

수정된 기체투과법을 이용한 다공성 지지체의 기공크기 평가

박재구[†] · 김현중

한양대학교 지구환경시스템공학과
(2001년 4월 30일 접수; 2001년 5월 28일 승인)

Evaluation of Pore Size of Porous Support using Modified Gas Permeation Method

Jai-Koo Park[†] and Hyun-Jung Kim

Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
(Received April 30, 2001; Accepted May 28, 2001)

초 록

수정된 기체투과법을 이용하여 다공성 지지체의 기공크기를 평가하였다. 본 연구에서의 수정된 기체투과법은 기공내에서 유체흐름이 Hagen-Poiseuille 법칙이 성립하는 영역으로 압력을 조절하여 투과유량을 측정하는 방법을 말한다. 수정된 기체투과법의 적합성 여부는 유체의 Reynolds number 및 기체분자의 평균자유행로를 통해 검토하였다. 다공성 지지체의 유량의 시간 변화로부터 대표치를 결정하여 기공크기로 환산하였다. 본 방법에 의해 평가된 다공성 지지체의 기공크기는 30 μm ~ 80 μm 이었으며, 평균치는 50 μm 로 평가되었다. 한편 화상해석법과 비교·분석한 결과 수정된 기체투과법을 통해 평가된 기공은 내부 채널의 가장 작은 부분을 나타내는 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

This study was directed at evaluating pore size of porous support by a modified gas permeation method. In this work a modified gas permeation method means a method to measure permeation flowrate in regime, which flows of fluid follow Hagen-Poiseuille's law, with control of entrance pressure. Its compatibility was examined through Reynolds number of fluid and the mean free path of a gas molecule. Pore size of porous support was calculated with representative value that had been obtained from the variation of flowrate according to time. Pore size, which was evaluated by this method, ranged from 30 μm to 80 μm with mean value of 50 μm . It was confirmed that pore evaluated by a modified gas permeation method was the smallest part of continuous channel from the comparison with a image analyzing method.

Key words : Pore size, Porous support, Modified gas permeation method, Representative value

1. 서 론

기공구조는 다공성 지지체의 1차 물성으로서 기공크기, 기공율, 기공형태 등으로 세분화할 수 있으며, 이들은 비표면적, 함수율 등과 같은 2차 물성과 각기 밀접한 연관성을 지니고 있다. 일반적으로 기공은 열린 기공과 닫힌 기공으로 구분되며, 열린 기공은 다시 연속형과 비연속형 기공으로 분류된다.¹⁾ 이 중 연속기공은 지지체의 양쪽면이 모두 외부로 노출된 기공을 의미하는 것으로 투과유체의 흐름에 직접 관련되는 기공을 지칭한다. 따라서 이러한 연속기공을 평가하는 것은 다공성 지지체를 환경정화용 필터로 적용할 경우, 반드시 고려하여야 할 중요한 인자라 할 수 있다.

다공성 지지체의 기공구조를 평가하는 방법으로는 화상해석법,²⁾ 수은주입법^{3,4)} 또는 기체투과법¹⁾ 등과 같은 방법이 이용된다. 화상해석법의 경우 복잡한 기공구조의 정량적인 평가를 위해서는 고도의 전처리기술 및 해석기술을 필요로 하며, 수은주입법에서는 측정 시 높은 압력으로 인한 지지체의 변형을 야기할 수 있다. 또한, 상기 방법들은 연속기공과 비연속기공을 같은 기공으로 평가하기 때문에, 투과율과 직접 관련된 연속기공만을 정량적으로 구별하기 어렵다. 한편, 기체투과법은 측정방법이 간단할 뿐 아니라 다공성 시료의 연속기공을 선별 평가할 수 있다는 장점이 있으며, 이를 통해 평가된 기공은 지지체 내부에 존재하는 기공과 기공의 연결부분(pore window)⁵⁾의 크기를 나타낸다.

기존의 기체투과법의 경우 다공성 지지체와 같이 큰 기공을 가진 매체의 기공구조를 평가함에 있어서 고압의 요구로

[†]Corresponding author : jkpark@hanyang.ac.kr

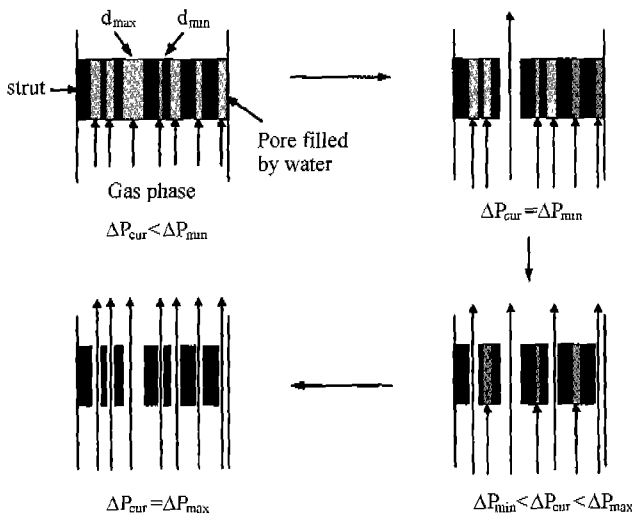


Fig. 1. The schematic diagram of pore size calculation by gas permeation method.

인한 투과유체의 유동영역에 변화가 발생할 수 있다.⁴⁾ 그러나, 수정된 기체투과법(modified gas permeation method)은 일정한 저압하에서 투과유량을 측정하기 때문에 큰 기공을 가진 매체의 경우에도 적용이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 수정된 기체투과법을 이용해 본 연구실에서 제작된 다공성 지지체의 기공크기를 평가하였다.

2. 이 론

2.1. 수정된 기체투과법

Fig. 1은 기체투과법을 이용해 기공크기를 산출하는 과정의 개략도이다. 기존의 기체투과법은 시편의 기공 내에 젖음성 액체(wettable liquid)를 함침시킨 후, 시편의 양단에 걸리는 차압을 변화시켜가며 기공의 크기를 산출한다. 보통의 경우 젖음성 액체로서 물이 사용되며, 본 연구에서도 이를 이용하였다.

기공크기 계산은 식 (1)의 Cantor 식⁶⁾을 이용하였다.

$$\Delta P_1 = \frac{4r\cos\theta}{d_i} \quad (1)$$

여기서, ΔP_1 는 직경이 d_i 인 기공을 채우고 있는 물이 배출될 당시의 차압이고, θ 는 액체에 대한 지지체의 접촉각, r 은 물의 표면장력 그리고 d_i 는 기공의 직경을 나타낸다. 본 연구에서 r 과 θ 값은 73 mN/m와 10° ⁷⁾를 사용하였으며, 임의의 적용 차압(ΔP_{cur})을 가장 작은 차압(ΔP_{min})부터 가장 큰 차압(ΔP_{max})까지 변화시켜가며 최대기공직경(d_{max})과 최소기공직경(d_{min}) 사이에 분포하는 기공크기를 산출하였다(Fig. 1).

Fig. 2(a)는 기존의 기체투과법에서 볼 수 있는 전형적인 측정차압($\Delta P'$)과 투과유량(Q)간의 관계를 나타내는 그래프이다.⁶⁾ 실선은 기공 내부가 물로 채워진 지지체의 투과유량

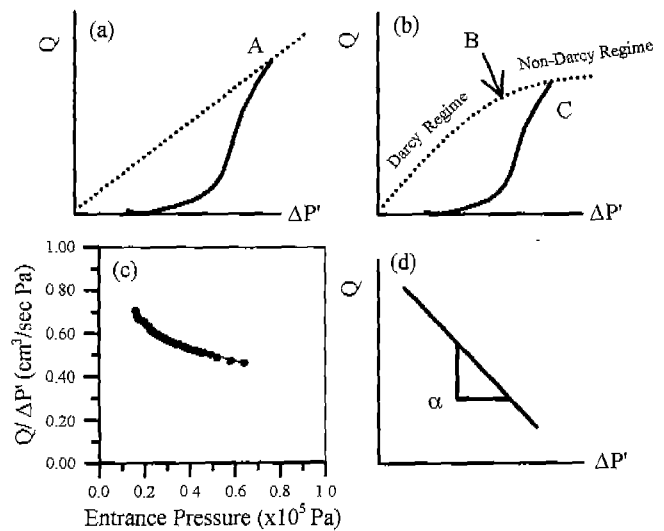


Fig. 2. Relationship between permeation flowrate and measured differential pressure at (a,b) conventional and (d) modified gas permeation method. (c) ratio of measured differential pressure and permeation flowrate according to entrance pressure in porous support. Applied conditions is as follows; (a~c) various and (d) constant entrance pressure.

곡선을 나타낸 것이며, 점선은 내부가 비어있는 기공을 가진 시편의 유량곡선이다. 이를 보면, 측정초기에는 함수 곡선의 형태가 비선형적이거나 A점 이후에는 선형으로 전이됨을 알 수 있다. 초기의 비선형적 형태는 가장 큰 기공내부에 존재하던 물이 유입기체에 밀려 배출되기 시작하였을 때부터, 나머지 기공들을 통하여 기체가 완전히 투과할 때까지를 나타낸다. 이 과정에서 투과율은 점점 증가하며, 물이 완전히 배출된 이후부터는 점선과 같이 Darcy's law에 따른 선형적인 거동을 보이게 된다.

Fig. 2(b)는 큰 기공을 갖거나 기공내에서 유체의 속도가 빠른 경우에 나타나는 측정차압과 유량과의 관계를 나타내는 그래프이다.⁴⁾ 측정차압이 증가함에 따라 투과율이 감소하며 B점을 전후로 Darcy 영역에서 Non-Darcy 영역으로 유동영역이 전이됨을 알 수 있다. 따라서 대체로 큰 기공분포를 보이는 다공성 지지체의 기공구조 평가 시, 유체의 유동을 Darcy 영역으로 한정하여 생각할 수 없다는 측면에서 기존의 기체투과법의 적용은 적절하지 못하다.

Fig. 2(c)는 내부가 비어있는 기공을 가진 다공성 지지체의 유입압력과 해당 압력에서의 유량과 차압의 비를 나타내는 그래프이다. 유량과 차압의 비가 해당압력에서의 투과율과 비례한다는 점으로부터 투과율은 압력 즉 차압이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 즉, 이는 압력 증가에 따라 다공성 지지체의 기공내부에서 유체의 유동이 Darcy 영역에서 벗어남을 의미한다. 결국 이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 일정 압력이하의 저압하에서 투과유량을 측정함으

로서 유체의 속도를 줄여 유동을 Darcy 영역으로 제한할 수 있었다.⁴⁾ 이러한 방법을 본 연구에서는 수정된 기체투과법이라 하였다.

Fig. 2(d)는 수정된 기체투과법에서 나타나는 측정차압과 투과유량간의 그래프이다. ΔP_i은 임의의 적용차압에 해당하는 기공이 열린 후, 일정한 저압하에서 측정된 차압을 나타낸다. 한편, 수정된 기체투과법은 기존의 기체투과법과는 달리 적용차압과 측정차압을 별개의 요소로 분리하였으며, 저압의 유입압력을 이용함으로써 측정차압과 투과유량의 비 (Fig. 2(d)의 α)를 일정하게 유지할 수 있었다.

2.2. 유량산정식

다공성 지지체 내에서 일정한 직경을 가진 원통형 채널을 통한 유체의 흐름을 묘사하는 식은 유체가 유동하는 환경에 지배를 받는다. 때문에 유체유동모델에 맞는 유량산정식을 선택하기 위해, 유동영역 및 유체유동의 특성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 Reynolds number(Re)와 내부채널에서 기체분자의 운동을 고려하여 유량산정식을 결정하였다.

먼저 다공성 지지체 내에서 유체의 흐름은 Reynolds number(Re)에 따라 층류와 난류상태로 구분되어 진다. 일반적으로, 유체의 원관유동에서 Reynolds number(Re)가 2100 보다 작으면 유체는 층류상태이며, 4000보다 크면 난류 그리고 그 사이의 영역에서는 층류 및 난류가 공존하는 전이 영역이 된다.^{8,9)} 다공성 지지체를 통과하는 유체의 Reynolds number(Re)는 식(2)에 의해 계산될 수 있다.

$$Re_i = \frac{d_{ave}}{v} \times u_{ave} \quad (2)$$

여기서, Re_i는 i번째 구간의 채널을 통과하는 유체의 Reynolds number(Re), d_{ave}는 i와 i+1번째 기공의 평균직경, v는 유체의 동점성 계수, u_{ave}는 평균직경이 d_{ave}인 채널을 통해 흐르는 평균유속으로, 평균직경에 해당하는 채널을 통해 흐르는 전체투과유량을 기체가 통과하는 전체 단면적으로 나눈 값이다.

한편, 유체유동이 층류영역에서 압축성유체의 유동인 경우, 한 개의 채널을 통해 흐르는 투과유량은 압력에 따른 기체분자의 평균자유행로(mean free path, λ)^{10,11)}에 의해 결정된다. 평균자유행로는 식(3)을 이용해 계산된다.

$$\lambda = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \times \frac{kT}{P d_m^2} \quad (3)$$

여기서, k는 볼츠만 상수, T는 절대온도, P는 유입압력, d_m은 기체분자 한 개의 직경을 의미한다. 일반적으로 λ < d_{ave}인 경우, 기체의 유동은 관의 양단의 압력구배에만 의존하게 되어 Hagen-Poiseuille 모델¹²⁾에 따르게 되며, λ > d_{ave}이면 기체 분자와 관벽과의 충돌에 의한 기체분자의 확산

유동이 우세하게 되어 Knudsen diffusion 모델¹²⁾에 따르게 된다. 그리고 압력변화에 따라 λ가 d_{ave}를 기준으로 변하는 경우에는 Hagen-Poiseuille 모델과 Knudsen diffusion 모델을 합쳐 사용한다.¹³⁾

3. 실험 방법

기공크기 평가를 위해 본 연구에서 사용된 시편은 발포법을 이용하여 제조된 두께 6 mm, 지름 60 mm인 원판형의 다공성 지지체이다. 출발원료는 cordierite(내외세라믹스(일))이며, 여기에 물을 첨가하여 슬러리를 형성시켰다. 발포제로는 Sodium Lauryl Sulfate(SLS, CH₃(CH₂)₁₁OSO₃Na)를 사용하여 성형체를 제작하였다. 이 후 겔캐스팅법에 의하여 슬러리를 고형화하였다.

다공성 지지체의 기공내부는 ASTM F316-80에 의거하여 시편을 끓는 물에 10분 동안 담궈두어 초기 열린 기공을 함침시켰다.¹⁴⁾ Fig. 3은 다공성 지지체의 기공크기를 평가하는 실험장치를 도시한 것이다.⁵⁾ 시편내 기공에 함침된 물을 제거하기 위한 비젯음성유체로는 일반 공기를 사용하였으며, air compressor를 이용하여 유동하였다. 한편, 투과유량은 일정한 유입압력하에서 측정하였고, 이 때 가한 압력은 가장 큰 기공이 열리는 데 필요한 압력보다 작은 값으로서 4000 Pa을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 유량산정식 결정

Hagen-Poiseuille 식을 통해 계산된 유량은 채널의 형상이 원통형이고, 유동영역이 층류이며 기체분자의 평균자유행로가 기공크기보다 작을 때 가능하다.⁹⁾ 따라서, 유량산정식의 결정에 앞서 위 조건들의 적합성 여부를 검토해야 한다.

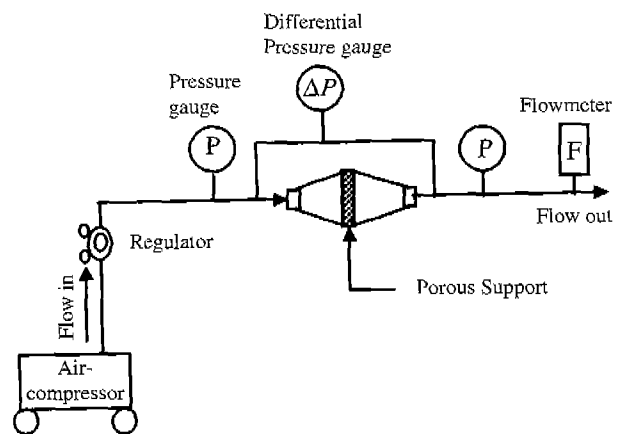


Fig. 3. A schematic diagram for evaluating pore size of porous support.¹⁶⁾

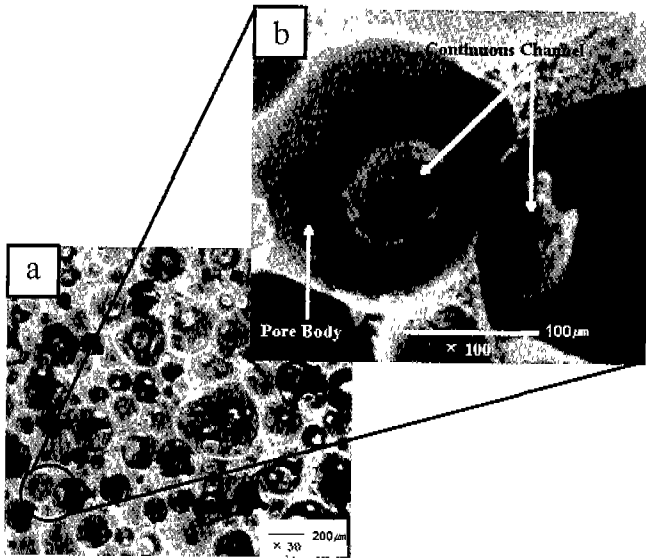


Fig. 4. Microstructure of porous support; (a: $\times 30$, b: $\times 100$).

Fig. 4(a)와 (b)는 다공성 지지체의 기공구조를 SEM (Scanning Electron Microscopy)을 통해 본 사진으로 본 연구에서 평가하고자 하는 기공은 형상이 거의 원형에 가까움을 알 수가 있었다. 한편, 지지체 내부에 존재하는 기공의 직경변화에 따른 각 채널내 유체의 Reynolds number 값을 계산한 결과 그 값은 2100보다 작게 평가되었으며, 채널을 통한 유체의 유동영역이 층류임을 알 수 있었다. 또한, 상기된 식 (3)을 이용하여 기체의 평균자유행로를 계산한 결과 약 $1.68 \mu\text{m}$ 로 산출되었으며, 이 값은 평가된 다공성 지지체의 가장 작은 기공보다 작은 값으로 나타났다. 따라서 위 결과에 비추어 볼 때, 다공성 지지체의 경우 한 개의 채널을 통한 투과유량의 흐름은 식(4)와 같은 Hagen-Poiseuille 모델에 따름을 알 수 있었다.

$$q_i = \frac{\pi d_i^4 \Delta P_i}{128 \mu \tau \Delta x} \quad (4)$$

여기서, d_i 는 i 번째 기공의 직경, $\Delta P_i/\Delta x$ 는 i 번째 압력 구배, μ 는 기체의 절대점성도를 나타낸다. τ 는 내부 채널의 굴곡도를 의미하며, 본 연구에서는 그 값을 1로 가정하였다.⁴⁾

4.2. 측정차압과 투과유량 사이의 관계

본 연구에서 사용된 다공성 지지체의 경우 Fig. 4(b)에 나타나듯이 채널과 채널이 연결된 3차원 망상구조를 가진다. 때문에 복잡한 내부 기공구조를 해석함에 앞서 다공성 지지체에 적합한 모델의 구축이 필요하다. Fig. 5(a)와 (b)는 다공성 지지체의 내부 구조를 단순화한 모델들이다. 다공성 지지체의 내부 채널이 Fig. 5(a)와 같이 한 방향으로 분포하고 적용 압력이 균등하게 분포한다면, 시간에 따른 투과유

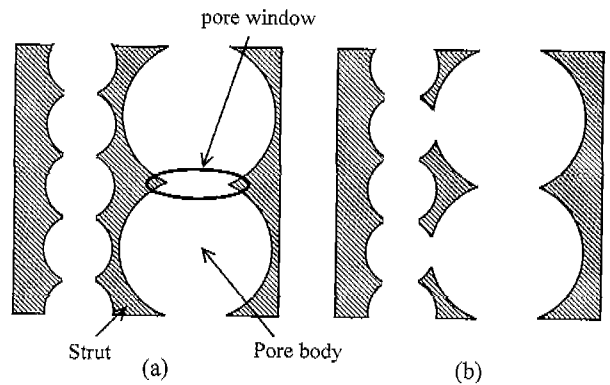


Fig. 5. Two models of continuous pore structure; (a) 1-directional flow model and (b) 2-dimensional model of 3-directional flow.

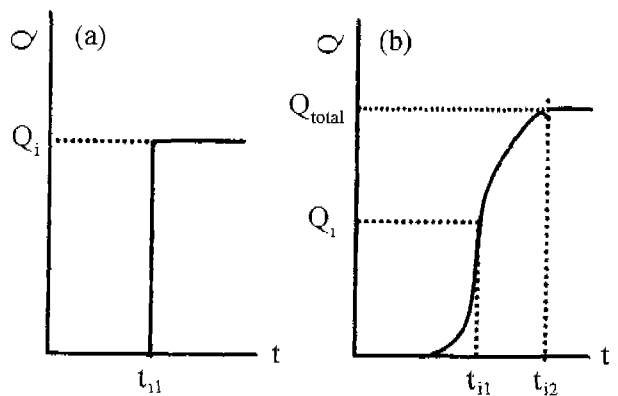


Fig. 6. Variation of permeation flowrate according to time. (a) ideal and (b) real.

량의 변화는 Fig. 6(a)와 같이 평형시간 t_{11} 에서 기울기가 무한대인 직선으로 나타난다. 그림에서 Q_i 는 i 번째 적용차압에서 측정된 투과유량이며, t_{11} 은 i 번째 적용차압이 가해진 후 투과유량이 일정해지는 평형시간이다. 한편, Fig. 5(b)는 본 연구에서 가정한 다공성 지지체 내부의 3차원 기공구조를 2차원으로 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 같이 모든 조건이 이상적이라면, 다공성 지지체의 내부채널을 흐르는 시간에 따른 투과유량의 변화도 Fig. 6(a)와 같은 형태를 보이게 된다. 그러나, 다공성 지지체의 경우 시간에 따른 투과유량의 변화는 Fig. 6(b)와 같이 비선형적인 경향을 보였다. 따라서, 임의의 시점에서 그 채널을 흐르는 유량의 대표치를 결정하는 것이 지지체의 기공구조를 평가함에 있어 중요한 과정이다. 그림에서 t_{11} 과 Q_i 는 각각 대표시간과 그 시간에서의 투과유량을 의미하며, t_{12} 와 Q_{total} 은 다공성 지지체 내부 채널을 채우고 있던 물이 모두 빠져나간 직후의 시간과 투과유량을 나타낸다. t_{11} 을 기준으로 좌측에는 적용차압에 해당하는 기공보다 큰 기공이 분포하고, 우측은 그보다 작은 기공들 내부에 있던 물이 다공성 지지체의 구조적인 특성에 의해 배출된 부분을 나타낸다.

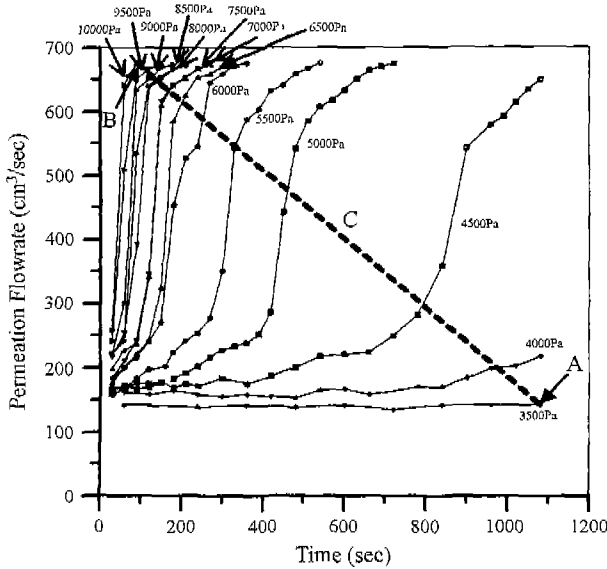


Fig. 7. Variation of permeation flowrate of porous support according to time; (parameter : applied differential pressure).

Fig. 7은 시간에 따른 다공성 지지체의 내부채널을 통한 투과유량의 변화를 나타낸다. 다공성 지지체의 기공구조의 특성으로 인해, 각각의 적용차압에 해당하는 투과유량을 구분짓는 경계가 시간에 따라 변함을 알 수 있었다. 적용된 차압의 범위는 3500 Pa~10,000 Pa이었고, 투과유량은 약 142 cm³/sec~667 cm³/sec 사이에서 분포하였다. 적용차압이 증가함에 따라 시간과 투과유량 사이의 그래프는 Fig. 6(a)처럼 기울기가 증가하는 경향을 보였다. 가장 작은 적용차압이 가해진 경우에는 약 1100 sec까지 일정한 투과유량을 나타냈고, 점 A 이후부터는 증가하는 경향을 보였다. 한편, 가장 큰 적용차압의 결정은 Fig. 6(a)처럼 기울기가 ∞에 가깝고, 최종투과유량의 도달시간이 일치하는 점 C로 하였다.

한편, Fig. 7의 A와 B 사이의 구간 내에 각 기공을 흐르는 유체의 임의의 시간에서의 대표치 투과유량이 존재한다. 각 채널을 흐르는 유체의 특정 대표시간에서의 투과유량의 관계가 Fig. 6(a)의 거동을 따르며, 식 (4)에서 각 채널의 굴곡도가 1이라고 가정하였으므로 각 적용차압이 가해질 경우 크기가 다른 채널내에 함침된 물은 임의의 대표시간에서 동시에 배출된다. 이로부터 지지체의 채널내에서 유체의 속도는 적용차압에 비례하며, 식(5)과 같이 각 채널을 흐르는 유체의 대표시간 변화에 따른 투과유량의 변화량은 일정하다는 것을 알 수 있었다.

$$\frac{\partial Q_{rv}}{\partial t_{rv}} = \text{constant} \quad (5)$$

여기서, t_{rv} 와 Q_{rv} 는 각 채널을 흐르는 유체의 대표시간과

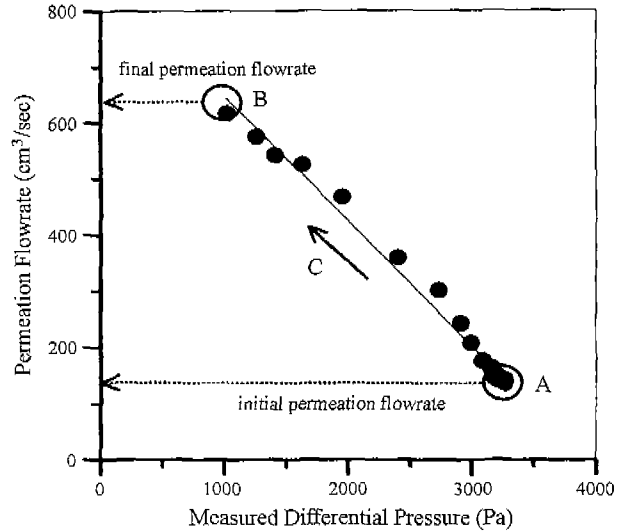


Fig. 8. Relationship of measured differential pressure and permeation flowrate according to time; (applied differential pressure : 3500 Pa).

투과유량을 나타내며, Fig. 7의 직선 C는 식 (5)에 의거해 도시된 것이다.

Fig. 8은 일정한 적용차압 3500 Pa에서 시간의 변화에 따른 측정차압과 투과유량 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. A는 초기유량을 의미하며, B는 물로 채워진 모든 기공이 열린 후 측정된 최종투과유량을 의미한다. A에서 B로 유량의 변화가 일어나는 동안 지지체 내부에 존재하는 기공의 크기가 다른 각 채널내에 함침된 물은 단계적으로 빠져나가게 된다. 즉 직선 C를 따라 각 기공별로 대표시간에서의 측정차압과 투과유량이 존재한다. Fig. 8의 결과는 식 (6)과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q_{rv}}{\partial (\Delta P_{rv})} = \text{constant} \quad (6)$$

여기서, ΔP_{rv} 와 Q_{rv} 는 대표시간에서의 측정차압과 투과유량을 의미하며, 식 (6)으로부터 Fig. 7에서 얻어진 투과유량에 해당하는 측정차압을 구할 수 있었다. 또한, 수정된 기체 투과법의 경우 기공크기 변화에 관계없이 유체유동이 Darcy's law에 따름을 알 수 있었다.

Fig. 9는 각 대표시간에서 측정차압과 투과유량과의 관계를 나타낸 그래프로 Fig. 2(d)의 모델과 일치하였다. 한편, Fig. 10은 대표시간별 적용차압과 투과유량과의 관계를 나타내는 그래프로 비선형적인 거동을 보였으며, 이는 기공의 크기나 개수와 같은 다른 변수가 요인이 된 것으로 사료된다.

4.3. 기공크기 및 분포 평가

다공성 지지체의 기공분포는 위에서 구해진 측정차압과

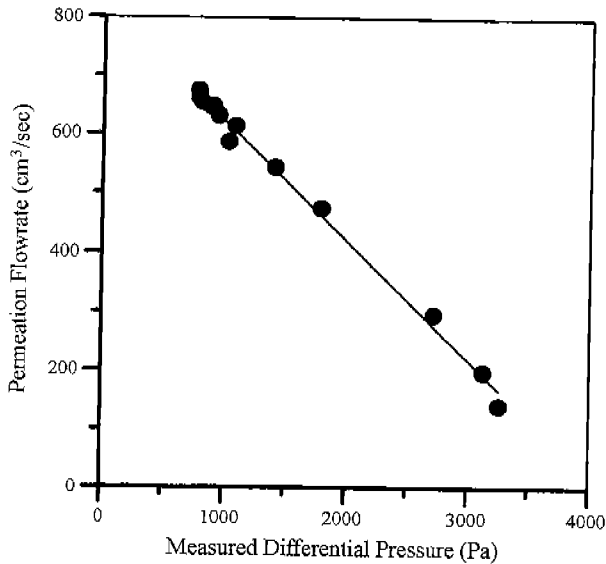


Fig. 9. Relationship of permeation flowrate and measured differential pressure at representative time.

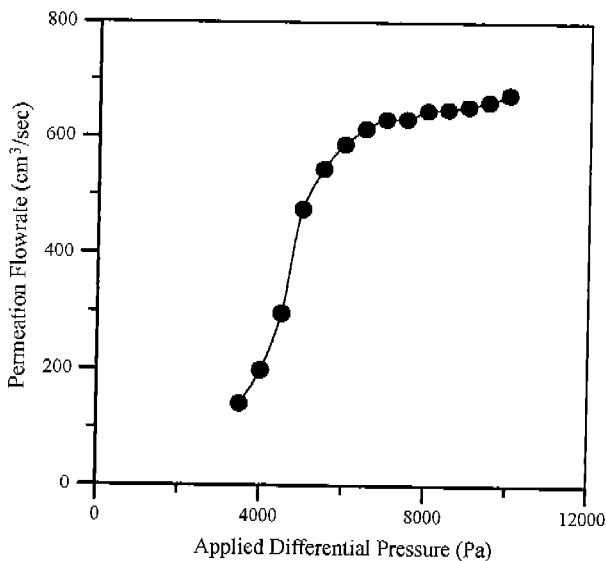


Fig. 10. Variation of permeation flowrate according to applied differential pressure at representative time.

투과유량 및 Hagen-Poiseuille 식을 통해 계산된 유량을 이용하여 구할 수 있었다.⁶⁾ Fig. 11은 다공성 지지체의 기공 분포를 평가하는 순서도이다. ΔP 와 Q 는 측정차압과 투과유량을 나타내며, q 와 N 은 한 개의 채널을 통해 흐르는 계산된 유량과 기공의 개수를 의미한다. 만약, 측정차압이 ΔP_{i-1} , ΔP_i 일 때 측정된 투과유량을 각각 Q_{i-1} , Q_i 이라 하면, 직경이 d_{i-1} 에서 d_i 사이에 분포하는 기공으로 이루어진 채널을 통해서 흐르는 순투과유량(net permeation flowrate, ΔQ_i)은 $Q_i - Q_{i-1}$ 에 의해 산출된다. 따라서, 직경의 범위가 d_{i-1} 부터 d_i 사이에 분포하는 기공의 개수(N_i)는 순투과유량과 한 채널

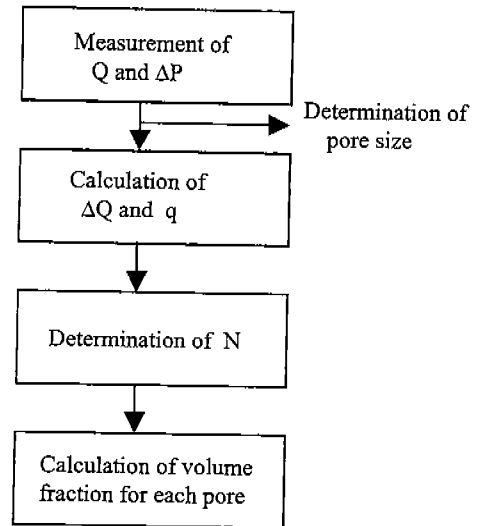


Fig. 11. Flowchart in relation to calculation of pore size distribution.

을 통해 흐르는 계산된 투과유량(q_i)을 이용해 $N_i = \Delta Q_i / q_i$ 에 의해 구할 수 있었다.

한편, Hagen-Poiseuille 식으로부터 계산된 유량은 다공성 지지체 내부의 유체가 흐르는 유동층을 가장 작은 기공의 직경에 상당하는 채널로 가정하여 계산된 값이다.¹⁵⁾ 그러나, 측정된 투과유량은 유체가 통과하는 채널의 실제 모델을 대표하는 값이라는 점에서 차이가 있다. 따라서, 본 시험내 기공의 복잡한 기하학적 구조를 고려할 때, 절대적인 기공의 개수는 과대평가 된다.

한편, 지지체의 직경 d_j 를 포함하는 채널의 부피분율($f_{v,j}$)은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{v,j} = \frac{(Q/q_j)d_j^2}{\sum_{i=1}^n (Q/q_i)d_i^2} \quad (7)$$

Fig. 12는 식(7)를 이용해 계산된 기공의 부피분율을 나타낸 것이다. 지지체의 기공크기는 $30 \mu\text{m} \sim 80 \mu\text{m}$ 로 분포하며 평균크기(중위경)는 약 $50 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있었다.

수정된 기체투과법에 의해 평가된 기공이 내부 채널의 가장 작은 직경을 대표한다는 것은 화상해석법을 통해 측정된 다공성 지지체의 기공크기와 비교함으로써 알 수 있었다. 사용된 화상해석장치는 CCD 카메라(Hirox)가 연결된 현미경과 화상해석프로그램(Image-pro plus 4.0)으로 구성되었다. Fig. 4(b)에서 관찰되듯이 불확실한 경계선으로 인해 발생하는 오차를 최소화하기 위해, Laplace Transform²⁾을 이용하여 구분선을 강조하는 기법을 사용하였다. 이 방법에 의해 측정된 기공크기는 $25 \mu\text{m} \sim 130 \mu\text{m}$ 범위에서 분포하는 것으로 나타났다. 최소기공크기의 차이는 수정된 기체투과법의 경우 최종유량 근처에서 투과유량의 변화량이 미소한 것

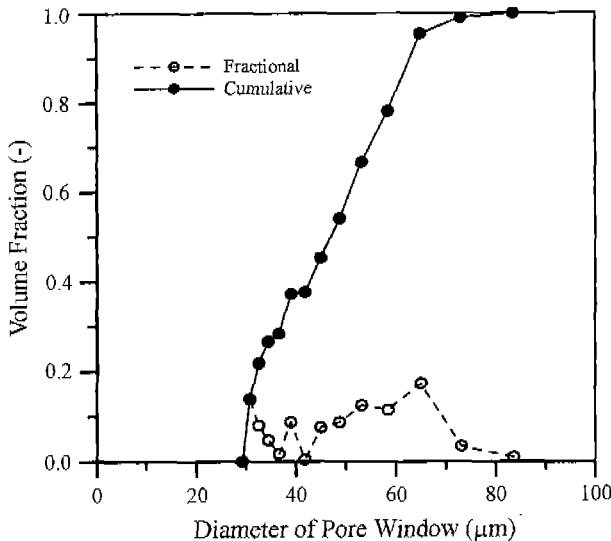


Fig. 12. Cumulative and fractional pore size distributions of porous support.

에 원인이 있는 것으로 사료된다. 한편, 최대기공크기의 차이는 화상해석법을 통해 평가된 기공크기가 채널의 가장 작은 부분을 대표하는 값이 아니라 접에서 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 수정된 기체투과법에 의해 평가된 기공크기는 임의의 채널 중 크기가 가장 작은 부분을 나타내는 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 슬러리 발포법으로 제조된 다공성 지지체의 기공크기 평가에 수정된 기체투과법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다공성 지지체 내부채널을 흐르는 유체의 Reynolds number와 기체 분자의 평균자유행로를 평가한 결과 다공성 지지체의 기공크기 평가에 수정된 기체투과법을 적용할 수 있었다.

2. 3차원 망상 구조를 갖는 다공성 지지체 내부 채널을 통한 투과유량은 시간에 따라 변하는 비정상 상태의 흐름이었고, 각 채널을 흐르는 유체의 대표시간별 투과유량의 변화는 선형적인 거동을 보였다. 한편, 이를 토대로 산정된 대표시간에서의 측정차압은 투과유량이 증가함에 따라 선형적으로 감소하였다.

3. 수정된 기체투과법에 의해 평가된 다공성 지지체의 기공크기는 30 μm~80 μm로 분포하였으며 평균크기는 약 50 μm로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 세라믹공정연구센터(CPRC)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. S. K. Roy, "Characterization of Porosity in Porcelain-bonded Porous Alumina Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **52**(10), 543-548 (1969).
2. W. K. Pratt, "Digital Image Processing," pp. 261-662, A Wiley-Interscience Publication, USA, 1991.
3. K. Sakai, "Determination of Pore Size and Pore Size Distribution. 2. Dialysis Membranes," *J. Membrane Sci.*, **96**, 91-130 (1990).
4. Y. Lee, J. Jeong, I. J. Youn and W. H. Lee, "Modified Liquid Displacement Method for Determination of Pore Size Distribution in Porous Membranes," *J. Membrane Sci.*, **130**, 149-156 (1997).
5. 박재구, 이승인, 이정식, 신희영, 정제화, "집진용 세라믹 필터의 제조 및 공기 투과 특성," *한국대기환경학회지*, **16**(6), 381-388 (2000).
6. S. Dallaire and R. Angers, "Porosity and Permeability of Sintered MgO," *J. Can. Ceram. Soc.*, **51**, 29-34 (1982).
7. T. H. Muster, C. A. Prestidge and R. A. Hayes, "Water Adsorption Kinetics and Contact Angles of Silica Particles," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **176**, 253-256 (2001).
8. E. Skjetne and J. L. Auriault, "New Insight on Steady, Non-linear Flow in Porous Media," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, **18**(1), 131-145 (1999).
9. J. A. Roberson and C. T. Crowe, "Engineering Fluid Mechanics," 6th Ed., Chap 10, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
10. K. J. Laidler and J. H. Meiser, "Physical Chemistry," 3rd Ed., pp. 9-29, Houghton Mifflin Company, New York, 1999.
11. E. Creutz, "The Permeability Minimum and the Viscosity of Gases at Low Pressure," *Nucl. Sci. Eng.*, **53**, 107-109 (1974).
12. A. Hernandez, J. I. Calvo, P. Pradanos and F. Tejerina, "Pore Size Distributions in Microporous Membranes. A Critical Analysis of the Bubble Point Extended Method," *J. Membrane Sci.*, **112**, 1-12 (1996).
13. R. W. Schofield, A. G. Fane and C. J. D. Fell, "Gas and Vapour Transport Through Microporous Membranes. 1. Knudsen-poiseuille Transition," *J. Membrane Sci.*, **53**, 159-171 (1990).
14. W. J. Chao and K. S. Chou, "Studies on the Control of Porous Properties in the Fabrication of Porous Supports," *Key Engineering Materials*, **115**, 93-108 (1996).
15. K. S. McGuire, K. W. Lawson and D. R. Lloyd, "Pore Size Distribution Determination from Liquid Permeation Through Microporous Membranes," *J. Membrane Sci.*, **99**, 127-137 (1995).