

중대사고시 가압경수형 원자력발전소 원자로용기 하부헤드내의
노심용융물 거동 평가를 위한 전산모델에 대한 타당성 연구

**A Feasibility Study on the Computational Model for Assessing Corium Behavior
in the Reactor Vessel Lower Head of Pressurized Light Water Reactor under
Severe Accident**

조용진, 이석호, 이종인
한국원자력안전기술원

진규동
한양대학교 원자력공학과

요 약

미국의 개량형 원자력 발전소 개념설계단계에서 중대사고시 사고완화를 위한 전략으로 원자로 압력용기 외부냉각 개념이 제안되었다. 중대사고 진행과정에서 노심용융물이 원자로 압력용기 하부헤드로 재배치 되었을 때 압력용기 외벽을 냉각함으로써 노심용융물을 압력용기 내부에 가두어 두어 격납건물 내로의 유출을 방지하는 방식이다. 이 연구에서는 원자로 압력용기 하부헤드 내의 노심용융물 거동중 자연순환에 의한 거동을 수치적으로 모의하여 보았다. 연구결과, 정상상태의 온도 및 속도분포는 현상학적으로 적절하게 모의되나 고화와 액화의 경우에는 고유모델의 필요성이 요구되었다.

1. 서론

1979년 TMI-2 사고이후 중대사고에 대한 관심이 모아지고 각종 규제요건이 확립되었으며 1986년 체르노빌 원전사고 이후 다중실패에 의한 중대사고에 대한 중요성이 더해지고 있다. 또한 이들 사고들은 지금까지 원전설계 및 안전성확보시 고려된 설계기준사고를 초과하는 중대사고, 즉 실제적인 원자로 노심손상이나 격납건물 건전성을 상실할 수 있는 사고 (RCSA : Realistically Conceivable Severe Accident) 로 원전안전에 대한 새로운 접근방법을 모색하는 계기가 되었다. 이에 따라 많은 중대사고 관련 연구가 진행되고 있으며 원자력 발전소의 중대사고 취약점을 찾기 위한 노력이 집중되고 있다. 국내에서는 영광 3,4 호기의 발전소 안전성 점검 (IPE)을 수행하였고 그 결과를 검토한 바 있으나 여러부분에 산재해 있는 불확실성에 의한 영향 및 판단오류 가능성 때문에 적절한 결정을 하기 힘든 실정이다. 따라서 세계적으로 이러한 불확실성을 줄이기 위하여 많은 실험들이 수행되었으며 현재 수행중 또는 계획중인 상태이다. 이중의 하나로 원자로 용기 하부헤드를 외부에서 냉각시켜 원자로 용기 내부에서 노심 용융물을 냉각시키는 방법이 미국의 Advanced Reactor 개념설계를 수행하는 도중 제안되었다.

본 연구는 제 1 단계로서 원자로용기 하부헤드 내의 노심용융물 거동을 분석할 수 있는 전산코드를 개발하고 내부에서 열이 생성되는 반원형 캐비티에서 부력에 의한 재연대류의 수치적 연구를 수행하여 용융노심에서의 거동특성을 찾아내는 것이다. 제 2 단계는 OECD/NEA가 주관하고 있는 RASPLAV 실험과의 비교평가를 통하여 그 예측의 적절성을 입증한 후 제 3 단계로서 원자로 용기 외부 냉각 계산용 전산코드를 개발하고 그 적절성을 입증하는 것이다. 최종단계로서 상기 1,2,3 단계에서 생성된 전산코드들을 접목시켜 하나의 종합 전산코드를 개발하고 이를 사고관리 계획수립시에 원자로 용기 하부헤드 외부냉각의 적절성을 입증하고 이를 활용하는데 그 목적이 있다. 본 연구는 이중 제 1 단계의 하부헤드 모델링의 적절성 평가측면에서 수행되었다.

2. 기술현황 및 연구현황

1979년 미국에서 TMI-2 사고가 발생한 이후 중대 사고에 대한 관심이 집중되어 원자력발전소에 대한 중대 사고를 근본적으로 해결하기 위한 여러 가지 방안이 사고 관리의 일환으로 모색되어 왔다. 중대 사고 시 가장 중요한 사고로부터의 회복 전략은 노심 용융물을 냉각시킴으로써 아직 손상되지 않은 핵분열 생성물 방벽의 건전성에 대한 위협 요인을 제거하고 사고를 조기에 종결 시키는 것이다.

TMI-2 사고에서는 원자로 용기 내의 잔여 냉각수와 장기간의 붕괴열 제거를 위한 주입된 냉각수에 의해 사고는 상당히 완화된 상태로 종결되었다. 그러나 지금까지 수행된 개별 원전 안전성 평가(IPE)

에 의하면 일부 사고 경위에서는 노심 용융물이 원자로 용기 하부 공간으로 떨어져 용기 내에 존재하는 냉각수의 비등을 발생시켜 원자로 냉각재 계통 (RCS) 으로의 냉각수 주입이 불가능해지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 극단적인 상황에서도 노심 용융물의 냉각을 가능하게 하는 수단이 마련될 수 있다면 원자로 용기 하부 헤드의 파손을 방지하여 노심 용융물을 용기 내에 격납시킬 수 있을 것이다. 반면에 용기 건전성 유지에 결국 실패하는 경우, 저압 하에서 발생하는 용기의 증기 폭발은 격납용기 및 구조물에 상당한 위협을 가할 수 있다. 전체적으로 노의 침수 냉각은 기대되는 이점이 매우 큰 반면에 우려되는 사항도 만만치 않으므로, 관련 현상에 대한 보다 깊은 이해로 불확실성을 줄이고, 개별 원전 설계 및 발생가능한 사고 절차에 대한 깊은 성찰이 이루어져야만 종합적인 타당성 평가를 내릴 수 있다.

노의 침수냉각에 의해 노심 용융물을 원자로용기 내에 격납시키려는 개념에 대한 타당성 평가는 관련되는 여러 현상들에 대한 신뢰할 만한 이해를 바탕으로 가능하다. 여기에는 다음과 같은 중요한 현상들이 있다.

1) 노심용융물 풀 형성까지의 초기 과도 상태

현재 후기 노심 용융 진행과 노심 용융물의 재배치에 대한 가장 유용한 자료가 TMI-2 사고이지만, 모든 경수로의 노심 및 원자로용기 설계와 여러가지 중대사고 결과를 잘 나타내지는 못한다. 그러나 TMI-2 용기 조사 계획 (TMI-2 Vessel Investigation Project : TMI-VIP)에 의해 하부헤드에 존재하는 노심 용융물의 상태와 조성, 하부헤드의 파손 정도, 구조물의 건전성 여유도가 조사되었으며, 이를 통해 중대 사고의 진행에 관한 이해가 크게 진전되었다. 그리고 노심 용융물의 거동을 이해하고 해석코드를 개발. 검증하기 위하여 상당수의 실험이 현재 진행 중이거나 계획중이다.

2) 노심용융물 풀의 대류

원자로용기 내부의 노심용융물풀 자연대류는 용융물 고화(또는 용융) 온도에서 풀로부터 각질층 (Crust)표면으로의 열유속 (Heat Flux) 분포를 결정하므로 노의 침수 냉각의 유효성에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

3) 복사 열전달

노심용융물 풀로부터 원자로용기 상부 구조물의 상향 복사 열전달이 크다면 노의 침수 냉각 요건을 완화시킬 것이다. 상향 열전달에서는 노심 용융물과 하부헤드의 접촉면보다 훨씬 넓은 원자로용기 표면적으로 열전달이 분산되는데, 이러한 복사 열전달은 노심 용융물 상부에서 고화된 상부 각질층 (Upper Crust) 과 손상되지 않은 용기내 구조물 사이의 상당한 온도 차이 때문에 가능하다. 원자로용기 내에 존재하는 기체로 인한 복사 열전달 저항의 증가는 상부 각질층 표면 온도의 작은 증가로 보상될 수 있어서 복사 열전달 감소에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 평가되고 있으나 상부 각질층의 두께에 미치는 영향은 클 수 있다.

4) 노의 냉각수 거동

원자로용기 주위의 냉각수 유동 상태 및 용기 외벽과 냉각수 간의 열전달은 용기벽의 온도, 두께 및 강도 분포를 평가하기 위하여 매우 중요하다. 용기 외벽으로부터 냉각수로의 열전달 매커니즘이 핵비동에서 막비동으로 바뀌게 되면, 열전달 저항이 크게 증가하여 용기의 온도가 상승하고 용기벽의 강도가 낮아진다. 이 경우 일차계통의 감압이 이루어진다 하더라도 노심용융물, 하부헤드 및 다른 구조물의 무거운으로도 용기의 구조적 건전성이 상실될 수 있다.

3. 이론적 모델

3.1 기본가정

본 연구에서 계산을 수행하기 위한 가정은 다음과 같다.

1. 하나의 제어체적내부에서의 용융코름 물성치는 열역학적 평균치를 사용하였다.
2. 실제 열생성은 Side Wall 의 가열에 의하여 용융코름이 가열되는 방식으로 수행되나 여기서의 용융코름은 일정한 내부열생성에 의해 가열되는 것으로 가정하였다.
3. 실제 상황에서는 코름 상부로의 복사나 대류가 지배적인 역할을 할 수 있으나 일단 문제의 단순화를 위하여 코름 상부로의 복사나 대류는 무시하였다. 추후 이 부분은 개선을 수행할 예정이다.
4. 실제 노심 용융과정에서는 용융코름이 시간에 따라 그 양이 변화할 것으로 예상되지만 여기서는 초기부터 용융코름이 하부헤드에 가득차 있다고 가정하였다.

3.2 이론적 모델

유체에서의 거동을 모델하기 위한 일반식은 질량보존식, 모우멘텀 보존식 및 에너지 보존식으로 나누어져 구성된다. 여기서 계산하고자 하는 Domain은 반구형으로 극 좌표계 (Polar Coordinates) 로 표현될 수 있다. 따라서 기본식을 2 차원 원통형 좌표계로 좌표변환을 하여 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Continuity Eq.} : \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho r u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v) = 0$$

$$\text{Energy Eq.} : \frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u T) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \Gamma_T \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_T \frac{\partial T}{\partial r}) + S_T, \text{ where } \Gamma_T = \frac{C_p}{K}$$

$$\theta\text{-momentum eq.} : \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v u) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\mu}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu \frac{\partial u}{\partial r}) + S_u$$

$$r\text{-momentum eq.} : \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho r u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v v) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\mu}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu \frac{\partial v}{\partial r}) + S_v$$

위식에서 Continuity Equation 과 Energy Equation 은 그 자체로 완결성을 가지나 Momentum Equation 은 Body Force 항인 S_u, S_v 와 Pressure Gradient 항인 $\frac{\partial P}{\partial \theta}, \frac{\partial P}{\partial r}$ 항이 미결로 남게 된다. 이것을 다음과 같이 근사하였다.

$$S_u = \rho g \cos(2\pi - \theta), \quad S_v = \rho g \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right); \quad -\frac{1}{r} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)_u = \rho_\infty g \cos(2\pi - \theta), \quad -\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_v = \rho_\infty g \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)$$

위 두식을 각각 u 와 v 에 대하여 묶으면

$$-\frac{1}{r} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)_u + S_u = (\rho - \frac{1}{r} \rho_\infty) g \cos(2\pi - \theta), \quad -\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_v + S_v = (\rho - \rho_\infty) g \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)$$

상기식에 Boussinesq Approximation을 적용할 수 있으나 이는 Thermal Expansion Volumetric Coefficient β 라는 물성치가 또 필요하게 된다. 따라서 이를 적용하지 않고 ρ_∞ 를 그 당시 Calculation Domain 의 최소밀도라 보고 모델링하였다.

3.3. 물성치 구성 및 경계조건

앞에서 기술한 것과 같이 실제 원자력 발전소의 중대사고시에는 노심 공융물의 구성성분은 여러 가지로 나뉘어 진다. 가장 중요한 것으로는 핵연료 펠렛인 UO_2 , 핵연료 피복재인 Zr, 피복재의 산화물인 ZrO_2 를 들 수 있다. 이들은 각각의 구성량에 따라 혼합물의 물성치가 크게 달라지게 되며 각각의 물질에 대한 연구는 그 동안 활발히 수행되어 왔으나 이들이 혼재되어 있는 경우의 물질에 대한 물성치는 거의 연구된 바가 없다. 이에 대하여 유럽 경제연합 (OECD) 산하 NEA에서 국제 공동연구로 진행하고 있는 RASPLAV Project에서 집중적으로 연구되었다. 여기서는 이 결과를 이용하였다. 경계조건으로 상부는 Isothermal Condition으로 가정하였고 하부측은 유체로 열이 전달되는 것으로 모사하여 열전달 상수 및 유체온도를 입력조건으로 할당하였다.

3.4. 수치해법

비정상 유동과 에너지 수송, 난류를 포함하는 식을 풀기 위해 Patankar에 의해 제안된 제어체적기법 (control-volume technique)에 기반을 둔 수치해법을 채택하였다. 이 해법은 Patankar에 의해 자세히 기술되었다. 대상이 되는 영역은 제어체적의 표면을 형성하는 격자선에 의해 구분되어진 각각의 제어체적으로 나누어진다. 주요 격자점은 각 주요 제어체적의 중심에 위치하고 압력을 포함한 스칼라 미지수 값들은 주요 격자점에 각각 모이게 된다. 각 격자점에서 변수들의 값에 대한 차분방정식은 전체 영역에 대해 각 제어체적에 대해 모든 합은 보존되어야 한다. Patankar에 의해 제안된 멱승법칙(power law profile)은 제어체적을 통과해 가로지르는 속(flux)을 얻기 위하여 사용되어진다. 이 연구에서는 암시시간 간격이 비정상흐름의 계산에 사용되었다. 수치적 기법의 또하나의 특징은 구분된 속도분포를 구하기 위해 엇갈린 격자(staggered grid)를 사용하는데 그것은 압력장에서 서양장기판 모양의 압력장의 발생을 피하기 위한 것이다. 그리하여 속도에 대한 제어체적은 주제어체적에 대해 엇갈리게 된다. 상호의존하는 차분화식, 운동량, 연속방정식, 난류, 에너지식은 정상과 비정상의 각 시간 간격에 대해 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 해를 얻게 된다. 주어진 변수에 대한 차분방정식의 해는 선순법(line-by-line procedure)을 사용하여 풀게 된다. 또한 고온의 용융코름과 저온의 경계에서의 열전달로 용융점아래로 코름의 온도가 떨어졌을때 크러스트 생성시 대류가 전도로 열전달 형태가 바뀌므로 이를 반영하기 위하여 수치적인 방법으로 점도를 무한히 크게함으로써 묘사가 가능하다.

제 4 장 결 과

본 연구에서 수행된 계산의 종류와 중요가정은 표 1 과 같다. 여기서는 실제 Corium의 열 발생량, 외부냉각시 열전달 상수 등에 대한 정보를 아직은 취득하기 어렵고 또한 본연구의 목적은 전산코드의 하부헤드 모델링에 대한 능력을 입증하기 위함임으로 임의의 경계조건 및 초기조건을 가지고 분석을 수행하였다.

4.1 정상상태

본 연구에서 다루고자 하는 유동의 상태는 층류 (Laminar) 와 난류 (Turbulence) 의 경계부분으로서 난류모델을 반영하지 않았기 때문에 발산할 가능성이 높다. 따라서 Relaxation Factor를 조절하여 계산을 수행하였다. 또한 Iteration 1000회까지는 수렴된 해를 보여주지 못하였고 2000회에 도달해서야 수

렴된 모습을 보여주었다.

우선, 자연대류 속도분포 (Natural Circulation Velocity Distribution) 에서 보면 일반적인 물리학적 현상을 이용하여 예측할 수 있는 상태로 결과가 도출되었다. 즉, 반구형 Sliced Geometry 하에서 Volume 자체에 열원을 가지고 있는 높은 점도의 유체에서는 열제거원이 없는 부분에서의 유동이 중력 방향으로 형성되며 상대적인 밀도차이에 의하여 뜨거운 부분의 유동이 중력 반대 방향으로 형성될 것이라는 것을 쉽게 예측을 할 수 있다. 그림 1에서 보여주는 것과 같이 중앙부위의 유동이 상승하며 좌우 측의 유동은 하강하는 것을 보여주고 있다. 이것은 실제 물리적인 예측과 계산결과가 일치하는 것을 보여주고 있다.

다음으로 자연대류에서 또 하나의 중요한 변수로 볼 수 있는 것은 온도이다. 자연대류시의 유동을 발생시키는 주 원인은 온도차이에 의한 중력이 속도차이라 볼 수 있기 때문에 온도장의 분포가 속도장을 결정한다고 볼 수 있다. 반대로 역시 속도장 또한 온도장에 영향을 미치기 때문에 서로 밀접한 관련이 있다. 계산결과 온도장은 속도분포를 예측할 수 있는 분포를 보이며 이는 실제 현상과 가까운 것으로 판단된다. 또한 상부가 가장 뜨거운 부분으로 나타났으며 이는 원자로 용기 제작과정에서 볼 때 원통형 용기와 반구형 용기를 따로이 제작하여 용접을 하는 부위로서 어느 부분 보다도 열응력이 남아 있기 쉬운 부분이 된다. 따라서 이 부분에 고온의 물질이 닿게 되면 원자로 용기 하부헤드 전체 파손 (Global Failure) 이 발생할 가능성도 있으리라 판단된다.

4.2. 고화 (Solidification)

본 연구에서는 고체를 점성이 무한대로 커져서 유동이 거의 없는 상태로 모델링을 하였으므로 기본 식내에 고화와 관련된 특정한 항을 삽입하거나 고화와 관련된 실험식을 사용하지 않고 고화온도 이하로 내려가는 제어체적 내의 물성치를 고체의 것으로 할당하여 계산을 수행하여 보았다. 여기서 고체의 점도는 1.E30으로 할당하였다.

Time Step 1.E10 초 및 2000번의 Iteration으로 정상상태를 모의하였고 이 이후 추가로 Time Step 1.E0 초 및 4000회의 Iteration 으로 계산을 수행하였다. 좀 더 빠른 수렴을 위하여 TDMA Iteration 횟수를 6번씩 100회 (NTIMES =100) 로 설정하였다, 표 2에서는 각 Iteration 별로 중심 제어체적의 온도 분포에 대한 수치를 표시하였고 그림 2 ~ 4 에서는 시간 (Iteration) 이 지남에 따른 유체 및 고체의 생성 거동을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 정상상태 종료시의 그림인 4.1에서는 적절한 거동을 보여주고 있으나 시간이 지남에 따라 결과가 물리적으로 적합치 못하게 좌우 대칭성이 이루어지지 않는 등의 상대적이 편차를 보여주고 있다. 실제로 확인할 방법은 없으나 고체와 액체사이의 유동면에서 발생한 어려도 한 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 현상은 물성치를 자세히 반영하고 기본식 내에 고화와 관련된 특정한 항을 삽입하거나 고화와 관련된 실험식을 사용할 경우 개선의 여지가 있을 것으로 판단된다.

냉각의 관점에서 보면 실제 물리적인 크기나 온도등을 고려하여 작성된 경계조건을 사용하지 않았기 때문에 좀더 자세한 연구를 필요로 하지만 외부의 냉각만에 의하여 온도를 감소시키는 것은 가능할 것으로 판단되나 원자로용기 하부헤드 자체 구조물의 건전성이 유지되어야 하는 전제조건이 필요할 것으로 판단된다. 또한 장기 냉각관점에서 보면 외부에서 각질층 (Crust)를 통한 냉각은 한계가 있어서 냉각이 쉽지 않을 것으로 판단된다. 즉, 외부 냉각만으로는 노심공용물의 열 전도도가 지극히 나쁘기 때문에 장기적인 관점에서 제대로 냉각이 수행기 힘들기 때문에 내부로의 냉각수 주입도 역시 고려하여 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 수렴이 적절히 이루어지지 않는 현상도 발견되었고 이에 대한 연구도 추가로 필요할 것으로 판단되었다.

4.3. 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)

가. Grid Size 민감도 분석

본 연구에서는 고화와 용융을 제어체적 전체가 변동되는 것으로 모델링을 하였기 때문에 가능한 한 자세히 Grid를 세분화하는 것이 바람직할 것으로 판단되었으나 계산시간에 대한 제약 때문에 앞에서 기술한 계산들은 30X30을 이용하였다. 본 연구에서는 시간적인 제약 때문에 100X100 에 대한 계산을 정상상태 및 Transient 에 대하여 한번 계산을 수행하였다. 계산결과는 정상상태에 대하여는 그림 5,6에 제시되어 있고 Transient 1000회 Iteration 후의 결과는 그림 7,8에 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Transient Symmetry 는 Grid 가 조밀할 때 잘 맞는 것을 보여주고 있으며 따라서 정상적인 거동을 세밀하게 보기 위하여는 100X100 정도의 Grid 가 필요할 것으로 판단되나 계산시간이 지나치게 오래 걸린다. 앞의 30X30 Grid에 7000회의 Iteration에 2시간이 소요되었고 8000회 Iteration 을 위하여 개인용 컴퓨터로 약 24시간이 걸렸다. 추후 이 부분에 대한 적절한 Grid 설정을 위한 민감도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

나. Block Correlation 민감도 분석

Block Correlation을 사용하였을 경우 Relaxation Factor를 1 ~ 0.01 사이에서 조절하여 보았으나 모두 발산하였다. 따라서 본 연구에서는 Block Correlation을 사용하지 않고 계산을 수행하였다.

다. Relaxation Factor 민감도 분석

Block Correlation을 사용하지 않았음에도 불구하고 Relaxation Factor 0.2 이상일 경우 결과가 100회 Iteration 이후부터 발산을 하였다. 따라서 이 계산에서의 Relaxation Factor 는 모든 식에 대하여 0.1을 적용하여 계산을 수행하였다.

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 중대사고시 하부헤드로 재배치된 노심공용물의 거동중 자연대류 및 고화에 대하여 특별한 모델을 사용하지 않고 일반적인 유체역학적인 방법을 통하여 수치적으로 모의하여 보았다. 계산 결과 자연대류의 거동은 적절한 것으로 나타났고 상부가 가장 뜨거운 부분으로 나타났다. 이는 원자로 용기 제작과정에서 불 때 원통형 용기와 반구형 용기를 따로 제작하여 용접을 하는 부위로서 어느 부분 보다도 열용력이 남아 있기 쉬운 부분이 된다. 따라서 이 부분에 고온의 물질이 닿게 되면 원자로 용기 하부헤드 전체 파손 (Global Failure) 이 발생할 가능성도 있으리라 판단되었다. 고화과정은 비교적 물리적으로 합당한 결과를 보여주고 있으나 이것은 Grid 가 조밀하지 못하며 물성치의 부정확성 때문에 발생하는 적절치 못한 현상이라 판단된다. 이러한 현상은 물성치를 자세히 모델링하고 기본식 내에 고화와 관련된 특정한 항을 삽입하거나 고화와 관련된 실험식을 사용할 경우 개선의 여지가 있을 것으로 판단된다. 또한 수렴속도를 개선하기 위하여 난류모델의 필요성 등에 대한 검토가 요구되었다.

참고문헌

[1] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," 1980
 [2] Jae-Heon Lee, "A Lecture Note Featuring the General Purpose Computer Program for Two-Dimensional Elliptic Situation," 1994.
 [3] 김인구, 조용진, "OECD NEA RASPLAV 국제공동연구과제 Program Review Group Meeting 및 Management Board Meeting 참가 출장보고서," KINS/DR-174, May, 1995. ·
 [4] S.Abalin, et al, "RASPLAV Experimental Complex Engineering System Description (Topical Report), RP-TR-1, RRC KI, January 1995
 [5] V.V.Vlasov, et al, "Metal Melts Formation and Its Interactions with Vessel Steel of WWER Type Reactor," RP-TR-2, RRC KI, January 1995
 [6] Lev Volokhonsky, et al, "RASPLAV-B Experimental Section Feasibility Study Main Results (Topical Report)," RP-TR-3, RRC KI, January 1995
 [7] S.Abalin, et al, "RASPLAV-A-Salt Facility Selection and Justification of Design Parameters, Engineering Calculation and Design Implementation, Program of Planned Experiments," RP-TR-4, RRC KI, January 1995
 [8] V.Strizhov, et al, "Mathematical Modeling and Analysis of RASPLAV Project Installations," RP-TR-5, RRC KI, January, 1995
 [9] V.Strizhov, et al, "RASPLAV-A Facility Feasibility Study Summary Report, Volume I, II, III," RRC KI, January 1995
 [10] NUREG-1265, "Uncertainty Papers on Severe Accident Source Terms," NRC, May 1987.
 [11] Chris M.Allison, et al, "SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, Volume I, II, III," NUREG/CR-5273, EGG-2555, June 1989.
 [12] "Westinghouse Annual Report to United States Department of Energy for Technology Programs in Support of Advanced Light Water Reactors," Westinghouse, DE-AC03-86SF16038, September, 1987.

표 1. 수행된 계산의 종류 및 가정

표 2. 전체계산경우별 일부 제어체적 온도분포 (30X30)

| Case | Grid No. | Iteration No. | Time Step (s) | Relax. | Remarks. | Itrs. | Time (s) | T(15,1) | T(15,5) | T(15,10) | T(15,15) | T(15,20) | T(15,25) | T(15,30) |
|----------------------------|----------|-------------------------------|---|--------|----------|-------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Steady State | 30X30 | 2000 | 1.E30 | 0.1 | | 2000 | S/S (0.) | 2800 | 2780 | 2780 | 2780 | 2780 | 2780 | 753 |
| Transient (Solidification) | 30X30 | S/S : 2000 Transient: 5000 | S/S : 1.E30 Transient: 1.E1 Final : 1.E30 | 0.1 | | 3000 | 10000 | 1940 | 2740 | 2740 | 2730 | 2710 | 1300. | 49.5 |
| | | | | | | 4000 | 20000 | 1310 | 2690 | 2690 | 2650 | 2650 | 1170 | 45.6 |
| | | | | | | 6000 | 30000 | 1050 | 2650 | 2650 | 2640 | 2620 | 1040 | 43.2 |
| Large Grid | 100X100 | S/S : 7000 Transient: 1000 | S/S : 1.E30 Transient: 1.E1 | 0.1 | | 7000 | S/S | 859 | 2580 | 2580 | 2580 | 2240 | 863 | 39.5 |

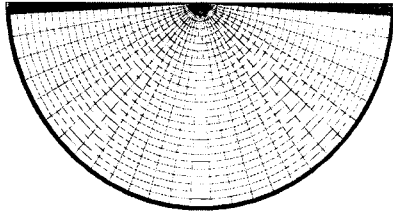


그림 1. 정상상태 Temperature Contour

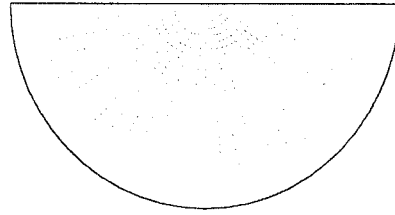


그림 2. 정상상태 Velocity Vector Plot

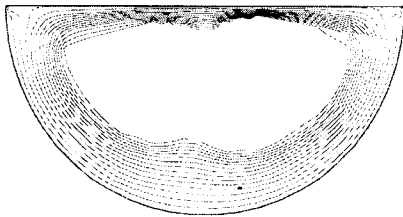


그림 3. 외부냉각시 Temperature Contour

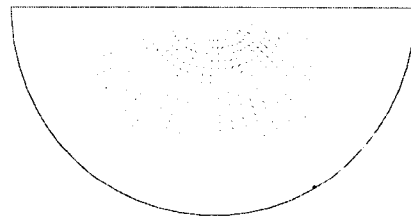


그림 4. 외부냉각시 Velocity Vector Plot

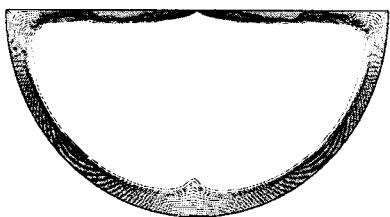


그림 5. 외부냉각시 Temperature Contour
(100 X 100)

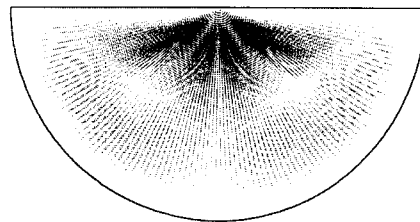


그림 6. 외부냉각시 Velocity Vector Plot
(100 X 100)