

집진효율 향상을 위한 미세 에어로졸 입자의 응축에 의한 성장 연구

한 상 우*, 황 정 호**
(2000년 1월 5일 접수)

Condensational Growth of Fine Aerosol Particles to Increase Precipitation Efficiency

Sang-Woo Han and Jung-Ho Hwang

Key Words : Condensation(응축), Fine Particle(미세입자), Aerosol(에어로졸), Impactor(임팩터) Precipitation Efficiency(집진효율)

Abstract

As the environmental problems grow, the regulation of the pollutants emitted from power plants increases. Most of the pollutants in particle phase are removed by particle removal facilities, but fine particles between 0.1 micron and 1 micron in diameter have a low removal efficiency compared to particles in other size ranges. Therefore the present concern has concentrated on the removal of those fine particles. The purpose of this study is to grow fine particles by condensation to the range larger than 1 micron. Theoretically the general dynamic equation is solved with an assumption that the particle size follows a log-normal distribution to calculate the temporal behavior of the size distribution. Experiments have been carried out to compare the results with the theoretical predictions. Particles grown by condensation are sampled by impactors and observed with SEM photographs.

1. 서론

화력발전소등에서 배출되는 대기오염 물질로는 황산화물(SOX), 질소산화물(NOX), 먼지(Dust) 등이 있다. 연료가 Oil, BC, 중유 등의 경우 SOX, NOX의 문제가 입자상 물질(분진)보다는 더 심각하게 인식되어 왔기 때문에 배출되는 SOx, NOx의 문제에 더욱 신경을 써온 실정이다. 현재 화력발전소에서는 석탄 또는 중유 등 화석연료가 연소될 때 발생되어 배기가스와 함께 대기로 배출되는 황산화물을 굴뚝으로 배출되기 전에 석회석 슬러리에 흡수 반응시켜 제거하고 석회를 부산물로 발생시키며 분진을 제거하기 위해 배연탈황설비(Flue Gas Desulfurization)를 사용하고 있다.

FGD의 경우 황산화물의 제거와 동시에 분진의 60%정도를 제거한다. 영동, 서천, 당진, 하동, 태안, 보령 화력발전소의 경우 FGD가 설치되어 있다. FGD에는 많은 경우 스크러버와 미스트 제거기가 함께 사용된다(Fig. 1). 스크러버는 배출가스내의 SOx를 제거하기 위한 목적으로 사용되는데, 물과 석회를 혼합하여 얻은 알칼리성의 소석회(limestone) 슬러리를 분무하여 SOx와 흡수, 중화반응을 이용한다. 이때 연소가스내의 큰 입자상 물질들은 물을 분사하여 제거되기도 한다. 스크러버의 상단부에 위치한 미스트 제거기는 스크러버를 통과하고 난 후 연소 가스에 남아 있는 작은 크기의 산성 미스트를 제거하기 위한 목적으로 사용된다.⁽¹⁾ 그러나 연소가스내에 고상의 입자상물질이 많이 존재한다면 미스트 제거기의 노즐이 막히는 등의 문제점이 발생되기도 한다.⁽²⁾

화력발전소에서 배출되는 0.1~1 μm 사이의 입

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2821 FAX : (02)312-2159

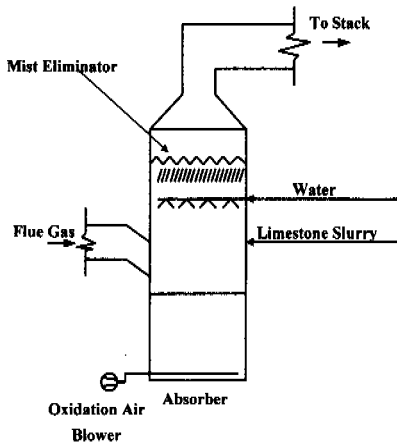


Fig. 1 Schematic of FGD system

자들의 포집효율이 상대적으로 $1 \mu\text{m}$ 이상의 입자와 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 입자들에 비하여 떨어진다. 그 이유는 입자가 $0.1 \mu\text{m}$ 보다 작은 경우 물질 확산으로 이동하고, $1 \mu\text{m}$ 보다 큰 경우 관성에 의해 이동되어 포집하기가 용이하지만, 그 사이 크기의 입자의 경우는 주위 유동에 의한 대류작용으로 입자가 이동하므로 포집하기가 어려워지기 때문이다. 이렇게 포집이 어려운 범위에 있는 입자들을 미스트 제거기 등 기존의 장치를 이용하여 효율적으로 포집하기 위해서는 입자의 크기를 성장시켜 포집하는 방법을 생각할 수 있다. 입자의 크기를 성장시킬 수 있는 방법의 하나로 발전소 보일러에서 나오는 수증기의 입자로의 응축현상을 이용하는 경우^(2~5)는 고상의 작은 입자들이 결국 증기 액적내에 존재하므로 위에서 언급한 바와 같은 미스트 제거기에 손상을 주는 경우가 줄어들다는 장점이 있다.

이와같이 가스내에 존재하는 미세 입자를 성장시켜 제거효율을 증가시키기 위해서는 입자와 증기사이의 비균질 응축현상에 대한 이해가 필요하며 본 연구에서 이를 이론적, 실험적으로 규명하였다.

2. 이론

응축에 의한 에어로졸 입자의 생성과 성장은 자연계에 있어서 에어로졸거동의 주요한 원인이고, 가스상과 입자상 사이의 주요한 물질 전달과정이다. 이 과정은 일반적으로 입자의 형성을 위

한 작은 입자핵이나 이온이 존재하는 과포화 증기를 필요로 한다. 증기가 온도 저하에 의하여 과포화 상태에 도달하면 과포화상태의 증기분자들이 응축되는데 증기분자들의 응축이 기존에 존재하는 응축핵에 일어나는 것은 비균질 응축 (heterogeneous condensation)이라고 한다.

미세입자의 증기응축에 의한 성장은 비균질 응축이고 입자의 크기에 따라 응축이 일어나는 기구가 다른 세 가지 영역이 존재하며 이는 Knudsen 수($2\lambda/d_p$)에 따라 결정된다; (1) 연속영역($Kn \ll 1$) (2) 자유분자 영역($Kn \gg 10$) (3) 천이영역($1 \leq Kn \leq 10$). 여기서 λ 는 증기분자의 평균 자유행정거리이고 d_p 는 미세입자의 직경이다. 연속영역에서는 입자 주위에 증기의 농도차가 존재하며 이 농도차로 인한 확산에 의하여 응축율이 결정된다. 자유분자 영역의 경우 응축율은 확산보다는 기존입자와 증기의 불규칙한 충돌수에 의하여 결정되며 입자표면으로 응축하는 모든 증기들은 입자표면에 부착된다고 가정하면 응축율은 기체운동이론에 의하여 표현된다. 천이영역은 이 두 영역의 중간 영역이다.

그동안 많은 이론적 연구가 수행되어 왔는데 열 및 물질전달을 고려한 경우 Heidenreich⁽⁶⁾와 Vesala 등⁽⁷⁾은 연속영역에서, Kulmala⁽⁸⁾는 연속영역과 천이영역에서, Loyalka와 Park⁽⁹⁾와 Gelbard⁽¹⁰⁾는 입자크기 전 영역에서 해석해 또는 계산해를 구하였다. 시스템이 등온조건인 경우, 최근에 입자크기 전 영역에 대한 모멘트 방정식 해석해가 Park과 Lee⁽¹¹⁾에 의해 구해진 바 있다.

본 절에서는 수증기 응축에 의한 미세입자 성장률을 등온 가정하에 이론적으로 제시한 두 방법을 소개한다. 먼저 입자크기 분포가 로그-정규 분포라는 가정하에 모멘트 방정식의 해로써 입자 성장률을 구한 방법을 소개한다. 그리고 고전적인 Maxwell 해⁽¹²⁾를 천이영역 및 자유분자영역에 까지 확장한 Fuchs와 Sutugin에 의해 제시된 입자 성장률⁽¹³⁾을 소개하기로 한다. 두 경우 모두 Kelvin 효과는 무시되었다.

2.1 모멘트법 해석해

입자의 거동을 나타내는 방정식은 GDE로 알려져 있고 중력과 전기력, 열영동과 같은 외력의 영향은 미치지 않고, 입자간 브라운확산과 응집

그리고 유체유동을 무시한다고 가정하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial I}{\partial v} \quad (1)$$

식 (1)에서 n 은 입자 분포 함수이고, v 는 입자 부피, I 는 응축률(nuclei/단위부피·sec)을 나타낸다.⁽¹⁴⁾ 식 (1)을 해석하기 위해서는 입자 크기 분포 함수 n 을 알아야 하는데 본 연구에서는 다음과 같이 로그-정규 분포로 가정하였다.

$$n(v) = \frac{N}{3\sqrt{2\pi}\ln\sigma_g} \exp\left[-\frac{\ln^2(v/v_g)}{18\ln^2\sigma_g}\right] \frac{1}{v} \quad (2)$$

위에서 N 은 입자의 수밀도[입자수/단위부피], v_g 는 기하평균 입자부피, σ_g 는 입자 크기 분포에 관한 기하 표준 편차를 나타낸다. 이와 같이 입자 크기분포가 정해지면 모멘트 모델을 도입하여 식 (1)을 상미분 방정식화 한다. 입자 부피에 관한 크기 분포 함수의 k 번째 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$M_k = \int_0^\infty v^k n(v,t) dv \quad (3)$$

이때 M_0 는 입자의 수밀도 N , M_1 은 입자 부피 밀도라는 물리적 의미를 가지며 k 번째 모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$M_k = M_0 v_g^k \exp\left(\frac{9}{2} k^2 \ln^2 \sigma_g\right) \quad (4)$$

식 (4)에 의해 세 가지 모멘트 M_0, M_1, M_2 로 다음의 식이 성립한다.

$$v_g = \frac{M_1^2}{M_0^{3/2} M_2^{1/2}} \ln^2 \sigma_g = \frac{1}{9} \ln\left(\frac{M_0 M_2}{M_1^2}\right) \quad (5)$$

그러므로, M_0, M_1, M_2 의 값을 알고 있다면 입자 크기 분포의 변화를 알려주는 인자인 σ_g 와 v_g 를 계산할 수 있다.

최종적인 모멘트 방정식들과 포화비 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dM_0}{dt} &= 0 \\ \frac{dM_1}{dt} &= \eta(S-1)M_0 \\ \frac{dM_2}{dt} &= 2\varepsilon M_1 \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{\eta}{n_s v_m} (S-1)M_0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 n_s, ε 은 응축계수⁽¹⁴⁾이고 n_s 는 수증기의 포화농도를 의미한다. 하첨자 m 은 모노머, 즉 수증기를 뜻하므로 v_m 은 증기분자의 부피이다. S 는 포화비로 n/n_s 이다(n 은 증기농도). 식 (6)에서 구한 M_0, M_1, M_2 를 식 (5)에 대입하여 기하평균 입자부피와 입자크기 기하표준편차를 구함으로써 최종적으로 성장한 입자의 시간에 따른 크기분포변화를 구할 수 있다.

2.2 Fuchs와 Sutugin의 보간해

자유분자영역과 연속영역을 포함하는 입자크기 전 영역에서 증기분자의 응축률(1/s)은 식 (7)으로 표현된다.

$$\text{Rate} = 2\pi d_p D_m (n - n_s) \frac{1 + Kn}{1 + 1.71Kn + 1.333Kn^2} \quad (7)$$

이 식을 포화비를 사용해 나타내보면 다음과 같다.

$$\text{Rate} = 2\pi d_p D_m n_s (S - 1) \frac{1 + Kn}{1 + 1.71Kn + 1.333Kn^2} \quad (8)$$

d_p 는 입자직경으로 $v = 1/6\pi d_p^3$ 의 관계를 갖는다. 입자와 증기의 상호관계에 의한 질량보존식으로부터 입자의 성장률은 다음과 같다.

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{m_m}{\rho_p} \frac{4D_m n_s (S - 1)}{d_p} \frac{1 + Kn}{1 + 1.71Kn + 1.333Kn^2} \quad (9)$$

위의 식 (9)에서 m_m 은 수증기분자의 질량이고 식 (9)는 $Kn \ll 1$ 일 때 연속영역의 식⁽¹³⁾과 같아지고 $Kn \gg 1$ 일 때는 확산계수 D_m 를 식 (10)과 같은 식으로 나타낸다면 자유분자 영역의 식⁽¹³⁾과 동일하다.

$$D_m = \frac{1}{3} \bar{v}_m \lambda \quad (10)$$

\bar{v}_m 는 수증기 분자의 평균속도이며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{v}_m = (8k_B T / \pi m_m)^{1/2} \quad (11)$$

증기분자가 비교적 가벼운 매질(공기, 연소가스)로 확산될 때 평균자유행로의 길이는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m_m}{m_{air}} + 1\right)^{1/2}}{(1 + a)\pi n \left(\frac{d_m + d_{air}}{2}\right)^2} \quad (12)$$

α 는 0~0.333의 값을 갖는 부차원 상수이며, α 를 적절히 선정하여 식 (9)로부터 모든 영역에서 수증기 응축으로 인한 입자 성장률을 계산할 수 있다.

3. 실험

실험장치는 크게 증기발생부, 미세입자발생부, 입자성장부, 입자포집부의 4부분으로 이루어져 있다. 증기발생부에서 나온 수증기는 스팀필터를 통과시켜 증기내의 불순물을 제거하였으며 미세 입자는 NaCl 또는 PSL(Polystyrene latex)입자를 청정공기를 사용한 입자발생기(atomizer)를 통하여 발생시켰다. 발생된 미세입자들은 확산건조기(diffusion dryer)를 거친 후 수증기와 함께 입자성장부에 유입됐으며, 입자성장부를 통과한 후 입자포집부인 임팩터에 의해 포집되었다. 입자발생기에서 나온 10% NaCl 입자의 NMD(Number median diameter)와 GSD(Geometric standard deviation)는 각각 0.13 μ m, 1.8이고, PSL 입자의 경우 NMD는 0.305 μ m, GSD는 1.1였다.⁽¹⁵⁾ 증기발생부로는 보일러 또는 플라스크를 사용하였다. 플라스크의 경우는 사용이 쉽기 때문에 실험결과와 계산결과를 비교하기 위해 선정했으며, 보일러의 경우는 실제 플랜트와 연관지우기 위해 사용했다. 플라스크의 경우 발생하는 증기의 온도는 100 $^{\circ}$ C였으며, 상압에서 직경 12mm,

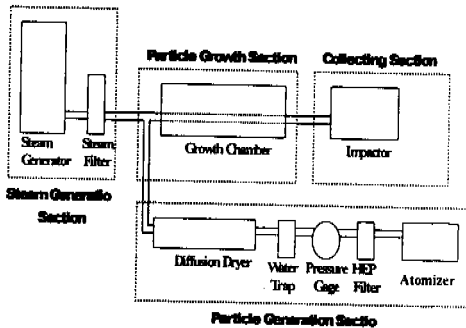


Fig. 2 Schematic of experimental setup

길이 60cm의 응축부(입자성장부)에 들어갔다. 들어가기 전에 응축이 일어나는 것을 방지하기 위해 열선으로 100 $^{\circ}$ C를 유지시켰다. 수증기 발생장치로 보일러를 사용한 경우는 열역학적 계산에 의해 증기조건을 구하고 이를 바탕으로 보일러에서 입자 응축부까지의 열정산에 의해 응축부로 들어가는 증기의 온도와 압력을 계산하였다.⁽¹⁶⁾ 계산된 온도는 142 $^{\circ}$ C, 압력은 5 기압이었다. 응축부에서는 온도가 선형으로 감소한다고 가정하였다.

입자가 응축에 의하여 어느 정도 성장하였는지 측정하기 위해서 응축부에서 성장된 입자를 입자포집부의 후단에서 임팩터로 포집하여 충돌판에 부착된 NaCl 또는 PSL입자를 SEM 사진을 이용하여 확인하였다. 임팩터는 2단 임팩터와 9단 MOUDI(Micro Orifice Uniform Deposit Impactor)를 사용하였다. 임팩터의 사양은 각각 Table 1, 2와 같다. 임팩터에서 단을 나누는 기준이 되는 입자의 크기는 공기역학적 크기(Aerodynamic size)를 사용하며 이는 일반 입자크기에 입자밀도의 제곱근을 곱함으로 구할 수 있다.

4. 결과 및 토의

4.1 입자의 성장크기 계산

Fig. 3은 NaCl 입자가 시간에 따라 성장하는 것을 수치적으로 계산한 결과이다. 이때 압력은 상압이었고, 응축부 입구온도는 100 $^{\circ}$ C였다(수증기의 수농도 2.0 $\times 10^{19}$ #/cm³). 주입 입자들은 크기가 일정하고(단분산) 수농도는 10²#/cm³로 가정하였다. 1 μ m 이하의 입자들이 응축에 의하여 1 μ m

Table 1 Two stage impactor

Stage	1	2
Size Range(μ m)	10~	2.5~10

Table 2 MOUDI

Stage	0	1	2	3	4
Size Range(μ m)	18~	10~	5.6~	3.2~	1.8~
		18	10	5.6	3.2
Stage	5	6	7	8	
Size Range(μ m)	1~	0.56~	0.32~	0.1~	
	1.8	1	0.56	0.32	

이상으로 성장하였음을 알 수 있으며, 초기의 입자크기에 관계없이 시간이 지남에 따라 입자의 성장된 크기가 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 이는 입자의 크기가 작을수록 입자의 응축에 의한 성장률이 크기 때문이다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 조건에서 초기 크기가 0.1 μm 인 NaCl 입자의 수밀도를 변화시켰을 때 1초 동안 성장된 입자의 크기이다. 입자의 수밀도가 10⁷#/cm³ 이상의 경우에는 응축에 필요한 수증기의 양이 부족하므로 입자성장이 충분치 못함을 알 수 있다. Fig. 5는 초기크기가 0.1 μm 로 균일하고 수농도가 10⁷#/cm³인 NaCl 입자의 경우 응축기 입구에서의 수증기 포화비를 변화시켰을 때 1초 동안 성장된 입자의 크기를 보여준다. 입자의 성장된 크기는 포화비가 1~10 사이의 범위에서 변화가 큼을 알 수

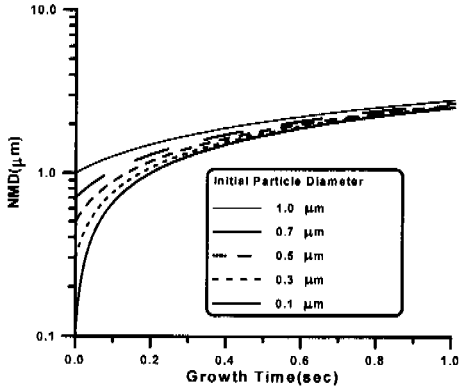


Fig. 3 Particle growth respect to initial particle size and time

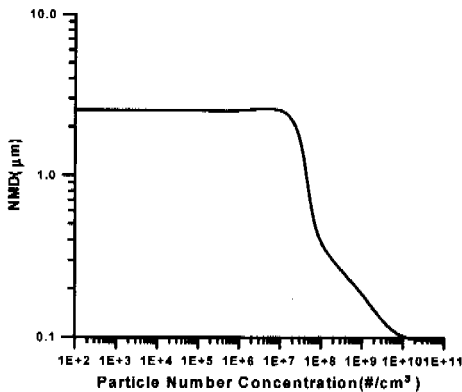


Fig. 4 Effect of number concentration of particles on the particle growth by condensation of water vapor

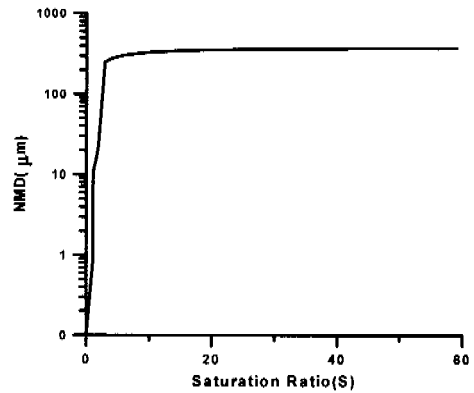


Fig. 5 Effect of saturation ratio of particle on the particle diameter grown by condensation of water vapor

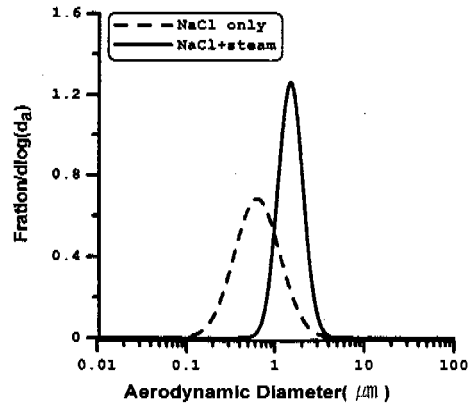


Fig. 6 Size distribution of NaCl particles before and after growth

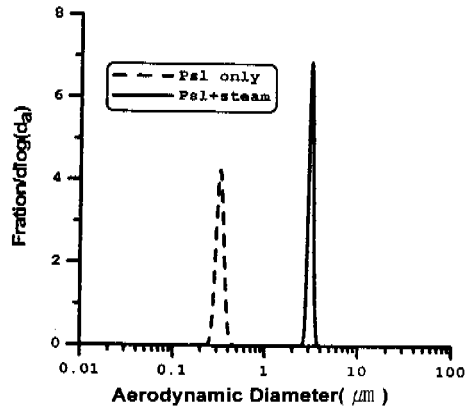


Fig. 7 Size distribution of PSL particles before and after growth

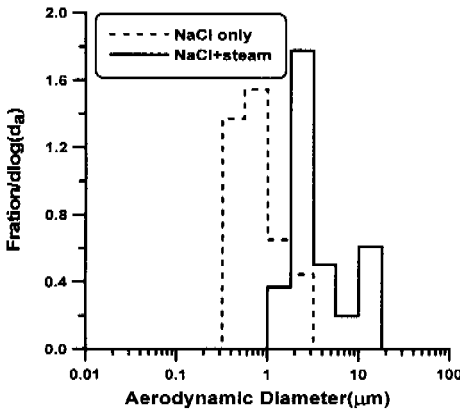


Fig. 8 Size distribution of NaCl particles before and after growth

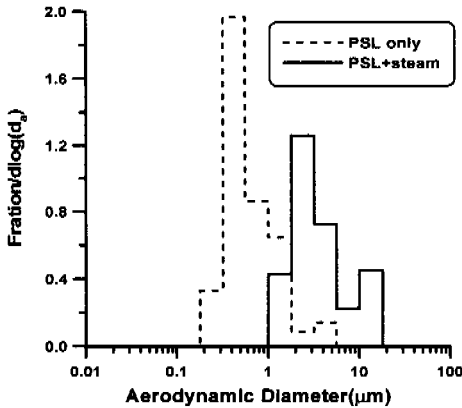


Fig. 9 Size distribution of PSL particles before and after growth

있으며 이 보다 큰 포화비는 응축에 영향을 크게 못 미침을 알 수 있다.

Fig. 6, 7은 각각 NaCl 입자와 PSL 입자의 성장 전후의 입자크기 분포 예를 보여준다. 그림에서 점선은 성장전의 분포이고 실선은 성장후의 분포를 의미한다. Fig. 6, 7의 입자크기는 공기역학적 입자크기로 이는 뒤에서 소개할 MOUDI 실험결과와 비교하기 위함이다. Fig. 6, 7의 결과로 미루어 보아 임팩터를 사용하였을 경우 성장전의 NaCl 입자와 PSL 입자들은 임팩터의 50% cut size가 1 μ m 이상인 단계에서 포집되지 않으나 성장된 후에는 포집될 것이라고 예상하였다.

4.2 임팩터 측정

Fig. 8과 Fig. 9에서 보여지는 MOUDI에 의하여

포집된 NaCl과 PSL입자의 성장 전과 후 질량

분포를 보여준다. 위의 그래프에서 알 수 있듯이 포집된 입자들은 응축의 영향이 있을 경우 포집되는 입자의 크기범위가 큰 쪽으로 이동됨을 알 수 있고 이는 이론적인 계산의 결과인 Fig. 6과 Fig. 7의 경향과 일치함을 알 수 있다. MOUDI를 사용하여 응축에 의해 성장된 입자를 포집할 경우 주위 수증기들의 응축에 의한 영향을 줄이기 위하여 응축이 없을 경우와 응축이 있을 경우에 대한 포집시간에 차이를 두었다.

4.3 SEM 사진 특성

Fig. 10은 2단 임팩터를 사용하여 포집된 NaCl 입자와 PSL입자를 SEM으로 관찰한 결과이다. 응축이 없는 경우(a, b, c)에 비하여 응축에 의하여 입자가 성장되었을 경우 상당히 많은 양의 입자가 포집됨을 알 수 있다. NaCl 입자의 경우 수증기에 용해되어 입자의 형상이 유지되지 못했다. 이러한 결과로 입자의 응축에 의한 성장이 아니라 응집에 의하여 성장된다고 볼 수 있으나 이는 (d)에서 알 수 있듯이 PSL 입자와 같은 불수용성 입자가 포집되어 있는 것으로 입자에 비균질 응축에 의한 성장으로 포집되었음을 보여준다. PSL 입자들이 포집되어 있는 형태(e, f)에서 알 수 있듯이 입자들간의 응집에 의한 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 MOUDI를 사용하여 포집한 NaCl 입자를 SEM을 통하여 관찰한 것이다. Fig. 11에서 (a)는 NaCl 입자에 수증기 발생부로 플라스크를 사용하여 수증기를 응축시킨 경우이고, (b)는 응축에 의한 성장이 없는 경우, (c)는 수증기 발생부로 보일러를 사용한 경우이다. (a)의 경우 4, 5단에서 NaCl 입자들이 가장 많이 포집되어 있음을 알 수 있고, (b)의 경우 다른 단에 비하여 7, 8단에 가장 많이 포집되어 있음을 알 수 있으며, (c)의 경우에는 4, 7, 8단에서 가장 많이 포집되어 있음을 알 수 있다. (a)와 (b)의 결과는 앞에서의 예측과 또한 앞에서의 임팩터의 질량분포 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. (c)의 경우 응축에 의한 성장으로 인해 7, 8단 보다는 그 위의 단에서 상대적으로 더 많은 양의 입자들이 포집될 것이라 생각되었으나 보일러에서 나온 수증기가 응축부를 통과하는 시간이 상대적으로 너무 적어 입자의 응축에 많은 영향을 미치지 못하였

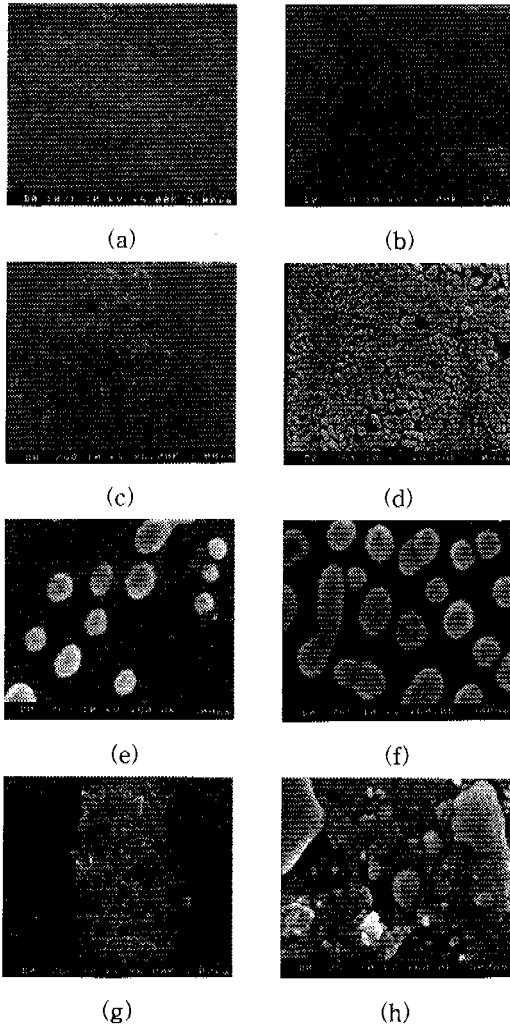


Fig. 10 SEM photo of impactor plate (a) No condensation (stage 2) PSL Particle (b) No condensation (stage 1) PSL particle (c) No condensation (stage 1) NaCl particle (d),(e),(f) Condensation (stage 2) PSL particle (g),(h) Condensation (stage 2) NaCl particle

고 또한 이는 계산과도 차이가 있음을 알 수 있다. (c)를 통하여 입자의 응축에 상대적으로 중요한 인자는 입자의 응축시간이라고 생각할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 입자의 응축에 의한 성장을 비균질

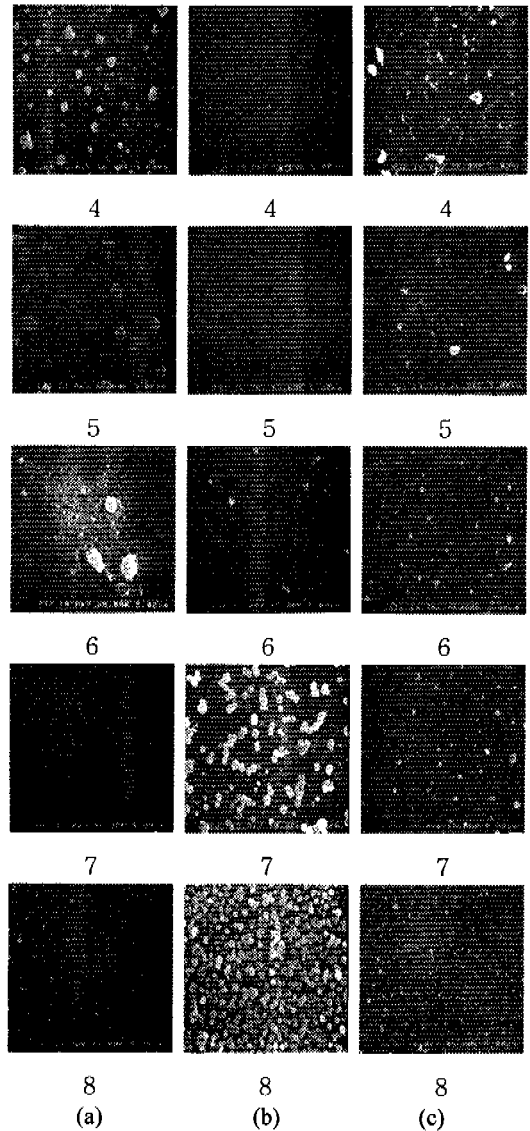


Fig. 11 SEM photo of impactor plate of MOUDI impactor (a) NaCl with condensation of water vapor (b) NaCl without condensation of water vapor (c) NaCl with condensation of water vapor from boiler ; each number of figure indicates stage of MOUDI

응축에 의한 성장으로 보고 수치적인 계산을 통하여 나온 결과를 실험을 통하여 비교 분석하였다. 비균질 응축에 의한 성장은 천이 영역에 대하여 계산하였고, 실험은 임팩터를 사용하여 입자와 액적의 크기분포를 구하였고, 이를 SEM을

통하여 확인하여 보았다. 모멘트 방법을 이용하여 천이 영역에서 비균질 응축에 의해 성장된 입자의 성장전과 후의 크기 분포와 임팩터를 사용하여 구한 입자의 크기 분포가 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 입자의 성장된 후 크기는 초기의 크기와는 상관없이 시간이 지남에 따라 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며 (과제번호 : 98-050) 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bulang, S., 1994, "Ten Years Experience of successful Operation of Mist Eliminator Systems in FGD Plants," *ASME Joint Int. Power Gen. Conf.*, Phoenix, Az, Oct.
- (2) Sun, J., Liu, B. Y. H., McMurry, P. H. and Greenwood, S., 1994, "A Method to Increase Control Efficiencies of Wet Scrubbers for Submicron Particles and Particulate Metals," *Air & Waste*, Vol. 44, pp. 184~185.
- (3) Lancaster, B. W. and Strauss, W., 1971, "A Study of Steam Injection into Wet Scrubbers," *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 10, pp. 362~369.
- (4) Yoshida, T., Kousaka, Y., Okuyama, K. and Nomura, F., 1978, "Application of Particle Enlargement by Condensation to Industrial Dust Collection," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 11, pp. 469~475.
- (5) Heidenreich, S. and Ebert, F., 1995, "Condensational Droplet Growth as a Preconditioning Technique for the Separation of Submicron Particles from Gases," *Chem. Eng. Processing*, Vol. 34, pp. 235~244.
- (6) Heidenreich, S., 1994, "Condensational Droplet Growth in the Continuum Regime-A Critical Review for the System Air-Water," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 49~59.
- (7) Vesala, T., Kulmala, M., Rudolf, R., Vrtala, A. and Wagner, P. E., 1997, "Models for Condensational Growth and Evaporation of Binary Aerosol Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. 565~598.
- (8) Kulmala, M., 1993, "Condensational Growth and Evaporation in the Transition Regime: An Analytical Expression," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 19, pp. 381~388.
- (9) Loyalka, S. K. and Park, J. W., 1988, "Aerosol Growth by Condensation: A Generalization of Mason's Formula," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 125, pp. 712~716.
- (10) Gelbard, F., 1990, "Modeling Multicomponent Aerosol Particle Growth by Vapor Condensation," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 399~412.
- (11) Park, S. H. and Lee, K. W., 1999, "Analytical Solutions to Condensational Growth of Polydisperse Aerosol for the Entire Particle Size Range," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 125, pp. 712~716.
- (12) Reist, P. C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill, New York.
- (13) Hinds, W., 1982, *Aerosol Technology*, Wiley, New York.
- (14) 유주현, 황정호, 1997, "폐기물 소각시 생성되는 유해 중금속 물질과 연소실내 비산재와의 응축, 응집현상에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B) 제21권, 제2호, pp. 264~274.
- (15) 안강호, 배귀남, 1994, "새로 개발한 분무 입자 발생기의 성능평가," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(II), pp. 381~384.
- (16) 한상우, 2000, "집진 효율 향상을 위한 미세 에어로졸입자의 응축에 의한 성장 연구," 연세대학교 석사학위 논문.