



# 원자로 노심 용융물의 고압분출 및 비산 현상에 대한 수치해석적 연구

김 종 태,<sup>\*1</sup> 김 상 백,<sup>2</sup> 김 희 동,<sup>2</sup> 정 재 식<sup>3</sup>

## MOLTEN CORIUM DISPERSION DURING HYPOTHETICAL HIGH-PRESSURE ACCIDENTS IN A NUCLEAR POWER PLANT

Jongtae Kim,<sup>\*1</sup> Sang-Baik Kim,<sup>2</sup> Hee-Dong Kim<sup>2</sup> and Jae-Sik Jeong<sup>3</sup>

*During a hypothetical high-pressure accident in a nuclear power plant (NPP), molten corium can be ejected through a breach of a reactor pressure vessel (RPV) and dispersed by a following jet of a high-pressure steam in the RPV. The dispersed corium is fragmented into smaller droplets in a reactor cavity of the NPP by the steam jet and released into other compartments of the NPP by a overpressure in the cavity. The fragments of the corium transfer thermal energy to the ambient air in the containment or interact chemically with steam and generate hydrogen which may be burnt in the containment. The thermal loads from the ejected molten corium on the containment which is called direct containment heating (DCH) can threaten the integrity of the containment. DCH in a NPP containment is related to many physical phenomena such as multi-phase hydrodynamics, thermodynamics and chemical process. In the evaluation of the DCH load, the melt dispersion rates depending on the RPV pressure are the most important parameter. Mostly, DCH was evaluated by using lumped-analysis codes with some correlations obtained from experiments for the dispersion rates. In this study, MC3D code was used to evaluate the dispersion rates in the APR1400 NPP during the high-pressure accidents. MC3D is a two-phase analysis code based on Eulerian four-fields for melt jet, melt droplets, gas and water. The dispersion rates of the corium melt depending on the RPV pressure were obtained from the MC3D analyses and the values specific to the APR1400 cavity geometry were compared to a currently available correlation.*

**Key Words** : 용융물 고압분출(High-pressure Melt Ejection, HPME), 원자로건물 직접가열(Direct Containment Heating, DCH), 이상유동(Two-phase Flow), 이산율(Dispersion rate), 오일러 해석방법(Eulerian Method)

### 1. 서 론

가압경수로형 원자로에서 가상(hypothetical)의 중대사고(severe accident)가 발생하면 노심 열제거 능력을 상실하여 노심용융사고로 이어진다. 더욱이 노심용융물(corium)에서 발생하는 붕괴열(decay heat)을 적절히 제거하지 못하면 원자로의 파손에 이르게 되며 이 때 원자로 감압(depressurization)이 제대로 이루어지지 않으면 원자로 파손부를 통하여 노심 용융물이 고압으로 분출(high pressure melt ejection)되는 사고가 발

생한다. 이렇게 고압으로 분출된 용융물은 연이어 분출되는 고속의 수증기 분출에 의하여 용융물 액적으로 분산되며 이렇게 만들어진 액적들이 수증기에 실려 다른 격실(compartment)로 이동하게 된다. 용융물은 입자화된 후에도 여전히 높은 온도를 유지하기 때문에 원자로건물(containment)에 존재하는 수증기와 급격한 산화반응을 통해 수소를 발생시킨다. 입자들의 높은 온도에 의하여 수소연소까지 이르면 원자로건물은 높은 열/압력 부하를 받게 되며 결국 원자로건물의 파손에 이를 수 있다.

이와 같이 원자로의 고압 사고 시 노심 용융물의 분출에서 수소연소까지 이르는 현상을 DCH(direct containment heat)이라 부르며 DCH 현상에 대한 규명, DCH 발생 시 원자로건물의 건전성 평가를 위하여 과거에 많은 연구가 이루어졌다[1].

DCH 현상에 대한 이해와 원자로건물의 캐비티 구조에 따

1 정회원, 한국원자력연구원, 열수력안전연구부

2 비회원, 한국원자력연구원, 열수력안전연구부

3 비회원, 한국전력기술주식회사

\* Corresponding author, E-mail: ex-kjt@kaeri.re.kr



른 용융물의 입자화율을 평가하기 위한 많은 실험이 이루어졌으며 이를 통하여 여러 상관식이 개발되었다 DCH에 대한 원자로건물의 건전성 평가를 위하여 1-cell 혹은 2-cell 모델[2]을 이용하여 수많은 사고 조건에 대한 해석을 수행하였다 국내에서도 가동중 원전에 대한 원자로 캐비티의 용융물 입자나포(capturing) 특성 및 상부 격실로 이송된 용융물 액적의 양을 평가하는 실험[3,4]이 수행된 바 있으며 이를 이용한 상관식 개발도 이루어졌다

최근에는 DCH 현상에 대한 다차원 수치해석을 통하여 좀더 정량적인 결과를 얻고자 노력하고 있다 기존의 축소 모델을 이용한 DCH 실험이나 이를 이용한 상관식 등은 최근에 개발된 실험경수로인 APR1400과 같이 복잡한 형상의 캐비티 구조를 가지는 원자로건물에서의 DCH 평가를 위하여 사용하는 데는 많은 불확실성을 가지고 있거나 혹은 매우 보수적인 결과를 얻을 수밖에 없다

본 연구에서는 MC3D [5]코드를 이용하여 APR1400의 원자로건물 캐비티에서의 용융물의 이산화(dispersion) 현상을 수치 해석하였다. 원자로 캐비티 구조의 모델링과 용융물의 이산화 관련 모델의 평가를 위하여 영광 3&4호기 원자로 캐비티에 대한 DCH 실험을 해석하여 그 결과를 비교하였으며 이를 바탕으로 APR1400에서의 고압사고시 원자로 파손압력에 따른 용융물의 이산율에 대한 수치계산을 수행하였으며 계산에서 얻어진 용융물의 이산율을 기존의 실험 상관식과 비교하였다

## 2. 수치 해법

MC3D는 원자로 안전해석을 위한 다상유동(multiphase flow) 해석 코드로서 프랑스의 CEA, EDF, IRSN이 중심이 되어 약 15년 동안 개진이 되어 버전 3.5가 사용되고 있으며 버전 3.6이 검증단계에 있다. MC3D는 정렬격자에 기반하여 지배방정식을 이산화(discretization)하며 직각(cartesian) 격자, 혹은 원통(cylinder) 격자를 사용할 수 있다. 각 상(phase)의 질량, 운동량 그리고 에너지의 보존방정식은 Euler 관점에 기초한다

### 2.1 지배방정식

원자로 파손시 노심용융물과 수증기의 분출과 원자로 캐비티에서 용융물의 비산 현상에 참여하는 유체는 용융물 수증기, 공기 그리고 물이며 이 유체는 연속상 분산상 등 여러 형태로 존재한다. 원자로 고압사고시 캐비티 내에 물이 없는 경우(dry cavity)가 용융물의 비산을 더욱 증가시켜 DCH 관점에서 더 가혹한 경우이므로 본 연구에서는 사고초기에 캐비티 내에 물이 없는 경우에 대해서만 해석을 수행하였으나 MC3D 코드에서는 물을 해석대상 유체의 하나로 포함하고 있으므로 여기서는 물을 포함한 4개의 유체에 대한 지배방정식

을 기술한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = S_{\alpha_k} \quad (1)$$

식 (1)은 k-상에 대한 연속방정식으로 MC3D는 기본적으로 연속 용융물(melt jet), 용융물 액적(melt droplets), 물, 그리고 기체의 4개의 상을 고려한다. 기체상에서 수증기와 공기 혹은 다른 비유축성 기체의 질량은 기체 상(gas species)의 질량분율 방정식을 풀어서 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) = & -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_k \mathbf{T}_k) \\ & + \alpha_k \rho_k \vec{g} + \mathbf{M}_k^{mass} + \mathbf{M}_k^{drag} + \mathbf{M}_k^{VM} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \vec{u}_k) - \nabla \cdot (\alpha_k \vec{q}_k) \\ = \alpha_k \mathbf{T}_k : \nabla \vec{u}_k + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha_k \vec{u}_k \cdot \nabla p + I_k + \alpha_k Q'' \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 k-상에 대한 운동량방정식과 에너지방정식으로 4개의 상에 대하여 적용된다.

연속상의 용융물에서 이산된 액적은 기체와의 상호작용으로 더 작은 액적으로 잘게 나뉘어지며 이에 따른 액적의 크기 분포는 다음과 같은 계면면적수송방정식을 통하여 얻는다

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot A \vec{V}_d = & \Gamma_{A, \rho} + \Gamma_{A, drop \rightarrow drop} + \Gamma_{A, jet} \\ & + \Gamma_{A, drop \rightarrow cont} + \Gamma_{A, drop \rightarrow frag} \end{aligned} \quad (4)$$

### 2.2 액적 이산 모델

원자로 파손부를 통하여 분출된 용융물은 수증기와 운동량 전달을 통하여 입자화된다. MC3D에서는 용융물이 입자화되는 현상을 2개의 단계로 모델링한다. 첫 번째 단계는 연속체 형태의 용융물의 자유표면에서 기체의 상대적 운동에 의하여 만들어지는 용융물의 자유표면의 불안정성(instability)에 기인하며 MC3D 코드에서는 Kelvin-Helmholtz 불안정성 모델을 이용한다.

$$\begin{aligned} \Gamma_j = N_j c_i \\ c_i = \frac{1}{\rho_j + \rho_{amb}} \sqrt{\rho_j \rho_{amb} (V_j V_{amb})^2 - \sigma k (\rho_j + \rho_{amb})} \Big|_{k=k_{max}} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 Kelvin-Helmholtz 모델을 적용하기 위하여 용융물의 자유표면을 PLIC 기법을 이용하여 재구성한다

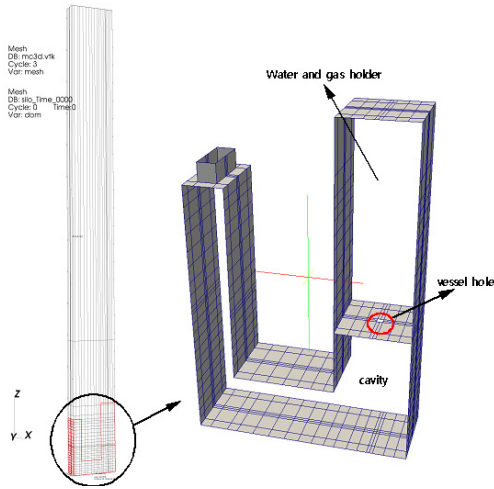


Fig. 1 Mesh of the simplified 1/30 scale YGN 3&4 cavity

이렇게 용융물에서 생성된 액적들은 두 번째의 Rayleigh-Taylor 불안정성 모델에 의해 더 작은 액적으로 쪼개진다

$$\Gamma_{A,drop \rightarrow drop} = -\frac{6\alpha}{D^2} dD/dt$$

$$= C_0 \frac{A}{D} \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_f}} \cdot \|\vec{V}_d - \vec{V}_c\| \cdot f_1(We) \cdot f_2(We) \quad (6)$$

$$C_0 = 0.245$$

### 3. 영광3&4 호기에 대한 DCH 실험 해석

#### 3.1 영광3&4호기 DCH 실험

국내에 가동 중인 원전의 원자로 캐비티에 대하여 원자로 용융물의 고압분출 사고 시 DCH에 직접적인 인자인 용융물의 이산화물(입자화물)에 대한 실험적 연구가 90년대에 이루어졌다. 특히 1/30 축소된 영광3&4호기의 원자로 캐비티 모형을 이용하여 원자로 압력용기 파단부의 직경이 용융물의 이산화물에 미치는 영향을 분석하였다[6]. 이 실험에서 원자로용기의 고압기체로 질소를 사용하였으며 용융물의 상사물로 물을 사용하였다. 용융물의 입자화물에 영향을 미치는 캐비티 구조의 파라미터로서 캐비티의 유로단면적(AR)과 원자로 파단부에서 캐비티 출구까지 입자가 비행할 수 있는 거리인 비행거리 (flight length, LP)를 선정하였으며 이 파라미터가 입자화물에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 영광3&4호기의 1/30 축소 원자로 캐비티 모형을 단순화하여 실험을 수행하였다. 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 식 (7)과 같은 상관식을 개발하였다.

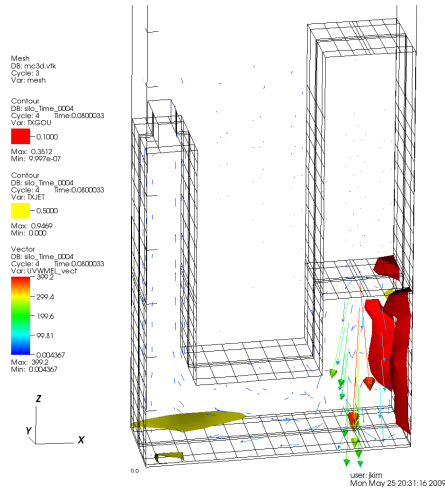


Fig. 2 Volume fractions of water and droplets and gas velocity vectors at t = 0.08 s, (p0 = 20 bar)

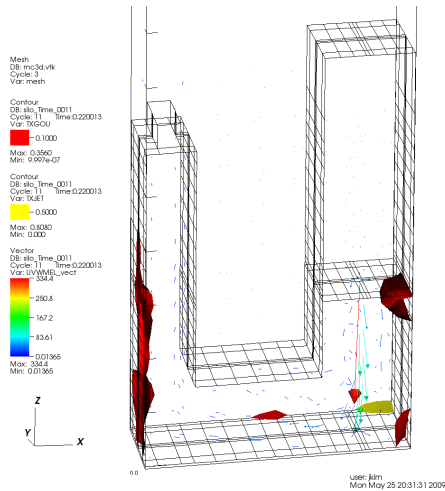


Fig. 3 Volume fractions of water and droplets and gas velocity vectors at t = 0.22 s, (p0 = 20 bar)

$$DF = 40 \left[ 1 + \tanh \left( 3.79 \log \frac{t^*}{15} \right) \right] \quad (7)$$

식 (7)의 DF는 dispersion fraction으로 초기 용융물의 양에 대한 액적형태로 이산화되어 캐비티를 이탈한 용융물의 양의 비를 나타낸다. t\*는 무차원 유효시간으로 캐비티 구조에 의해 결정되는 비행거리와 초기 압력조건에 의해 결정된다

#### 3.2 영광3&4호기 DCH실험 해석

단순화된 1/30 축적의 영광 3&4호기 원자로 캐비티에 대하

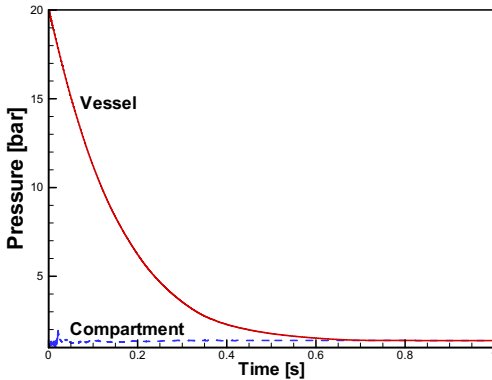


Fig. 4 Pressure-time histories in the case of initial vessel pressure of 20 bar

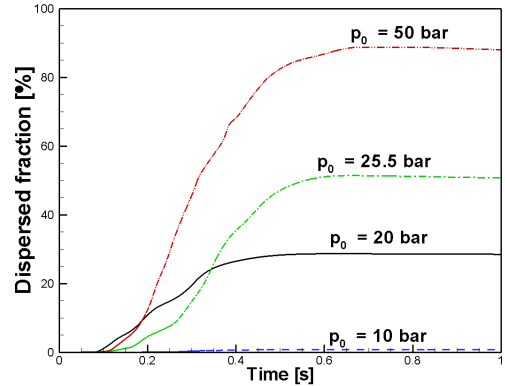


Fig. 5 Temporal dispersed fractions depending on an initial vessel pressure

여 MC3D를 이용한 용융물의 입자화현상을 해석하기 위하여 직각 격자를 사용하였다 기존의 MC3D를 이용한 DCH 해석 연구에서는 주로 프랑스의 원전인 P4와 EPR을 대상으로 하였으며 이 원전들의 캐비티 구조가 국내의 원전과 달리 원통형에 가깝기 때문에 원통형 격자를 사용하여 계산을 하였다 원통형 격자는 원자로 압력용기의 형태를 모의하기가 쉽고 또한 원자로 압력용기와 1차 차폐벽 사이의 환형유로를 모의하기에 유리하다 그리고 캐비티 구조를 적절히 단순화하고 유동의 축대칭 가정을 적용하면 2차원 해석이 가능하기 때문에 적은 수의 계산 노드를 이용하여 빠른 계산이 가능하다 그러나 국내 원전의 캐비티 구조는 원자로 압력용기의 중심축과 수직하게 원자로 바닥에서 사각단면의 용융물 통로가 길게 만들어져 있기 때문에 원통형의 격자를 사용하는 것은 오히려 계산 노드 수를 늘릴 수 있고 벽면을 모델링하기 위하여 계단(stair step) 모양의 격자가 만들어질 가능성이 높다 본 연구에서는 영광 3&4호기 원자로 캐비티의 구조를 고려하여 직각격자를 사용하였으며 Fig. 1은 영광 3&4 실험장치에 대하여 생성된 격자를 보여준다

Fig. 2는  $t = 0.08$  s에서 유동장을 보여주는 그림으로 캐비티 내의 물(용융물의 상사물)과 액적의 분포를 알 수 있다 체적분율이 0.5인 iso-surface가 수직 채널 바닥까지 밀려가 있으며 분출구 아래에서는 기체 제트에서 의하여 만들어진 액적이 오른쪽 수직 벽면을 타고 압력용기 바닥면으로 거슬러 올라가는 것을 볼 수 있다 압축기체는 분출구를 빠른 속도로 빠져나와서 캐비티 바닥면에 충돌한 후 수평통로를 지나 수직 채널의 출구를 통하여 밖으로 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 물이 분출되기 시작 0.22 초에서 유동장을 보여준다. 그림에서 액적들이 분출 기체에 의하여 좌우 벽면을 타고 올라가는 것을 알 수 있으며 캐비티의 우측 뒤 모퉁이에 물

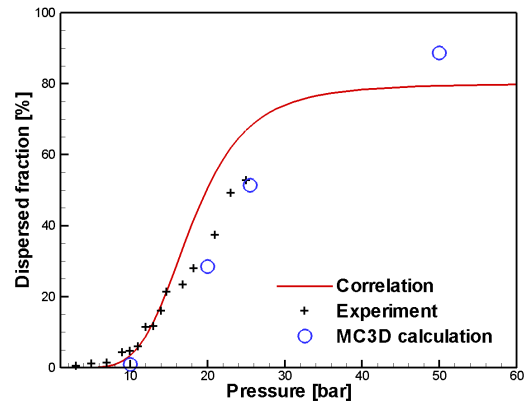


Fig. 6 Comparison of dispersed fractions depending on an initial vessel pressure for the simplified YGN 3&4 cavity model

의 체적분율이 0.5인 iso-surface가 존재하는 것으로 보아 액적들이 다시 모여(de-entrainment) 연속액상으로 변화된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 초기압력이 20 bar인 경우에 대하여 시간에 따라 압력용기 내부와 캐비티 내에서의 압력변화를 MC3D로 계산한 것이다. 초기 약 0.3 초 동안 압력용기 내 압력은 급격히 감소하고 있으며, 그 후 서서히 줄어들다가 약 0.7 초 후에는 캐비티 내 압력과 같아짐을 알 수 있다 그림에서 볼 수 있는 것처럼 단순화된 영광 3&4 모델에서는 초기압력이 20 bar인 경우에는 약 0.7 초까지 물(혹은 코륨 상사물)의 입자화가 이루어짐을 짐작할 수 있다

단순화된 영광 3&4호기의 캐비티에 대하여 압력용기 및 1차 축의 초기압력에 따라 물의 입자화율을 분석하기 위하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 10, 20, 25.5, 50 bar에 대하여 MC3D 계산을 수행하였다. 입자화율은 초기압력에 따라 매우

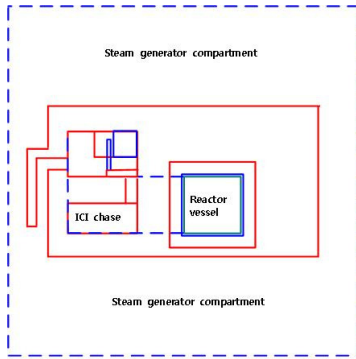


Fig. 7 Horizontal view of the modeled cavity and S/G compartment of APR1400

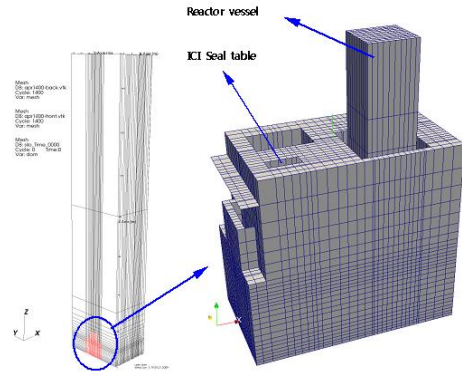


Fig. 8 Mesh generated for the DCH analysis in the cavity of APR1400 using MC3D code

다른 특성을 보이고 있으며 압력용기의 압력이 캐비티 압력과 같아질 때까지 즉 분출되는 기체 체트에 의한 입자화율이 끝나는 약 1 초 동안 시간에 따른 입자화율의 변화를 비교하였다. 여기서 입자화율은 초기 물의 부피에 대한 수직채널을 빠져나가 캐비티 밖의 격실에 모인 입자들의 총부피비를 나타낸다. 이 그림을 통하여 단순화된 영광 3&4호기의 캐비티에서는 입자화는 약 1초 내에 종결되며 초기압력에 따라 입자화율이 크게 상승하는 것으로 보인다

Fig. 6은 단순화된 영광 3&4호기의 캐비티에 대하여 압력에 따른 입자화율을 실험과 MC3D 계산 결과를 비교한 것이다. 본 계산에서 사용된 단순화된 영광 3&4호기의 캐비티에 대하여 상관식을 적용하여 Fig. 6에 나타내었다. MC3D 계산 결과는 실험 및 상관식과 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 압력용기의 초기압력이 50 bar인 경우에 MC3D 계산의 입자화율이 87 % 상관식에 비하여 다소 높게 예측되었다

#### 4. APR1400에 대한 DCH 현상 해석

##### 4.1 원자로건물 모델링

Fig. 7은 MC3D 해석을 위하여 모델링한 APR1400의 원자로 캐비티와 2차 차폐벽 내에 있는 증기발생기 격실을 포함한 해석 영역을 보여준다. ICI 수직 채널과 코륨(corium, 노심 오염물) 챔버 등은 실제 APR1400 도면을 이용하였기 때문에 치수와 형상이 동일하며 원자로와 그 주위의 환경 간극은 면적을 기준으로 모델링한 것이다. 그림의 왼쪽으로 코륨 챔버로 통하는 통로가 모델링 되어 있는 것으로 볼 수 있다. 캐비티를 제외한 증기발생기 격실과 원자로 건물의 다른 격실은 오직 압력에 의해 코륨의 입자화 현상에 영향을 미치지 때문에 원자로건물의 체적을 보존하는데 초점을 맞추어 원자로건물을 모델링하였다.

Fig. 8의 왼쪽 그림은 APR1400의 DCH 해석을 위한 전체

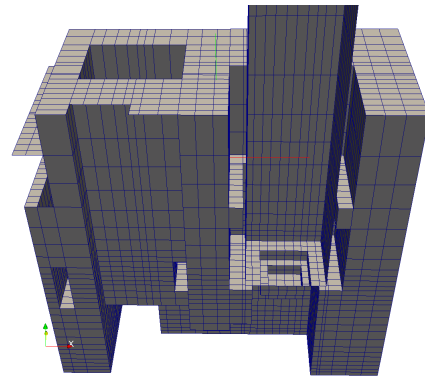


Fig. 9 Vertical cut views of the APR1400 cavity at y = 12 m

격자이며 오른쪽은 전체 해석영역의 하부에 있는 캐비티의 1차 차폐벽과 원자로를 보여주고 있다. 앞에서 언급한 것처럼 MC3D 계산에서는 캐비티 내에서 코륨 액적의 생성과 생성된 액적이 다른 격실로 이동되는 현상을 모의하는 것으로 원자로 캐비티를 빠져나간 액적이 어느 격실로 이동하고 어디에 많이 존재하는가 하는 것은 본 연구에서 다루어질 문제가 아니므로 캐비티를 제외한 다른 격실은 단지 체적만 보존하는 방식으로 구성하였다. 실제 원자로건물은 캐비티 바닥을 기준으로 높이가 약 80 m인 원통형이며 상부에는 반구형 돔으로 이루어져 있지만 여기서는 체적만을 고려하여 높이가 155 m로 모델링하였다. 높이가 실제에 비하여 매우 높아진 것은 원자로건물 내 2차 차폐벽과 원자로건물 외벽 사이의 환형격실을 무시하였기 때문이다.

Fig. 9는 모델링된 캐비티 내부 공간의 구조를 보여주기 위하여 수직방향으로 자른 단면을 보여준다. 이 그림은 y = 12 m에서 자른 면으로 아래쪽으로 캐비티가 보이며 그 위로 오른쪽에 원자로가 위치해 있다.



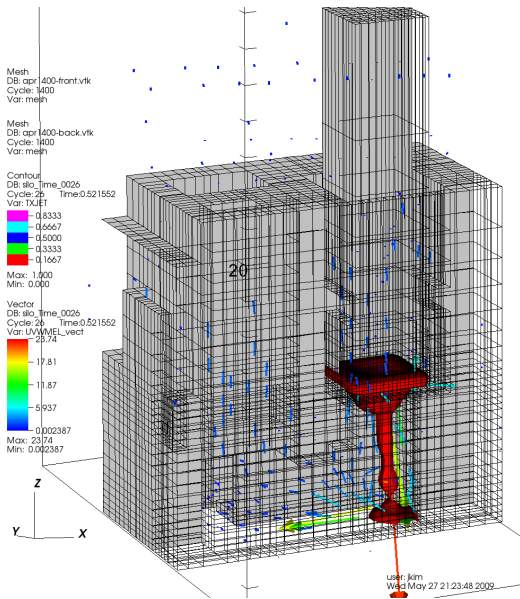


Fig. 10 Iso-surfaces of the corium jet and gas velocity vectors induced by the corium ejection at  $t=0.5s$ , ( $p_0 = 40$  bar)

#### 4.2 DCH 해석

APR1400의 캐비티 내에서 코륨의 입자화 현상에 대하여 MC3D 코드를 이용하여 해석을 수행하기 위한 원자로 압력용기 및 원자로건물의 초기조건에 대하여 기술하면 다음과 같다.

원자로용기 내에는 수증기만 존재하는 것으로 가정하였으며 온도는 1000 K로 설정하였다. 그리고 본 연구에서는 MC3D에 포함된 코륨의 물성치를 사용하였으며 코륨의 밀도는  $8000 \text{ kg/m}^3$ 이고 코륨의 용융점은 2,700 K (solidus temperature)에서 2,800 K (liquidus temperature)로 설정되어 있다. 본 계산에서는 용융물의 과열상태를 고려하지 않고 2,800 K로 설정하였다. 원자로건물의 초기조건 중에 코륨의 입자화에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자는 압력 온도, 수증기의 체적분율 등이 있다. 그러나 원자로용기의 초기압력이 커질수록 그 영향은 줄어들게 된다. 본 계산에서 사용된 원자로건물 내의 압력은 2 bar, 온도는 393 K, 그리고 수증기는 20 vol%로 설정하였다.

코륨의 입자화율에 가장 직접적으로 영향을 미치는 인자는 원자로 파손부의 크기(직경), 원자로용기의 초기압력이다. 파손부의 크기는 격자의 크기 및 계산에 걸리는 시간과 밀접한 관계를 가지고 있다. 파손부의 크기를 작게 하면 그만큼 격자의 수가 늘어나고 수치안정성(CFL)에 의하여 계산 시간이 크게 증가한다. 또한 코륨의 입자화율의 관점에서 볼 때 원자로 파손부의 크기가 크면 분출되는 수증기의 질량유량이 증

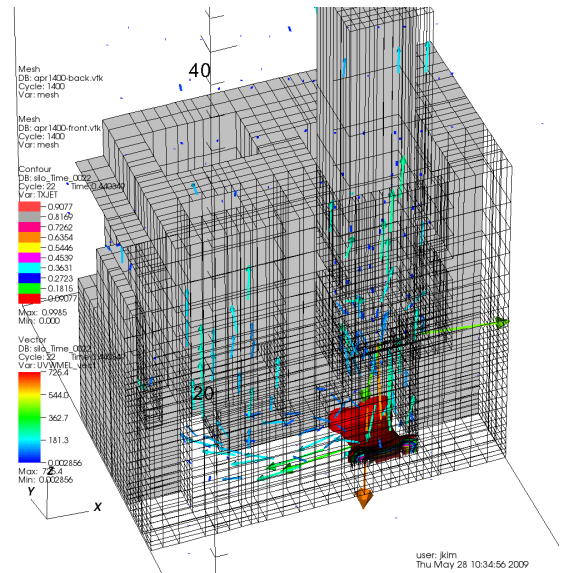


Fig. 11 Iso-surfaces of the corium jet and gas velocity vectors at  $t=0.44s$ , ( $p_0 = 20$  bar)

가하게 되어 코륨의 입자화율이 증가한다. 원자로 파손부의 크기에 따른 입자화율의 의존성은 향후 연구업무로 미루고 여기서는 대표적인 케이스로 파손부의 직경면적기준 환산이 0.6 m, 1.2 m인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 기존 연구에 의하면 원자로의 초기압력은 코륨의 입자화율에 가장 민감한 인자이고 압력이 증가하면 입자화율이 급격히 증가하여 80% ~ 90%까지 접근한다. 본 연구에서는 원자로 내 압력을 변화해가면서 APR1400의 캐비티에서 코륨의 입자화율을 평가하고자 하였다.

캐비티에서 주위의 격실로 연결된 유로는 앞에서 언급한 바와 같이 원자로 압력용기와 1차 차폐벽 사이의 환형유로, ICI 채널 출구부, 그리고 코륨 챔버의 통로 등이다. 본 계산에서는 ICI 채널의 출구에 설치된 ICI seal table이 파손된다고 가정하여 출구를 완전히 개방하였으며 코륨 챔버로 접근하는 통로의 천정에 있는 댄퍼도 완전히 개방되는 것으로 가정하였다. 그리고 원자로 압력용기를 둘러싸는 1차 차폐벽에는 RCSS (reactor cavity streaming shield)가 2층 구조로 원자로 용기를 둘러싸고 있다. 여기서는 고온관저온관의 아래에 있는 RCSS를 모의하여 유로 면적을 실제 설계와 맞게 모델링하였다.

첫 번째로 원자로 파손 후 코륨 분출을 포함하여 수증기의 분출로 인한 코륨의 입자화를 모의하기 위하여 원자로 내에 부피로  $19.45 \text{ m}^3$  (155.6 ton)의 코륨을 채우고 계산을 하였다. 원자로 파손부에 대해, 위치는 하반구의 가장 아래이며 파손 직경은 0.6 m로 가정하였다. Fig. 10은 원자로 파손 0.5 초 후

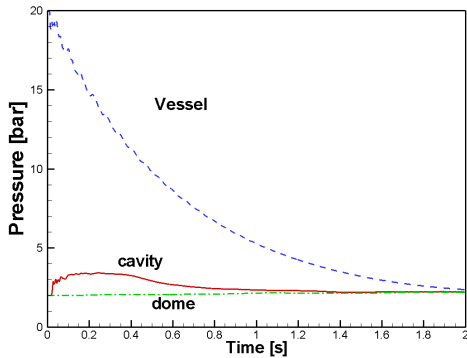


Fig. 12 Pressure-time histories in the case of initial vessel pressure of 20 bar

원자로와 캐비티 내에서 코륨의 체적분율에 대한 등가면(iso-surface)을 나타낸 것으로 원자로의 파손부를 통하여 코륨이 분출되고 있는 것을 알 수 있다. 이 시점에서는 아직 코륨만 분출되고 있으며 수증기는 아직 방출되지 않고 있다. 그림에 보이는 속도 벡터는 코륨 제트에 의하여 유도된 캐비티 내 공기의 흐름을 나타내고 있다.

코륨의 분출과정을 MC3D로 모의하는 것은 매우 작은 시간 간격( $1 \times 10^{-6}$  이하)이 요구되었으며 또한 수치적으로 매우 불안정하였다. 고압에 의하여 분출되는 코륨 제트는 캐비티 바닥에 충돌(impingement)하면서 비산(splashing)하게 되는데 이 현상을 수치적으로 모의하기 위해서는 매우 조밀한 격자가 요구된다. 또한 제트의 충돌에 의해 만들어진 액적들은 매우 커서 대부분 중력에 의하여 바닥의 제트에 합쳐지게 (agglomeration) 되기 때문에 코륨이 미세한 액적 형태로 원자로 캐비티를 이탈하는 이산물에 미치는 영향은 매우 작다.

코륨의 분출현상에 대한 해석은 향후 연구로 미루고 여기서는 캐비티 바닥에 코륨을 재배치하는 방법으로 코륨의 입자화 현상을 모의하기로 한다.

캐비티 바닥에 코륨을 재배치하여 원자로 압력용기의 초기 압력 20 bar에서 MC3D 계산을 수행하였다. Fig. 11은 원자로 파손부를 통하여 수증기가 분출되기 시작한지 0.44 초 후에 캐비티에서의 기체(수증기와 캐비티에 존재한 공기의 혼합기체)의 속도분포와 캐비티 바닥에 있는 코륨의 거동을 코륨의 체적분율 등가면(iso-surface)을 이용하여 가시화하였다. 캐비티에서 주위의 격실로 연결된 유로는 앞에서 언급한 바와 같이 원자로 압력용기와 1차 차폐벽 사이의 환형유로, ICI 채널 출구부, 그리고 코륨 챔버의 통로 등이다. Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 코륨 챔버로 접근하는 통로, ICI의 채널 끝 출구, 그리고 원자로 환형 유로를 통하여 유동이 형성됨을 속도벡터를 통하여 알 수 있다.

Fig. 12는 시간에 따라 원자로, 캐비티, 그리고 원자로건물

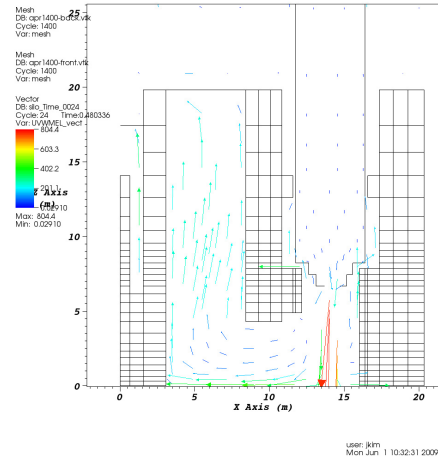


Fig. 13 Velocity vectors of the gas mixture on the surface of  $y = 13.8$  m at  $t = 0.48$  s

에서의 압력변화를 보여주고 있다. 원자로용기 내의 압력은 초기의 20 bar에서 수증기가 파단부를 통하여 분출됨에 따라 압력이 감소하고 있으며 캐비티 중심에서의 압력은 초기에 약 3.5 bar까지 상승하였다가 서서히 내려간다. 수증기의 분출이 시작되고 2초가 지나면 원자로용기의 압력이 원자로건물의 압력과 같아지면서 수증기의 분출도 사라지게 된다.

원자로 내 초기압력을 40 bar로 설정하여 계산을 수행하였다. Fig. 13은  $t = 0.48$  s에서 원자로를 중심으로 x-z 방향으로 자른 단면에서의 기체 속도 분포를 보여주고 있다. APR1400의 캐비티 및 1차 차폐벽을 모델링하는 부분에서 언급한 것처럼 MC3D의 해석을 용이하게 하기 위하여 원자로의 위치를 약간 아래로 이동하여 모델링하였다. 그림에서 보는 바와 같이 원자로 하반구의 파단부를 통하여 고압의 수증기가 방출되고 이것은 캐비티 내부의 공기를 밀어내면서 ICI 채널과 코륨 챔버를 통하여 원자로건물 상부 격실로 배출된다. Fig. 13의 단면 위치에서는 ICI 채널의 출구가 보이지 않기 때문에 ICI 채널에서 수증기가 배출되는 것을 볼 수 없으나 그림의 가장 왼쪽에 있는 코륨 챔버의 출구를 통하여 수증기가 배출되는 것을 볼 수 있다.

ICI 채널과 코륨 챔버에서의 유동 특성을 보여주기 위하여 그 영역을 절단하여 내부의 기체 속도장과 입자화된 코륨 액적의 체적분율 1%인 등가면을 Fig. 14에서 보여주고 있다. 그림에 볼 수 있는 것처럼 캐비티를 지나면서 유동이 코륨 챔버와 ICI 채널쪽으로 분산된 것을 알 수 있다. 특히 원자로에서 수증기가 분출되기 시작한 지 2 초 후에도 많은 코륨의 액적들이 여전히 캐비티 바닥에 머물러 있는 것을 볼 수 있다. APR1400에 대해 대하여 원자로 파손 시 원자로 초기 압력에

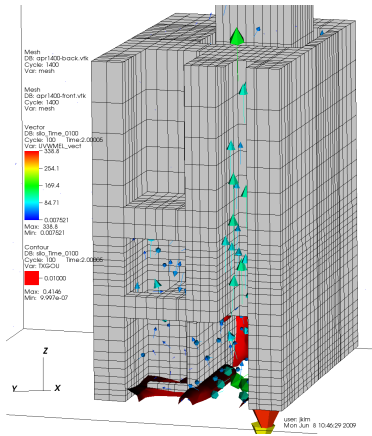


Fig. 14 Volume fraction iso-surfaces of the dispersed corium droplets and gas velocity vectors at  $t = 2.0$  s, ( $p_0 = 40$  bar)

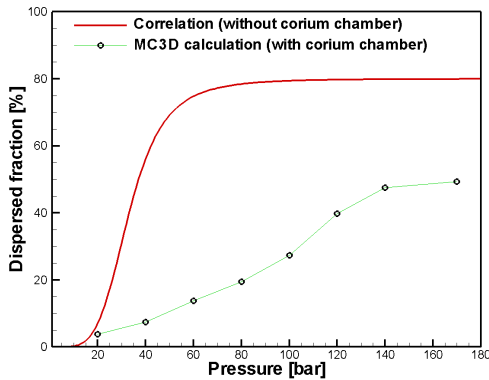


Fig. 15 Comparison of dispersed fractions depending on an initial vessel pressure for the Shin-kori 3&4 cavity

다른 코륨의 입자화율에 대하여 MC3D 코드를 이용하여 해석을 수행하였다. 코륨의 입자화율에 대한 비교를 위하여 단순화된 영광 3&4의 DCH 해석에서 사용된 상관식을 APR1400에 적용하여 입자화율을 Fig. 15에 나타내었다. 참고문헌에서 개발될 상관식은 원자로건물의 캐비티 구조에 대한 인자로서 유로 단면적과 입자의 유효 비행거리만을 사용하기 때문에 APR1400에 적용된 코륨 챔버의 효과를 고려할 수 없다

Fig. 15에서는 원자로용기의 초기압력을 170 bar까지 변화시켜 가면서 코륨의 입자화율 나타내었다 앞에서 계산 결과에 대한 분석을 통하여 기술하였지만 APR1400에서는 상부 격실로 나간 코륨의 입자가 극히 작은 것으로 나타났으며 그림에서 보는 바와 같이 상관식과는 많은 차이를 보이고 있다 이것으로 보아 APR1400의 코륨 챔버는 코륨 액적이 상부 격실로 이동하는데 상당히 영향을 미치는 것으로 보인다

## 5. 결 론

신형경수로인 APR1400은 원자로의 고압사고 시 DCH에 의한 원자로건물의 파손을 방지하기 위하여 원자로 캐비티 구조에 코륨 챔버를 설치하였다 그러나 이 캐비티 구조에 대한 실험자료의 미비로 인하여 기존 원자로 캐비티 구조에서 얻어진 용융물 이산율의 상관식을 사용하여 DCH에 의한 원자로건물의 파손가능성을 평가하였다 본 연구에서는 MC3D 코드를 이용하여 APR1400의 고압사고 시 노심용융물의 이산율에 대한 수치적 평가를 수행하였으며 원자로 압력에 따른 이산율을 생산하였다 본 연구를 통하여 APR1400의 캐비티 구조는 기존 캐비티 구조에서 얻어진 이산율 상관식에 비하여 매우 낮은 이산율을 보이고 있음을 확인하였다

## 참고문헌

- [1] 1994, Pilch, M.M., Allen, M.D., Knudson, D.L., Stamps, D.W. and Tadios, E.L., "The Probability of Containment Failure by Direct Containment Heating in Zion," *NUREG/CR-6075 Supplement 1*, SAND93-1535, Sandia National Laboratories.
- [2] 1995, Pilch, M.M. et al, "The Probability of Containment Failure by Direct Containment Heating in Surry," *NUREG/CR-6109*, SAND93-2078, Sandia National Laboratories.
- [3] 1992, Kim, M.H., Chung, C.Y., Kim, H.D. and Kim, S.B., "Experimental Study on Direct Containment Heating Phenomena," *Proceeding on the Third Workshop on Severe Accident in Japan*, Nov.4-6, Tokyo, Japan, JAERI-memo 05-100.
- [4] 1991, Chun, M.H., So, D.S. and Lee, C.S., "A Parametric Study of the High Pressure Melt Ejection From Two Different Scale Reactor Cavity Models," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol.18, p.619.
- [5] 2005, Meignen, R. et al., "Direct Containment Heating At Low Primary Pressure: Experimental Investigation And Multidimensional Modeling," *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11)*.
- [6] 1995, Kim, S.B. et al. "A Parametric Study Of Geometric Effect On The Debris Dispersal From A Reactor Cavity During High Pressure Melt Ejection," *Int. comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol.22, No.1, pp.25-34.