

## SMART 계통 거동에 대한 TASS/SMR과 MARS/SMR 코드의 비교 계산

### Comparative Calculations of TASS/SMR and MARS/SMR for SMART System Behaviour

임홍식, 김희철

동력로기술개발팀  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

SMART에 대한 안전 및 성능 해석을 위해 개발중인 계통 열수력 분석코드인 TASS/SMR과 SMART관련 모델을 추가한 최적 열수력계통 분석코드인 MARS/SMR을 비교 평가함으로써 TASS/SMR 코드의 현재 특성과 취약점을 조사하였다. 먼저 각 코드의 수치기법 및 물리적 모델들을 살펴보고, 출력 증감발, 급수유량 완전상실, 냉각재유량 완전상실 사건/사고에 대해 비교 계산을 수행하였다. 비교 및 분석 결과에 의하면, TASS/SMR에 대해 수치적 안정성과 수렴성을 규정해야 하고, 비응축성가스 거동과 열전달 package등의 물리적 모델에 대한 세부 검토 및 보완이 필요한 것으로 파악되었다.

#### Abstract

By comparative assessment of TASS/SMR which is under development for safety and performance analyses of SMART and the best-estimate thermal-hydraulic system analysis code MARS/SMR with SMART-specific models, the current status of TASS/SMR and its weakness have been investigated. Numerical schemes and physical models of each code have been compared, and thereafter comparative analyses for power maneuvering, total loss of feedwater flow, and total loss of coolant flow, have been performed. According to the comparative calculation results, numerical stability and convergence should be specified for TASS/SMR as well as some modifications and detailed reviews are needed for physical models, such as noncondensable gas behaviour, heat transfer package, etc.

#### 1. 서론

한국원자력연구소에서 중장기 원자력 연구개발사업의 일환으로 개발중인 SMART(System-Integrated Modular Advanced Reactor)[1]에 대한 안전 및 성능해석을 위해 사용되고 있는 계통 열수력 분석코드는 지난 수년간 개발되어 온 TASS/SMR 코드[2]이다. SMART 계통 분석에 TASS/SMR을 사용함에 있어 TASS/SMR 코드의 수치 해법 및 물리적 모델 그리고 부품 모델을 검토하고, 현재 최적 열수력계통 분석코드로 널리 사용되는 RELAP5/MOD3 코드를 기반으로 한 MARS/SMR 코드[3]의 특성과 비교할 필요성을 가지게 되었다.

MARS/SMR은 two-fluid 모델에 ICE(Implicit Continuous Eulerian) 기법을 기반으로 하는 RELAP5/MOD3, TRAC 등의 코드의 계열에 속하는 반면, TASS/SMR은 HEM 혹은 drift-flux 모델에 FLASH 기법을 기반으로 하는 W-FLASH, CE-FLASH, RETRAN-02 등의 계열에 속한다. 따라서 TASS/SMR과 같은 계열에 속하는 RETRAN-02[4]와 비교하는 것이 적합할 수도 있으나, RETRAN-02는 SMART를 분석할 수 있도록 준비되어 있지 않으므로, SMART 계통 열수력 분석용으로 이용이 가능한 MARS/SMR을 비교 코드로 선택하였다. 현재 TASS/SMR로 분석이 가능하지 않은 일부 설계기준사고(SBLOCA 등)에 대해서는 MARS/SMR을 사용하여 예비 분석을 수행하고 있다.

우선 TASS/SMR 코드와 MARS/SMR 코드의 수치 해법 및 물리적 모델 그리고 부품 모델등을 비교 평가한 다음, SMART에 대한 성능관련 설계기준사고 및 안전관련 설계기준사고중 대표적인 사건/사고에 대해 각 코드로 분석을 수행하고 그 결과를 비교하고자 한다. MARS/SMR이나 TASS/SMR 어느 코드도 SMART의 계통 열수력 거동에 대해 검증된 바가 없으므로, 계산 결과의 타당성보다는 일반적인 거동 및 추이를 분석하는데 주안점을 두어 TASS/SMR의 제한성 및 취약점을 파악하는 것이 바람직하다고 본다. 이를 바탕으로 향후 TASS/SMR 코드의 개선 방향을 도출하고자 한다.

## 2. TASS/SMR과 MARS/SMR에 대한 특성 비교

MARS/SMR의 1차원 계산부분은 나선형 증기발생기에 대한 열전달 상관식등 몇가지 모델을 추가한 것을 제외하면 RELAP5/MOD3와 거의 동일하다. MARS/SMR의 특성에 대해서는 참고 문헌 5에 상세히 기술되어 있으므로, TASS/SMR에 대해서만 주로 여기에 기술하고 MARS/SMR과 비교 평가한 내용은 표 1과 2에 정리하였다.

### 가. 지배방정식

TASS/SMR의 지배방정식은 아래와 같이 6개의 장방정식으로 구성되며 상간 속도차를 고려하기 위해 algebraic slip/drift flux 모델[6]을 채택하고 있다.

혼합체 질량 보존식 :

$$A \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x} (W_m) = 0$$

액체 질량 보존식 :

$$A \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha)\rho_l] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (1-\alpha) \frac{\rho_l}{\rho_m} W_m \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m} V_r A \right] = -\Gamma_g$$

혼합체 운동량 보존식 :

$$\frac{\partial}{\partial t} (W_m) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{W_m^2}{\rho_m A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m} V_r^2 A \right] = -A \frac{\partial P}{\partial x} - K\Phi^2 \frac{W_m |W_m|}{\rho_m A} + \rho_g A$$

혼합체 에너지 보존식 :

$$A \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m e_m) + \frac{\partial}{\partial x} (h_m W_m) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) V_r A \right] = q'_w$$

증기 엔탈피 보존식 :

$$A \frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_g h_g) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h_g \frac{\alpha\rho_g}{\rho_m} W_m \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m} h_g V_r A \right] = \Gamma_g \cdot h_{sg} + q'_{wg} + q'_{ig}$$

비응축성가스 질량 보존식 :

$$A \frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_N) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_N}{\rho_g} \frac{\alpha\rho_g}{\rho_m} W_m \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\alpha\rho_N(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m} V_r A \right] = 0$$

## 나. 수치해법

TASS/SMR의 수치해법은 FLASH 계열의 기법에 근간을 두고 있어 ICE 계열의 MARS/SMR보다는 RETRAN-02와 거의 같은 방식으로, TASS/SMR의 주요 수치해법을 정리하면 아래와 같다.

앞선 지배방정식에서 편의를 위해  $x_f = \frac{\alpha\rho_g}{\rho_m} + \frac{\alpha\rho_g(1-\alpha)\rho_l}{\rho_m W_m} V_r A$  라 놓고, 밀도대신

질량으로 표현된 식을 Newton's method로 선형화하면 다음의 차분식을 얻는다.

$$\frac{\Delta M_i}{\Delta t} = \sum_k (\Delta W + W)_k$$

$$\frac{\Delta M_{l,i}}{\Delta t} = \sum_k \{ (1-x_f) (W + \Delta W) \}_k + W_{cond,i}$$

$$\frac{\Delta M_{N,i}}{\Delta t} = \sum_k \{ x_f x_N (W + \Delta W) \}_k$$

$$\frac{1}{g} \left( \frac{L}{A} \right)_k \frac{\Delta W_k}{\Delta t} = (P + \Delta P)_{k,u} - (P + \Delta P)_{k,d} - \frac{(K\Phi^2 + K_v)}{2\rho g A_k^2} [(W + 2\Delta W) W]_k - \frac{1}{2g} \left( \frac{1}{A_{k,d}} + \frac{1}{A_{k,u}} \right) \left( \frac{1}{\rho_{k,d} A_{k,d}} - \frac{1}{\rho_{k,u} A_{k,u}} \right) [(W + 2\Delta W) W]_k + \Delta P_{elev,k} + \Delta P_{pump,k}$$

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta t} = \sum_k [h_g x_f + h_l (1 - x_f)] (W + \Delta W)_k + Q_i$$

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta t} = \sum_k \{h_g x_f (W + \Delta W)\}_k + Q_{g,i} - W_{cond,i} h_{sg} + W_{cond,i} (h_{sg} - h_{sl})$$

여기서 압력을 모든 노드 변수로 다음과 같이 선형화한다.

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial P}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial P}{\partial M_N} \Delta M_N + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial H} \Delta H$$

다음으로 모든 노드관련 변수에 대한 방정식을 운동량 방정식에 대입하면 유량만으로 표현되는 single flow-reduced matrix를 얻는다.

표 1은 MARS/SMR과 TASS/SMR의 지배방정식과 수치해법을 서로 비교한 것으로, 특히 중요시되는 것으로 수치해의 존재를 가늠하는 수치적 안정성과 수렴성의 판정 그리고 implicitness 정도에서 TASS/SMR의 취약점이 나타나고 있다. 따라서 현재 SMART 해석에서는 수치적 안정성과 수렴성을 보장하기 위해 매우 작은 time step으로 계산을 수행하고 있다.

다. 물리적 모델 및 부품 모델

표 2는 MARS/SMR과 TASS/SMR의 상간 및 벽면간의 상호작용에 관련한 물리적 모델과 SMART 해석에 관련된 부품 모델을 비교한 것으로, MARS/SMR의 경우 다양한 사용자의 요구에 맞게 일반적인 상관식 및 다양한 부품 모델을 제공하는 반면 TASS/SMR은 설계 코드의 형식을 취하여 제한된 용도로 사용되게끔 구성되어 있다.

### 3. SMART 계통 거동에 대한 비교 분석 결과

SMART 계통을 해석함에 있어서 현재 TASS/SMR의 계산 능력을 파악하기 위한 목적으로 아래의 세가지 사건/사고를 선정하여 MARS/SMR의 결과와 비교 분석하였다. 그림 1은 세가지 사건/사고를 분석하기 위한 TASS/SMR의 nodalization이며, 노심과 가압기 그리고 증기발생기 및 피동잔열제거계통(PRHR) 열교환 튜브에 보다 많은 노드를 사용하는 MARS/SMR의 nodalization도 이것과 거의 일치한다. 여기서는 단순히 코드의 예측 능력을 평가하기 위한 것이 주된 목적이므로, 실제 사건/사고 경과와는 다소 다르며 또한 설계기준사고에 대한 해석도 보수적

가정을 사용하지 않았으므로 안전해석 결과로 볼 수 없다. 각 분석 사건/사고에 대한 사건 경과에 대해서는 표 3에 기술하였다.

#### 가. 출력 증감발

원자로 출력 20%에서 100%사이의 출력 증감발 운전은 성능관련 설계기준사고중의 하나로, 5%/분의 급수유량 변화율과 온도편차를 보상하기 위한 제어봉 이동으로 출력이 제어된다. 본 비교 분석에서는 장시간에 걸쳐 비응축성가스 가압기내로 완만한 유출입 유량이 있는 경우에 대해 비응축성가스 거동을 파악하기 위한 목적으로 제어봉의 작동은 고려하지 않았다. 제어봉이 작동하지 않더라도 음(-)의 감속재온도계수(MTC)의 작용으로 노심 출력이 제어되지만, 급수유량 변화에 따른 냉각재 평균 온도 변화로 냉각재가 수축/팽창되어 가압기로 유출입되므로 가압기내 온도와 압력이 변화하게 된다. 그림 2와 3을 보면 TASS/SMR의 경우에서 압력과 온도 변화가 MARS/SMR의 결과보다 작는데 이는 비응축성개스와 액체가 공존하는 경우의 열적 비평형 및 개스와 액체간의 상간 열전달을 고려하는 방식이 다르기 때문이다. 특히 SMART의 일차계통 압력은 전적으로 가압기내의 비응축성가스 거동에 의존하므로 이에 대한 모델링 및 검증이 수행되어야 할 것이다.

#### 나. 냉각재유량 완전 상실

이 사고는 일차계통내 주냉각재펌프(MCP) 4대가 동시에 정지되는 사고로 4대의 펌프 회전속도가 정격의 80%에 도달하면 원자로 정지신호가 발생한다. 4.76초에 발생한 원자로 정지신호에 의해 급수 및 증기 격리밸브가 폐쇄됨과 동시에 PRHR 입출구 차단밸브가 개방된다. 그림 4에서 7까지는 사고동안 노심 유량, 노심 출력, PRHR 유량 그리고 가압기 압력을 보여준다. MCP 완전 정지후 일차계통내 단상 자연순환 유량과 노심 출력에 대해서는 두 코드 결과의 차이가 비슷하다. PRHR 이상 자연순환 유량은 TASS/SMR에서 크게 반해 가압기 압력 감소율은 TASS/SMR에서 보다 느리다. 이러한 불일치는 증기발생기 및 PRHR 열교환 튜브를 통한 열전달을 고려하는 방식의 차이에 기인하는 것으로 여겨지므로, TASS/SMR의 열전달 package에 대한 재검토와 특히 이상 자연순환 예측 능력을 검증할 필요성이 있다.

#### 다. 급수유량 완전 상실

일차측 급수유량이 완전 상실되는 사고에서는 열제거 능력 저하로 인해 일차계통 압력이 급속히 증가한다. 일차적으로 가압기 고압신호에 의해 원자로가 정지되지만 지속적인 압력 증가로 안전밸브 개방을 필요로 하게 된다. 그림 8과 9는 사고동안 가압기 압력과 안전밸브에서

의 방출유량을 보여 준다. TASS/SMR의 경우에는 가스실린더의 압력이 안전밸브 개방 설정치를 넘지 않아 실제로는 안전밸브가 개방되지 않는다. 여기서는 비교 계산을 위해 MARS/SMR에서의 안전밸브 개방 시간과 같게 놓았는데, 안전밸브 개방이후의 거동은 거의 비슷하다. 그러나 안전밸브 개방이전의 압력 거동이 이 사고의 경과를 지배하므로 출력 증감 발에서와 같이 비응축성개스의 거동 예측이 중요하다. 특히 가압기와 가스실린더간의 긴 연결 배관에서의 유동저항도 상당히 커서 그 영향이 무시될 수 없음이 관찰되었다.

#### 4. 결론

SMART에 대한 안전 및 성능 해석에 사용하기 위해 개발중인 TASS/SMR의 분석 능력과 그 취약점을 파악하기 위해 최적 열수력계통 분석코드인 MARS/SMR과 비교 평가하였다. 각 코드의 수치해법 및 물리적 모델을 비교한 결과, 수치해의 존재를 판정하기 위해서는 수치적 안정성과 수렴성 확인 알고리즘을 보완해야 할 것으로 조사되었다.

SMART 계통 거동에 대한 TASS/SMR의 분석 능력을 파악하기 위해서 세가지 사건/사고(출력 증감발, 급수유량 완전상실, 냉각재유량 완전상실)에 대해 비교 계산을 수행하였다. MARS/SMR 결과와 비교 분석된 사건/사고에서 일반적인 거동은 두 코드 모두에서 유사하였다. 그러나 비응축성개스의 거동과 열전달 package 등의 물리적 모델 그리고 붕괴열 모델에 대해서는 계통 특성을 감안하여 개선되어야 하고, 모델 및 코드 검증 작업이 수행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

#### 참고 문헌

1. "SMART 계통 설명서," 한국원자력연구소, SMART-FS-DD210, Rev. 00, 1998.
2. 윤한영외, "TASS/SMR 열수력 모델 기술서," KAERI/TR-1835/2001, 2001.
3. 이원재외, "다차원 최적 열수력계통 분석코드 MARS 1.3 개발 및 검증," KAERI/TR-1108/98, 1998.
4. "RETRAN-03 Volume I : Theory and Numerics," EPRI 1992.
5. "RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods," NUREG/CR-5535-Vol.I, 1999.
6. M. Ishii, "One-dimensional Drift-flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-phase Regimes," ANL-77-47, 1997.

표 1 TASS/SMR과 MARS/SMR의 지배방정식과 수치해법 비교

	MARS/SMR	TASS/SMR
field equation	two fluid	algebraic slip
# of equations	6 + noncondensable gas eqn	5 + noncondensable gas eqn
primary variables	$P, a_g, U_g, U_f, V_g, V_f$	$M, M_l, W_m, E_m, H_g$
equation of state	$\rho_g = \rho_g(P, U_g)$ $\rho_f = \rho_f(P, U_f)$ $T_g = T_g(P, U_g)$ $T_f = T_f(P, U_f)$	$P = P(M, M_l, W_m, E_m, H_g)$ $\rho_g = \rho_g(P, h_g)$ $\rho_l = \rho_l(P, h_l)$
time scheme implicitness :	semi-implicit : interphase transfer - partially implicit sonic - implicit convective - explicit	partially semi-implicit : interphase transfer - explicit  sonic - implicit convective - explicit
differencing scheme	upwind	upwind
nodal scheme	staggered mesh	staggered mesh
interfacing scheme	donor cell	donor cell
conservative property	mass, energy only	mass, momentum, energy
matrix reduction method	ICE technique pressure-reduced matrix	FLASH technique flow rate-reduced matrix
matrix solver	direct inversion : sparse matrix solver	direct inversion : TDMA & Gauss elimination
linearization	Newton-Raphson method	Newton-Raphson method
stability	material Courant limit check	No check
convergence	mass error check에 의한 time step control	No check (one iteration convergence 가정) constant time step 사용
well-posedness	virtual mass term을 추가 long wavelength disturbance에 대해서는 unstable	without additional term, conditionally hyperbolic $0 \leq  V_r  \leq V_H$

표 2 TASS/SMR과 MARS/SMR의 물리적 모델과 부품 모델 비교

	MARS/SMR	TASS/SMR
동특성 모델 붕괴열	point kinetics ANS 1973/1979 decay heat model	point kinetics table form input
열전도 방정식	1-D heat conduction eqn (sphere, cylinder, plate)	1-D heat conduction eqn (fuel, heat exchange tubes) lumped wall model (structures)
유동 형태 모델	vertical, horizontal, highly mixed, ECC mix	bubble rise model+증기 보존식 (phase separation)
interphase momentum transfer : interphase friction wall friction	flow regime dependent drift-flux method/ drag coefficient method HTFS 상관식	no flow regime drift-flux 상관식 (Chexal-Lellouche) Thom/Martinelli-Nelson
wall heat transfer	generalized heat transfer package	독립된 package(노심, SG, PRHR) h=const (structures)
임계 유동	H-F/Trapp-Ransom/ Isentropic	HEM/H-F/Murdock-Bauman
펌프	pump homologous curve	pump homologous curve
밸브 모델	trip/check/inertial/motor/ servo/relief valves	simple valve model
제어 모델	flexible control models	flexible control elements

표 3 분석 대상 사건/사고의 사건 경과

출력 증감발		냉각재유량 완전상실		급수유량 완전상실	
시간(초)	사건	시간(초)	사건	시간(초)	사건
0	급수유량 감소	0	4대 MCP 정지	0	급수유량 중단
960	20% 급수유량 도달	4.76 (TASS)	원자로 정지, PRHR 작동	10.6 (TASS)	원자로 및 MCP 정지, PRHR 작동
1500	급수유량 증가	4.76 (MARS)		14.1 (MARS)	
2460	100% 급수유량 도달			18.0 (TASS) 18.0 (MARS)	안전밸브 개방



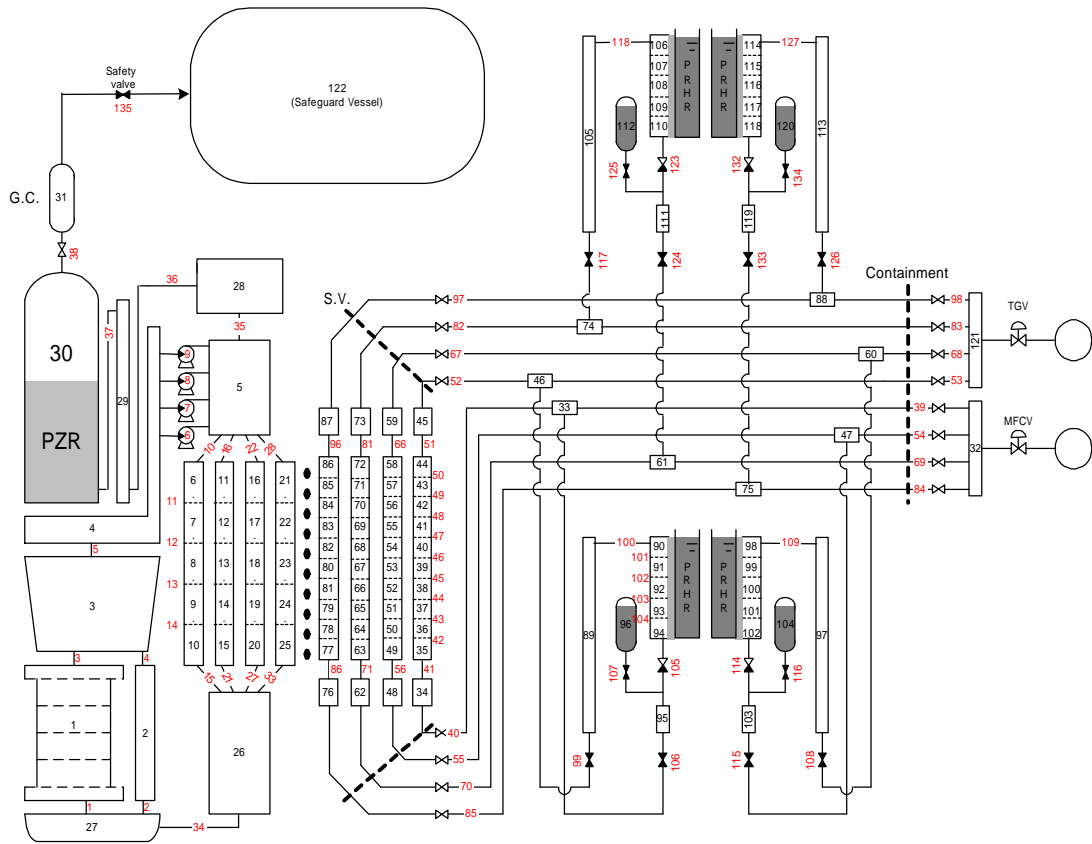


그림 1 SMART 계통 열수력 분석을 위한 Nodalization

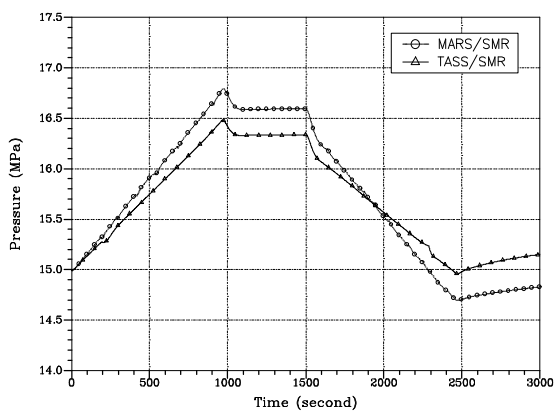


그림 2 출력 증감발 : 가압기 압력

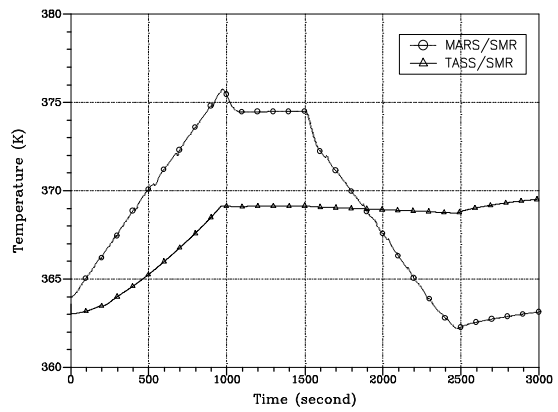


그림 3 출력 증감발 : 가압기 온도

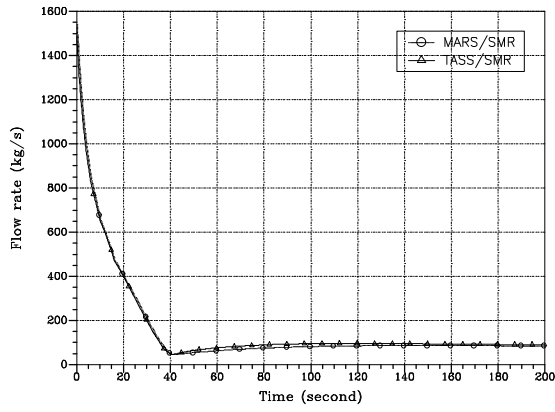


그림 4 냉각제유량 완전상실 : 노심 유량

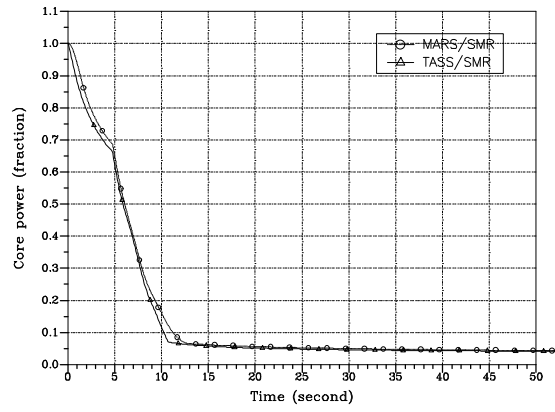


그림 5 냉각제유량 완전상실 : 노심 출력

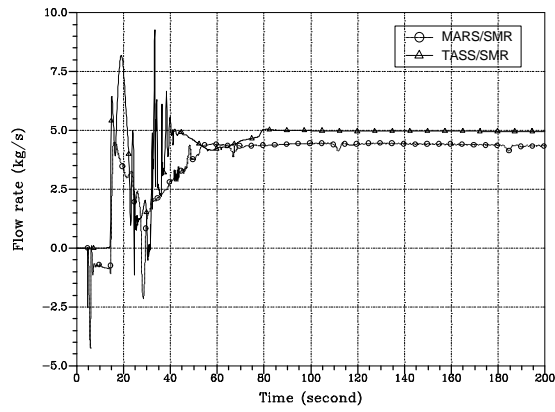


그림 6 냉각제유량 완전상실 : PRHR 유량

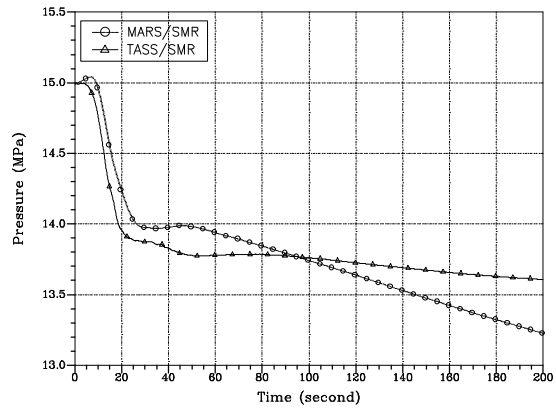


그림 7 냉각제유량 완전상실 : 가압기 압력

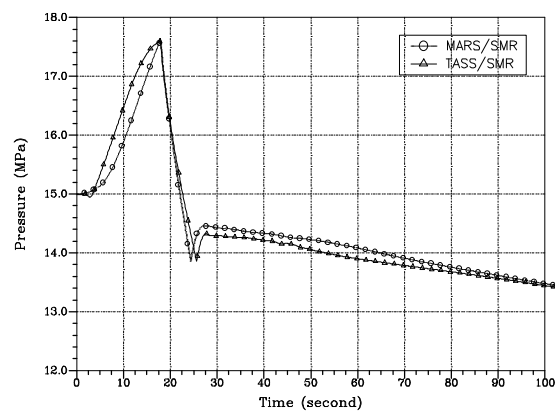


그림 8 급수유량 완전상실 : 가압기 압력

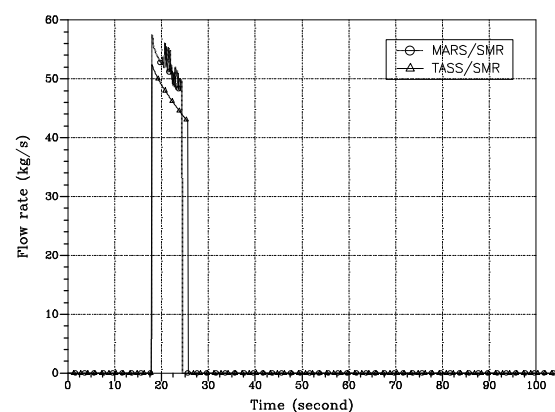


그림 9 급수유량 완전상실 : 안전밸브 유량