'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MARS 1.3 코드의 열전도체 모델 및 점 동특성 모델 기능 개선

The Functional Improvement of Heat Structure and Point Kinetics Models of MARS 1.3 Code

하귀석, 정재준, 김희경, 정법동, 이원재

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

MARS 1.3 코드는 RELAP5/MOD3.2.1.2 와 COBRA-TF 코드를 각각 1D 모듈과 3D 모듈로 통합하여 단일코드화 한 다차원 최적 열수력 계통분석 코드로서, 코드 Restructuring 및 현대화를 통하여 기술 국산화를 구현한 코드이다. 본 연구에서는 MARS 1.3 코드의 열전도체 모델 및 점 동특성 모델의 기능을 개선함으로써 MARS 코드의 계통 모델링 능력을 향상시켰다. 열전도체 모델은 1D 모듈 및 3D 모듈로 모의되는 수력학적 영역들이 1D 열전도체 모델을 사용하여 결합 가능토록 개선하였으며, 점 동특성 모델은 1D 모듈의 점 동특성 모델에 3D 모듈의 3 차원 열수력적 Feedback 효과를 사용하여 계산을 수행할 수 있도록 개선하였다. 상기 개선사항에 대한 검증 계산을 통하여 열전도체 모델 및 점 동특성 모델의 개선사항에 대한 유효성을 입증하였다. 이러한 MARS 코드의 계통 모의 능력 향상은 코드의 적용성 및 모델링 유연성을 크게 향상시킬 것이다.

Abstract

A multi-dimensional realistic thermal-hydraulic system analysis code, MARS 1.3 is a consolidated code developed by integrating RELAP5/MOD3.2.1.2 and COBRA-TF in 1D module and 3D module and it is a domesticated code through the code restructuring and modernization. This paper describes the functional improvement of the heat structure and point kinetics models of MARS 1.3. Heat structure model has been improved such that the 1D and 3D hydrodynamic volumes can be thermally coupled through the 1D heat structures. And, the 3D module has been improved to perform point kinetics calculation using the point kinetics model of 1D module and 3D thermal-hydraulic feedback. Through the verification calculations, the above functional improvements have been verified effective. Such improvement of MARS modeling capability should enhance the code applicability and the code modeling flexibility.

1. 서론

한국원자력 연구소는 과학기술부의 중장기 계획하에서 다차원 최적 열수력 계통 분석 코드인 MARS(Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety) 를 개발하였다.

MARS 코드는 일차원 최적계통분석코드 RELAP5/MOD3.2.1.2[1](이하 RELAP5라 함)와 다차원 원자로 용기 열수력 코드 COBRA-TF[2]를 통합하여 개발된 다차원 최적열수력계통 분석 코드이다. 이 코드는 기존 두 코드의 장점을 최대한 활용할 수 있도록 개발되었다. 즉, RELAP5 코드의 일반성, Robustness, Versatility 및 COBRA-TF의 다차원 이상유동 현상 모의기능과 뛰어난 재관수 현상 모의기능 등을 동시에 활용하기 위한 것이다. 이를 위해 RELAP5/MOD3.2.1.2 코드에 COBRA-TF 코드를 하나의 모듈 형태로 흡수/통합했다. 그리고 사용자의 편의성 및 이식성을 개선하기 위해 통합된 코드의 프로그램 언어를 FORTRAN 90으로 변환하고, Restructuring 및 Modernization을 수행하여 현재의 MARS 1.3에 이르렀다[3].. MARS 1.3 코드에서는 RELAP5와 COBRA-TF는 각각 1차원 (1D) 및 3차원(3D) 모듈로 활용되고 있다.

현재 MARS 1.3 코드는 가압경수로의 Non-LOCA(Loss-of-Coolant Accident), 소형 및 대형 LOCA 등에서 발생하는 다양한 이상유동 현상을 사실적으로 모의할 수 있다. 특히 3D 모듈을 이용하여 원자로 용기 등에서 발생하는 다차원 이상 유동 현상을 모의할 수 있는 장점이 있다. 그런데, 1D 모듈 및 3D 모듈로 모의되는 수력학적 영역들이 열전도체로 연결된 경우를 모의할 수 없으며, 또한 3D 모듈에는 노심 동특성 모델이 없으므로 3D 모듈로 원자로 용기를 모의하는 경우 노심 동특성 계산을 수행할 수 없다. 본 논문은 이 두가지 제한점을 극복하기 위해 수행된 열전도체 모델 및 점 동특성 모델 기능 개선에 관해 소개한다.

2. Heat Structure Model의 기능 개선

MARS 1.3 코드의 1D와 3D 모듈은 각각 열 전도체 모델과 열전달 Package로 이루어진 Heat Structure Model을 갖고 있다. 이를 이용하여 핵연료 핀, 전기 가열봉, 증기발생기 전열관, 배관이나 원자로 용기의 벽면으로부터의 열전달 등을 모델할 수 있다. 일반적으로 열 구조물 내에서 열전달은 일차원적으로 전도된다고 가정하여 일차원 열전도 방정식을 유한차분법을 써서 푼다. 핵연료봉에 대해서는 추가로 Gap Conductance, Fuel Deformation, Metal-Water Reaction, 재관수 열전달 등에 관한 모델이 요구된다. 여기서 재관수 모델은 2차원(x- & z-direction) 전도 방정식이 이용되며, "Fine mesh rezoning" 방법을 사용하여 축방향의 큰 온도 구배와 열유속 변화를 고려한다.

열전도체 모델의 경계조건으로 대류 열전달, 단열, 온도 및 열속 조건 등이 있다. 대류 열전달 경계조건의 경우, 1D 모듈 Heat Structure 에서는 1D 모듈의 열수력 Component 만을 쓸 수 있고, 3D 모듈 Heat Structure 에서는 3D 모듈의 열수력 Component 만을 쓸 수 있다.

이와 같은 경계조건의 제한점 때문에 1D 모듈 및 3D 모듈로 모의되는 수력학적 영역들이 열전도체로 연결된 경우를 모델할 수 없다. 이와 같은 문제를 1D Heat Structure Model 기능개선을 통해 극복할 수 있도록 MARS 코드를 수정하였다.

과도기 계산중에 MARS 코드의 1D 모듈과 3D 모듈은 Heat Structure Model들을 먼저 계산한 후에 각각의 수력학적 계산을 수행한다. 이는 Heat Structure Model 들이 과거 Time Step에서 계산한 제어체적의 수력학적 조건을 경계조건으로 해서 계산을 수행하면 벽면과 유체 사이의

열전달율과 열유속 등을 현재 Time Step 에서 제어체적의 보존 방정식을 풀기 위한 수력학적 벽면 경계조건으로 제공하게 된다. 따라서 Heat Structure Model 은 3D 모듈의 "Cell" 혹은 1D 모듈의 "Volume" Data 만이 열전도 방정식에서 경계조건으로 이용되기 때문에, 3D 모듈의 "Cell" Data 를 1D 모듈의 "Volume" Data 의 형태로 Mapping 할 경우에, 1D 모듈의 Heat Structure Model 로 1D 모듈 및 3D 모듈로 모의되는 수력학적 영역들이 열전도체로 연결된 경우의 열전달을 모의할 수 있다.

위의 방법을 적용하기 위하여 MARS 코드의 1D 모듈의 일부 프로그램이 수정되었으며, 3D "Cell" Data Mapping 을 위한 새로운 프로그램도 추가되었다. 또한 1D Heat Structure Model 에서 계산된 열전달율과 벽면 근처에서의 기체 생성율(응축율) 등이 3D 모듈의 질량과 에너지 방정식들에 더해지도록 수정되었다.

MARS 코드의 1D 모듈의 Heat Structure Model 에서 계산한 열 유속은 다음과 같이 분할된다.

$$Q_w = \begin{cases} Q_{wf} = \begin{cases} Q_{wf}^{sensible} \\ + \\ Q_{wf}^{latent} = \Gamma_w (h_g^{sat} - h_f), \; if \;\; \Gamma_w > 0 \end{cases} \\ + \\ Q_{wg} = \begin{cases} Q_{wg}^{sensible} \\ + \\ Q_{wg}^{latent} = \Gamma_w (h_g - h_f^{sat}), \; if \;\; \Gamma_w < 0 \end{cases} \end{cases}$$

여기서 Q, Γ, h 는 각각 벽면의 열전달양, 벽면 열전달과 관계된 액상와 기상의 질량 교환, 엔탈피를 나타낸다.

위의 벽면 열유속과 기체 생성율을 3D 모듈의 "Cell"에서의 각 상에 대한 질량 및 에너지 방정식 들의 우측(Source Term; RHS)에서는 다음과 같이 고려되었다.

$$(RHS)_{mass}^{liquid'} = (RHS)_{mass}^{liquid} - \Gamma_w$$
$$(RHS)_{mass}^{vapor'} = (RHS)_{mass}^{vapor} + \Gamma_w$$
$$(RHS)_{energy}^{liquid'} = (RHS)_{energy}^{liquid} + Q_{wf}^{sensible} - \Gamma_w h_f^* = (RHS)_{energy}^{liquid} + Q_{wf} - \Gamma_w h^{**}$$
$$(RHS)_{energy}^{vapor'} = (RHS)_{energy}^{vapor} + Q_{wg}^{sensible} + \Gamma_w h_g^* = (RHS)_{energy}^{vapor} + Q_{wg} + \Gamma_w h^{**}$$

여기서

$$h_f^* = h_f, \; h_g^* = h_g^{sat}, \; h^{**} = h_g^{sat}, \; if \;\; \Gamma_w > 0$$
$$h_f^* = h_f^{sat}, \; h_g^* = h_g, \; h^{**} = h_f^{sat}, \; if \;\; \Gamma_w < 0$$

MARS 코드를 위와 같이 수정하여 검증계산을 수행하였다. 검증의 주요 관점은 전체적인 알고리즘의 건전성과 3D 모듈 "Cell" Data 의 Mapping, 기타 다양한 열 구조물의 경계조건들과의 열적 결합에 대한 건전성, 3D 모듈 "Cell"에서 1D 모듈 Heat Structure Model 의 열유속 분할 적절성 등이다. 또한 Heat Structure Model 이 광범위한 열전달 영역을 다루기 때문에 이들 각각에 대한 검증계산이 이루어져야 한다.

검증을 위해 그림 1과 같이 열 구조물에 의해 연결된 두개의 평행한 배관을 가정하였다. 계산결과의 비교를 위해 일차측과 이차측이 함께 1D 모듈로 모델한 것과 일차측은 1D 모듈, 이차측은 3D 모듈로 모델한 두 종류의 모델을 이용하였다. 여기서 두 배관사이의 열 구조물은 1D 모듈의 Heat Structure Model을 이용하여 모델하였으며, 열수력 경계조건은 다음과 같이 가정하였다.

- 일차측 : 출구 압력 : 15.0 MPa, 입구 유량 온도 : 610.0 K, 유량 : 20.0 kg/s
- 이차측 : 출구 압력 : 7.0 MPa, 입구 유량 온도 : 550.0 K, 유량 : 10.0 kg/s

그림 2는 위의 두 경우(1D/1D, 1D/3D)에 대한 정상상태 계산 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 일차측의 축방향의 온도분포는 두 경우가 정확하게 일치하는 반면에 이차측의 기포율 분포는 약간의 차이를 보인다. 이는 3D 모듈에서 계면 항력을 1D 모듈에서보다 크게 계산하기 때문에 3D 모듈에서 기포율을 크게 예측하고 있다. 두 모델에서 계산한 총 열전달율의 차이는 0.0495 % 였으며, 이는 1D 모듈과 3D 모듈에 포함된 수력학적 모델 차이로 기인한다.

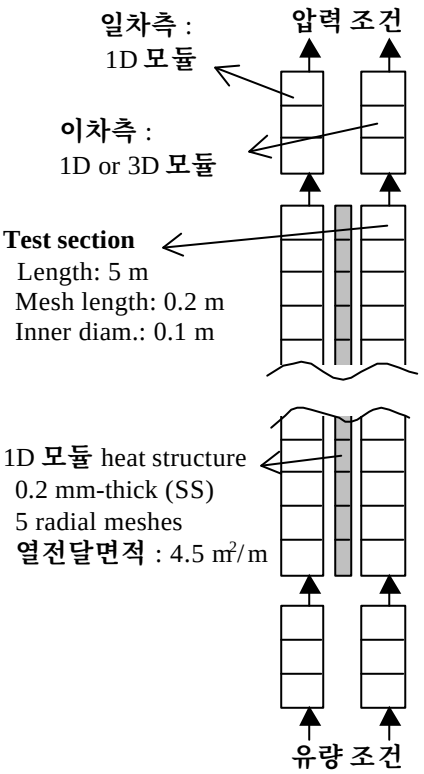

그림 1. 열 전도체로 연결된 두개의 평행 배관 모델

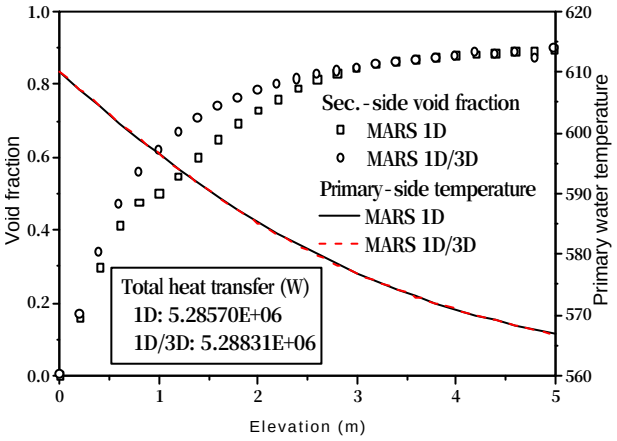

그림 2. 계산 결과 : 배관 길이에 따른 온도 분포와 기포율 분포도

위의 계산에서는 두가지의 열전달 영역(아냉 핵비등, 포화 핵비등)이 나타났다. 다른 열전달 영역에 대한 세부 평가내용 및 결과는 참고문헌 4에서 자세히 다루고 있다. 그 결과 1D 모듈로 모델한 영역과 3D 모듈로 모델한 영역을 열구조물로 연결하여 모의할 수 있다고 평가된다. 부가적으로 그림 1의 일차측과 이차측을 모두 3D 모듈로 모델하고 두개의 배관을 1D 모듈의 Heat Structure Model을 이용하여 연결해도 모의가 가능하다.

3. 3D 모듈에서의 점 동특성 모델 적용

MARS 1.3 코드의 1D 모듈은 자체적으로 Feedback 을 갖는 점 동특성 모델을 이용하여 노심 출력 과도기를 계산할 수 있으나 3D 모듈은 사용자의 입력으로만 노심 출력 과도기를 모의할 수 있다. 노심 출력 과도기에 대한 모의 능력은 종합적인 안전해석에 있어서 필수적이므로 3D 모듈에서 노심 동특성을 계산할 필요가 있다. 이를 위해 반응도 Feedback 에 대해서 3D 열수력 Data 를 사용한 1D 모듈의 점 동특성 모델을 3D 모듈로 이식시킴으로써 3D 노심의 출력 과도기를 모의할 수 있도록 하였다.

반응도 Feedback 계산을 위해, 3D 모듈에서 계산한 냉각재의 밀도와 핵연료와 냉각재의 온도를 1D 모듈의 점 동특성 모델에 맞도록 Mapping 하고, 1D 모듈의 점 동특성 모델에서 출력을 계산하면 그 값을 3D 모듈로 넘겨준다. 또한 Direct Moderator Heating 을 사용자의 입력을 통해 모델할 수 있도록 3D 모듈이 변경되었다.

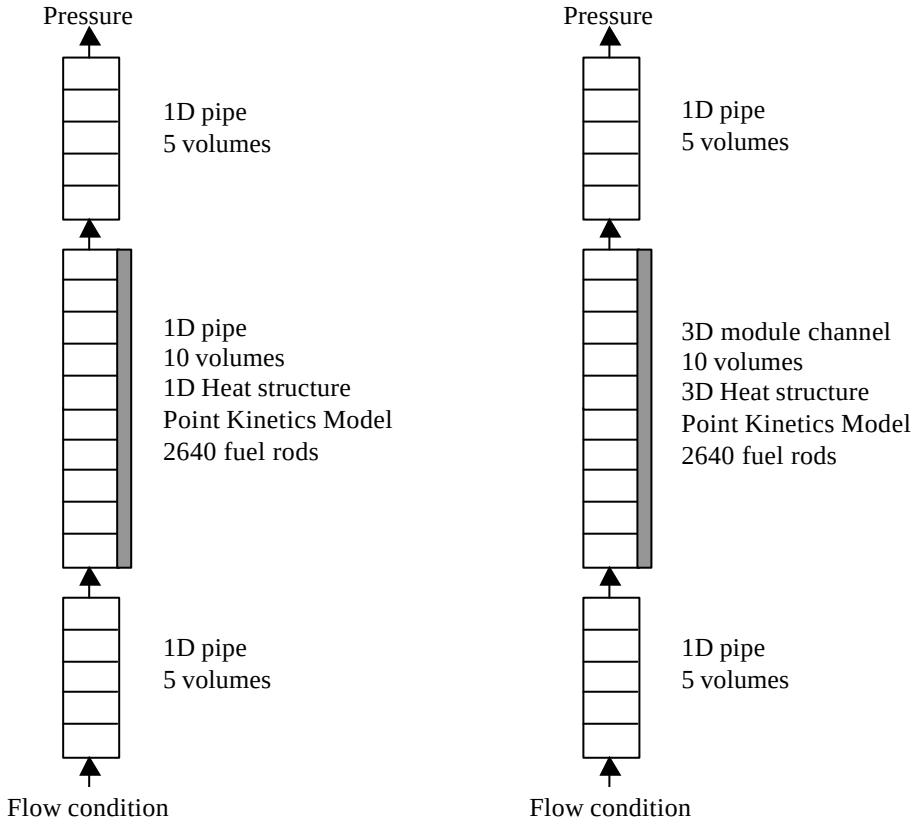

그림 3. MARS 코드 3D 모듈로의 점 동특성 모델 이식을 검증하기 위한 입력 모델

1D 모듈의 점 동특성 모델을 3D 모듈로 이식한 것에 대한 검증을 위해서, 다음과 같은 개념적인 문제를 도출하였다.

- 노심 출력 : 168.9 MW
- 핵연료봉 길이 : 5 m (Active Rod Length : 4 m)
- 총 핵연료봉 수 : 2640 개

그림 3 은 위의 개념적인 문제에 대해서 두개의 입력 모델을 나타내고 있다. 중앙의 배관 영역은 노심을 포함하며, 노심은 1D 모델에서 1D Heat Structure Model 과 점 동특성 모델을 이용하여 모델하였다. 3D 모델에서는 3D 의 Heat Conductor 와 점 동특성 모델을 이용하여

노심을 모델하였다. 각각의 모델을 이용한 계산에서 아래의 경계조건들과 반응도계수를 0 으로 두고 초기 정상 상태를 계산했다.

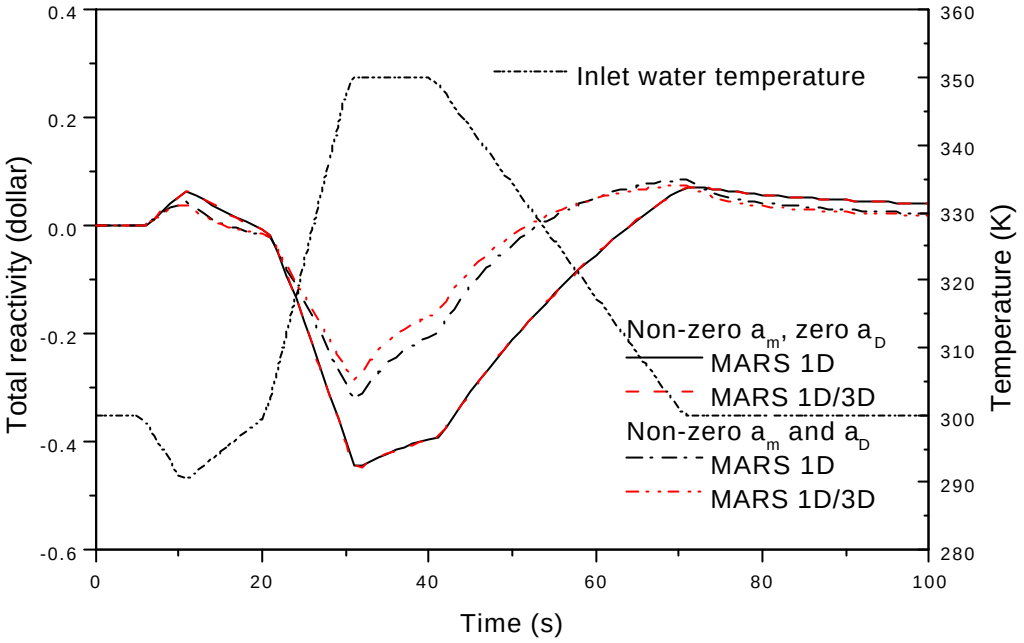

그림 4. 점 동특성 모델 검증 계산 결과(반응도)

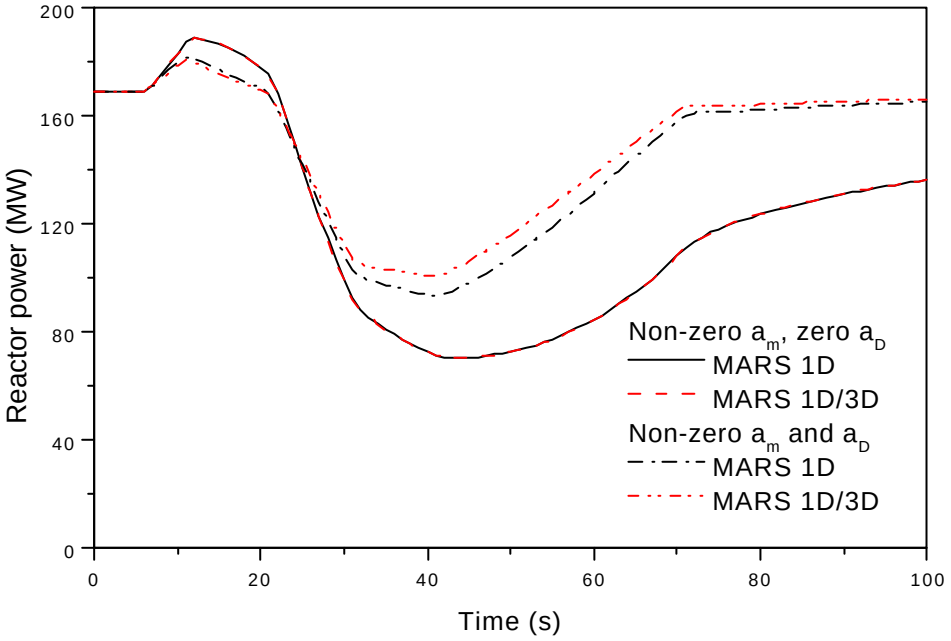

그림 5. 점 동특성 모델 검증 계산 결과(출력)

- **입구 냉각수 온도** : 300.0 K
- **유량** : 998.0 kg/s
- **출구 압력** : 0.4 MPa

입구 냉각수 온도를 그림 4에서 나타난 바와 같이 시간에 따라 변화시키면서 이로 인해 발생하는 과도 현상을 모의하였다. Moderator Temperature 및 Doppler Feedback 계수(a_m, a_d)의 효과를 따로 알아보기 위해 먼저 Doppler Feedback 계수를 0으로 입력한 후 계산을 수행하고, 다시 0이 아닌 Doppler Feedback 계수를 입력하여 계산을 수행하였다.

두 입력 모델에 대한 계산 결과는 그림 4와 5에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Doppler Feedback 계수를 0으로 입력했을 때, 두 결과는 정확히 일치한다. 그러나 0이 아닌 Doppler Feedback 계수를 입력했을 때는 두 결과에서 약간의 차이를 보인다. 각 모듈의 Heat Structure Model에 포함된 모델들의 차이가 평균 핵연료봉 온도의 차이를 발생하고, 이는 다시 다른 Doppler Feedback을 갖는 동특성 거동을 야기한다. 그럼에도 불구하고 전체적인 거동은 두 모델에서 잘 일치하고 있으며, 이는 1D의 점 동특성 모델이 3D 모듈에 잘 이식되었음을 나타낸다.

4. 결론

최적 다차원 계통 분석 코드인 MARS 1.3을 개선하기 위한 노력으로, 1D 모듈 및 3D 모듈로 모의되는 수력학적 영역들이 열전도체로 연결된 경우를 모의할 수 있도록 1D 모듈 Heat Structure Model의 기능을 개선했다. 또한, 1D 모듈의 점 동특성 모델을 3D 모듈에서 활용할 수 있도록 하여 노심 동특성을 3D 모듈로 모의할 수 있도록 개선했다.

상기 개선사항에 대한 검증 계산 결과는 정성적으로 참고 결과와 잘 일치했으며, 정량적으로는 약간의 차이를 보였다. Heat Structure Model 기능개선의 경우, 1D 모듈과 3D 모듈의 계면 항력 모델의 차이로 3D 모듈을 사용한 모델링에서 기포율을 크게 예측하였다. 두 모델에서 계산한 총 열전달율의 차이는 0.0495 % 이므로 개선사항이 코드에 잘 적용된 것으로 평가된다. 점 동특성 모델에 대한 기능 개선의 경우는 Doppler Feedback 계수를 입력했을 때 미미한 차이를 보였지만, 이는 1D 모듈과 3D 모듈의 열전도체 관련 열수력 모델이 상이함에 따른 것으로 평가된다.

결론적으로 상기 개선사항에 대한 검증 계산을 통하여 열전도체 모델 및 점 동특성 모델의 개선사항에 대한 유효성을 입증하였다. 이러한 MARS 코드의 계통 모의 능력 향상은 코드의 적용성 및 모델링 유연성을 크게 향상시킬 것이다.

5. 참고문헌

1. RELAP5 Code Manual, NUREG/CR-5535, USNRC (1995).
2. Thurgood, M. J. et al., NUREG/CR-3046, USNRC (1983).
3. 이 원재 외, Development of A Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and Its Verification, KAERI/TR-1108/98, KAERI (1998).
4. 이 원재 외, Improvement of Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3, KAERI/TR-1141/98, KAERI (1998).

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.