

치즈형 섬유집합체의 물 투과 특성

김동환, 이승윤, 서문호

건국대학교 섬유공학과

1. 서론

섬유제품의 염색 및 대부분의 후가공 공정에서는 물이나 특수 용액을 매체로 사용하여 섬유에 특정한 처리를 하게 된다. 이러한 매체는 염료나 특수한 기능을 가진 물질을 섬유표면에 전달하여 섬유내부로의 확산을 유도하거나 섬유표면에 균일하게 도포 하여 그 기능을 발휘하도록 하거나, 탈호공정이나 감량가공과 같이 섬유 표면에 있는 물질을 화학적이나 물리화학적으로 제거하는 역할을 하게 된다. 섬유제품에 가해지는 이러한 공정들은 그 처리 속도보다는 제품 전체를 통해서 균일한 처리가 가해지도록 하는 것이 가장 중요한 공정제어 인자가 된다. 특히 염색의 경우는 색상의 발현이 그 목적이므로 불균염은 섬유제품의 제 1의 기피인자가 된다. 염색공정에서는 불균염을 피하기 위해서 염색속도를 늦게 하여 균염을 유도하는 완염제나 균염제 등을 사용하고 있다. 그러나 이러한 화학적인 염색조제의 역할은 작은 범위의 균염을 유도할 수는 있으나 큰 스케일의 염색의 균일화를 위해서는 염액자체의 적절한 이동이 가장 중요하다. 이를 위해 천의 염색에서는 염액과 천을 상대적으로 끊임없이 유동시키며, 섬유나 실의 염색에서는 압력을 가하여 염액을 연속적으로 투과시켜서 균염을 피하게 된다. 그러나 이 경우 투과되는 대상의 두께가 상대적으로 커서 투과되는 부분별 완전한 균염을 얻기가 힘이 든다. 단섬유 덩어리 경우는 염색후 방적과정에서 섬유들의 혼합에 의해 이러한 문제가 완충되는 효과를 보게된다. 그러나 사염(絲染)인 경우는 이러한 불균염 상태가 직물에까지 전파되기 된다. 따라서 실의 경우 염액의 효율적인 이동이 필수적이다.

사염에서 많이 사용되는 치즈형 패키지 염색에서는 염색상태의 조절을 위해 염색기의 압력을 제어하고 있으나 이에 대한 체계적인 연구는 부족하다. 본 연구에서는 먼저 패키지 염색공정에서 사치즈를 통과하는 염액투과현상의 규명을 위해서 치즈형태의 시료의 액체투과 속도측정을 위한 장치를 제작하였다. 이 장치를 사용하여 치즈 내외의 압력과 압력차, 치즈의 크기 및 섬유분율과 단위시간당의 유량과의 관계를 측정하고 이 결과들과 이론적인 결과들을 서로 비교하여 패키지 사염공정중의 치즈의 유체투과현상을 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

각각의 분리된 입자로 충전되었거나 세기공으로 충전된 고체를 통한 유체의 흐름에 대한 압력차와 유량의 관계를 나타내는 경험식으로는 d'Arcy의 법칙(식 (1))이 있다.

$$Q = \frac{k_D A \Delta P}{L} \quad \text{----- (1)}$$

단 여기서

Q : 단위시간당 투과하는 유량 ($[\frac{m^3}{sec}]$)

ΔP : 압력차 ($[Pa]$)

A : 유체의 흐름에 수직한 단면적 ($[m^2]$)

L : 유체투과 길이

k_D : 투과계수

위의 식은 유체가 동일한 단면적으로 흐를 경우에 적용된다. 여기서 투과계수와 유체의 점성, η 를 곱한 값을 비투과계수, $K_D = k_D [m^4/N \cdot sec] \times \eta [Pa/m^2] = k_D \eta [m^2]$ 라 정의되며 $1 \cdot 10^{-12} [m^2]$ 를 1 d'Arcy라고 정의 된다.

위의 경험식을 점성유체의 흐름과 기공도 및 단위부피당의 연관지어 d'Arcy의 식을 물리적으로 해석한 결과가 Blake-Kozeny식이다. 이 Blake-Kozeny식에 의한 투과계수, k_D 를 구해보면 다음과 같다.

$$k_D = \frac{1}{4.2} \frac{\omega^3}{\eta S_0^2 (1-\omega)^2} \quad \text{-----} (2a)$$

단 여기서

ω : 단면당 입자들 면적분율

S_0 : 입자들 단위부피당 표면적 ($[m^{-1}]$)

이 Blake-Kozeny식 역시 크게는 d'Arcy의 식 모양과 동일하다. Kozeny의 식은 압력의 변화에 따라 투과매체의 섬유부피분율의 변화가 없는 경우에 한하게 된다. 이러한 경우의 예로는 충전입자가 압력에 따른 변형이 거의 무시될 때 가능하며 이러한 충전은 일반적인 금속이나 세라믹 물질의 경우에는 매우 타당하다. 그러나 본 연구에서 다루고자 하는 사(絲)치즈의 경우는 덩어리 전체의 하드니스가 금속과는 비교될 수 없이 부드러운 경우라서 유체투과시 가해지는 압력의 영향을 무시할 수 없다. 이러한 점을 감안하여 압력에 따른 압축변형이 전무한 경우(case 1)와 압축변형이 있는 경우에 대하여 내부에서 외부로 투과하는 유체의 유량과 압력차간의 관계식을 구해보면 다음과 같이 된다.

case 1. 투과계수가 압력에 무관한 경우

$$Q = \frac{\pi \cdot h \cdot \omega^3}{2.1 \cdot \eta \cdot S_0^2 \cdot (1-\omega)^2} (P_{in} - P_{out}) \frac{1}{\ln \left[\frac{r_{out}}{r_{in}} \right]} \quad \text{-----} [3a]$$

case 2. 투과계수가 압력의 함수인 경우

$$Q = - \frac{\pi r \cdot h}{2.1} \frac{\left(1 - \left(\frac{V_f^3 P}{C} - (1-\omega_o)^3 \right)^{1/3} \right)^3}{\eta S_0^2 \left(\frac{V_f^3 P}{C} - (1-\omega_o)^3 \right)^{2/3}} \frac{dP}{dr} \quad \text{-----} [3b]$$

단 여기서

P_{in}, P_{out} : 치즈 내외의 압력 ($[Pa]$)

r_{in}, r_{out} : 치즈 내외의 반경 ($[m]$)

- h : 치즈의 높이 ($[m]$)
- η : 유체의 점도 ($[Pa \cdot sec]$)
- S_0 : 단위부피당의 비체적 ($[m^{-1}]$)
- C : 상수 ($[Pa \cdot m^3]$)
- V_j : 섬유유리의 부피 ($[m^3]$)
- ω_0, ω : 초기 및 압력을 받은 뒤의 치즈내의 공극율

Case 2의 경우는 압력차이와 유량의 관계가 선형인 case 1과는 다르게 저항력이 압력에 따라 증가하게 되어 복잡한 적분함수관계를 이룬다.

섬유집합체를 통과하는 유체의 유동패턴을 짐작할 수 있는 지수로서는 Reynolds number Re 가 있다. 본 치즈를 관통하는 유체에 대한 새로운 Reynolds number, Re_c 를 다음과 같이 정의할 수 있고

$$Re_c = \frac{\rho \bar{v}_s}{\eta(1-\omega)S_0} \text{ ---- [4]}$$

여기서 \bar{v}_s 는 표면상의 속도(superficial velocity)로서 다음과 같다.

$$\bar{v}_s = \frac{Q}{A} \text{ ---- [5]}$$

$Re_c < 2$ 일 경우 층류이고 $2 < Re_c < 1000$ 이면 층류와 난류의 전이영역으로 여겨지며, $Re_c > 1000$ 이면 난류이다.

3. 실험

3-1. 실험장치의 제작

치즈상태의 사 팩케지의 물 투과 실험을 위해서 아래의 다이어그램에서 보인 바와 같은 장치를 제작하였다. 시료의 장착은 Fig. 1의 S에 한 개의 치즈를 부착하여 압력과 유량과의 관계를 측정할 수 있도록 제작하였다. 입력되는 물의 압력을 높이기 위해 가압 펌프(P)를 설치하고 여기서 가압된 물이 필터(F)를 통과하여 실린더의 내부로 들어간다. 이 때 시료의 내부압력은 기기 상단에 부착된 압력계(G1)로 읽을 수 있으며 외부는 치즈와 동심원을 이룬 아크릴 실린더를 사용하여 충분한 양의 물을 외부에 유지하여 외부의 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 외부압력의 제어는 출구밸브를 저항을 사용하였다

3-2. 실험 시료

본 실험을 위한 시료는 가연된 아크릴 필라멘트사 치즈들을 사용하였다. 두께(권량)가 다른 치즈를 실험하기 위하여 동일한 권사기에서 감은 서로 다른 권량의 치즈를 사용하였다. 섬유유의 분율 변화를 비교하기 위해서는 수축된 시료들과 미수축된 시료들을 사용하였다. 시료의 안쪽면을 일정하게 유지하고 물의 통과에 대한 저항을 줄이기 위해 내부실린더는 사각구멍이 촘촘히 뚫린 플라스틱 실린더를 사용하였다.

3-3. 실험 방법

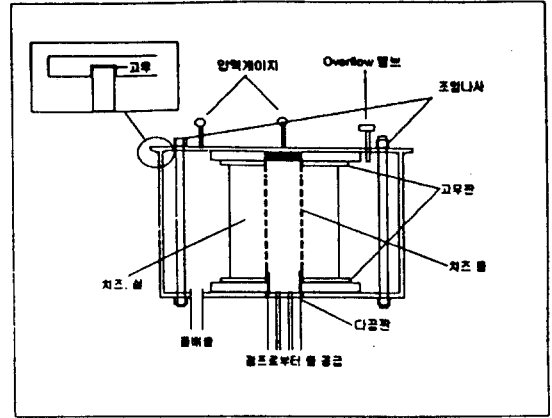
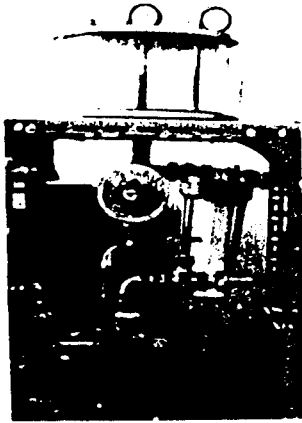


Fig. 1a Water Permeability Measuring Instrument Fig. 1b A Diagram for the Cheese Holder

본 실험장치는 외압의 제어를 출구밸브로 조절하여 사용하였으므로 기기 장치의 표준화 (calibration) 작업이 필요하다. 이를 위해서 출구밸브의 잠금 위치를 다섯 군데 고정하고 내압을 증가시키면서 밸브저항계수를 측정하여 보았다. 그 결과 Fig. 2에서 보인 바와 같이 각 밸브의 개방위치에서 송출되는 유량은 내압이 증가하면 선형적으로 증가하며 동일한 압력에서는 밸브의 개방정도를 증가시키면 송출량 역시 증가한다. 만약 밸브를 통과하는 유동의 패턴이 동일하다면 압력증가에 따른 송출수량 증가속도는 동일하여야 하나 밸브를 완전히 연 위치에서 단혀 질수록 압력차의 증가에 대해 기울기가 감소하고 있다. 이 이유는 유동의 국부적인 현상이 달라 그렇게 된 것으로 생각된다.

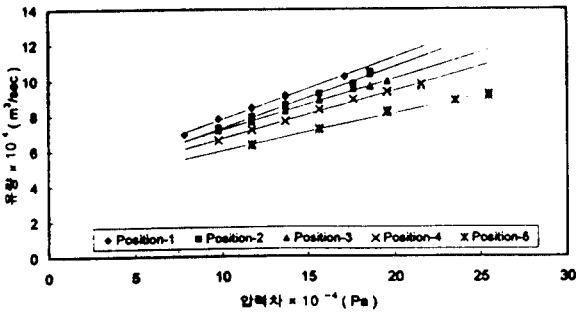


Fig. 2 Calibration Curve

유량의 측정을 위해서 유량계를 부착하여 그 수치를 읽었으나 더 정확한 유량의 측정을 위해서는 일정용량의 용기에 채워지는 시간을 측정하여 유량을 계산하였다. 시료들의 압력에 따른 유량 측정방법은 시료를 장착한 후 calibration 표에 의해 치즈 외압의 조건 설정에 따른 밸브의 개폐위치를 설정하고 내압을 바꾸어가면서 유량의 변화를 측정하였다. 투과계수의 환산은 다음의 식을 사용하였다.

$$k_D = \frac{Q}{2\pi h(P_{in} - P_{out}) \ln\left[\frac{r_{out}}{r_{in}}\right]} = \frac{\omega^3}{2.1 \cdot \eta \cdot S_0^2 \cdot (1-\omega)^2} \text{ --- [6]}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 내압, 외압 및 압력차와 투과계수

Fig. 3a와 3b는 미수축, 수축 시료들의 내압과 외압의 차이, 즉 압력차와 유량의 변화를 보여준다. 이 결과를 보면 모든 권취량에서 압력차가 거의 직선적으로 증가한다. 수축시료의 경우 권취량이 가장 큰 경우 압력차이가 커지면 유량의 증가속도는 둔화되는 것을 알 수 있다. Fig. 4a는 수축된 시료에 대한 외압, 내압, 및 압력차에 대한 투과계수의 변화를 보여준다. 만약

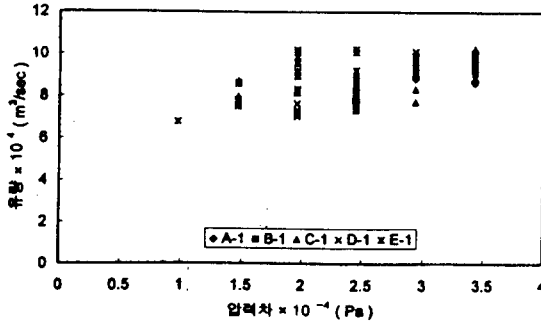


Fig. 3a Flow Rate vs. Pressure Difference Unshrunk Acryl Filament Cheese

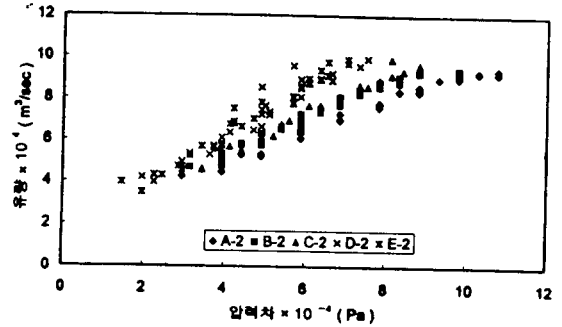


Fig. 3b Flow Rate vs. Pressure of Difference of Shrunk Acryl Filament Cheese.

치즈내의 섬유분율이 가한 압력과 무관하다면 식 [3a]에서 보인 것처럼 투과계수는 압력에 무관하여야 한다. 그러나 실험에서 구한 투과계수는 압력차이, 내압 및 외압에 대한 모든 결과는 압력 및 압력차가 증가하면 투과계수가 감소하고 있다. 투과계수를 감소시킬 수 있는 인자로서는 식 [6]의 우측 항에서 섬유분율과 투과거리 이외에는 없다. 섬유분율이 변화할 수 있는 가능성은 치즈가 압축압력을 받아서 부피가 줄어드는 경우이며 이와 동시에 투과거리의 변화가 생긴다. 내압 및 외압 모두 압력차와는 독립적이거나 내압, 외압이 커진다는 사실은 시료가 받는 압축응력이 커지고 있는 경향과 일치한다. 따라서 이러한 압력변화에 의해 시료가 압축되어 섬유분율이 커져서 생긴 결과로 추정된다.

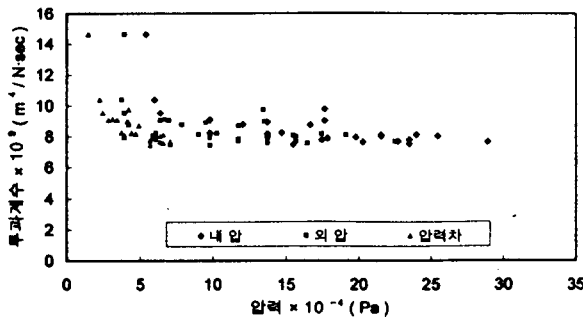


Fig. 4a Permeation Coefficients of E2 as a Function of Inner, Outer Pressure and Pressure Difference

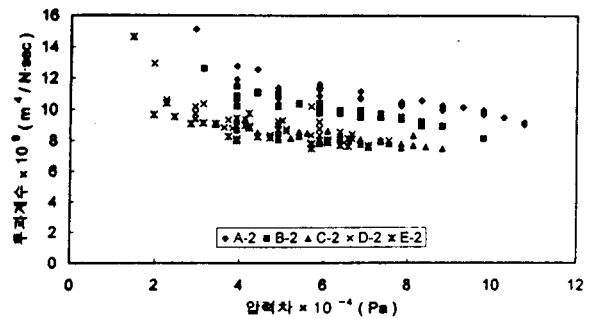


Fig. 4b Permeation Coefficients of Shrunk Acryl Filament Cheese as a Function of Pressure Difference

4.2 기공도와 유체투과계수

투과계수의 섬유분율 의존도를 효율적으로 조사하기 위해서 수축시료와 미수축시료의 투과계수를 비교해 보았다. 투과계수가 압력에 따라 변하므로 비교수치로서는 압축되어 평형에 도달한 투과계수값과 기공도를 비교해 보았다. Fig 5는 이 결과를 보여준다. 이 결과

는 투과계수의 로그값은 기공도에 따라 선형적으로 커지는 것을 보인다. 이 값과 필라멘트사의 표면을 두 가지 서로 다른 가정으로 계산하여 그 계산된 투과계수와 실험치를 비교하여 보았다. 한가지 가정은 필라멘트사가 각 필라멘트들이 서로 묶여져있는 형태이며 다른 가정은 각 구성필라멘트들이 모두 분리되어 거동한다는 가정이다. 이 이론식으로 구한 결과와 실험치를 비교해 본 결과 본 치즈의 물투과저항은 각 필라멘트들이 서로붙어 있다고 보고 계산한 결과와 유사함을 알 수 있다.

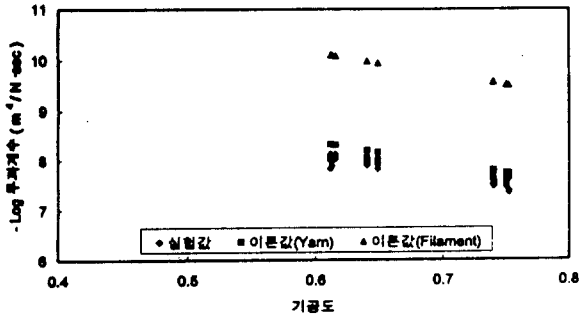


Fig. 5 Void Fraction vs. Permeation Coefficients

5. 결론

1. 치즈형 보빈의 투과특성을 측정할 수 있는 측정장치를 제작하여 치즈형 보빈을 통하여 통과하는 유량과 보빈 내부와 외부의 압력을 조절하여 투과특성을 측정할 수 있었다.
2. 측정기를 사용하여 측정한 결과 내압과 외압사이 압력차의 증가에 따라 유량은 증가하였고 같은 압력차에서 치즈형 보빈의 두께가 증가 할수록 유량은 감소하였다.
3. 치즈형 보빈에서 물질의 투과특성중 한가지인 투과계수는 시료의 내부반경에 대한 외부반경 비율의 자연로그값과 유량, 압력차, 높이의 관계식으로 구할 수 있었다.
4. 수축된 치즈형 보빈의 경우 보빈 수축시 내부의 구성조직이 외부조직의 힘을 받아 조밀해져서 기공도가 낮고 낮은 투과계수를 갖는다. 또 압력차가 일정한 값까지 증가함에 따라 시료가 압력에 의해 압축되 부피가 줄어들고 기공도가 낮아져 점점 투과계수가 줄어든다가 일정 압력차이후에는 거의 일정한 투과계수를 갖는다.

6. 참고문헌

1. L . Rebenfeld and B . Miller, *J. Text. Inst.*, **83**, 241(1995)
2. V . Kulichenko and Lieva Van Langenhove, *J. Text. Inst.*, **80**, 127(1992)
3. T . R . Wan , G . A . V . Leaf , and C . Iype, *J. Text. Inst.*, **83**, 649(1995)
4. Bugao Xu and Yu-Liang Ting, *Textile Res. J.*, **65**, 41(1995)
5. C. M. van Wyk, *J. Text. Inst.*, **37**, 285(1946)
6. Toyofumi Kato, Masanori Kyo and Yoshinobu Kamata, *J. Text. Mach. Soc. of Japan*, **36**, T260(1993)
7. David R. Gaskell, "An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering", pp. 167-181, Macmillan Publishing Co. USA, 1992