

블레인 공기투과 장치의 원리

이 승 현 (군산대학교 재료·화학공학부 교수)

분체의 비표면적 측정에는 여러가지 방법이 있지만 공기투과법은 조작성이 비교적 간단하기 때문에 공장, 실험실에서 널리 이용되고 있다. 공기투과법을 이용한 측정 장치에는 여러가지가 있지만 블레인법에 의한 장치가 일반적으로 사용되고 있다. 블레인법 장치는 비표면적을 알고 있는 표준분말을 사용하며 장치, 조작성이 간편하다는 장점이 있어 한국산업규격에서도 시멘트 분말도를 측정할 때에 이 방법을 채택하고 있다. 이 방법에 대한 원리에 대해 알아보기로 한다.

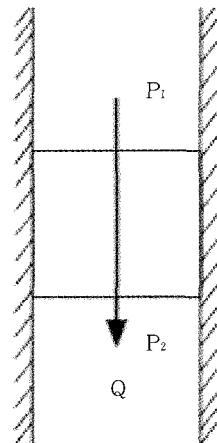
1. 투과율

기공속에서 공기의 흐름은 기공의 크기와 유속 또는 압력차에 의해 영향을 받아 Knudsen Flow, Slip Flow를 거쳐 Viscous Flow(Poiseuille Flow), 난류(Turbulent Flow)가 된다. 이것은 흐름의 형태가 달라져서 각각 다른 압력과 유속의 관계식이 성립되기 때문이다. 한 예로서 매끈한 원통에서 유체가 흐를 때 레이놀즈수(Re)가 2,000 이상에서는 난류가 생기고 3,000 이상에서는 격렬한 소용돌이가 형성된다. 다공체의 특성을 측정할 때, 다공체를 구성하는 기공은 매끄럽지 못하므로 Re값이 비교적 작은 값에서도 난류가 형성되기 쉽지만, 기공이 작고 유속이 크지 않기 때문에 특성식을 고려할 때 난류를 고려한 관계식은 중요하지 않다.

투과율은 보통 기체의 투과에 의해 측정하는 경우

가 많고, <그림-1>과 같이 측면을 봉하고 충전층 상부와 하부에 압력차 $\Delta P = P_2 - P_1$ 을 준다. 여기에 유체가 충전층을 통과하는 유량 Q는 충전층의 기공의 크기, 형태, 배열 상태에 영향을 받지만, 압력차 및 충전층의 단면적에 비례하고 유체의 점도와 충전층의 두께에 반비례한다.

정상상태에서 압력구배가 매우 작거나 혹은 매우 클 경우를 제외하고는 흐름이 소용돌이가 없는 균일한 점성류를 나타내므로 Darcy's Law를 이용하여 투과율(Permeability, K)을 구한다. Darcy's Law는 실험에 의해서 유도된 법칙으로, 유체가 충전층 혹은 다공체를 통과할 때 단위시간당 유량(μ)은 압력구배($\Delta p/L$)에 비례하고 유체의 점도(η)에 반비례하는 관계가 있다는 것이다.



<그림-1> 투과율 측정원리

$$\mu = Q_v/A = (K \cdot \Delta P)/(\eta \cdot L) \dots\dots\dots \langle \text{식-1} \rangle$$

- Q_v: 단위시간에 분체 충전층을 통과하는 유체의 양(cm³/sec)
- A: 분체 충전층의 단면적(cm²)
- ΔP: 분체 충전층의 양단에서의 압력차(g/cm²)
- η: 유체의 점도(poise)
- L: 유체 충전층의 두께(cm)

〈식-1〉에서 투과율 K는 분체 충전층의 공격율이 나 입자의 크기 형상 등에 관련이 있는 정수로 Buckingham, Slichter, Smith, Movis & Wilsey 등에 의해 다수의 실험식이 도출되었다. K는 〈식-2〉와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = (q_m \cdot p_m \cdot L)/(A \cdot \Delta P) \dots\dots\dots \langle \text{식-2} \rangle$$

- q_m: 압력(pm)에서 기체의 투과속도(cm³/sec)

투과율 K는 darcy 라는 단위로 나타내며, 1darcy 는 1centipoise 의 점성을 갖는 유체가 1cm³의 충전층을 1기압의 압력차로 1cm³/sec 속도로 통과하는 경우이다. 분체의 가압 성형체와 같이 비교적 크기가 고루 갖춘 기공이 분포되어 있는 경우에는 기공율 ε와 투과율 K로부터 기공의 평균크기 d를 계산할 수 있다.〈식-3〉

$$d \propto (1-\epsilon)[(K \cdot \eta)/\epsilon]^{1/2} \dots\dots\dots \langle \text{식-3} \rangle$$

이러한 관계는 Lea-Nurse 등에 의해 비표면적을 구하는데 사용되었고, 이것을 간소화한 방법이 블레인법이다.

2. 블레인 측정장치와 원리

블레인법은 측정하고자 하는 분체의 압축층을 만들고, 압축층에 공기를 투과시켜 투과 정도에 의해 분체의 비표면적을 구하는 것이다. 블레인 장치의 개요도를 〈그림-2〉에 나타냈다.

분체 충전층은 시료 셀에 분체 시료를 집어넣고 플런저로 압축하고, 플런저가 셀에 밀착될 때까지 손가락으로 플런저를 누른다. 그리고 분체 충전층에 공기를 투과시킨다. 공기 투과방법은 플런저를 제거한 셀을 그대로 마노메타에 설치하고 마노메타액을 A표선까지 올린 후 코크를 닫고 마노메타액을 강하시켜 공기를 투과시킨다. 투과공기량은 B-C 사이의 부피, 투과압력은 B-C 사이의 평균압력이지만, 이러한 값은 장치의 고유값으로 표준분말을 사용하여 구한다.

Carman은 Kozeny가 유도한 이론식에 대해 검토하여 분체의 비표면적과 투과율과는 〈식-4〉와 같은 관계가 있다는 것을 유도하였다.

$$K = \epsilon^3/(1-\epsilon)^2 X g/(k S_v^2) \dots\dots\dots \langle \text{식-4} \rangle$$

- g: 중력계수
- ε: 분체 충전층의 공격율
- S_v: 단위부피 분말의 표면적(cm²/cm³)
- k: Kozeny 정수

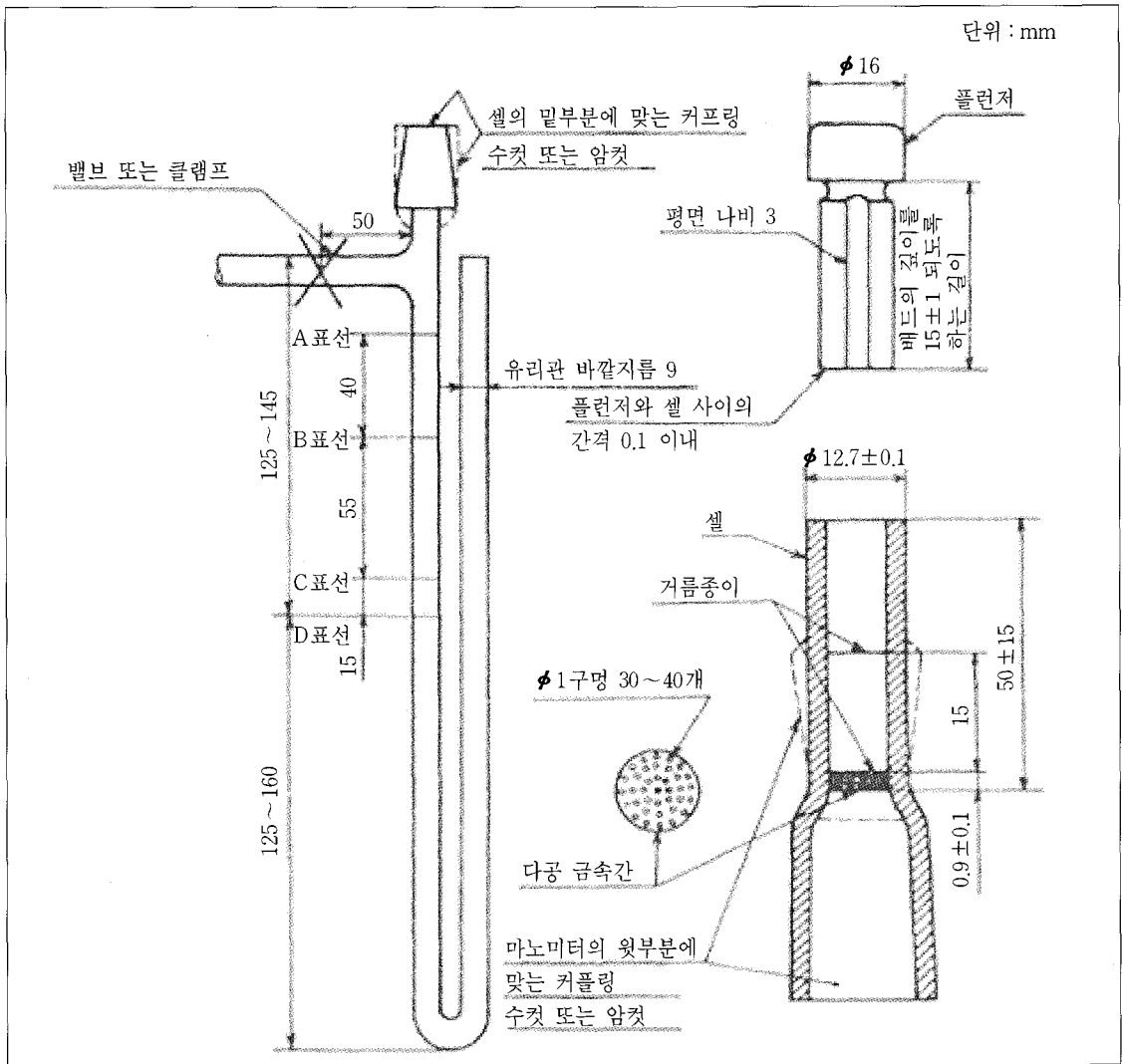
〈식-4〉에 의해 분체 충전층의 유체 투과율은 기공율 및 분체 비표면적의 함수이므로, 기공율과 투과도를 알면 분체의 비표면적을 알 수 있다. 〈식-4〉에서 k는 Kozeny 상수라 하고 분체층 중의 유체의 통로가 구부러진 정도를 나타내며, 입자의 형상과 충전율에 영향을 미치지만, Corman에 의해 측정된 결과인 5.0을 일반적으로 사용하고 있다.

〈식-1〉에 〈식-4〉를 대입하고, k=5.0과 중력계수를 사용하여 정리하면 〈식-5〉가 얻어진다. 다만, t초간에 투과되는 공기량은 Qcm³이다.

$$S_w = 14/\rho X [(\Delta P \cdot A \cdot t)/(\eta \cdot L \cdot Q) X \epsilon^3/(1-\epsilon)^3]^{1/2} \dots\dots\dots \langle \text{식-5} \rangle$$

- S_w: 단위중량분체의 표면적(cm²/g), (S_v=ρS_w)
- ρ: 분체의 비중

〈식-5〉에 의해 분체 충전층에 공기를 투과했을



〈그림-2〉 블레인 투과장치 개요도

때 투과압, t 초 사이의 투과량, 기공율 등을 대입하여 비표면적을 계산한다. 브레인법에서는 압력차 ΔP , 투과공기량 Q , 분말 층진층의 형상 L 및 A가 장치의 고유값이므로 이것을 정리하여 상수 K_B 로 나타내면 〈식-5〉는 〈식-6〉과 같이 된다.

$$S_w = K_B / \rho X (t/\rho)^{1/2} X (\epsilon^3 / (1-\epsilon)^3)^{1/2} \quad \dots\dots\dots \langle \text{식-6} \rangle$$

여기서, K_B 는 기지의 비표면적(S_0)을 갖는 분체(표준시멘트)를 사용하여 적당한 기공율의 시료 층진층을 만들고 앞서 언급했듯이 표선 B-C간의 마노메타액을 낙하시킨 시간을 측정하여 미지 시료에 대한 비표면적을 구할 수 있다.

다시 설명하면, 비중 ρ 의 분말을 단면적 $A(\text{cm}^2)$, 높이 $L(\text{cm})$, 기공율 ϵ 의 압축 베드를 만들고, 압력차 ΔP 일 때, 점도 η_{poise} 의 기체가 t 초간에 $\nu(\text{cm})$

만큼 투과한다. 그러면 다음 <식-7>이 성립한다.

$$S_w = 14 / [\rho(1-\epsilon)] X [(\epsilon^3 \cdot t \cdot a) / (\eta \cdot \nu \cdot L) X \Delta P]^{1/2} \dots\dots\dots \langle \text{식-7} \rangle$$

<그림-2>에서 셀 부분에 시료를 설치하고 마노메타액을 A표선까지 상승시키고 코크를 잠근 다음, 액이 A표선으로부터 B표선을 통과할때의 시간을 초시계로 측정한다. 이때에 <식-7>에서 $\nu = BC \cdot a$, ΔP (평균압) = $\sigma \cdot H = [(H_1 - H_2) / \log(H_1 / H_2)] \cdot \sigma$ 라면 다음과 같은 <식-8>을 얻을 수 있다.

$$S_w = K_4 [(\epsilon^3 \cdot t) / n] / [\rho(1-\epsilon)] \dots\dots\dots \langle \text{식-8} \rangle$$

ϵ 가 일정한 값을 선택하면

$$S_w = K_3 [(t/n) / \rho] \dots\dots\dots \langle \text{식-9} \rangle$$

η 가 일정한 값이라면

$$S_w = K_2 (t^{1/2} / \rho) \dots\dots\dots \langle \text{식-10} \rangle$$

비중 ρ 를 일정하게 하면

$$S_w = K_1 \cdot t^{1/2} \dots\dots\dots \langle \text{식-11} \rangle$$

기지의 분말도 S_0 의 것과 비교하는 것에 의해 비표면적을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [S \cdot \rho \cdot (1-\epsilon)] / [(\epsilon^3 \cdot t) / n]^{1/2} \\ & = [S_0 \cdot \rho_0 \cdot (1-\epsilon_0)] / [(\epsilon_0^3 \cdot t_0) / n_0]^{1/2} \dots\dots \langle \text{식-12} \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_w & = S_0 \cdot \rho_0 / \rho X (t/t_0)^{1/2} X (n_0/n)^{1/2} X (1-\epsilon) \\ & / (\epsilon^3)^{1/2} X (\epsilon_0^3)^{1/2} / (1-\epsilon_0) \dots\dots\dots \langle \text{식-13} \rangle \end{aligned}$$

3. 맺는 말

지금까지 투과율을 이용하여 비표면적을 측정하는 원리에 대해 설명하였다. 유체의 투과율을 이용하면 비표면적 뿐만 아니라 평균입경, 다공체의 기공량, 기공의 분포도 등을 측정할 수 있다. 측정원리를 다시 한번 언급하면, “구형입자로 구성된 분말 베드는 그중에 기공을 가지고 있으며, 이 기공을 경유해서 공기가 통과하므로, 공기가 흐르는 경로의 전체 면적은 분말의 전체 표면적과 같다”는 원리에 비표면적을 구하였다. 따라서 어느 정도의 오차는 가지고 있지만, 장비가 간단하고 측정 조작이 간편하다는 장점이 있어 일반적으로 사용하기에는 적합하다. 그러나 정확한 비표면적을 측정할 경우에는 질소가스흡착법(BET) 등을 사용하여 비표면적을 구해야 한다. ▲

▶▶▶▶ 시사 용어 해설 ◀◀◀◀

▶ 페이퍼 컴퍼니(Paper Company)

사업활동에서 나오는 소득과 기타 합산소득에 대한 세금 절감 및 기업활동에 소요되는 제반 경비를 절감하기 위해 설립된 서류형태로만 존재하는 회사로서 일부에서는 돈세탁(머니 룬더링)을 위해 설립된다. 우리나라에선 대우증권이 1992년 버진 아일랜드에 역외펀드 관리 페이퍼 컴퍼니를 설립했고, 은행권에선 장기신용은행이 최초로 1995년 케이맨 군도에 페이퍼 컴퍼니 형태의 무인지점을 설치했다. 페이퍼 컴퍼니는 카리브해 연안의 조세도피지(Tax Haven)에 주로 설립된다.