

N₂기체의 흐름에 주입된 CO₂기체의 확산 및 분산 Diffusion and Disperision of Injected CO₂ Gas Into the N₂ Gas Flow

김유식[†] · 안대영

Yoo-Shik Kim[†] · Dae-Young Ahn

진주전문대학 소방안전관리과
(2002. 5. 10. 접수/2002. 7. 8. 채택)

ABSTRACT

Diffusion and dispersion of injected CO₂ gas into the N₂ gas flow are complex. In the packed column with porous particles the axial dispersion and the extra-particle mass transport as well as the intra-particle mass transport are involved. The pulse spreads by stationary diffusion during the period of arrested flow. Hence, the effect of axial dispersion, and of entrance and exit, as well as that of intraparticle convection should be eliminated during the period. The effective diffusivity was determined experimentally by using the gas chromatography, which is to arrest the gas flow during the period after injecting the pulse. This experiment method hasn't been used often in the field. Effective diffusivities are raised with temperature increasing, and it is quite satisfied compared to literature values. In this study, the calculated data of gaseous chemical for extinguish fires could be helpful to appreciate several physical phenomenons. Also, it could be expected that, the calculated data of this study might be very useful for development of excellent gaseous chemical for extinguish fires and improvement of its efficiency.

Keywords : diffusion, dispersion

1. 서 론

N₂ 기체의 흐름에 펄스로서 CO₂ 기체를 일정량 주입함으로써 나타나는 여러 가지 확산 및 흡착에 관련된 물질전달현상은 매우 복잡하다. 특히, 입자가 충전된 계에 대한 물질전달 현상은 입자외부의 경막 물질전달 현상과 축방향의 분산과정이 도입된다. 충전된 입자가 다공성 물질일 경우에는 입자내부의 확산까지 고려하여야 하며, 여기에는 분자확산과 Kundsens 확산 및 표면확산도 포함된다.

확산에 대한 연구는 Graham에 의하여 실험적으로 시작되었다.^{1,2)} Graham의 확산법칙은 Hoogschagen에 의하여 확인되었으며,³⁾ 그 이후 Wicke와 Hugo에 의하여 재확인 되었다.⁴⁾

Schneider와 Smith는^{5,6)} 흡착평형상수와 흡착속도상수, 내부 표면확산계수를 측정하였으며, 충전입자로서

이원세공 고체입자가 충전된 계에 대하여 Andrieu와 Smith,⁷⁾ Dogu와 Ercan등은⁸⁾ 마크로 세공(marcopore) 확산계수와 마이크로 세공(micripore) 확산계수를 측정하였다.

다공성 고체내부에서의 확산현상의 메카니즘은 다공성 고체가 충전된 계에서 기체와의 물질전달에 중요한 역할을 한다. 세공의 구조에 대한 규명이 아직 완전하지 않고 여러 가지 물질전달과정이 포함되어지므로 다공성 고체의 충전계에서 기체의 물질전달 파라메타는 직접 추산하여야 한다.

이러한 물질전달 현상을 측정하기 위한 방법으로 최근에는 가스 크로마토그래피(gas chromatography)를 이용한 방법이 많이 사용되고 있다.

Knox와 McLaren은⁹⁾ 주입되는 펄스를 가스의 흐름속에서 일정시간 동안 정지시키는 가스 크로마토그래피법으로 분자확산계수를 측정하였다.

본 연구의 목적은 N₂ 가스의 흐름에 CO₂ 가스의 일정량을 펄스로 주입하여 펄스가 계의 중간부분에 도달되었을 때, 일정 시간동안 N₂ 가스의 흐름을 정지시키는 가스 크로마토그래피법을 사용하여 여러 가지 확산

이윤용 박사 정년퇴임 기념논문

[†]E-mail: yoosk9119@hanmail.net

계수와 비공성 입자에 대한 입자 외부 굴곡인자 및 다공성 입자에 대한 입자 내부 굴곡인자 등을 추산해 보고자 한다.

이러한 방법을 이용하여 추산된 파라미터들은 그리 많지 않으므로, 본 연구에서 나타낸 결과들은 현재 널리 이용되고 있는 가스계 소화약제의 물리적 현상들을 규명하고 가스계 소화약제들을 개발하는 데에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

2. 이 론

가스의 흐름에 일정량의 펄스를 주입하여 펄스가 계의 중간 부분에 도달되었을 때 일정 시간동안 가스의 흐름을 정지시키는 가스 크로마토그래피법으로 충전탑의 유효확산계수를 비교적 쉽게 측정할 수 있다.

2.1 확산이론

둘 또는 그 이상의 분자성분을 포함하는 기체 혼합물에서 각 성분 기체의 농도는 계의 각 지점마다 다르므로 혼합물의 조성은 불 균일성을 없애려는 경향이 발생한다. 이와 같이 계에서 대류현상이 없는 상태의 거시적 물질이동을 분자확산(molecular diffusion)이라 한다.

기체 혼합물에서의 분자확산은 기체의 운동이론으로서 해석이 가능하다. 기체의 운동이론에¹⁰⁾ 의하면, 절대영도보다 높은 온도에서 각 분자들이 연속적으로 불규칙한 운동을 하며 희박한 농도의 기체 혼합물에서 각 기체 분자들의 거동은 다른 기체 분자에 관계없이 이동하게 된다. 이 경우에 용질 기체분자와 용매 기체 분자의 충돌은 연속적으로 일어나며 지그재그의 불규칙한 경로운동을 한다. 또한 경우에 따라서는 저 농도 영역에서 고농도 영역으로의 분자의 이동도 생겨나게 된다.

물질전달에 대한 법칙은 물질이동의 추진력인 농도구배와 이동성분의 플럭스와의 관계를 나타낸다.

플럭스는 물질이동의 방향에 수직한 단면을 단위면적·단위시간당 통과하는 질량으로 벡터 량을 나타낸다.

분자확산의 경우 몰플럭스에 대한 해석은 Fick에 의하여 최초로 시도되었으며, 일정한 온도와 압력 하에서 z 방향으로 성분A의 확산만을 고려할 경우 Fick의 확산 제1법칙은 다음과 같이 표현된다.¹¹⁾

$$N_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (1)$$

Fick의 확산 제1법칙에 관한 식으로부터 Stafen¹²⁾과 Maxwell¹³⁾ 다음의 Stafen-Maxwell 확산방정식을 나타내었다.

$$N_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} + y_A(N_A + N_B) \quad (2)$$

위 식에서

$$-D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} : \text{농도구배에 의해서 일어나는 몰 플럭스}$$

이고 $y_A(N_A + N_B)$: 유체의 흐름에 의해서 일어나는 성분 A의 몰 플럭스로서 벌크(bulk) 흐름에 의한 플럭스이다. 성분A의 농도가 아주 묽은 경우(즉, $N_A \approx 0$), 또는 등몰 상호확산일 경우 $y_A(N_A + N_B) = 0$ 이다.

2.2 유효확산 방정식

입자내부 확산계수를 구하기 위해서는 불균일 매체에 대한 정상상태 확산이론을 적용하여야 한다.¹⁴⁾ 정상상태 확산이론으로써 입자내부 확산계수를 구하기 위해서는 입자내부에서 확산물질의 총량이 일정한 상태의 유사 정상상태 조건하에서 유효 확산계수를 측정하여야 한다.

다공성 입자 충전층에서의 물질수지식은 다음과 같다.

$$\frac{D_e \partial^2 C}{\epsilon_t \partial z^2} - \frac{D_i 1 - \epsilon_t}{R} \left(\frac{\partial C_i}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{\partial C}{\partial t_B} \quad (3)$$

위 식에서 다공성 입자 속으로 유체가 들어가는 플럭스는 다음 항으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{D_i 1 - \epsilon_t}{R} \left(\frac{\partial C_i}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (4)$$

다공성 입자 충전층에서 펄스가 계의 중간부분에 도달되었을 때 일정 시간동안 가스의 흐름이 정지된 시간동안의 유효확산방정식은 식 (3)에서 식 (4)를 소거하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t_B} = \frac{D_e \partial^2 C}{\epsilon_t \partial z^2} \quad (5)$$

초기조건 : 농도분도를 다음과 같이 가정한다.

$$C(z) = C_0(z), \text{ at } t_B = 0 \quad (6)$$

경계조건 : 펄스입력에 대하여

$$C(z \rightarrow \infty, t_B) = 0 \quad (7)$$

Fourier domain에서의 해를 구하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \exp\left(-\frac{\omega^2 D_e t_B}{\epsilon_t}\right) \quad (8)$$

식 (8)에서 계의 2차공간 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d^2}{d\omega^2} \left(\frac{\bar{C}}{\bar{C}_0} \right) = \frac{2D_e t_B}{\varepsilon_t} = S_{t_B} \quad (9)$$

Column 출구에서의 응답은 가스의 흐름이 정지된 시간 이외의 분산도 포함하므로 선형 계에 대한 중첩의 원리를 적용하여 공간분산을 구하면 다음과 같다.

$$S = S_0 + \frac{2D_e t_B}{\varepsilon_t} \quad (10)$$

입자가 균일하지 않은 경우의 유효확산계수에 대한 Maxwell 이론을¹⁵⁾

$$\frac{D_e}{D_{AB}} = 1 + 3\gamma(1 - \varepsilon_b) + 3\gamma^2(1 - \varepsilon_b)^2 \cdot (1 + 2\gamma\delta) \quad (11)$$

그리고 $\gamma = (D_i - D_{AB}) / (D_i + 2D_{AB})$, $\delta = D_i / D_{AB}$ 이다. 식 (11)은 입자들이 서로 무한히 떨어져 있는 경우에 대한 이론 식이므로 충전층의 경우에는 적용할 수 없으며, 식 (12)를 충전층의 경우에 대하여 적용할 수 있다.¹⁴⁾

$$D_e = \frac{\varepsilon_b D_{AB}}{\tau_{ext}} + D_i \left(1 - \frac{\varepsilon_b}{\tau_{ext}} \right) \left(\frac{1}{f} \right) \quad (12)$$

여기서,

$$f = 1 + \frac{\varepsilon_b}{3} \left(\frac{D_i}{D_{AB}} - 1 \right) \quad (13)$$

입자 외부 굴곡인자와 입자 내부 굴곡인자는 각각 다음의 식 (14)와 식 (15)로 나타낼 수 있다.¹⁶⁾

$$\tau_{extra} = \varepsilon_b \frac{D_{AB}}{D_V} \quad (14)$$

$$\tau_{intra} = \varepsilon_p \frac{D_C}{D_i} \quad (15)$$

만일, 세공 내에서 분자확산이 지배적이라면 입자 내부 굴곡인자는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\tau_{intra} = \varepsilon_p \frac{D_{AB}}{D_i} \quad (16)$$

전이영역의 몰플럭스로부터 합성확산계수 D_C는 성분 A의 농도 의존적으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{D_C} = \frac{1 - \sigma_{AB} y_A}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{K,A}} \quad (17)$$

여기서 D_{K,A}는 세공에서 성분 A의 Kundsén 확산계수이고 다음 식으로 주어진다.

$$D_{K,A} = \frac{2}{3} r_p \sqrt{\frac{8RP}{\pi M_A}} \quad (18)$$

등불 상호확산의 경우와 묶은 계의 경우에 대하여 식 (18)은 다음의 Bosanquet식으로 쓸 수 있다.¹⁷⁾

즉, $\sigma_{AB} = 0$, $y_A \ll 1$ 에 대하여

$$\frac{1}{D_C} = \frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{K,A}} \quad (19)$$

이 식을 D_C에 대하여 다시 쓰면 $D_C = \left(\frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{K,A}} \right)^{-1}$ 로 쓸 수 있다.

3. 실험

실험장치의 구성은 그림 1에 나타내었으며, 가스주입 밸브와 가스 sampler 및 열전도도 검출기가 부착된 가스 크로마토그래프를 사용하였다. 6-port valve를 부착하여 펄스를 일정하게 주입되도록 하였고, 가스주입밸브와 column 및 열전도도 검출기 부분은 1°C 이내의 범위로 항온을 유지하였다. 유량은 출구에 부착된 비누거품 유량계로 측정하였고, column의 입구와 출구의 압력차이의 측정은 수은 manometer에 카세트 메타를 부착하여 정확히 읽었다.

실험에 사용한 기체는 모두 99.95% 이상의 고순도로서 운반기체는 N₂를 사용하였고 펄스역할의 확산기체로는 CO₂를 사용하였다.

충전시킨 입자들은 ASTM 표준체로 선별하여 column에 충전시킨 후 운반기체를 통과시키면서 200°C에서 12시간 이상의 충분한 시간동안 전처리 하였다. Column의 특성은 표 1에 제시하였고, 입자들의 특성은 표 2에 제시하였다.

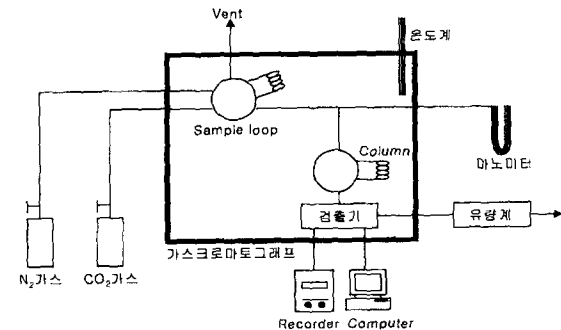


그림 1. 실험장치의 구성도.

표 1. 실험에 사용된 column의 특성

Column	Length (cm)	I.D (mm)	ϵ_b	ϵ_t
Empty	295	3.10	1.000	1.000
Nonporous (steel ball)	295	3.10	0.4388	0.4388
Porous (fire brick)	107	3.10	0.4162	0.7202

표 2. 실험에 사용된 입자들의 특성

	Steel ball	Firebrick
$\rho_p(\text{kg/m}^3) \times 10^{-2}$	79.00	7.34
$\rho_s(\text{kg/m}^3) \times 10^{-2}$	79.00	15.40
Mesh size(ASTM)	6-7	60-80
Average diameter(mm) $\times 10^{-2}$	2.58	0.22
Average pore diameter(mm) $\times 10^{-2}$		199.00
$\epsilon_p \times 10^{-2}$		52.23

실험을 수행하기 전에 밸브를 flow mode로 하여 기체 크로마토그래프를 가동시켰다. 온도를 설정하고 원하는 온도에 도달하면 충분히 안정화시키고 column의 입구와 출구에서의 압력 차가 지나치게 크지 않도록 유량을 적절히 조절하였다.

충분한 시간을 경과시켜 밸브배열을 일정 시간동안 가스의 흐름을 정지시키는 mode로 전환하고 valve에 부착된 압력 조절밸브를 이용하여 압력이 flow mode에서와 같은 압력이 되도록 조절하였다. 예비조작으로서 펄스를 일정량 주입하여 응답이 나온 후에도 기록계의 baseline이 완전히 안정화 되도록 하였다.

응답곡선의 높이와 폭이 적당한 크기가 되도록 가스 크로마토그래프의 current와 range 및 chart speed를 결정하였다.

이상의 조작이 끝난 후에 empty column과 비공성 입자 충전층 및 다공성 입자 충전층에 대한 실험을 순차적으로 수행하여 그 결과들을 No.1~No.19까지 표 3~5에 각각 보였다.

4. 결과 및 토론

실험 결과로부터 일정 시간동안 가스의 흐름을 정지시키는 동안의 유효확산방정식과 유효입자내부확산계수의 추산을 위하여 Park등이¹⁴⁾ 제안한 정상상태확산이론에 대한 식¹²⁾의 적용이 가능하다.

빈 column과 비공성입자 충전층 및 다공성입자 충전층에 대하여 식 (10)을 이용한 물질전달 파라미터를 구하기 위해서는 응답의 분산과 가스의 흐름을 정지시킨 시간에 대하여 도시한 그래프로 부터 직선의 기울기를 구해야 한다.

Column내부에 아무것도 채우지 않은 빈 column에서 분자확산계수($D_{A,B}$)를 측정하였고, 세공이 없는 비공성 입자가 충전된 column에서는 유효입자 외부확산계수(D_V)를 측정하였으며, 다공성 입자가 충전된 column에서는 입자외부 및 내부의 유효 합성확산계수(D_e)를 측정하였다.

분자확산계수에 대한 Fuller등의 상관관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.¹⁸⁾

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \cdot T^{1.75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P \left\{ (\sum_A V_i)^{1/3} + (\sum_B V_i)^{1/3} \right\}^2} \quad (20)$$

단, V_i 는 Fuller등에 의하여 주어진 값이다.

식 (20)으로부터 분자확산계수($D_{A,B}$)를 계산할 수 있고, 식 (10)을 빈 column에 대하여 적용하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$S = S_0 + 2D_e t_B \quad (21)$$

식 (21)로부터 구한 분산자료들을 시간에 대하여 그림 2에 도시하였고, 그림에서의 직선의 기울기로부터 분자확산계수($D_{A,B}$)를 구하여 표 3에 나타내었다.

분자확산계수($D_{A,B}$)는 계산한 이론값과¹⁸⁾ 비교하여 표 3에 나타내었다. 표 3에서는 온도가 상승함에 따라서 분자확산계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 각 온도에 대한 평균값은 이론치와 비교에서 비교적 유사한 값으로 나타났다.

식 (10)을 세공이 없는 비공성입자의 충전층에 대하여 적용하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

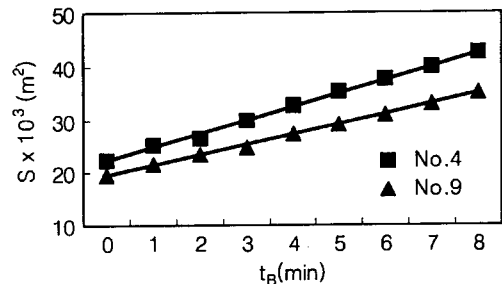


그림 2. 빈 column에서 S와 t_B 에 대한 도식.

표 3. 빈 column에서 측정한 분자확산계수

No.	T (°C)	$\Delta P \times 10^4$ (atm)	$D_{AB} \cdot (P/P_0) \times 10^4$ (m ² /s)	Average D_{AB}	$D_{AB} \times 10^4$ (m ² /s) cal)
No.1	40	4.442	0.1695		0.176
No.2	40	4.342	0.1805		
No.3	40	4.474	0.1688	0.1729	
No.4	70	4.342	0.2057		0.206
No.5	70	4.441	0.2054		
No.6	70	4.501	0.2062	0.2058	
No.7	100	5.921	0.2234		0.239
No.8	100	5.658	0.2275		
No.9	100	4.868	0.2295	0.2268	

cal)calculated value of Fuller *et al.*

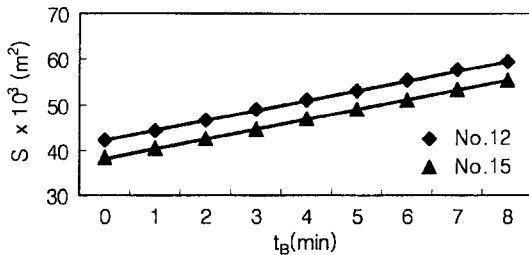


그림 3. 비공성 입자 충전층에서 S와 t_B에 대한 도식.

표 4. 비공성 입자에 대한 유효 입자외부확산계수

No.	T (°C)	$\Delta P \times 10^4$ (atm)	$D_V \times 10^2$ (m ² /s)	τ_{extra}
No.10	40	6.734	6.823	1.349
No.11	40	5.012	6.808	1.367
No.12	70	4.868	7.663	1.406
No.13	70	5.395	7.934	1.358
No.14	100	7.368	9.239	1.353
No.15	100	5.658	9.245	1.352

$$S = S_0 + \frac{2D_V t_B}{\epsilon_b} \quad (22)$$

식 (22)로부터 구한 분산자료들을 시간에 대하여 도시하여 그림 3에 나타내었고, 그림 3의 직선의 기울기로부터 유효 입자외부확산계수(D_V)를 구하여 표 4에 나타내었다.

표 4에서와 같이 온도가 상승함에 따라서 유효 입자외부확산계수(D_V)도 증가함을 확인할 수 있다.

표 5. 다공성 입자에 대한 확산계수

No.	Pulse Gas	T (°C)	$\Delta P \times 10^4$ (atm)	$D_e \times 10^2$ (m ² /s)	$D_i \times 10^2$ (m ² /s)	τ_{intra}
No.16	Ar	40	12.041	0.1072	0.0532	2.1231
No.17	He	40	47.681	0.3598	0.1833	2.0597
No.18	Ar	70	13.952	0.4472	0.2351	1.9441
No.19	He	70	13.891	0.4394	0.2238	1.9721

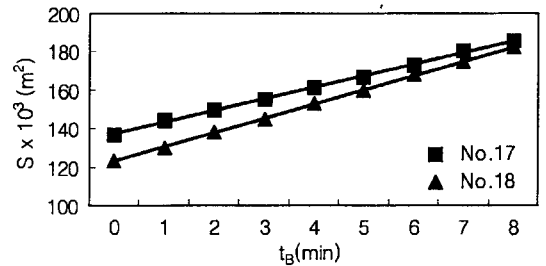


그림 4. 다공성 입자 충전층에서 S와 t_B에 대한 도식.

식 (10)에 의하여 다공성 입자 충전층에 대한 분산 자료들을 시간에 대하여 도시하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 직선의 기울기로부터 유효 충전탑확산계수(D_e)를 구할 수 있고, 식 (12)와 식 (13)으로부터 입자내부확산계수(D_i)를 구하였다.

다공성 입자 충전층에 대한 분산 자료들과 입자내부 굴곡인자를 식 (15)로부터 구하여 다른 결과들과 함께 표 5에 나타내었다.

일정 시간동안 분 단위로 가스의 흐름을 구속하게 되면 정상상태로의 복귀가 아주 짧은 시간동안에 매우 빠르게 이루어지므로 가스의 흐름을 정지시키는 시간 동안의 관계식 (5)와 입자내부확산계수(D_i)를 구하기 위한 식 (12)를 적용할 수 있다.

다공성 물질에서의 흡착성 기체의 흡착량은 온도가 상승함에 따라서 감소하게 된다.⁷⁾ 다공성 물질을 충전한 경우의 흡착평형상수는 펄스로 사용한 CO₂가스가 흡착성 가스이므로 흡착된 가스가 탈착되는데 상당한 시간이 소요되므로 응답곡선의 데이터를 정확히 해석하기가 매우 어렵고, 해석한 결과도 직선에서 크게 벗어남으로서 재현성이 없다고 하겠다. 따라서 일정 시간동안 가스의 흐름을 구속하는 방법으로 흡착평형상수를 구하기는 어려우므로 펄스가스를 흡착성이 아닌 비흡착성 가스로서 He와 Ar를 사용하여 구한 자료들을 표 5에 보였다. 표 5에서 압력 변화에 대한 유효 충전탑확산계수(D_e)와 입자내부확산계수(D_i)는 크게 변화함을 알 수 있고, 또한 온도가 상승함에 따라 증가

함을 알 수 있다.

가스의 흐름을 일정 시간동안 정지시키는 방법으로 측정된 응답의 분산은 빈 column과 비공성 물질을 충전한 경우 및 다공성 물질을 충전한 경우 모두에 대하여 각각 가스 흐름의 정지 시간에 대하여 선형적으로 증가함을 그림 2~4를 통하여 확인할 수 있다.

5. 결 론

오늘날의 첨단 산업시설과 사회의 많은 분야에서 만일의 경우에 사용하게 되는 소화약제들은 소화력이 뛰어나고 사용후 휴유증을 남기지 않아야 한다. 이러한 소화약제로서 사용되는 가스계의 소화약제들은 소화력은 우수하지만 많은 비용을 필요로 한다. 앞으로 이러한 가스계의 소화약제들은 사용의 저변확대를 위하여 소화력의 성능이나 비용 면에서 우수한 약제가 개발되어야 할 것이다.

본 연구에서는 N_2 기체의 흐름에 펄스로서 CO_2 기체를 일정량 주입하여 가스의 흐름을 일정시간 동안 정지시킨 상태에서의 확산계수들을 측정하였다. 표 3~5에서와 같이 확산계수들은 온도가 상승함에 따라서 증가함을 확인하였고, 압력의 변화에 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. 빈 column에 대한 확산계수들을 각 온도에 대한 평균값을 취하여 계산된 이론치와의 비교에서 비교적 유사한 값으로 나타났다. 표 4에 나타난 비공성 입자에 대한 입자 외부굴곡인자는 근사값으로 사용되는 $\sqrt{2}$ ¹⁹⁾와 비교적 유사한 값이다. 표 5에 나타난 다공성 입자에 대한 입자 내부굴곡인자는 본 실험에 사용된 물질보다 세공이 큰 99% AlO_3 에 대한 값 (1.60~1.72)¹⁴⁾과 비교하여 비교적 좋은 결과라고 할 수 있겠다. 또한 빈 column과 비공성 입자 충전층 및 다공성 입자 충전층의 각각에 대한 응답의 분산은 시간에 대하여 증가함을 확인하였다.

여기에 제시된 확산에 대한 자료들은 가스계 소화약제들의 여러 가지 물리적 현상들을 해석하는 데에 많은 도움이 될 수 있으리라 생각된다.

펄스로 주입되는 기체가 흡착성으로서 빈 공간과 세공이 없는 물질들 속에 주입되었을 경우에는 자료의 해석이 비교적 순조로울 수 있다. 반면에 충전된 물질이 다공성이고 펄스로 주입된 기체가 CO_2 와 같은 흡착성일 경우 기체의 탈착과정에서 많은 시간이 소요됨으로 확산과 흡착에 관련된 여러 가지 물리적 현상들을 밝히는데 어려움이 뒤따른다.

앞으로 가스계 소화약제의 성능 향상을 위해서 이러한 흡착성 기체의 흡착 현상에 대한 세부적인 메커니

즘의 규명에 많은 연구가 뒤따른다면 더욱더 좋은 결과가 있으리라 생각된다.

사용기호

$C(z, t)$: effective concentration column, mol/m ³
C_A	: concentration of component A, mol/m ³
C_i	: concentration in pores inside of particles, mol/m ³
$C_0(z)$: initial concentration profile, mol/m ³
$\bar{C}(z, t)$: Fourier transform of $C(z, t)$
$\bar{C}_0(\omega)$: Fourier transform of $C_0(z)$
D_c	: composite diffusivity, m ² /s
D_e	: effective column diffusivity, m ² /s
D_i	: effective intraparticle diffusivity, m ² /s
$D_{K,A}$: Knudsen diffusivity, m ² /s
D_{AB}	: molecular diffusivity, m ² /s
D_v	: effective extraparticle diffusivity, m ² /s
f	: correction factor,
M_A, M_B	: Molecular weight of A and B, respectively
N_A, N_B	: molar flux of A and B in z-direction, respectively, mol/m ² /s
P	: pressure, atm
P_0	: standard atmospheric pressure, atm
R	: particle radius, m
r	: radial coordinate in spherical particle, m
S	: spatial variance, m ²
S_0	: spatial variance in fluid period, m ²
y_A	: mole fraction of species A
z	: axial coordinate, m

Greek Letters

ϵ_b	: void fraction of column
ϵ_p	: particle porosity
ϵ_t	: total porosity of column
ρ_p	: Particle density(kg/m ³)
ρ_s	: Solid phase density(kg/m ³)
γ	: diffusivity ratio function,
ω	: Fourier domain variable with respect to z, 1/m
τ_{extra}	: extraparticle tortuosity factor,
τ_{intra}	: intraparticle tortuosity factor,

참고문헌

1. Graham, T., Phil. Mag., 2, 175, 269, 351(1833).

2. Graham, T., *Annl. Phys.*, 28, 331(1833).
3. Hoogschagen, J., *Ind. Eng. Chem.*, 47, 906(1955).
4. Wicke, E. and Hugo, P., *Z. Phys. Chem., N.F.*, 28, 401(1961).
5. Schneider, P. and Smith, J.M., *AIChE J.*, 14, 762 (1968).
6. Schneider, P. and Smith, J.M., *AIChE J.*, 14, 886 (1968).
7. Andrieu, J. and Smith, J.M., *AIChE J.*, 26, 944 (1980).
8. Dogu, G. and Ercan, C., *Canadian J. Chem. Eng.*, 61, 660(1983).
9. Knox, J. H., and McLaren, L., *Anal. Chem.*, 36, 1477(1964).
10. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. James R. Welty and Charles E. Wicks, Robert E. Wilson. : Third Edition p.472.
11. Fick, A., *Pogg. Ann.*, 94, 59, 1855, Abridged in *Phil. Mag.*, 10, 30(1855).
12. Stefan, J., *Akad. Wiss. Wien.*, 65, 323(1872).
13. Maxwell, J. C., *Phil. Mag.*, 20, 21(1860).
14. Park, I. S., Smith, J. M. and McCoy, B. J., *AIChE J.*, 33, 1102(1987).
15. Maxwell, C., "Treaties on Electricity and Magnetism", Oxford Univ. Press, London, 1, 365 (1973).
16. Satterfield, C. N., "Mass Transfer in Heterogeneous Catalysis", MIT Press, Cambridge, MA(1970).
17. Bosanquet, C. H., *British TA Rept. BR-507*(1944).
18. Fuller, E. N., Schettler, P. D. and Giddings, J. C., *Fund.*, 4, 451(1965).
19. Cerro, R. L. and Smith, J. M., *AIChE J.*, 16, 1034 (1970).