2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

UPTF DVI 실험 결과를 이용한 MARS 코드의 비상노심 냉각수 우회현상 모의능력 평가

Assessment of MARS for ECC Bypass Phenomena Using UPTF DVI Tests

하귀석, 정재준, 황문규, 김경두, 이원재

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국 원자력 연구소에서 개발중인 MARS 2.0 최적 열수력 계통 분석코드의 강수관 다차원 열수력 현상에 대한 예측능력을 평가하기 위해 UPTF (Upper Plenum Test Facility) DVI (Direct Vessel Injection) 실험 결과에 대한 평가 계산을 수행하였다. UPTF DVI Test 21은 대형냉각재 상실사고시 강수관 및 상부공동(Upper Plenum)에서의 다차원적인 이상 유동 현상을 규명하기 위해 4개의 단계(A, B, C, D)로 나누어 수행된 실험이다. 이중 단계 A, B, D 등에 대해 MARS 2.0 최적 열수력 계통 분석코드를 이용하여 예비 평가를 수행하고, 예비 계산을 근거로 MARS 코드의 일부 모델을 개선시켰다. 예비 평가 결과, 단계 A, B에 대해 예측결과가 만족스럽지 않았으며, 단계 D에 대해서는 실험과 유사한 결과를 얻었다. 예비 계산 결과를 바탕으로, MARS 3D 모듈에 적용되는 유동 영역 중 “Inverted Pool” 유동 영역에서 액상과 기상에 대한 계면 항력 계수 및 계면 응축 열전달 계수를 개선시켰다. 또한 벽면 마찰계수 모델도 MARS 1D 및 3D 모듈에서의 일관성을 위해 1D 모듈의 모델로 통합시켰다. 결과적으로 개선된 MARS 2.0 코드를 이용한 계산 결과는 실험과 상당히 일치되는 결과를 얻었다.

Abstract

UPTF DVI Test 21 is divided into four phases of tests A, B, C and D. The Multi-dimensional analysis for UPTF DVI Test 21 Phases A, B, and D which are performed to evaluate ECC (Emergency Core Cooling) bypass during End-of-Blowdown and reflood of LBLOCA (Large Break Loss-Of-Coolant Accident) has been carried out using MARS 2.0 thermal hydraulic computer code. The purpose of the assessment is to investigate the MARS (Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety) simulation capability for ECC bypass in downcomer when ECC water is injected during End-of-Blowdown and reflood of LBLOCA. Preliminary assessment showed that the MARS yielded poor results for the phases A and B but agreeable results for the phase D. Based on these results, models for the interfacial friction and the interfacial heat transfer for inverted pool flow regime of the MARS 3D module were improved. Also, the wall friction factor of the 3D module was modified as the form similar to that of the 1D module. Assessment results with the modified MARS nearly agreed with the experimental results. In conclusion, it has been shown that the modified MARS is capable of simulating well the ECC bypass phenomena during EOB and reflood of LBLOCA.

1. 서론

MARS 2.0[1,2]은 경수로의 과도기 사고 해석을 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 RELA5[3]와 COBRA-TF[4]를 기초로 개발되었다. 또한 MARS는 3D 노심 동특성 코드(MASTER)[5] 와 격납용기 코드(Contempt4)[6] 등과 같은 타 분야 전문 코드들과 연계 해석을 할 수 있는 통합 코드 체계를 갖추고 있다.

RELAP5 코드는 이상 유동을 일차원, 2-유체로 모델링한 컴퓨터 코드로서 다양한 기능을 갖추었고 안정성이 뛰어나다. 반면에 COBRA-TF는 이상 유동을 다차원, 2-유체, 3-유동장으로 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 수정 및 검증이 용이하도록 1D 모듈의 전역 변수들을 FORTRAN 90의 동적 기억장소 할당 방법을 이용하여 모듈화하였으며, 사용자의 편의성을 향상시키기 위해 다양한 Windows Graphics 기능을 활용하였다.

본 논문에서 MARS의 해석능력 평가를 위해 채택한 UPTF Test는 냉각재 상실사고시 원자로의 일차계통에서의 다차원 유동현상을 실험적으로 연구한 것이다. 그중 UPTF Test 21[7]은 대형 냉각재 상실사고시 재충수 및 재관수 중에 비상노심 냉각수가 DVI 노즐로 유입되는 경우 원자로의 강수관에서 역류 유동한계(Counter-Current Flow Limitation)와 같은 다차원 열수력 현상에 관한 실험을 포함한다. 일차원 계통 분석 코드는 역류 유동한계가 발생되는 조건에서는 역류 유동 상관식으로 운동량 보존 방정식을 대치하는 데, 원자로의 강수관과 같은 환형(Annulus)형태에서는 유동의 다차원적인 특성 때문에 역류 유동 상관식의 적용에 한계가 있다. UPTF 실험자료는 이와 같은 2상 유체의 다차원 열수력적인 거동을 잘 나타내고 있다.

UPTF test 21은 4개의 단계로 나누어 실험이 수행되었는 데, 단계 A와 B는 대형냉각재 상실사고 후 재충수 단계에서 축압기(Accumulator)내의 비상노심 냉각수가 강수관으로 주입되는 경우에 강수관에서의 열수력 현상을 연구한 것이다. 반면에 단계 C와 D는 재관수시의 축압기 유량보다는 상대적으로 적은 유량이 강수관으로 주입되는 경우에 대해 각각 상부 공동과 강수관에서 이상 유동의 열수력 거동을 실험한 것이다. 본 논문은 강수관에 대한 실험(단계 A, B, D)을 대상으로 코드 평가를 수행하였다.

제 2절에서는 UPTF test 21을 보다 자세히 소개하고, 이어서 제 3절에서는 UPTF실험 계산을 위한 MARS 입력 모델링에 대해 토의할 것이다. 제 4절은 MARS 코드를 이용한 예비 평가 계산과 코드의 개선 사항, 제 5절은 개선된 MARS 코드를 이용한 계산 결과를 다룬다. 마지막으로 6절에서 결론을 맺는다.

2. UPTF Test 21

UPTF 실험장치는 3900 MWt, 4-Loop Babcock & Wilcox 가압 경수로를 모델한 실규모의 실험 설비이다. 원자로는 강수관, 하부 공동 (Lower Plenum), 노심 모의 장치, 상부 공동 등으로 구성되어 있으며, 4개의 배관 유로에는 각각 증기발생기 모의장치, 펌프 모의장치 등이 장착되어 있다. 강수관은 노심 Barrel과 원자로 용기벽 사이가 0.25 m이며, 원자로 용기의 직경은 4.87 m이다. 0.75 m 직경의 저온관 및 고온관 노즐들은 각각 4개씩 구성되어 있으며, 원자로 용기 하단부에서 9.12 m 높이에 장착되어 있다. 2개의 DVI 노즐은 직경이 0.308 m 이며, 용기 하단부에서 9.47 m 높이에 위치

한다

UPTF Test 21은 대형냉각재 상실사고의 재충수와 재관수 단계에서 비상노심 냉각수가 DVI로 주입되는 경우 강수관에서의 유동 현상을 연구하기 위해 수행되었다. 재충수 단계에서는 증기와 물의 이상 유체가 노심에서 강수관을 경유하여 파단 저온관으로 방출된다. 또한 축압기의 비상노심 냉각수가 강수관으로 주입되므로 인하여, 결과적으로 나타나는 증기와 물의 유동현상은 하부 공동의 재충수율에 영향을 미친다. 재충수 단계 후, 강수관은 비상노심 냉각수의 유입에 따라 저온관 아래 부분까지 차게 되며, 노심은 강수관과의 수두차에 의해 유입되는 냉각수의 비등으로 증기를 발생시킨다. 이 증기는 고온관, 증기발생기 U-tube, 저온관 등을 거쳐 다시 강수관으로 유입된 후 파단 저온관으로 방출되는 데, 이때 강수관의 냉각수중 일부는 액적상태로 이탈되어 증기와 함께 방출된다. UPTF Test 21은 위의 상황을 모의하여 실험을 수행한 것이다.

UPTF Test 21의 단계 A와 B는 재충수 조건하에서 실험이 수행되었는 데, 이들 실험은 파단 저온관의 파단 밸브만을 개방하고 각 유로들은 펌프 모의장치에서 폐쇄된다. 따라서 노심 모의장치에서 유입되는 증기는 하부 공동과 강수관을 경유하여 파단 저온관으로 방출된다. 단계 A의 실험 초기 압력은 3 bar 이고, 315 kg/s의 증기를 주입하여 6 bar 까지 가압한 후 DVI 노즐당 34^0C , 910 kg/s의 냉각수가 주입된다. 단계 B는 DVI 노즐 유량과 및 증기 유량에 따라 3개의 Sub-phase (B-I~III)들로 나눠며, 비상노심 냉각수의 온도는 125 ^{0}C로서 거의 포화상태에 가깝다. B-I 에서는 300 kg/s의 증기를 노심 모의장치를 통하여 주입하며, DVI 노즐당 850 kg/s의 냉각수를 주입한다. B-II 에서는 103 kg/s의 증기와 885 kg/s 의 냉각수가 각각 노심 모의 장치와 파단 저온관에 근접한 DVI 노즐로만 주입된다. B-III 에서는 102 kg/s의 증기와 850 kg/s의 냉각수가 각각 노심 및 2개의 DVI 노즐들로 주입된다.

표 1. UPTF Test 21의 실험 초기 및 경계 조건

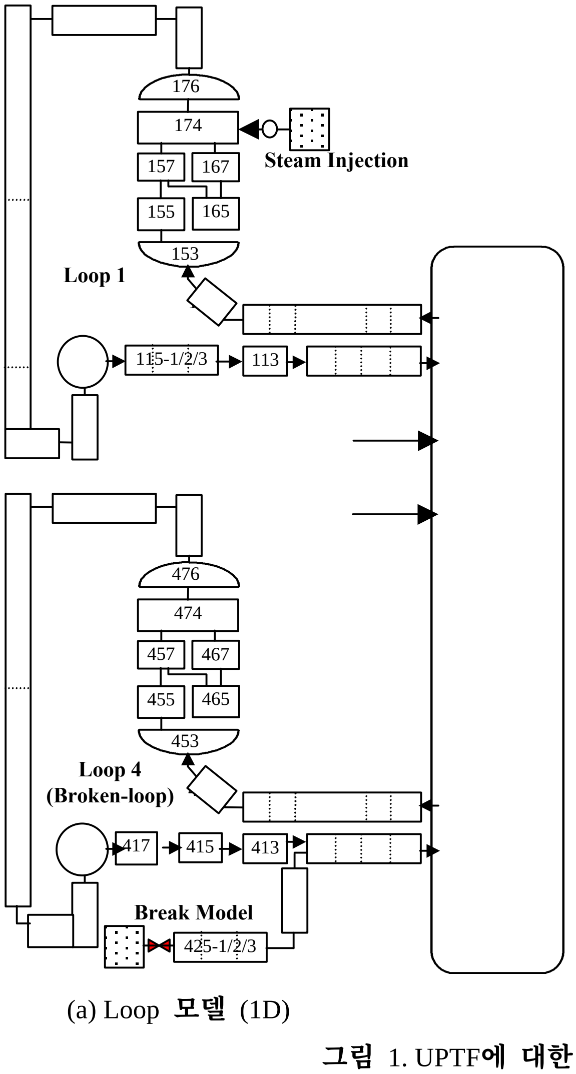
단계/ Subphase	비상노심냉각수 유량(kg/s)		증기 주입량(kg/s) $\dot{m}_{CORE} + \dot{m}_{SG}$	노심 냉각재 주입량(kg/s) $\dot{m}_{CORE}$	초기압력 (Mpa)	비상노심 냉각수온도 (K)
	DVI 노즐(0^o) 파단저온관쪽	DVI 노즐(180^o)				
A	912	910	315	0	0.29	307
B-I	845	856	300	0	0.29	398
B-II	885	0	103	0		398
B-III	885	835	102	0		398
D-I	120	120	100	0	0.25	303
D-II	120	120	90	0		303
D-III	120	120	75	277(200-312s)		303
D-IV	120	120	60	730(430-447s)		303

UPTF Test 21의 단계 D는 재관수 조건에서 실험한 것이다. 단계 A, B와는 달리 파단 유로만을 폐쇄하고 건전 유로들을 개방하였다. 원자로 용기에서 실험 초기 냉각재가 강수관과 노심의 중간 정도까지 채워져 있기 때문에 노심 모의 장치에서 발생되는 증기는 건전 유로의 고온관, 증기발생기, 저온관 강수관 등을 거쳐서 파단 저온관으로 방출된다. 이 단계는 노심 모의 장치의 증기 유량에 따라 4개의 Sub-phase (D-I~IV)들로 나뉜다. 비상 노심 냉각수의 유량은 2개의 DVI 노즐들을 통해 33 ^{0}C, 120 kg/s의 유량이 계속 주입되며, 노심에서의 증기 유량은 D-I에서 100 kg/s, D-II에서 90 kg/s, D-III에서 75 kg/s, D-IV에서 60 kg/s 씩 각각 주입되었다. 비상노심 냉각수의 과냉각은 약 100 ^{0}C 정도이고, 계통의 초기 압력은 2.5 bar이다. 또한 원자로 용기의 하부에서 120 kg/s 유량을

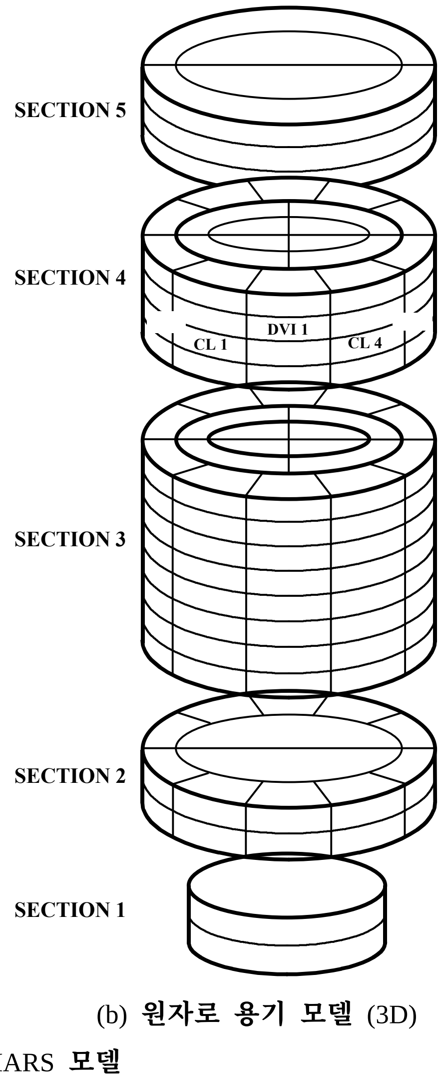
배수시키고, D-III와 D-IV에서는 소량의 냉각재가 노심 모의 장치를 통하여 주입시켜 강수관의 수위를 약간 높여서 실험을 수행하였다. 표 1은 UPTF Test 21의 실험 조건을 요약하여 나타내었다.

3. UPTF Test 21의 MARS 모델링

UPTF의 계통 모델은 4개의 냉각재 유로에 대해서는 MARS의 1D 모듈을 이용하고, 원자로 용기에 대해서는 3D 모듈을 이용하여 각각 모델하였다. 그림 1은 UPTF에 대한 MARS의 1D 모델과 3D 모델을 분리하여 나타내었다. 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 Cell들로 이루어져 있다.



(a) Loop 모델 (1D)



(b) 원자로 용기 모델 (3D)

그림 1. UPTF에 대한 MARS 모델

강수관에 대한 Nodalization은 축 방향과 원주 방향의 2차원적인 모델이다. 기하학적으로, 강수관은 4개의 저온관 노즐과 연결되고, 상부공동과 고온관을 연결하는 4개의 고온관 노즐이 통과되며, 비상 노심 냉각수를 주입하는 2개의 DVI 노즐이 연결된다. 이러한 구분으로 강수관은 10개의 원주 방향 노드를 갖게 되며, 대칭이 유지된다. 강수관의 축 방향 노드는 통상적으로 대형 냉각재

상실사고의 모의에 이용되는 길이와 유사하게 구분하였다.

하부 공동은 2개의 SECTION과 4개의 축 방향 노드로 구분하였다. SECTION 1은 하부 공동의 하반부를 모델하며, 단일 CHANNEL로 나타내었다. SECTION 2는 하부공동의 상반부를 모델한 것이다. 2개의 축 방향 노드로 나누었으며, 반경 방향으로 강수관 아래 영역과 노심 아래 영역으로 구분하였다. 노심 아래 영역은 2개 CHANNEL, 강수관 영역은 10개 CHANNEL로 모의하였다. SECTION 1과 2의 구분은 Barrel 아래로 가상선을 연장하여 원자로 용기 벽면과 교차하는 가상 높이를 이용하였다.

SECTION 3은 노심이 위치하는 부분을 모델한 것으로서, 반경 방향으로 노심 영역, 노심 우회 영역, 강수관 영역 등으로 구분되며, 8 개의 축 방향 노드를 포함한다. SECTION 5는 상부 헤드 영역을 모의한 것으로서 강수관 영역과 노심 상부 영역으로 구분하였으며, 3개의 축 방향 노드를 갖는다. SECTION 4의 상부공동 부분은 모조 핵연료 다발 상단부에서 상부 지지판 하부까지의 영역을 모델한 것이며, 축 방향으로는 저온관 노즐 아래 부분, 저온관 부분, DVI 노즐 부분, 강수관 최상부 영역 등 4개로 모의하였다. 따라서 강수관의 축 방향 2번째 노드에서 1D 모듈의 저온관이 연결되고, 고온관은 강수관 내측에 있는 3D 모듈 Cell들에 연결된다. DVI 노즐은 강수관의 3번째 노드에 연결된다.

그림 1의 (a)는 Loop Nodalization 을 보여주고 있다. 파단 유로의 파단 모의부분을 제외하고 4개의 유로가 동일하게 모델되었다. 각각의 유로는 고온관, 증기발생기, 펌프 흡입관, 펌프, 저온관 등을 모델한 노드를 포함한다. 원자로 용기의 입구과 출구는 3D Cell을 나타내는 SDBVOL 컴포넌트와 'Cross-flow Juction'으로 연결된다.

고온관은 증기발생기 모의장치의 Inlet Plenum과 원자로 용기를 연결하는 배관으로서, 1D 모듈의 'PIPE', 'SNGLVOL' 컴포넌트 등을 이용하여 8개의 제어체적으로 모델하였다. 증기발생기 모의장치는 증기와 물을 분리하는 'Cyclotron' 들을 포함하기 때문에 'SEPARATR' 를 포함한 다양한 컴포넌트를 이용하여 일반적인 경수로의 2차측 모델과 유사하게 모의하였다. 펌프는 'BRANCH' 컴포넌트를 이용하여 펌프 흡입관과 저온관을 연결하며, 펌프 흡입관은 7개의 제어체적을 갖는 'PIPE' 컴포넌트로 모델되었다. 저온관은 'PIPE', 'BRANCH' 컴포넌트를 이용하여 8개의 제어체적으로 모델하였다.

4. MARS의 예비평가 계산 및 모델 개선

대형냉각재 상실사고 중 증기와 냉각수의 상호작용 및 비상노심 냉각수의 우회 현상 (ECC Bypass)에 대한 MARS 코드의 예측능력을 평가하기 위하여 UPTF Test 21에 대해 계산을 수행하였다. 이 실험에 대한 평가는 MARS 3D 모듈의 계면 항력 모델과 직접 접촉 응축 모델 등의 유효성을 실제 발전소 규모의 강수관에서 검증할 수 있다. 이들 모델의 적절성을 검토하기 위하여, 다량의 과냉 냉각수가 주입되는 단계 A, B, D에 대해서 예비 평가한 결과를 그림 3~10에 나타내었다.

그림 5에서 보는 바와 같이 MARS의 계산은 직접 접촉 응축으로 인한 계통의 감압이 실험보다 늦게 일어남을 보인다. 또한 비상 노심 냉각수가 하부 공동을 실험보다 빨리 채우는 것으로 계산되었으며, 이는 ECC Bypass가 실험보다 적게 계산되었음을 나타낸다. 그림 9에서 보듯이 단계 D에 대한 예비계산에서는 D-I과 D-II에 대해 실험보다 상대적으로 많은 ECC Bypass를 보였으며, D-III, D-IV에서는 상대적으로 적은 ECC Bypass를 나타내었다.

예비 계산 결과에 따르면, 강수관에서 기포율 분포가 실험과 다르다. 단계 A와 B의 실험에서

비상노심 냉각수가 강수관의 상부에 넓게 분포한 반면, MARS 코드는 비상노심 냉각수가 횡방향으로 분포하지 못하고 바로 하부공동을 채웠다(그림 3, 4 참조). 이로 인하여 노심의 증기가 강수관을 상승하면서 응축되지 못하였다.

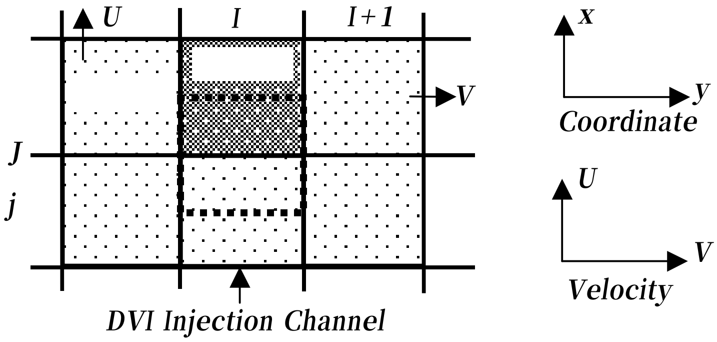


그림 2. 단계 A와 B에서 발생되는 Inverted Pool Flow Regime

비상노심 냉각수가 강수관에서 떨어질 때, 냉각수의 선단 부분과 측면 냉각수의 경계 부분들은 MARS 3D 모듈에서 'Inverted Pool Flow Regime'으로 간주하였다. MARS 3D 모듈에서는 일반적으로 이웃한 Cell 들의 평균 기포율로 유동 영역을 선택한다. 그러나 'Inverted Pool Flow Regime'이나 'Pool Flow Regime'은 위 아래 Cell 에서의 기포율 차이가 0.4 보다 클 경우에 선택된다. 이들 두 유동 영역의 계면 항력과 계면 열전달 계수들을 구하기 위한 기포율은 횡방향과 축방향 모두에서 이웃한 두 Cell의 기포율중 작은 값을 이용한다. 그림 2는 단계 A와 B에서 나타난 'Inverted Pool Flow Regime' 유동 형태를 보여주며, 이때 계면 항력 계수는 거의 Bubbly 유동에서의 값과 같다. 이와 같이 구한 큰 계면 항력은 냉각수가 강수관 상부에 넓게 분포하지 못하게 하는 원인이 되며, 냉각수가 바로 하부 공동으로 떨어지도록 한다. 계면 항력 계산에 이용된 모델은 다음과 같다.

$$K_{IBvl} = 0.375 \times \frac{C_D}{r_b} a_v r_l U_r$$

$$where,\quad C_D = \frac{24}{Re_b}(1.0 + 0.1 \times Re_b^{0.75}) \qquad (1)$$

$$r_b = \min(0.5\frac{We_b s}{r_l U_r^2},\ 0.5D_H,\ 0.02),\ \ if\ \ a_v < 0.2$$

$$H_{sclv} = \left[\frac{2.0 k_l |U_r| r_l C_{p_l}}{p r_b}\right]^{0.5} \qquad (2)$$

식 (1)은 Bubbly 유동에 대한 계면 항력 모델이며 식 (2)는 이 유동에서의 응축 열전달 모델이다. Inverted Pool 유동을 나타내는 Cell에서 절반은 Bubbly 유동이지만 나머지는 Annular 유동을 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 절반의 Annular 유동형태에 대해 설명하지 못한다. 따라서 Annular 유동 형태를 고려하도록 식 (4)와 같이 Inverted Pool 유동에 대한 계면 항력 상관식을 수정하였다. 식 (4)는 식 (1)과 Annular 유동에서 계면 항력 계수를 구하기 위해 이용되는 식 (3)을 적절히 혼합한 모델이다. 또한 단계 A의 예비 평가에서 응축현상을 적절히 예측하지 못하는 것으로 평가되어, 참조 문헌[8]의 식 (5)를 'Inverted Pool' 유동에 적용하였다.

$$K_{IFvl} = 2.0 \times \frac{f_I}{D_H} \sqrt{\alpha_v} \rho_v U_r \quad (3)$$
$$where, \quad f_I = 0.005 \times (1.0 + 75 \times \alpha_l)$$

$$K_{IIvl} = (1 - \alpha_{max} \frac{0.25\alpha_l}{\alpha_v}) K_{IFvl} + \alpha_{max} \frac{0.25\alpha_l}{\alpha_v} K_{IBvl} \quad (4)$$
$$where, \quad \alpha_{max} = 1.0 - 0.5 \times \max(\alpha_I, \alpha_{I+1})$$

$$H_{sclv} = 6.5 |U_r| \rho_l C_{p_l} Re^{-0.4} \quad (5)$$

MARS 3D 모듈의 벽면 마찰계수는 식 (6)과 같이 레이놀드 수를 이용하여 계산된다. 식 (6)은 벽면의 거칠기를 고려할 수 없기 때문에 사용자들이 기하학적으로 노심과 다른 벽면에서 마찰에 따른 압력 강하를 올바로 계산 할 수 없을 수도 있다. 이 모델은 MARS 1D 모듈에서 이용하는 Colebrook-White 상관식[9]으로 대치되었다. 식 (7)은 레이놀드 수와 벽면의 거칠기를 근거로 마찰계수를 구한다. 이외에도 MARS의 1D/3D 가 연결되는 Cell에서의 액적 동반 모델 개선과 비응축성 가스의 밀도 Error 수정 등이 있었다.

$$f_k = \max(\frac{64.0}{Re_k}, \frac{1.691}{Re_k^{0.43}}, \frac{0.117}{Re_k^{0.14}}) \quad (6)$$

$$f_k = \begin{cases} \frac{64.0}{Re_k}, & for\ laminar\ region, \\ (3.75 - \frac{8250}{Re_k})(f_{T,3000} - f_{L,2200}) + f_{L,2200}, & for\ transition\ region, \\ \left[-2\log\left\{ \frac{e}{3.7D_H} + \frac{2.51}{Re_k}\left(1.14 - 2\log(\frac{e}{D_H} + \frac{21.25}{Re_k^{0.9}}) \right) \right\} \right]^{-2}, & for\ tubulent\ region \end{cases} \quad (7)$$

5. 개선된 MARS의 계산 결과

예비 계산 결과를 근거로 MARS 3D 모듈의 Inverted Pool 유동 영역에 대한 계면 관련 모델들이 수정되었다. 수정된 MARS의 계산 결과가 그림 4에서 10에 나타나 있다. 단계 A와 B의 실험은 노심과 증기발생기에서 유입되는 증기에 의하여 압력이 약 6 bar에 도달하면 비상 노심 냉각수를 강수관으로 주입하면서 시작된다.

단계 A는 과냉각도가 100 ^{0}C 정도인 냉각수가 주입되는 데, 파단 저온관과 반대편의 DVI 주입구에서는 냉각수가 횡방향으로 널리 분포됨을 실험에서 보여주었다. 그림 4는 개선된 MARS로 계산한 강수관의 기포율 분포를 보여준다. 예비 평가에서 계산한 그림 3과는 달리 그림 4의 개선된 MARS의 계산 결과는 실험에 상당히 근접한 결과를 나타내었다. 파단 저온관과 인접한 DVI 노즐에서 주입된 냉각수는 실험과 계산 모두 대부분 파단 저온관으로 방출되었다.

그림 5는 하부 공동의 수위 거동을 나타낸다. 이는 역으로 ECC Bypass를 나타내며, 개선된 MARS에 의한 결과는 실험과 상당히 일치하고 있다. 단계 A에서 계통의 압력 거동은 주로 과냉 냉각수와 증기의 직접 접촉에 의한 응축 현상에 의해 지배된다. 그림 6에 나타나 있듯이, 예비 평

가에서 비상노심 냉각수의 주입 초기에 계통의 감압이 약 8초 정도 지연된 반면, 개선된 MARS를 이용한 계산 결과에서는 실험의 압력 거동과 잘 일치하고 있다.

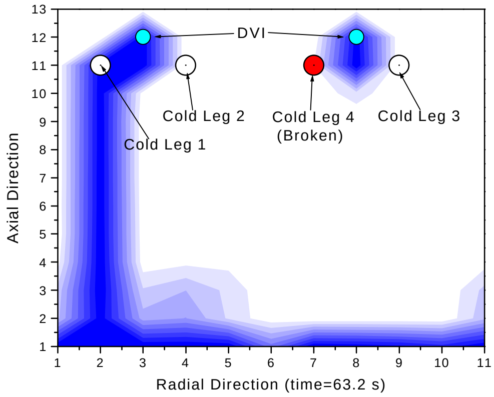


그림 3. 예비 평가시 MARS에 의한 강수관 기포율 분포도

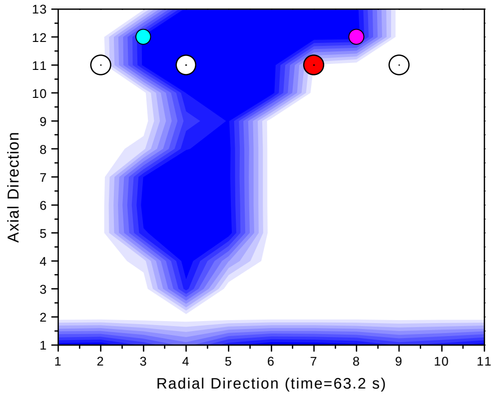


그림 4. 개선된 MARS에 의한 강수관 기포율 분포도

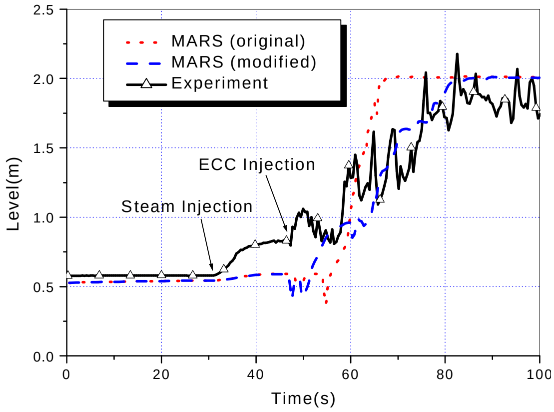


그림 5. 단계 A에 대한 수위 거동 비교

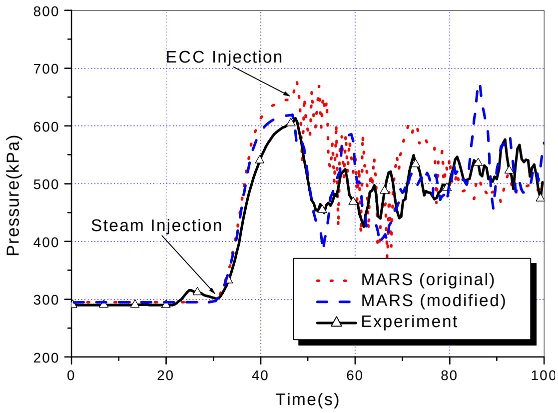


그림 6. 단계 A에 대한 압력 거동 비교

단계 B의 실험에서는 비상노심 냉각수의 온도가 단계 A에 비해 상당히 높기 때문에 계통의 압력을 감소시킬 만큼의 응축이 발생하지 않는다(그림 8). 오히려 질량의 계통 유입으로 인하여 계통 압력이 증가하였다. 실험의 압력 거동은 기존의 MARS와 개선된 MARS에서 거의 잘 예측되고 있는 반면에 하부 공동의 수위 거동은 두 계산 결과에서 실험보다 빨리 증가하였다. 그럼에도 불구하고 개선된 MARS의 계산 결과가 실험의 추세를 따르는 반면에 기존의 MARS는 실험과 많은 편차를 보인다.

B-I 단계의 경우 비상 노심 냉각수가 주입되면서 기존의 MARS는 하부 공동 수위 상승으로 인한 제한 수위 2.0 m에 바로 도달한다. 파단 저온관 부위의 DVI 노즐로만 비상노심 냉각수가 주입되는 B-II 단계에서는 실험에서 주입되는 냉각수 중 극히 일부만이 하부 공동을 채우는 반면에 기존의 MARS는 파단 저온관으로 방출되지 않고 거의 순간적으로 하부 공동을 채웠다. 그러나 개선된 MARS는 B-I 단계에서 초기 과다한 하부 공동으로의 냉각수 유입을 제외하고 ECC Bypass 유량이 적절히 예측됨을 나타내며, B-II 단계에서는 실험에서 소량이 하부공동으로 유입되는 반면, 개선된 MARS는 전혀 유입되지 않고 있다. 또한 B-III 단계에서도 ECC Bypass 유량을 적절히 예측하므로써 하부 공동의 수위를 적절히 예측하고 있다.

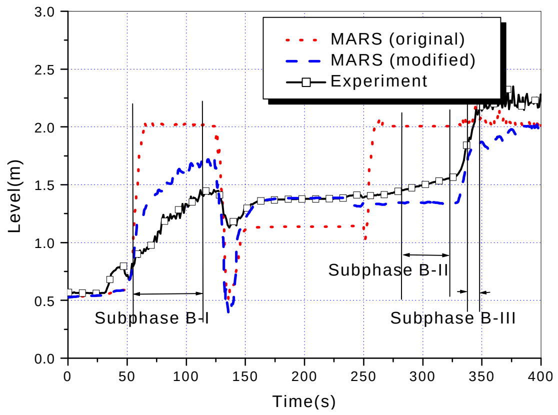


그림 7. 단계 B의 하부 공동의 수위거동 비교

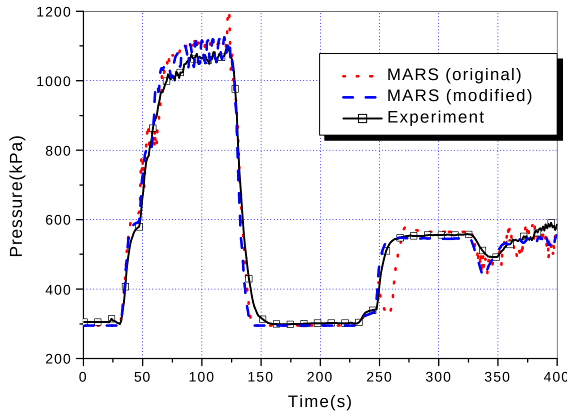


그림 8. 단계 B의 압력 거동 비교

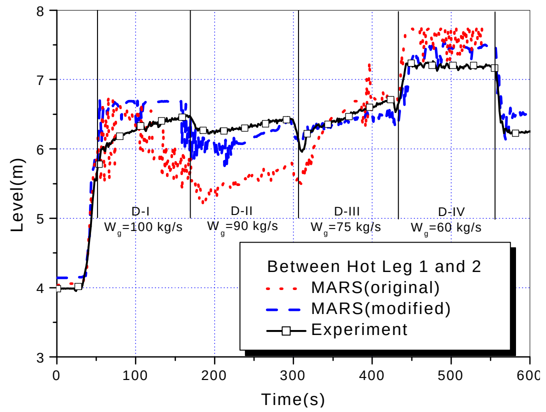


그림 9. 단계 D의 강수관 수위 거동

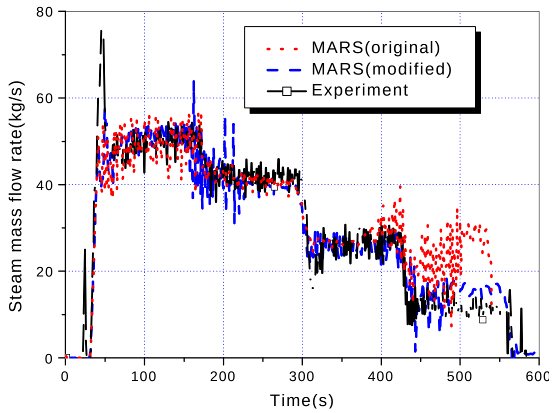


그림 10. 파단 저온관으로 증기 방출량 비교

재관수 상황을 모의한 단계 D의 경우, 초기 강수관 수위는 약 4.1 m이다. 두개의 DVI 노즐에서 240 kg/s의 비상 노심 냉각수가 주입되기 때문에 강수관 수위는 약 6.0 m 까지 상승한다. 이후 수위는 각 Sub-Phase 들이 종료되는 시점까지 느리게 상승한다. 실험에서 전체적으로 증기의 30 ~ 50 % 정도가 비상 노심 냉각수에 의해 응축되었다.

그림 9에서 보듯이 기존의 MARS의 결과는 D-I 단계에서 과잉의 액적이 방출되므로써 수위가 감소되었는 데 반하여 반면 개선된 MARS는 지나친 액적 방출로 인한 수위 감소를 보이지 않는다. 기존의 MARS를 이용한 계산에서 D-I에서의 실험과 수위차이가 D-II에서도 똑 같이 유지되다가 D-III 단계에서 증기 유량이 감소하기 때문에 다시 수위를 회복한다. 즉 증기 유량에 따라 기존의 MARS는 실험과 상당히 큰 액적 유량의 방출 차이를 나타낸다. 개선된 MARS의 결과는 기존의 MARS의 결과와 실험과 비교적 적은 편차를 나타낸다. 이러한 차이는 1D/3D 가 연결되는 Cell에서의 액적 동반 모델에 관하여 일부 수정이 있었기 때문으로 보인다. 기존의 MARS는 단계 D-IV에서 소량으로 유입되는 증기의 응축을 잘 예측하지 못하고 약 540초에 결국 계산이 실패하였다. 그러나 개선된 MARS는 증기의 응축을 보다 잘 예측하며, 성공적으로 계산되었다.

표 2는 각 단계의 평가 기간동안 평균한 비상 노심 냉각수의 하부 공동으로의 유입 유량과 강수관 수위를 나타내었다. 표 2의 B-III 단계에서 기존 MARS에 의한 결과는 B-III 단계의 평가 기간 이전에 이미 도달되었기 때문에 그 값을 산출할 수 없었다. 표에서 보듯이 기존의 MARS는 많

게는 실험과 거의 12배 이상 차이가 나는 반면에, 개선된 MARS는 기존의 MARS의 결과보다 상당히 개선됨을 보여주고 있다.

표 2 하부공동으로의 ECC 유입 유량 및 강수관 수위 예측 비교

단계	하부공동 유입 유량 (kg/s)			단계	강수관 수위 (m)		
	실험	기존 MARS	개선된 MARS		실험	기존 MARS	개선된 MARS
A	385	806	354	D-I	6.4	6.0	6.5
B-I	90	542	107	D-II	6.4	5.6	6.2
B-II	33	394	0	D-III	6.5	6.8	6.4
B-III	554	-	400	D-IV	7.2	7.7	7.4

6. 결론

다차원 계통 분석 코드인 MARS 2.0의 다차원 열수력 현상 예측 능력을 평가하기 위해 UPTF Test 21 실험을 모의 분석하였다. 이 실험은 DVI 노즐을 장착한 발전소의 대형 냉각재 상실사고시 재충수 및 재관수 단계를 모의 실험한 것으로서, 강수관에서의 강력한 직접 접촉 응축 및 2차원적 역학적 상호작용과 같은 열수력적인 거동을 조사한 것이다.

MARS코드를 이용한 예비 평가결과는 실험에서 나타난 열수력 현상을 적절히 예측하지 못했다. 예비 평가 결과 MARS는 Inverted Pool 유동에서 계면 항력을 과대 예측하고, 계면의 응축 열전달을 과소 예측하는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로, Inverted Pool 유동 영역에 대한 계면 항력 상관식과 계면 응축 열전달 상관식을 수정했다. 추가로 벽면 마찰계수를 MARS 1D 모듈의 모델로 대치했으며, 1D/3D 경계면에서의 액적 모델을 개선했다. 개선한 MARS의 해석 결과는 기존 MARS의 해석결과에 비해 실험과 상당히 일치함을 보여주었다.

DVI 강수관 다차원 열수력현상에 대한 MARS 코드의 열수력모델 개선 및 종합적인 평가는 본 UPTF DVI Test 21 실험결과 외에도 향후 한국원자력연구소에서 생산될 DVI 실험결과를 사용하여 수행할 예정이며, 이를 통하여 차세대원전의 강수관 열수력현상에 대한 MARS 코드의 해석능력의 종합적인 검증이 이루어질 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

부호 설명

K_{IBvl} : Interfacial friction coefficient for bubbly flow

K_{IFvl} : Interfacial friction coefficient for film flow

K_{IIvl} : Interfacial friction coefficient for inverted pool flow

C_D : Interfacial drag coefficient

α_v : Vapor void fraction

α_l : Liquid void fraction

r_b : Bubble radius

C_{pl} : Liquid specific heat

ρ_l : Liquid phase density

U_r : Relative velocity

Re_b : Bubble reynolds number

We_b : Bubble weber number

σ : Surface tension

D_H : Hydraulic diameter

f_i : Interfacial friction factor

f_k : Wall friction factor for phase k

e : Wall roughness

k_l : Liquid thermal conductivity

H_{sclv} : Interfacial heat transfer coefficient between subcooled water and vapor

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).

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

[8] R. J. Young, K. T. Yang and J. L. Novotny, "Vapor-Liquid Interaction in a High Velocity Vapor Jet Condensing in a Coaxial Water Flow", Proc. of 5th International Heat Transfer Conference, Vol. 3 (1974).

[9] D. J. Zigrang and N. D. Sylvester, "A Review of Explicit Friction Factor Equations", J. of Energy Resources Technology, Vol. 107 (1985).