

흡습성 에어로졸의 거동에 미치는 수증기 응축의 영향

박재우*

The Effect of Steam Condensation on the Behavior of an Hygroscopic Aerosol

Jae-Woo Park*

Abstract

The growth by steam condensation of an hygroscopic aerosol is investigated using the condensation rate model which has been derived from the mass and heat transfer equations and considers both the solute and Kelvin effects. Considering the hygroscopicity shows that condensation can occur on hygroscopic seed particles even under subsaturated steam conditions. Investigations are made regarding the effect of hygroscopicity on the evolution of the particle size distribution and decay of the total aerosol concentration. It is found that hygroscopicity causes the particle size distribution to rapidly move upward even in a very short time, resulting in substantially higher decay of the total aerosol concentration than the case without considering hygroscopicity.

Key words : Hygroscopic aerosol, Steam condensation, Condensation rate model

1. 서론

수증기 응축에 의한 흡습성(hygroscopic) 에어로졸의 성장 현상은 대기과학, 환경공학, 보건학 등과 관련된 주요한 연구대상이다.^{1,2)} 흡습성 에어로졸의 수증기응축 성장은 또한 원자로 중대사고 해석분야에도 중요한 역할을 한다. 중대사고시 격납용기로 방출되는 핵분열생성물 가운데 방사선원형에 기여도가 큰 Cs, I 핵종은 CsOH, CsI 등과 같은 흡습성 에어로졸 형태로 존재한다. 이러한 에어로졸은 상대습도가 낮은 조건에서도 주위 기체의 수증기를 흡수하여 입자

크기가 빠르게 성장하는 특징이 있다. 입자크기가 빠르게 성장하면 중력에 의한 침전이 가속되고 결과적으로 방사선원형을 감소시킨다. 원자로 중대사고와 관련된 흡습성 에어로졸의 연구는 Jokiniemi^{3),4)} 등에 의하여 수행된 바 있다. 방사선원형에 미치는 흡습성 에어로졸의 이러한 중요성에도 불구하고 MELCOR⁵⁾ 등과 같은 일부 중대사고 해석 코드는 에어로졸의 흡습성을 고려하지 않고 있다. 본 연구는 이러한 중대사고 해석 코드의 모델 개선 과정의 일환으로 흡습성이 수증기 응축에 의한 에어로졸 성장에 미치는 영향을 조사하였다. 흡습성이 수증기 응축률과 입자 성장 속도에 미치는 영향을 분석하였고, 중력침전과 수증기 응축을 고려한 경우에 대해서 에어로졸 거동방정식의 해를 구하여 흡습성이 에어로졸 입자크기 분포

* 제주대학교 에너지공학과
Dept. of Nuclear & Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

및 전체 에어로졸량에 미치는 영향을 분석하였다.

$$a_u = \frac{1}{1 + f \frac{M_u m_s}{M_s m_u}} \quad (3)$$

II. 흡습성 에어로졸의 수증기 응축률 모델

에어로졸 입자 표면의 수증기 응축은 수증기 분자가 입자표면으로 확산하므로써 발생한다. 입자표면의 수증기 밀도가 주위 기체의 수증기 밀도보다 낮은 경우 수증기 분자는 입자표면으로 확산되고, 수증기 응축률은 입자표면에서의 확산속(diffusion flux)과 입자표면적의 곱으로 표시된다. 구형 입자에 대해서 수증기 분자의 확산방정식을 풀어서 응축률을 구하면 다음과 같이 표시된다.

$$\psi(r_p, t) = 4\pi r_p D (\rho_\infty - \rho_r) \quad (1)$$

여기서 $\psi(r_p, t)$ 는 시간 t 에서 반경이 r_p 인 입자에 대한 수증기 응축률을 나타낸다. D 는 수증기분자의 확산계수. ρ_∞ 와 ρ_r 은 각각 주위기체와 입자표면의 수증기 밀도이다. ρ_r 에 영향을 미치는 주요 변수는 입자표면의 온도와 입자크기이다. 입자의 크기가 작을수록 입자표면의 수증기 밀도가 커져서 응축률이 감소하게 되는데 이것을 Kelvin효과라 한다.

에어로졸 입자가 흡습성 성분을 포함하면 응축된 물과 흡습성 성분이 반응함으로써 입자표면의 증기밀도를 감소시키는데 결과적으로 응축률을 증가시키는 작용을 한다. 이것을 흡습성 성분의 용질효과(solute effect)라 한다. Kelvin효과와 용질효과를 고려한 경우 입자표면의 증기밀도는 다음과 같이 표시된다.

$$\rho_r = \rho_s(T_r) a_u \exp\left(\frac{2\sigma M_u}{r_p R \rho_p T_r}\right) \quad (2)$$

여기서 $\rho_s(T_r)$ 은 입자표면의 온도 T_r 에서 물의 포화 증기밀도이고, σ 는 흡습성 용액의 표면장력, M_u 는 물의 그림분자량, R 는 기체상수, ρ_p 는 입자의 밀도이다. a_u 는 물의 화학적 활동도(chemical activity)를 나타내며 Raoult의 법칙에 의하면 다음과 같이 표시된다⁶⁾.

여기서 M_s 는 흡습성 성분의 그림분자량이며 m_s 와 m_u 는 각각 입자에 포함된 흡습성 성분과 물의 질량이다. f 는 van't Hoff 계수로서 흡습성 성분의 전리도에 의해서 결정되는 상수이다. 식 (3)에서 지수항수는 Kelvin효과를 나타내며 a_u 는 용질효과를 나타낸다. (2)식으로부터 입자표면의 포화비(saturation ratio) S_r 을 정의하면 아래와 같다.

$$S_r = \frac{\rho_r}{\rho_s(T_r)} = a_u \exp\left(\frac{2\sigma M_u}{r_p R \rho_p T_r}\right) \quad (4)$$

수증기가 응축함에 따라 수증기의 잠열로 인하여 입자표면의 온도는 상승하고, 그 결과 입자로부터 주위의 기체로 열전달이 발생한다. 따라서 평형상태에서 입자표면의 온도 T_r 은 첨가되는 잠열과 입자표면으로부터 주위 기체로 전달되는 열을 같게 됨으로써 결정된다.

$$\psi(r_p, t) L = 4\pi r_p K (T_r - T_\infty) \quad (5)$$

여기서 L 은 수증기의 잠열을 나타내고 T_∞ 와 K 는 각각 주위 기체의 온도와 열전도계수를 나타낸다. (5)식의 좌변은 수증기 응축으로 입자에 첨가되는 잠열량을 나타내고 우변은 입자로부터 주위 기체로 전달되는 열을 나타낸다. 우변은 구형 입자에 대한 열 확산방정식을 풀어서 구한 결과이다.

(1)과 (5)식으로부터 수증기 응축률 $\psi(r_p, t)$ 를 구하기 위해서 Clausius-Clapeyron의 공식을 이용하여 입자표면의 포화 증기밀도를 다음과 같이 근사한다.⁷⁾

$$\rho_s(T_r) = \rho_s(T_\infty) \left[1 + \frac{LM_u}{RT_\infty^2} (T_r - T_\infty)\right] \quad (6)$$

식 (5), (6)을 이용하여 T_r 을 소거한 후 그 결과를 (2)식과 함께 (1)식에 대입하면 흡습성 에어로졸의 수증기 응축률 모델은 다음과 같이 구해진다.

$$\psi(r_p, t) = 4\pi r_p \frac{(S_\infty - S_r)}{\frac{1}{D\rho_s} + \frac{L^2 M_x}{KRT_\infty^2}} \quad (7)$$

여기서 $\rho_s = \rho_s(T_\infty)$ 이고 S_∞ 은 주위 기체의 포화비로서 $S_\infty = \rho_\infty/\rho_s$ 로 정의된다.

III. 흡습성 에어로졸 입자의 평형반경

흡습성 에어로졸은 주위 기체의 수증기가 과포화인 조건에서는 입자크기가 지속적으로 성장을 하게 된다. 하지만 상대습도가 100% 이하인 경우에는 처음에는 수증기 응축이 일어나지만 흡습성 성분의 농도가 희석되어 입자표면의 증기압이 주위 기체의 증기압과 같게 되면 입자의 성장이 멈춘다. 이때 응축률은 0이 되고 입자는 평형크기에 도달한다. 그러므로 주어진 상대습도에서 입자의 평형반경은 (7)식의 S_r 이 S_∞ 과 같게 되는 점에서 결정된다. (2)식의 지수함수를 일차식으로 근사하고 (3)식의 m_x 를 전체 입자의 질량에서 흡습성 성분의 질량을 뺀 값으로 대입하면 평형반경을 계산하는 방정식은 다음과 같이 얻어진다.⁶⁾

$$\begin{aligned} (S_\infty - 1)r_e^4 - \left(\frac{2\sigma M_x}{\rho_p RT_\infty}\right)r_e^3 \\ - \left(\frac{\rho_o r_o^3}{\rho_p}\right)(S_\infty - 1 - S_\infty f \frac{M_x}{M_s})r_e \\ + \frac{2\sigma M_x \rho_o r_o^3}{RT_\infty \rho_p^2} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 r_e 와 r_o 는 각각 입자의 평형반경과 초기 반경을 나타내며 ρ_o 는 흡습성 성분의 밀도를 나타낸다. (8)식은 입자의 평형크기를 구하는 4차 방정식으로 $S_\infty \leq 1$ 인 경우에 r_e 의 실근이 존재한다.

IV. 에어로졸의 입자 성장 방정식

수증기 응축에 의한 에어로졸 입자의 크기 성장은

수증기 응축률이 입자의 질량 증가율과 같으므로 입자 성장 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dv}{dt} = \psi(r_p, t) \quad (9)$$

여기서 v 는 반경이 r_p 인 입자의 질량으로서 $v = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_p$ 의 관계가 성립한다. (7)과 (9)식을 이용하면 입자의 반경변화는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{1}{r_p} \frac{(S_\infty - S_r)}{\frac{\rho_p}{D\rho_s} + \frac{\rho_p L^2 M_x}{KRT_\infty^2}} \quad (10)$$

에어로졸은 광범위한 크기의 입자들의 집합체로서 입자간 결합과 증기의 응축으로 크기가 성장하며 중력침전을 비롯한 여러 가지 부착현상에 의해서 제거된다. 에어로졸의 부착은 확산 부착, 벽면과의 온도차에 의한 부착(thermophoresis), 수증기 응축에 동반된 부착(diffusiophoresis), 관성충격에 의한 부착(inertial impaction) 등이 있다. 수증기응축에 의한 입자 성장은 입자간 결합에 비하여 매우 빠르게 진행되기 때문에 짧은 시간에는 입자간 결합의 영향은 무시할 수 있다. 또한 증기응축으로 인하여 급속한 입자의 성장이 일어나는 경우는 중력에 의한 부착이 지배적이다. 본 연구에서는 중력침전과 수증기 응축이 동시에 일어나는 경우를 고려하였으며 다른 현상의 영향은 무시하였다. 이 경우 에어로졸 거동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial v} [\psi(v, t)n(v, t)] \\ & - R(v, t)n(v, t) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $n(v, t)$ 는 입자크기 분포함수로서 $n(v, t)dv$ 는 입자의 질량이 v 와 $v+dv$ 사이에 있는 입자수 밀도를 나타낸다. $\psi(v, t)$ 는 질량이 v 인 입자의 수증기 응축률로서 식 (7)의 우변을 v 의 함수로 나타낸 것이다. $R(v, t)$ 는 질량이 v 인 입자의 중력침전에 의한 제거율을 나타내는데 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$R(v, t) = R_0 v^{2.3} \quad (12)$$

여기서 R_0 는 에어로졸 용기의 기하학적 구조와 증력가속도, 점성계수 등에 의해서 결정되는 상수이다. (11)식은 해석적인 방법으로 $n(v, t)$ 의 해를 구할 수 있는데 다음과 같이 주어진다⁸⁾.

$$n(v, t) = n_0(v') \frac{\psi(v', t)}{\psi(v, t)} E(t) \quad (13)$$

여기서 v' 는 시간 t 에서 크기가 v 인 입자의 초기 질량으로서 아래의 방정식에 의해서 결정된다.

$$\frac{dv'}{dt} = -\psi(v', t) \quad (14)$$

초기조건: $v'(0) = v$

$E(t)$ 는 시간 t 동안 증력침전으로 제거되는 에어로졸의 감소상수로서 아래와 같이 정의된다.

$$E(t) = \exp\left[-\int_0^t R(v', t') dt'\right] \quad (15)$$

수증기 응축률 모델 (7)과 증력침전 모델 (12)에 대해서 식 (14)와 (15)는 각각 상용화된 미분방정식 해법과 수치분법을 사용하여 해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 IMSL의 DGEAR와 DCADRE를 사용하였다. (13)식으로부터 입자크기분포 $n(v, t)$ 가 구해지면 이것을 수치적분하면 전체 에어로졸 입자수 밀도 $N(t)$ 를 계산할 수 있다.

$$N(t) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} n(v, t) dv \quad (16)$$

여기서 v_{\min} 과 v_{\max} 는 각각 최소 및 최대 입자의 크기를 나타낸다.

V. 계산결과 및 분석

수증기 응축이 흡습성 에어로졸의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 CsOH 에어

로졸을 고려하였다. 계산에 사용된 에어로졸 성분의 물성치 및 열역학적 조건은 다음과 같다.

CsOH의 밀도(ρ_0): $3.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

기체의 온도(T_∞): $323 \text{ }^\circ\text{K}$ ($50 \text{ }^\circ\text{C}$)

기체의 압력(P_∞): $1.10325 \times 10^5 \text{ Pa}$

물의 그림분자량(M_w): 0.018 kg/mol

CsOH의 그림분자량(M_s): 0.150 kg/mol

수증기의 잠열: $L = 3.255 \times 10^6 - 2.6845 \times 10^3 T_\infty \text{ J/kg}$

기체의 열전도계수:

$$K = 1.96 \times 10^{-3} \frac{T_\infty^{1.5}}{T_\infty + 125} \text{ J/kg m sec}$$

수증기분자의 확산계수:

$$D = 2.11 \times 10^{-5} \left(\frac{1.01325 \times 10^5}{P_\infty} \right) \left(\frac{T_\infty}{273.15} \right)^{1.94} \text{ m}^2/\text{sec}$$

수증기의 포화밀도:

$$\rho_s = \frac{0.2888}{T_\infty} \exp\left[18.304 - \frac{3816.44}{(T_\infty - 46.13)}\right] \text{ kg/m}^3$$

물의 표면장력:

$$\sigma = 7.785 \times 10^{-2} - 1.925 \times 10^{-4} (T_\infty - 273.15) \text{ N/m}$$

위에 주어진 물성치의 상관식은 에어로졸 거동 계산 코드인 NAUA⁹⁾에서 취하였다. (3)식의 van't Hoff 계수 f 는 실험을 통하여 결정되는 값으로 CsOH인 경우 1.5와 2.0 사이의 값이 보고 되고 있으며 본 연구에서는 2.0을 사용하였다.

Fig. 1-3은 각각 상대습도가 90%, 100%, 105%일 때(즉, $S_\infty = 0.9, 1.0, 1.05$) 흡습성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서 CsOH 원시입자(seed particle)에 수증기가 응축하여 용액을 형성할 때 용액입자의 크기에 따른 응축률의 변화를 식 (7)를 사용하여 계산한 결과이다. 흡습성을 고려하지 않은 경우는 물의 활동도 a_w 를 1로 두고 계산하였다. CsOH 원시입자의 반경 r_0 는 $0.1 \mu\text{m}$ 로 가정하였으며 용액입자의 크기는 원시입자에 대한 반경의 비(r/r_0)로 나타내었다. 상대습도가 90%에서 흡습성을 고려한 경우 용액입자의 반경비 r/r_0 가 약 1.8에 이를 때까지는 응축률이 (+) 값으로 응축이 일어남을 보이고 있으나 반경비가 1.8이상이 되면 증발이 일어남을 보이고 있다. 이에 반하여 흡습성을 고려하지 않은

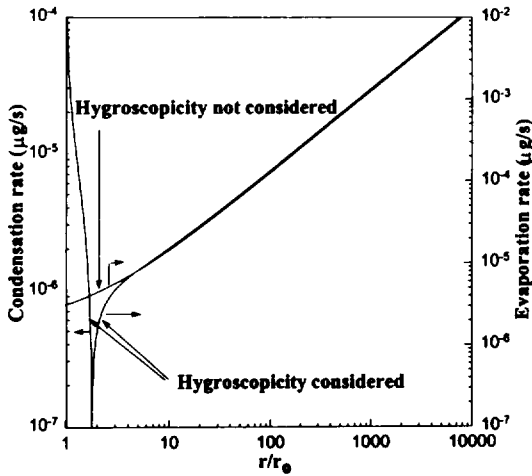


Fig. 1 Condensation rates at 90% relative humidity
 r = grown radius, r_0 = initial radius

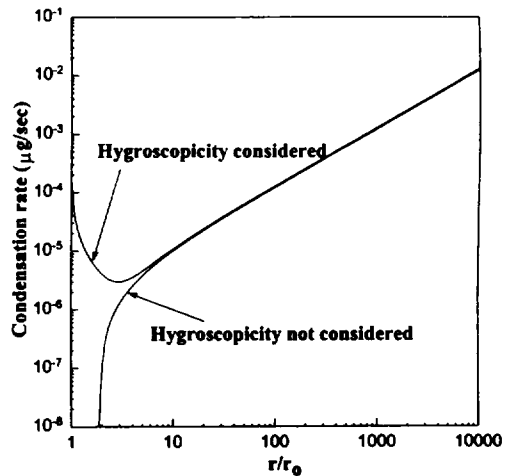


Fig. 3 Condensation rates at 105% relative humidity
 r = grown radius, r_0 = initial radius

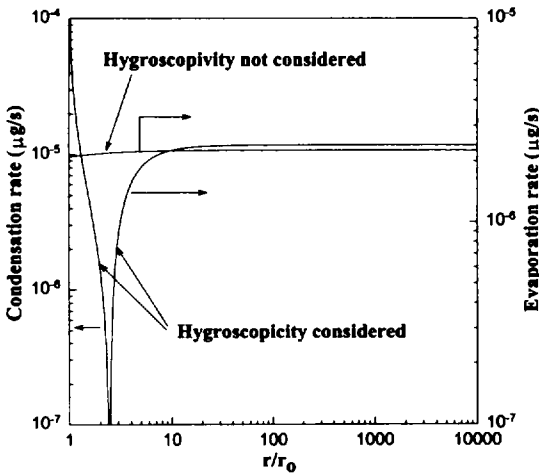


Fig. 2 Condensation rates at 100% relative humidity
 r = grown radius, r_0 = initial radius

경우는 모든 크기의 입자에 대해서 응축률이 (-) 값으로 실질적으로 증발이 일어남을 보이고 있다. 용액 입자의 반경비가 약 5배 이상에서는 흡습성의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이 경우 용액입자의 크기가 클수록 증발률은 가파르게 상승하고 있다.

상대습도가 100%인 포화상태에서 흡습성을 고려한 경우는 앞의 경우와 같이 용액입자의 반경비가 약 2.5에 이를 때까지는 응축이 일어남을 보이나 그 이

상에서는 증발이 일어남을 알 수 있다. 이 경우에 있어서도 흡습성을 고려하지 않은 경우는 모든 입자 크기에서 증발이 일어나고 있다. Fig. 1과 Fig. 2를 비교하면 흡습성을 고려한 경우 상대습도가 높아짐에 따라 응축이 일어나는 영역이 증가하고 증발률이 감소함을 알 수 있다. 상대습도가 105%인 경우는 흡습성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 응축이 발생함을 보이고 있다. 흡습성을 고려한 경우 용액입자의 크기가 커짐에 따라 응축률이 감소하여 반경비가 약 2.2에서 최소치에 달한 후 일정하게 증가하고 있다. 반면 흡습성을 고려하지 않은 경우는 초기에는 급속한 응축률의 증가를 보이다 그 이후에는 흡습성을 고려한 경우와 비슷한 증가를 나타내고 있다. 위의 결과에 따르면 흡습성 에어로졸인 경우 상대습도가 아포화상태에서도 수증기 응축으로 입자크기가 성장할 수 있다. 그러나 입자의 크기가 커지면 흡습성의 영향은 거의 무시할 정도이다. 또한 입자의 크기가 작을수록 Kelvin효과의 영향이 커져서 응축률의 급속한 변화가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-6은 상대습도가 각각 90%, 99%, 100%에서 반경(r_0)이 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 μm 인 CsOH 원시입자의 성장속도와 평형반경(r_e)의 계산결과를 보이고 있다. 입자 성장속도는 식 (10)을 이용하여 계산하였으며 평형반경은 식 (8)로부터 계산하였다. 상대습도가

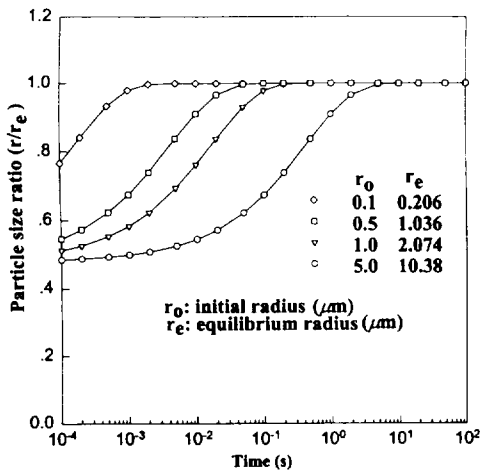


Fig. 4 CsOH particle growth rates and equilibrium radii at 90% relative humidity

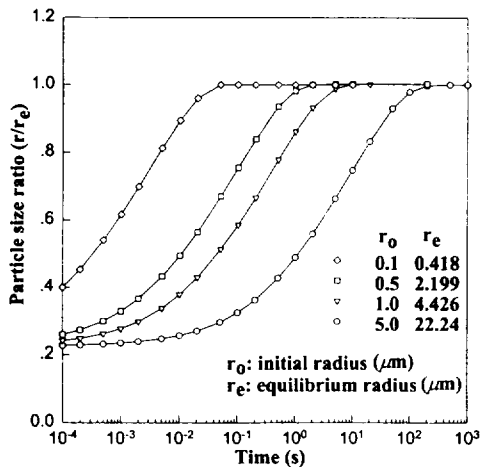


Fig. 5 CsOH particle growth rates and equilibrium radii at 99% relative humidity

90%인 경우 평형반경은 각각 0.206, 1.306, 2.074, 10.38 μm 이며 평형반경에 도달하는데 소요되는 시간은 각각 2×10^{-3} 초, 5×10^{-2} 초, 2.5×10^{-1} 초, 8×10^1 초이다. 상대습도가 99%인 경우 평형반경은 각각 0.418, 2.199, 4.426, 22.25 μm 이며 평형에 도달하는 시간은 각각 4×10^{-2} 초, 2초, 10초, 200초이다. 상대습도가 100%인 경우 평형반경은 각각 0.985, 10.99, 31.08, 347.4 μm 이며 0.1 μm 입자는 평형반경에 도달하는 시

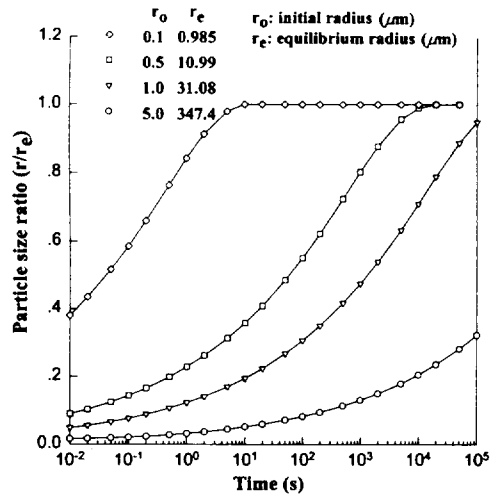


Fig. 6 CsOH particle growth rates and equilibrium radii at 100% relative humidity

간이 20초, 0.5 μm 입자는 30000초로 계산되었다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 상대습도와 초기반경이 클수록 평형반경은 증가하지만 평형반경에 도달하는 시간은 길어진다.

Fig. 7은 상대습도에 따른 초기반경과 평형반경의 관계를 보이고 있는데 상대습도가 높아질수록 상대습도의 변화가 입자 성장에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다. 즉, 상대습도가 99.5% 및 100%일 때의 평형반경비의 차이는 상대습도가 99% 및 99.5%일 때 평형반경비의 차이보다 훨씬 크다.

흡습성이 입자 크기 분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 초기 분포가 대수정규 분포(log-normal distribution)를 갖는 CsOH 에어로졸을 대상으로 흡습성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서 각각 (13)식을 이용하여 입자 크기 분포를 계산하였다. 초기 분포의 입자 직경의 중앙값은 0.225 μm , 총 입자 수는 1×10^{10} #/ m^3 , 분포의 표준편차는 1.5, 최소 입자의 직경은 0.01 μm 로 가정하였다. 중력 침전에 대한 제거 상수 (R_g)는 3.844×10^{-3} 로 하였다. 흡습성을 고려한 경우는 상대습도를 99%, 100%, 101%로 가정하였으며, 흡습성을 고려하지 않은 경우는 101%로 가정하였다. 각 경우 모두 다른 열역학적 조건과 상대습도는 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다.

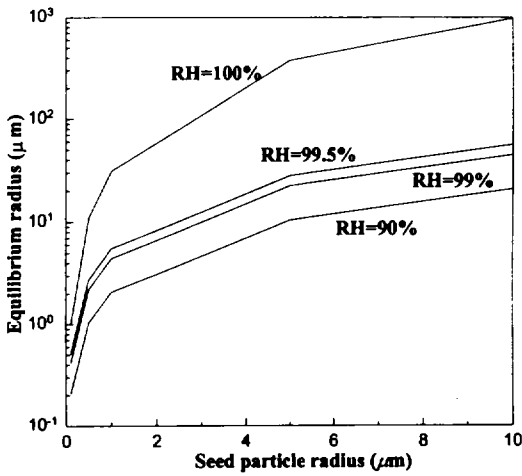


Fig. 7 Change of the equilibrium radius with respect to relative humidity and seed particle radius

Fig. 8과 9는 각각 0.1초 및 1초후의 입자크기분포를 보여주고 있다. 0.1초에서의 입자크기 분포는 상대습도가 101%이고 흡습성을 고려한 경우 가장 빠른 입자성장을 보였으며 같은 상대습도에서 흡습성을 고려하지 않은 경우가 그 다음으로 빠른 입자성장을 보이고 있다. 상대습도가 100% 및 99%에서 흡습성을 고려하지

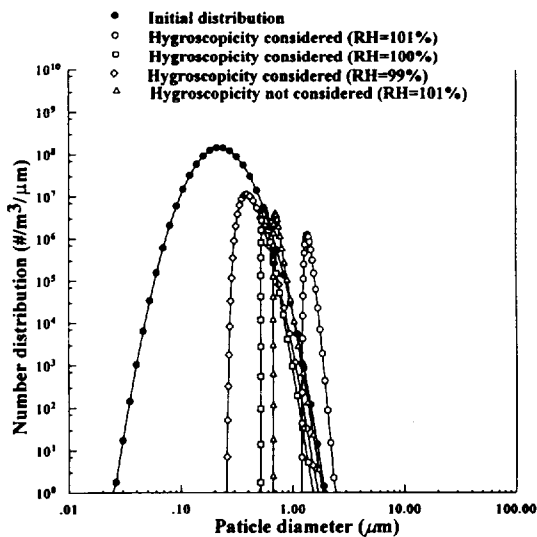


Fig. 8 Change of the particle size distribution after 0.1 sec

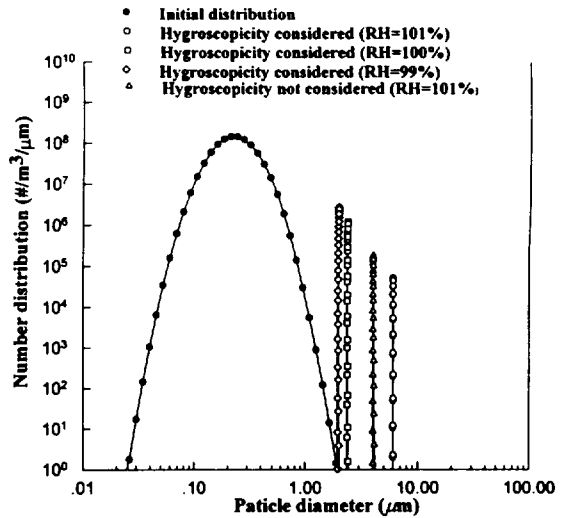


Fig. 9 Change of the particle size distribution after 1 sec

않으면 앞서 본 바와 같이 수증기 응축이 일어날 수 없으므로 초기분포에서 거의 변화가 없으나 흡습성을 고려한 경우에는 상당히 빠른 입자성장을 나타내고 있다. 이러한 경향은 1초후의 입자 크기분포에서도 유사하게 나타나고 있다. 또한 작은 입자가 상대적으로 빨리 성장하므로써 입자 크기분포의 폭이 시간이 지남에 따라 점점 좁아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 입자크기 분포의 변화는 증력에 의한 침전과 입자간 결합에 직접적인 영향을 미치게 된다. 즉, 입자의 성장속도가 빠를수록 빨리 침전이 일어나므로 흡습성을 고려한 경우 더 빨리 제거됨을 예상할 수 있다.

Fig. 10은 CsOH 에어로졸량의 변화를 초기량에 대한 비율로 나타낸 것이다. 수증기 응축에 의해서 입자의 크기가 성장하면 증력침전이 가속되므로 입자 성장이 빠를수록 빨리 감소한다. 앞의 결과에서 예상한 바와 같이 상대습도가 101%이고 흡습성을 고려한 경우 가장 빠른 속도로 감소하며 다음은 상대습도가 101%에서 흡습성을 고려하지 않은 경우이다. 흡습성을 고려한 경우 초기량의 1/10로 감소하는데 걸리는 시간은 상대습도가 100%에서 약 65초, 상대습도가 99%에서는 약 80초이다. 상대습도가 101%에서 흡습성을 고려한 경우 초기량의 1/10로 되는 시간이 약 30초이나 고려하지 않은 경우는 약 60초이다.

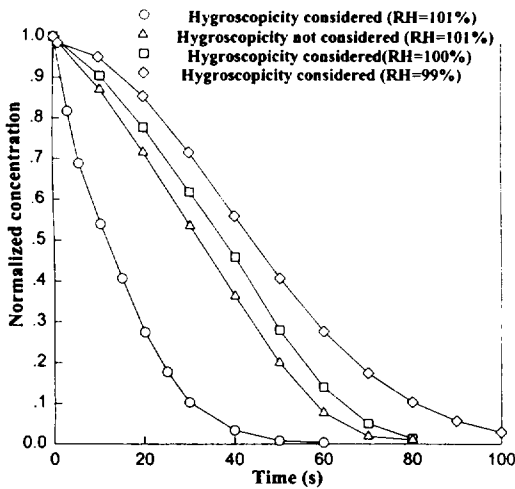


Fig. 10 Time change of the normalized number concentration

본 연구에서는 해석적인 방법으로 에어로졸 거동방정식의 해를 구하기 위하여 수증기 응축과 증력침전만을 고려하였으며 짧은 시간 동안의 에어로졸 거동을 계산하였다. 장시간에 걸친 에어로졸의 거동을 해석하기 위해서는 입자간 결합의 영향을 고려되어야 한다. 이 경우 에어로졸 거동방정식의 해는 해석적인 방법으로 구할 수 없기 때문에 수치해법으로 에어로졸 거동방정식의 해를 구하여야 한다.

VI. 결 론

흡습성 에어로졸의 용질효과와 Kelvin효과를 고려한 수증기 응축률 모델을 이용하여 수증기 응축에 따른 흡습성 에어로졸의 입자성장 현상을 분석하였다. 원자로 중대사고시 방사선원항에 기여도가 큰 CsOH, CsI 등과 같은 흡습성 에어로졸은 상대습도가 포화상태 이하에서도 주위의 수증기를 흡수하여 입자성장이 일어날 수 있음을 보였다. 이 경우(상대습도 ≤ 100%) 입자는 평형크기에 이를 때까지 성장한다. 입자의 평형크기와 성장속도를 계산한 결과 상대습도가 높고 원시입자의 크기가 클수록 평형크기는 증가한다. 그러나 상대습도가 높고 원시입자가 클수록 평형

크기에 도달하는 시간은 길어진다.

흡습성을 고려한 경우 고려하지 않은 경우에 비하여 수증기 응축양상이 큰 차이를 보였다. 수증기 응축과 증력침전을 고려한 경우에 대해서 입자 크기분포 변화를 계산한 결과 흡습성은 입자 크기분포의 빠른 성장을 초래하였고, 이러한 입자 크기분포의 성장은 증력침전으로 제거되는 에어로졸량에도 영향을 주어 짧은 시간에 빠른 에어로졸의 감소를 초래하였다.

본 연구에서 분석한 바에 의하면 흡습성은 에어로졸의 감소에 크게 기여하였다. 그러므로 중대사고 해석 코드에서 정확한 방사선원항을 계산하기 위해서는 흡습성 수증기 응축을 다룰 수 있는 방향으로 관련 모델이 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Robinson, R.J. and Yu, C.P., 1998, Theoretical Analysis of Hygroscopic Growth Rate of Mainstream and Sidestream Cigarette Smoke Particles in the Human Respiratory Tract, *Aerosol Sci. and Tech.* Vol. 28, pp. 21-32.
- 2) Hitzemberger, R., Berner, A., Dusek, U. and Alabashi, R., 1997, Humidity-Dependent Growth of Size-Segregated Aerosol Samples, *Aerosol Sci. and Tech.* Vol. 27, pp. 116-130.
- 3) Jokiniemi, J., 1988, The Growth of Hygroscopic Particles During Severe Core Melt Accidents, *Nucl. Tech.* Vol. 83, pp. 16-23.
- 4) Jokiniemi, J., Koistinen, K. and Raunemaa, T., Experimental Verification of Hygroscopic Aerosol Growth in Reactor Accident Conditions, *Nucl. Tech.* Vol. 90, pp. 394-407.
- 5) Sandia National Laboratory, 1994, *MELCOR 1.8.3 Computer code manual.*
- 6) Jokiniemi, J., 1990, Effect of selected binary and mixed solutions on the steam condensation and aerosol behavior in containment", *Aerosol Sci. and Tech.* Vol. 12 pp. 891-902.
- 7) Mozurkewich, M., 1986, Aerosol Growth and the

- Condensation Coefficient for Water: A Review.
Aerosol Sci. and Tech. Vol. 5, pp. 223-236.
- 8) Williams. M.M.R. and Loyalka. S.K.. 1991.
Aerosol Science: Theory and Practice. Pergamon Press.
- 9) Bunz. H., Kyoro. M. and Schock. W.. 1983.
NAUA Mod4. A code for calculating aerosol behavior in LWR core melt accidents: Code description and users manual. KfK-3554. Kernforschungszentrum Karlsruhe.