

MARS 코드 3차원 열수력 모듈의 Water Packing 완화 루틴 개발

Development of Water Packing Mitigation Scheme for MARS 3- Dimensional Thermal-hydraulic Module

임호곤, 이영진, 김경두, 정법동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

MARS 삼차원 열수력 모듈의 water packing 현상을 완화시키는 루틴을 개발하여 삼차원 계산의 수치적 안정성을 향상시켰다. Water packing 현상은 유한차분법을 사용하는 2상 유동분석 코드에서 발생하는 비물리적인 현상으로 큰 압력의 스파이크를 발생시켜 코드 계산시간을 상당히 증가시킨다. 그뿐 아니라, 압력의 급격한 증가나 이에 동반되는 낮은 압력으로 인해 열역학 테이블계산의 오류를 발생시킬 수 있기 때문에 코드계산의 불안정성을 초래하며 때때로 큰 압력 스파이크로 인해 전체적인 열수력 거동에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 MARS 코드의 3차원 모듈에 적용할 수 있는 Water packing 완화 루틴을 개발하였으며 개발된 루틴을 이용하여 적절한 벤치마크 문제에 대한 예비계산을 수행하였으며 계산의 안정성의 증대와 계산효율의 개선효과가 있음을 입증하였다.

Abstract

Water Packing mitigation scheme was developed to enhance the numerical stability and calculational efficiency of MARS 3-dimensional thermal-hydraulic module. The water packing phenomena is unphysical pressure spike which occurs in a two-phase system thermal-hydraulic code using Eulerian finite difference method. Great velocities developed from large pressure spike slow down the calculation efficiency due to the stability limit. Also, large pressure spike and subsequent low pressure can make errors in thermodynamic state table search. The developed water packing mitigation scheme was implemented in MARS3D module. It is shown from the results of some benchmark problema that numerical stability and calculational efficiency were improved.

1. 서 론

오일러 유한차분법을 사용하는 코드를 이용하여 실험장치 또는 원자로 사고해석시 물리적으로 설명할 수 없는 압력의 스파이크가 종종 발생하는 경우가 있다. 이러한 가상의

압력 스파이크는 주로 제어체적이 과냉각 상태의 물로 완전히 채워질 때 자주 발생한다. 이러한 상황을 통상적으로 Water packing 현상이라 한다.

이러한 비정상적인 압력 스파이크는 이상유동 혼합물과 순수한 액상으로서 물의 압축을 불연속과 차분방정식의 선형 근사오류 등에 의해 발생한다. 유한차분법을 사용하는 코드에서 새로운 압력계산을 위해서 밀도-압력관계는 이전 시구간의 상태변수 및 미분 값에 의존하는데, 기포율이 낮은 이상유동체 혼합물은 코드에서 압축율이 상당히 큰 것으로 간주될 수 있으며 약간의 압력변화에 대해 주위로부터 큰 값의 내부흐름(influx)을 유발할 수 있다. 과냉각 상태의 물과 포화증기가 섞여 있는 경우 증기응축에 의해 저압이 발생하며 작은 압력변화에 대해 제어체적에 남아있는 압력보다 더큰 값의 influx를 유발할 수도 있다. 이어지는 시구간에서 과도하게 유입된 물에 의해 제어체적의 압축율은 대단히 작아 지며 상당히 큰 압력 스파이크를 발생하게 된다.

이러한 가상의 압력 스파이크에 의해 다음시간구간에서는 이웃하는 제어체적으로의 큰 속도가 유발되며 이로 인해 Material Courant limit을 맞추기 위해 시간 간격은 상당히 작아지게 된다. 결국, 계산효율은 상당히 저하되며, 또한, 압력 스파이크는 필연적으로 제어체적의 물이 급격히 이웃하는 노드로 빠져나가게 되어 저압의 압력 스파이크도 유발시킨다. 이로 인해 기포율 분포는 심한 진동을 하게되어 전이상태의 이상유동 해를 어느 정도 왜곡시키며 또한 고압과 저압에 의한 열역학 테이블의 오류를 발생시킬 가능성이 높아 코드의 계산 안정성에 심각한 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 TRAC 이나 RELAP5코드에 적용되었던 Water packing 완화 방법을 MARS 코드의 3차원 모듈에 적절히 적용함으로써 APR1400 LBLOCA 해석과 같은 과냉각 비상냉각수가 직접 강수관으로 주입되는 문제에 대한 적용성을 증대하고자 하였다. 개발된 Water packing 완화 루틴은 예비검증을 위하여 1차원 및 2차원의 테스트 문제에 대한 계산을 수행하였으며 계산 효율과 안정성이 증대됨을 확인하였다.

2. Water Packing 완화 알고리즘

2.1 적용 방법

본 연구에서는 TRAC 코드 및 RELAP5 코드에서 사용되었던 방법[1]을 적용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 노드 “K”에서 압력 스파이크가 발생할 수 있는 상황에서의 표준적인 운동량 방정식의 차분화 형태는 다음과 같다.

$$v_{j+1/2}^{n+1} = v_{j+1/2}^{\text{exp}} + v f d p_K (p_K^{n+1} - p_K^n) - v f d p_L (p_L^{n+1} - p_L^n) \quad (1)$$

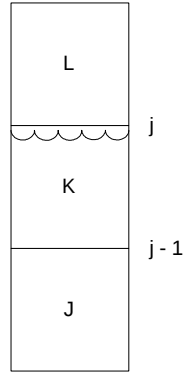


그림 1. 압력 스파이크가 발생할 수 있는 노드

여기서 오른쪽의 첫 번째 항은 n 시구간의 값으로 이루어진 explicit 항을 나타내며 $ufdp$ 는 압력의 계수를 나타낸다. TRAC 이나 RELAP5에서는 "K"노드에서 Water packing이 발생하였을 때 압력 스파이크를 완화하기 위하여 다음과 같은 형태의 차분화된 운동량 방정식을 사용한다.[3]

$$v_{j+1/2}^{n+1} = v_{j+1/2}^{\text{exp}} + vfdp_K \times factor \times (p_K^{n+1} - p_K^n) - vfdp_L (p_L^{n+1} - p_L^n) \quad (2)$$

여기서 factor는

$$factor = \text{Max} \left(10^4, 10^4 + \text{Min} \left(10^6, \frac{P - 8.618 \times 10^6}{10.342 \times 10^6 - 8.618 \times 10^6} (10^6 - 10^4) \right) \right)$$

식(2)는 "K" 노드의 압력변화항에 큰 계수를 곱하여 "K"노드의 압력변화량을 줄이는 역할을 한다. RELAP5나 TRAC은 위와 같은 water packing 완화 방정식을 적용하기 위하여 압력의 계수가 각각의 압력의 변화 항에 대해 분리된 상태로 질량 및 에너지 방정식에 조합되게 된다. 그러나 MARS코드의 삼차원 모듈은 차분화된 운동량 방정식이 식(2)와 같이 분리된 형태를 가지지 않기 때문에 동일한 알고리즘의 적용이 어렵다. 이를 극복하기 위해 MARS 삼차원 모듈에서는 운동량 방정식의 속도항을 받는 질량 및 운동량 방정식의 대류항에 직접 식(2)와 같은 항을 적용하는 방법을 사용하였다. 예시를 위해 단일 채널의 축방향의 유량만을 고려하는 MARS 3차원 모듈의 운동량 방정식은 유량으로 표시되며 다음의 형태를 갖는다.

$$f_{l,j}^{n+1} = f_{l,j}^{\text{exp}} + fdp_j ((p_K^{n+1} - p_K^n) - (p_L^{n+1} - p_L^n)) \quad (3)$$

$$f_{l,j}^{n+1} = (a_l r_l)^* u_{l,j}^{n+1} A_j$$

여기서 오른쪽 첫 번째 항은 n 시구간에 의한 유량 값을 나타내며 $fldp$ 는 압력변화의 계수를 나타내며 위 첨자 *는 donor 량을 나타낸다. 식(3)이 식(2)와 같이 water packing를 고려하기 위해서는 식(4)의 형태를 가져야한다.

$$f_{l,j}^{n+1} = f_{l,j}^{\text{exp}} + fldp \times factor \times (p_K^{n+1} - p_K^n) - fldp(p_L^{n+1} - p_L^n) \quad (4)$$

MARS 3차원 모듈의 “K” 노드에서 액상에 대한 질량 및 에너지 차분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{(a_l r_l)_K^{n+1} - (a_l r_l)_K^n}{\Delta t} + \frac{(a_l r_l)^* u_{l,j}^{n+1} - (a_l r_l)^* u_{l,j-1}^{n+1}}{\Delta x} = -\frac{(1-h)\Gamma_j^{n+1}}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{[(a_l + a_e) r_l h_l]_K^{n+1} - [(a_l + a_e) r_l h_l]_K^n}{\Delta t} A_K + \frac{(a_l r_l h_l)^* u_{l,j}^{n+1} A_j - (a_l r_l h_l)^* u_{l,j-1}^{n+1} A_{j-1}}{\Delta x} \\ & + \frac{(a_e r_l h_l)^* u_{e,j}^{n+1} - (a_e r_l h_l)^* u_{e,j-1}^{n+1}}{\Delta x} = Q \end{aligned} \quad (6)$$

식(4)의 water packing시의 운동량 방정식은 질량 및 에너지 차분 방정식의 대류항에 삽입되므로 식(5)와 (6)의 대류항은 다음과 같은 형태의 압력에 관한 식이된다.

$$\begin{aligned} & (a_l r_l)^* u_{l,j}^{n+1} A_j - (a_l r_l)^* u_{l,j-1}^{n+1} A_{j-1} \\ & = f_{l,j}^{\text{exp}} + f_{l,j-1}^{\text{exp}} - fldp_{j-1}(p_j^{n+1} - p_j^n) + (fldp_j \times factor + fldp_{j-1}) \times (p_K^{n+1} - p_K^n) - fldp_j(p_L^{n+1} - p_L^n) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (a_l r_l h_l)^* u_{l,j}^{n+1} A_j - (a_l r_l h_l)^* u_{l,j-1}^{n+1} A_{j-1} \\ & = h_{l,j}^* f_{l,j}^{\text{exp}} + h_{l,j-1}^* f_{l,j-1}^{\text{exp}} - h_{l,j-1}^* fldp_{j-1}(p_j^{n+1} - p_j^n) + (fldp_j h_{l,j-1}^* \times factor + fldp_{j-1} h_{l,j-1}^*) \times (p_K^{n+1} - p_K^n) - fldp_j h_{l,j}^* (p_L^{n+1} - p_L^n) \end{aligned} \quad (8)$$

“L”노드에서도 “j”번째의 운동량 방정식이 삽입되므로 유사한 방법을 사용하면 압력에 관한 식을 구할 수 있다.

2.2 Water Packing 선택기준

본 연구에서 사용된 Water packing 선택기준은 TRAC 코드와 RELAP5 코드의 선택기준을 참고하여[2, 3] 다음과 같은 기준을 사용하였다.

- a. $0 \leq a_g(i, j) \leq 0.12$
- b. $T_f \leq T_{sat}$
- c. $\Delta p^{n+1}(i, j) \geq 0.005 p_{\max}^n$
- d. $p^{n+1}(i, j) \geq p_{\max}^n$
- e. $Net\ Influx > 0$

첫 번째 선택기준은 Water packing이 열수력노드에 물이 채워지려할 때 발생하기 때문에 주어지는 기준으로 RELAP5는 0.12를 사용하고 TRAC은 0.1을 사용하고 있다. 두 번째 기준은 Water packing은 Water hammering 현상과 간이이므로 물이 아냉각 상태에 있을 것을 요구하는 기준이다. 세 번째는 새로운 시간에서의 압력이 이전 값의 압력에 비해 0.5%이상일 때를 요구하고 있으며 RELAP5는 0.0023의 값을 사용하고 있으며 TRAC은 이전 값의 7%를 초과하는 경우를 기준으로 한다. 그러나 TRAC은 MARS와 수치해석 방법이 다르므로 RELAP5에서 사용하는 값보다 약간 큰 값을 기준으로 선택하였다. 다섯 번째 기준은 계산 노드로의 순 유입(net influx)이 없을 때의 오작동을 막기 위한 기준이다.

2.3 3D Water Packing 완화 루틴

MARS 코드에서 삼차원 모듈의 water packing완화 루틴의 구조는 그림2와 같다. MARS 코드는 1차원 계산 루틴은 RELAP5/MOD3.3을 기본으로 개발되었으며 3차원 계산 모듈은 COBRA-TF를 기본으로 구성되었으며 압력방정식의 통합에 의해 구성되었다. 1차원 계산루틴은 water packing 완화 루틴을 가지고 있다. 3차원 계산 루틴 중 서브루틴 XSCHEM에서 운동량, 질량 에너지 방정식을 차분화하여 압력방정식을 계산하고 있다. 1차원 계산 모듈에서와 같이 새로운 압력이 구해진 후 water packing 발생여부를 조사하며 water packing 이 발생했으면 액상의 대류항을 식(7) 및 (8)의 형태로보정하여 준다. MARS 3차원 모듈은 POST3D루틴에서 유량 및 다른 종속변수를 계산하며 식(4)에 근거하여 유량을 구하게 된다

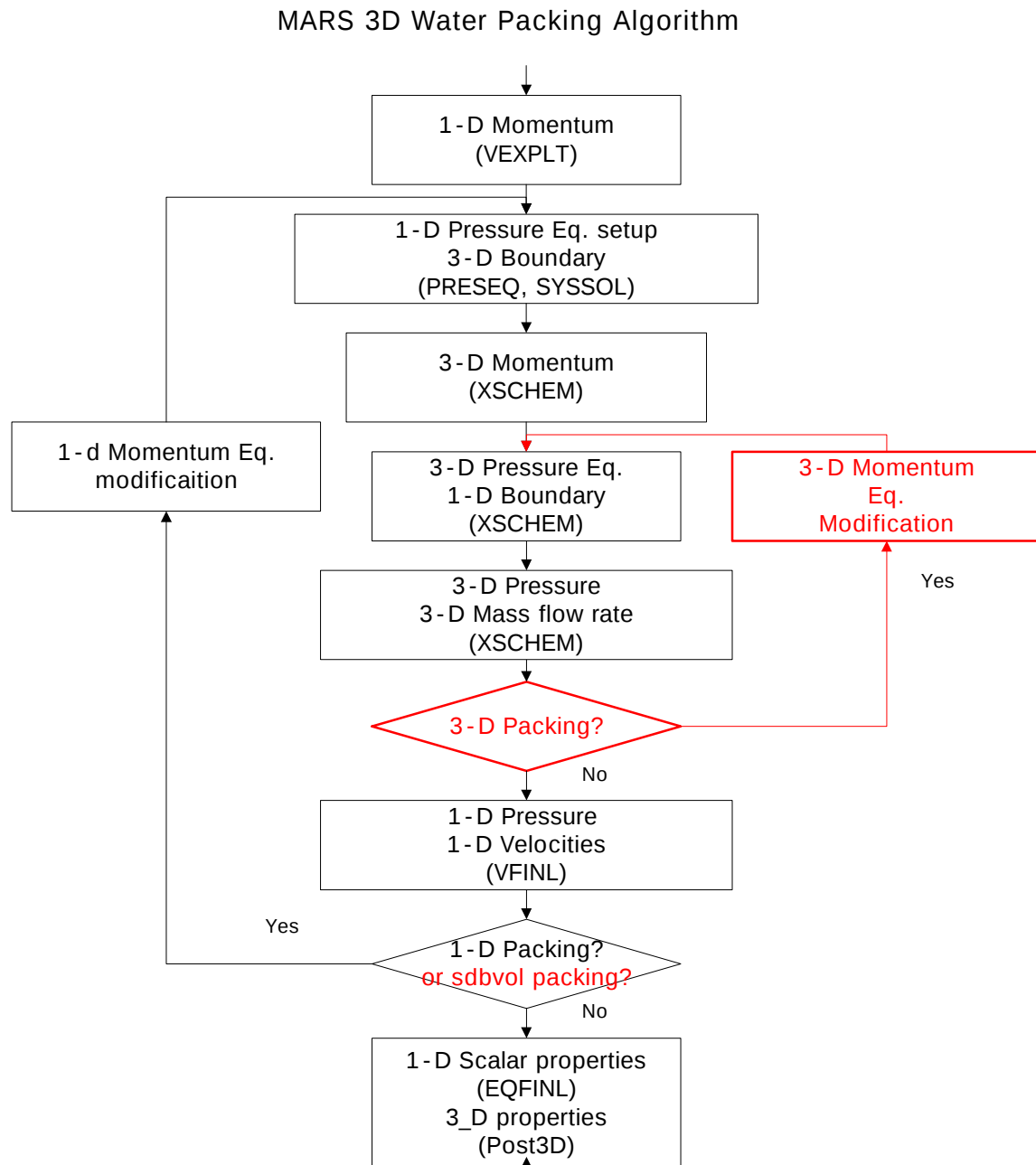


그림 2. MARS 삼차원 모듈의 water packing 완화 루틴

2.4 Benchmark 문제

Water packing 완화 루틴의 적용성을 검토하기 위해 2종류의 테스트 문제를 모사하였

다.

(a) Fill & Drain 문제

Fill & Drain 문제는 MARS 코드 개발 시 Water packing 과 기포의 분포를 조사하기 위해 사용되었던 문제로 본 계산에서는 3차원 노드의 water packing 완화능력을 검증하기 위해 선택하였다. 그림 3.에서 보는 바와 같이 노드의 구성은 수직의 일차원 노드의 중간에 단일 채널의 3차원 노드가 연결되었다. Water packing 현상의 발생을 위해 약 40 °K의 아냉각도를 갖는 물이 파이프의 하단으로부터 1m/s의 속도로 유입된다. 시간의 경과에 따라 모든노드는 물로 채워지게 되며 약간의 지연시간 후에 하단으로 유입되었던 물이 방출된다. 그림 4.는 몇 개의 노드에서의 압력변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3차원 채널에서 아냉각 상태의 물이 노드의 경계면을 통과할 때 큰 압력 스파이크를 보이고 있으며 또한 발생한 압력 스파이크는 저압의 스파이크를 유발하고 있음을 알 수 있다. Water packing 완화 루틴을 적용한 계산에서는 압력 스파이크가 잘 감쇄되고 있으며 일차원 모듈과 비교해 적절한 계산을 수행하고 있음을 알 수 있다.

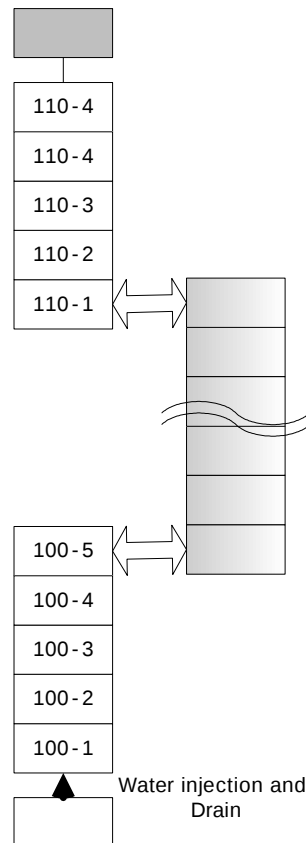
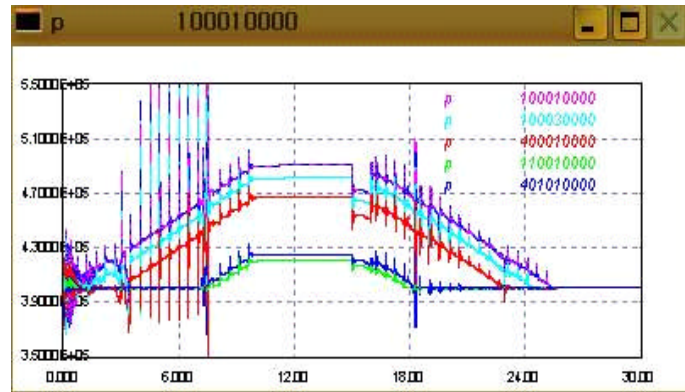
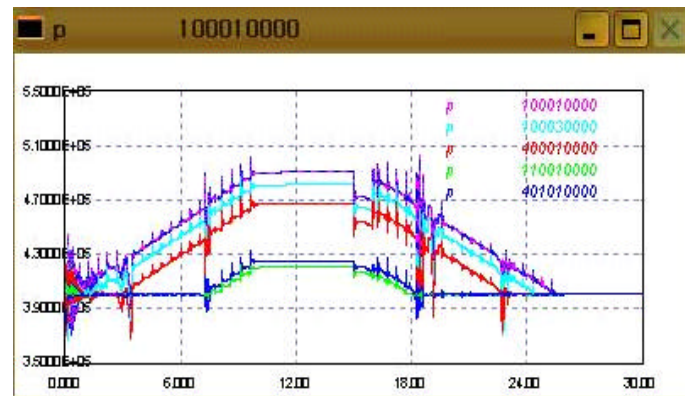


그림 3. Fill & Drain 의 노드구성



(a) MARS 2.1: original



(b) MARS 2.1: modified

그림 4. Fill & Drain 문제의 압력변화

(b) 2차원 슬랩에서의 안전주입수 주입문제

이 문제는 APR1400 LBLOCA 계산 시 문제가 되었던 계산의 중단 문제를 단순화 하여 조사하기 위한 문제이다. 그림 5.에서 보는 바와 같이 9개의 채널로 구성되어 있으며 중간 채널의 중앙노드의 수직방향으로부터 아냉각 상태의 물이 주입되게 된다. 그림 6.는 MARS2.1 과 Water packing 완화 루틴을 적용한 경우의 안전주입수 주입노드에서의 압력 계산 결과를 나타내고 있다. MARS2.1의 계산 결과는 초기부터 과도한 압력 스파이크가 발생하고 있으며 water packing 완화 루틴이 적용된 계산에서도 계산 후반에 압력 스파이크가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 7.은 이 경우의 전형적인 압력 스파이크의 발생을 보여주고 있다. 압력 스파이크가 발생하였으나 스파이크가 발생한 노드의 주변이 모두 기포율이 0.1보다 높기 때문에 Water packing 완화 루틴이 작동하지 못한다.

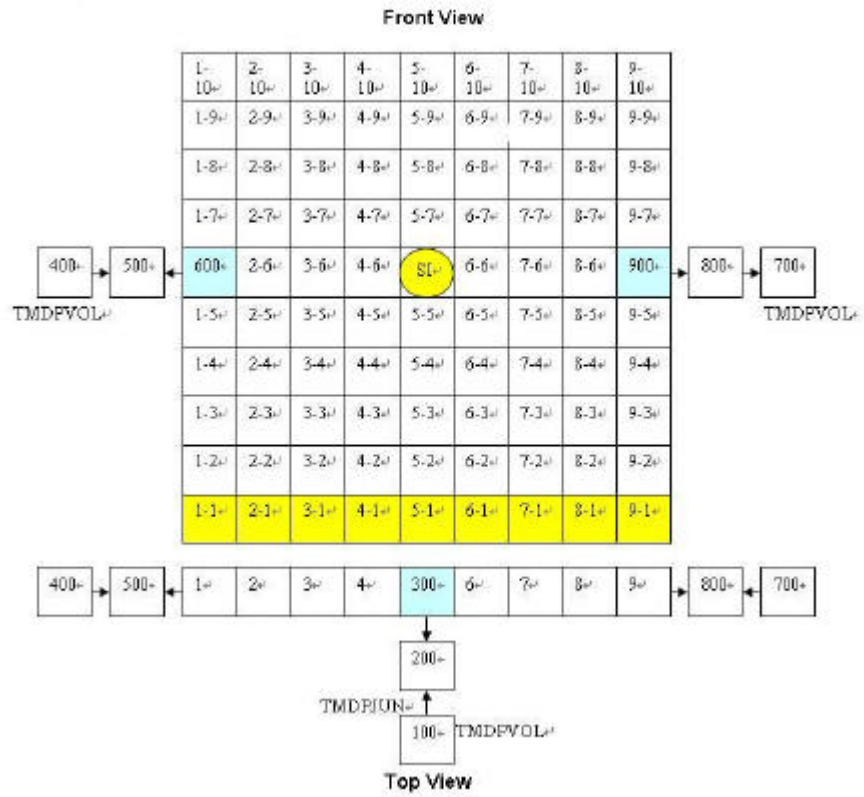
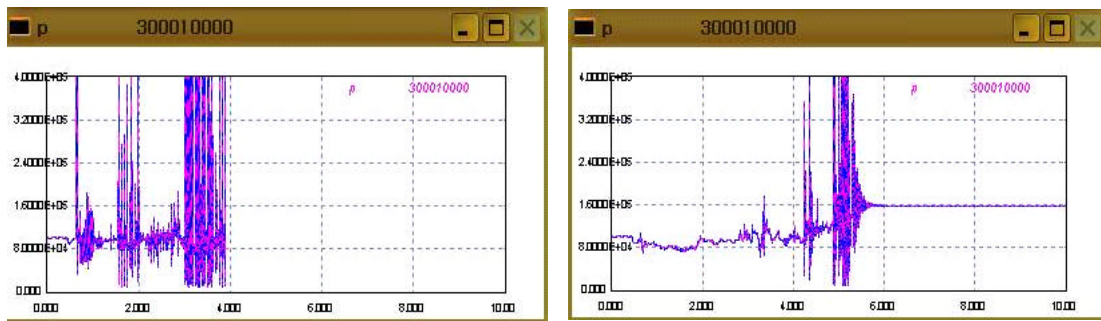


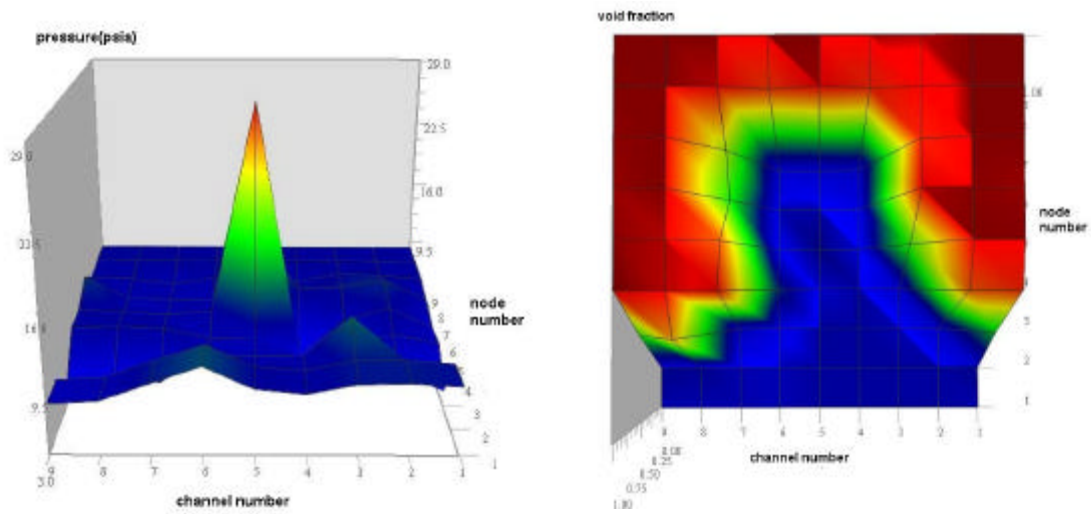
그림 5. 이차원 슬랩의 노드구성



(a) MARS 2.1: original

(b) MARS 2.1: modified

그림 6. 2차원 슬랩에서의 안전주입수 주입노드의 압력변화



(a) 압력 스파이크

(b) 기포율

그림 7. Water packing 완화루틴이 작용하지 않는 압력 스파이크

3. 결론

MARS 코드의 삼차원 열수력 모듈 계산 안정성의 증대를 위한 water packing 완화 루틴의 원형이 개발되었다. 개발된 완화 루틴은 일차원 계산으로부터 water packing 현상이 적절히 완화되고 있음을 보였으며 2차원 슬랩구조에서도 그 유용성이 검증되었다. 그러나 water packing 완화 루틴만으로는 제어할 수 없는 형태의 압력스파이크가 발생함을 알 수 있었으며 계산의 안정성 확보를 위하여 추가의 모델개선의 필요성이 제기되었다.

Nomenclature

A	flow area
α	void fraction
Dx	volume length
Dt	time step size
Γ	vapor generation rate
ρ	mass density
f	mass flow rate
u, v	velocity

h	enthalpy
T	temperature
p	pressure

Subscripts

l	liquid phase
v	vapor phase
j	node number
m	mixture
K	Scalar cell

Superscripts

n	time step advancement
-----	-----------------------

참고문헌

1. J. H. Mahaffy and D. R. Liles, "Numerically Induced Pressure Excursions in Two-Phase Flow Calculations," *2nd International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Santa Barbara, CA, January 11-14, 1983*
2. D. R. Liles et al., *TRAC-PF1/MOD1: Correlations and Models*, NUREG/CR-5069, LA-11208-MS, December 1988
3. Carlson, K. E., Riemke, R. A., Rouhani, S.Z., Shumway, R. W., and Weaver, W. L., *RELAP5/MOD3 code manual volume 1: code structure, system models, and solution methods (draft)*, NUREG/CR-5535, EGG-2596, EG&G Idaho, Inc., June 1990.3.
4. 이원재 등, MARS1.4 코드의 모델 개선 및 검증, KAERI/TR-1386-99, August, 1999