

노심보충수탱크의 직접접촉응축에 대한 MARS의 계산능력평가

박 근 태, 박 익 규,* 이 승 욱, 박 현 식

한국원자력연구원, 열수력안전연구부

ASSESSMENT OF MARS FOR DIRECT CONTACT CONDENSATION IN THE CORE MAKE-UP TANK

Keun Tae Park, Ik Kyu Park,* Seung Wook Lee and Hyun Sik Park

Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal Hydraulics Safety Research Division

This study aimed at assessing the analysis capability of thermal-hydraulic computer code, MARS for the behaviors of the core make-up tank (CMT). The sensitivity study on the nodalization to simulate the CMT was conducted, and the MARS calculations were compared with KAIST experimental data and RELAP5/MOD3.3 calculations. The 12-node model was fixed through a nodalization study to investigate the effect of the number of nodes in the CMT (2-, 4-, 8-, 12-, 16-node). The sensitivity studies on various parameters, such as water subcooling of the CMT, steam pressure, and natural circulation flow were done. MARS calculations were reasonable in the injection time and the effects of several parameters on the CMT behaviors even though the mesh-dependency should be properly treated for reactor applications.

Key Words : MARS, 노심보충수탱크(Core Make-up Tank), 직접접촉응축(Direct Contact Condensation), 열적 성층화(Thermal Stratification), 피동안전주입계통(Passive Safety Injection System)

기호설명(Nomenclature)

알파벳

A : 단면적

B : 중력가속도

a_{gf} : 단위 부피당 계면적, A/V

D : 지름

G_m : $\alpha_g \rho_g |v_g| + \alpha_f \rho_f |v_f|$

Gr : 그라쇼프 수(Grashof number)

H : 계면 열전달 계수

h : 엔탈피

k : 열전도도

M : 계면 운동량 전달

Nu : 넛셀 수(Nusselt number), $0.27 (GrPr)^{0.25}$

P : 압력

Pr : 프란틀 수(Prandtl number)

Q : 열량

T : 온도

U : 내부 에너지

V : 격자 부피

v : 속도

v_m : 유동평균속도, G_m/ρ_m

v_{Tb} : 테일러 기포 상승 속도,
 $0.35 [gD(\rho_f - \rho_g)/\rho_f]^{1/2}$

X_n : 비응축가스 질량 분율

x : 1차원 좌표

그리스문자

α : 부피 분율

ρ : 밀도

ρ_m : 평균밀도, $\alpha_g \rho_g + \alpha_f \rho_f$

Γ : 상변화량

Received: December 31, 2013, Revised: March 4, 2014,

Accepted: March 5, 2014.

* Corresponding author, E-mail: gosu@kaeri.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.1.064>

© KSCFE 2014

위첨자

- s : 포화 상태(saturation)
- VM : 가상 질량(virtual mass)

아래첨자

- i : 계면
- k : 기체(g) 또는 액체(g)
- s : 증기
- w : 벽면

1. 서 론

지난 십여 년간 원자로의 안전성 향상을 위해 능동 시스템에서 탈피하여 피동 안전 계통을 적용한 설계와 연구들이 다방면에서 진행되어 왔다. 특히, 지난 2011년 발생한 일본 후쿠시마 사고 이후, 원전 안전성 문제는 전 세계적으로 관심의 대상이 되고 있다. 이에 따라 비상 디젤 발전기의 기능 상실을 포함한 외부 전원 상실 및 운전원 대피 시에도 자체적으로 원자로의 안전성을 유지할 수 있는 완전피동안전계통(PSS, Passive Safety System) 원전에 대한 연구가 수행되고 있다.

완전피동안전계통 원전개념으로는 AP600[1], AP1000[2], CP1300[3], IPSS[4] 등이 있다. 완전피동안전계통은 증기 발생기의 2차측 냉각을 위한 피동잔열제거시스템(PRHRs, Passive Residual Heat Removal System)과 피동격납용기냉각시스템(PCCS, Passive Containment Cooling System) 그리고 피동안전주입계통(PSIS, Passive Safety Injection System)으로 구성되어 있다. 원자로의 1차측을 직접 냉각시키는 피동안전주입계통으로는 피동고압주입시스템(PHPIS, Passive High Pressure Injection System), 축압기(Accumulator), 핵연료교환수탱크(IRWST, In-Containment Refueling Water Storage Tank)가 있으며 각각 고압, 중압, 저압에서 노심노출을 방지하기 위한 냉각수가 주입된다(Fig. 1, 2).

원자로 배관 파단 사고 시 축압기로부터 냉각수의 주입이 시작되기 전인 고압 상태에서 냉각수의 안전주입 역할을 담당하는 피동안전주입계통은 노심보충수탱크(CMT, Core Make-up Tank)와 가압기 또는 저온관에 연결된 압력균형관(PBL, Pressure Balancing Line) 그리고 주입배관(IL, Injection Line)으로 구성된다. 노심보충수탱크는 압력균형관을 통해 원자로 냉각수 계통과 같은 압력으로 유지되어 원자로용기의 수위가 일정 기준 이하가 되면 중력에 의해 노심보충수탱크의 저장수가 원자로용기로 주입되도록 설계되어 있다. 그러나 안전주입 밸브가 열리고 가압기 상부 또는 노심의 증기가 노심보충

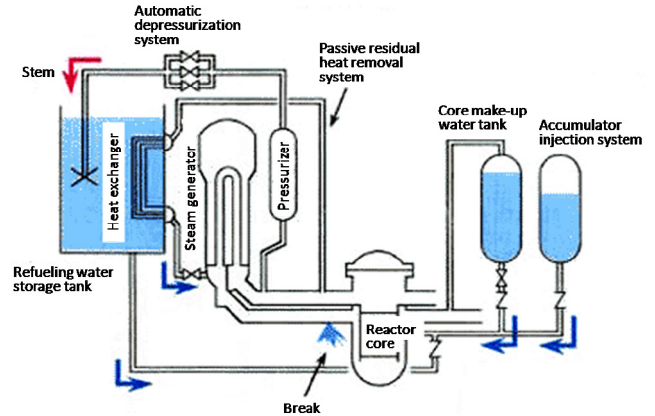


Fig. 1 Schematic diagram of AP600[1]

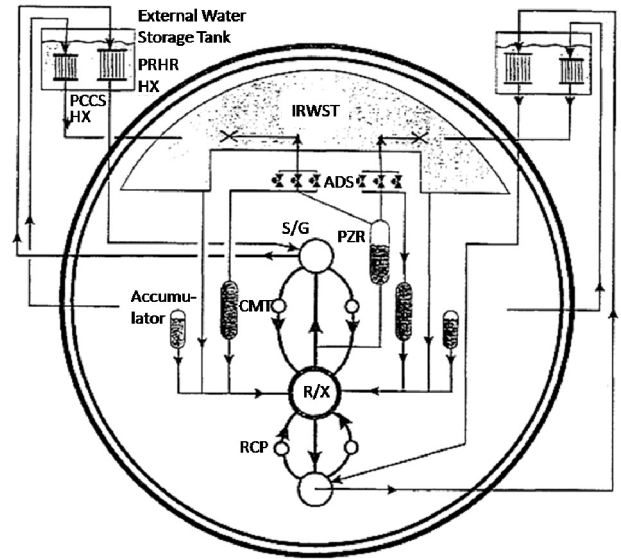


Fig. 2 Schematic diagram of CP1300[2]

수탱크로 유입되면서 노심보충수탱크의 저장수와 접촉하게 되면 급격한 응축현상이 발생할 수 있다. 이로 인해 노심보충수탱크 내부의 압력이 감소함으로써, 의도한 바와 달리 노심보충수탱크의 저장수가 노심으로 주입되는 것이 지연될 수 있다.

이러한 노심보충수탱크 저장수의 수면에서 일어나는 직접 접촉응축과 같은 열수력 현상을 모의하고 검증하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 핀란드의 PACTEL 시험[5], 중국 NPIC의 CMT Test Rig 시험[6,7], 일본 JAEA의 ROSA/AP600 성능시험[8] 등이 대표적이다. 한국과학기술원(KAIST)은 CP1300 설계에 기반하여 노심보충수탱크의 개별효과 시험과 RELAP5/MOD3.1 코드 평가[9-11]를 수행하였다.

MARS[12]는 한국원자력연구원(KAERI)에서 RELAP5/MOD 3.2와 COBRA-TF를 통합하여 개발한 열수력 계통해석 코드이다. MARS 코드의 완전피동안전계통에 대한 예측능력을 평가하기 위한 연구[13]가 최근에 진행되고 있다. 따라서 이러한 MARS의 완전피동안전계통 해석에 대한 신뢰성을 제고하기 위하여 노심보충수탱크에서 일어나는 직접접촉응축(Direct Contact Condensation)과 열적 성층화(Thermal Stratification) 현상에 영향을 끼치는 요인들과 MARS 코드의 예측능력에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 한국과학기술원에서 수행한 가압기에 연결된 압력균형관을 구비한 노심보충수탱크에 대한 개별효과 시험 조건에 대하여 MARS 로 해석을 수행하였다. MARS코드의 노심보충수 주입거동에 대한 예측능력을 평가하기 위해 격자민감도 계산을 수행하고, 실험결과 및 RELAP5/MOD3.3 코드의 계산 결과와 비교하였다. 뿐만 아니라 노심보충수의 온도, 공급 증기 압력, 자연대류 등의 요인들이 노심보충수 주입거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 방법 및 모델

2.1 전산해석 방법

RELAP5[14]와 MARS[12]는 가압경수로 열수력 계통의 과도상태 해석을 수행하기 위해 개발된 코드다. 두 원자로계통 해석코드는 과도상태, 1차원, 2유체 열수력 모델과 이에 대한 구성방정식을 이용하여 2상 유동을 계산한다. 2유체 모델은 기체 및 액체상에 대한 질량, 운동량, 에너지 방정식으로 구성되며 식 (1)-(3)과 같다. 해당 방정식에서 아래 첨자 k 는 기상(g) 및 액상(l)을 의미하고 A , Γ_k , v_k , B_k 는 각각 단면적, 상 변화량, 속도, 증력가속도이다. M_k^{drag} , M_k^{mass} , M_k^{mass} 는 질량 교환, 견인력, 기상 질량에 의한 계면 운동량 전달을 나타내고 U_k , Q_{wk} , Q_{ik} , I_k 는 내부에너지, 벽면 열전달, 계면 열전달, 질량 교환에 따른 열전달을 의미한다. 비응축성 기체가 포함된 질량에 대한 연속 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k \rho_k v_k A) = \Gamma_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha_k \rho_k A \frac{\partial}{\partial t}(v_k) + \frac{1}{2} \alpha_k \rho_k v_k A \frac{\partial v_k^2}{\partial x} \\ = -\alpha_k A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_k \rho_k B_x A + M_k^{mass} + M_k^{drag} + M_k^{VM} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k U_k) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k \rho_k U_k v_k A) \\ = -P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k v_k A) + I_k + Q_{wk} + Q_{ik} \end{aligned} \quad (3)$$

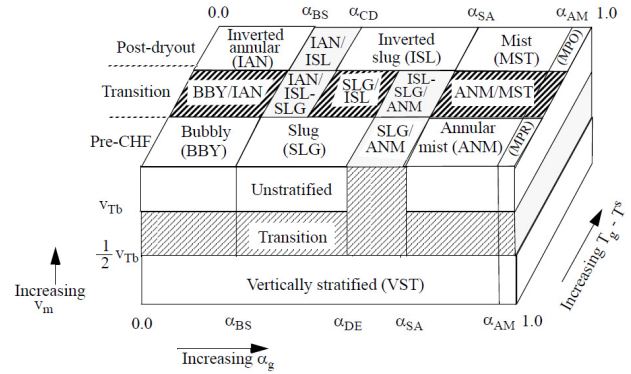


Fig. 3 Schematic of vertical flow regime map[12]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k X_n) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k \rho_k v_k X_n A) = 0 \quad (4)$$

노심보충수의 주입거동에서 핵심적인 물리현상인 수직성층유동(Vertically stratified flow)에서 일어나는 직접접촉응축은 식 (1)의 증기 응축량(Γ_f)에 의해 정의되며 아래와 같다.

$$\Gamma_f = \frac{\frac{P_s}{P} H_{ig} [T^s(P_s) - T_g] + H_{fi} [T^s(P_s) - T_f]}{h_{gi} - h_{fi}} \quad (5)$$

기체 및 액체의 계면 엔탈피인 h_{gi} , h_{fi} 는 기화가 일어날 때는 $h_{gi} = h_g^s$, $h_{fi} = h_f$, 응축이 일어날 때는 $h_{gi} = h_g$, $h_{fi} = h_f^s$ 로 정의되어 계면에서 에너지 불연속 조건(Energy jump condition)을 가진다. 식 (5)에 의해 노심보충수탱크 수면에서 일어나는 응축량을 적절히 예측하기 위해서는 유동양식과 해당 유동양식에서의 계면 열전달 계수(H_{if} , H_{ig})가 적절히 모델링 되어야 한다. 노심보충수탱크의 응축에서는 수증기의 온도와 포화온도가 거의 동일하여 식 (5)에서 H_{ig} 에 의한 응축은 무시할 수 있다. 또한, 이때 지배적인 유동양식은 수직성층유동과 기포유동이기에 때문에 본 논문에서는 상기 두 유동영역의 H_{if} 만 기술하였다. H_{ig} 와 다른 유동영역에서 H_{if} 는 MARS 매뉴얼[12]을 참고하기 바란다.

MARS와 RELAP5/MOD3.3에서 수직성층유동에 대한 유동 양식은 Fig. 3과 같으며 수직성층유동으로의 천이는 식 (6)과 같이 유동평균속도(v_m)가 테일러 기포 상승 속도(v_{tb} , Taylor bubble rise velocity)보다 작을 때 시작된다.

$$\frac{v_m}{v_{tb}} < 1 \quad (6)$$

이처럼 유동평균속도가 작은 수직성층유동에서 과냉각 액

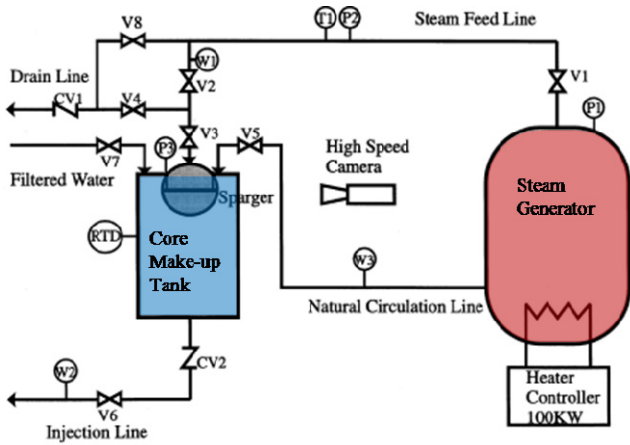


Fig. 4 Schematic diagram of test facility[9]

체의 계면 열전달 계수는 식 (7)과 같이 McAdams의 상관식 [12]에 의해 결정된다. 반면에 유동평균속도가 크고, 기체 질량 분율이 작은 기포 유동에서는 수정된 Unal과 Lahey의 상관식[12]인 식 (8)을 따르며 식 (8)에서 C 는 α_g 에 따른 비례 계수이다. 기포유동과 수직성층유동의 천이영역(Transition)에서 계면 열전달 계수는 식 (7)과 식 (8)을 보간하여 결정한다.

$$H_{fi} = Nu \frac{k_f}{D} a_{af} \quad (\text{McAdams}) \quad (7)$$

$$H_{fi} = \frac{Ch_{fg} \rho_g \rho_g^D f_{fg}}{\rho_f^{1-D} \rho_g} \quad (8)$$

(Modified Unal, Lahey) if $\alpha_g > 0$

2.2 해석 모델 및 조건

노심보충수탱크 내부의 직접접촉응축 현상에 대한 MARS의 계산능력을 평가하기 위해 Lee and No[9]가 수행한 노심보충수탱크 개별효과 시험 장치의 실험 조건 및 결과에 근거하여 계산을 수행하였다. 해당 장치는 CP1300 설계에 기반하여 노심보충수탱크의 저장수 주입거동에 영향을 미치는 요인들을 분석하기 위한 장치이다. 장치는 노심보충수탱크, 가압기 혹은 노심 상부를 모의하는 증기발생기, 측정 장비로 구성되었다(Fig. 4). AP600의 노심보충수탱크를 기준으로 높이, 면적에 대해서 각각 1/7, 1/36의 척도비를 적용하여 높이 85 cm, 직경 65 cm의 크기를 가진다. 실험은 노심보충수탱크와 증기발생기의 온도와 압력이 정상 상태에 도달하면 데이터 측정을 시작하고 10초 후에 0.1초 이내로 노심보충수 주입관의 주입 밸브(V6)를 개방하게 된다. 자연대류관은 증기발생기 하부에서 노심보충수탱크 상부로 자연대류 하는 고온수의 영향을 살펴보기 위한 실험(CSLN-31)에서만 사용되며 자연대류관 밸브(V5)는 주입 밸브(V6)와 동일한 시점에 개방된다.

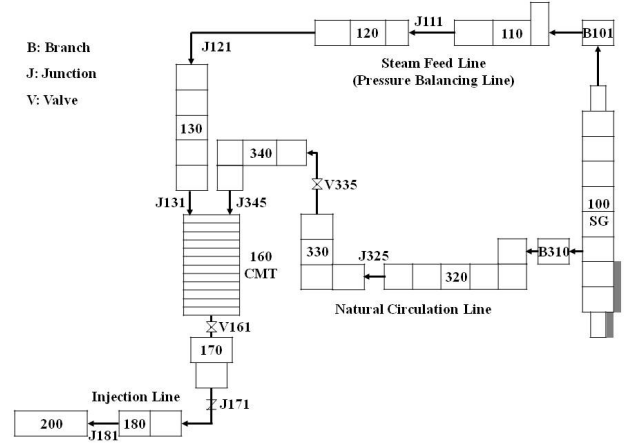


Fig. 5 Schematic diagram of MARS nodalization, Natural circulation line is used only in the simulation of the CSLN-31

1차원 계통 코드를 활용한 전산해석을 위해 실험 장치를 Fig. 5와 같은 1차원 격자로 모델링하였다. 증기발생기(100), 압력균형관(110, 120, 130), 노심보충수탱크(160), 노심보충수 주입배관(170, 180), 자연대류관(320, 330, 340)으로 각각 격자화하였으며 노심보충수의 주입을 개시하기 위한 주입밸브(161), 공급된 수증기의 직접접촉응축에 의한 노심보충수탱크 내부의 압력 감소로 인해 발생할 수 있는 역류를 방지하기 위한 체크밸브(171), 자연대류관 밸브(325) 등도 모델링하였다. 실제 실험에서는 노심보충수탱크의 저장수가 대기 중으로 주입된 것과 달리 본 연구에서는 비응축성 기체인 공기의 유입을 배제하기 위해 대기압의 수조(200)로 주입되는 조건에서 수행하였다.

먼저, CSLI-31 ($P_{SG} = 1.43 \text{ bar}$, $T_{CMT} = 31^\circ\text{C}$)에 대해 RELAP5 /MOD3.3과 MARS의 격자민감도를 분석하고 실험[9]과 비교하여 예측 능력을 평가하였다. 또한, 선행연구[5,9]에 기초하여 노심보충수탱크 내부의 직접접촉응축 현상에 영향을 미치는 요인으로 알려진 노심보충수탱크의 온도(T_{CMT}), 증기발생기 압력(P_{SG}), 자연대류유동(Natural circulation flow)의 영향을 분석하였다.

3. 결 과

3.1 격자민감도 및 노심보충수 주입거동 분석

노심보충수의 주입거동에 대한 MARS와 RELAP5/MOD3.3의 해석 능력을 평가하기 위해 CSLI-31 ($P_{SG} = 1.43 \text{ bar}$, $T_{CMT} = 31^\circ\text{C}$) 조건에서 노심보충수탱크의 격자를 각각 2, 4, 8, 12, 16개로 증가시키면서 그 민감도를 검토하였으며 MARS와

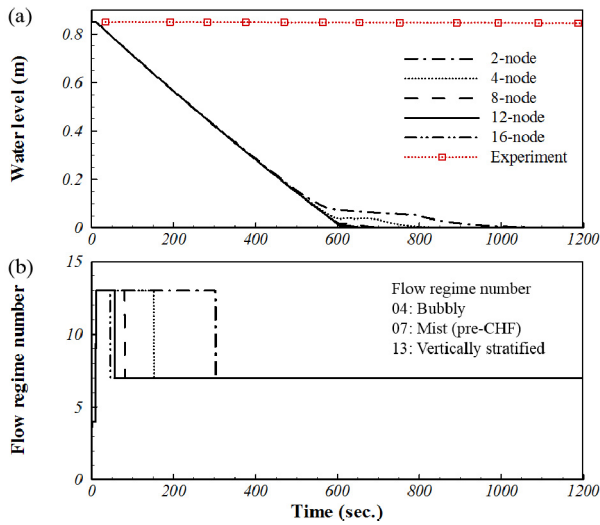


Fig. 6 The effect of nodalization of RELAP5/MOD3.3 in the simulation of the CSLI-31: (a) CMT water level; (b) CMT flow regime at 1st node

RELAP5가 계산한 주입 시점을 Lee and No[9]의 실험과 비교하였다.

3.1.1 격자민감도 분석

RELAP5/MOD3.3의 경우, 시간에 따른 노심보충수탱크의 수위 변화를 보면(Fig. 6a), 격자의 개수가 노심보충수의 주입 시점에 영향을 주지 않았다. 이는 노심보충수 주입관의 주입 밸브가 열리자마자 노심보충수탱크 최상부 격자의 유동 양식이 모든 경우에 대해서 수직성층유동으로 고정되어(Fig. 6b) 계면 열전달 계수와 응축량이 격자수와는 무관하게 같은 수준으로 예측되기 때문이다. 하지만, 냉각수 주입거동이 실험과는 매우 큰 차이를 보였는데 이는 수직성층유동에서는 계면 열전달 계수와 응축량이 실험보다 작게 계산되기 때문이다.

MARS의 경우, 노심보충수의 주입거동이 격자수에 따라 달라지는 것으로 나타났으며(Fig. 7a), 크게 두 가지 영역 - 격자 수 3개 이하와 4개 이상 - 으로 구분할 수 있다. 이는 MARS에서 격자 크기에 따라 유동 양식이 다르게 예측되기 때문이다. 2개 격자 모델과 12개 격자 모델의 유동 양식을 Fig. 7(b)와 7(c)에 비교하였다. 2개 격자 모델의 경우 RELAP5/ MOD3.3 계산 결과와 같이 노심보충수 주입밸브 개방 뒤에 노심보충수탱크 최상부 격자의 유동 양식이 수직성층유동으로 고정되면서 노심보충수가 주입 밸브 개방과 동시에 주입되었다. 하지만 12개 격자 모델의 경우에는 수직성층유동과 기포유동 사이를 진동하면서 급격한 직접접촉응축에 따라 노심보충수탱크의 압력이 감소하여 주입 밸브 개방 후

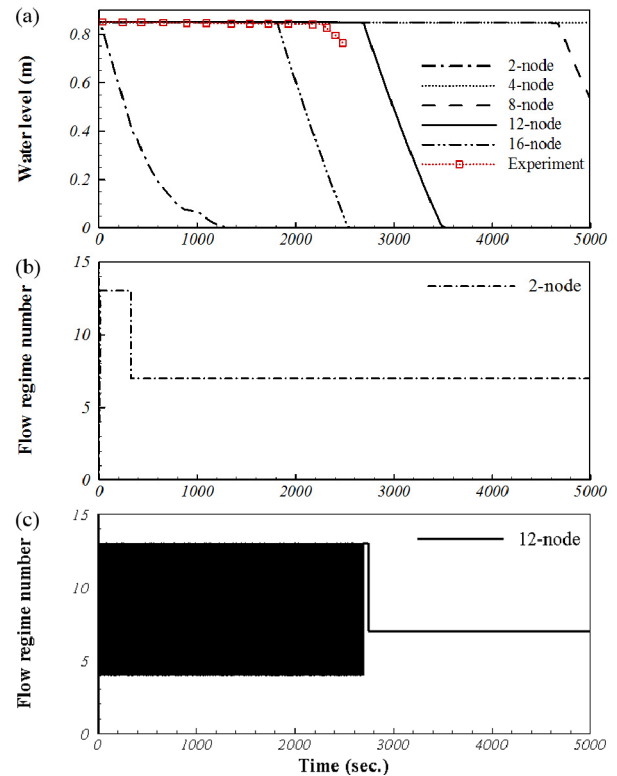


Fig. 7 The effect of nodalization of MARS in the simulation of the CSLI-31: (a) CMT water level; CMT flow regime at 1st node, (b) 2-node; (c) 12-node

에도 노심보충수 주입이 실험과 마찬가지로 일정 시간 동안 지연되면서 노심보충수탱크의 수위가 유지된다.

Fig. 7(a)에서 격자수가 4개 이상일 경우 격자수가 증가함에 따라 주입시점이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 이는 계통 해석코드인 MARS에서 온도를 계산할 때, 격자의 평균 온도를 사용하기 때문이다. 해당 격자의 크기가 작을수록 증기와 접촉하는 노심보충수탱크 첫 번째 격자의 온도가 빠르게 상승하여 식 (5)에서 $T^*(P_s) - T_f$ 의 값이 작아져서 유입되는 증기의 응축량이 줄어들고, 이에 따라 노심보충수탱크 내부 압력이 회복되어 주입이 빠르게 일어나는 것이다.

위 계산에서 노심보충수의 주입이 시작되는 시점이 2700초로 실험(2250초)과 유사한 결과를 보인 12개 격자 모델을 본 연구의 노심보충수 주입거동 분석을 위한 기본 격자 모델로 고정하였다. 12개 격자 모델에서 한 격자의 크기는 7.0833 cm로 선행연구[9]에서 저장수가 주입되는 시점에 노심보충수탱크로 유입되는 증기에 의해 생성된 증기공동(steam cavity)과 그 크기가 유사하다.

3.1.2 노심보충수 주입거동 분석

CSLI-31 ($P_{SG} = 1.43$ bar, $T_{CMT} = 31^\circ\text{C}$) 조건에서 MARS와

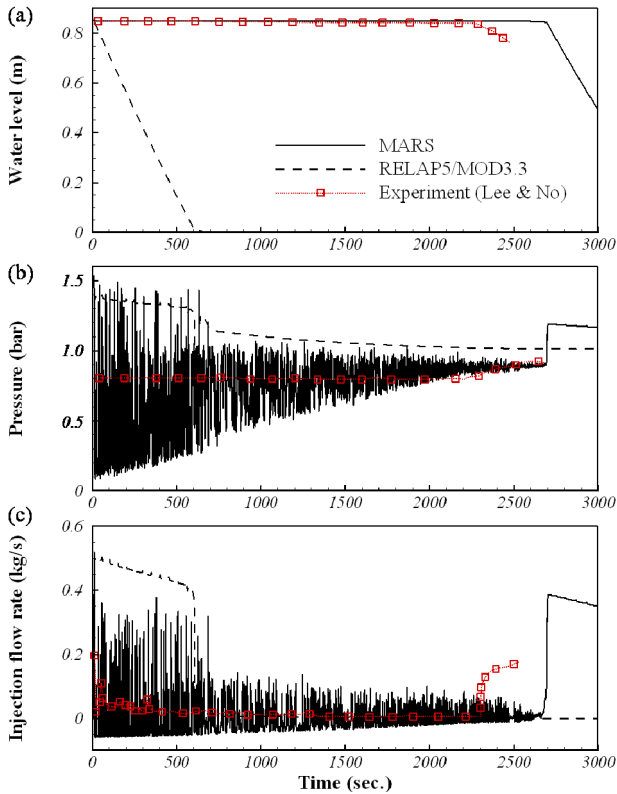


Fig. 8 The simulation of the CSLI-31: (a) CMT water level; (b) CMT pressure at 1st node; (c) Injection flow rate

RELAP5/MOD3.3의 계산결과 그리고 실험결과를 Fig. 8과 9에 비교하였다. MARS코드의 계산 결과는 RELAP5/MOD3.3의 계산 결과에 비해 노심보충수탱크의 수위, 압력, 주입량 등의 거동이 실험결과에 근접하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 RELAP5/MOD3.3계산에서는 주입 밸브 개방 직후에 유동 양식이 수직성층유동으로 고정되었다 (Fig. 6b). 이때, 노심보충수탱크 내부 압력이 유지되면서 (Fig. 8b), 곧바로 노심보충수가 주입되고(Fig. 8c) 노심보충수 탱크의 수위가 곧바로 감소한다(Fig. 8a). 이는 계면 열전달 계수와 응축량이 실험보다 작기 때문에 실험과는 매우 상이한 결과를 보였다. Fig. 9(a)는 각 높이에서의 액체 온도를 나타내는데 그림에서 볼 수 있듯이 낮은 계면 열전달 계수에 따른 적은 응축량은 노심보충수의 온도를 크게 상승시키지 않았고 수위가 감소함에 따라 해당 격자가 단상 증기로 채워지면서 액체 온도가 포화온도에 도달하게 된다.

MARS계산에서는 노심보충수탱크의 유동 양식이 수직성층 유동과 기포유동 사이에서 진동하면서(Fig. 7c) 상대적으로 높은 열전달 계수를 가지게 된다. 따라서 급격한 응축과 함께 압력이 대기압 이하로 떨어지게 되고(Fig. 8b) 노심보충수의 주입시점이 지연된다(Fig. 8c). 이처럼 유동 양식의 진동현상

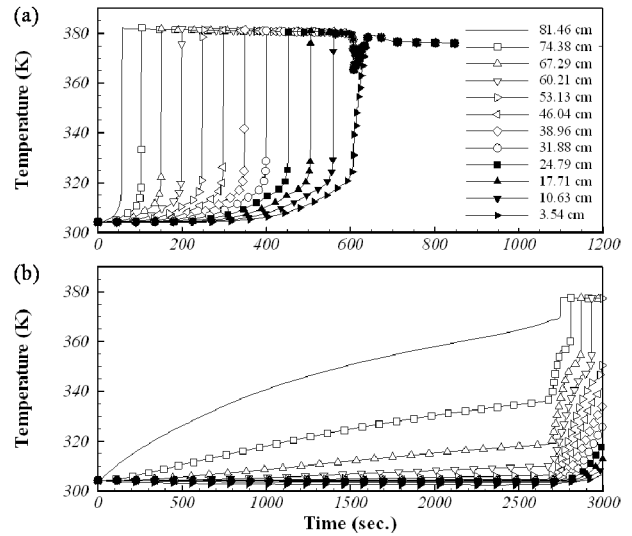


Fig. 9 The temperature distribution of CMT in the simulation of the CSLI-31: (a) RELAP5/ MOD3.3; (b) MARS

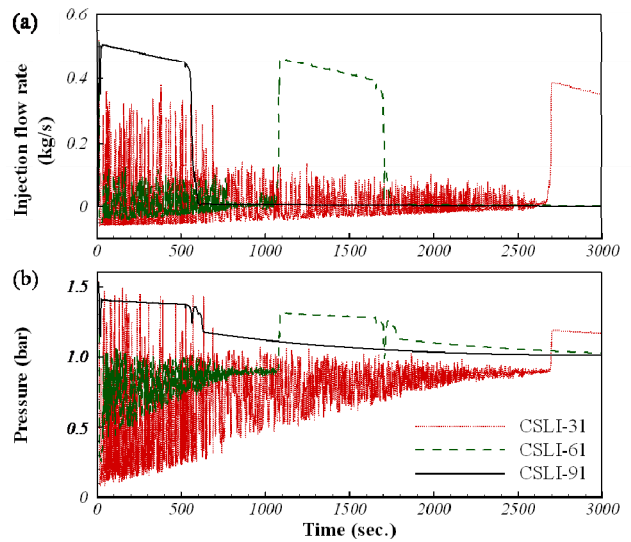


Fig. 10 The effect of CMT temperature: (a) Injection flow rate; (b) CMT pressure at 1st node

으로 인해 압력과 노심보충수 주입량은 저장수 주입 전까지 진동하지만, 전체적인 압력과 노심보충수 주입거동은 실험결과와 유사하다. 노심보충수탱크의 온도 분포를 보면(Fig. 9b) 수증기의 직접접촉응축에 의해 노심보충수탱크 상부의 온도만 증가하는 열적 성층화가 일어나고 상부의 온도가 상승함에 따라 수증기 응축량이 감소하면서 노심보충수의 주입이 일어남을 확인할 수 있다. 이때 노심보충수가 빠져나가면서 수증기상으로 바뀌기 때문에 노심보충수탱크의 온도는 상부부터 차례로 포화온도에 이른다. 이와 같은 노심보충수탱크

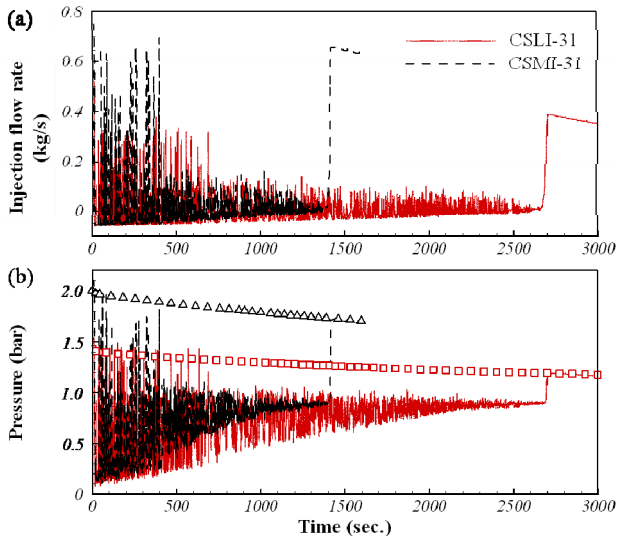


Fig. 11 The effect of SG pressure: (a) Injection flow rate; (b) Pressure (Lines denote CMT pressure at 1st node and symbols denote SG pressure)

내부에서의 수직성층화 현상은 선행 연구의 측정 결과와 일치한다[5,9].

3.2 온도, 압력, 자연대류 영향 분석

선행연구[5,9]에 기초하여 노심보충수탱크의 직접접촉응축 현상에 영향을 미치는 요인들인 노심보충수탱크의 온도 (T_{CMT}), 증기발생기의 압력(P_{SG}), 자연대류(Natural Circulation Flow)의 영향을 해석하였다.

3.2.1 노심보충수탱크 온도의 영향

증기발생기의 압력이 낮은 CSLI ($P_{SG} = 1.43$ bar)에서 노심보충수탱크 온도에 따른 거동을 살펴보면 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)를 보면 $T_{CMT} = 31, 61^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 1050, 2700초에서 주입이 시작되었으며 $T_{CMT} = 91^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는, 주입 밸브 개방과 동시에 냉각수가 주입되어 노심보충수탱크의 온도가 증가하면 주입시점이 빨라지게 된다. Fig 10(b)의 노심보충수탱크의 압력 거동 역시 노심보충수탱크 온도가 증가할수록 압력 회복이 빠르게 일어났다. 즉, 노심보충수탱크 저장수의 온도가 증가할수록 열 제거 능력이 감소하여 응축량이 빨리 감소한다.

또한 온도가 낮아질수록 노심보충수의 주입 유량과 노심보충수탱크 내부 압력의 진동이 심해지는데, 이러한 거동은 한국과학기술원의 실험에서 관측된 것과 동일하다[9].

3.2.2 증기발생기 압력의 영향

공급 증기 압력이 안전주입계통에 미치는 영향을 평가하기

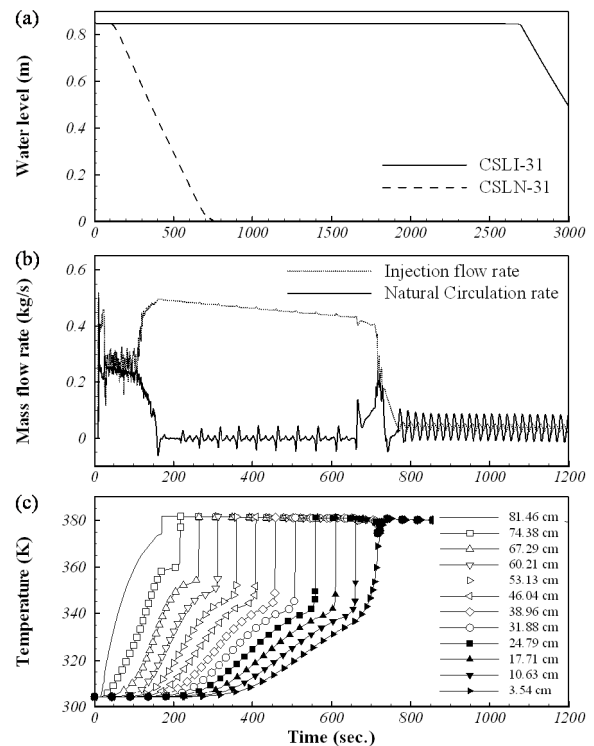


Fig. 12 The effect of natural circulation flow: (a) CMT water level; (b) Mass flow rate; (C) Temperature distribution of CMT

위하여 $T_{CMT} = 31^{\circ}\text{C}$ 일 때, 가압기를 모사한 증기발생기의 압력을 각각 1.43 bar (CSLI), 2 bar (CSMI)로 변화시켜 그 결과를 분석하였다. 증기발생기의 압력이 증가하면 노심보충수의 주입시점이 더 빨라진다(Fig. 11a). 주입시점이 빨라지는 것은 높은 증기발생기의 압력으로 인해(Fig. 11b) 노심보충수탱크로 주입되는 증기 공급량도 많고 이에 따라 응축량도 많아서 노심보충수탱크의 상부의 열성층화가 가속화되기 때문이다. 이러한 계산 결과는 기존 연구와 일치한다[9].

3.2.3 자연대류유동의 영향

AP600은 CP1300과 달리 노심보충수탱크의 압력균형관이 원자로 저온관과 연결되어 있다(Fig. 1). 이러한 구조의 압력균형관을 가진 노심보충수탱크는 주입밸브 개방 초기, 자연대류에 의해 고온의 냉각수가 유입되어 노심보충수탱크 저장수의 열적 성층화를 촉진시키고 노심보충수의 주입시점을 앞당기는 효과가 있다는 연구 결과[15]가 보고되었다. 압력균형관에 유동분사기(Sparger)가 설치되어 있지 않은 경우[9]에는 고온의 물이 노심보충수탱크 저장수의 전체적인 온도를 상승시키는 효과로 인해 노심보충수의 주입시점이 빨라진다.

이러한 자연대류유동의 영향을 분석하기 위해 자연대류관이 있는 CSLN-31 ($P_{SG} = 1.43$ bar, $T_{CMT} = 31^{\circ}\text{C}$)에 대한 해석

을 수행하였고 결과를 자연대류관이 없는 CSLI-31 결과와 비교하였다(Fig. 12). Fig. 12(a)을 보면 증기발생기 하부에서 노심보충수탱크 상부로 자연대류 하는 고온의 물이 노심보충수의 주입시점을 앞당기는 것을 확인할 수 있다. 유량은 Fig. 12(b)와 같으며 100초까지 자연대류 유량과 주입 유량이 비슷한 크기를 가지고 있어 수위가 감소하지 않다가 100초 이후에 자연대류 유량이 감소하면서 수위가 떨어지게 된다. 노심보충수탱크 온도 분포를 자연대류유동이 없는 경우와 있는 경우에 대해 Fig. 9(b)와 Fig. 12(c)에 각각 제시하였다. 자연대류관이 있는 경우 계산초기에 증기발생기의 고온수가 압력차이로 인해 노심보충수탱크의 상부로 유입되어 노심보충수탱크 저장수의 상부의 온도가 빠르게 증가한다. 이렇게 고온수 유입으로 열적 성층화가 촉진되어 노심보충수의 주입시점이 앞당겨지는 것은 Wright et al.[15]의 연구와 동일하다.

4. 결 론

피동안전주입계통의 하나인 노심보충수탱크의 직접접촉응축 현상에 대한 MARS의 예측능력을 평가하였다. 뿐만 아니라 온도, 압력, 자연대류유동 등의 요인들이 주입거동에 미치는 영향을 해석하였다.

MARS는 노심보충수탱크의 격자수에 따라 유동 양식이 다르게 예측되어 노심보충수의 주입거동이 달라졌다. 격자수가 3개 이하일 때는 수직성층유동으로 고정되어 바로 주입이 일어났으며 격자 수 4개 이상의 모델에서는 유동 양식이 기포유동과 수직성층유동으로 진동하였다. 노심보충수의 주입시점을 실험과 비교하여 가장 유사한 12개 격자 모델로 노심보충수탱크의 격자수를 고정하였으며 이때, 급격한 응축과 함께 노심보충수탱크의 내부 압력이 감소하고 주입시점이 늦춰져 실험을 적절히 모사하였다. 또한 저온 냉각수는 주입을 늦추고, 높은 증기압력과 자연대류유동은 주입을 빠르게 일어나게 하여 그 거동이 실험과 일치하였다.

본 연구의 계산 결과를 바탕으로 원자로 열수력계통해석 전산코드의 예측능력을 향상시키기 위해 다음과 같은 개선사항을 도출하였다.

- (1) 기존 연구[9]에 따르면, 노심보충수탱크 상부의 수직성층 유동은 증기공급한계(Supply limit, 냉각수의 열 제거량 > 증기의 잠열)와 응축한계(Condensation limit, 냉각수의 열 제거량 < 증기의 잠열)로 세(細)분류할 수 있다. 노심보충수탱크 내부의 유동영역이 수직성층유동으로 고정되어 응축 한계만 모사되고 있는 경우에 이러한 세분류 적용을 고려할 수 있다.
- (2) 노심보충수탱크를 모의하는 격자의 수에 따라 주입시점이

다른 문제에 대해서는, 격자 민감도에 대한 적절한 처리가 필요하다. 이를 위해 노심보충수탱크는 CFD 코드로 계산하고 전체 계통은 계통코드로 계산하는 연계 계산[16]을 고려할 수 있다.

후 기

이 논문은 정부(미래창조과학부와 원자력안전위원회)의 재원으로 한국연구재단과 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행된 연구임(SMART건설관련안전성향상연구사업 No.2013M2B9A1020039; 원자력안전연구센터사업 No.1305011).

References

- [1] 1998, Tower, S.N., Schulz, T.L. and Vijuk, R.P., "Passive and simplified system features for the advanced westinghouse 600 MWe PWR," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.109, pp.147-154.
- [2] 2006, Schulz, T.L., "Westinghouse AP1000 advanced passive plant," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.236, pp.1547-1557.
- [3] 1997, Chang, S.H., No, H.C., Baek, W.P., Lee, S.I. and Lee, S.W., "Conceptual desing of CARR passive PWR 1300MWe (CP1300)," *Nucl. Eng. Int.*
- [4] 2013, Chang, S.H., Kim, S.H. and Choi, J.Y., "Design of integrated passive safety system (IPSS) for ultimate passive safety of nuclear power plants," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.260, pp.104-120.
- [5] 1999, Tuunanen, J., Vihavainen, J., D'Auria, F. and Kimber, G., "Assessment of passive safety injection systems of ALWRs," *Final report of the European Commission 4th Framework Programme Project FI4I-CT95-0004*, Technical Research Centre of Finland.
- [6] 2000, IAEA, "Natural circulation data and methods for advanced water cooled nuclear power plant designs," *Proceedings of a Technical Committee meeting*, Vienna, Austria.
- [7] 2013, Wang, M., Tian, W., Qiu, S., Su, G. and Zhang, Y., "An evaluation of designed passive Core Makeup Tank (CMT) for China pressurized reactor (CPR1000)," *Ann. Nucl. Energy*, Vol.56, pp.81-86.
- [8] 2006, Yonomoto, T. and Sibamoto, Y., "Summary on natural circulation phenomena observed in ROSA/AP600 tests," *IAEA's Third Research Coordination Meeting*, CEA,

- Cadarache, France.
- [9] 1998, Lee, S.I. and No, H.C., "Gravity-driven injection experiments and direct-contact condensation regime map for passive high-pressure injection system," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.183, pp.213-234.
- [10] 1997, Lee, S.I. and No, H.C., "Assessment of RELAP5 /MOD3.1 for direct-contact condensation in the core makeup tank of the CARR passive reactor," *Ann. Nucl. Energy*, Vol.24, pp.445-562.
- [11] 1998, Lee, S.I. and No, H.C., "Improvement of direct contact condensation model of RELAP5/MOD3.1 for passive high-pressure injection system," *Ann. Nucl. Energy*, Vol.25, pp.677-688.
- [12] 2004, Thermal Hydraulic Safety Research Department, *MARS code manual Vol. I: Code structure, system models, and solution methods*, Korea Atomic Energy Research Institute.
- [13] 2013, Chun, J.H., Lee, G.H., Bae, Y.J., Chung, Y.J. and Kim, K.K., "Performance Evaluation of SMART Passive Safety System for SBLOCA Using MARS Code," *Transactions of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Gwangju, Korea.
- [14] 2001, Nuclear Safety Analysis Division, *RELAP5 /MOD3.3 Code Manual Vol. I: Code structure, system models, and solution methods*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, USA.
- [15] 1996, Wright, R.F., Hundal, R., Hochreiter, L.E., Friend M.T. and Ogrins, M., "Analysis and evaluation of the AP600 SPES-2 integral system tests," *Proceedings of the 4th International Conference on Nuclear Engineering*, NewOrleans, USA.
- [16] 2013, Park, I.K., Lee, J.R., Lee, S.W., Yoon, H.Y. and Jeong, J.J., "An implicit code coupling of 1-D system code and 3-D in-house CFD code for multi-scaled simulations of nuclear reactor transients," *Ann. Nucl. Energy*, Vol.59, pp.80-91.