

입자층 에어로졸여과의 과도거동에 관한 실험연구
— 압력강하에 대한 입자 퇴적의 영향 —

An Experimental Study on Transient Behavior of Granular
Aerosol Filtration

— Effect of Particle Deposition on Pressure Drop —

정 용 원

인하대학교 환경공학과

(1996년 10월 31일 접수, 1997년 5월 2일 채택)

Yong-Won Jung

Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 31 October 1996; accepted 2 May 1997)

Abstract

Experiments on granular filtration of polydispersed aerosols were conducted to determine the changes in pressure drop necessary to maintain a given gas flow rate as filter becomes clogged with deposited particles. Among the various variables which affect the increase in the pressure drop during the filtration, the most important one was found to be the size of the deposited aerosol particles. It was shown that for a given extent of the total deposition, the extent of increase in pressure drop increases with the decrease of the deposited aerosol size.

For the general case where the deposited particles have different sizes, a procedure was proposed for correlating and predicting experimental results on pressure drop. This procedure was found applicable to bidispersed aerosols and polydispersed aerosols.

Key words : granular filtration, polydispersed aerosols, pressure drop, clogging, transient

1. 서 론

입자층여과 (granular filtration) 기술은 다양한 종류의 유체로부터 미량의 작은 입자들을 제거하는데 흔히 적용되는 고액분리 또는 고체-기체 분리공정이다. 입자층여과의 역사는 매우 오래되어 대략 기원전 200년부터 정수에 사용되어 왔으며, 수돗물의 정수과정 중의 하나인 모래층여과기는 입자층여과

의 전형적인 한 예이다. 입자층여과를 가스의 정화에 이용할 경우의 장점으로는 입자층을 구성하는 물질, 즉 충전물질이 세라믹 계통의 물질로 비교적 고온과 부식성이 강한 환경에서 적용될 수 있는 물질이 많고, 또한 가격도 저렴하여 특히 고온과 부식성이 강한 배기가스의 정화에 잘 적용될 수 있다는 점이다. 입자층여과는 크게 고정층여과, 이동층여과, 유동층여과의 세가지로 나눌 수 있으며, 각 방법의 장단점에 따라 적용 대상도 달라지는데 (Tien, 1989),

본 연구의 대상 시스템은 고정층여과시스템이다.

2. 입자층여과에 관한 이론적 고찰

입자층여과의 기본 원리는 다음과 같다. 에어로졸이 입자층 내부를 통과할 때 에어로졸에 작용하는 여러 가지의 힘(관성력, 브라운운동, 전기력, van der Waals력 등...)에 의해 입자층 표면 또는 이미 포집된 에어로졸 입자에 퇴적(deposition)이 되며, 시간이 경과함에 따라 입자층 내부에 포집된 에어로졸 입자의 양도 증가되는데, 이에 따라 동일 유량의 가스를 처리한다고 가정할 경우 입자층에서의 집진 효율과 압력강하가 변화하게 된다. 이러한 양상을 입자층여과의 과도거동이라 부르며, 입자층여과의 설계 및 효과적인 제어를 위해서는 여러 공정변수에 대한 입자층여과의 과도거동을 파악하는 것이 필수적이다. 입자층여과의 과도거동을 묘사하는 기본방정식은 아래와 같다(Tien, 1989).

거시적 보존방정식 (macroscopic conservation equation)

$$U_s \frac{\partial C_k}{\partial Z} + \frac{\partial \sigma_k}{\partial \theta} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

여과속도식 (filtration rate equation)

$$\frac{\partial \sigma_k}{\partial \theta} = U_s (\lambda)_k C_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

압력강하식 (pressure drop equation)

$$(-\Delta P) = \int_0^L \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right) dZ \quad (3)$$

초기 및 경계조건

$$C_k = (C_k)_{in} \quad Z = 0 \quad \theta > 0 \quad (4)$$

$$C_k = (C_k)_0 \quad \sigma_k = (\sigma_k)_0 \quad Z \geq 0 \quad \theta \leq 0 \quad (5)$$

여기에서 하첨자 k 는 다분산 에어로졸의 입자크

기분포를 불연속(discrete)으로 가정할 경우 k 번째 크기의 에어로졸 입자를 뜻하며, N 은 입자크기의 전체 수를 의미한다. σ_k 는 비퇴적(specific deposit)이라 부르며, 입자층 단위부피당 포집된 k 번째 크기의 에어로졸 입자부피로 정의된다. 또한 $(\lambda)_k$ 는 k 번째 크기의 에어로졸 입자의 여과계수(filter coefficient)이고, ΔP 는 입자층의 압력강하, U_s 는 공탑가스속도(superficial gas velocity), $(C_k)_{in}$ 은 유입(influent) 에어로졸의 농도, (C_k) 는 에어로졸의 농도, $(C_k)_0$ 와 $(\sigma_k)_0$ 는 각각 (C_k) 와 (σ_k) 의 초기 값이다. 기타 독립변수인 Z 는 입자층의 상부에서 측정된 거리, L 은 입자층의 두께, θ 는 다음과 같이 정의되는 수정시간인데,

$$\theta = t - \int_0^Z \frac{\varepsilon dZ}{U_s} \quad (6)$$

여기에서 t 는 실제시간, ε 는 입자층의 공극률이다. 식 (1)과 (2), 그리고 초기조건과 경계조건인 식 (4), (5)를 풀면 시간에 따른 에어로졸 농도 변화와 σ_k 로 표시되는 입자층내부의 에어로졸입자 퇴적정도를 Z 의 함수로 구할 수 있다. 또한 압력강하는 식 (3)으로 구할 수 있는데, 이 때 국부 압력구배(local pressure gradient), $(\partial P/\partial Z)$ 는 입자퇴적 정도(extent of particle deposition)의 함수이다. 따라서 입자층여과의 기본방정식의 해를 구하기 위해서는 여과계수, $(\lambda)_k$ 와 국부 압력구배의 여러 공정변수와의 함수관계를 알아야만 한다. 일반적으로 여과계수는 에어로졸을 포집하는 여과기의 능력을 나타내는 계수이며, 여재(filter medium)의 구조와 직접적으로 관계되어 있다. 입자층여과에서 여재의 내부에 입자의 퇴적정도가 증가됨에 따라 그 구조가 변화하게 되며, 또한 입자의 퇴적 정도는 시간과 여재 내부의 위치에 따라 변화하므로, $(\lambda)_k$ 는 Z 와 t 의 함수로 생각할 수 있다. 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\lambda)_k = (\lambda_0)_k F_k(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N, \alpha) \quad (7)$$

여기에서 $(\lambda_0)_k$ 는 집진초기의 상태, 즉 여재 내부에 포집된 에어로졸 입자가 없는 깨끗한 상태에서의 여과계수를 의미한다. 또한 F_k 는 에어로졸 부차적으로 인한 효과를 고려하는 보정계수로 생각할 수 있는데, 이는 전체 비퇴적(total specific deposit), 퇴적

의 조성, 즉 다분산 에어로졸의 경우 각 크기의 에어로졸 입자의 조성비, 및 관련 운영변수의 함수로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$F_k = F_k(\sigma, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N-1}, \alpha) \quad (8)$$

$$\sigma = \sum_{j=1}^N \sigma_j \quad (9)$$

$$\omega_k = \sigma_k / \sigma \quad (10)$$

여기에서 α 는 운영변수의 효과를 나타내는 매개 벡터 (parameter vector)이고, σ 는 전체 비퇴적, ω_k 는 전체 비퇴적 중 k 번째 크기의 에어로졸 입자의 비율을 의미한다. 한편 여과계수와 유사하게 압력구배, $(\partial P / \partial Z)$ 도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_0 G(\sigma, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N-1}, \beta) \quad (11)$$

여기에서 $(\partial P / \partial Z)_0$ 는 여재가 깨끗한 여과 초기의 압력구배를 나타내고, β 는 α 와 유사하게 운영변수의 효과를 나타내는 매개벡터이다. 한편 투과도 (permeability)는 압력구배에 반비례하므로, G 는 투과도에 대한 입자퇴적의 효과를 나타내는 보정계수로 간주할 수 있다. 따라서 입자층여과의 과도거동 문제는 $(\lambda_0)_k, F_k, (\partial P / \partial Z)_0, G$ 에 대한 관련 변수와의 상관식을 구하는 문제로 귀결될 수 있다. 여기에서 우선, $(\lambda_0)_k$ 는 초기 단위 포집기효율 (unit collector or single collector efficiency)과 수학적으로 연관 지을 수 있으며, 초기 단위포집기효율에 관한 상관관계 식으로는 Jung *et al.* (1989)의 상관관계식을 포함 다수의 상관관계식들이 문헌에 나와 있다. 또한 $(\partial P / \partial Z)_0$ 는 입자층의 압력강하에 관한 기존의 상관관계 식 등으로 구할 수 있다.

F_k 및 G 에 관한 상관관계식은 비교적 간단한 경우인 단분산 에어로졸 (즉, 에어로졸의 입자 크기가 동일한 경우)을 사용한 여과 실험을 통하여 얻어졌었는데, 이에 관한 가장 최근의 상관관계식으로는 Jung과 Tien의 상관관계식 (1991) 등이 있다. 한편, 다분산 에어로졸의 경우에는 입자층에 포집된 에어로졸 입자들이 동일한 크기들이 아니기 때문에 구

성입자들의 크기 및 조성의 효과를 고려해 주어야만 하는데, 이 경우에 실험적으로 모든 조건들을 포함한다는 것은 사실상 불가능한 것으로 판단된다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 Jung과 Tien (1992)은 잘 설계된 실험을 통하여 다분산 에어로졸의 경우 F_k 에 관한 상관식을 만들어 낼 수 있는 방법과 포집된 입자크기의 집진효율에 대한 영향의 중요성을 밝힌 바 있다.

본 연구는 위의 연구의 연장으로 다분산 에어로졸의 입자층여과에서 압력강하에 관한 입자퇴적의 효과를 나타내는 함수인 G 를 실험적으로 구하는 것을 목적으로 하고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다. 실험장치는 비교적 고농도의 단분산 또는 다분산 에어로졸을 발생시키고, 이를 여과실험에 사용할 수 있도록 설계되었다 (Barot *et al.*, 1980). 에어로졸 물질로는 단분산 Polyvinyltoluene latex particle (Duke Scientific Corp.) 서스펜션을 사용하였고, 시험 에어로졸을 발생시키는 장치로는 Tri-jet aerosol generator (Thermo-System Inc. Model 3460)를 사용하였다. 에어로졸 발생장치에서 생성된 액적 spray는 유리관에 가열테이프를 감아 만든 heating section을 거쳐 에어로졸입자에 부착된 수분을 증발시킨 후 확산건조기 (diffusion dryer)로 유입되며, 증발된 수분은 확산건조기의 실리카겔에 흡수가 된다. 수분이 제거된 에어로졸은 Kr⁸⁵을 사용하는 aerosol neutralizer (Thermo-System Inc. Model 3012)를 통과하면서 에어로졸의 정전하가 Boltzmann 전하평형 상태에 이르게 된다. 에어로졸 서스펜션의 유량은 수분이 없는 질소가스를 유입시켜 조절하는데, 질소가스는 에어로졸 서스펜션의 상대습도를 줄여주어, 결과적으로 입자여과기에서의 가능한 수분 응축 또는 이로 인한 여과특성의 변화가 일어나지 않도록 예방하는 효과가 있다.

시험부분은 에어로졸 터널 (tunnel)과 시험여과기 (test filter) 부분으로 구성되며, 시험여과기 부분의 내경은 1.5 inch이다. 에어로졸 터널은 팽창부분, 일정 단면부분, 수축부분의 세 부분으로 구성되는데, 이는

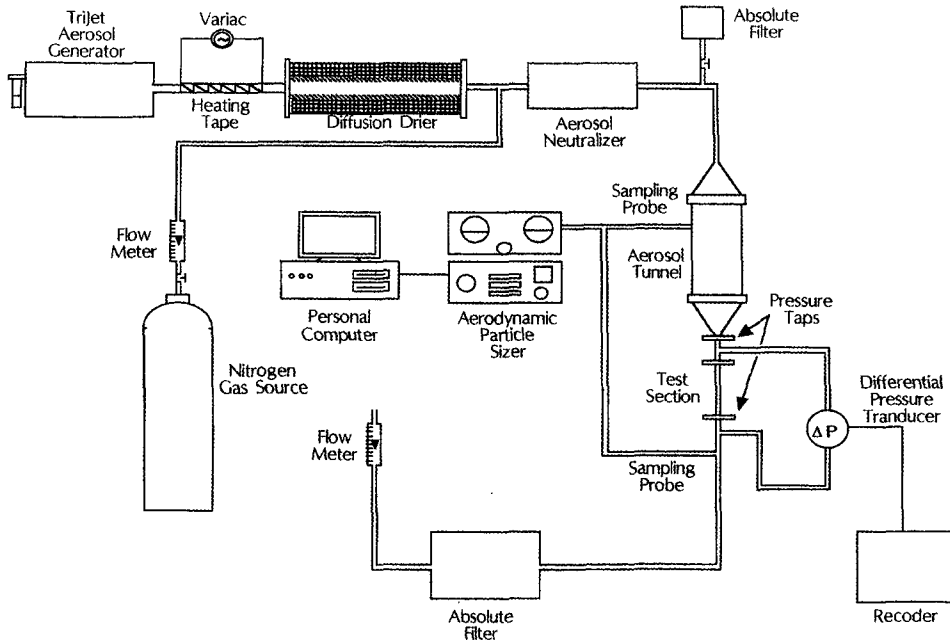


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

시험 에어로졸이 시험여과기에 균일한 유속으로 유입되도록 하기 위한 설계이다. 시험여과기에 걸리는 압력강하를 측정하기 위하여 압력지시계(PDGR 10/L, Druck, England)를 사용하였고, 그 결과를 기록계로 기록하였다. 여과기에 유입되는 에어로졸과 통과하는 에어로졸의 농도는 aerodynamic particle sizer (APS 33 Aerodynamic Particle Sizer, Thermo-System Inc.)을 사용하여 측정하였다. 유입되는 에어로졸과 통과되는 에어로졸의 농도를 시간에 따라 측정하면 물질수지에 의해 입자층에 퇴적되는 에어로졸의 양을 알 수 있다. 여과입자(filter grain)는 크기가 거의 일정한(평균직경 525 μm , 표준편차 37 μm) 유리구(glass spheres)를 사용하였는데, 현미경으로 검사한 결과 표면이 평활한 것으로 나타났다.

3.2 실험방법 및 조건

입자 퇴적에 의한 집진효율과 압력강하에 관한 영향을 조사하기 위해 가능한 입자층의 두께가 얇은 입자층을 사용하였다. 입자층이 너무 두꺼우면 입자층 전반부에 에어로졸 입자들이 시간이 지남에 따라 많이 퇴적되어 여과기를 막아버리는 소위

'filter clogging' 이 심화되고 반면에 후반부에는 거의 입자퇴적이 없는 비교적 깨끗한 상태의 입자층으로 유지되어 입자퇴적의 비균일성 정도가 심화되며, 따라서 국지적인 정보인 비퇴적과 F, G 에 관한 정보를 구할 수 없게 된다. 입자퇴적의 비균일성은 입자층의 두께가 줄어들면 줄어들는데, 너무 얇은 두께의 입자층을 사용하면 편류(channeling) 현상 등이 유발되므로 본 연구에서는 층의 높이 (bed height)가 18 단위층 요소(unit bed element) 이하에 해당되는 높이의 입자층을 사용하였다. 한편 Jung과 Tien (1991)은 입자층을 단위층(unit bed)이 순차적으로 연결된 형태로 보는 소위 '단위층 요소'의 개념을 사용하여 균일 퇴적 가정(uniform deposition assumption)이 18단위층 요소의 높이에서 평균 비퇴적이 1.0×10^{-3} 정도까지 적용됨을 밝힌 바 있다.

실험은 에어로졸을 생성시킨 후 5분 후에 입자층 전후의 에어로졸 농도를 측정하며, 그 후 매 20분 간격으로 농도를 측정하고, 입자층의 압력강하는 기록계에 실험시간 동안 연속적으로 기록된다. 실험에 사용한 Polyvinyltoluene latex 입자는 단분산 형태의 제품으로 다분산 에어로졸을 발생시키기 위해 두

가지 또는 세가지 크기의 Polyvinyltoluene latex 서스펜션을 정해진 농도비로 혼합하고 이를 증류수에 희석하여 사용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 결과의 해석 방법

실험조건에서 밝힌 바와 같이 본 연구의 실험조건에서는 균일 퇴적 가정을 사용할 수 있으므로, 단분산 에어로졸의 경우 입자층의 평균 비퇴적, $\bar{\sigma}$ 은 다음의 물질수지식으로 구할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{L} \int_0^\theta U_s (C_{in} - C_{eff}) d\theta \quad (12)$$

여기에서 C_{in} , C_{eff} 는 각각 유입에어로졸과 통과 에어로졸의 농도를 나타낸다. 또한 국지 압력구배는 다음과 같은 평균 압력구배로 나타낼 수 있다.

$$\overline{(\partial P / \partial Z)} = \Delta P / L \quad (13)$$

한편, 국지함수(local function)인 G 는 Jung과 Tien (1991)에 의해 다음과 같은 함수형태로 잘 표시되는 것으로 알려져 있다.

$$G = \frac{(\partial P / \partial Z)}{(\partial P / \partial Z)_0} = 1 + \beta_1 \sigma^{\beta_2} \quad (14)$$

여기에서 β_1 , β_2 는 경험상수이다. 이를 실험적으로 구하기 위해 균일 퇴적 가정을 사용하면 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$\frac{\overline{(\partial P / \partial Z)}}{(\partial P / \partial Z)_0} = \frac{\Delta P}{\Delta P_0} = 1 + \beta_1 \bar{\sigma}^{\beta_2} \quad (15)$$

따라서 실험적으로 시간에 따른 입자층의 평균 비퇴적 $\bar{\sigma}$ 와 입자층 압력강하를 구하면 실험결과와 식 (15)의 회귀분석으로부터 β_1 과 β_2 값을 구할 수 있다. 이상의 과정이 실험으로부터 얻은 평균정보로부터 국지정보를 얻어내는 간략한 이론적인 배경이다. 다시 말해 본 연구의 실험조건에서는 평균 비퇴적과 비퇴적을 혼용하여 사용할 수 있다는 의미이다. 이를 근거로 본 연구에서 얻어진 결과는 $(\Delta P / \Delta P_0)$ 와 비퇴적, σ 의 비교 그림으로 분석되었다.

4.2 결과의 분석

그림 2는 단분산 에어로졸 입자크기가 1.1 μm 이고 입자층의 입자크기가 525 μm 인 경우의 실험결과인데, 비퇴적이 증가할 수록 압력강하가 증가함을 보여준다. 또한 그림 2에서 입자층의 높이가 0.44 cm, 0.88 cm인 경우의 실험결과가 거의 동일함을 나타내는데, 이는 실험결과와 재현성과 특히 전술한 균일 퇴적 가정이 적용됨을 실험적으로 증명하고 있는 결과이다.

그림 3은 입자층의 입자직경이 525 μm 인 입자층에 퇴적되는 세가지 크기(1.1, 2.02, 3.09 μm)의 단분

Table 1. Conditions used in the experiments.

	Monodispersed Aerosols	Bidispersed Aerosols	Tridispersed Aerosols
$U_s = 11.3 \text{ cm/sec}$	$d_g = 262, 525 \mu\text{m}$ $d_p = 0.7, 1.1, 2.02, 3.09 \mu\text{m}$ $L = 0.44 \text{ or } 0.88 \text{ cm}$	$d_g = 525 \mu\text{m}$ $d_p = 1.1, 2.02 \mu\text{m}$ volume concentration ratio = 0.399 : 1 volume concentration ratio = 1.113 : 1	$d_g = 525 \mu\text{m}$ $d_p = 1.1, 2.02, 3.09 \mu\text{m}$ volume concentration ratio = 1.638 : 1.298 : 1 volume concentration ratio = 7.69 : 1.70 : 1
$U_s = 20.8 \text{ cm/sec}$	$d_g = 525 \mu\text{m}$ $d_p = 1.1, 2.02 \mu\text{m}$ $L = 0.88 \text{ cm}$	$d_g = 525 \mu\text{m}$ $d_p = 1.1, 2.02 \mu\text{m}$ volume concentration ratio = 1.151 : 1	

d_g : grain diameter
 d_p : particle diameter
 volume concentration of particles = volume of particles per unit volume of suspension

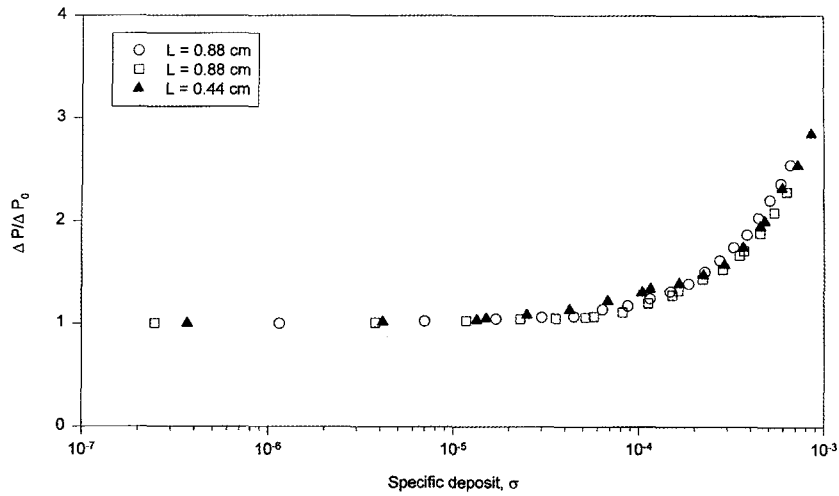


Fig. 2. Experimental results of $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ showing the validity of uniform deposition assumption. ($d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$, $d_p=1.1 \mu\text{m}$)

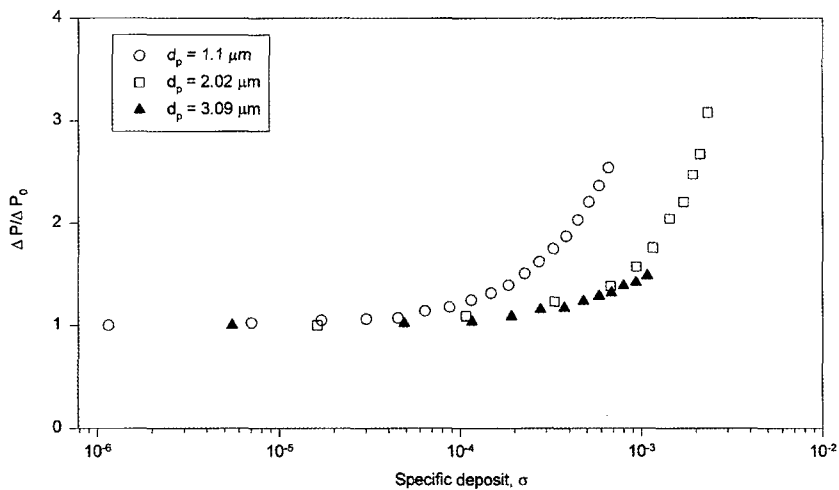


Fig. 3. Effect of size of deposited aerosols on the increase of pressure drop. ($d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$)

산 에어로졸입자의 크기에 대한 각각의 실험결과를 비교한 것이다. 비교 결과 에어로졸 입자크기가 작을수록, 비퇴적이 증가함에 따라 압력강하 증가가 커짐을 알 수 있는데, 이는 입자 퇴적형태 (particle deposition morphology)에 관계되며, 따라서 Jung과 Tien(1993)의 입자층 내의 입자퇴적에 관한 시뮬레이션 연구에서 밝힌 바와 같이 에어로졸 입자 크기

가 작을수록 큰 dendrite 또는 particle cluster가 형성되고 또한 이들의 내부 공극이 작아 동일한 부피일 경우 큰 입자로 구성된 particle cluster보다 입자층 내부의 유체흐름을 효과적으로 방해하여 결과적으로 입자층의 압력강하를 증가시키는 것으로 사료된다.

그림 4는 입자층의 입자직경이 $262 \mu\text{m}$ 인 경우에

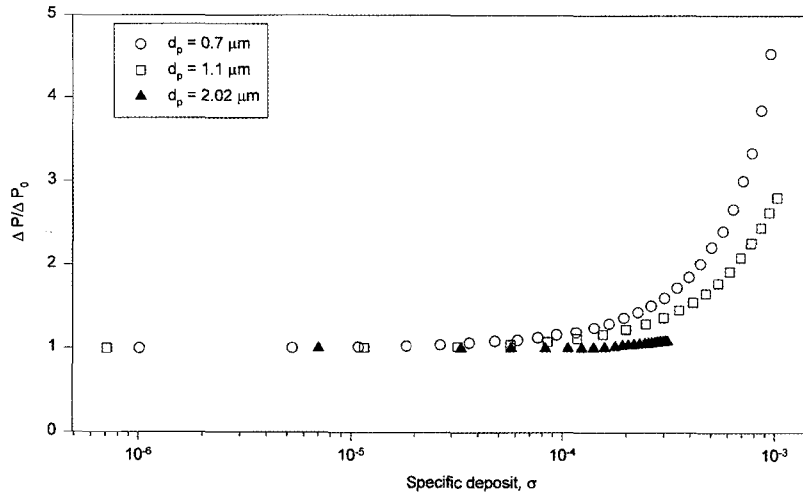


Fig. 4. Effect of size of deposited aerosols on the increase of pressure drop. ($d_g=262 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$)

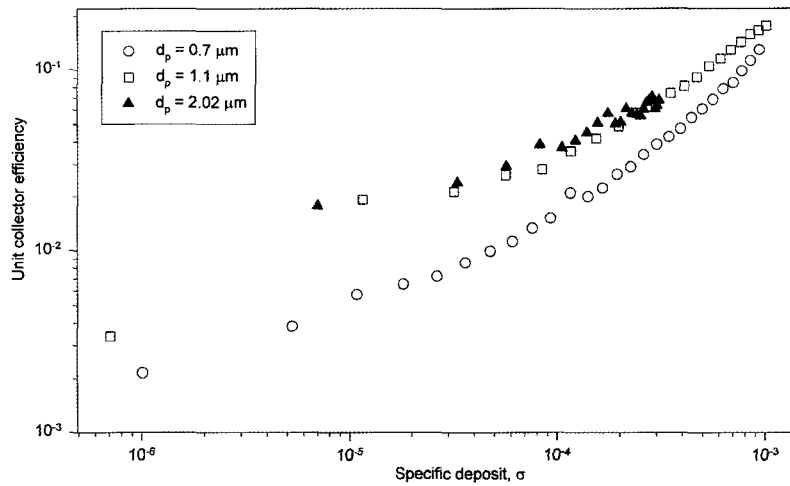


Fig. 5. Unit collector efficiency vs. specific deposit. ($d_g=262 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$)

세가지 크기 (0.7, 1.1, 2.02 μm)의 단분산 에어로졸에 관한 각각의 실험 결과를 비교한 것이다. 그림 4의 경우에도 그림 3의 경우와 같이 가장 작은 에어로졸 입자크기인 0.7 μm 의 경우에 비퇴적의 증가에 따른 입자층의 압력강하 효과가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 참고로 그림 5는 비퇴적에 대한 단위 포집기효율 (unit collector efficiency)의 변화를 도시한 것인데, 대략 평균 비퇴적이 1.0×10^{-3} 정도까지도

0.7 μm 크기의 에어로졸이 1.1, 2.02 μm 크기의 에어로졸보다 큰 압력강하를 유발시키지만 반면에 집진 효율은 상대적으로 작음을 보여준다.

그림 6은 공탐가스속도 11.3 cm/s, 입자직경 525 μm 의 조건에서 1.1 μm 과 2.02 μm 크기의 두가지 에어로졸이 혼합된 이분산 (bidispersed aerosol) 에어로졸의 실험결과를 1.1 μm 와 2.02 μm 크기의 단분산 에어로졸의 실험결과와 함께 도시한 그림이다. 그림

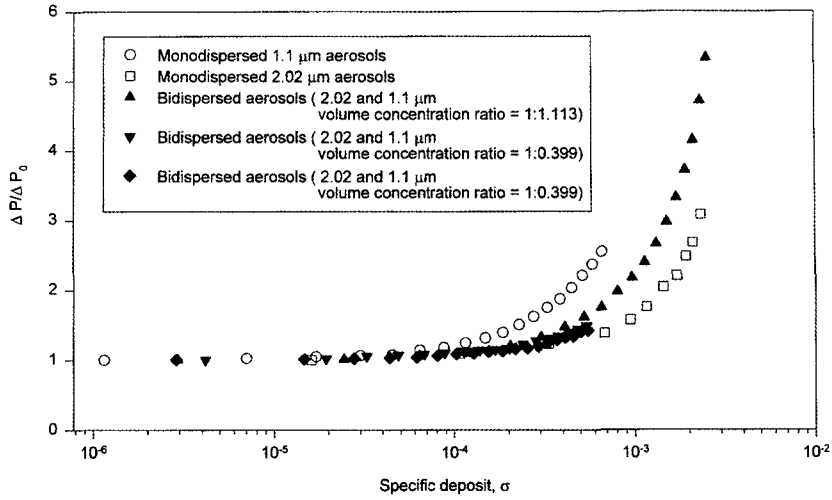


Fig. 6. Experimental results of $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ showing the effect of concentration distribution in bidispersed aerosols. ($d_j=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$)

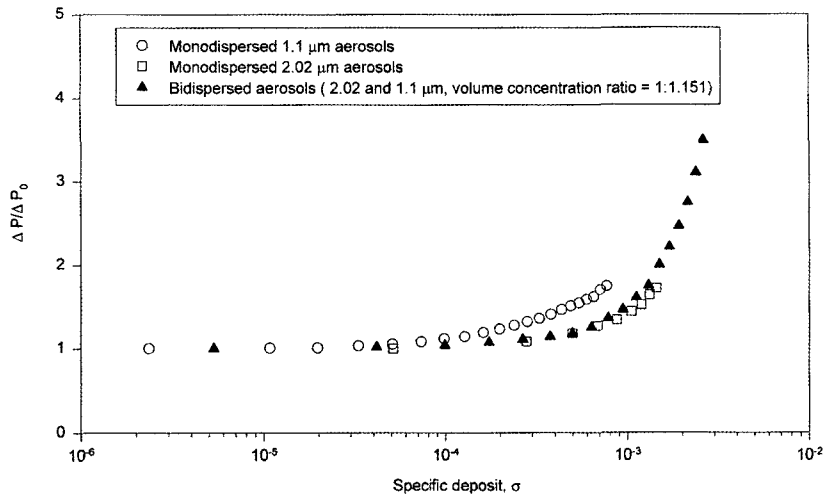


Fig. 7. Experimental results of $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ showing the effect of concentration distribution in bidispersed aerosols. ($d_j=525 \mu\text{m}$, $U_s=20.8 \text{ cm/s}$)

6에서 보는 바와 같이 유입 에어로졸 중 각각의 에어로졸의 혼합비에 따라, 예컨대 1.1 μm 크기의 에어로졸의 분율이 상대적으로 2.02 μm 크기의 에어로졸의 분율보다 크면 이분산 에어로졸의 실험결과가 그 만큼 1.1 μm 크기의 단분산 에어로졸의 실험결과에 상대적으로 근접하는 것을 알 수 있다. 이 같은 경향은 공탐가스속도 20.8 cm/s인 조건의 실험

결과를 같은 방식으로 도시한 그림 7에서도 나타난다. 그림 8은 공탐가스속도 11.3 cm/s, 입자직경 525 μm의 조건에서 1.1, 2.02, 3.09 μm 크기의 세가지 크기의 단분산 에어로졸을 혼합하여 만든 삼분산 에어로졸(tridispersed aerosol)의 실험결과와 비교를 위해 가장 압력강하 증가가 큰 1.1 μm 단분산 에어로졸 실험과 가장 압력강하 증가가 작은 3.09 μm

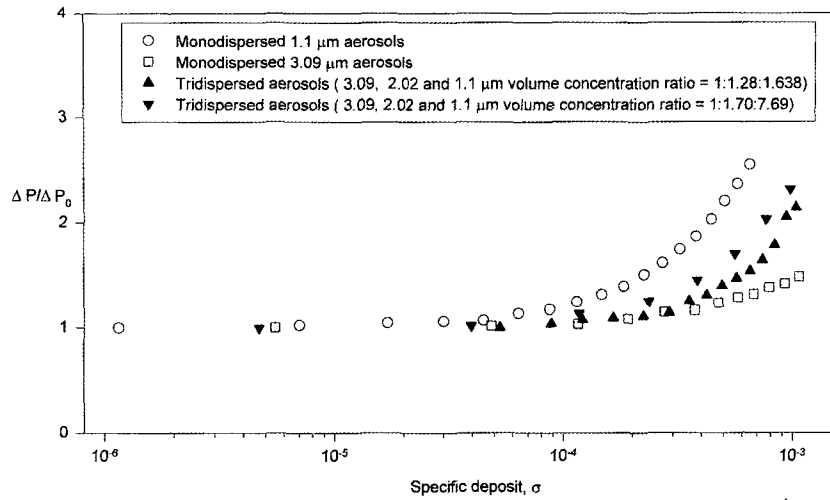


Fig. 8. Experimental results of $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ showing the effect of concentration distribution in tridispersed aerosols. ($d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$)

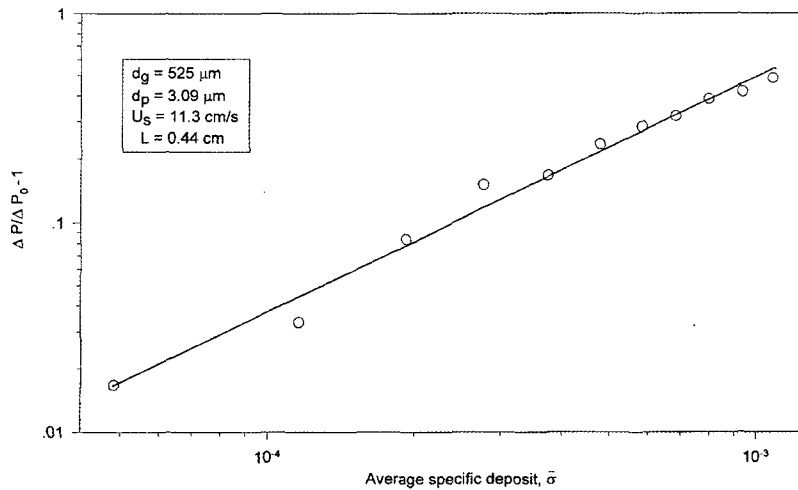


Fig. 9. Increase in pressure drop vs. average specific deposit.

단분산 에어로졸의 결과를 함께 도시한 그림인데, 이분산 에어로졸의 경우와 같은 경향을 알 수 있다.

4.3 국지함수 G에 관한 모델식 제안

이상의 결과분석을 토대로 모든 경우의 조건, 다시 말하여 유입 에어로졸의 조성이 달라 이로 인해 입자층에 퇴적되는 에어로졸 입자의 크기에 따른 조성비가 다른 모든 경우의 압력강하 증가를 예측

하기 위하여 다음과 같은 모델식을 제안하였다.

$$G = 1 + \sum_{k=0}^N \omega_k \beta_1(k) \sigma^{\beta_2(k)} \quad (16)$$

여기에서 σ 는 전체 비퇴적, ω_k 는 비퇴적 중 k 번째 크기의 에어로졸 입자의 분율을 의미하고, 경험상수 $\beta_1(k)$, $\beta_2(k)$ 는 k 번째 크기의 단분산 에어로졸

Table 2. Values of β_1 and β_2 obtained from the experimental data in this study.

d_g (μm)	d_p (μm)	U_s (cm)	β_1	β_2
525	1.1	11.3	1.863×10^3	0.979
525	1.1	20.8	3.807×10^3	1.160
525	2.02	11.3	7.869×10^2	1.013
525	2.02	20.8	2.128×10^3	1.287
525	3.09	11.3	1.168×10^3	1.125

을 사용한 실험으로부터 얻은 경험상수이다. 즉, 모델식의 의미는 다분산 에어로졸의 경우 압력강하 증가정도는 단순히 각각의 단분산 에어로졸의 압력강하 특성에 비퇴적에서의 각각의 조성만큼의 선형적 기여를 하는 것으로 표시한다는 것이다. 표 2는 단분산 에어로졸의 실험결과를 식 (16)과의 회귀분석을 통하여 구한 경험상수 β_1, β_2 를 제시한 것이다.

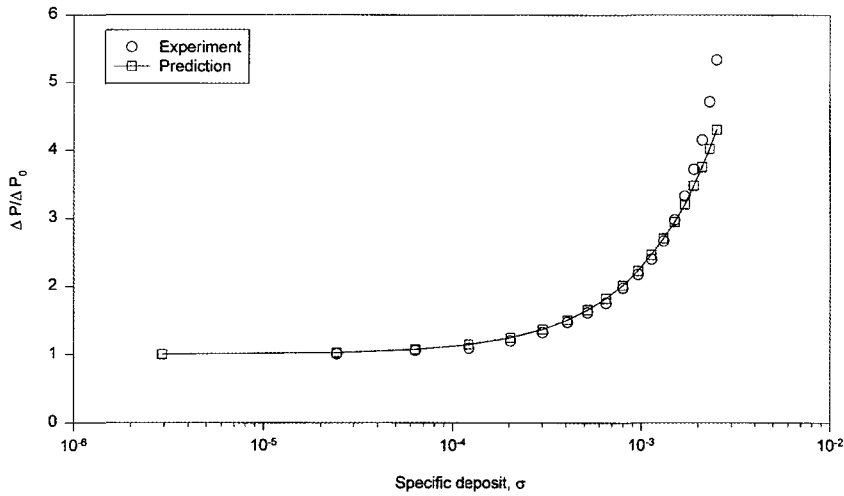


Fig. 10. Comparison between experiments and prediction, $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ .
(Volume concentration ratio of particles in influent=1:1.113, bidispersed aerosols of 2.02 μm and 1.1 μm particles, $d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$, $L=0.44 \text{ cm}$)

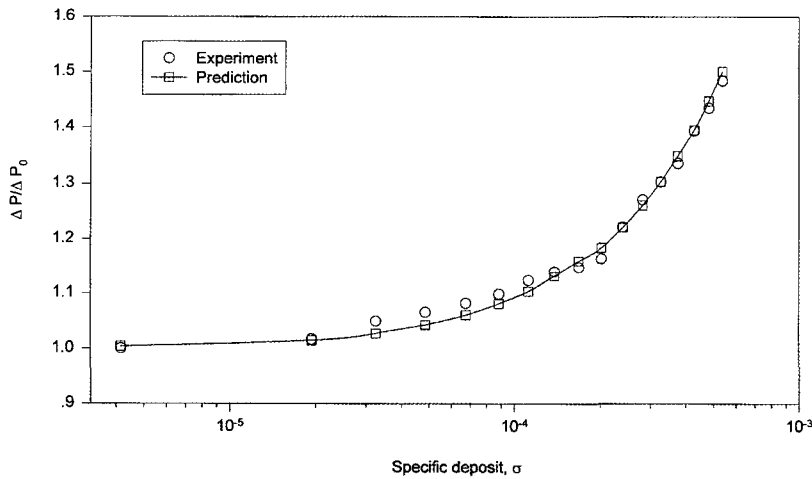


Fig. 11. Comparison between experiments and prediction, $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ .
(Volume concentration ratio of particles in influent=1:0.399, bidispersed aerosols of 2.02 μm and 1.1 μm particles, $d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$, $L=0.44 \text{ cm}$)

대표적인 회귀분석 결과가 그림 9에 도시되어 있다.

4.4 모델식을 이용한 예측과 실험결과와의 비교

다분산 에어로졸의 실험결과로부터 각 에어로졸 입자크기별 유입농도와 투과농도를 측정하여 물질

수치를 구하면 특정 시간의 전체 비퇴적에서의 각 크기의 에어로졸 입자의 조성 또는 기여도를 구할 수 있다. 이를 식 (16)에 대입하고 표 2의 경험상수 값을 이용하여 계산한 결과가 실험결과와 함께 그림 10~14에 도시되어 있다. 먼저 그림 10, 11은 이 분산 에어로졸의 경우인데, 공탐가스속도 11.3 cm/s 에서 두가지 각기 다른 유입 에어로졸 농도에 대해

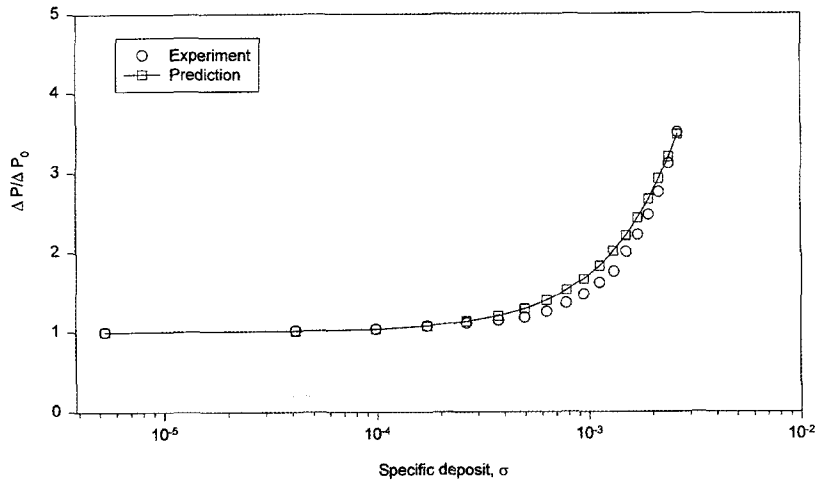


Fig. 12. Comparison between experiments and prediction, $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ .
(Volume concentration ratio of particles in influent=1:1.151, bidispersed aerosols of 2.02 μm and 1.1 μm particles, $d_0=525 \mu\text{m}$, $U_s=20.8 \text{ cm/s}$, $L=0.44 \text{ cm}$)

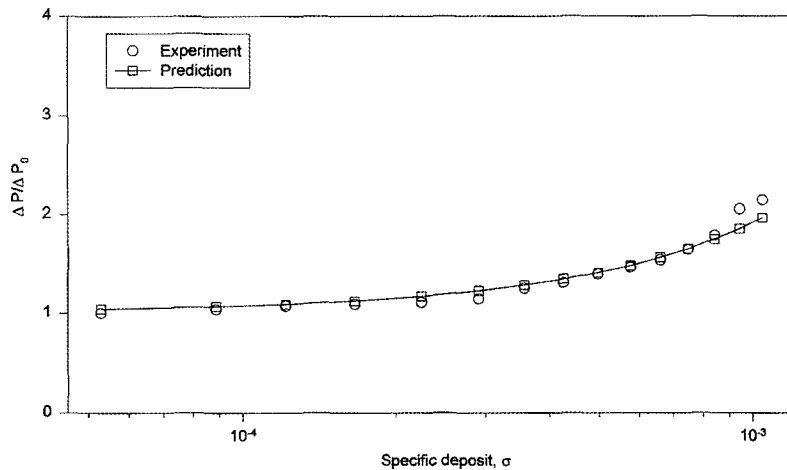


Fig. 13. Comparison between experiments and prediction, $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ .
(Volume concentration ratio of particles in influent=1:1.298:1.638, tridispersed aerosols of 3.09 μm , 2.02 μm , and 1.1 μm particles, $d_0=525 \mu\text{m}$, $U_s=20.8 \text{ cm/s}$, $L=0.44 \text{ cm}$)

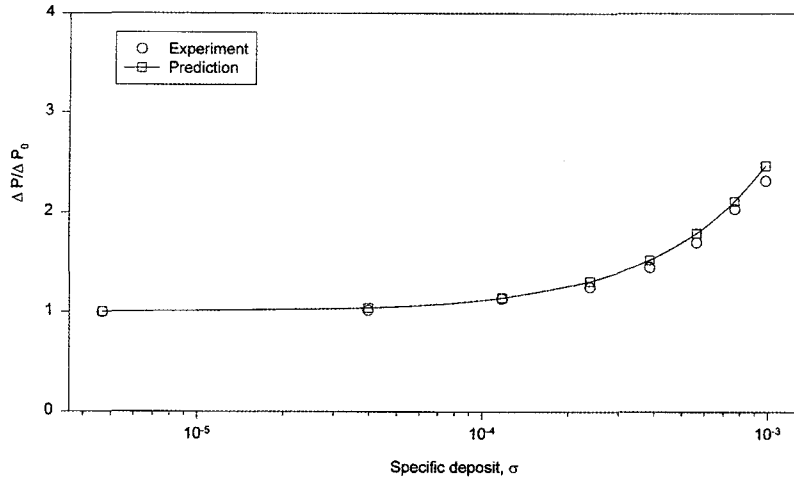


Fig. 14. Comparison between experiments and prediction, $\Delta P/\Delta P_0$ vs. σ .
 (Volume concentration ratio of particles in influent=1:1.70:7.69, tridispersed aerosols of 3.09 μm , 2.02 μm , and 1.1 μm particles, $d_g=525 \mu\text{m}$, $U_s=11.3 \text{ cm/s}$, $L=0.44 \text{ cm}$)

예측치와 실험치가 매우 잘 일치하는 것을 보여주고, 그림 12는 공탐가스속도가 20.8 cm/s의 경우에도 예측치와 실험치가 매우 잘 일치함을 보여준다. 한편 그림 13, 14는 삼분산 에어로졸의 경우인데, 공탐가스속도가 11.3 cm/s인 경우의 두가지 농도의 유입 에어로졸에 대한 실험결과가 예측치와 각각 잘 일치하는 것을 나타내주고 있다. 따라서 비록 방대한 양의 실험결과로부터 도출한 모델식이 아니더라도 본 연구의 실험결과와의 일치 정도와 모델가정의 논리성으로 보아 모델의 타당성은 매우 크다고 할 수 있다. 그러므로 다분산 에어로졸의 입자충여과에서의 에어로졸 입자퇴적에 따른 압력강하 변화는 기존의 단분산 에어로졸에 대한 압력강하를 예측하는 경험식인 Jung과 Tien(1991)의 경험상관식으로부터 β_1 과 β_2 를 구한 후, 이를 본 연구에서 제안한 모델식에 이용하면 얻을 수 있다.

5. 결 론

다분산 에어로졸의 입자충여과의 과도거동 중 입자층 내의 에어로졸 입자퇴적의 증가에 따른 압력강하 증가에 관하여 중점적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다. 먼저 입자층 내

에 퇴적되는 에어로졸의 입자크기가 작을수록 입자퇴적량이 증가함에 따른 압력강하 증가가 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 이분산 및 삼분산 에어로졸의 실험에서도 유사한 경향을 나타냈는데, 작은 크기의 에어로졸 분율이 퇴적 에어로졸입자 중 많을 수록 압력강하 증가가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 따라서 이와 같은 정성적인 결과를 토대로 다분산 에어로졸의 퇴적에 따른 입자충여과의 압력강하 증가를 예측할 수 있는 모델식이 제안되었고, 모델을 이용한 예측 결과는 실험치와 매우 잘 일치하는 것으로 판명되었다. 이 모델식의 장점은 기존의 단분산 에어로졸의 입자층 압력강하 증가에 관한 경험상관식을 적용하여 다분산 에어로졸의 압력강하 증가를 예측 가능하게 하였다는 점에서 매우 큰 의미가 있는 것으로 사료된다.

감 사

본 논문은 1994년도 인하대학교 학술연구비의 일부 보조를 받아 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- Barot, D.T., C. Tien, and C.S. Wang (1980) Accumulation of solid particles on single fibers exposed to aerosol flow, *AIChE J.*, 26, 289-292.
- Jung, Y.W., S.A. Walata, and C. Tien (1989) Experimental determination of the initial collection efficiency of granular beds in the inertial impaction dominated region, *Aerosol Sci. Technol.*, 11, 168-182.
- Jung, Y.W. and C. Tien (1991) New correlation for predicting the effect of deposit on collection efficiency and pressure drop in granular filtration, *J. of Aerosol Sci.*, 22, 187-200.
- Jung, Y.W. and C. Tien (1992) Increase in collector efficiency due to deposition in polydispersed granular filtration: An experimental study, *J. of Aerosol Sci.*, 23, 525-537.
- Jung, Y.W. and C. Tien (1993) Simulation of particle deposition in granular beds, *Aerosol Sci. Technol.*, 18, 418-440.
- Tien, C. (1989) *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*, Butterworths, Boston, USA.