

냉각수가 비등하지 않는 조건에서 용융물의 피막층 형성에 대한 2차원적 해석

조재선, 이병철, 정창현
서울대학교

김희동
한국원자력연구소

요 약

중대사고시 원자로 압력용기내 또는 원자로 공동(cavity) 내에서의 노심용융물은 주입되는 물로 인하여 물과 접촉하는 표면이 냉각되면서 피막층(crust)이 형성된다. 이러한 피막층의 형성은 노심용융물과 냉각수 사이의 열전달 현상에 영향을 미치며 중대사고 발생시 사고 진행에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 이러한 용융물의 피막층 형성의 해석모델을 수립하기 위해 전이현상과 전도와 대류를 포함하는 2차원 열전달과 상변화를 수반하는 문제를 포함하는 운동량방정식과 에너지방정식을 2차원으로 구성하였으며 에너지방정식은 엔탈피의 함수로 나타내었다. 그리고 이러한 2차원 지배방정식을 해석하기 위해 유한차분법 및 SIMPLER 알고리즘을 이용하였다. 비교대상으로는 한국원자력연구소에서 수행한 냉각수의 비등과 기체주입 효과가 고려되지 않은 실험을 대상으로 하였다. 계산결과 용융물의 피막층은 파동(wave) 형태로 형성되었으며 일정시간이 경과하면 변화가 없는 안정한 상태가 되었다. 용융물 내에서의 온도분포는 액체상태일 경우에는 하부가열면과 상변화가 일어나는 경계면부근을 제외하고는 거의 일정한 온도분포를 나타내고 있으며 용융물이 고화된 피막층에서는 급격한 온도변화를 보여주고 있다.

1. 서론

중대사고시 원자로 압력용기내 또는 원자로 공동 내에서의 노심용융물은 주입되는 물로 인하여 물과 접촉하는 표면이 냉각되면서 피막층이 형성되어 열전달에 영향을 미치며 이러한 피막층의 형성은 중대사고 발생시 사고 진행에 중요한 역할을 한다. TMI 사고이후 중대사고시 노심용융물의 냉각과 이로 인한 피막층의 생성에 대해 많은 연구가 수행되었다. 그러나 피막층의 생성은 상변화(phase change)를 수반하며 현상이 복잡하여 아직 많은 불확실성이 존재하며 지금도 이에 대한 연구가 널리 수행되고 있다.

복잡한 열전달 메커니즘을 야기하는 여러가지의 매개체(예를 들면 용해되는 콘크리트)가 있는 주위 조건하에서의 상변화를 수반하는 노심용융물의 거동해석은 매우 어려우며 따라서 현재의 상변화를 다루는 열전달 모델들은 대부분 모델을 단순화하여 용융물을 일차원적으로 취급하여 자연대류 및 전도에 의한 열전달로 피막층을 모사하고 있다. CORCON/MOD3의 경우 질량과 에너지 합량을 알고 있는 용융물층내의 온도분포곡선이 존재하더라도 평균 온도에 대한 함수로 가정하여 용융물층의 평균온도, 경계온도, 두께 그리고 부피 등의 인자를 사용하여 원통형 구조에 대하여 열전달 방정식의 해를 구한다. 용융물층의 상태는 열손실과 열발생이 평형을 이루는 상태로 준정상상태로 진행된다고 가정하여 평균온도와 경계에서의 열속을 그 층의 내부발열과 경계온도를 이용해 결정한다.⁽¹⁾

노심용융물의 냉각을 위해 물을 주입하던 서로 섞이지 않고 성층화되어 있는 노심용융물 층을 중심으로 하부 및 옆방향으로 콘크리트가 접촉해 있으며 상부에는 냉각수가 존재한다. 콘크리트가 분해되지 않고 heat sink 역할로서만 작용할 경우에는 (노심용융물 층내부의 자연대류와 상변화만 고려하고 경계조건을 부과하는 방법으로 취급가능하여 비교적 용이하나), 콘크리트가 분해될 경우에는 발생가스의 상승에 따른 부산물의 용융물 내부 유입 및 기체주입을 고려하여야 하고 또 이에 따른 용융물 층내의 난류 자연대류와 층간의 gas entrainment 효과 역시 고려하여야 한다. 또한 고화된 피막층의 붕괴 과정 및 피막층 파편물의 상부 대기나 냉각수로의 부유현상도 취급하여야 한다. 따라서 각각에 해당하는 독립된 물리적 해석결과의 분석 및 근거로 MCCI에 적합한 통합적인 모델을 수립할 필요성이 있다. 따라서 이러한 한계를 극복하고 보다 정확한 해석모델을 수립하기 위해서는 천이현상과 전도와 대류를 포함하는 2차원 열전달과 상변화를 수반하는 문제를 확립하고 이에 대한 적절한 tool을 개발하여야 한다.

2. 해석모델

2.1 방법론

상변화를 수반하는 현상은 상변화가 일어나는 경계면이 계속 움직이는 moving boundary 문제이기 때문에 해석이 용이하지 않다. 그래서 기존의 해석적 모델이나 수치 해법을 이용한 모델들은 근사 이론을 이용하거나 현상을 단순화 시켜 해석을 하고 있으나 그래도 복잡한 과정을 포함하고 있다. 이러한 용융물의 거동을 해석하기 위해 Enthalpy method^[2]를 이용하여 해석모델을 제시하고 궁극적으로는 이러한 방법론을 CORCON코드에서 가정하는 모델의 단점을 개선하여 정확한 상변화 현상의 해석을 통해 중대사고시 사고진행 및 물리적 현상에 대한 해석능력 향상을 목적으로 하고 있다.

본 연구에서는 용융물의 상변화 해석을 위해 운동량방정식과 에너지방정식을 2차원으로 구성하였으며 에너지방정식은 엔탈피의 함수로 나타내었다. 에너지방정식을 엔탈피의 함수로 구성할 경우 용융물내에서 상변화가 일어나는 경계면을 구하기 위해 또다른 방정식이나 경계조건을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 그리고 이러한 2차원 지배방정식을 해석하기 위해 유한차분법 및 SIMPLER 알고리즘^[3]을 이용하였다.

2.2 지배방정식

상변화 현상을 수치해법적으로 해석하기 위해서는 용융물이 액체상태에서 고체상태로 변한 격자부분의 속도를 0으로 하기 위한 방법이 필요하다. 그러므로 이를 보정하는 항을 첨가하여 유동장 방정식을 구성해야 한다. 상변화는 단일온도에서 일어나는 경우로 하였다. 그러므로 액상과 고상이 동시에 존재하는 영역(mushy region)은 무시하였다. 상변화 해석을 위한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + Au \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Av + S_b \quad (3)$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} = \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} \quad (4)$$

$$S_b = \frac{\rho_{ref} g \beta (h - h_{ref})}{c_p}$$

$$\Delta H = \begin{cases} L & T > T_m \\ 0 & T < T_m \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} 0 & T > T_m \\ -1.6 \times 10^9 & T < T_m \end{cases}$$

위의 식들은 비정상항(transient term), 대류항(convection term), 확산항(diffusion term) 그리고 생성항(source term)으로 구성된 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho u, \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \quad (5)$$

식 (2)와 (3)에 나타난 Au와 Av가 운동량방정식에서 용융물이 고화되어 피막층이 형성되는 영역에서 속도를 0으로 만드는 보정항이다. 이항들은 (3)식에 나타난 Sb와 함께 차분방정식에서 생성항으로 처리된다. 용융물이 액체상태일때 A값은 0이며 고체상태일 때는 음의 큰 값을 갖는다.^[4] Sb는 부력에 의한 자연대류 현상을 해석이 가능하게 하는 항이며 L은 용융물의 잠열을 나타낸다. 그리고 Tm은 용융물의 상변화온도이다.

2.3 계산수행

2.2절에서 제시한 지배방정식을 수치해법적으로 계산을 수행하였는데 비교대상으로는 한국원자력연구소에서 수행한 냉각수의 비등과 기체주입 효과가 고려되지 않은 실험을 대상으로 하였다.^[5] 이 실험은 용융물로 상변화온도가 70°C인 wood metal을 사용하였으며 용융물 상부에 냉각수를 주입하여 용융물의 냉각에 따른 피막층 형성과정을 측정하는 실험이다. 그리고 실험용기의 좌우 측면은 단열을 하였다. 계산수행에 있어서는 모든 물성치는 상수로 가정하였으며 상변화 온도도 단일온도로 가정하였다. 현재의 계산 프로그램은 두 유체가 분리되어 있을 경우 이러한 두 유체를 동시에 해석하지 못하고 있다. 그러므로 본 계산에서는 계산 영역을 용융물로 제한하였으며 용융물 상부의 냉각수에 의한 냉각 효과는 계산에서 용융물 상부의 경계조건으로 대체하였다.

용융물의 피막층 형성을 계산하기 위해 사용된 물성치가 표 1에 나와 있으며 계산 알고리즘은 그림 1과 같다.

3. 계산결과

본 연구에서는 밑면과 윗면의 경계조건인 용융물의 하부 가열온도와 상부 냉각온도를 바꿔가면서 계산을 수행하였다. 그림 2, 3, 4는 상부 냉각온도가 40°C이고 하부 가열온도가 80°C로 설정하여 계산한 결과이다. 그림 2는 시간에 따른 용융물내에서의 자연대류에 의한 유동장을 나타내는 결과로써 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 용융물내부에서는 용기의 가운데를 중심으로 좌우대칭을 이루며 자연대류 현상이 일어나며 자연대류에 의한 Benard cell의 수가 줄어들어 최종적으로는 2개가 됨을 보여주고 있다. 이에 따라 용융물 상부에서의 피막층 형성도 그림 3과 같이 Benard cell을 중심으로 용기의 좌우측면과 가운데 부분에서 두껍게 형성되어 파동 형태가 됨을 보여주고 있다. 피막층이 이러한 파동형태로 형성되는 이유는 Benard cell의 가운데 영역에서는 자연대류에 의한 열전달로 인해 용기의

하부 가열량이 많이 전달되어 피막층의 두께가 얇게 형성되기 때문에 풀이된다. 그림 4는 용융물내에서의 온도분포를 나타내는 결과이다. 용융물이 액체상태일 경우에는 하부 가열면과 상변화가 일어나는 경계면부근을 제외하고는 거의 일정한 온도분포를 나타내고 있으며 용융물이 고화된 피막층에서는 급격한 온도변화를 보여주고 있다.

4. 결론 및 토의

중대사고시 냉각수 주입에 따른 노심용융물의 피막층 형성을 2차원으로 해석하기 위한 예비단계로서 냉각수가 비등하지 않는 조건에서 용융물의 피막층 형성을 해석하였다. 계산 결과는 피막층이 냉각되는 면에서 균일하게 형성되는 것이 아니라 자연대류에 의해 파동 형태를 보여주었다. 실제 원자력발전소 내 공동에서는 훨씬 더 복잡한 양상을 보여줄 것으로 예상된다. 그러므로 기존의 중대사고 해석코드들이 용융물의 피막층 형성을 1차원으로 단일한 두께로 계산하는 모델링은 부적절하다고 판단되며 현재의 계산 프로그램은 두 유체가 분리되어 있는 경우 이러한 두 유체를 동시에 해석하지 못하고 있다. 그러므로 냉각수와 용융물이 접촉하는 경계면의 온도는 계속 변화하는데 이에 대한 효과를 고려하지 못하고 있다. 실험 및 계산에서는 실험용기의 측면을 단열조건으로 하였는데 향후 해석에서는 원자력발전소의 실제 크기의 원자로공동과 내부발열을 갖는 노심용융물을 대상으로 계산을 수행할 예정이다. 본 연구에서는 용융물의 상변화온도를 단일 온도로 가정하였는데 실제의 용융물은 한가지 원소로 이루어진 단일물질이 아니고 핵연료와 핵연료봉 피복재의 혼합물이기 때문에 단일 온도가 아닌 어느 정도의 온도영역에서 점진적으로 상변화가 일어난다. 그러므로 이러한 liquidus와 solidus 상태가 공존하는 two-phase영역을 정확히 해석하는 것도 추후 해결해야 할 문제이다. 그리고 용융물이 내부발열을 할 경우 용융물은 피막층의 형성과 붕괴가 주기적으로 반복되는 현상이 일어날 수 있다. 이러한 현상을 모델링하는 것도 향후 해결해야 할 문제이다. 궁극적으로는 냉각수와 용융물 두 유체를 동시에 해석하며 콘크리트에서 발생하는 기체 주입효과와 냉각수의 비등효과를 고려한 프로그램의 개발이 필요하다.

참고문헌

- [1] CORCON/MOD3 : An Integrated Computer Model for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions, NUREG/CR-5843
- [2] V.R. Voller, M. Cross and N.C. Markatos, "An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change", Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, pp. 271-284, 1987
- [3] S. V. Pantankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, DC, 1980
- [4] P.C. Carman, "Fluid Flow through Granular Beds", Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol. 15, pp. 150-166
- [5] 박래준 외, "냉각수가 비등하지 않을 때 노심 용융물의 피막층 형성에 대한 연구", KAERI/TR-466/94

표 1. Physical Properties of Wood Metal

Density	9383.22 Kg/m ³
Melting temperature	70°C
Specific heat capacity	1465 J/Kg K
Latent heat of fusion	32567.85 J/Kg
Thermal conductivity	12.793 W/m K
Volumetric thermal expansion coefficient	0.22×10^{-3} /K
Viscosity	1.88×10^{-3} kg/m sec

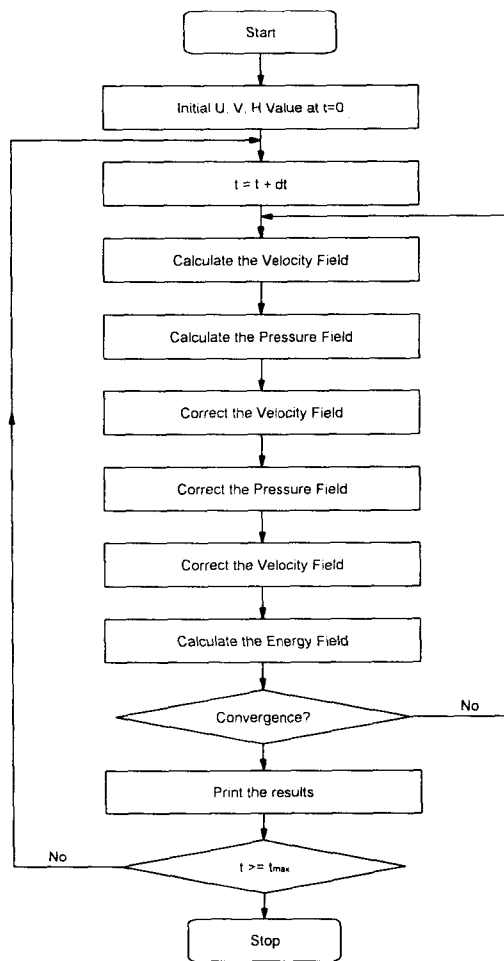


그림 1. 용융물의 피막층형성 계산 알고리즘

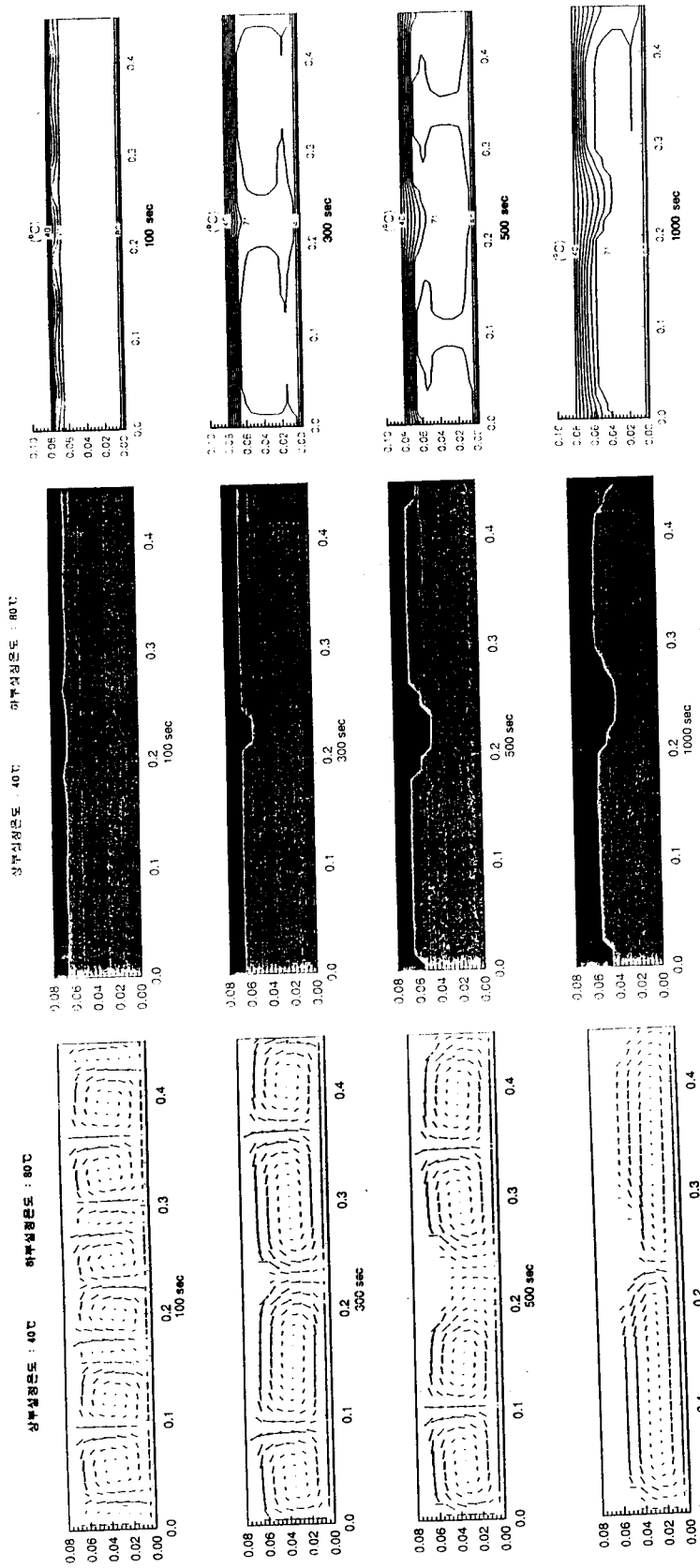


그림 2. 용융물 내에서의 Velocity Profile

그림 3. 용융물의 파박중 압력 변화

그림 4. 용융물 내에서의 Temperature Profile