

MARS 3D 모듈의 상변화에 의한 질량 및 에너지 전달항 개선

Improvement of Mass and Energy Transfer Terms by Phase Change in MARS 3D Module

하귀석, 황문규, 이원재, 배규환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

열적 비평형 이상유동에 대한 MARS 2.0 코드의 해석능력 및 robustness 향상을 위하여, MARS 3D 모듈의 상변화에 의한 질량 및 에너지 전달항을 개선하고 다양한 실험에 대한 코드 검증계산을 수행하였다. 상변화 시 기존 MARS 코드의 포화상태 가정을 수정하여, 임의의 상으로 들어오는 질량 전달량은 포화상태로, 임의의 상에서 나가는 전달량은 해당 상의 엔탈피를 갖도록 MARS 코드를 개선하였다. 개선된 MARS 코드의 검증률 위하여, FLECHT-SEASET 31805, KAERI DVI, UPTF DVI 272 개별효과실험 및 LOFT L2-5 종합효과실험에 대한 계산을 수행하여 기존의 계산결과와 비교하였다. 검증계산 결과, FLECHT-SEASET 및 LOFT 실험과 같이 상간의 비평형성이 작은 경우, 개선된 MARS 코드는 기존의 결과와 유사한 결과를 생산함을 알 수 있었다. 상간의 비평형성이 큰 UPTF DVI 및 KAERI DVI 실험의 경우, 개선된 MARS 코드는 UPTF 실험에 대하여는 실험결과의 예측능력을 향상시켰으며, KAERI DVI의 경우 코드의 robustness를 향상시켰음을 알 수 있었다. 결론적으로, MARS 3D 모듈의 개선은 성공적으로 이루어졌으며, 열적 비평형 이상유동 현상에 대한 MARS 코드의 해석능력이 향상되었다..

Abstract

In order to enhance the analysis capability and robustness of MARS 2.0 for thermal non-equilibrium two-phase flow, mass and energy transfer terms by phase change in MARS 3D module were improved and verified based on code calculations for various experiments. In the improved MARS, it is assumed that mass entering to a phase is at saturation and mass leaving a phase has its phase enthalpy in case of phase change, while original MARS assumes all mass entering or leaving a phase at saturation. For the verification of improved MARS capability, the code was run for separate effect tests, FLECHT-SEASET 31805, KAERI DVI, UPTF DVI 272 and an integral effect test, LOFT L2-5 and the results were compared with previous results or experimental results. From the verification calculations, it is found that the code predicts nearly the same results for FLECHT-SEAT and LOFT L2-5, where thermal non-equilibrium between phases is not high. For UPTF DVI and KAERI DVI where thermal non-equilibrium between phases plays an important role, the results of improved MARS for UPTF show better agreement with experimental data and those for KAERI DVI result in enhanced code robustness. From this study, we can conclude that the code improvements have been successfully implemented in the MARS 2.0 and that the MARS analysis capability for thermal non-equilibrium two-phase flow is enhanced with these improvements.

1. 서론

MARS 2.0[1,2]은 가압 경수로의 통합 안전해석을 위해 현재 원자력 연구소에서 개발하고 있는 다차원 및 다목적의 최적 열수력 계통 분석 컴퓨터 전산 프로그램이다. 이 전산 코드의 기본 근간은 일차원 계통을 모델하는 1D 모듈과 다차원 계통을 모의할 수 있는 3D 모듈로 구성되어 있으며, 이들은 각각 RELAP5[3]와 COBRA-TF[4]를 기초로 개발되었다. 또한 MARS는 3D 노심 동특성 코드(MASTER)[5]와 격납용기 코드(CONTEMPT-4)[6] 등과 같은 타 분야 전문 코드들과 연계 해석을 할 수 있는 통합 해석능력을 갖추고 있다.

RELAP5 코드는 이상유동을 일차원, 2-유체, 6개의 방정식으로 모델링한 컴퓨터 코드로서 다양한 기능을 갖추었고 안정성이 뛰어나다. 반면에 COBRA-TF는 이상유동을 다차원, 2-유체, 3-유동장, 14개의 방정식으로 모델하고 있다. 이들 두 코드의 장점 및 검증된 다양한 기능을 충분히 활용하기 위해 이들 두 코드를 통합했으며, 이 통합 코드는 MARS 코드의 근간이 되었다. 추가로 코드의 유지/보수가 용이하도록 1D 모듈의 전역 변수들을 Database 형태의 'Driven Type Variable'로 전환한 후, FORTRAN 90의 동적 기억장소 할당 방법을 이용하여 모듈화하였으며, 사용자의 편의성을 향상시키기 위해 다양한 Windows Graphics 기능을 활용하였다.

원전의 대형 냉각재 상실사고 중에 과냉 액체와 과열 증기가 직접 접촉하여 액상과 기상 사이에 질량 및 에너지 전달이 이루어진다. ECCS(Emergency Core Cooling System)에 따라, 저온관 주입 발전소의 경우는 ECC 주입 노즐 부위의 저온관에서 과냉 액체와 과열 증기가 접촉하며, 원자로 용기 직접 주입 발전소에서는 DVI(Direct Vessel Injection) 노즐 부위의 원자로 용기의 Downcomer에서 접촉한다. UPI(Upper Plenum Injection) 발전소에서는 원자로 용기의 상부공동에서 과냉 액체와 과열 증기가 접촉한다. 이러한 직접 접촉은 많은 상 변화량을 유발한다.

본 연구는 비평형 이상유동 조건에서 MARS 코드의 해석능력 및 Robustness 향상을 목적으로 수행하였다. MARS 3D 모듈의 질량 및 에너지 보존 방정식에서 상 변화량 및 에너지 교환량을 상간의 비평형성을 고려할 수 있도록 개선하였으며, 비평형 정도가 큰 문제에 대해 유효성을 검증하였다.

2. MARS 3D 모듈의 에너지 보존 방정식

이상 유동에 대한 지배 방정식들은 질량, 에너지 및 운동량 전달 항들을 포함한다. 일반적으로 에너지 보존 방정식에서 상 변화로 인한 에너지 전달과 경계면에서의 에너지 전달을 동시에 처리하며, MARS 3D 모듈에 이용된 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \vec{U}_k) = -\nabla \cdot [\alpha_k (Q_k + \underline{q}_k^T)] + \Gamma_k h_k^* + Q_{lk} + Q_w + \alpha_k \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1) 좌측 항들은 각각 엔탈피의 시간 변화량과 제어체적의 표면에서 유입되는 에너지량을 나타낸다. 우측 항들은 유체의 대류 및 난류 열유속, 상 변화로 인한 에너지 전달, 상의 경계면에서의 열전달, 벽면 열전달, Pressure Derivative 등을 나타낸다. 위의 상 변화로 인한 에너지 전달량을 계산할 때에 잠열(Sensible Energy)을 적절히 고려하지 않으면, 과냉 액체(Subcooled Liquid)와 과열 증기(Superheated Vapor)가 접촉할 경우에 낮은 온도에서 높은 온도로 열을 전달시킬 수도 있다.

상변화로 인한 에너지 전달량 계산에 사용되는 엔탈피는 경계면에서의 엔탈피를 적용해야 한

다. 그러나 열수력 모델의 제한성으로 기존의 열수력 계통 분석코드에는 계면 엔탈피는 단순화한 값을 적용하고 있다. 기존의 MARS 3D 모듈은 임의의 상에서 사라지는 양이나 그 상으로 유입되는 양이나 항상 포화 상태의 엔탈피를 갖는다고 가정하였다. 이 경우 열적 비평형 정도가 큰 유동에 대해 각각의 상에서 상의 경계면까지의 열전달을 계산할 때에 열전달 계수나 열전달 면적 등의 정확한 모델링이 되지 않으면 계산의 실패를 경험할 수 있다. 반면에 MARS 1D 모듈은 임의의 상으로 유입되는 양은 포화 상태의 엔탈피를 갖으며, 사라지는 양은 상의 엔탈피를 갖는다고 가정하였다.

1D 모듈과 3D 모듈의 모델 일관성을 유지하기 위해서 3D 모듈의 질량 전달 및 계면 열전달 항들을 1D 모듈의 형태로 수정하였다. 액상과 기상의 질량 전달량과 계면에서의 열 전달 항들의 총합은 '0'이 되어야 하며, 이들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{lv} + Q_{ll} + \Gamma_{lv}(h_v^* - h_l^*) = 0 \quad (2)$$

여기서 계면 열전달 항들은 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_{lv} = \frac{H_{lv}(h_v - h_g)}{C_{pv}} \quad (3)$$

$$Q_{ll} = \frac{H_{ll}(h_l - h_f)}{C_{pl}} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하여 Γ_{lv} 에 대해 정리하면,

$$\Gamma_{lv} = \frac{-1}{(h_v^* - h_l^*)} \left[\frac{H_{lv}(h_v - h_g)}{C_{pv}} + \frac{H_{ll}(h_l - h_f)}{C_{pl}} \right] \quad (5)$$

식 (3)과 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 기상의 에너지 보존 방정식에서 $Q_{lv} + \Gamma_{lv}h_v^*$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_{lv} + \Gamma_{lv}h_v^* = \frac{-h_l^*}{(h_v^* - h_l^*)} \frac{H_{lv}(h_v - h_g)}{C_{pv}} - \frac{h_v^*}{(h_v^* - h_l^*)} \frac{H_{ll}(h_l - h_f)}{C_{pl}} \quad (6)$$

액상의 에너지 보존 방정식에서 $Q_{ll} + \Gamma_{ll}h_l^*$ 는 다음과 같다.

$$Q_{ll} + \Gamma_{ll}h_l^* = \frac{h_l^*}{(h_v^* - h_l^*)} \frac{H_{lv}(h_v - h_g)}{C_{pv}} + \frac{h_v^*}{(h_v^* - h_l^*)} \frac{H_{ll}(h_l - h_f)}{C_{pl}} \quad (7)$$

계면에서 발생하는 상 변화 과정은 임의의 상에서 상 변화량이 가열되거나 냉각되어 포화상태가 되고, 포화 상태에서 상 변화가 일어나는 것으로 가정하였다. 따라서 계면에서의 에너지 전달 과정은 그 상의 엔탈피에서 포화 엔탈피까지의 잠열(Sensible Energy)을 포함해야 한다. 이러한 조건에 따라서, 식 (6)과 (7)에서 h_k^* 는 Vaporization이 일어날 경우 $h_v^* = h_g, h_l^* = h_l$ 이며, Condensation이 일어날 경우에는 $h_v^* = h_v, h_l^* = h_f$ 가 되며, 식 (6)과 (7)은 크기는 같고 부호가 반대이다.

MARS 3D 모듈은 식 (5)~(7)을 Implicit하게 처리하기 위해, 이식들을 각각의 독립 변수에 대해 Taylor Expansion 시킨다. 이후 도함수 항들을 Cell Jacobian Matrix에 포함하고 Old Time Step Value는 Source Term Matrix에 남게 된다. 식 (5)과 (6)은 코드에서 식 (8)과 (13)으로 구

현되었다.

$$-\Gamma_{IV} = \gamma_1(h_l - h_f) + \gamma_2(h_l - h_f) + \gamma_3(h_v - h_g) + \gamma_4(h_v - h_g) \quad (8)$$

$$\gamma_1 = \frac{H_{SCL}}{(h_v - h_f)C_{pl}} \quad (9)$$

$$\gamma_2 = \frac{H_{SHL}}{(h_g - h_l)C_{pl}} \quad (10)$$

$$\gamma_3 = \frac{H_{SHV}}{(h_g - h_l)C_{pv}} \quad (11)$$

$$\gamma_4 = \frac{H_{SCV}}{(h_v - h_f)C_{pv}} \quad (12)$$

식 (8)은 식 (5)을 표현한 것이며, 식 (9)는 기체와 과냉 액체 간의 열전달을 나타내며, $(h_l - h_f)$ 의 값이 0보다 크면 γ_1 은 0이 된다. 식 (10)은 기체와 과열 액체 간의 열전달을 나타내며, $(h_l - h_f)$ 의 값이 0보다 작으면 γ_2 은 0이 된다. 식 (11)과 (12)는 각각 액체와 과열 증기, 액체와 과냉 증기 간의 열전달을 나타낸다. $(h_v - h_g)$ 가 0보다 크면 γ_4 가 0이 되며, 0보다 작으면 γ_3 이 0이 된다. 식 (9)~(12)를 이용하여 기상 에너지 방정식에 포함되는 계면의 열전달 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-Q_{IV} - \Gamma_{IV} h_v^* = \gamma_1 h_v (h_l - h_f) + \gamma_2 h_g (h_l - h_f) + \gamma_3 h_l (h_v - h_g) + \gamma_4 h_f (h_v - h_g) \quad (13)$$

3. 검증 및 계산 결과 비교

위의 에너지 보존 방정식의 개선 내용은 액체가 증발되거나, 증기가 응축될 때 영향을 미친다. 따라서 위의 검증을 위해 식 (9)과 (12)의 각각을 고려할 수 있도록 다양한 문제에 대해 기존의 MARS 코드를 이용한 계산과 개선한 MARS 코드를 이용한 계산을 비교하였다. 이들 검증에서 주요 목적은 코드 개선으로 코드의 해석능력 및 Robustness가 향상됨을 보이기 위함이며, 검증을 위해 선택된 문제 및 주요 현상은 다음과 같다.

- (1) FLECHT-SEASET Test 31805 : 대형 냉각재 상실사고의 재관수(Reflood) 단계에서 원자로 노심에서 열전달을 실험한 것으로 주로 가열에 의한 비등 발생
- (2) KAERI DVI Test : 대형 냉각재 상실사고의 재관수 단계 중 DVI노즐을 통해 Downcomer로 유입되는 과냉 액체와 과열 증기가 접촉하면서 응축 발생
- (3) UPTF DVI Test Run 272 : 대형 냉각재 상실사고의 방출 단계 후기(End of Blowdown)에서 DVI 노즐을 통해 Downcomer로 유입되는 과냉 액체와 과열 증기가 접촉하면서 응축이 발생
- (4) L2-5 Test : 종합 효과 실험으로 LOFT 실험을 선택하였으며, 이 실험은 Flashing과 응축이 동시에 발생

(1) FLECHT-SEASET Test 31805

FLECHT-SEASET Test 31805는 161개의 가열봉을 포함하는 집합체에서 대형냉각재 상실사고

의 재관수를 모의한 실험으로서, 가열봉이 가열된 상태에서 50 °C의 안전주입수가 강제로 주입될 때 집합체에서의 재관수 속도 및 열전달 현상 등에 대해 연구한 것이다. 주입되는 냉각수는 시험부위의 하부에서 곧 바로 포화 상태에 도달하고, 실험 초기에 핵연료 상부는 기체와 액적으로 냉각된다.

그림 1은 MARS로 모의하기 위한 Nodalization을 나타내며, 시험 부위의 단면에서 보여주는 횡 방향 2개의 Channel들과 축 방향으로 19개의 Node로 구성되어 있다. 가열봉은 각 Channel에 1개씩 모델 되어 있으며, 축 방향으로 5개의 Node에 Grid Spacer를 모의하였다. 시험 부위의 입구와 출구는 MARS 1D 모듈의 PIPE 컴포넌트를 이용하였으며, 입구는 유량 경계조건, 출구는 압력 경계 조건이 부과되었다.

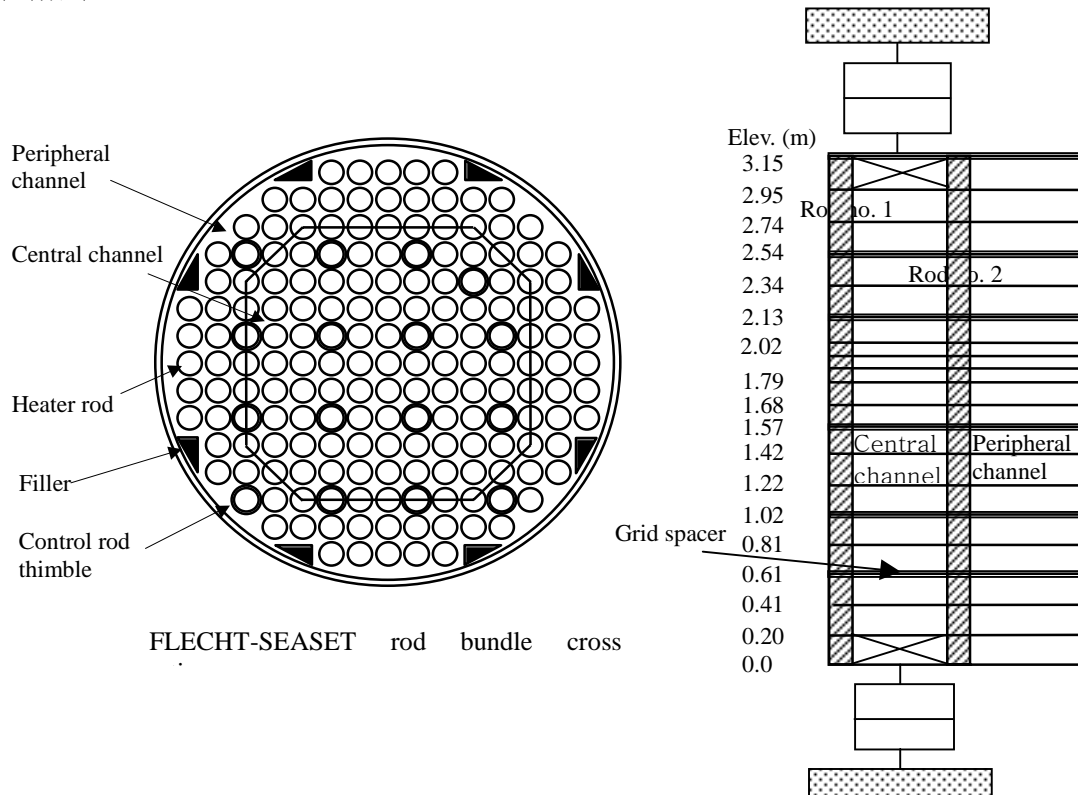


그림 1. FLECHT-SEASET Test 31805의 모의를 위한 MARS Nodalization

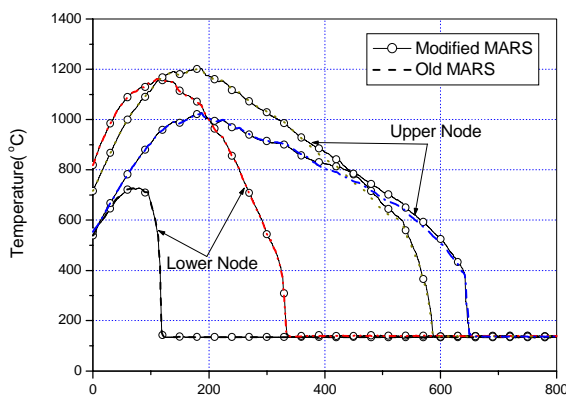


그림 2. 연료봉 온도 거동 비교

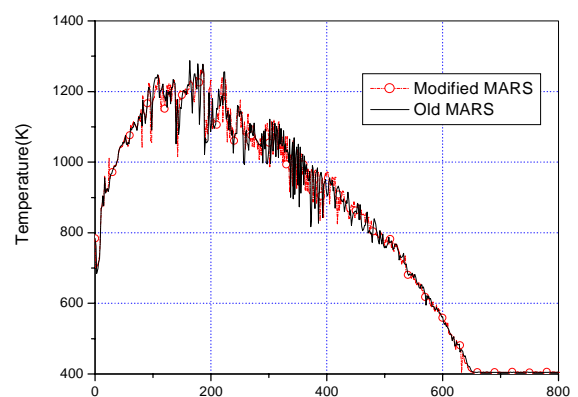


그림 3. 시험부 상부에서의 액체 온도 거동 비교

그림 2와 3에서 보는 바와 같이, 냉각수가 가열되는 상황에서 MARS 3D 모듈의 Old Version과 New Version의 차이는 거의 보이지 않는다. Energy Transfer의 도함수는 액상의 Enthalpy와 포화 액체

Enthalpy의 차이가 클 때 영향을 미치며, Source Term은 증기 Enthalpy와 포화 증기의 Enthalpy차이가 클 때 영향을 미친다. 냉각수가 계속 가열되는 이 실험의 경우, Test Section의 상부로 상승하는 Liquid Phase는 거의 포화상태에 가깝고, 상부로 올라갈수록 증기에 관한 Enthalpy차이는 커진다. 결과적으로 계산 결과에서 가열부 하부에서는 거의 차이를 나타내지 않고, 상부 Node에서만 약간의 차이를 보인다.

(2) KAERI-DVI Test

이 실험은 대형냉각재 상실사고 중 원자로의 Downcomer로 직접 주입되는 과냉 ECC Water와 저온 관에서 Downcomer로 유입되는 과열 증기가 Downcomer에서 상호 작용할 때의 열수력적 거동을 고찰한 실험이다. 다른 Heat Source가 없는 상황에서 저온의 냉각수가 고온의 증기를 응축시키는 열적 비평형이 큰 이상유동으로서, Direct Contact Condensation 현상이 발생한다.

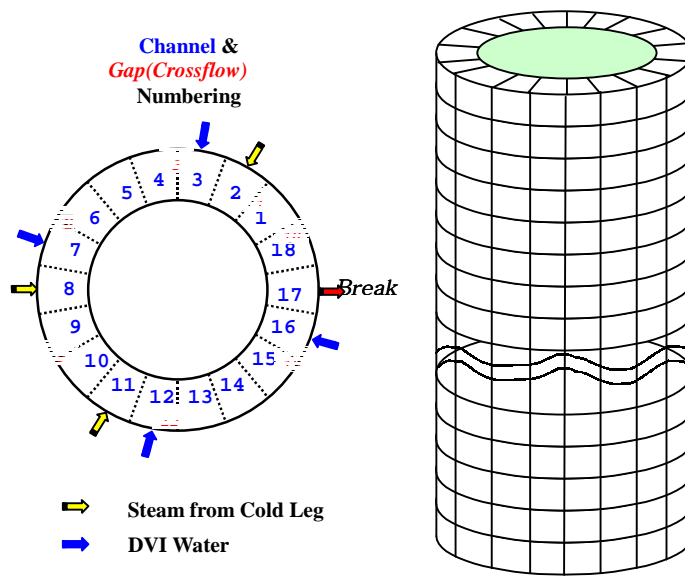


그림 4. KAERI DVI Test 모의를 위한 MARS 횡 방향 및 축 방향 노드

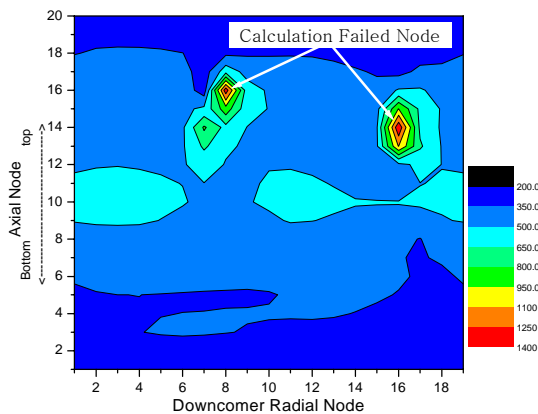


그림 5. MARS Old Version을 이용하여 계산한 Downcomer 내의 유체 온도 거동

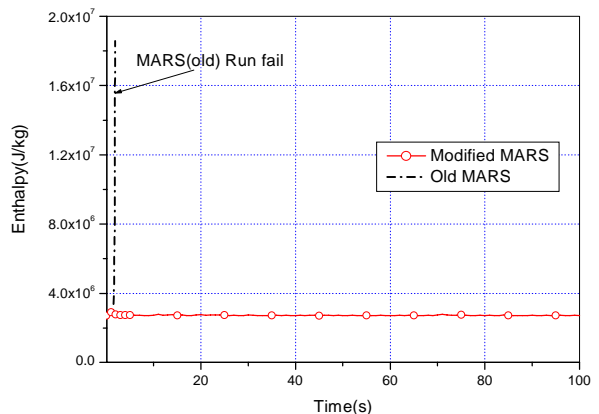
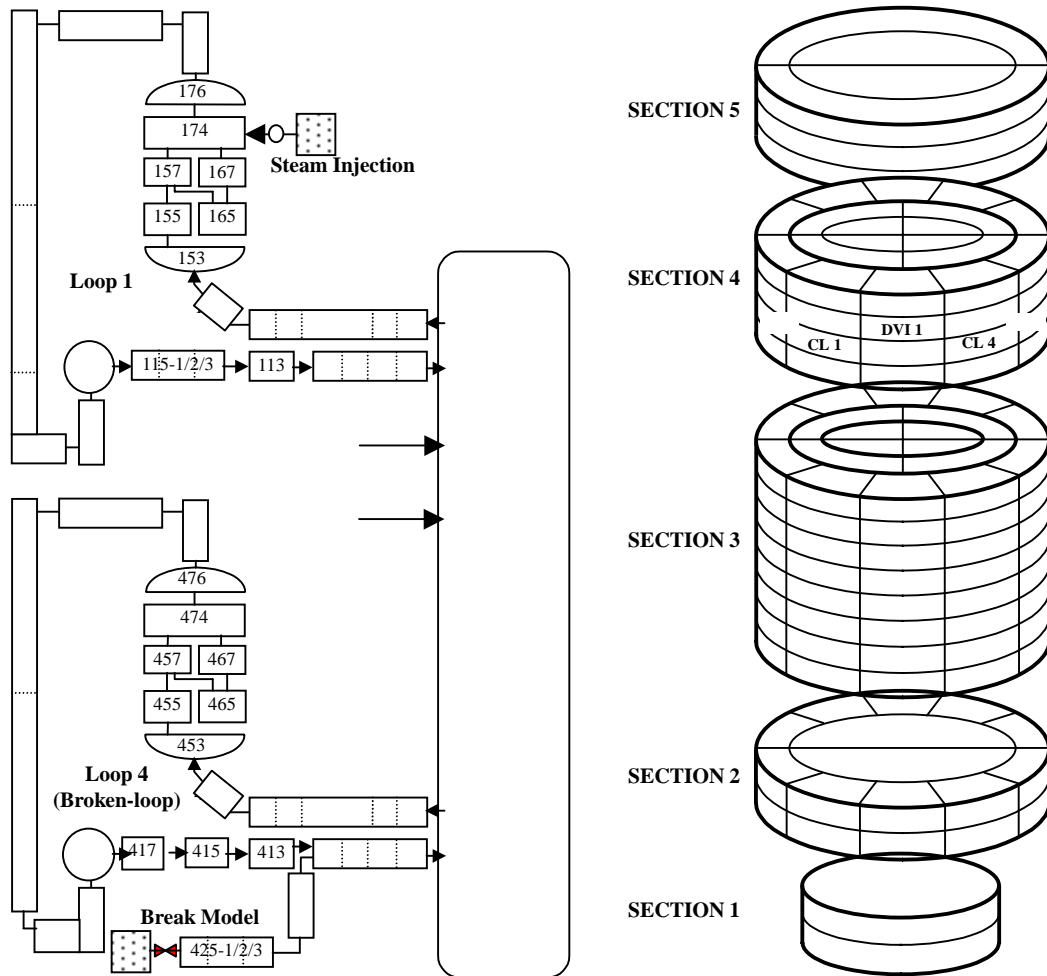


그림 6. 계산이 실패한 노드에서 유체의 엔탈피 거동 비교

이 실험은 단순히 원자로 용기의 Downcomer에서 열수력적 거동을 연구하는 것이기 때문에

Downcomer에서 세부적인 결과를 얻기 위하여 Downcomer를 정교하게 나누었다. 즉 그림 4와 같이 원주 방향으로 18개의 Channel로 나누고, 축 방향으로 20개의 Node를 갖도록 모델하였다.

이 경우 MARS 3D 모듈의 Old Version에서의 Vapor Energy Transfer를 살펴보면, Super-heated Vapor가 포화 증기의 Enthalpy를 가지고 나가는 것으로 계산하기 때문에 그 만큼의 Energy가 Vapor Phase에 쌓이게 된다. 계속 이와 같은 상황이 발생하면 계속해서 Vapor Energy가 상승하여 결국 계산이 실패한다. 이 입력에 대한 MARS 계산에서는 DVI 노즐을 갖는 Channel 들의 부근에서 Vapor의 Enthalpy가 상승하여 계산이 실패하였다. 새로이 개선된 MARS는 계산의 중단없이 적절한 결과를 생산하였다.



(a) Loop 모델 (1D)

(b) 원자로 용기 모델 (3D)

그림 7. UPTF에 대한 MARS 모델

(3) UPTF DVI Test Run 272

UPTF DVI Test Run 272는 대형 냉각재 상실사고의 방출단계 후기에 축압기(Accumulator)의 비상노심 냉각수가 DVI 노즐을 통해 주입될 때의 상황을 실험한 것으로서, Downcomer 상부에서 대량의 과냉각수(33 °C)와 과열증기가 직접 접촉 응축을 발생시키는 실험이다. 본 분석에서는 계산 결과와 실험의 직접 비교를 통하여 개선된 MARS 코드의 해석능력을 검증하였다.

그림 7은 UPTF를 모의하기 위한 MARS 입력 Nodalization을 보여준다. UPTF 시설의 4개 냉각재 루프는 MARS의 1D 모듈을 이용하고, 원자로 용기는 3D 모듈을 이용하여 각각 모델하였다. 그림 7

에 보인 바와 같이, 원자로 용기에 대한 Nodalization은 Barrel이나 지지판 등과 같은 구조물에 따라서 원주 방향 및 축 방향으로 노드를 나누었다. 크게 반경 방향으로 노심, 노심 우회 영역, 강수관 등 3 부분으로 나누었으며, 노심과 노심 우회 영역은 강수관 영역이 10개의 원주 방향 노드를 갖는 것에 비해 상대적으로 단순하다. 축 방향으로는 5개의 SECTION으로 구성되어 있으며, 전체 254개의 Cell 들로 이루어져 있다.

그림 8은 Downcomer 상부에서의 압력 거동을 나타낸 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 계통의 압력을 적절하게 모의하였다. 즉 비상노심 냉각수의 주입 초기에 대량의 증기 응축으로 인한 계통의 감압과 그 후의 유사 정상 상태를 잘 예측하였다. 그림 9은 하부 공동(그림 7(b)의 SECTION 1)에서 수위 거동을 보여준다. 전반적인 수위 거동도 실험에 적절히 근사하고 있다. 이는 상 변화(증발이나 응축)에 관련한 코드개선에 따라 코드의 예측능력이 향상되었음을 시사한다.

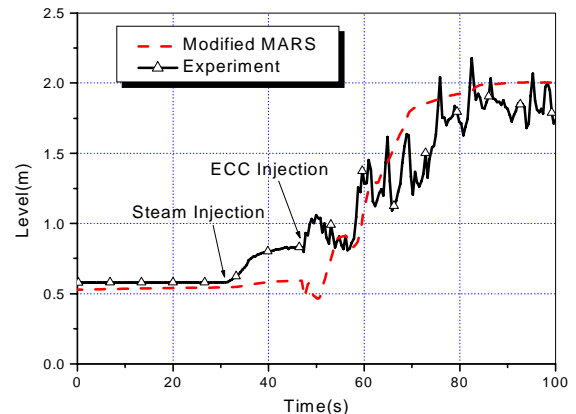
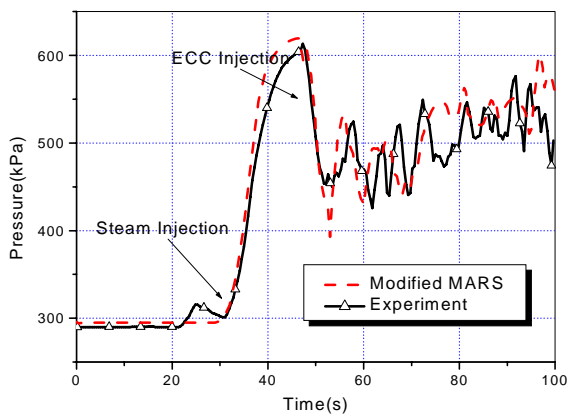
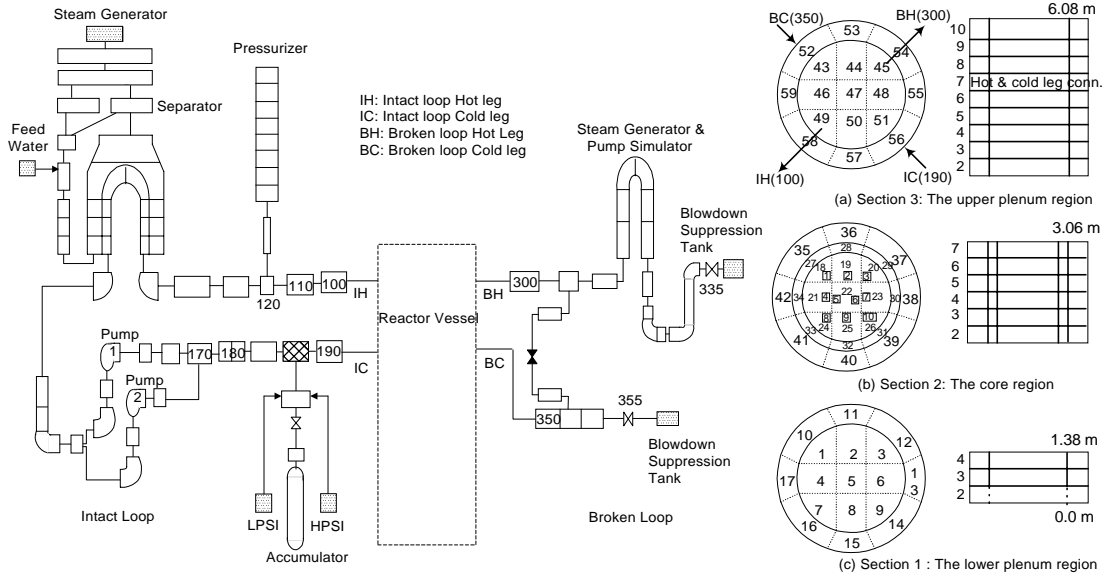


그림 8. UPTF DVI Test: Downcomer 압력 거동 그림 9. UPTF DVI Test: 하부 공동 수위 거동

(4) L2-5 Test

LOFT L2-5는 대형냉각재 상실사고시 감압, 재충수, 재관수 단계에서 원자로 계통의 열수력 거동을 고찰한 실험이다. LOFT 실험 설비는 냉각재 상실사고 중 상업용 가압 경수로의 주요 기기 및 계통 거동을 모의하기 위한 50 MWt의 소형 가압 경수로이다. 수행된 실험 중 L2-5는 소외 전원 상실과 동시에 저온관이 200 % 파단된 사고를 모의한 것이다. 이 실험은 큰 감압으로 인하여 과열 액체가 기체로 상 변화를 경험한다. 따라서 이 실험에 대한 계산은 코드의 종합적인 검증일 뿐만 아니라 Flashing에 대한 상 변화과정의 검증이기도 하다.

그림 10은 이 실험을 계산하기 위한 MARS Nodalization을 보여준다. 원자로 용기는 MARS 3D 모듈을 이용하여 모델하였다. 기타 다른 계통들은 1D 모듈을 이용하여 모의하였다. 과도기는 0초에 파단 밸브를 개방하여 시작된다. 그림 11은 계통의 압력 거동을 보여준다. MARS의 Old 버전을 이용하여 계산한 결과와 비교하였으며, 압력 계산 결과는 거의 유사함을 보여준다. 그림 12는 핵 연료봉의 온도 거동에 대한 예측을 나타낸다. Old 버전 계산 결과에 비해 약간의 급냉(Quenching) 시간이 지연되었지만, 이는 보다 실험결과에 근접한 것이며, 전체적인 계산 결과는 거의 차이를 보이지 않는다. 따라서 MARS 3D 모듈의 상 변화에 대한 개선이 종합 효과 검증 계산에서도 잘 되었음을 보여주고 있다.



(a) 1D module input

(b) 3D module input

그림 10. L2-5 실험 모의를 위한 MARS Nodalization

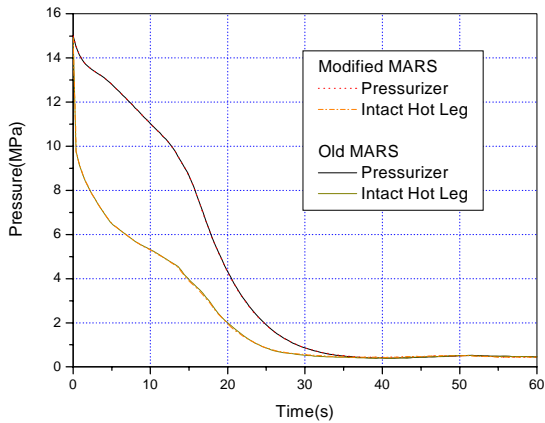


그림 11. 압력 거동 예측 결과

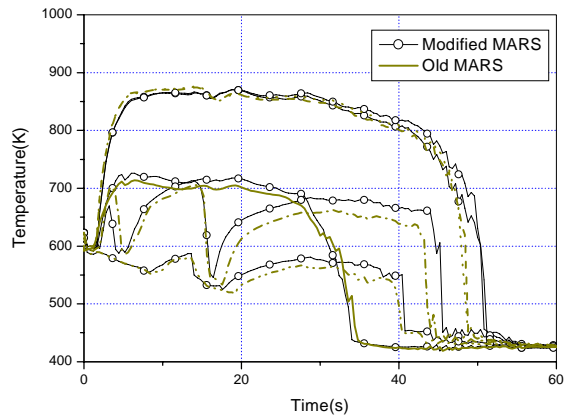


그림 12. 핵 연료봉 온도 거동 예측 결과

4. 결론

다차원 계통분석코드인 MARS 코드의 열적 비평형 이상유동에 대한 해석능력 및 robustness 향상을 위하여, MARS 3D 모듈의 상변화에 의한 질량 및 에너지 전달항을 개선하였다. 기존 MARS 3D 모듈의 상변화 시 임의의 상에서 나가거나 들어오는 질량을 모두 포화상태로 가정함에 따른 문제점 해소를 위하여, 개선된 MARS는 임의의 상으로 들어오는 상 전달량은 포화상태로 임의의 상으로부터 나가는 상 전달량은 그상의 엔탈피를 갖도록 수정하였다. 개선된 MARS 코드의 해석능력 및 robustness의 검증을 위하여 다양한 열적 비평형 조건을 갖는 실험에 대한 계산을 수행하여 기존의 해석결과와 비교 분석하였으며, 이로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

FLECHT-SEASET 31805 실험에 대한 검증계산의 경우, 개선된 MARS 코드는 기존의 결과와 거의 동일한 결과를 생산한다. 본 실험은 노심에서 액상이 증발될 때 포화상태의 엔탈피를 갖으므로 개선사항에 크게 영향을 받지 않는 것이 타당하다.

KAERI DVI 실험의 경우 기존의 MARS 코드는 상간의 열적 비평형성을 고려하지 못함에 따라 계산이 실패하나, 개선된 MARS 코드는 성공적으로 계산을 수행하였으며 분석결과 또한 타당하다. 따라서, 개선된 MARS 코드의 예측능력 및 robustness가 향상된 것으로 평가된다.

UPTF DVI 실험도 상간의 열적 비평형성이 큰 현상을 고찰하는 실험이다. 코드 평가계산 결과, 개선된 MARS 코드는 실험결과를 잘 예측하므로, 이로부터 MARS 코드의 향상된 해석능력을 입증할 수 있었다.

LOFT L2-5 실험 검증계산을 통하여 개선된 MARS 코드의 종합적인 해석능력을 입증하였다. LOFT 실험은 저온관 주입형태를 채택하고 있으므로, 3D 모듈로 모의하는 원자로용기에서는 열적 비평형성이 상대적으로 작다. 따라서, 개선된 MARS 코드가 기존의 해석결과와 유사한 결과를 생산함은 타당하다.

결론적으로, MARS 3D 모듈의 상변화 시 질량 및 에너지 전달량의 개선은 성공적으로 이루어졌으며, 열적 비평형 이상유동 현상에 대한 MARS 코드의 해석능력이 향상되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

부호 설명

h_k : k-Phasic Enthalpy	α_k : k-Phasic fraction
ρ_k : k-Phasic density	\vec{U}_k : k-Phasic velocity
Γ_k : Phase change rate	P : Pressure
q_k^T : k-phase turbulent heat flux	Q_k : k-phase conduction vector
Q_{ik} : Interfacial heat transfer	H_{ik} : Interfacial heat transfer coefficient
Q_w : Wall heat transfer	C_{pv} : Vapor thermal conductivity
C_{pl} : Liquid thermal conductivity	P_g : Noncondensable gas pressure
δ : Temporal variation	

Subscripts

v : Bulk vapor phase	g : saturated steam
l : Bulk liquid phase	f : saturated liquid

7. 참고 문헌

- [1] W. J. Lee, B. C. Chung, J. J. Jeong and K. S. Ha, "Development of a Multi-dimensional Realistic Thermal-hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and Its Verification", KAERI/TR-1108/98, KAERI (1998).
- [2] J. J. Jeong, K. S. Ha, B. D. Chung and W. J. Lee, "Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.1", Annals of Nuclear Energy, Vol. 26 No. 18 (1999).
- [3] U. S. NRC, "RELAP5 Code Manual Volume", NUREG/CR-5535 (1998).
- [4] M. J. Thurgood, et.al., "COBRA/TRAC Manual", NUREG/CR-3046, USNRC (1983).
- [5] Jae-Jun Jeong, et. al., "MARS/MASTER Solution to OECD Main Steam Line Break Benchmark Exercise III", J. of KNS, Vol. 32, No. 3, (2000).
- [6] B. D. Chung, J. J. Jeong and W. J. Lee, "MARS 1.3 System Analysis Code Coupling with CONTEMPT4/MOD5/PCCS Containment Analysis Code using DLL", Proc. KNS '98 Autumn Meeting (1998).