

# 네트워크 모형을 이용한 다층 섬유집합체의 유체전달에 대한 이론적 모델설정

김종범, 홍철재  
 숭실대학교 섬유공학과

## 1. 서론

섬유집합체물질은 기공성 물질로 흡수, 수분투과, 여과, 투배수성이 우수하여 의류, 청정, 토목, 위생분야 등에서 널리 사용된다. 이들 제품은 유체 전달과 더불어 형태안정성을 높이기 위하여 서로 다른 기능을 갖고 있는 섬유집합체들을 다층으로 적층시킨 복합구조로 설계 제조된다. 기공분포도와 유체투수도는 제품성능을 분석하는데 중요한 요소이다. 복합 구조체에서 구조 모형 및 유체 전달메카니즘을 설정하고 기공분포도와 이와 연관한 유체전달 현상들을 정량적으로 묘사 예측할 수 있다면 제품 개발을 위하여 반복적 시료제작과 실험 분석 등으로 소요되는 시간과 경비를 크게 절약할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 섬유복합구조체에 있어서 네트워크 모형을 이용하여 모델을 설정하고 이를 바탕으로 기공분포도와 유체전달성능에 대해 묘사 분석하고자 한다. 고려한 구조적 인자는 구성 섬유물질의 기공도, 기공크기, 분포도, 그리고 적층수이다.

## 2. 모델

본 장에서는 이미 기공구조를 알고 있는 섬유집합체들로 여러 층 혼합 적층된 복합구조체에서 기공 분포도와 유체 투수도를 정량적으로 분석하기 위한 모델설정과 묘사방법에 대하여 설명하고자 한다. Figure 1은 기공구조가 다른 A, B, C의 섬유집합체가 3층으로 적층된 복합구조를 간단한 네트워크 모형으로 나타낸 것이다. 여기서 유체는 유압에 의해 구성체 하부에서 상부로 최단 기공 경로를 따라 전달되고 구성체에서 기공크기가 가장 작은 층이 유체흐름을 결정한다고 가정한다. 복합체에서 각 구성층을 이루는 섬유집합체의 기공도와 기공분포도의 형태는 시료제조공정 조건에 따라 달리 나타난다. 묘사를 위한 예로 각 구성층에서 기공분포도가 Figure 2와 같고, 계산편의상 시료 표면을 Figure 3과 같이 25개의 셀(cell)로 구성되어

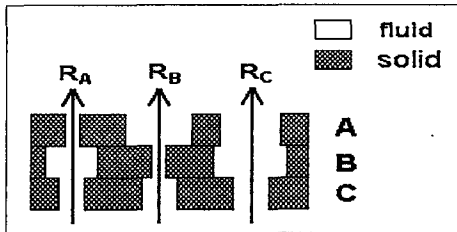


Figure 1. Simple network model for a multi-laid fibrous structure

구조체의 각 셀에서 유체전달에 유효한 기공크기는 Figure 3 (c)과 같이 나타낼 수 있다. 복합 구조체의 기공 분포도는 Figure 3 (c)에서 전체 19개의 유효 기공 셀을 기공 크기별로 분류하고 이를 비율로써 계산하여 구할 수 있다. Figure 4는 이와 같이 계산한 기공분포도를 나타낸 것이다. 네트워크 모형을 이용한 유체 투수도 계산은 다음과 같다. 기공이 일정하고 반지름이  $R$  인 기공에서 유체 투수도 ( $k$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{R^2}{8} \quad (\text{단위: length}^2)$$

큰 유체흐름을 고찰하기 위하여 기공도를 포함시켜 투수도계수를 계산한다. 이 경우 기공크기가 서로 다른 기공이 인접 적층된 섬유복합구조체에서 유체투수도는 앞서 설명한 네트워크 모형과 기공분포도로부터 다음과 같이 유도된다.

$$k = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i}{N_T} R_i^2 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^N \frac{N}{N_T} \frac{n_i}{N} R_i^2 = \frac{\epsilon_a}{8} \sum_{i=1}^N f_i R_i^2$$

여기서,  $R_i$ 는 기공반지름,  $n_i$ 는 기공크기  $R_i$ 가 차지하고 있는 셀 개수,  $N_T$ 는 전체 셀 개수,  $N$ 은 넥트워킹 섬유물질로 막힌 부분을 제외한 즉, 유체흐름에 제한을 주지 않는 전체 유효 기공 셀 개수,  $\epsilon_a$ 는  $N/N_T$ 로 유효 기공도,  $f_i$ 는  $n_i/N$ 로 기공분포빈도를 나타낸다.

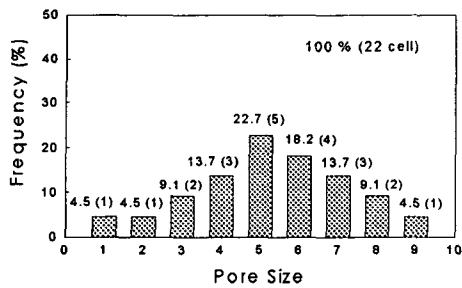


Figure 2. Typical pore size distribution of a component layer for modelling

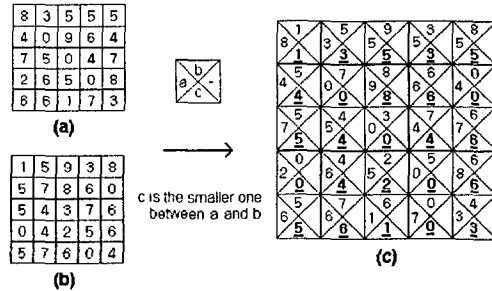


Figure 3. Random distribution of different pore sizes in lattice

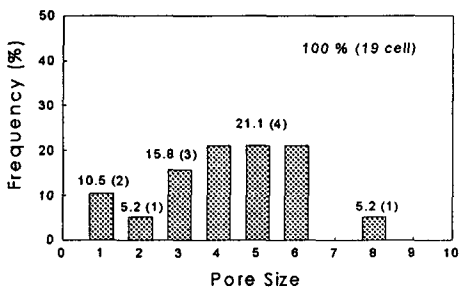


Figure 4. Pore size distribution of multi-laid fibrous structure

### 3. 실험

묘사를 위한 시료를 Figure 5와 같이 준비하였다. 적층시 시료의 기공분포도가 유체전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 (A), (B), (C)와 같이 평균기공크기는 같으나 분포형태가 다른 시료를 준비하였다. 또한 기공크기가 유체전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 (B), (D), (E)와 같은 평균기공크기가 다른 시료를 준비하였다. 모든 시료에서 기공도( $\epsilon$ )와 적층수(L)를 달리하여 묘사 분석하였다. 계산 편의상 구성층 표면의 셀 개수를 100개로 하였다.

### 4. 묘사

결과를 Figures 6-12에 나타내었다. Figures 6-8은 평균기공크기는 같으나 분포형태가 다른 시료 (A), (B), (C)에서 적층수(2-3층)에 따른 기공분포도를 묘사한 결과이다. 적층수가 증가할수록 분포

도 빈도가 작은 기공쪽으로 점차 변환되고, 따라서 평균기공크기는 감소한다. 감소의 정도는 구성시료의 기공 분포도가 넓은 시료일수록 더욱 크다.

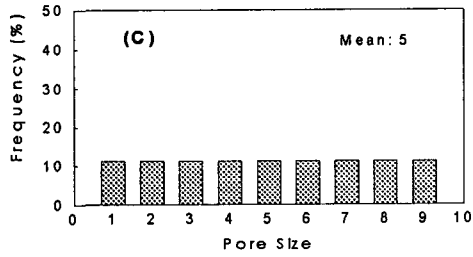
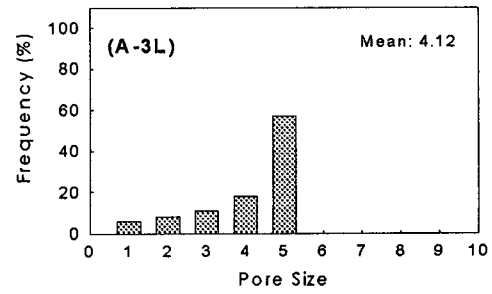
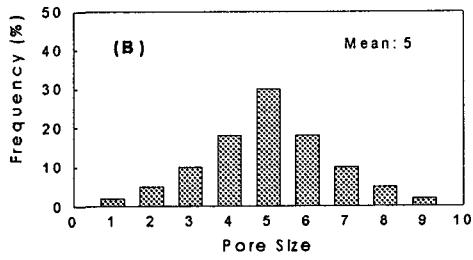
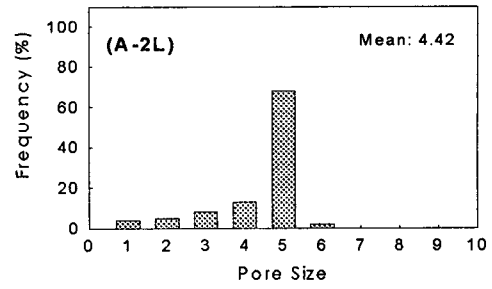
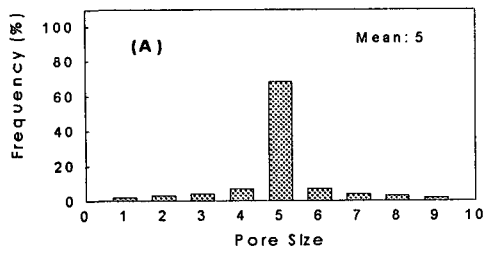
Figures 9는 시료 (A), (B), (C)에서 적층수에 따른 평균기공크기의 변화를 나타낸 것이다.

Figure 10은 기공크기가 서로 다른 시료 (B), (D), (E)를 적층하여 기공분포도를 묘사한 것이다. 복합층에서 작은 기공의 구성층이 유체흐름을 결정함으로 구성 시료중 기공크기가 가장 작은 시료(D)의 분포도와 유사하게 나타났다. Figure 11은 평균기공크기는 같으나 분포형태가 다른 시료 (A), (B), (C)에서 적층수에 따른 투수도를 계산하여 나타낸 것이다. 단층에서는 기공분포형태가 넓은 시료 (C)에서 투수도 값이 가장 높았으나, 반대로 적층수가 증가할수록 급속하게 감소하였다.

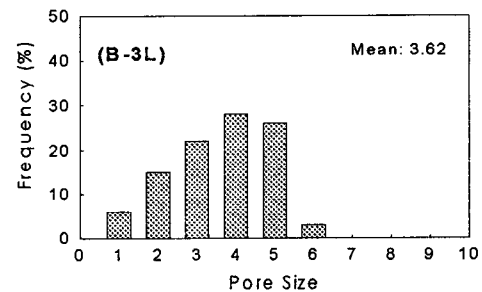
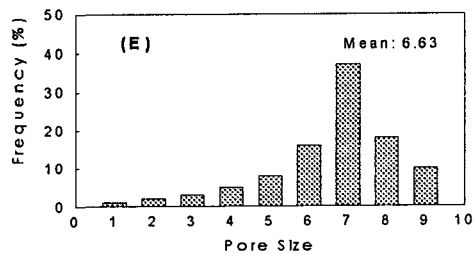
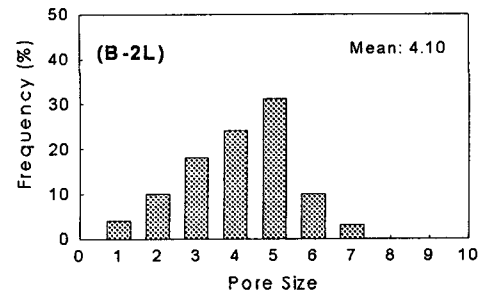
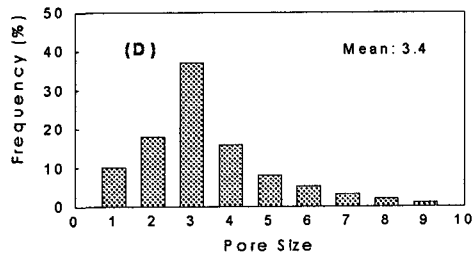
Figure 12는 평균기공크기는 같으나 분포형태가 다른 시료 (A), (B), (C)에서 적층시 구성시료의 기공도에 따른 투수도변화를 묘사한 것이다. 기공도가 감소할수록 투수도는 급속히 감소하는데 시료의 기공분포형태에 따라 감소경향이 매우 달리 나타났다.

### 5. 결론

넥트워킹 모형을 이용하여 다층 섬유집합체 구조의 유체 투수현상에 대하여 모델설정과 묘사 분석을 하였다. 고려한 구조적 인자는 기공크기, 분포도, 적층수, 기공도이다. 이들 인자는 복합체의 유체 전달에 크게 영향을 끼쳤으며, 모델을 이용한 정량적 예측 묘사는 투수성과 연관한 제품개발에 도움을 줄 것으로 사료된다.



**Figure 6.** Pore size distribution of sample A according to the number of layers



**Figure 5.** Pore size distribution of the sample selected for simulation

**Figure 7.** Pore size distribution of sample B according to the number of layers

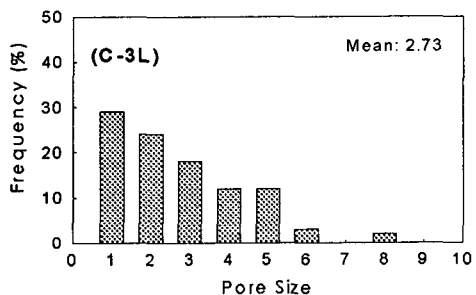
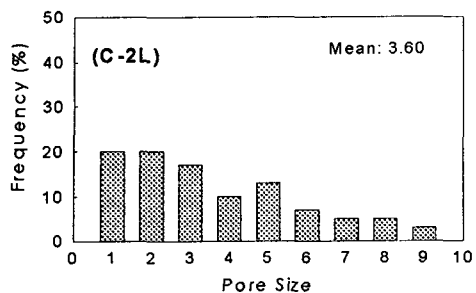


Figure 8. Pore size distribution of sample C according to the number of layers

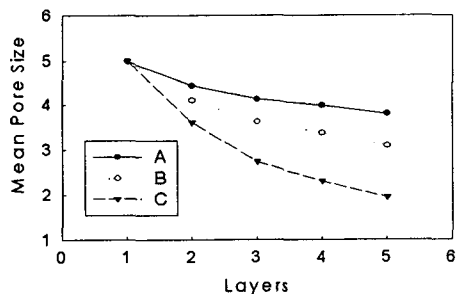


Figure 9. Mean pore size against the number of layers

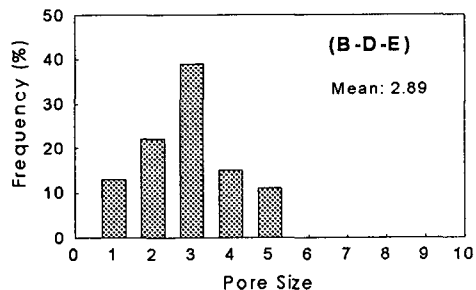


Figure 10. Pore size distribution of B-D-E multi-laid structure

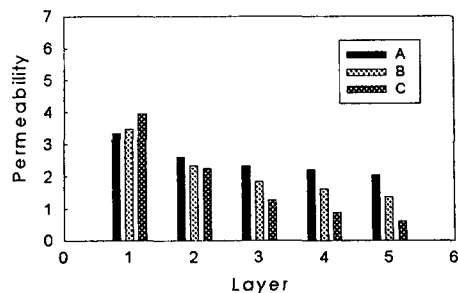


Figure 11. Permeability against the number of layers

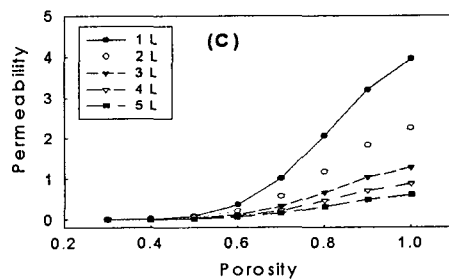
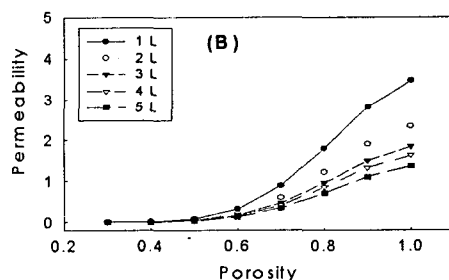
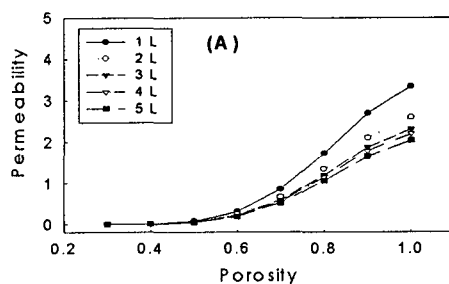


Figure 12. Permeability against the porosity of component layer