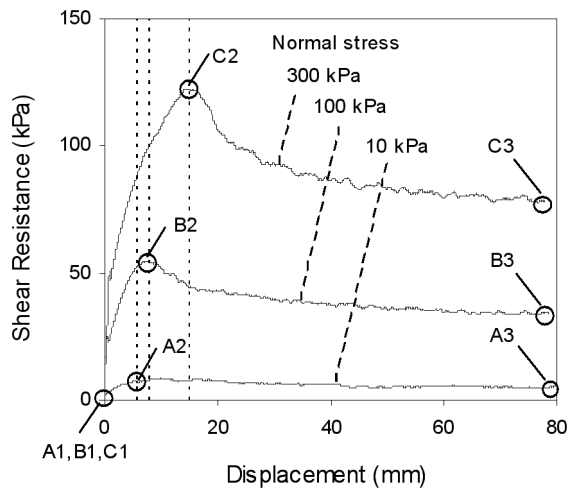
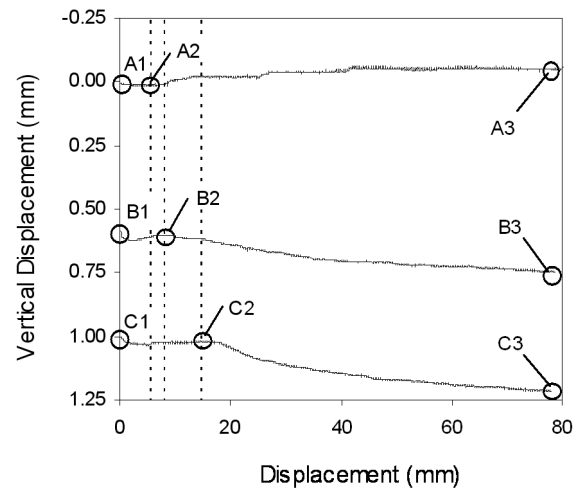


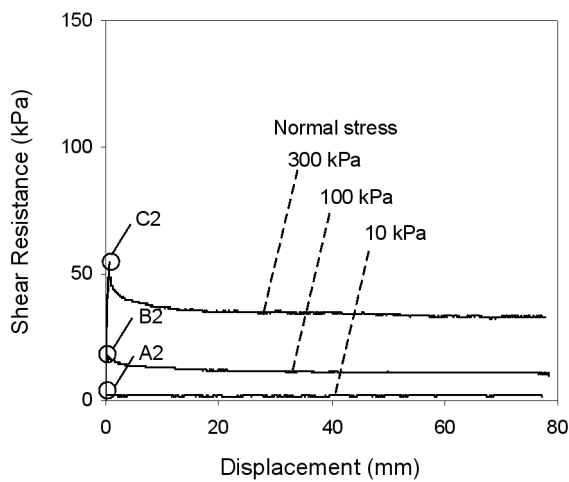
Fig. 3. Interface shear device (Kim, 2006)



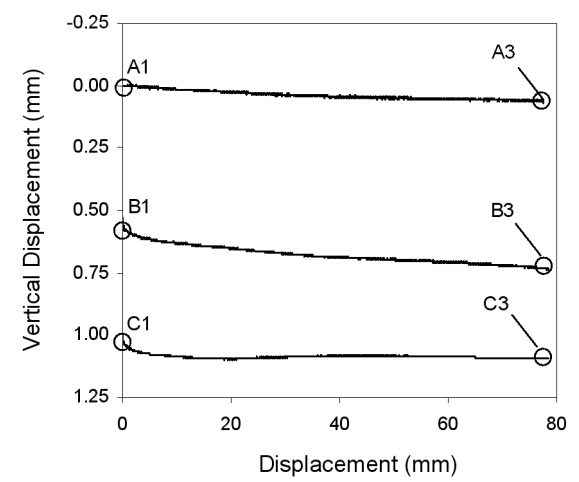
(a) Interface shear resistance against GM-T



(b) Vertical displacement against GM-T



(c) Interface shear resistance against GM-S



(d) Vertical displacement against GM-S

Fig. 4. Interface shear response of the geotextile against textured geomembrane GM-T and smooth geomembrane GM-S

표면의 인터로킹에 의한 저항이 크기 때문에 발생한 결과이다. 일반형 지오텍스타일에서 전단시험을 하였을 경우 다일레이션 현상 없이 시료가 전단동안 압축됨을 볼 수 있다 (Fig. 4c, 4d). 본 논문에서는 상부하중과 인터페이스 전단시, 마찰에 의해 발생하는 열과 이에 따른 재료의 구조 변화에 대하여는 고려하지 않았다.

## 4. 정량적 디지털 이미지 분석

### 4.1 이미지 분석 기법

내부구조 파악을 위하여 재료를 일정한 방향으로 절단하고 그 단면을 관찰하는 것은 재료공학에서 잘 정립된 방법으로서, 특히 미소구조(micro-structure) 분석을 위해 널리 사용되는 방법이다. 이때 재료 관찰면 수를 최소화

하면서 동시에 재료의 대표적인(unbiased) 정보를 얻기 위하여, 절단면 및 절단면 개수를 정하는 것이 관건이다 (Underwood, 1969; 1970).

Fig. 5a는 서로 120° 각도를 이루는 3개의 연직면(vertical tri-sector)에 의하여 절개되는 단면을 관찰하여 시료의 대표적 정보를 추출하는 방식을 나타낸다. 이 기법은 재료의 등방성(degree of isotropic)에 상관없이 적용할 수 있으며, 실험적 오차범위가 5% 내외로 알려져 있다(Gokhale and Drury, 1994). 또 다른 방법으로 3개의 서로 직교하는 단면(T형 단면)을 관찰하는 방법을 들 수 있다(Vaughan and Brown, 1996). 이 방법은 재료의 관찰대상 배열방향이 일정한 패턴을 가진 경우에 보다 적절하다.

본 논문에서는 지오텍스타일 시료를 압축 또는 인터페이스 전단된 상태에서 점성이 낮은 에폭시 레진을 흡수시킴으로써 상온에서 양생(curing)시켰다. 사용한 에폭시 레

진은 양생 과정중 온도의 증가, 체적팽창이 적으며, 투명도, 경도 등을 만족한다(Kim, 2006). 단단하게 굳어진 시료를 절단한 후 절단면을 표면 거칠기가 다른 샌드페이퍼, 샌드직포(sand woven clothes)로 갈고, 처리하여 평평하게 한 후, 필라멘트와 지오멤브레인의 단면 이미지를 디지털 현미경을 사용하여 캡처하였다. 이 과정을 통하여 얻은 각각의 이미지는 고화질로써, 여러 이미지를 연결하여 모자이크 처리함으로써 시료 전체를 나타내는 이미지로 만들었다. 재료의 대표적 정보를 얻기 위하여 GM-S 표면에서

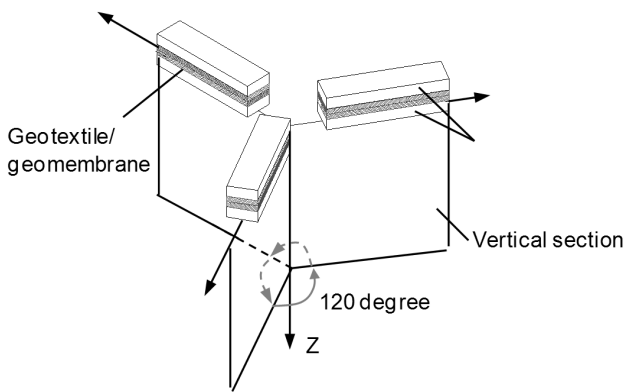
압축된 재료는 tri-sector 방식, 인터페이스 전단된 재료는 직교하는 3개면(Fig 5b)으로부터 이미지를 얻었다.

#### 4.2 최대내접공극크기(LIOS) 측정

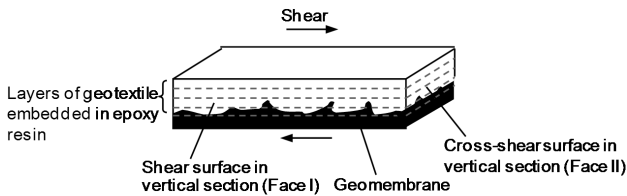
LIOS 측정은 자동화된 디지털 이미지분석방법에 의하여 수행하였다. 디지털 현미경을 통하여 캡처한 초기의 그레이 스케일 이미지를 이원화(binimize)한 후 아래에 나타난 일련의 과정을 통하여 LIOS를 구하였다(Kim, 2006).

1. 필라멘트 이미지 면적 수축(erosion)
2. 수축된 이미지들의 중심점을 연결하는 세그멘테이션(segmentation)
3. 세그먼트의 다각형 화
4. 다각형의 중심점 찾기
5. 다각형 중심점을 윈도우링(windowing)하여 실제 최대내접원 찾기

윈도우링은 이미지의 각 픽셀에서 실제 중심점을 찾을 때까지 디지털 프로세싱(digital processing)을 하는 과정이며, 각각의 최종 내접원이 필라멘트와 최소 3개점에서 접하는 것을 확인함으로써 마무리하였다. LIOS 측정 결과 이미지와 초기 이미지를 중첩시킨 것의 예를 Fig. 6에 나타내었다. 이 이미지는 GM-S 표면에서 300kPa의 연직응력으로 압축된 시료의 중간 깊이에서 캡처하였다. 여기서, 우측의 그림은 내접원 중심점을 찾은 뒤 윈도우링 과정을 통하여 실제 내접하는 원의 중심점을 찾은 결과를 보여준다. 지오텍스타일 필라멘트가 연속적이지 않은 것은 필라멘트가 수평 방향뿐만 아니라 연직방향으로도 복잡하게 꼬여

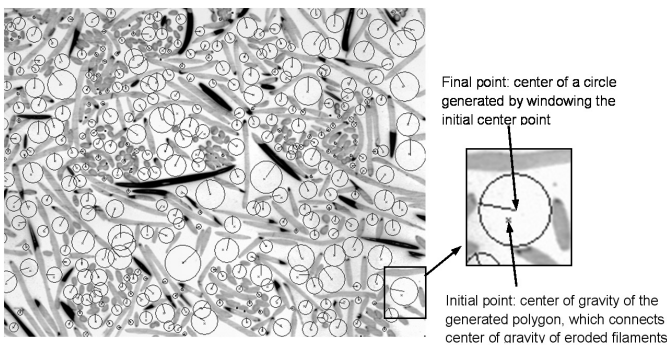


(a) Tri-sector sectioning method used for compressed specimens on smooth geomembrane surfaces



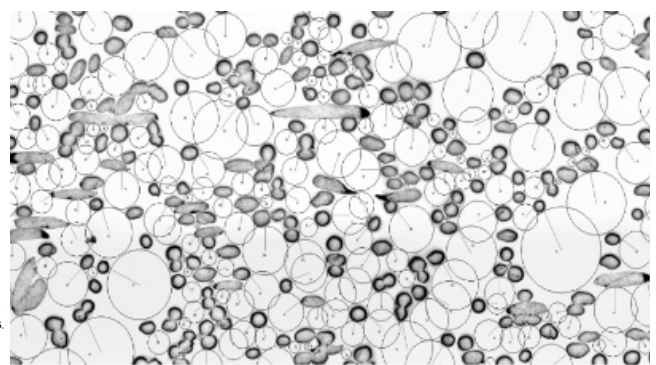
(b) Three orthogonal viewing planes method used for sheared specimens

Fig. 5. Sampling methods for digital image analysis



Note: 300 kPa compression; smooth geomembrane; horizontal surface at the middle depth of the specimen; image size: 2.654 mm (W) x 2.005 mm (H).

(a) Horizontal surface image



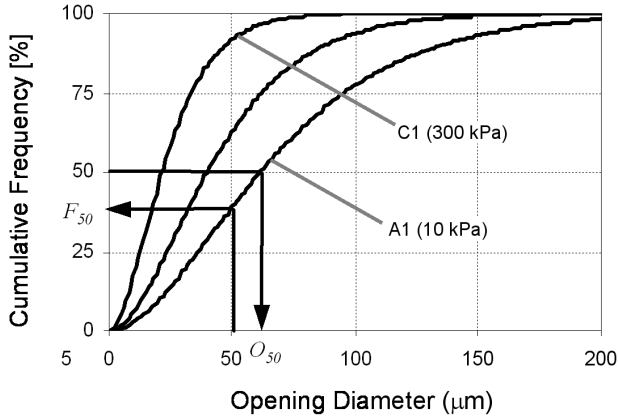
(b) Vertical surface image

Fig. 6. Measurement of largest inscribing opening size of geotextile section images

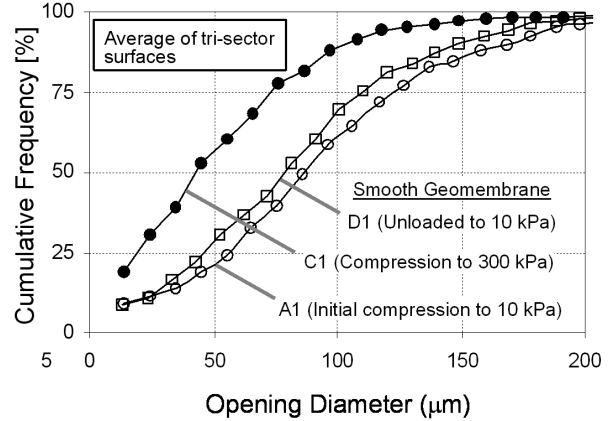
있는(weaving) 상태로 배열되어 있음에서 기인한다. 편향율(aspect ratio)이 작은 요소(phase)들은 지오텍스타일 제조 공정중 초기의 늘어뜨림(lay-down), 니들펀칭(needle punching)에 의한 필라멘트의 재배열에 의한 것임을 알 수 있다.

### 4.3 시험 결과 및 고찰

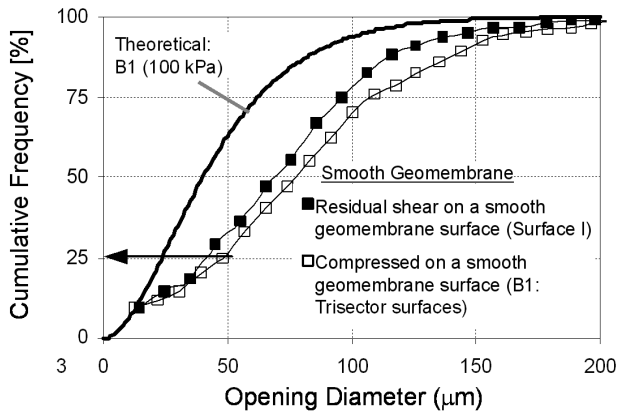
Lombard et al.(1989)이 개발한 이론적 공극크기 계산치와 연직단면 이미지분석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서, 이론적인 값을 구하기 위한 필라멘트의 평균지름은 실내시험 결과치를 바탕으로  $35\mu\text{m}$ 로 산정하였다.  $F_i$



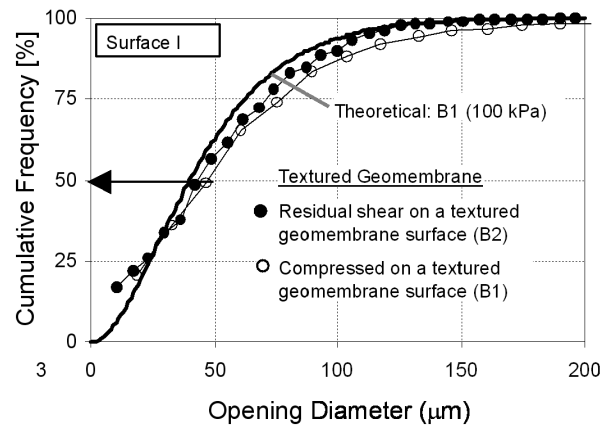
(a) Theoretical Values by Lombard et al. (1989)



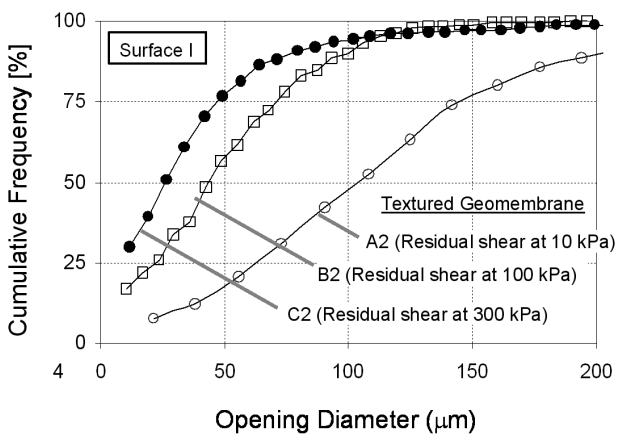
(b) Normal Stress on a Smooth Geomembrane



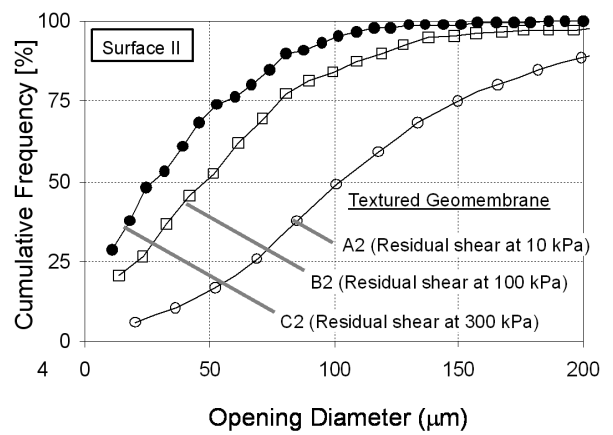
(c) Effects of Residual Shear on a Smooth Geomembrane



(d) Effects of Residual Shear on A Textured Geomembrane Surface



(e) Residual Shear State at Different Normal Stress (Textured Geomembrane; Shear Surface, I)



(f) Residual Shear at Different Normal Stress (textured Geomembrane; Cross-Shear Surface, II)

Fig. 7. Results of LIOS measurements from vertical sections with various boundary conditions

는  $i \mu\text{m}$ 보다 큰 공극의 분포빈도를 축적백분율(cumulative percent frequency)로 나타낸 것이다. 또한  $O_j$ 는 축적 백분율  $j\%$ 에 해당하는 공극의 지름을 나타낸다(Fig. 7a).

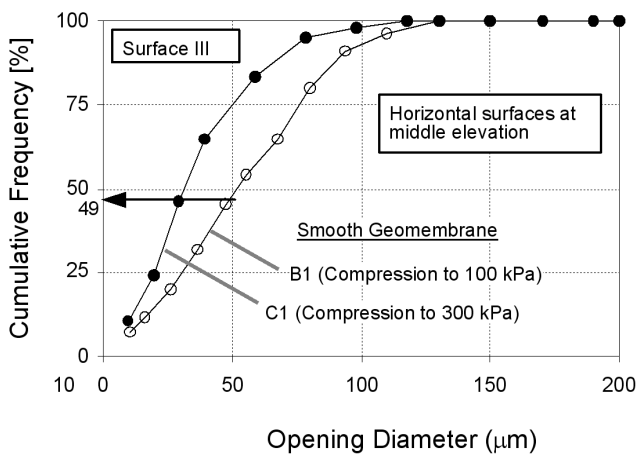
Fig. 7b는 연직 압축응력이 지오텍스타일 공극 크기 변화에 미치는 영향을 나타낸다. 축적빈도(cumulative frequency) 50%에 해당하는 공극직경이 압축응력이 10kPa에서 300kPa로 증가함에 따라  $45\mu\text{m}$ 가량 감소하였으며, 다시 압축응력을 10kPa로 되돌렸을 경우 초기치의 90% 정도 수준으로 회복한 것을 알 수 있다. Fig. 7c는 GM-S 표면에서 100kPa의 압축응력하에서 전단되었을 경우 공극 크기의 변화를 나타낸다. 동일 압축응력 하에서 지오멤브레인 표면 거칠기에 의하여 작은 공극의 수가 증가되었음을 Fig. 7d에서 볼 수 있다.  $50\mu\text{m}$ 보다 작은 공극의 축적빈도가 압축 또는 전단시 모두 25% 정도 증가되었으며, 이는 지오텍스타일 필라멘트와 지오멤브레인 표면 요철(texture element) 사이에서 발생하는 응력 및 필라멘트 집중에 의한 것으로 나타났다. 잔류 전단응력 상태(residual shear state)에서도 필라멘트의 추가적인 밀도 증가가 GM-S와 GM-T상에서 공히 일어났으며,  $F_{50}$ 값 5% 증가로 나타낼 수 있다(Fig. 7c와 7d).

지오텍스타일이 GM-T면에서 전단되었을 경우 발생하는 필라멘트 배열 변화(reorientation)와 결과적으로 발생하는 LIOS 분포 변화를 Fig. 7e와 7f에 나타내었다. 전단 방향 표면(Fig. 5b의 face II)은 face I의 경우와 유사한  $F_{50}$  값을 가지나  $F_{75}$  값은 전단면(Fig. 5b의 face I)에 비교하여 약 4% 감소한 값을 보인다. 이러한 결과는 전단면에서 필라멘트의 재배열이 일어나 필라멘트의 빈도가 크게 증가

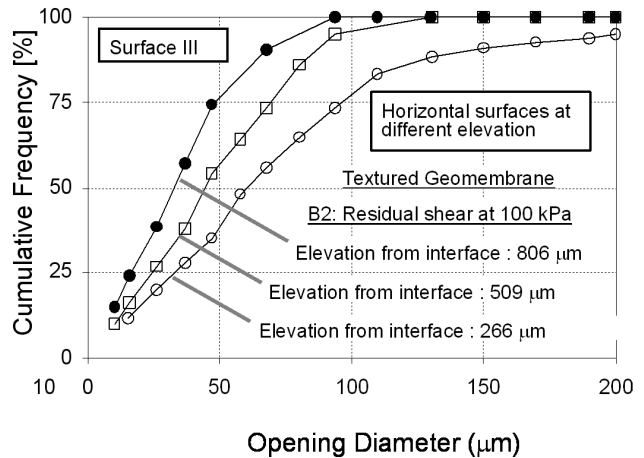
될 것이라는 예상과 다른 결과를 나타낸다. 이러한 변화는 지오텍스타일과 지오멤브레인이 서로 맞물리는 지점에서만 관찰되었으며 지오멤브레인 요철 변형과 이에 따른 표면 거칠기 감소에 기인한 것으로서 그 영향정도는 크지 않다.

Fig. 5b의 face I에서 필라멘트 숫자가 감소한 것을 관찰할 수 있으나, 많은 필라멘트가 전단방향으로 재배열됨으로써 증가된 편평률(aspect ratio, AR)을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 편평율이 큰 필라멘트가 공극 크기를 감소시키고 공극네트워크 모양을 변화시켜 결과적으로 내접할 수 있는 공극의 크기를 제한하였다. 또한 지오텍스타일은 상대적으로 큰 공극율을 가지며 증가된 필라멘트 개수 또는 감소된 필라멘트 직경이 LIOS에 상대적으로 적은 영향을 미친 것으로 나타났다. Fig. 7a에 나타낸 이론적인 선들은 공간상에서 필라멘트가 직선을 유지하며 네트워크를 구성한다는 가정을 바탕으로 계산된 것이다. 지오텍스타일 제조 당시 얇은 필름형식으로 텍스타일을 늘어뜨리는 경우는 2차원에 가까운 구조를 가지겠지만, 현미경 하에서 관찰되는 지오텍스타일은 일반적으로 불연속이며 불규칙한 곡률을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 이론과 관찰 결과의 차이는 실제 지오텍스타일 내부에 큰 공극의 수가 많음에서 기인한다고 할 수 있다.

Fig. 8은 지오텍스타일 수평방향 절단면(Fig. 5b의 face III)으로부터 구한 이미지들이다. Fig. 8a는 GM-S표면에서 압축된 지오텍스타일의 중간두께에서 관찰한 결과로서, 압축력이 공극 크기 분포에 미치는 영향을 나타낸다.  $50\mu\text{m}$ 보다 작은 공극의 축적분포가 연직응력이 100kPa에서 300kPa로 증가함에 따라 약 25% 증가됐음을 알 수 있



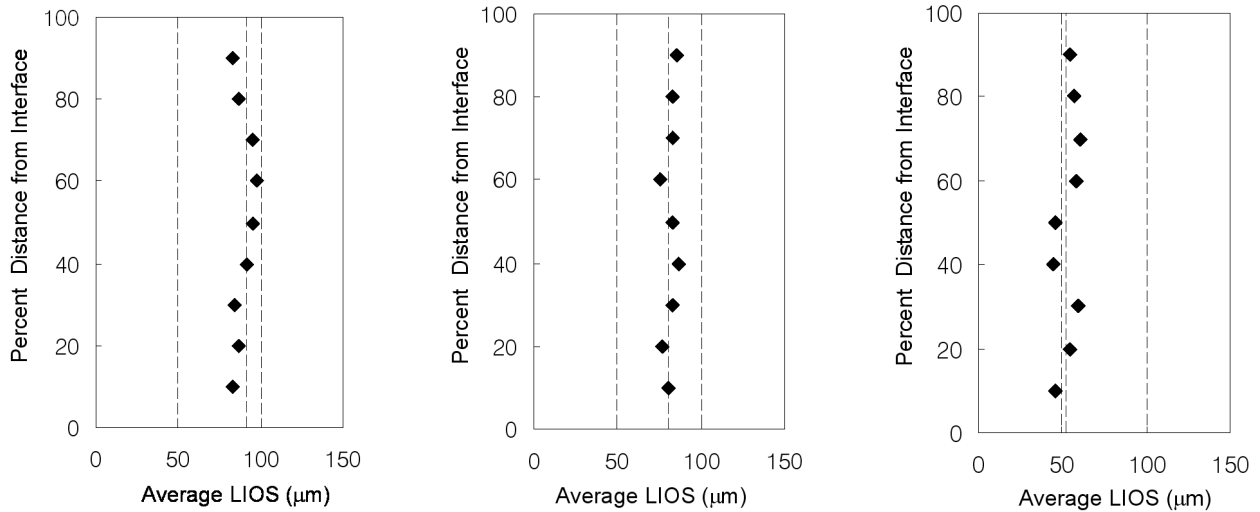
(a) effects of normal stress on a smooth geomembrane surface (middle elevation)



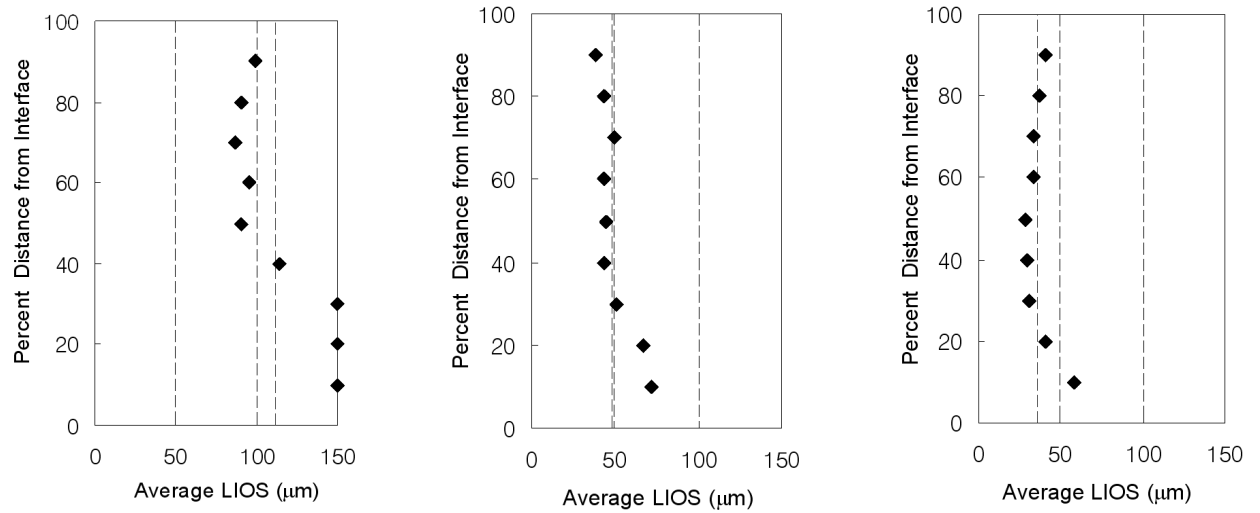
(b) variation of LIOS at 100 kPa with elevation

Fig. 8. Results of LIOS measurements from horizontal surfaces





(a) Compressed on GM-S, Normal Stress: 10kPa (b) Compressed on GM-S, Normal Stress: 100kPa (c) Compressed on GM-S, Normal Stress: 300kPa



(d) Sheared against GM-T, Normal Stress: 10kPa (e) Sheared against GM-T, Normal Stress: 100kPa (f) Sheared against GM-T, Normal Stress: 300kPa

Fig. 9. Change of average LIOS distribution with load conditions-Face I

다. 지오텍스타일-지오멤브레인 접촉면과 평행한 면은 AP가 큰 필라멘트로 구성되어 있으며 작은 공극의 비율이 크게 나타났다. 예를 들어 GM-S와 접하는 지오텍스타일 연직면(Fig. 7c)의  $F_{50}$ 는 연직하중 100kPa에서 26%이지만 시료 중간 깊이에서의 수평면은 같은 연직하중 조건하에서 49%의 값을 나타낸다. Fig. 8b는 여러 심도에서의 재료의 수평면에서의 공극 크기의 변화를 나타낸다. 여기서 데이터는 마찰형 지오멤브레인 GM-T면에서 전단된 지오텍스타일로부터 구한 값이다(Fig. 4b의 B2점). 지오텍스타일 필라멘트가 지오멤브레인 요철부에서 집중되며 작은 공극의 분포가 인터페이스로부터 먼 지점에서 발견됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 지오텍스타일-지오멤브레인 층으로 이루어진 상태에서 지오텍스타일 공극크기의 심도별로 분포를 나타낸 예이다. GM-S 표면에서 평균 공극 크기가 압축응력이 10kPa일때 91 $\mu$ m이었으나(Fig. 9a), 압축응력이 100, 300kPa로 증가함에 따라 80.5, 52.1 $\mu$ m로 각각 감소함을 알 수 있다(Fig. 9b, 9c). 마찰형 지오멤브레인 상에서 전단된 경우 압축응력이 10kPa에서 100, 300kPa로 증가함에 따라 재료의 심도별 평균 공극의 크기가 114.1 $\mu$ m에서 50.4, 37.0 $\mu$ m로 각각 감소하였다. 또한 Fig. 9d에 나타낸 바와 같이 지오멤브레인과의 인접하는 인터페이스(y-축 0~30 범위)에서 공극의 크기가 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 압축응력이 낮은 경우(10kPa) 후크-루프(hook-

and-loop) 현상과 함께 재료가 연직방향으로 다일레이션(dilation) 하는 것을 잘 보여준다(Fig. 4b 참조). 연직응력이 큰 (100, 300kPa) 경우 제한된 다일레이션 현상을 볼 수 있다(Fig. 7e, 7f). 연직응력이 100, 300kPa하에서 거친 지오멤브레인 표면에서 전단됨에 따라 평균 공극 크기는 약 32, 16.5% 감소하였다(Fig. 9e, 9f). Fig. 9d의 경우와 유사하게, 인터페이스 (y-축 0~30)에서 평균 공극 크기가 13~22% 정도 증가한 것을 볼 수 있는데, 이것은 모래입자와 표면 요철이 있는 재료간의 전단 시험을 할 경우 발견되는 현상(Frost et al., 2012)과 유사하다고 할 수 있다. 본 논문 4장에 나타난 지오텍스타일의 공극 크기 분포와 지오텍스타일 제조회사가 제공한 공칭공극 크기 180 $\mu$ m와 비교하면, 제조회사가 사용한 기존의 물리적인 방법 즉, 체분석 방법을 사용하였을 경우 지오텍스타일 구조의 교란이 발생함으로써 공극 크기를 과대평가한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 압축 및 인터페이스 전단에 의해서 발생하는 지오텍스타일의 공극 크기변화를 실내시험과 디지털 이미지 분석을 통하여 정량화하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 점성이 낮고, 양생기간 동안 온도변화 및 체적변화가 적은 에폭시 레진을 선택하여 지오텍스타일을 포화시킴으로써 필라멘트 구조의 교란을 최소화하며 양생시킬 수 있었으며, 분포학적(streological) 개념을 바탕으로 시료를 절단한 후 디지털 현미경으로 단면을 관찰하고 캡처함으로써 이미지 분석이 가능해졌다.
- (2) 축적빈도 50%에 해당하는 공극직경이 압축응력이 10kPa에서 300kPa로 증가함에 따라 45 $\mu$ m가량 감소하였으며, 다시 압축응력을 10kPa로 되돌렸을 경우 초기치의 90%정도 수준으로 회복하였다. 마찰형 지오멤브레인 표면에서 연직응력 100, 300kPa을 받으며 전단되었을 경우 평균 공극의 크기가 각각 32, 16.5% 감소하였다.
- (3) 마찰형 지오멤브레인 상에서 전단된 경우 압축응력이 10kPa에서 100, 300kPa로 증가함에 따라 재료의 심도별 평균 공극의 크기가 114.1 $\mu$ m에서 50.4, 37.0 $\mu$ m로 각각 감소하였다. 지오멤브레인 마찰에 의한 공극 크

기의 감소가 연직응력 100, 300kPa 하에서 각각 32, 16.5%를 나타내었다.

- (4) 지오텍스타일 수평방향 절단면을 관찰한 결과 50 $\mu$ m보다 작은 공극의 축적분포가 연직응력이 100kPa에서 300kPa로 증가함에 따라 약 25% 증가되었다. 마찰형 지오멤브레인 GM-T면에서 전단된 지오텍스타일 필라멘트가 지오멤브레인 요철부에서 집중되며 작은 공극의 분포가 인터페이스로부터 먼 지점에서 발견되었다.
- (5) 지오텍스타일-지오멤브레인 인터페이스 부근에서 지오텍스타일 공극의 크기가 13~22% 정도 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 압축응력이 낮은 경우 후크-루프 현상과 함께 재료가 연직방향으로 다일레이션(dilation) 하는 것을 관찰할 수 있었다.
- (6) LIOS는 기존의 평균 공극을 측정이 아닌, 실제 공극크기 분포를 제공하는 장점이 있으며, 향후 지오텍스타일의 투수성, 필터재로서의 기능을 고려한 제품 설계에 반영할 수 있는 인자이다. 또한 본 연구과제 수행 결과, 특히 교란을 최소화하며 필라멘트 분포에 따른 섬유체 내부 구조변화를 파악하는데 유용한 것으로 판단된다.
- (7) 본 본문에서 언급한 공극 크기의 변화, 인터페이스로부터의 거리에 따른 분포 등의 관찰을 통하여 부직포가 표면 거칠기 상태에 따른 접촉 특성이 어떻게 달라지는지를 이해하는데 일조할 것으로 예상된다.

## References

1. ASTM D 4751, Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
2. ASTM D 6767, Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
3. ASTM D 1505, Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
4. ASTM D 1603, Standard Test Method for Carbon Black in Plastics, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
5. ASTM D 4491, Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
6. ASTM D 4632, Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles, ASTM International,

- West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
7. ASTM D 4751, Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  8. ASTM D 4833, Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes and Related Product, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  9. ASTM D 5199, Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  10. ASTM D 5261, Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  11. ASTM D 6693, Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  12. ASTM D 1004, Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
  13. Bhatia, S. K., and Soliman, A. F. (1990). "Frequency Distribution of Void Ratio of Granular Materials Determined by an Image Analyzer," *Soils and Foundations*, Vol.30. No.1, pp.1-16.
  14. Bhatia, S. K., Smith, J. L., and Christopher, B. R. (1996). "Geotextile Characterization and Pore Size Distribution: Part III. Comparison of Methods and Application to Design," *Geosynthetics International*, Vol.3, No.3, pp.301-328.
  15. Dove, J. E., and Frost, J. D. (1996). "A Method for Measuring Geomembrane Roughness," *Geosynthetics International*, Vol.3, pp.369-392.
  16. Frost, J. D., and Kuo, C. Y. (1996). "Automated Determination of the Distribution of Local Void Ratio from Digital Images," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.19, No.2, pp.107-117.
  17. Frost, J. D., and Park, J. Y. (2003). "A Critical Assessment of the Moist-Tamping Technique," *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.1, pp.57-70.
  18. Frost, J. D., Kim, D., and Lee, S. (2012). "Microscale geomembrane-granular material interactions," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vo. 3, No.1, pp.79-92.
  19. Gokhale, A. M., and Drury, W. J. (1994). "Efficient Measurement of Microstructural Surface Area Using Trisector," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.25A, pp. 919-928.
  20. Hebel, G. H., Frost, J. D., and Myers, A. T. (2005). "Quantifying Hook and Loop Interaction in Textured Geomembrane-Geotextile Systems," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.23, No.1, pp.77-105.
  21. Ibrahim, A. A., and Kagawa, T. (1991). Microscopic Measurement of Sand Fabric from Cyclic Tests Causing Liquefaction, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.14, No.4, pp. 371-382.
  22. Kim, D., and Frost, J. D. (2005). "Multi-Scale Assessment of Geotextile-Geomembrane Interaction," *Proc. of NAGS 2005/GRI 19 Conference*, Las Vegas, USA, 8p.
  23. Kim, D. (2006). Multi-Scale Assessment of Geotextile-Geomembrane Interaction, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 250p.
  24. Koerner, R. M. (1998) *Designing With Geosynthetics*, Fourth, Prince Hall, 761p.
  25. Lombard, G., Rolin, A., and Wolff, C. (1989). "Theoretical and Experimental Opening Sizes of Heat-Bonded Geotextiles," *Textile Research Journal*, Vol.59, No.4, pp.208-217.
  26. Rebenfeld, L., and Miller, B. (1995). "Using Liquid Flow to Quantify the Pore Structure of Fibrous Materials," *Journal of Textile Institute*, Vol.86, No.2, pp.241-251.
  27. Rigo, J. M., Lhote, F., Rollin, A. L., Mlynarek, J., and Lombard, G. (1990). "Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination," *ASTM Special Technical Publication*, Vol.12, No.4, pp.90-101.
  28. Underwood, E. E. (1969). "Stereology, or the quantitative evaluation of microstructure," *Journal of Microscopy*, Vol.89, Pt2, pp.161-180.
  29. Underwood, E. E. (1970). *Quantitative Stereology*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Maryland, 274p.
  30. Vaughan, N. P., and Brown, R. C. (1996). "Observations of the microscopic structure of fibrous filters," *Journal of Filtration and Separation*, Vol.33, No.8, pp.741-748.

## 기호

- AP : 편향률 (Aspect Ratio)  
 GM-S : 표면거칠기가 없는 지오멤브레인(Smooth Geomembrane)  
 GM-T : 표면거칠기가 있는 지오멤브레인(Textured Geomembrane)  
 GT : 지오텍스타일(Geotextile)  
 LIOS : 최대내접공극크기(Largest Inscribing Opening Size)