

변동구간분할법을 이용한 흡습성 에어로졸의 거동 해석

An Analysis of the Hygroscopic Aerosol Behavior Using the Moving Sectional Method

박재우* · 김희동**

J. W. Park*, H. D. Kim**

ABSTRACT

Hygroscopic aerosols can rapidly grow in size by steam condensation even under subsaturated steam conditions. Much efforts have been made to handle this process, but there have been computational difficulties in handling the condensational growth of hygroscopic aerosols by conventional methods. A recently released computer code, CONTAIN 2.0, employs a new technique called Moving Sectional Method(MSM) to handle the growth of hygroscopic aerosols. As a part of the model verification efforts, we have used the code to simulate the VANAM M3 hygroscopic aerosol experiment. We assess the accuracies of the new MSM and the conventional Fixed Sectional Method(FSM) based on the simulation results. Also presented are discussions about the robustness of the MSM.

주요기술용어: Hygroscopic Aerosol, Moving Sectional Method, Fixed Sectional Method

I. 서론

흡습성 에어로졸 입자에 대한 증기의 응축과 증발은 질소산화물 및 유황산화물의 대기중 거동, 스프레이 및 흡연물질의 기관지내 거동, 연소분위기에서 연료예적의 거동 등 다방면에서 연구되는 현상이다. 이 현상은 또한 원자로 사고시의 방사성물질의 거동을 해석하는 데에도 직접적으로 관련되는 현상이다. 원자력발전소의 안전성 분석에는 원자로심이 용융되어 다량의 방사성 물질이 원자로 격납건물로 방출되는 최악의 시나리오가 포함된다. 현재 밝혀진 바로는 격납건물로 방출되는 방사성 물질의 대부분은 미세한 입자인 에어로졸 형태를 취하게 된다. 격납건물은 방사성 물질의 환경방출을 궁극적으로 차단하는 역할을 하므로 격납건물

의 성능을 평가하고 방사성물질의 환경방출 잠재량을 평가하기 위해서는 에어로졸의 거동을 해석하는 과정을 거쳐야 한다. 원자로 사고시에 격납건물로 방출되는 방사성 물질 가운데는 CsOH, CsI 등 강한 흡습성을 가진 물질이 있고 이들을 포함한 에어로졸은 수증기 응축에 의한 입자 성장이 에어로졸의 침전에 영향을 미치는 중요한 변수가 된다.

원자로 사고 해석과 관련하여 다양한 형태의 에어로졸 거동 계산 모델이 개발되어 사용되고 있으나 공통적으로 겪는 어려움은 입자표면에 수증기가 응축하여 입자크기가 빠르게 성장하는 경우 정확성이 나빠진다는 점이다.⁽¹⁾ 에컨데 MELCOR 코드⁽²⁾에 사용된 MAEROS⁽³⁾ 모델의 경우 수증기 응축이 없는 건조한 에어로졸의 거동을 계산하는 데는 정확성이 입증되었으나 수증기 응축을 고려하는 경우 수치확산(numerical diffusion)으로 인하여 실제보다 에어로졸 성장이 느리게 계산되는 문제가 발생한

* 정회원, 제주대학교 에너지공학과

** 한국원자력연구소 중대사고연구 Lab

다. 이러한 문제점은 흡습성(hygroscopic) 성분이 포함된 에어로졸을 대상으로 하면 더욱 심각해진다. 흡습성 성분은 수증기가 불포화 상태에서도 주위의 수분을 흡수하여 용해하므로 그 만큼 입자성장이 빠르게 진행되기 때문이다.

수증기 응축이 동반되는 에어로졸의 거동 해석에 따른 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에 발표된 CONTAIN 2.0 코드⁽⁴⁾는 소위 변동구간분할법(Moving Sectional Method 또는 Moving Grid Method)⁽⁵⁾이란 모델을 채택하였다. CONTAIN 코드는 원자로 중대사고시에 적납용기에서 발생하는 열수력 현상과 에어로졸 거동을 계산하는 코드로서 1.0판에서는 고정구간분할법(Fixed Sectional Method)⁽⁶⁾을 사용하였으나 앞서 언급한 문제점으로 인하여 2.0판에서는 수증기 응축이 동반되는 경우에만 한정하여는 변동구간분할법을 사용할 수 있도록 하였다. 그러나 수증기 응축을 제외한 에어로졸 현상에 대해서는 기존의 고정구간분할법을 사용한다. CONTAIN 코드에 사용된 에어로졸 모델은 수증기 응축이 없는 건조한 에어로졸에 대해서는 검증용 거쳤으나 수증기 응축이 동반되는 에어로졸에 대해서는 충분한 검증을 받지 못하였다. 더구나 최근에 발표된 CONTAIN 2.0 코드에 사용된 변동구간분할법은 수증기가 불포화 상태에서도 입자표면에 응축이 발생하는 흡습성 에어로졸에 대한 검증작업은 이루어진 바가 없다.

본 연구는 변동구간분할법을 최초로 도입한 CONTAIN 2.0 코드를 사용하여 국제적인 코드 검증 목적으로 수행된 흡습성 에어로졸 실험인 VANAM M3 실험⁽⁷⁾을 모의하였으며, 이를 통하여 변동구간분할법의 정확성을 평가하였다. 또한 계산과정에서 발견한 현재 사용된 변동구간분할법의 문제점에 대해서도 논의하였다.

II. CONTAIN 코드의 에어로졸 거동 계산 방정식

중대사고시에 적납건물로 방출된 에어로졸의 경우 입자를 구성하는 성분은 핵분열생성물과

수증기가 응축한 물을 포함한다. 각 핵분열생성물은 방사선학적으로 서로 다른 특성을 가지므로 이러한 에어로졸의 거동을 계산하기 위해서는 성분별로 에어로졸의 양을 계산할 수 있는 복수성분 에어로졸 계산 모델이 필요하다. CONTAIN 코드에 사용된 에어로졸 거동 계산식은 Simons⁽⁸⁾이 제시한 아래의 복수성분 에어로졸의 거동 방정식에 기초를 두고 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k(m, t)}{\partial t} = & \int_0^m \beta(m-u, u) q_k(u, t) n(m-u, t) dm \\ & - q_k(m, t) \int_0^\infty \beta(m, u) n(u, t) du \\ & + \delta_{w,k} \psi(m) n(m, t) - \frac{\partial}{\partial m} [\psi(m) q_k(m, t)] \\ & - R(m, t) q_k(m, t) + S_k(m, t) \quad (1) \end{aligned}$$

위에서 $q_k(m, t)$ 는 질량이 m 인 입자에 포함된 k -성분의 질량분포를 나타내는 함수로서 $q_k(m, t) dm$ 는 m 과 $m+dm$ 사이에 있는 입자들의 k -성분 질량농도를 나타내고, $n(m, t)$ 는 단위 부피당 입자수분포를 나타낸다. $\beta(m, u)$ 는 질량이 각각 m, u 인 입자의 결합률(coagulation rate)을 나타내며 $\psi(m)$ 는 질량이 m 인 입자에 대한 수증기 응축률을 나타낸다. $R(m, t)$ 는 질량이 m 인 입자의 제거율이고, $S_k(m, t)$ 는 질량이 m 인 입자에 포함된 k -성분의 생성률을 나타낸다. $\delta_{w,k}$ 는 k -성분이 물인 경우(w)이면 1이고 그렇지 않으면 0이다.

식 (1)은 적분형 편미분방정식으로 직접 해를 구하는 데는 많은 어려움이 따르므로 수치적 방법이 불가피하다. Gelbard와 Seinfeld⁽⁹⁾은 입자 질량을 다수의 구간(또는 그룹)으로 분할하고 각 구간에 속한 성분별 에어로졸량을 계산하는 수치방정식을 식 (1)로부터 유도하였다. CONTAIN 코드는 Gelbard와 Seinfeld가 개발한 수치방정식을 풀어서 성분별 에어로졸량을 계산하는데 이 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{l,k}(t)}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j=l}^m [{}^1a \beta_{i,j} Q_{j,k} Q_i + {}^1b \beta_{i,j} Q_{i,k} Q_j] \\ & - \sum_{i=l}^m [{}^2a \beta_{i,l} Q_i Q_{l,k} - {}^2b \beta_{i,l} Q_l Q_{i,k}] \\ & - \frac{1}{2} {}^3 \beta_{l,l} Q_l Q_{l,k} - Q_{l,k} \sum_{i=l+1}^m {}^4 \beta_{i,l} Q_i \\ & + {}^1 G_{l,k} Q_l - {}^2 G_{l,k} Q_{l,k} + {}^2 G_{l+1} Q_{l+1,k} \\ & + {}^3 G_{l-1,k} Q_{l-1} - R Q_{l,k} + S_{l,k} \quad (2) \end{aligned}$$

위에서 $Q_{l,k}(t)$ 는 l -구간에 속한 k -성분의 에어로졸 농도로서 다음과 같이 정의 된다.

$$Q_{l,k}(t) = \int_{m_{l-1}}^{m_l} q_k(m, t) dm \quad (3)$$

여기서 m_l 과 m_{l-1} 은 각각 l -구간의 위와 아래 경계에 해당하는 입자의 질량이다. 식 (2)에서 $Q_l(t)$ 는 l -구간에 속한 각 성분 농도의 합을 나타낸다. β, G, R 은 식 (1)을 수치화 하는 과정에서 각각 $\beta(m, u), \psi(m), R(m, t)$ 을 각 구간에 걸쳐 적분하여 구하는 구간계수(sectional coefficients)이다. 이들 계수를 구하는 상세한 식은 문헌 (6)에 주어져 있다.

CONTAIN 2.0 코드에는 기존의 방법인 고정 구간분할법(FSM)과 변동구간분할법(MSM)이 사용되고 있다. FSM은 계산초기에 설정된 각 구간의 경계를 고정된 상태에서 미리 계산된 구간계수를 이용하여 식 (2)의 우변에 있는 모든 항을 동시에 적분하여 $Q_{l,k}(t)$ 을 계산한다. 이 모델은 수증기 용축이 없는 건조한 에어로졸에 대해서는 정확한 계산을 할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 반면 수증기 용축이 동반되는 에어로졸인 경우 우변의 G 계수가 포함된 항으로 인하여 방정식이 과도하게 경직(stiff)되는 문제가 발생한다. 이것은 수증기 용축률이 입자크기에 따라 급격하게 변함으로 인하여 G 계수도 구간에 따라 매우 크게 변하기 때문이다. 수증기 용축이 있는 경우 발생하는 또 다

른 문제는 각 구간의 경계를 고정함으로써 야기되는 수치확산(numerical diffusion) 오차이다. 방정식의 경직성은 수증기 용축을 다른 현상과 동시에 계산함으로써 발생하고, 수치확산은 수증기 용축으로 입자의 크기가 성장함에도 불구하고 처음의 구간경계를 그대로 고정시키는 데서 발생한다.

고정구간분할법의 단점으로 밝혀진 방정식의 경직성과 수치확산 문제를 극복하기 위하여 Gelbard⁽⁵⁾는 변동구간분할법을 제안하였다. 이 모델은 구간의 경계를 이동시키면서 수증기 용축에 따른 구간별 에어로졸 변화량을 먼저 계산하고, 이 계산이 완료되면 다른 현상에 의한 영향을 기존의 고정구간분할법을 사용하여 계산하는 방법이다. CONTAIN 2.0 코드에 사용된 변동구간분할법의 계산과정을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 임의의 시간 t_0 에서 전체 에어로졸 계산을 위해 설정한 시간간격을 Δt 라 하자. 먼저 수증기 용축의 영향을 계산하기 위하여 Δt 는 n 개의 더 작은 시간단위인 dt 로 세분되고, 이 시간단위로 구간의 경계를 이동시키면서 수증기 용축/증발에 의한 구간별 에어로졸량을 계산한다. 이 과정을 반복하여 Δt 동안의 계산이 완료되면 그 결과를 초기의 구간 경계에 따라 재배분한다. 그리고 초기시간(t_0)으로 돌아가 앞서 계산한 구간별 에어로졸량을

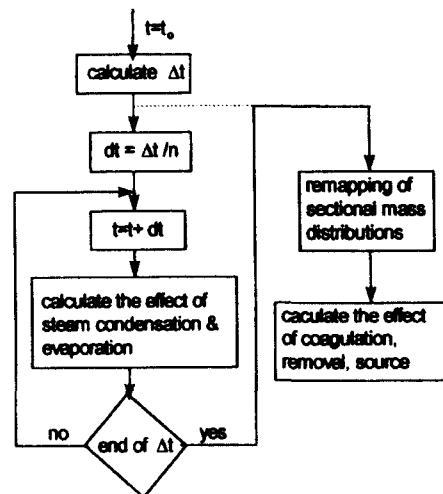


Fig. 1 Computational procedure of Moving Sectional Method in CONTAIN 2.0

초기치로 하여 고정구간분할법을 사용하여 수증기 응축을 제외한 현상인 결합(coagulation), 제거(removal), 생성(source)에 의한 에어로졸 변화를 계산한다.

이동하는 구간의 경계는 수증기 응축에 의한 입자 성장방정식으로부터 계산되는데 질량 m 인 입자에 대한 성장방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = \psi(m) \quad (4)$$

CONTAIN 2.0 코드는 식 (4)를 직접 적분하는 대신에 실재는 다음의 식에 따라 이동하는 구간의 경계를 계산한다.

$$dt = \int_{m(t)}^{m(t+dt)} \frac{dm}{\psi(m)} \quad (5)$$

여기서 $m(t)$ 은 시간 t 에서의 구간경계 입자의 질량이고 $m(t+dt)$ 는 dt 후의 질량이다. 식 (5)로부터 $m(t+dt)$ 의 해를 찾는 방법은 $m(t+dt)$ 을 반복적으로 변화시키면서 우변을 수치적분하여 그 값이 dt 에 근접하도록 한다.

수증기 응축 계산을 통하여 얻어진 구간별 에어로졸량을 입자간 결합, 제거, 생성의 영향을 계산하기 앞서 원래의 구간구조에 따라 재배분하는 방법은 다음과 같다. 예컨대 j -구간의 경계인 m_j 와 m_{j+1} 이 수증기 응축으로 dt 동안 성장하여 각각 m_j^d 와 m_{j+1}^d 로 이동하였고 이것은 Fig. 2와 같이 초기의 l -구간의 경계(m_l , m_{l+1})와 부분적으로 중첩되었다고 하자. j -구간의 입자는 수증기 응축으로 크기가 성장하여도 물을 제외한 성분의 변화는 없으므로 dt 후의 j -구간 k -성분의 에어로졸량은 처음과 같아서 $Q_{j,k}(t+dt) = Q_{j,k}(t)$ 이다. 따라서 Fig. 2의 경우 원래의 l -구간에 배분될 에어로졸량은 다음과 같이 계산된다.

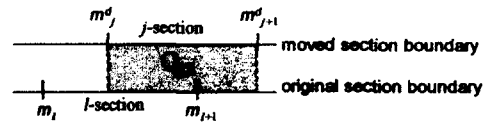


Fig. 2 An overlapping of moving section boundaries and original section boundaries

$$Q_{l,k}(t) = Q_{j,k}(t) \frac{\ln(m_{l+1}/m_j^d)}{\ln(m_{j+1}^d/m_j^d)} \quad (6)$$

위에서 구간경계의 대수값을 사용한 이유는 구간분할이 입자질량의 대수값에 근거하여 이루어지기 때문이다.

한편 수증기 응축으로 각 구간에 첨가되는 물의 양은 에어로졸 전체에 응축될 물의 양을 먼저 계산하고 이것을 각 구간에 포함된 물을 제외한 성분의 비율에 따라 배분하여 결정한다. 에어로졸 전체에 응축될 물의 양은 현재 공기중 수증기농도와 평형 수증기농도의 차이로부터 계산한다.

III. CONTAIN 코드의 에어로졸 현상 모델

CONTAIN 2.0 코드에서 고려되는 에어로졸 현상은 다음과 같다.

- 입자간 결합(coagulation)
 - 브라운운동에 의한 결합
 - 중력에 의한 결합
 - 난류운동에 의한 결합
- 수증기 응축/증발
- 부착(deposition)에 의한 제거
 - 중력침전
 - 확산부착
 - 기체와 벽면과의 온도차에 의한 부착(thermophoresis)
 - 수증기의 벽면 응축에 따른 부착(diffusiophoresis)
- 에어로졸 생성(sources)

각 현상에 대한 상세한 모델식은 코드 메뉴얼에 주어져 있으므로 생략한다. 수증기 응축/증발에 의한 입자 성장/수축 모델은 Mason 모델⁽⁹⁾을 사용하고 있으며 아래와 같다.

$$\psi(m) = \frac{2\pi d [S - a_w \exp(-\frac{4\sigma M_w}{RT\rho_w d})]}{\frac{1}{\rho_s D} + \frac{L}{K_g T} (\frac{M_w L}{RT} - 1)} \quad (7)$$

위에서 d 는 질량이 m 인 입자의 직경, S 는 수증기 포화비(saturation ratio), a_w 는 물의 화학적 활동도, σ 는 물의 표면장력, M_w 는 물의 그램분자량, R 은 기체상수, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_s 는 포화수증기 밀도, D 는 수증기 분자의 확산계수, L 은 수증기 잠열, K_g 는 기체의 열전도계수, T 는 절대온도이다. 식 (7)의 지수함수는 구형 입자의 표면이 수증기 응축에 미치는 영향(Kelvin effect)을 나타내는 항이고 a_w 는 입자에 흡습성 성분이 포함된 경우 수증기 응축에 미치는 용질의 영향(solute effect)을 나타내는 항이다. a_w 는 다음의 식으로 계산된다.

$$a_w = \frac{1}{1 + f \frac{M_w m_s}{M_s m_w}} \quad (8)$$

여기서 m_s 와 m_w 는 각각 입자에 포함된 흡습성 성분과 물의 질량이고 M_s 는 흡습성 성분의 그램분자량이다. f 는 van't Hoff 계수로 흡습성 성분의 용해도를 나타낸다.

IV. VANAM M3 에어로졸 실험 입력 모델

VANAM M3 실험은 흡습성 성분인 NaOH 에어로졸을 사용하여 수증기 응축조건에서 시간에 따른 주요 열수리변수와 에어로졸 농도의 변화를 측정할 실험이다. NaOH는 중대사고시 격납건물로 방출되는 CsOH와 흡습성 거동이 유사한 물질로서 사용되었다. 실험용기는 원자로 격납건물과 유사한 구조를 가진 Battelle

Model Containment이며 전체 구조는 Fig. 3에 보인 바와 같다. 용기내부는 콘크리트 벽으로 여러 개의 격실로 구분되어 있으며 격실간에는 관통구가 있어 기체가 유통될 수 있다. CONTAIN 2.0 코드 계산을 위해서 용기내부를 단위방(cell)으로 세분하여 Fig. 4와 같이 모형화 하였다. 실험용기의 R9는 상부의 돔과 외곽의 환형공간이 하나로 연결된 공간이나 R9.1, R9.3, R9.4의 단위방으로 나누었고, R4는 R4.1, R4.2로 나누었다. 단위방안에 표시된 점선은 실험용기에 벽이 없는 경계이고 실선은 콘크리트 벽이 있는 경계이다. 격실간을 연결하는 관통구는 기체의 유통이 일어나는 유통로(flow path)로 나타내었다. R5와 R3에는 에어로졸과 수증기를 주입하는 배관이 설치되어 있다. 하부에 위치한 단위방에는 벽면에 응축한 물이 모이는 집수조(sump)를 마련하였고 상부 단위방의 응축수는 자동적으로 바로 아래에 위치한 단위방의 집수조로 이동되는 것으로 가정하였다. 실험용기의 외부경계는 대기(environment)와 실험제어건물(building) 그리고 지면(soil)으로 나타내었다.

실험의 전 과정은 Fig. 5에 보인바와 같이 여섯 단계로 나누어진다. 제 I단계(1.13-17.2hr)는 R5를 통하여 수증기를 주입하여 용기내부를 가열하는 과정이다. 주입된 수증기가 용기의 구석까지 확산되도록 하기 위하여 R3를 통하여

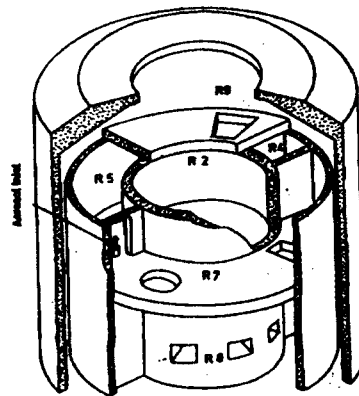


Fig.3 Battelle Model containment used for the experiment

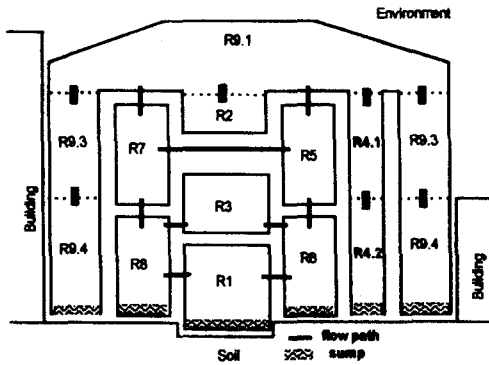


Fig. 4 Nodalization of the model containment

공기의 일부를 배출하였다. I단계 후 용기내부의 온도는 환경공간(R9.3, R9.4)은 22 °C, 나머지는 25 °C로 상승하였다. 제 II단계(17.2-18.23 hr)는 R5를 통하여 NaOH 에어로졸이 수증기와 혼합되어 주입되는 과정이다. 제 III단계(18.23-22.92 hr)는 모든 주입이 중단되고 이미 주입된 에어로졸이 자연 감소하는 과정이다. 제 IV단계(22.92-23.08 hr)에는 R5를 통하여 수증기와 에어로졸 혼합물이 재차 주입되었으며, 제 V단계(23.08-25.26 hr)의 처음 10분간은 모든 주입이 중단되었고 이후 R3을 통하여 다시 수증기가 보충 주입되었다. 제 VI단계(25.26-30 hr)에는 수증기 주입이 R3에서 R5로 전환되어 계속 유지되었다. 실험의 전 과정을 통하여 R3, R4.2, R9.4에서 일부 기체의 누출이 지속적으로 발생한 것으로 추정하였다.

cell	Experimental Phases					
	I	II	III	IV-V	VI	
R5		■		■		■
R3	■				■	
R4.2						■
R9.4						■
time (hr)		17.2 18.23		22.92 23.08	25.26	

■ steam injection ■ aerosol injection
 ■ air extraction ■ air leakage

Fig. 5 VANAM M3 experimental phases

VANAM M3 실험의 시간에 따른 에어로졸 농도변화를 계산하기 위해서는 격실간의 기체 유동, 온도 및 압력변화, 기체와 벽간의 열전달, 수증기의 벽면 응축 등 열수력 계산을 동시에 실시하여야 한다. CONTAIN 코드 계산에 필요한 입력자료인 실험용기 규격, 구조재료의 물성치, 격실간 유통로의 크기, 수증기 주입률 및 물성치, 공기 및 기체의 배출률과 누출률 등에 관한 자료는 ISP-37⁽¹⁰⁾에 제공된 자료를 사용하였다. NaOH 에어로졸 주입률과 물성치는 Table 1에 주어진 바와 같다.

Table 1. Aerosol injection rates and properties

Parameters	1st injection (Phase II)	2nd injection (Phase IV)
Duration of injection (hr)	17.2 - 18.23	22.92 - 23.08
Total injected mass (kg)	2.21	0.719
Injection rate (kg/s)	1.28×10^{-3}	1.25×10^{-3}
Initial size distribution based on particle diameter (d)	$m(d) \propto \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\ln^2(d/d_m)}{\ln^2 \sigma_g}\right)$	
Mass median diameter (d_m)	0.2 μm	
Geometric standard deviation (σ_g)	1.9	
NaOH density (kg/m^3)	2130	
Molecular weight (kg/mol)	0.04	
van't Hoff factor (f)	2.0	

V. 계산결과 및 분석

CONTAIN 2.0 코드에 사용된 에어로졸 거동 계산 모델의 정확성을 평가하기 위하여 VANAM M3 실험에 대해서 CONTAIN 2.0 코드를 사용하여 열수력 계산과 에어로졸 거동 계산을 동시에 수행하였다. 기존의 방법인 고정구간분할법(FSM)과 개선된 방법인 변동구간분할법(MSM) 모두를 사용하였으며 각각의 계산결과를 실험자료와 비교하였다. 에어로졸 농도 실험자료는 실험용기의 R9.1, R3, R9.3 부위에서만 제공되었기 때문에 이들 단위방의 계산결과를 비교하였다.

Fig. 6은 실험용기의 압력변화를 계산한 결과이다. 코드 계산결과는 제 III단계와 V, VI 단계에서 실험자료보다 0.1-0.4 bar 정도 높은 값을 보이고 있다. Fig. 7은 R9.1, R9.3, R3 부위의 온도변화를 계산한 결과이다. R9.1과 R9.3의 온도는 제 IV단계까지는 비교적 실험자료에 근접한 결과를 보이고 있으나 그 이후는 실험자료보다 약 10-15% 정도 높은 값을 보이고 있다. R3의 온도는 제 I단계와 IV단계를 제외한 전 시간대에 걸쳐 실험자료보다 최대 20% 정도 높은 값을 예측하였다. 온도와 압력은 변동구간분할법을 사용한 경우와 고정구간분할법을 사용한 경우에 계산결과가 거의 일치하였다.

Fig. 8은 R9.1, R9.3, R3 부위에서 수증기 포화비 변화를 계산한 결과이다. 포화비 계산결과에 있어서도 모델간에 거의 차이가 없었다. 포화비는 정확한 실험자료가 제공되지 않아서

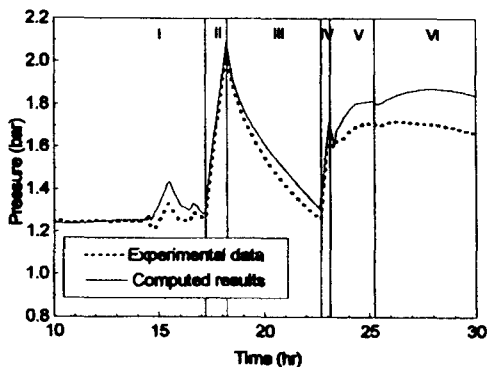


Fig. 6 Calculated containment pressure

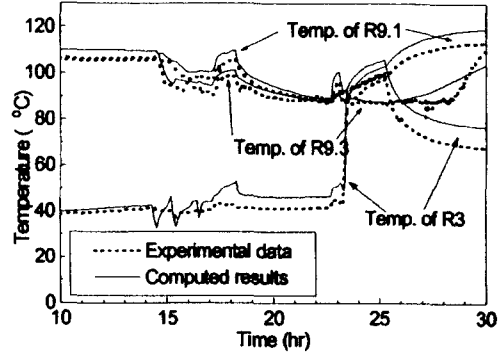


Fig. 7 Calculated temperatures in R9.1, R9.3, R3

계산결과와 정확도는 평가할 수 없으나 수증기 응축률에 직접적인 영향을 미치는 열수력 계산 결과로서 에어로졸 자연 감소가 일어나는 III단계와 V, VI단계에서의 변화가 주목된다. III단계 동안은 R9.1, R9.3, R3 모두 포화비가 1.0(상대습도 100%)보다 작은 값을 보이고 있으나 V단계 중반 이후와 VI단계에서 R9.1과 R3에서는 수증기가 거의 포화상태임을 알 수 있다. 그러나 R9.3의 포화비는 에어로졸 주입이 일어난 이후 전시간에 걸쳐서 1보다 낮은 값을 보여주고 있다.

Fig. 9는 R9.1 부위의 에어로졸 농도변화를 계산한 결과이다. 실험자료에 의하면 III단계 초기에 R9.1에서 에어로졸 농도는 급속히 감소하고 있다. (II 단계끝의 실험값은 측정 오류로 확인 되었음.) 이것은 수증기 응축에 의한 빠른 입자성장으로 중력침전이 가속화되었기 때문이

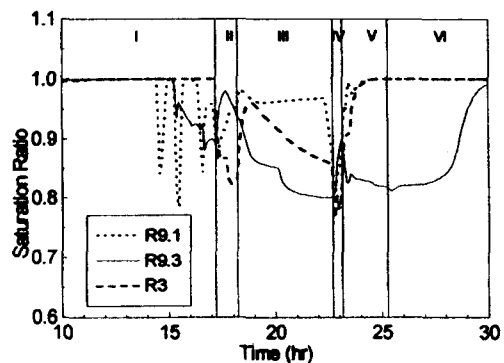


Fig. 8 Calculated steam saturation ratios

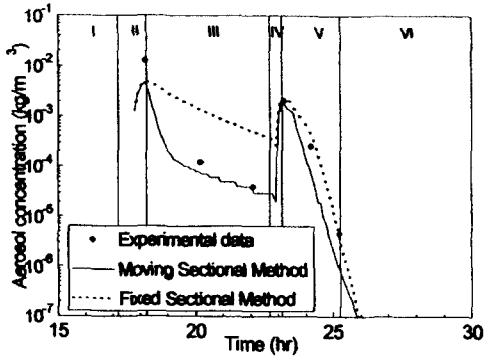


Fig. 9 Calculated NaOH aerosol concentration in R9.1

다. 이 시간대에서 수증기 포화비의 계산치는 1보다 작으며 불포화 상태이지만 변동구분법 모델은 NaOH 에어로졸의 빠른 감소를 정확하게 예측하였다. 그러나 고정구분법 모델은 II 단계 초반의 빠른 감소를 제대로 계산하지 못하여 실험자료보다 매우 높은 값을 예측하고 있음을 볼 수 있다. III단계에서 고정구분법법의 계산결과에 나타난 완만한 감소는 수증기 응축이 없는 상태에서 건조한 에어로졸이 지수함수적으로 감소하는 양상과 일치한다. V단계와 VI단계에서 급속한 에어로졸 감소가 일어난 것은 수증기 포화상태에서 빠른 에어로졸 성장이 발생하였기 때문이다. 이 시간대의 에어로졸 농도 계산결과는 MSM과 FSM 모두 실험 데이터와 거의 일치하고 있다. 이 시간대에서 R9.1의 수증기 포화비 계산결과(Fig. 8)는 거의 1.0으로서 포화상태이다. 따라서 수증기가 포화조건에서는 FSM을 사용하여도 계산의 정확성이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 R9.3 부위의 에어로졸 농도를 계산한 결과이다. 에어로졸 농도 측정치는 R9.1에 비하여 상당히 느리게 감소하고 있는데 이것은 R9.3 부위의 상대습도가 낮아서 수증기 응축이 적게 발생하였기 때문이다. 이 경우에 있어서도 MSM은 실험데이터에 비교적 근접한 계산결과를 보이는 반면 FSM은 상당히 높은 값을 예측하고 있다. 상대습도 계산결과는 III단계와 V, VI단계 모두 1보다 매우 작은 값으로서 낮은 포화도를 나타낸다. 그럼에도 불구하고

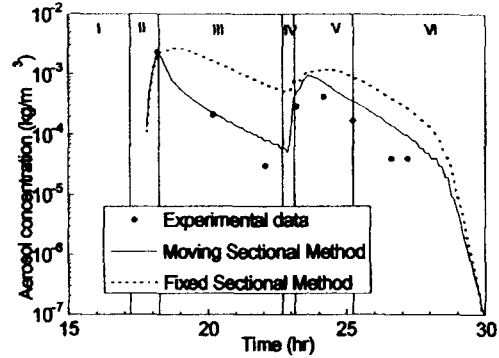


Fig. 10 Calculated NaOH aerosol concentration in R9.3

MSM은 III단계 초기에 보이는 약간 빠른 에어로졸 감소를 계산하고 있다. 그러나 FSM은 이러한 경향을 전혀 예측하지 못하여 실제보다 훨씬 높은 에어로졸 농도를 계산하였다. V단계와 VI단계에서도 FSM은 III단계와 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 11은 실험용기의 중심부위인 R3의 에어로졸 농도를 계산한 결과이다. 실험에서 측정된 이 부위의 에어로졸 농도는 III단계와 V, VI단계 모두 빠르게 감소하고 있다. 즉 상대습도가 높아서 수증기 응축에 의한 증력침전이 많이 발생하였음을 의미한다. MSM은 III단계 초기의 가파른 감소는 정확하게 계산하였으나 이후 실험치보다 매우 느린 감소를 예측하였다. III단계에서 수증기 포화도 계산치는 거의 0.98

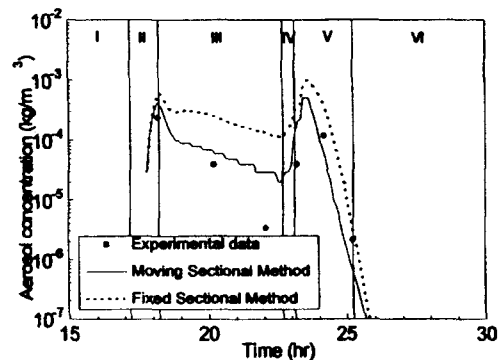


Fig. 11 Calculated NaOH aerosol concentration in R3

에서 시작하여 점점 감소하고 있다. 즉 초기에는 수증기 응축의 영향이 커서 에어로졸 농도의 빠른 감소를 계산하였으나 이후 포화비가 감소함에 따라 완만하게 감소하는 것으로 계산하였다고 볼 수 있다. 따라서 MSM의 계산 결과는 수증기 포화비에 의거하면 잘못되지 않았다. 그럼에도 불구하고 III단계 후반부에서 실험치보다 높게 계산된 것은 기체의 유동 계산에서 R3로 유입되는 에어로졸량이 실제보다 많게 계산된 결과로 풀이된다. III단계에서 FSM은 앞서 본 바와 같이 수증기 응축의 영향을 정확하게 계산하지 못하여 높은 에어로졸 농도를 예측하였음을 알 수 있다. V, VI단계에서는 수증기 포화비가 거의 1.0으로서 R9.1에서와 같이 MSM과 FSM 모두 급속한 에어로졸 감소를 예측하였다. 다만 III단계에서 발생한 기체 유동계산의 오차로 인하여 처음부터 높은 에어로졸 농도에서 감소하기 때문에 실험데이터보다 높은 값을 보이고 있다.

CONTAIN 2.0코드의 MSM과 FSM을 사용하여 VANAM M3 실험을 모의하는 과정에서 MSM은 FSM에 비하여 계산시간이 약 4배정도 더 많이 소요되었다. 또한 MSM을 사용할 경우 계산이 중단되는 문제가 빈번히 발생하였다. 그 원인은 식 (5)에 의거하여 이동하는 구간의 경계를 계산하는 과정에서 발생하였다. 즉 각 구간에 대하여 수렴조건을 만족하는 경계입자크기를 찾기 위해서 식 (5)의 우변을 반복적으로 수치적분하여야 하는데 이 과정에서 많은 계산시간이 소요되었고, 주어진 반복회수 이내에서 경계입자크기를 찾지 못하면 계산이 중단되었다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 임시 방편으로 프로그램 내부의 반복회수를 늘리거나 수렴한계를 증가시키는 방법을 사용하였으나 궁극적인 해결책은 되지 못하였다. 따라서 현재 사용된 알고리즘을 보다 효율적으로 개선하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

VI. 결론

변동구간분할법은 수증기 응축에 의한 입자 성장이 동반되는 에어로졸의 거동을 계산하기

위하여 제안된 모델이다. 이 모델을 최초로 도입한 CONTAIN 2.0 코드를 사용하여 흡습성 에어로졸 실험인 VANAM M3 실험을 모의하였다. 동시에 기존의 고정구간분할법을 사용한 계산도 수행하였다. 본 연구결과에 의하면 변동구간분할법은 불포화 상태의 수증기 조건에서도 에어로졸이 성장하여 급속히 침전되는 현상을 정확하게 계산할 수 있었다. 반면 기존의 고정구간분할법은 수증기가 포화상태에서는 변동구간분할법에 버금가는 정확한 계산을 수행하였으나 포화도가 감소함에 따라 수증기 응축에 의한 흡습성 에어로졸의 성장을 정확하게 계산하지 못하였다. 이에 따라 실제보다 높은 에어로졸 농도를 예측하였다.

현재 CONTAIN 2.0 코드에 사용된 변동구간분할법은 VANAM M3 실험을 모의하는 데 기존의 고정구간분할법에 비하여 계산시간이 약 4배정도 더 소요되었다. 아울러 변동구간분할법을 사용한 경우 계산이 중단되는 문제가 빈번히 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 현재 사용된 알고리즘을 보다 강인하고 효율적으로 개선하여야 할 것으로 여겨진다.

감사의 글

이 연구는 한국전력공사가 지원한 차세대원자로기술개발 과제 of 일부로 수행되었음.

참고문헌

1. F. Gelbard, "Aerosol growth in a nuclear reactor containment environment", SAND-87-09430 1987.
2. S. L. Thompson, MELCOR 1.8.3: Reference Manual and Programmer's Guide, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 1992.
3. F. Gelbard, MAEROS User's Manual, SAND80-0822, NUREG/CR-1391, 1982.
4. K.K. Muratta, et al., User's Guide for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis,

- NUREG/CR-6533, 1997.
5. F. Gelbard, "Modeling Multicomponent Aerosol Particle Growth by Vapor Condensation", *Aerosol Sci. and Tech.* 12, pp.399-412, 1990.
 6. F. Gelbard and J.H. Seinfeld, "Simulation of Multi-component Aerosol Dynamics", *J. Colloid and Inter. Sci.* 78, pp. 485-501 1980.
 7. T. Kanzleiter, VANAM M3 Aerosol Experiment, Technical Report BleV-R67.098-304, Battelle, Frankfurt, 1993.
 8. S. Simons, "The Condensation, coagulation and deposition of a multi-component radioactive aerosol", *Annual Nuclear Energy*, 9, pp. 473-479, 1982.
 9. R. J. Mason, *Clouds, Rain and Rainmaking*. Cambridge University Press, Cambridge, 1962.
 10. S. Firnhaber, et. al., Specification of the International Standard Problem ISP 37, GRS, Colon 1995.