'2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열영동 현상에 의한 증기발생기 세관벽의 FP 부착양에 대해 기존 Lumped 모델과 온도및 속도 구배를 고려한 1-D 모델간 비교

The comparison of the amount of FP deposition on the SG U-tube between the lumped model and 1-D model with consideration of temperature and velocity gradient by the thermophoresis phenomena.

박종화, 김동하
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 305-303

요 약

중대사고시 노심에서 방출된 핵분열생성물 가스나 에어로졸의 일차계통내 부착은 선원항 평가와 관련한 중요한 연구 분야이다. 그러나 ISP-46 문제 해석 결과에 의하면, Lumped 모델에 기초한 기존 중대사고 해석 코드는 증기발생기 세관에서 방출된 핵분열생성물의 열영동 (Thermo-phoresis) 현상에 의한 부착 비율을 측정치(17%)에 비해 과대 평가(약 40%)하고 있다. 따라서 이 논문에서는 기존 모의방식을 개선하여, 관벽 가까이 경계층내 속도 및 온도 구배를 고려한 1-D 모델을 개발하였고, 이를 이용하여, 부착양을 예측하였다.

그결과 1-D 모델은 열영동 현상에 의한 관내 핵분열생성물 부착양(19%)은 Lumped 모델보다 측정치와 유사하게 예측하였다. 이렇게 유도된 1-D 모델은 MELCOR 코드를 비롯한 lumped 모의 방식의 중대사고 해석 코드 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

During the severe accident, the deposition of the aerosol and gas from the released fission product on the inside of RCS is an important research field in terms of the evaluation of source terms. But the ISP-46 results showed that the current severe accident codes based on the lumped model over-predicted (~40%) the amount of fission product deposited on the steam generator U-tube by the thermo-phoresis phenomena compared with that (17%) of measured. In order to improve the current model deficiency, 1-D model has been developed considering the distribution of temperature and velocity within the boundary layer near the wall surface. The amount of deposit mass was predicted with this 1-D model.

From the calculation results, the 1-D model predicts the amount of FP deposition by the thermo-phoresis

phenomena closer than the lumped model does. Also this model can contribute to improve the MELCOR code using the lumped type thermophoresis model.

I. 서 론

중대사고시 노심에서 방출된 핵분열생성물 가스나 에어로졸이 일차 계통 내에서 대량으로 포획될 경우, 격납건물로의 방출양이 감소되어, 궁극적으로 격납건물 손상시 환경으로 방출될 수 있는 핵분열생성물 양이 감소된다. 따라서 이에 관한 현상의 이해와 정확한 예측 모델 개발은 신뢰성 있는 선원항 예측 및 감소와 관련한 중요한 연구 분야이다.

PHEBUS FPT-1 실험을 대상으로한 ISP-46 문제의 단계 I~III 까지의 해석 결과에 의하면 일차계통을 모의한 배관과 연결된 증기발생기 세관 전단부에서의 핵분열생성물 에어로졸 및 가스의 부착 비율은 초기 노심으로 부터의 방출 질량을 기본으로 Cs 핵종 경우, 측정치는 11%, 예측치는 45% 이었고, Iodine 경우는 측정치는 18%, 예측치는 41%로, 대부분의 핵종의 방출양이 코드 평가시 크게 과대 평가 되었다. 이 같은 핵분열생성물 가스나 에어로졸의 주부착 기구는 열영동 (Thermo-phoresis) 현상에 의해 진행되었다[1].

열영동 현상이란 온도 구배가 존재하는 매체내 입자가 존재할 때, 매체 구성 분자들의 온도 구배에 의한 운동 에너지 차이로 부유된 입자에 가해지는 힘이 달라져, 온도가 높은 영역에서 낮은 영역으로 이동되는 현상이다. 이 같은 열영동 현상은 유리병내에서 연소된 촛불의 그을름이 상대적으로 저온인 유리 내벽에 맺히거나, 열교환기 저온부에 끼는 끄을름에서 볼 수 있다. 이 같은 열영동 현상은 반도체 기판에 가스내 분진의 부착을 방지하기 위해 기판 표면 온도를 가열 시켜거나, 반대로 기판을 저온으로 유지시켜 가스내 특정 성분을 균일하게 부착시키는데 적용되고 있다. 또한 매연이 많이 발생되는 산업체에서 굴뚝을 저온으로 유지시켜 배출 분진을 포획, 제거하는데도 적용하고 있으며, 핵분열생성물 가스나 에어로졸을 저온관으로 통과시켜 열영동현상과 확산영동(diffusio-phoresis) 현상을 동시에 이용, 제거하기 위한 연구도 진행중이다 [2].

열영동 현상은 Maxwell 에 의해 처음 발견된 후, Epstein 에 의해 Knudsen 수가 1 보다 큰 경우, 즉 작은 입자들에 대한 열영동 속도 및 힘에 관한 식이 처음 유도되었다. 이후 이 식을 기본으로 Knudsen 수가 작은 경우를 비롯 다양한 조건의 입자를 모의할 수 있도록 입자와 가스의 열전도도 값의 비, 열조화 계수, Cunningham 미끄럼 인자등의 사용자 지정 인자들을 포함시켜, Brock, Derjaguin 과 Yalamov 그리고 최근에 Talbot 등에 의해서 개선되었다 [3].

이 같은 열영동 현상에 의한 핵분열생성물 입자의 관내 부착현상은 MELCOR 를 비롯한 VICTORIA[4], SOPHAEROS[5], MAAP 등 모든 중대사고 해석용 코드들에서 Lumped 방식을

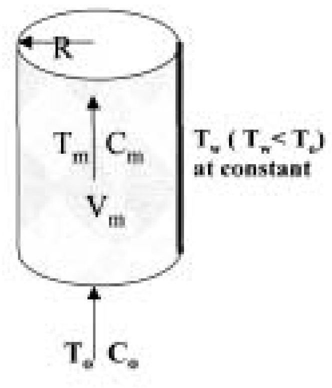
체택 모의하고 있다. 즉 해당 제어체적(control volume)내 평균 속도, 평균 가스온도 그리고 온도 차이 (평균가스온도 –구조물 표면온도) 값을 사용, 평균 열영동 속도를 계산하여, 구조물 표면에 부유된 입자의 부착양을 예측한다. 그러나 실제 경우는 제어 체적내 구조물 표면과 유체간 저항으로 표면 가까이 경계층이 형성되며, 경계층내에 온도 구배와 속도 구배가 존재하기 때문에 이들이 열영동 현상에 미치는 효과를 고려하여 관내 부착양을 예측해야 할 필요성이 있다 [6,7].

이논문 에서는 기존 Lumped 모델과 경계층내 속도 및 온도 구배를 고려한 1-D 모델을 각각 구성하여, 두 모델로부터 관내 유입된 에어로졸 입자의 관벽에 부착되는 예측양들을 각각 비교, 평가하였다.

II. 본 론

II.1 Lumped 모델

그림 1 과 같은 제어 체적내 초기 온도 T_o , 입자 농도 C_o 의 에어로졸이 유입되는 것을 가정한다. 이 에어로졸은 제어 체적에 유입된 후 온도 T_m, 열영동력에 의해 저온 내벽으로 부착되어 손실된 것을 고려하여 농도가 C_m 이 되었다고 가정하여, 에너지와 질량에 대한 보존 방정식을 아래와 같이 각각 구성한다. 단 제어 체적내 유체의 평균 속도는 V_m 이며, 제어 체적내 벽면 온도 T_w가 대기 온도 T_m 보다 낮은 경우이다.



$$\frac{dC_m}{dz} = -\frac{2C_m}{V_m R} V_{th} \quad ---(1)$$

$$\frac{dT_m}{dz} = -\frac{2h}{\rho V_m C_p R}\left(T_m - T_w\right) ---(2)$$

$$V_{th} = K \frac{\nu}{T_m} \frac{\left(T_m - T_w\right)}{\left(2R / Nu\right)} ---(3)$$

그림 1. lumped 모델용 제어체적

식 (2)를 온도는 T_o 부터 T_m, 높이는 0 부터 해당관 길이 Z 까지 적분하여, Tm 에 대한 해를 구한후, 이를 열영동 속도 V_{th} 에 관한 식 (3)을 적용하여, 식(1)에 대입 후, 농도는 C_o 부터 C_m, 높이는 0 부터 Z 까지 적분하면, 최종적으로 아래와 같이 lumped 방식에 의한 관내 부유 입자 농도를 나타내는 상관식을 구할 수 있다. 단 R 은 관의 반경, h 는 관벽에서의 대류 열전달 계수, T_w 는 저온의 관벽온도, $C_{p,g}$ 는 유체 비열, ν 는 유체의 동점성계수 그리고 K 는 열영동 모델 종류에 따라 다르게 정의되는 계수값이다. 이 논문에서는 Talbot 모델을 적용하였다.

$$C_m = C_o\left[e^{\left[-\frac{K\nu Nu}{V_m R^2} Z + \frac{K\nu Nu}{V_m R^2}\left(\frac{T_w}{T_w+T_o}Z + \frac{T_w}{(T_w+T_o)\frac{2Nu}{RTePr}} \ln\left\{ 1+\frac{T_w}{T_o} - \frac{T_w}{T_o} e^{-\frac{2Nu}{R\,Re\,Pr}Z} \right\} \right) \right]} \right] ---(4)$$

최종적인 제어 체적(관)내 에어로졸 부착양은 초기 유입 부유 입자 농도 C_o 로부터 현재 제어체적내 부유 입자 농도 C_m 을 빼서 구한다. 식(4)에 의하면, 세관에 유입된 에어로졸중 약 71%가 부착, 제거되는 것으로 예측되었다.

II.2 1-D 모델

Lumped 모델 경우 관내벽에 부유 FP 입자의 부착에 대한 경계층 효과가 무시되지만, 1-D 모델 에서는 경계층 효과를 고려하여, 관내 FP 부착양을 모의한다. 관내에서 벽쪽으로의 입자 운동 방정식, 관내 반경방향으로의 유체 속도 V_r 및 온도 분포 방정식들을 적용, 각 입자들의 관내 궤적을 구하여, 부착양을 예측한다. 단 한번 관벽과 충돌한 입자는 즉시 관벽에 부착되고, 이후 재이탈(resuspension) 되지않고, 부착된 상태를 유지하는 것으로 가정하였다.

관내 반경방향, 즉 벽쪽으로 입자운동은 아래와 같이 Stokes 반발력에 관계된다고 가정한다.

$$m_p \frac{dV_r}{dt} = F_r \quad ---(5)$$

$$\frac{4}{3}\pi r_p^3 \frac{dV_r}{dt} = \frac{3\pi\mu_g D_p (V_r - V_{th})}{C_n} \quad ---(6)$$

최종적으로 위식 (6)을 정리하면, 관내 반경 방향으로의 입자 운동은 아래와 같은 (7)식으로 표현된다. 단 ρ_g, ρ_p 는 각각 유체와 입자 밀도, r_p 는 입자의 반경을 나타내며, τ 는 입자와 매질 특성을 포함한 완화 시간(relaxation time)을 나타낸다.

$$\tau C_n \frac{dV_r}{dt} = -V_r + V_{th} \quad ---(7) \qquad \text{단} \quad \tau = \frac{2\rho_p r_p^2}{9\rho_g \nu}$$

난류 조건에서 관내 반경 방향에 따른 유체 속도 분포는 관벽으로 부터의 거리를 나타내는 무차원수 Y^+ 를 이용, 대해 아래와 같이 표현될 수 있다[5]. 단, 관의 반경 방향으로의 속도 분포 모양은 일정하며 유체의 진행 방향과 같다. τ_o 는 관벽에서의 전단응력, f 는 관벽에서

의 마찰계수, 그리고 V_z 는 유체의 진행방향, 즉 축방향 유체 속도이다.

$$U^+ = 2.5\ln(1+0.4y^+) + 7.8(1 - e^{-y^+/11} - \frac{y^+}{11}e^{-0.33y^+}) --- (8)$$

$$\text{단} \quad y^+ = yV^*\rho_g/\mu, \quad V^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_g}}$$

$$U^+ = V_z/V^* = \frac{V_z}{V_m}\sqrt{\frac{2}{f}} \quad --- (9)$$

$$\text{단} \quad \tau_o = f\frac{1}{2}\rho_g V_m^2$$

$$V_z = \left[V_m\sqrt{\frac{f}{2}}\right]U^+ \quad --- (10)$$

또한 난류 조건에서 관내 반경 방향에 따른 유체 온도 분포는 속도 분포와 같다는 가정하에 아래와 같이 관내 반경 위치에 따른 가스온도 분포에 관한 (14)식이 유도된다. 단 q_w 는 관벽에서의 열속, α 는 관벽물질의 열확산계수 그리고 이 k_g 는 관내 유체의 열전도도 이다.

$$U^+ \equiv T^+ = 2.5\ln(1+0.4y^+) + 7.8(1 - e^{-y^+/11} - \frac{y^+}{11}e^{-0.33y^+}) --- (11)$$

$$T^+ = \frac{\rho_g C_{p,g} V^*(T_g - T_w)}{q_w} \longrightarrow T^+ = \frac{(T_g - T_w)}{(T_m - T_w)} * \frac{2RV_m\sqrt{f/2}}{\alpha Nu} --- (13)$$

$$q_w = \frac{Nu\,\kappa_g}{2R}(T_m - T_w) --- (12)$$

$$\therefore \quad T_g = T_w + \frac{(T_m - T_w)\alpha Nu}{2RV_m\sqrt{f/2}}T^+ --- (14)$$

그림 2 와 3 은 Lumped 모델과 1-D 모델 경우의 관내 반경 거리에 따른 유체속도 및 온도 분포 예를 보여준다. 표 1 은 이 논문에서 모델한 1-D 모델을 프로그램한 Track-1D 에서 부유입자의 반경 방향으로의 속도및 축 방향으로의 속도를 계산하는데 사용한 입력 값들이다.

Track-1D 프로그램은 입자 괘적을 다음과 같이 총 7 단계별로 반복과정을 포함 계산하며, 그림 4 는 유입된 입자들이 관내에서 경계층내 온도 및 속도 구배를 고려한 열영동력에 의해 시간에 따라 관벽에 부착되는 과정을 보여준다. 반경 R=0.01m 의 관에서 관벽에서 약 0.1cm (=Y/R ≈ 0.1) 보다 멀리 떨어진 위치에서 입사한 입자들은 관벽에 부착되지 않고 관을 통과하는 것으로 예측된다. 이 같은 예측 결과에 의하면 유입된 입자의 약 19% 가 관벽에 열영동 현상에 의해 부착되는 것으로 예측되어, 측정치가 17 % 인점을 고려할 때, lumped

모델에 의해 과대평가된 예측결과 (71%)를 크게 개선할 수 있음을 보여준다.

① Re, Nu, 마찰 계수등 입력 자료를 정의하고 계산한다.
② 반경위치 Y 및 축방향 속도 V_z를 계산한다.
③ 반경위치 Y 에서 가스온도 T_g 및 dT/dY 를 계산한다.
④ Knudsen 수, Cunningham slip 인자등 열영동 계수 관련 변수값을 계산하여 반경 위치 Y 에서의 열영동 속도를 계산한다.
⑤ 반경 위치 Y 에서 반경 방향으로의 입자 속도 Vr 를 계산한다.
⑥ 시간 간격별로 입자의 위치를 개선하고 저장한다.
⑦ 관입구의 모든 Y 위치에 일정 간격으로 배열된 입자들이 관 유입후, 모두 벽에 충돌하거나 관을 모의한 제어체적 출구에 도달할 때 까지 단계 2 에서 6 을 반복한다.

III. 결 론

관내 온도 및 속도 구배를 고려한 1-D 모델은 열영동 현상에 의한 관 내벽에 유입된 핵분열생성물 가스와 에어로졸의 부착양을 Lumped 모델 보다 좀더 측정치와 유사하게 예측하였다. 또한 유도된 열영동 현상에 의한 에어로졸이나 가스의 부착 모의시 온도나 속도 구배를 고려하는 방법은 lumped 모의 방식을 적용하고 있는 MELCOR 코드를 비롯한 기존 중대사고 해석 코드의 개선방안으로 활용될 수 있다. 기타 에어로졸이나 가스의 부착과 관련하여 열영동 현상을 제외한 다른 현상들에 대하여, 온도와 속도 구배가 미치는 영향 평가의 필요성이 도출되었다.

IV. 감사의 글

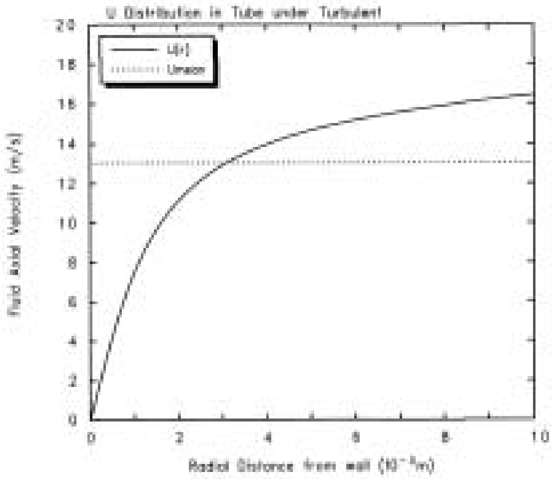
본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Didier Jacquemain, Serge Bourdon et. al, “FPT-1 Final Report, “ vol-3, IRSN, 2000.
2. S. Aoyama, K. yoshida and I. Kataoka ,“ Study on The Removal of Aerosol Particles Using thermophoresis and Diffusiophoresis,” NTHAS3 Korea, Oct 13-16,2002.
3. 김신도역 ,“ Aerosol Science and Technology: Parker C. Reist ,“ 동화기술 출판, 1992.
4. MELCOR Computer Code Manuals: Reference ,NUREG/CR-6119, Vol.1 & 2, July 1997.
5. SOPHAEROS Computer Code Manuals: General Representation of Fission Product, IRSN.
6. C. Housiadas, Y. Drossinos ,“ Developments on Thermophoretic Deposition in the Steam Generator, “ Phebus FP meeting, 8th CACIC, Aix-en-provence, 4 Oct 2000.
7. C. Housiadas, K. Mueller, “ Two-Dimensional Effects in Theermophoretic Particle Deposition: The Phebus-FP Steam Generator ,“ European Aerosol Conference 2001.
8. R. Byron Bird ,“ Transport Phenomena ,“ Wiley Int. Edition, PP-204,1960.

표 1 Track-1d 입력값 목록

변수	값	변수	값
T_w (벽면온도)	423.15 K	λ(유체분자 자유행로)	0.067 μm
d_w (관직경)	0.02 m	C_s (열미끄럼 계수)	2.34 (Talbot)
D_p (입자직경)	0.6 μm	C_t(열조화계수)	2.18 (Talbot)
K_g (유체 열전도도)	0.0637 W/m-k	C_m(운동량 조화계수)	3.42 (Talbot)
K_p (입자 열전도도)	1.274 W/m-k	C_o(유입입자 평균밀도)	1 (Normalize 가정)
ρ_g (유체 밀도)	0.2579 kg/m^3	T_o(유입가스 평균온도)	1300K (MELCOR 예측)
ρ_p (입자 밀도)	10000 kg/m^3	T_m(관내유체 평균온도)	1200K (MELCOR 예측)
$C_{p,g}$ (유체 비열)	2186 J/kg-k	V_m(관내유체 평균속도)	13 m/s (MELCOR 예측)
μ (유체 점성도)	29.69*10 $^{-6}$ N.s/m^2	$Re=(2R)*Vm*\rho_g/\mu$, $Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.3333}$ $1/\sqrt{f} = 4\log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0.4$ ($2100 < Re < 5*10^6$) [8]	



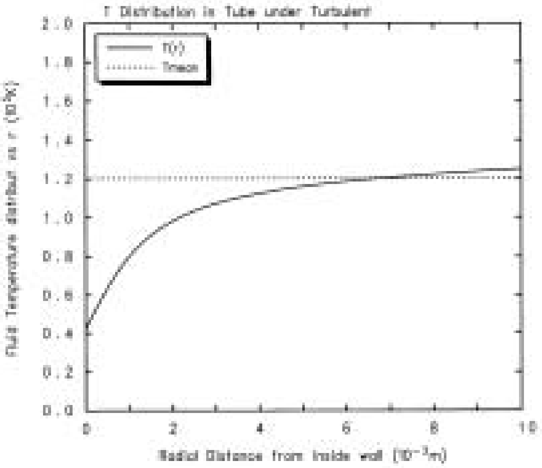


그림 2. Lumped 모델과 1-D 모델 경우 관내 반경 방향에 따른 유체 속도 분포

그림 3. Lumped 모델과 1-D 모델 경우 관내 반경 방향에 따른 유체 온도 분포

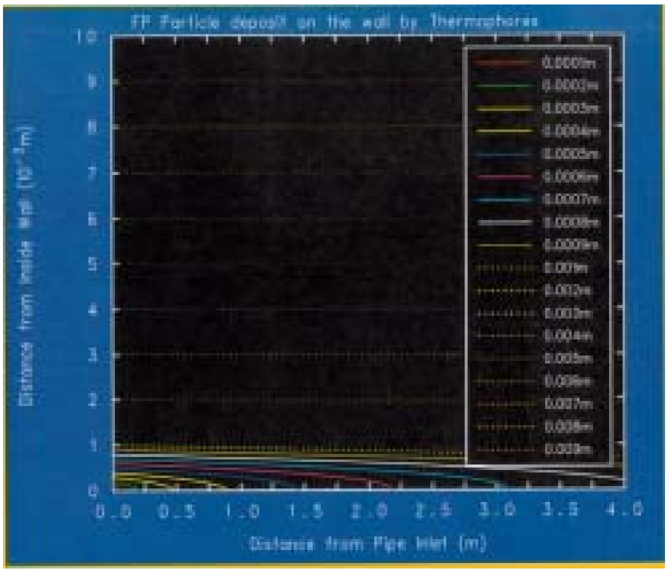


그림 4. 관내벽에 유입된 입자들의 영영동 현상에 의한 괘적