2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

UPTF Test 21A의 DVI 실험을 이용한 LBLOCA EOB 단계에서 MARS 코드의 ECC 우회현상 해석능력 평가

Assessment of MARS for ECC Bypass during LBLOCA End-of-Blowdown Using UPTF Test 21 Phase A

하귀석, 이원재, 정재준, 김경두, 황문규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

UPTF의 DVI (Direct Vessel Injection) Test 21은 4 단계(Phase A,B,C,D)의 실험으로 구성되어 있다. 이 중 LBLOCA (Large Break Loss-of-Coolant-Accident) EOB (End-of-Bypass) 단계에서의 ECC(Emergency Core Cooling water) 우회실험인 Phase A에 대하여 MARS 2.0 코드를 이용한 다차원 분석을 수행하였다. 본 평가계산은 LBLOCA EOB 단계에서 축압기 냉각수가 원자로 용기로 주입될 때 강수관에서의 ECC 우회현상에 대한 MARS 코드의 해석능력을 평가하기 위하여 수행하였다. Phase A 실험에 대한 예비 평가계산 결과, MARS 코드는 실험보다 적은 초기 감압과 적은 우회량을 예측하였다. 코드의 해석결과를 바탕으로 MARS 3D 모듈의 'Pool' 및 'Inverted Pool' 유동 영역에 대한 계면마찰계수 모델을 개선하였으며, 벽면마찰계수 모델은 1D 모듈의 형태로 개선하였다. 개선된 MARS 코드를 이용한 재 평가계산 결과, 실험결과와 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 결론적으로, 본 연구를 통한 MARS 코드의 개선은 LBLOCA EOB 단계에서 MARS 코드의 ECC 우회현상 해석능력을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

Abstract

The UPTF DVI (Direct Vessel Injection) Test 21 is divided into four phases of tests A, B, C and D. The Multi-dimensional analysis for UPTF DVI Test 21 Phase A that is ECC bypass test during LBLOCA EOB (End-of-Blowdown) has been carried out using MARS 2.0 thermo-hydraulic computer code. The purpose of the assessment is to investigate the MARS analysis capability for the ECC bypass in downcomer when accumulator injects during LBLOCA EOB. Preliminary assessment results showed that the MARS under-predicted the depressurization at early transient and the ECC bypass rate. Based on the code calculation results, the interfacial friction force model for "pool" and "inverted pool" flow regime of the MARS 3D module was improved. Also, the wall friction factor of the 3D module was improved in the form of 1D module model. Assessment results with the improved MARS nearly approximated with the experimental results. Conclusively, it has been shown that the improved MARS is capable of simulating the ECC bypass phenomena during LBLOCA EOB.

1. 서론

차세대 원전의 비상노심냉각계통 설계인 강수관 직접주입안전주입 계통(DVI : Direct Vessel Injection System)은 최근 국내에서 많은 관심을 모으고 있다. 이러한 방법은 기존 가압 경수로의 저압 안전 주입 계통의 역할 및 안전주입 계통의 단순화 등 상당한 이점을 갖고 있다. 반면에 DVI를 갖는 안전계통에 대한 실험은 현재 UPTF(Upper Plenum Test Facility)의 Test 21을 제외하고 거의 없으며, 기존의 열수력 컴퓨터 코드 또한 위와 같은 안전계통에 대해 검증을 거의 수행하지 않았기 때문에 DVI 성능에 대한 해석 능력의 검증이 요구된다.UPTF의 DVI 설비는 현재 국내에서 개발중인 차세대 원자로의 DVI 설비와는 몇 가지 측면에서 서로 다르다. 첫째 UPTF의 DVI 노즐은 저온관 상단부위에 위치하는 반면에 차세대 원자로의 경우는 저온관보다 약 2 m 더 높게 위치하기 때문에 주입되는 비상노심 냉각수의 유동 특성이 서로 다를 것으로 예상된다. 둘째 UPTF는 각각 두개의 저온관 사이에서 주입되는 2 개의 주입 노즐을 갖고 있는 반면에 차세대 원자로의 경우는 각각의 저온관 상부에 4 개의 주입 노즐을 갖고 있다. 따라서 UPTF의 DVI 실험자료를 바로 국내의 차세대 원자로의 DVI 설계 자료로 이용하기에는 어려운 점이 있을 것으로 생각된다.

그럼에도 불구하고 UPTF 실험 자료는 Full Scale 규모의 DVI 계통에 대해 수행된 실험자료로서 열수력 컴퓨터 코드의 검증을 위해서는 최적의 자료로 평가된다. UPTF Test 21은 DVI 안전주입 계통에 대해 수행된 실험으로서 대형 냉각재 상실사고시에 발생되는 주요 물리적 현상에 따라 4 개의 실험(Phase A, B, C, D)을 수행하였다. Phase A와 B는 대형 냉각재 상실사고(LBLOCA ; Large Break Loss-of-Coolant Accident)의 EOB(End of Blowdown 에서 축압기(Accumulator)의 안전주입으로 원자로 용기의 하부 공동(Lower Plenum)을 채우는 Refill 거동을 모의한 것이다. Phase A는 117 °C 과냉각수를 주입하면서, Phase B는 증기 유량, 과냉각도, 안전주입 유량 등을 변화시키면서 각각 Refill 거동을 모의한 것이다. Phase C는 노심의 Upper Core Plate에서 냉각수의 Entrainment 현상을 모의한 것이고, Phase D는 LBLOCA의 재관수(Reflood) 기간동안 원자로 용기의 Downcomer에서 파단 저온관으로의 Entrainment 현상을 모의한 것이다.

본 논문은 한국원자력연구소에서 개발중인 다차원 최적 열수력 코드 MARS(Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety) 2.0을 이용하여 UPTF의 DVI 실험 중 LBLOCA의 EOB에서 비상노심 냉각수의 우회실험인 Test 21 Phase A에 대한 평가계산 결과를 기술한다. 2 절에서는 UPTF Test 21 Phase A에 대한 초기 조건 및 MARS 코드의 다차원 모델링에 대해 논의하고 3 절에서는 계산 결과, 4 절에서는 결론 및 추후 계획 등을 논의할 것이다.

2. UPTF Test 21 Phase A

UPTF DVI 실험장치는 1300 Mwe, 4-Loop Babcock & Wilcox 가압 경수로를 모델한 실규모의 실험설비이다. 원자로는 Downcomer, 하부 공동, 노심 모의 장치, 상부 공동 등으로 구성되어 있으며, 4 개의 배관 유로에는 각각 증기발생기 모의장치, 펌프 모의장치 등이 장착되어 있다. 파단 유로에는 각각 고온관 파단 노즐과 저온관 파단 노즐이 따로 설치되어 있으며, 각각 노즐에서 격납용기의 열수력적 Feedback을 모의할 수 있도록 격납용기 모의 장치와 배관으로 연결되어 있다. 또한 원자로 용기의 외벽과 내부 구조물들도 1대1 축적비로 모의되어 있다.

UPTF 21A 실험은 LBLOCA EOB 단계에서 노심과 증기발생기에서 생성된 과열 상태의 증기가 Downcomer를 거쳐 파단 유로의 저온관을 통해 방출될 때 DVI 주입수의 파단부 우회현상을 고찰한 실험이다. 실험은 31초에 증기를 주입하여 약 37초에 최대 유량(315 kg/s)으로 주입함으로써, 계

통의 압력을 초기에 3 bar의 압력에서 약 6 bar까지 증기로 가압시킨다. 이후, 46초에 117 °C의 아냉각(subcooled) 비상노심냉각수를 강수관으로 주입하여 48초에 최대 유량(1820 kg/s)을 주입한다. 표 1은 Phase A의 초기조건을 보여주고 있다. 4 개의 유로는 펌프 모의 장치에서 유로를 차단시켰으며, 원자로 용기의 초기 수위는 0.6 m 이다. 과도기시 노심 모의 장치에서 225 kg/s, 건전 유로의 증기 발생기에서 각각 30 kg/s씩 총 315 kg/s의 증기 유량이 Downcomer를 통해 파단 유로로 방출된다. 비상 노심 냉각수는 원자로가 6 bar 까지 가압된 후 2개의 DVI 노즐을 통해 각 노즐당 910 kg/s씩 Downcomer로 유입된다[7].

표 1. UPTF Test 21 Phase A의 열수력 초기 조건

기기	조건			
	압력(MPa)	온도(°C)	유량(kg/s)	수위(m)
원자로 용기	0.295	191	225 (30s~)	0.6
증기 발생기	0.295	178	30/SG (30s~)	-
격납용기	0.295	136	-	-
축압기	1.900	32	910 (46s~)	11.8

3. MARS - 평가 방법

3.1 MARS 코드

MARS 코드[1,2]는 정부의 원자력 연구.개발사업으로 한국원자력연구소에서 개발중인 코드로서, USNRC의 RELAP5[3] 및 COBRA-TF[4] 코드를 각각 1차원 및 3차원 열수력 모듈의 형태로 통합, 개선하여, 코드 Restructuring 및 현대화를 통하여 기술국산화를 이룩한 코드이다. 현재 개발된 MARS 2.0 코드는 3차원 노심동특성 코드인 MASTER 코드와 격납용기 온도-압력 과도해석 코드인 CONTEMPT4 코드를 다중 연계모듈의 형태로 통합함으로써, 다차원 원자로계통 열수력, 3차원 노심동특성 및 격납용기 최적 과도거동의 범용 통합 안전해석을 구현한 코드이다 [5, 6]. 이와 병행하여 다차원 열수력모델, 임계유동 모델, 수치해법 모델 등 고유 열수력모델의 개발 및 보강, 그리고 GUI(Graphic User Interface) 기술에 근간한 사용자 편의성 향상 등은 MARS 코드의 최적 해석능력 향상, 코드 적용성 및 실질적인 코드 국산화를 가능하게 할 것이다. 본 코드는 국내 14개 원자력 산.학.연 기관이 참여하는 MARS 사용자그룹을 통하여 열수력 모델 개발 및 평가/검증, 사용자 및 전문가 의견수렴 등을 통하여 국가기술로 개발 중에 있다.

특히, MARS 코드의 3차원 열수력 모듈은 이상유동 기본방정식으로 연속액상, 액적 및 기상에 대한 다차원 보존식을 보유하고 있으며, 액적의 상세 과도거동 해석을 위한 액적면적 수송방정식을 보유하고 있다. 따라서, 다차원적 거동 및 액적의 거동이 중요한 DVI 현상의 해석에 매우 적합한 코드로 평가된다.

3.2 MARS UPTF 모델링

MARS 코드의 Phase A 계산을 위한 원자로 용기의 다차원 Nodalization은 그림1과 같다. 계산을 용이하게 하기 위해 배관 유로중 고온관, 증기발생기, 펌프흡입관 등은 모델하지 않았으며, 증기 발생기에서 발생되는 증기는 노심 모의 장치에서 발생하는 것으로 가정하였다. Barrel 내부 영역은

이 실험에서 증기 생성 역할만 하기 때문에, 그림 1에 보인 바와 같이 노심 및 노심 우회 영역의 Nodalization은 각 2개의 CHANNEL로 구성되어 있다. 저온관도 펌프까지만을 모델하여 계통을 단순화시켰다. 원자로 용기는 상부의 헤드를 제거하고 4 개의 SECTION으로 구분하였다. SECTION I은 하부 공동을 나타내며, 1 CHANNEL, 축방향으로 2 NODE로 모델하였다. SECTION II는 하부 공동의 상부에서 Lower Core Plate까지를 나타내며, Barrel 내부 영역과 Downcomer 영역으로 구분하였다. Downcomer 영역은 저온관과 고온관 각 4개와 DVI 노즐 2개 등을 고려하여 10 CHANNEL로 나누었다. SECTION III과 IV는 각각 노심 영역과 상부 공동 영역을 나타내며, SECTION IV의 두 번째 축 방향 NODE에서 저온관과 DVI 노즐들이 연결된다.

위와 같이 Nadalization을 구성하여 MARS 2.0 코드를 이용하여 계산을 수행하였다. 현재의 MARS 2.0 코드로 계산을 수행한 결과, 몇가지 코드의 모델을 개선할 필요가 있었다. 다음 절은 기존 코드의 계산 결과와 개선된 코드의 계산 결과를 비교한 것이다.

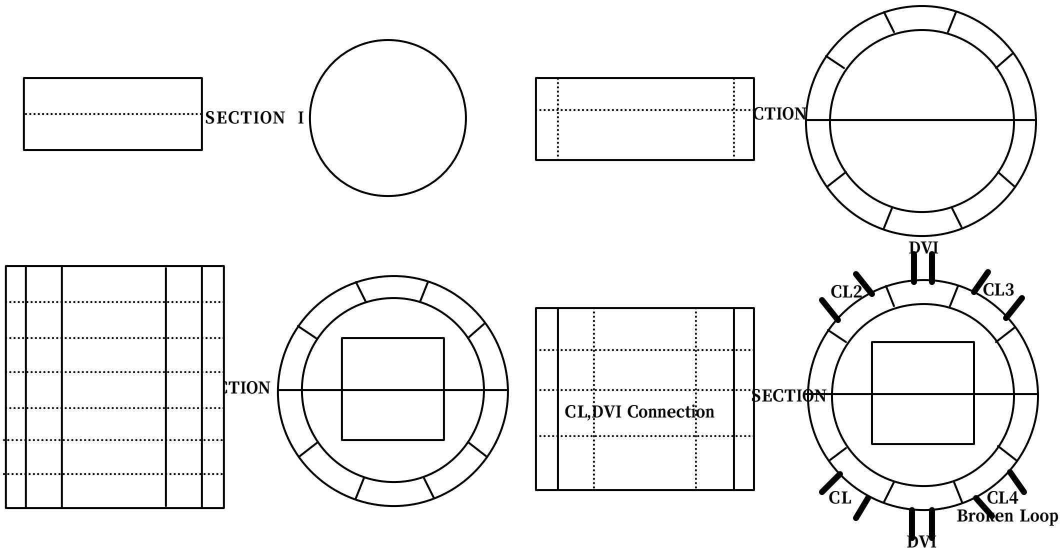


그림 1. UPTF Test 21 해석을 MARS Nodalization

4. MARS 예비 평가 및 모델 개선

기존의 MARS 2.0에 의한 예비계산 결과(그림 4~7)에서 크게 2 가지의 비정상적인 현상이 발견되었다. (1) 압력 거동에 있어서 초기 증기 응축에 따른 계통의 감압을 잘 예측하지 못한다. (2) 하부 공동으로의 냉각수 Penetration을 실험보다 빨리 그리고 많은 양 (50%)을 예측한다. 이는, 비상노심 냉각수가 Downcomer Annulus에 적절하게 분배되지 못하고 DVI CHANNEL에만 분포하기 때문에 DVI Penetration이 많으며, 실험에서는 건전한 유로 사이에 있는 DVI의 유량 중 50 % 이상이 Broken Cold Leg으로 유출되는 반면 계산에서는 거의 유출되지 않기 때문이다. 이를 개선하기 위해 크게 2가지의 모델이 수정되었다.

<u>'Pool' 혹은 'Inverted Pool' 유동에 대한 Interfacial Friction Model 수정</u>

예비계산 결과를 살펴보면 DVI Water가 주입되는 Channel과 인접한 두 Channel들 사이의 기포율 차이는 매우 크다. 그림 2와 같이 인접한 두 Cell의 기포율 차이가 클 경우 MARS 3D 모듈은 유동영역을 'Pool' 혹은 'Inverted Pool' 로 정의하며, Interfacial Friction Force는 기포율이 적은 쪽의 조건을 선택하여 계산한다.

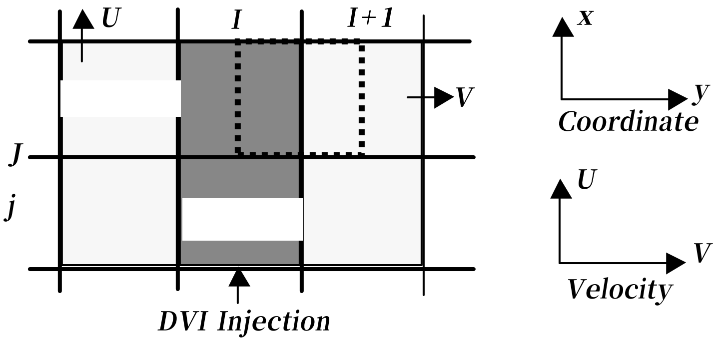


그림 2. DVI CHANNEL과 인접한 CHANNEL에서의 유동 형태.

이에 따라, MARS 코드는 채널 간의 Interfacial Friction Force를 Bubbly Flow Regime에서 사용하는 Coefficient를 이용하여 계산한다. 그러나 그림 2에서 보듯이, 유동형태는 DVI Water Injection Channel에서는 Bubbly Flow이지만, 인접한 두 Channel들에서는 Bubbly Flow 보다는 Film Flow에 더 가깝다. 이에 따라, 높은 쪽의 기포율을 Friction Force에 이용하는 형태로 MARS 모델을 개선하였으며, 그 결과, 안정적이고 실험에 근접한 계산결과를 얻을 수 있었다[8]. MARS는 Bubbly Flow 및 Film Flow Regime에서 식 (1), (2)와 같이 Liquid와 Vapor 상간의 Interfacial Friction Coefficient(K_{Ivl})들을 적용한다.

- Bubbly Flow

$$K_{IBvl} = 0.375 \times \frac{C_D}{r_b} a_v r_l U_r$$
$$where, \quad C_D = \frac{24}{Re_b}(1.0 + 0.1 \times Re_b^{0.75}) \qquad (1)$$
$$r_b = \min(\, 0.5 \frac{We_b s}{r_l U_r^2},\, 0.5 D_H,\, 0.02),\;\; if \;\; a < 0.2$$

- Film Flow

$$K_{IFvl} = 2.0 \times \frac{f_I}{D_H} \sqrt{a_v}\, r_v U_r \qquad (2)$$
$$where, \quad f_I = 0.005 \times (1.0 + 75 \times a_l)$$

MARS에서 Interfacial Term들은 Small Bubble Flow와 Stable Film Flow를 제외한 Large Bubble Flow와 Unstable Film Flow에서는 각각의 Flow Regime에서 구한 Term들을 적절한 Factor를 사용하여 내삽시킨다. 예를 들어 기포율이 0.4이면 Small Bubble Flow에서 구한 값과 Large Bubble Flow에서 구한 값을 혼합한다. 그림 2의 Flow Pattern은 Bubbly Flow와 Film Flow가 혼합되어 나타나기 때문에 두 Flow Regime의 적절한 혼합이 필요한 것으로 판단된다. 따라서, 다음과 같은 정의에 따라 Interfacial Friction Coefficient를 구하도록 코드를 수정하였다. (1) Momentum Cell에서의 기포율은 두 Cell의 평균값을 사용한다. (2) Interfacial Friction Force는 위의 식 (1)과 (2)를 적절하게 혼합하여 다음과 같이 적용한다. 계면에서의 열전달 계수들도 식 (3)과 같은 방식으로 개선하였다.

$$K_{Ivl} = (1-\alpha_{max})(1-\frac{0.25\alpha_l}{\alpha_v})K_{IBvl} + \alpha_{max}\frac{0.25\alpha_l}{\alpha_v}K_{IFvl} \quad (3)$$
$$where, \quad \alpha_{max} = 0.5 \times \max(\alpha_I, \alpha_{I+1})$$

Wall Friction Factor 및 기타 모델 개선

MARS 3D 모듈에서의 Wall Friction 모델, 1D/3D 연결부분에서의 일부 모델, 3D 모듈에서의 기체상의 밀도, 새로운 Wall Friction 모델 적용으로 인한 입력 카드 등의 코드 개선이 있었다. MARS의 3D 모듈에 의한 Pressure Drop은 1D 모듈에 의한 Pressure Drop보다 일반적으로 상당히 크다. 위의 계산 결과에서도 Wall Drag로 인한 Pressure Drop이 큰 것으로 보인다. 3D 모듈의 Bubbly Flow Regime에서 사용하는 Wall Friction Factor는 식 (4)와 같다.

$$f_k = \max(\frac{64.0}{Re_k}, \frac{1.691}{Re_k^{0.43}}, \frac{0.117}{Re_k^{0.14}}) \quad (4)$$

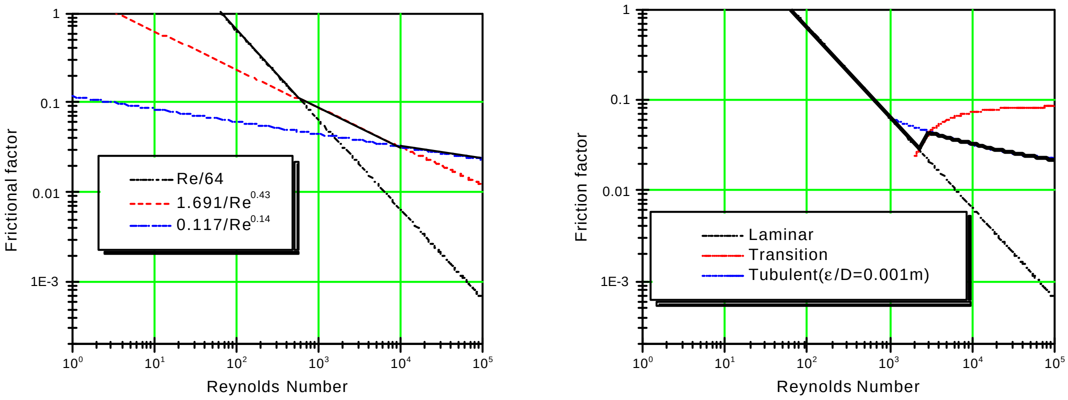
그림 3에서 보는 바와 같이 식 (4)의 가정은 Reynolds Number 600이하는 Lamina Flow Region, 600에서 10000까지를 Laminal-Tubulent Transition, 10000 이상을 Tubulent Region으로 구분하였다. 또한 배관의 크기에 관계없이 같은 Friction Factor를 적용하기 때문에 원자로 용기의 Downcomer와 같이 Hydraulic Diameter가 큰 경우에 대해 실제보다 크게 계산할 것으로 판단된다.

MARS 1D 모듈의 Wall Friction Factor는 세가지의 유동 영역에 대해 Laminar Flow를 Reynolds Number 2200까지, Transition구간을 2200에서 3000까지, 3000 이상을 Tubulent flow로 가정하였다. Friction Factor는 각 유동 영역에 다음과 같이 정의하였다.

$$f_k = \begin{cases} \dfrac{64.0}{Re_k}, & for\ laminar\ region, \\ (3.75 - \dfrac{8250}{Re_k})(f_{T,3000} - f_{L,2200}) + f_{L,2200}, & for\ transition\ region, \\ \left[-2\log\left\{\dfrac{e}{3.7D} + \dfrac{2.51}{Re_k}\left(1.14 - 2\log(\dfrac{e}{D} + \dfrac{21.25}{Re_k^{0.9}})\right)\right\}\right]^{-2}, & for\ tubulent\ region \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)는 Transition, Tubulent 영역에서 배관의 크기에 따라 다른 Friction Factor를 적용한다. 식 (5)를 MARS 3D 모듈에 적용하여 Friction Factor의 모델을 통합하였으며, Wall Roughness는 Default Value로서 0.0001 m를 가정하였다.

MARS 코드는 1D/3D 경계면에서 Momentum Equation들은 1D 모듈에서 계산한다. 반면에 Energy와 Mass Equation들은 각각의 영역에서 계산한다. 따라서 1D/3D 경계면 속도와 유량이 각각의 영역에서 영향을 미치게 되므로 이들은 각 모듈의 모델들에 반영되어야 한다. 1D부분의 모델과 3D 부분의 모델이 축방향으로 연결되어 있는 경우는 기존의 코드 구조에서 올바르게 계산하도록 되어 있다. 반면에 1D 부분이 3D Cell에 Cross로 연결될 경우, 기존의 3D 모듈에는 없는 새로운 Gap (Channel들을 연결하는 Horizontal 방향의 Junction) 에 연결되기 때문에 새로운 Gap의 유량과 속도가 3D 모듈의 코드의 모델들에 반영되도록 개선하였다.



Base Model **Modified**

그림 3. MARS 3D 모듈의 Friction Factor 수정

MARS 3D 모듈의 Interfacial Term들을 계산할 때 Vapor Phase Density 계산의 오류가 있었다. 일반적으로 3D 모듈에서 Vapor Phase는 Steam과 비응축성 기체로 나누어 각각의 Density에 Mass Fraction을 곱한 값으로 식 (6)과 같이 Density를 표현하고 있다. 따라서 Vapor Phase의 Density는 두 변수의 합이 되어야 한다. 그러나 MARS의 3D 모듈은 Interfacial Term들을 계산할 때 Steam Phase의 Density Fraction 만을 모든 상관식에 사용하고 있었다. 따라서, 이를 두 변수의 합이 되도록 수정하였다.

$$\rho_n = \rho_v \frac{M_n}{M_n + M_s}, \quad \rho_s = \rho_v \frac{M_s}{M_n + M_s}$$
$$\begin{aligned} where,\quad & \rho_v : Vapor\ Phase\ Total\ Density \\ & \rho_n : Noncondensable\ gas\ Density \\ & \rho_s : Steam\ Density \\ & M : Mass \end{aligned} \qquad (6)$$

MARS 코드의 입력이 일부 변경되었다. (1) MARS 3D 모듈은 Gap Loss Coefficient를 Horizontal Momentum Cell별로 입력할 수 없다. 따라서 복잡한 계통을 보다 정확히 모델하기 위해서는 많은 Section(같은 Elevation을 갖는 Channel들의 집합체)들로 나누어야 한다. 이를 개선하기 위해 Gap Loss Coefficient를 Horizontal Momentum Cell별로 입력할 수 있도록 수정하였다. (2) 새로운 Wall Friction 모델은 Wall 표면의 조도(Roughness)를 필요로 한다. Default 값으로 0.0001 m가 코드에 내장되어 있으나, 이를 Channel 별로 변경할 수 있도록 입력이 변경되었다. 이들의 예는 다음과 같다.

(1) Gap Loss Coefficient를 Cell 별로 변화를 주기 위해서는 6050ccxx 카드에서 Channel Variation Table과 같이 Table을 만든 후, 6060tt00 카드의 두 번째 Word에 음(-)의 cc 값을 입력한다. 그리고 6060ttdd 카드에서 Gap 번호들을 입력한다.
(2) Wall Friction Factor에 이용되는 조도 변경하기 위해서는 6020cc00 Channel Data 입력 카드의 일곱 번째 Word에 조도 값을 입력하면 된다. Default 값을 사용할 때에는 입력하지 않아도 된다.

5. MARS 평가 계산

기존의 MARS 2.0 코드를 이용하여 예비계산을 수행하였다. 예비계산 결과 비상 노심 냉각수가 주입되기 전까지 계통의 압력 거동은 잘 예측된다. 그러나, 실험의 경우 비상 노심 냉각수가 주입되면서 증기와 물의 직접 접촉 응축에 의해 계통의 압력은 약 4.6 bar까지 급감한다. 이후 압력은 서서히 증가하여 80초 이후부터 약 5.2 bar에서 평형상태를 유지한다. 반면에 예비계산은 비상 노심 냉각수의 주입과 동시에 압력 감소 및 증기 응축을 잘 예측하지 못하며, 계통압력의 감소는 52초 경부터 발생한다. 또한 실험에서는 약 57초부터 하부공동으로 비상노심 냉각수가 유입되어 80초 이후 약 1.8 m의 평형수위를 유지하는 반면에 예비계산은 실험보다 훨씬 빨리 약 65초에 하부공동을 다 채워버린다.

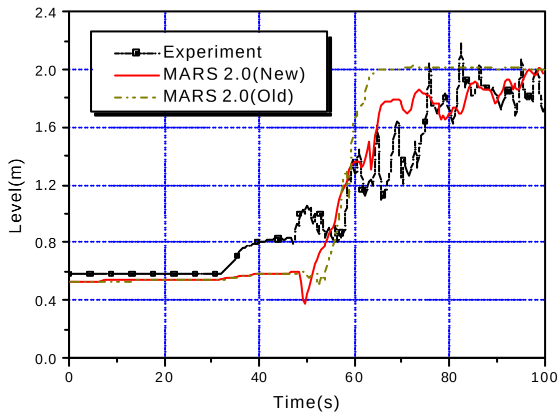


그림 4. 하부 공동의 수위

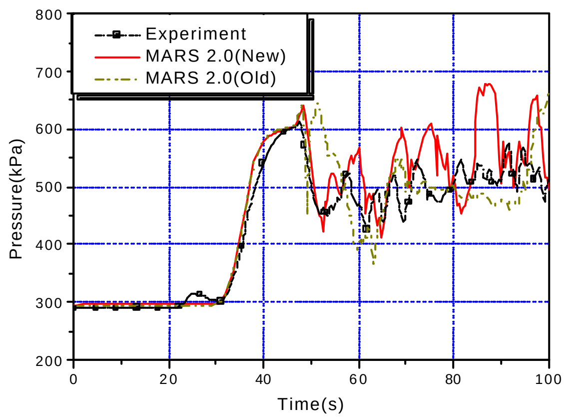


그림 5. Downcomer 압력 거동

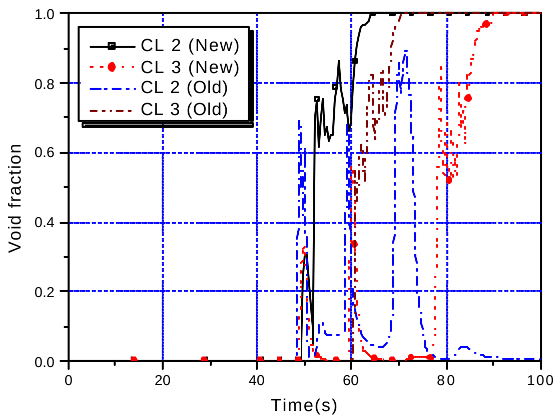


그림 6. 유로 3의 저온관 기포율

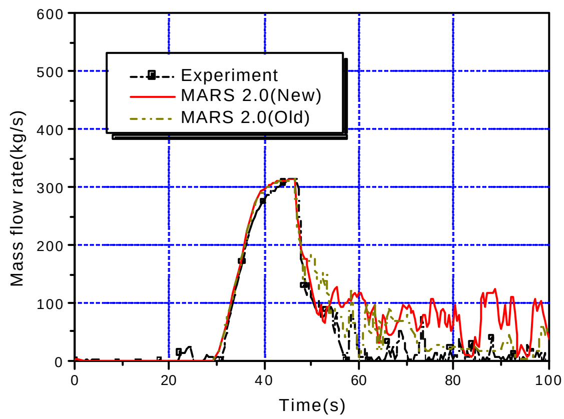


그림 7. 파단유로의 증기 방출 거동

이에따라, 제 4절에 논의된 바와 같이, MARS 모델의 개선이 이루어졌다. 개선된 MARS 2.0 코드를 사용한 Phase A의 평가계산 결과, 평형상태(80초~100초)기간 동안 하부 공동 수위는 실험과 일치하는 약 1.8 m의 임계 높이를 예측하였다. 즉, 기존의 MARS 2.0과 비교하여 DVI 우회현상에 대한 예측능력이 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 60초에서 80초 사이의 비상노심 냉각수의 하부공동으로 유입량(ECC Penetration)을 적절히 예측하였다.

개선된 MARS 2.0코드는 초기의 감압을 적절히 예측하나, 70초 이후 증기 응축은 여전히 과소 예측하므로 계통의 압력은 실험보다 약간 높게 유지하였다. 실험에서는 비상노심 냉각수의 일부가 건전한 저온관(Loop 2와 3)으로 유입되면서 저온관과 Downcomer간의 상호작용이 있었다. 이 현상에 대한 예측은 두 경우가 거의 비슷하다.

4. 결론 및 추후 계획

UPTF의 DVI 실험에 대해 MARS 2.0 코드를 이용하여 다차원 분석을 수행하였다. 이 실험은 LBLOCA의 EOB에서 축압기 냉각수가 원자로 용기로 주입될 때 냉각수의 우회량과 하부 공동의 Refill 량을 알아보기 위한 것이다. 4 단계(Phase A, B, C, D)의 실험 중, Phase A에 대해 MARS 2.0 코드 평가계산을 수행하였다.

Phase A에 대해 MARS 2.0의 예비 평가결과는 실험보다 적은 초기 감압과 빠른 하부공동의 수위 상승(우회량이 적음)을 예측하였다. 예비 평가결과를 바탕으로 MARS 3D 모듈의 Interfacial Friction Force 모델 및 Wall Friction Factor 모델 등을 개선하였다. 개선된 MARS 코드를 이용하여 재 계산을 수행한 결과, 실험과 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 본 연구를 통한 MARS 코드의 개선은 LBLOCA EOB 단계에서 MARS 코드의 DVI 우회현상 해석능력을 크게 향상시킴을 알 수 있다. 향후, UPTF DVI 실험 B, C 및 D에 대한 평가계산을 통하여, DVI 주요현상에 대한 MARS 코드의 종합적인 개선 및 평가가 이루어질 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

부호 설명

K_{Ivl} : Interfacial friction coefficient

α : Void fraction

ρ : Phase density

Re : Reynolds number

σ : Surface tension

f : Friction factor

C_D : Interfacial Drag Coefficient

r_b : Bubble radius

U_r : Relative Velocity

We : Weber number

D_H : Hydraulic diameter

ε : Wall roughness

5. 참고문헌

[1] 이원재, 정법동, 정재준, 하귀석, “다차원 최적 열수력 계통 분석 코드 MARS 1.3 개발 및 검증”, KAERI/TR-1108/98 (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”, ANE, 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 (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] 정법동, 정재준, 이원재, “MARS 1.3 System Analysis Code Coupling with CONTEMPT4/MOD5/PCCS Containment Analysis Code using DLL”, Proc. KNS ’98 Autumn Meeting (1998)

[7] UPTF Team, “Experimental Data Report, Test No. 21, Downcomer Injection Test”, SIMENS AG, KWU (1990)

[8] J.J. Jeong, I. Dor, and D. Bestion, “Improvement and Assessment of the CATHARE 2 Three-dimensional Module Compared with the UPTF Downcomer Test 7”, Nuclear Technology, Vol. 117 (1996)