

고화된 용융물 피막과 압력용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각현상 모델링

Modeling of Cooling in a Gap between Melt Crust and Vessel Wall

김종태, 강경호, 박래준, 김상백

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

간극 입구에서의 CCFL 현상에 기초한 간극 냉각 모델을 개발하고 다차원 열수력 코드에 도입함으로써 중대사고시 노심 용융물의 냉각을 모의하는 LAVA(Lower Plenum Arrested Vessel Attack) 실험을 해석하였다. LAVA 용기와 용융물은 축대칭 2차원으로 가정하였으며 외벽으로 전달되는 열속을 모델링하기 위하여 용융 풀 내에서의 자연대류 및 고화현상을 고려하였다. 간극 내에서의 비등에 의한 냉각은 간극 입구에서 냉각수와 증기의 상호작용에 의한 대향류 유동 제한 현상(CCFL)을 이용하여 모델링하였다. 용융물 주변의 고화, 반구형 용기의 열 팽창 등에 의한 간극 형성은 현재 고려하지 않고 단지 어느 입력 시각에 순간적으로 간격이 생성되었다고 가정하였다. 계산 결과 간극 내 냉각수 침투 깊이는 시간에 따라 매우 비선형적으로 증가하였으며 시간에 따른 외벽의 온도 변화는 실험 결과와 정량적으로 매우 비슷함을 알 수 있었다.

Abstract

LAVA(Lower Plenum Arrested Vessel Attack) experiment which simulates coolability of molten core in severe accident of nuclear reactor is analysed using multi-dimensional thermal hydrodynamic code. The pressure vessel and core melt simulant of the LAVA experiment are modeled in computer code as axi-symmetric, and natural convection and solidification of melt are simulated to calculate thermal loads on the vessel accurately. Gap-cooling phenomenon is modeled with counter-current flow limited boiling in a hemispherical gap. Gap formation by crust development at the edge of melt and thermal expansion of the vessel is not modeled currently but it is triggered at a time by input parameter of the computer code. Numerical results show that penetration depth of coolant increases with time but is not linear to time elapsed. Temperature variations with time are compared at each location with experimental results of LAVA to validate the computer code. The numerical results agree well with LAVA-4 experiment quantitatively.

1. 서 론

원자로 노심 용융사고로 대표되는 TMI-2 사고의 해석결과 노심 용융물과 하부 반구 사이에 생성된 간극을 통한 냉각이 용융물의 중요한 냉각기구로 인식되었다. 고온의 용융물이 냉각수가 존재하는 용기 내부로 주입될 때 간극이 형성되는 것은 FAI[1], FARO[2], ALPHA[3], LAVA[4]

등의 실험에서 확인되었다. 간극의 형성 메커니즘은 고온 용융물의 고화와 수축, 하반구의 열적 기계적 부하에 의한 팽창, 그리고 냉각수의 존재 등 복합적인 인자에 의해 발생하는 것으로 판단되어진다.

Suh등[5]은 원자로 사고 해석 코드인 MAAP4에 간극 냉각 모델을 도입하였다. 비등 열속은 Monde등[6]의 임계 열속을 사용하였으며, 용융물 고화층에서의 온도분포를 포물형으로 가정하고 비등 열속을 제외한 나머지 열속은 간극 내 증기층에 의해 반구로 진도에 의해 전달된다. Kohriyama등[7]은 MAAP4 코드를 활용하여 여러 가지 임계 열속 상관식을 비교하였다. 특히 Koizumi[8]의 CCFL 실험 결과에서 유도된 임계 열속을 사용한 것은 간극에 의한 냉각이 대향류 유동제한 현상인 CCFL에 의해 지배됨을 의미한다. 그리고 Park등[9]은 중대사고 해석 코드인 MELCOR에 간극냉각 모델을 도입하였다. 이와 같은 모델의 특징은 간극 내부에 냉각수가 충분히 존재한다고 가정하고 임계 열속점에서 비등 열전달이 이루어진다는 것이다. Maruyama등[10]은 다차원 열수력 해석 코드인 CAMP에 간극냉각 모델을 도입하여 ALPHA 실험을 해석하고 실험 결과와 비교하였다. 이 모델은 간극 내 냉각수 침투 깊이를 예측하기 위하여 수직 환상관에서 실험한 CCFL 상관식과 상향 평판에 대한 수조비등 곡선을 사용하였다. 한국원자력연구소 중대사고 실험실에서는 노심용융물 냉각기구를 규명하기 위한 LAVA실험[11]을 수행하였다. 이 실험을 통해 간극의 형성을 확인하고 간극 내 냉각수의 비등으로 인한 냉각효과를 파악하였다. K형 열전대를 사용하여 반구 외벽의 온도를 시간에 따라 측정하였으며, 반구의 변형은 선형 변위 측정기로 실시간으로 측정하였다. 간극의 크기는 반구가 완전히 냉각된 후 초음파계측기로 측정하였다. 이와 함께 반구형 간극 내에서 임계 열속을 측정하기 위한 CHF 실험을 수행하여 간극의 크기와 반구 내부 압력에 따른 임계 열속의 상관식을 개발하였다[12]. 본 연구에서는 CHF 실험에서 얻은 상관식을 이용하여 LAVA 실험을 모의하고 간극에 의한 냉각특성을 고찰하였다.

2. 지배방정식과 수치해법

2.1 지배방정식

질량, 운동량 그리고 에너지의 보존방정식을 적분형 일반 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho C \phi \, r d\Omega + \oint \rho C \phi \vec{V} \cdot r d\vec{A} = \oint \Gamma^{\phi} \nabla \phi \cdot r d\vec{A} + \int_{\Omega} S^{\phi} \, r d\Omega \quad (1)$$

변수 ϕ 는 $[1, u, v, T]$ 이며, C 는 변수가 온도 T 인 경우만 비열 C_p 를 나타내고 그외에는 1의 값을 갖는다.

$$S^{\phi} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + (\rho - \rho_{ref})g_x \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + (\rho - \rho_{ref})g_y \\ Q_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma^{\phi} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma^{\phi} \frac{\partial v}{\partial x}) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma^{\phi} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma^{\phi} \frac{\partial v}{\partial y}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Au \\ Av \\ \frac{\partial \rho \Delta H}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

S_{ϕ} 는 원천항을 나타내는 것으로 첫 번째 항은 압력구배와 부력 그리고 열원 등을 포함한다. 두 번째 항은 점도의 변화에 따라 발생하는 점성 플릭스로서 온도에 따른 점도변화, 난류유동의 와 점도 등에 의해 발생한다. 그리고 세 번째 항은 용융물의 고화와 같이 상이 변화할 때 발생하는 잠열과 고화된 부분에서 운동량에 대한 저항을 의미한다. 2차원 유동에서는 r 이 1이며, 축대칭 유동인 경우 r 은 그 대칭 축(x 혹은 y)을 나타내며 각각에 대한 축대칭 원천항이 발생한다. x -축에 대칭인 경우 $-2\mu v/y^2$ 값이 S_v 에 더해지며, y -축에 대칭인 경우 $-2\mu u/x^2$ 값이 S_u 에 더

해진다. 체력항의 크기를 줄이기 위해 $\rho_{ref} \mathbf{g}$ 를 압력구배에 첨가함으로써 p는 압력에 정수압을 포함한 수정압력이 된다. 비압축성 유체에서 밀도는 온도만의 함수이며 온도차가 매우 크지 않으면 Boussinesq 가정을 이용하여 부력항의 밀도를 제외한 다른 항들에서 밀도변화를 무시 할 수 있다. 그리고 부력항을 체적팽창계수(β)를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$(\rho - \rho_{ref}) \mathbf{g} = -\beta \rho_{ref} (T - T_{ref}) \mathbf{g} \quad (3)$$

2.2 수치해법

수치계산 영역은 임의의 모양의 셀로 구성되며 각각의 셀이 바로 검사체적이 되고 압력과 속도 성분을 모두 셀의 중심에 저장하는 셀중심 유한체적법을 사용하였다. 각 셀은 여러 개의 면으로 이루어져 있고 각 면의 중심에서 플럭스를 계산하여 적분한다. 대류 플럭스는 유동 방향에 따라 차분하는 2차 정확도의 상류차분법을 사용하였다. 2차 이상의 고차 해법은 상류 셀에서 해의 구배를 필요로 하며 여기에는 각 셀에서 최소자승법을 이용하여 미리 해의 구배를 구한 뒤 사용한다. 점성 플럭스는 대류 플럭스와 달리 셀의 적분면에서 해의 구배를 알아야한다. 셀 면에서 해의 구배를 얻기 위해서는 그 면을 중심으로 새로운 검사체적을 구성하는 방법과 격자점에 해를 내삽하여 국소좌표변환을 이용하는 방법이 있으나 여기서는 그 면에 이웃하는 두 셀에서의 값을 직접 차분하여 해의 구배 중에서 두 셀의 중심을 잇는 방향으로의 성분을 얻고 나머지 성분은 두 셀에서의 구배 값을 평균하여 얻는다. 이 방법은 수치적으로 안정할 뿐 아니라 일반적으로 2차 정확도를 얻을 수 있다. 시간적으로는 오일러의 후방차분을 이용하였다.

3. 간극 냉각 모델

하반구에 채배치된 용융물은 온도차이에 의한 자연대류와 고화과정을 거치면서 냉각된다. 용융물은 압력용기 내의 냉각수와 재료적 특성 등으로 인하여 탄소강으로 이루어진 반구와 완전한 용접이 이루어지지 않는 경우 용융물이 냉각 수축되면서 열팽창을 하는 하반구의 내부 표면 사이에 간극이 형성된다. 간극형성 메커니즘은 현재 해석 코드에 모델링되어 있지 않으며 단순히 입력 시각에 입력한 크기의 간극이 완성되게 되어있다. 반구 내부면과 용융물 피막층 사이에 간극이 형성되면 간극 입구로부터 냉각수가 침투되어 고온의 반구 내면과 크러스트 표면으로부터 비등에 의한 냉각이 이루어진다.

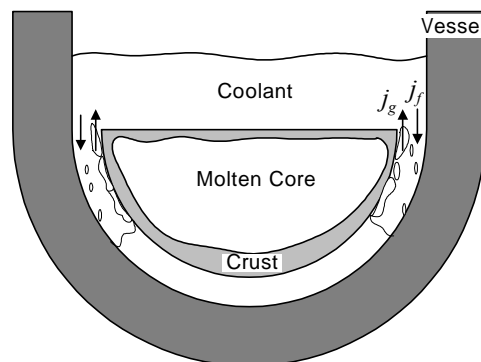


Fig. 1 Schematic for the cooling of molten core in a pressure vessel.

Fig.1은 압력용기 내에서 노심 용융물의 냉각에 대한 개략도를 나타낸다. 용융물의 가장자리에서 피막층이 형성되어 있으며 간극을 통해 냉각수와 증기가 유입 유출하고 상부 표면은 냉각수에 의

해 냉각된다.

3.1 간극내 냉각수 침투깊이

간극 입구에서 공급되는 냉각수 유량은 배출되는 증기와 상호작용을 하며 냉각수 침투 깊이는 이 CCFL 현상에 의해 결정된다.

간극 내에서 가열면 (A_h)은 압력용기의 안쪽 면과 용융물의 고화된 표면으로 이루어져있다. 이 가열면에서 비등에 의한 열전달은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{q}'' A_h = \dot{m} h_{fg} = \rho_g j_g A_{gap} h_{fg} \quad (4)$$

즉 발생된 증기가 배출되는 간극의 입구에서의 증기 속도는 가열면에서 공급되는 열속으로 표현된다. 간극 입구로 유입되는 냉각수 공급량이 증기 배출량보다 적으면 간극은 시간에 따라 건조되어 가며, 반대로 냉각수 공급량이 증기 배출량보다 많으면 간극으로 냉각수가 더 침투한다. 냉각수와 증기의 질량유량이 같은 점에서 간극내는 질량이 보존되는 준정상상태에 도달한다.

$$\rho_g j_g A_{gap} = \rho_f j_f A_{gap} \quad (5)$$

간극 입구에서는 냉각수와 증기의 유동방향이 서로 반대인 대향류를 형성하며 서로 상호작용을 하게된다. 액상과 기상의 유체가 서로 반대방향으로 흐를 때 액체와 기체의 유속은 상호작용에 의해 제한을 받게되며 Wallis는 실험을 통해 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\sqrt{j_g^*} + m\sqrt{j_f^*} = C, \quad j_g^* = j_g \frac{\sqrt{\rho_g}}{\sqrt{gD\Delta\rho}}, \quad j_f^* = j_f \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{gD\Delta\rho}} \quad (6)$$

Koizumi등은 수직관의 직경을 변화시켜가면서 CCFL을 측정하였으며 그 실험 값을 Wallis의 식으로 표현하면 다음과 같이 간극의 크기에 따른 m과 c 값을 얻을 수 있다.

$$m = 0.671/(1000 \times s + 0.917), \quad C = 0.6/(1000 \times s + 3.0) + 0.2 \quad (7)$$

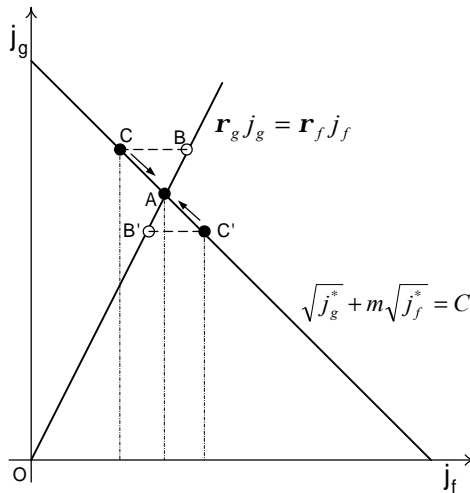


Fig. 2 Diagram to show Counter-Current Flow Limited boiling in a gap

Fig. 2는 식 (5)와 (6)을 도식적으로 표현한 그림이다. 식 (5)의 점 O와 점 A 사이에서는 CCFL이 발생하지 않고 비등에 의해 제거된 양만큼 충분히 간극 입구로부터 냉각수를 공급받을 수 있다. 점A에서는 식 (5)와 (6)가 만나는 점으로 CCFL 발생 점이 된다. 만약 가열면에서 점 B만큼 비등이 된다면 간극내 냉각수가 줄어들지 않으려면 $(j_f)_B$ 만큼 냉각수가 공급되어야 하지만

CCFL에 의하여 점 B는 점 C로 이동하게 된다. C 점에서는 증기 발생량만큼 냉각수가 공급되지 못하여 간극내 냉각수 침투깊이가 줄어들거나 비등열속이 줄어들어 다시 점 A로 이동하게 될 것이다. A 점에서의 증기 배출속도 j_g 는 식(5)와 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$j_g = \frac{C^2 \sqrt{\rho_g g \Delta \rho D}}{\rho_g (1. + m^4 \sqrt{\rho_g / \rho_f})^2} \quad (8)$$

Maruyama등은 식 (8)을 이용하여 간극내 냉각수 침투깊이를 결정하였다. 그러나 이 식은 수직관에 대한 CCFL 상관식을 이용하였기 때문에 반구형의 용융물 풀에 적용하기에는 문제가 있다. 한편 Park등[12]은 반구형 간극에서의 임계열속 실험에서 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

$$\ddot{q}_{CHFG} = \frac{\rho_g h_{fg}}{4 \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}}} \frac{0.1042}{1. + 0.1375 (\rho_g / \rho_f)^{0.21} (D/s)} \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^{-0.332 \ln s + 1.7} \quad (9)$$

식 (4)와 (9)를 이용하면 반구형 간극에서 CCFL에 의한 j_g 를 얻을 수 있다.

$$(j_g)_{CCFL} = \frac{A_h}{\rho_g h_{fg} A_{gap}} \ddot{q}_{CHFG} = \frac{\ddot{q}_{CHFG}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \frac{h}{s} \quad (10)$$

용융물의 깊이에 따른 가열면의 면적(A_h)은 $2\pi Dh$ 이며 간극 입구의 단면적(A_{gap})은 πDs 이다. 냉각수의 침투깊이는 가열면의 표면온도와 비등곡선을 이용하여 구한다. 각도 θ 까지 적분한 비등열량이 생성할 수 있는 증기의 배출속도 j_g 가 $(j_g)_{CCFL}$ 과 같아지면 그 지점이 냉각수의 침투 깊이가 된다.

$$j_g = \frac{\sum_i^{\theta} (\ddot{q} A)_i}{\rho_g h_{fg} A_g} = (j_g)_{CCFL} \quad (11)$$

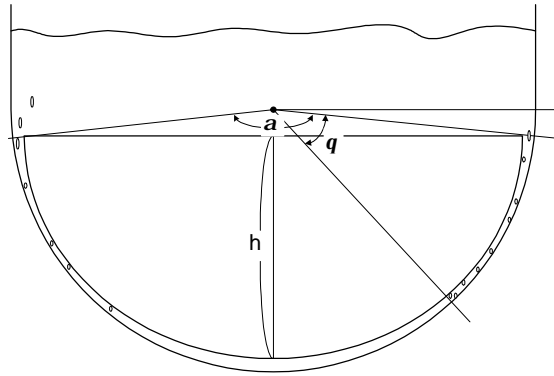


Fig. 3 Definitions of pool geometry for gap cooling model.

현재까지 반구형 간극 내에서 핵비등, 막비등을 포함하는 완전한 비등곡선에 대한 자료가 없으므로 일반적인 수조비등에서의 상관식을 사용하였다. 핵비등 영역에서는 Rohsenow의 상관식을 그리고 막비등 영역에서는 Berenson의 상관식을 사용하였으며, 임계열속은 Monde의 상관식을 이용하였다.

3.2 간극 내에서의 열전달

간극이 형성되는 초기에는 간극 내에 냉각수가 존재하지 않고 증기가 존재한다고 볼 수 있다.

그리고 냉각수가 하반구의 정점까지 완전히 침투하지 못한 경우에도 그 영역에서는 비등은 이루어질 수 없으며 단지 증기층에 의한 전도와 두 가열면 사이의 복사에 의한 열전달이 이루어진다고 가정한다.

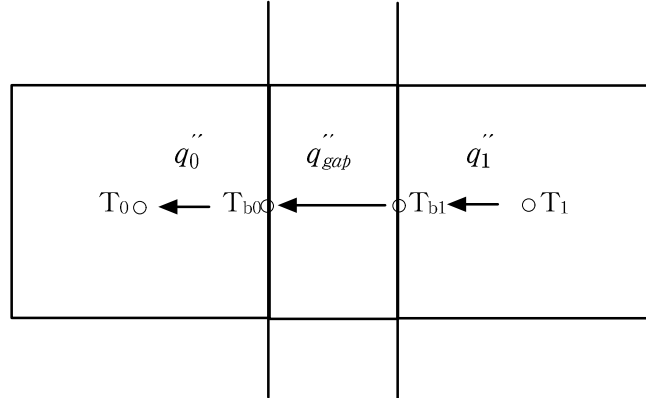


Fig. 4 Control volumes for energy conservation at a gap

Fig. 4는 간극에서의 열전달을 보여주는 것으로 q_1'' 은 고화층에서의 전도에 의한 열유속, q_0'' 은 반구 내부에서 간극에 인접한 셀에서의 전도 열속을 나타낸다. 그리고 q_{gap}'' 는 간극에서 전도와 복사에 의한 열속이다.

$$\begin{aligned} q_{gap}'' &= \frac{k}{s} (T_{b1} - T_{b0}) + \varepsilon \sigma (T_{b1}^4 - T_{b0}^4) \\ &= \frac{k}{s} (T_{b1} - T_{b0}) + \varepsilon \sigma (T_{b1}^* + T_{b0}^*) (T_{b1}^{*2} + T_{b0}^{*2}) (T_{b1} - T_{b0}) = h_b (T_{b1} - T_{b0}) \end{aligned} \quad (12)$$

이 경우에는 $q_0'' = q_{gap}'' = q_1''$ 이므로 간극에서의 에너지 보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$h_0 (T_{b0} - T_0) + S_0 = h_b T_{b1} - h_b T_{b0} = h_1 (T_1 - T_{b1}) + S_1 \quad (13)$$

S_0 와 S_1 은 격자가 간극면에 대해 직각이 아닌 경우에 발생하는 값으로 직각격자에서는 0이 된다. 식 (13)을 정리하여 매트릭스 형태로 표현하면 식 (14)가 되고 Cramer 정리를 이용하여 간극 표면에서의 온도를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (h_0 + h_b) & -h_b \\ -h_b & (h_1 + h_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{b0} \\ T_{b1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 T_0 - S_0 \\ h_1 T_1 + S_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_{b0} = T_0 + \frac{h_b h_1 (T_1 - T_0)}{D} + \frac{h_b S_1 - (h_1 + h_b) S_0}{D}$$

$$T_{b1} = T_1 + \frac{h_b h_0 (T_0 - T_1)}{D} + \frac{(h_0 + h_b) S_1 - h_b S_0}{D}$$

$$q_f'' = h_0 (T_{b0} - T_0) + S_0 = \frac{h_0 h_b h_1}{D} (T_1 - T_0) + \frac{h_0 h_b S_1 + h_b h_1 S_0}{D} \quad (15)$$

$$D = h_1 (h_b + h_0) + h_0 h_b$$

식 (14)에서 구한 간극 표면 온도 T_{b0} , T_{b1} 을 이용하면 식 (15)와 같이 간극을 통해 나가는 열속을 구할 수 있으며, 우변의 첫 번째 항은 이산화방정식의 계수에 포함되고 두 번째 항은 원천항에 포함하여 계산한다.

간극 내에 냉각수가 침투한 경우는 복사와 비등에 의한 열전달이 이루어진다.

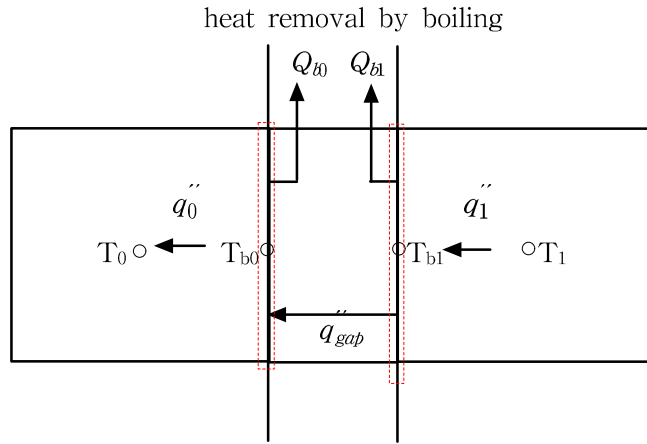


Fig. 5 Control volumes for energy conservation at a gap with boiling

Fig. 5는 간극 내에서 비등이 일어나는 경우 열전달을 도식적으로 나타낸 그림이다. Q_{b0} 과 Q_{b1} 는 간극면에서 비등에 의해 제거되는 열속이고, q''_{gap} 은 복사만을 고려하였다. 빗금으로 표시된 오른쪽 검사체적에 대해 에너지 보존식을 쓰면 다음과 같다.

$$\epsilon\sigma(T_{b1}^4 - T_{b0}^4) = h_1(T_1 - T_{b1}) + S_1 - Q_{b1} \quad (16)$$

왼쪽 검사체적에 대해 에너지 보존식은

$$\epsilon\sigma(T_{b1}^4 - T_{b0}^4) = h_0(T_{b0} - T_0) + S_0 + Q_{b0} \quad (17)$$

이다. 복사에 의한 열속을 식 (12)와 같이 전단계 값으로 선형화하여 매트릭스 형태로 표현하면 식 (18)가 된다.

$$\begin{bmatrix} (h_0 + h_b) & -h_b \\ -h_b & (h_1 + C_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{b0} \\ T_{b1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 T_0 - S_0 - Q_{b0} \\ h_1 T_1 + S_1 - Q_{b1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 T_0 - S'_0 \\ h_1 T_1 + S'_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 $S'_0 = S_0 + Q_{b0}$ 이고 $S'_1 = S_1 - Q_{b1}$ 이고 식 (18)은 식 (14)와 같은 형태가 된다. Cramer 정리를 이용하면 간극 표면에서의 온도와 열속을 구할 수 있다.

$$(q''_f)_{b0} = h_0(T_{b0} - T_0) + S_0 = \frac{h_0 h_b h_1}{D} (T_1 - T_0) + \frac{h_0 h_b S'_1 + h_b h_1 S'_0}{D} - Q_{b0} \quad (19)$$

$$(q''_f)_{b1} = h_1(T_1 - T_{b1}) + S_1 = \frac{h_0 h_b h_1}{D} (T_1 - T_0) + \frac{h_0 h_b S'_1 + h_b h_1 S'_0}{D} + Q_{b1}$$

4. 결과 고찰

간극 냉각 모델을 검증하기 위하여 LAVA 4 실험을 해석하였다. LAVA 4 실험은 반응로에서 thermite 반응을 일으켜 고온의 산화알루미늄과 철의 용융물을 얻고 분리기에서 밀도차이에 의해 산화알루미늄을 분리해서 냉각수가 있는 반구형 용기에 자유낙하로 주입시킨다. 용기에 주입된 산화알루미늄의 질량은 30kg이며 용융물의 초기 온도는 대략 2400 K 정도이며 초기 내부 압력은 17기압이다. 그리고 냉각수의 온도는 427 K이다. 실험에서 반구의 외벽 온도는 K형 열전대를 이용하여 실시간으로 측정하며 온도에 의한 반구의 변형을 선형 변위 측정기로 측정하였다. 실험

종료 후 냉각된 용기를 절단하여 간극의 크기를 측정하였으며 그 값은 1-3 mm 정도 되었다. Fig.6은 반구의 외벽 온도 측정을 위해 설치한 K형 열전대의 위치를 보여준다. K형 열전대는 한 동심원에서 90° 간격으로 외벽에서 2mm 깊이에 설치되었다.

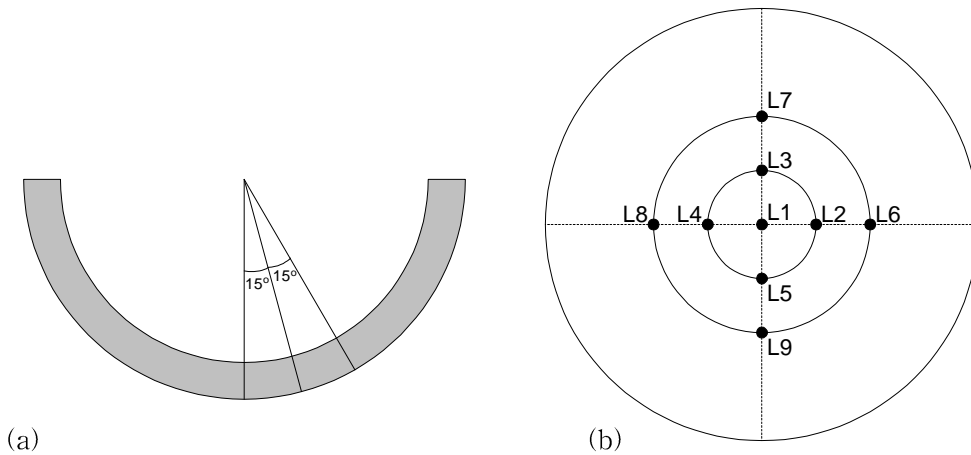


Fig. 6 Locations of thermocouples for LAVA experiment, (a) side view, (b) top view

Fig.7은 LAVA 실험을 해석하기 위해 사용한 격자와 경계를 나타낸다. 해석 영역은 축대칭 2차원이며 3502 개의 사각형 셀을 사용하였다. BC1은 대칭축이며 BC2는 용융물의 상부면으로 복사와 수조비등조건을 사용하였다. BC3, BC4, BC5 등은 용기의 벽면으로 복사와 대류 경계조건을 사용하였다. 특히 BC3 경계는 냉각수가 채워져 있는 부분으로 계산 중에 벽면 온도가 포화온도보다 높아지면 수조비등조건이 사용된다.

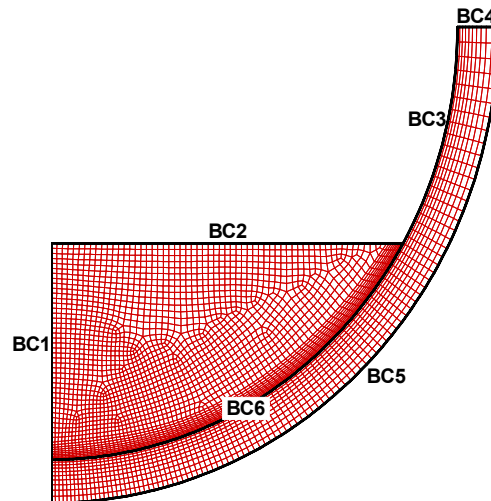


Fig. 7 Computational mesh and boundary conditions for LAVA simulation. The number of cell is 3502. BC1 is axis, BC2 is upper surface of melt with boiling boundary condition. BC3, BC4, and BC5 is vessel walls with radiative and convective condition. BC6 is the interface between vessel and crust on which gap-cooling model is implemented.

이 계산에서는 200초 후에 간극이 2mm 크기로 생성된다고 가정하였다. 그리고 용융물의 초기 온도는 2400 K이고 반구는 냉각수의 온도를 사용하였다. 용융물과 반구의 온도차를 기준으로 한 초기의 Ra수는 4.4×10^9 정도로 층류와 난류 자연대류의 천이영역이라 할 수 있으므로 현재 계산에

서는 난류모델을 사용하지 않았다. Fig.8, 9, 10은 각각 0°, 15°, 30° 지점에서 시간에 따른 외벽의 온도 변화를 실험 값과 비교한 것이다.

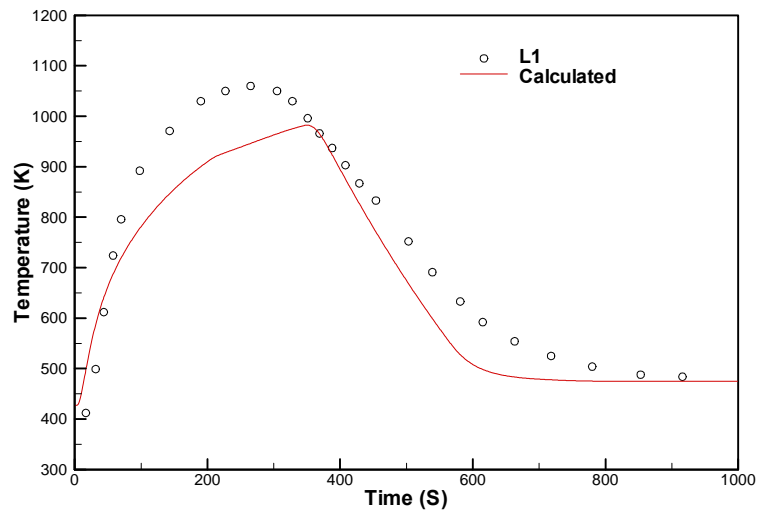


Fig. 8 Comparison of temperature histories at the apex and 2mm in depth from outer wall of the vessel. The results are for the case of LAVA4 experiment.

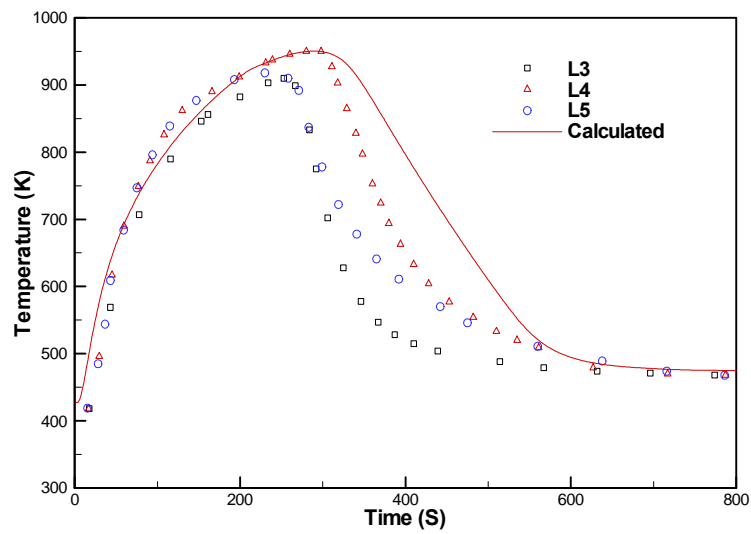


Fig. 9 Comparison of temperature histories at a point 15° away from the apex and 2mm in depth from outer wall of the vessel. The results are for the case of LAVA4 experiment.

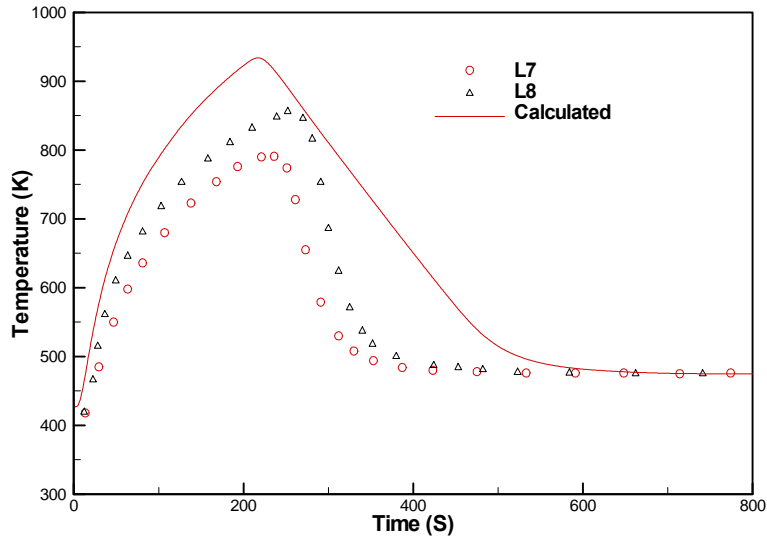


Fig. 10 Comparison of temperature histories at a point 30° away from the apex and 2mm in depth from outer wall of the vessel. The results are for the case of LAVA4 experiment.

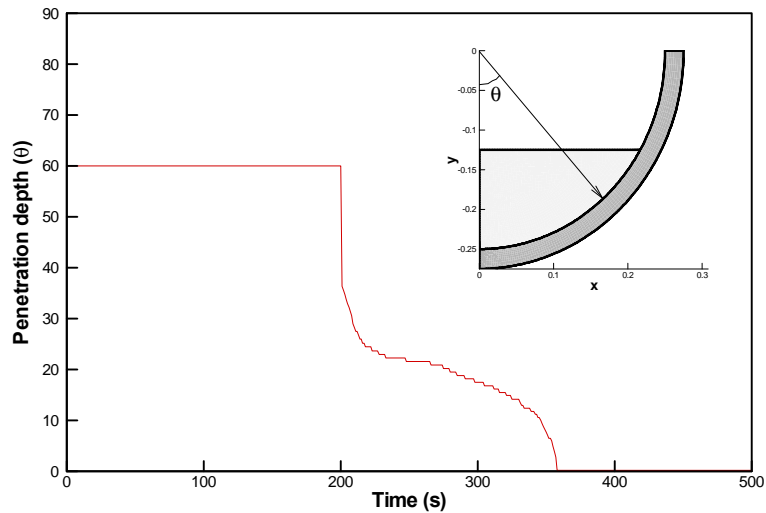


Fig. 11 Water penetration depth with time

Fig.11에 시간에 따른 냉각수의 침투 깊이를 각도로 표시하였다. 30 kg의 산화알루미늄은 직경 0.5 m의 반구에 약 60° 까지 차게된다. 200 초부터 간극 냉각을 시작하였으며 이때 약 35° 까지 냉각수가 침투된다. 더 이상 침투하지 못하는 것은 간극 입구에서 CCFL 현상에 의해 냉각수 유입 속도에 제한을 받기 때문이다. 시간이 지남에 따라 피막층 표면과 반구 내벽이 냉각수 비등에 의해 냉각되면서 냉각수의 침투깊이도 점점 증가한다. 약 350 초 정도 지나면서 냉각수는 바닥까지 완전히 침투한 것을 그림에서 알 수 있다. Fig.12는 300 초 후 그리고 Fig.13은 600 초 후의 의 계산 결과이다. 오른쪽은 등온선을 나타내고 왼쪽은 액상과 고상의 경계를 의미하는 액상분률등고선(liquid fraction contour)이다. 용융물은 상부 표면과 하부표면에서부터 고화가 시작되며 시간이 진행됨에 따라 서서히 내부로 진행된다. Fig.11에서 300 후에는 냉각수가 17° 까지 침투하였으며 Fig.12의 등온선 그림에서도 반구는 냉각수가 침투된 영역까지는 내벽이 외벽보다 온도가 더 낮음을 알 수 있다. 반구의 정점 부근에는 아직 냉각수가 침투하지 못하여 아직 높은 온도를 유지하고 있다. 600 초가 지난 뒤에는 냉각수가 반구의 정점까지 완전히 침투하여 반구에 거의 온도 구배가 없는 것으로 보인다. 그러나 용융물의 고화층은 여전히 고온상태로 유지되어 있는 것

으로 보인다.

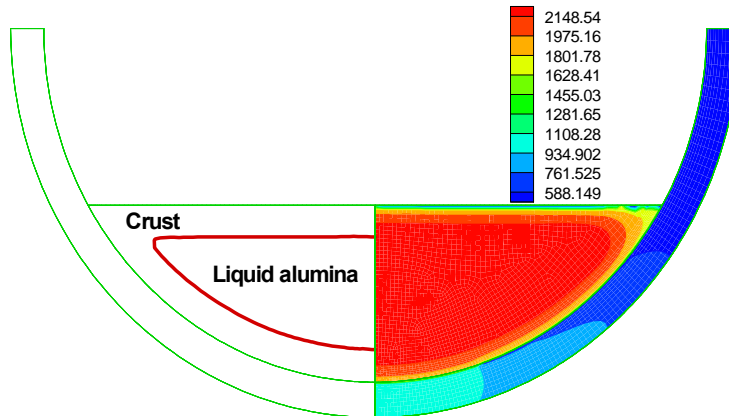


Fig. 12 Numerical results at Time=300S, LAVA4 experiment. Right :Temperature contours, left : liquid fraction contours

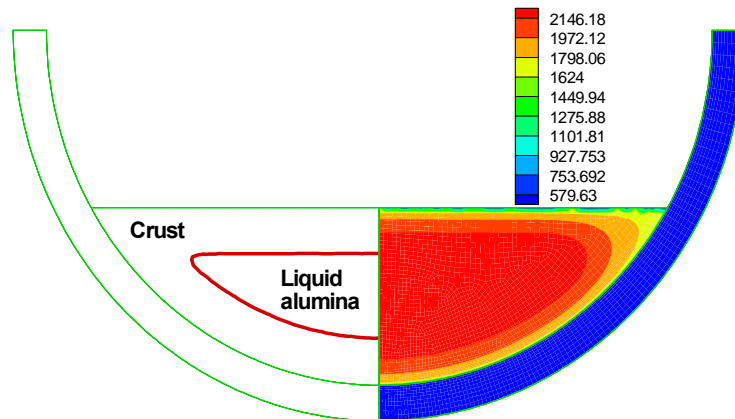


Fig. 13 Numerical results at Time=600S, LAVA4 experiment. Right :Temperature contours, left : liquid fraction contour

5. 결론

본 연구에서는 CCFL 현상에 기초한 간극 냉각 모델을 이용하여 LAVA 실험을 해석하고 실험 결과와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- LAVA 실험에서 산화알루미늄 용융물이 반구형 용기에 재배치된 후 용기의 초기 온도상승 곡선은 간극 형성 메카니즘에 주로 영향을 받는다. 간극 형성 시기와 간극의 크기를 결정할 수 있는 모델이 개발되면 초기 온도상승을 좀 더 정확히 예측할 수 있을 것이다.

- 간극 입구에서의 CCFL 현상에 의해 냉각수 유입 속도는 제한을 받으며 이것으로부터 냉각수의 침투깊이가 결정된다. 시간이 지남에 따라 피막층 표면과 반구 내벽이 냉각수 비등에 의해 냉각되면서 냉각수의 침투깊이도 점점 증가한다. 계산 결과 LAVA4 실험의 경우 400초 이후 냉각수가 바닥까지 완전히 침투한 것으로 나타났다. LAVA 실험과 같이 내부 열원이 없는 경우에는 냉각수가 짧은 시간 안에 바닥까지 침투하며 간극을 통한 냉각이 매우 효율적인 반면, 실제 원

전은 증대사고시 노심 용융물의 붕괴열이 지속적으로 발생할 것이며 이로 인해 냉각수의 침투도 매우 제한적일 것이다.

· 용융물의 자연대류에 의해 외벽으로 전달되는 열속은 원자로용기의 상부로 갈수록 증가한다. 간극 냉각은 용기 상부에서 증대된 열속을 줄이기 위한 중요한 도구로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] R.H. Henry, et al., "An Experimental Investigation of Possible In-Vessel Cooling Mechanisms," CSARP Meeting, Bethesda, Maryland, May 5-8, 1997
- [2] D. Magallon and H. Hohmann, "High Pressure Corium Melt Quenching Test in FARO," CSNI-FCI Specialist Meeting, Santa Babara, California, Jan. 5-8, 1993
- [3] Yu Maruyama, et al., "In-Vessel Debris Coolability Studies in ALPHA Program," Proc. of The Int. Top. Mtg. on PSA '96, Park City, Utah, September 1996
- [4] K.H. Kang, et al., "Experimental Investigations on In-Vessel Debris Coolability through Inherent Cooling Mechanisms," Proc. OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, NEA/CSNI/R(98)18, pp.251-260, Garching, Germany, March 3-6, 1998
- [5] Suh, K.Y. and Henry, R.E., "Debris Interaction in Reactor Vessel Lower Plena During a Severe Accident, I. Predictive Model," Nuclear Engineering and Design, Vol.166 pp.147-163,
- [6] M. Monde, H. Kusuda, and H. Uehara, "Critical Heat Flux During Natural Convection Boiling in Vertical Rectangular Channels Submerged in Saturated Liquid," J. of Heat Transfer, Vol.104, pp.300-303, 1982
- [7] T. Kohriyama, et al., "Verification Study of Molten core In-Vessel Retention Analysis Using MAAP4 code," Proc. of PSAM5, Vol.3, pp.1943-1948, Osaka, Japan, Dec., 2000
- [8] Y. Koizumi, et al., "Gravitational Water Penetration into Narrow-Gap Annular Flow Passages with Upward Gas Flow," Proc. of Eight Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Vol.1, pp48-52, Kyoto, Japan, Sep., 1997
- [9] J.H. Park, et al., "Modeling of Gap Cooling Phenomena in LAVA-4 Test using MELCOR," Proc. of PSAM5, Vol.3, pp.1935-1942, Osaka, Japan, Dec., 2000
- [10] Y. Maruyama, et al., "Validation of CAMP Code for Thermo-Fluidynamics of Molten Debris in Lower Plenum," RASPLAV Seminar 2000, Program Review Meeting of OECD RASPLAV Project, Munich, Germany, Nov. 14-15, 2000
- [11] 강경호등, "간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 실험 연구," KAERI/TR-1334/99, 1999
- [12] R.J. Park, et al., "Critical Power in a Hemispherical Narrow Gap," 5th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Thessaloniki, Greece, Sep. 24-28, 2001, Submitted