2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열수력 계통분석코드MARS의 MULTID 컴포넌트를 이용한 일체형원자로의 다차원 유동 계산

Multi-dimensional flow calculation of Integral Reactor using MULTID Component of Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS

이석민, 이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림9동 산56-1

배성원, 정재준, 정법동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력 연구소에서 개발된 MARS코드의 다차원 유동장 계산을 위해 개발된 MULTID 컴포넌트의 시스템 적용가능성을 검증하기 위해 이를 일체형원자로에 적용하였다. 소규모의 전력생산 및 해수담수화를 목적으로 개발중인 일체형원자로는 기존의 분리형(loop-type)원자로와 달리 노심, 증기발생기, 가압기, 주냉각재 펌프 등이 배관 연결 없이 한 개의 압력용기 안에 내장된 원자로이기 때문에 복잡한 순환유로를 갖는다. 이러한 계통중 다차원 유동특성을 나타내는 계통에 대해 MULTID 컴포넌트를 적용하여 다차원 유동 형태를 분석하였다. 그 결과 1차원계산에서는 볼 수 없는 유동장의 다양한 특성을 확인 할 수 있었으며, MARS코드의 MULTID 콤포넌트의 다양한 적용가능성에 대해 알 수 있었다.

Abstract

MULTID component, which was developed to multi-dimensional flow analysis of MARS in KAERI, was applied to the Integral reactor for assessment of its capability. Integral reactor is being developed for use an energy source for small-scale power generation and seawater desalination. It has very complicated flow path because all of the primary system components are contained in a single pressure vessel without piping. Multi-dimensional flow characteristics of Integral reactor were analyzed by adopting MULTID component. As a result, MARS code could be utilized with the various application of MULTID component.

1. 서 론

현재 국내에서는 Fluent, CFX등의 상용 전산해석프로그램을 이용하여 3차원 유동해석을 수행하고 있으나, 이들 전산해석코드는 국부적 열 유동현상에 대한 해석은 가능하나 원자로 계통의 천이 열수력 현상을 해석하는 데는 계산시간이나 이상유동의 모델등에서 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 계통분석에서 다차원유동 해석가능성을 파악하기 위해 한국원자력연구소에서 개발된 MARS코드[1]를 사용하고 다차원 유동으로 MULTID 컴포넌트를 사용하는 방식을 적용하였다.

MARS코드는 1D 및 3D 모듈이 내장되어 다차원 열수력 계산이 가능하도록 설계되어 있다. 그러나 MARS 1D 모듈에서의 다차원 열수력 해석의 필요성이 제기되어, MARS 1D 모듈에 운동량 방정식의 대류 및 난류항에 3차원 해석을 고려한 MULTID 컴포넌트를 개발하여 3차원 유동장 해석이 가능하도록 하였다[2]. 따라서 MARS의 MULTID 컴포넌트는 다양한 형태 구조물의 3차원 유동해석이 가능하며, 단상 및 이상유동에 대한 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다.

소규모의 전력생산 및 해수담수화를 목적으로 개발중인 일체형원자로는 기존의 분리형(loop-type) 원자로와 달리 노심, 증기발생기, 가압기, 주냉각재 펌프 등이 배관 연결 없이 한 개의 압력용기 안에 내장된 원자로이다. 이러한 일체형원자로의 유동장은 그림1과 같이 주냉각펌프, 증기발생기 카세트, 원자로 하향유로, 노심하부, 노심 및 노심지지원통을 지나 주냉각펌프로 순환하는 복잡한 폐유로의 특성 때문에 1차원해석과 3차원해석에는 많은 차이가 있다. 특히, 열과 물질 혼합이 3차원유동장에서 발생하는 경우 1차원 해석으로는 유동특성의 확인이 어려우며 정상운전상태가 아닌 사고시에 발생하는 유동장의 특성을 파악하기에 어려움이 있어 3차원해석의 중요성이 증가하고 있다[3].

따라서 본 논문에서는 일체형원자로의 복잡한 유로중 다차원 해석이 필요한 부분에 대해 MARS의 MULTID 컴포넌트를 적용하여 정상상태 및 천이상태 해석을 수행하였으며, 다차원 유동 계산을 위한 MULTID 컴포넌트의 시스템 적용가능성에 대해 평가하였다.

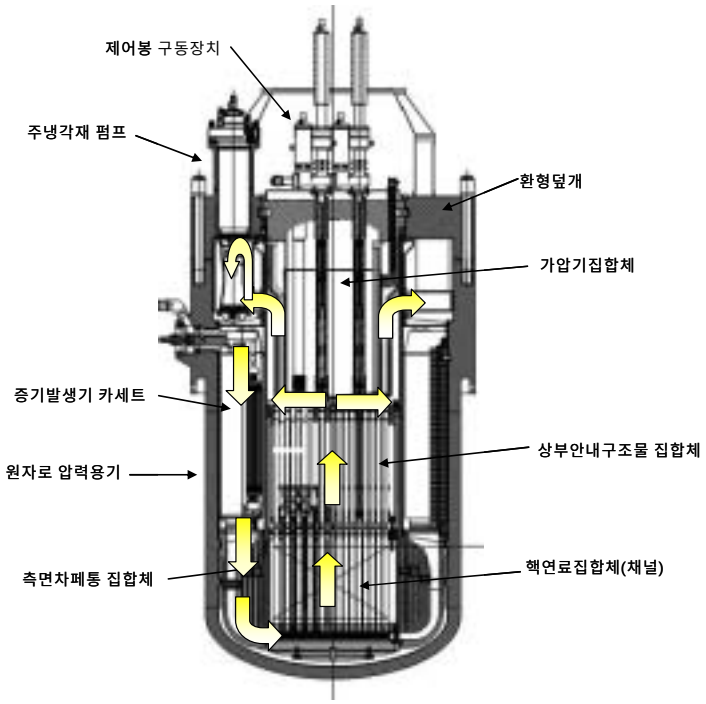
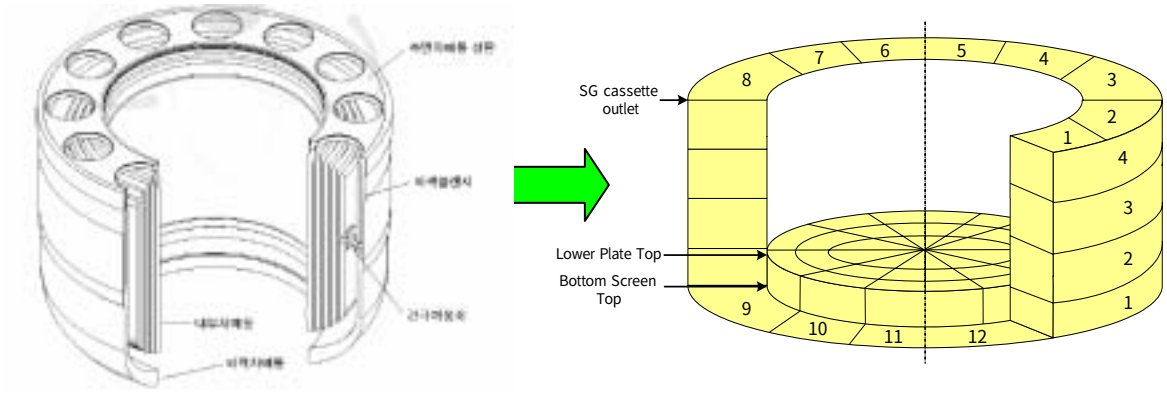


그림1. 일체형원자로의 유로구성

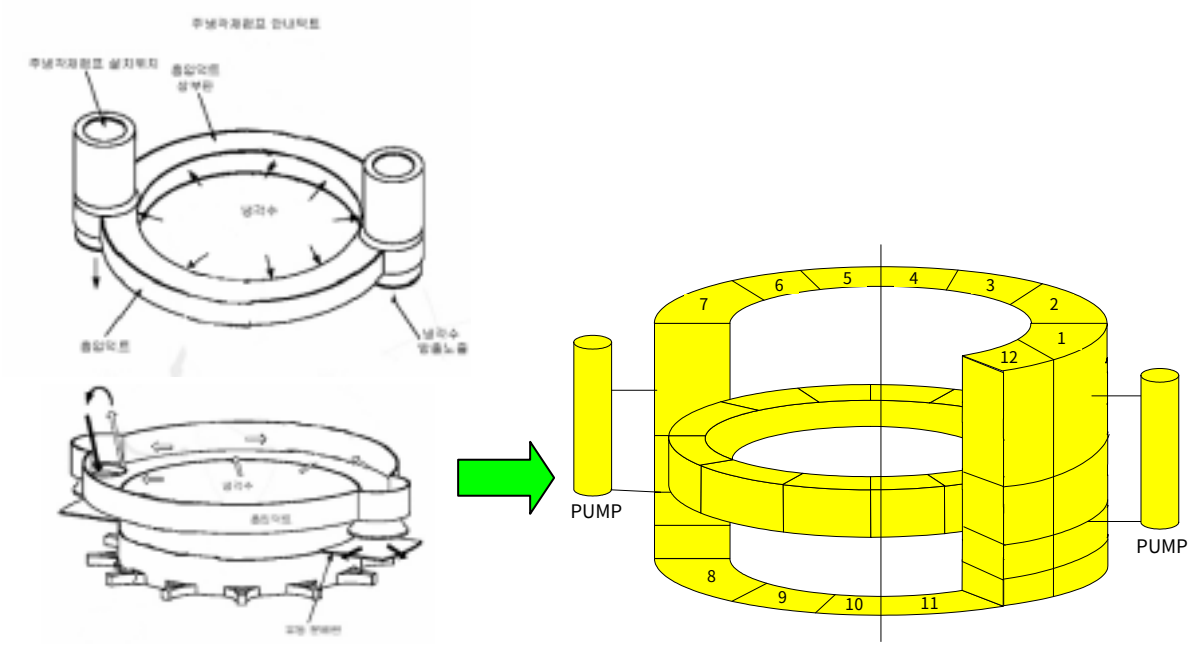
2. MARS, MULTID 컴포넌트를 이용한 일체형원자로 계통 구성

그림1과 같이 일체형원자로의 1차계통은 노심(핵연료집합체), 상부안내구조물 집합체, 주냉각재 펌프, 증기발생기 카세트, 측면차폐통 집합체, 가압기등으로 구성되어 있다. 이중 노심은 closed 채널의 집합체로 구성되어있어 1차원적인 유동형태를 나타내며 상부안내구조물 집합체도 1차원적 유동형태를 나타낸다. 그러나 펌프덕트 구조물 상/하부와 측면차폐통집합체는 환형의 공간에 유동이 흐르므로 3차원 유동의 형태를 띤다. 따라서 이 부분을 MULTID 컴포넌트로 구성하였다. 그림2는 측면차폐통 집합체의 설계모형(a)과 이를 MULTID 컴포넌트로 모델링(b)한 것을 나타낸 것으로, 높이 4개의 원통형 셀과 12개의 반경방향 셀로 구성하였으며, 차폐통 집합체를 지나 노심으로 들어가는 하부는 1개의 높이를 갖는 총36개의 원통형셀로 구성하였다. 그림3은 펌프덕트 구조물을 나타낸 것으로 본 모델링에 사용된 일체형원자로는 2개의 펌프를 갖고 있다. 상부안내물 집합체를 빠져나온 유체가 펌프 안내덕트로 균일하게 들어가도록 설계되어있는데(그림3의 a), 이를 모델링하기 위해 원자로용기 상부와 펌프 안내덕트를 MULTID 컴포넌트로 구성하였으며, 펌프는 기존의 single junction으로 각 높이에 맞게 연결하였다(그림3의 b). 12개의 반경방향 셀중 2번과 8번셀에 대칭이 되도록 펌프를 구성하였으며, 펌프출구부의 유동분배판은 유량이 반경방향으로 잘 퍼지도록 하기 위한것으로, 본 모델링에서는 junction의 면적과 form loss factor를 사용하여 입력하였다.



(a) 설계모형 (b) MARS 모델링

그림2. 측면차폐통 집합체의 설계모형 및 모델링



(a) 펌프 안내덕트 (b)상부공동헤드 및 안내덕트 모델링

그림3. 주냉각재 펌프 안내덕트의 설계모형 및 MARS 모델링

이와 같이 구성한 일체형원자로 일차계통의 전체적 구성을 그림4에 나타내었다. 노심 및 상부안내구조물은 기존의 MARS 1D의 pipe 컴포넌트로 모델링하였으며, 펌프 및 증기발생기가 삽입되어 있는 원자로 용기와 펌프 안내덕트, 노심하부를 MULTID 컴포넌트로 구성하였다. 2차계통의 구성은 기존의 MARS 1D로 구성된 일체형원자로의 입력자료를 그대로 사용하였다.

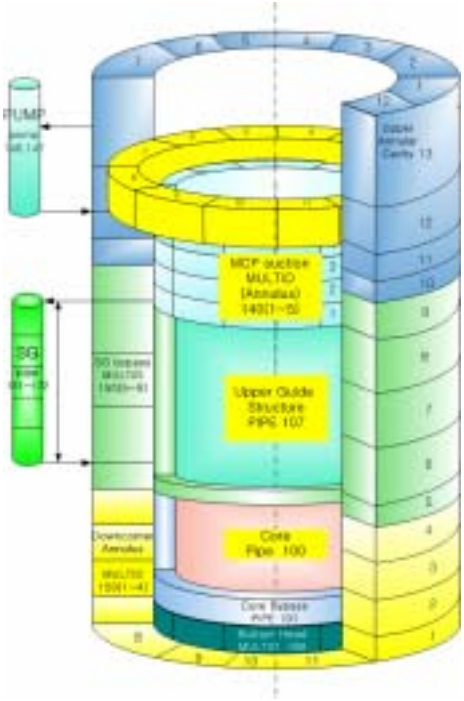


그림4. 일체형원자로 일차계통 모델링

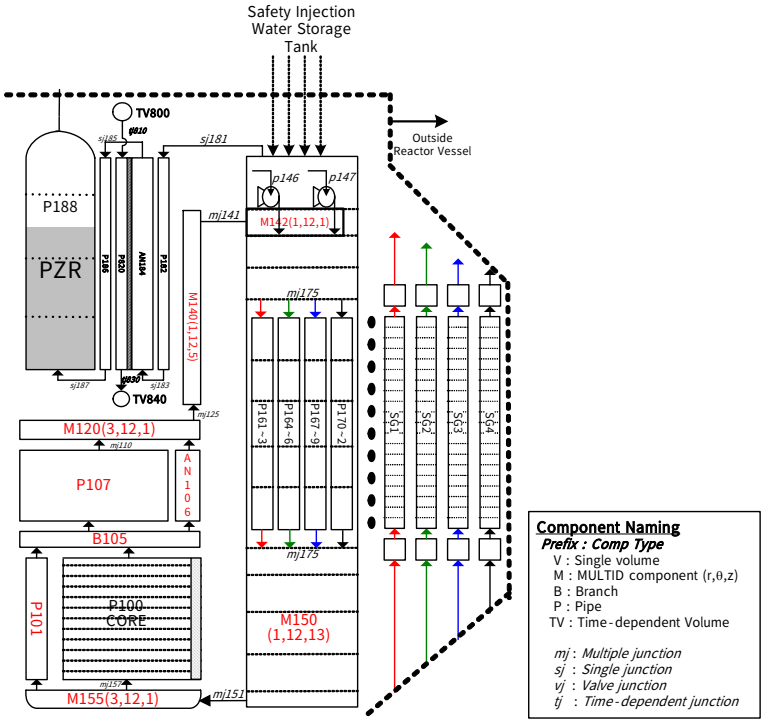


그림5. 일차계통 입력 Nodalization

그림 5는 MARS입력에 사용된 1차계통의 Nodalization을 보여주는 것으로, 전체 650개의 volume과 976개의 junction으로 구성되어 있으며, 이중 MULTID 컴포넌트의 volume수는 300개 이다.

3. 정상상태 계산

일체형원자로의 정상상태계산을 위해 600초의 계산을 수행하였다. 그림6은 노심출력과 이에 따른 2차측 증기발생기로의 열전달을 보여주고 있다. 그림7은 12개의 증기발생기로 들어가는 유량분포를 보여주고 있는것으로 계산동안 균일한 유량이 증기발생기로 들어가는 것을 확인 할 수 있다. 계산결과 0.1%내외의 오차범위에서 기준값과 잘 일치함을 알 수 있다.

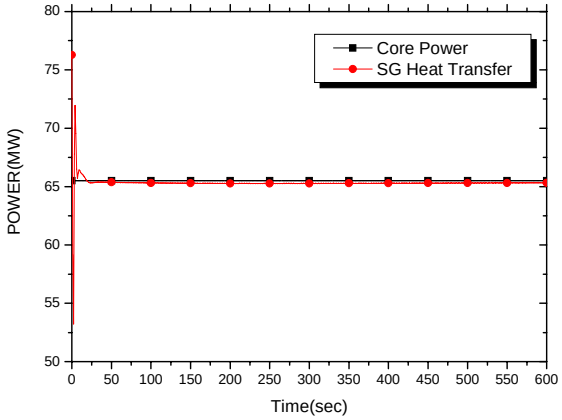


그림6. 정상상태 출력

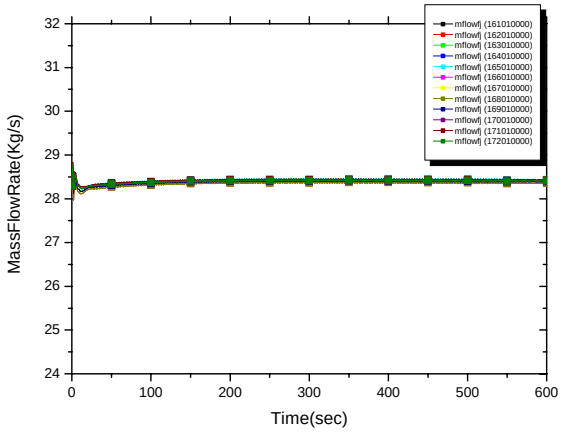


그림7. 정상상태 증기발생기 유량

정상상태의 온도 및 속도분포를 살펴보면, 그림8는 그림4의 150번 컴포넌트를 펼쳤을경우(θ-r평

면)에 대한 속도분포를 보여주고 있다. θ방향으로 2번과 8번노드에 달여있는 펌프에서 나온 냉각수가 균일하게 퍼져 증기발생기(z방향 5~8노드)로 일정하게 들어가는 것을 확인할 수 있다. 시스템 전체적인 온도분포는 그림9에 나타내었다. 그림9는 일차계통에서 펌프의 위치를 기준으로 한 단면적(r-z평면)의 온도분포이다. 노심에서 가열된 물이 펌프와 증기발생기를 지나 냉각되어 다시 노심으로 균일하게 들어가는 것을 볼 수 있으며, 상부의 낮은 온도를 나타내는 부분은 가압기 영역을 나타낸다.

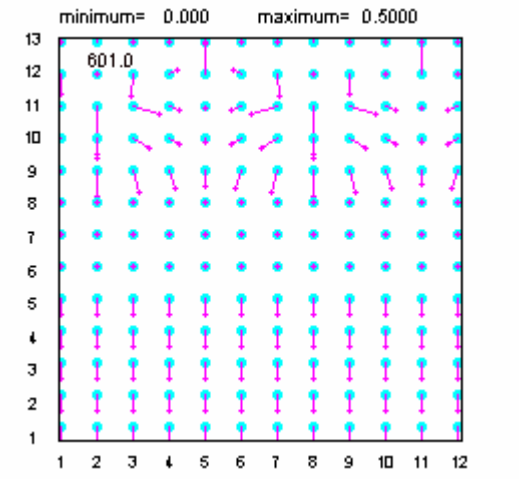


그림8. 150컴포넌트의 속도분포(θ-z 평면)

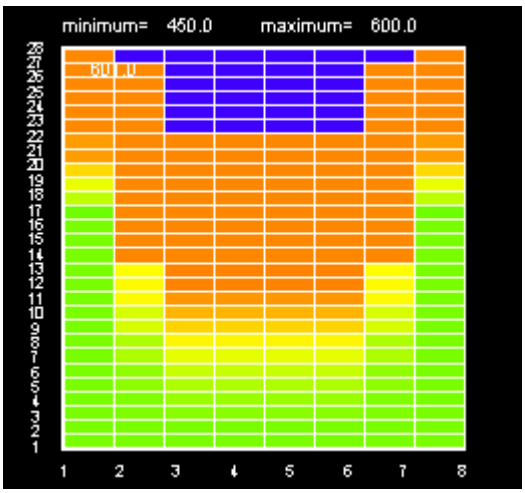


그림9. 일차계통 전체 온도분포(r-z평면)

4. 천이상태 계산

일차계통의 불균형한 유동장이 발생하는 경우를 모사하기 위해, 2대의 펌프중 한대의 펌프가 기기고장등으로 인해 정지하는 사고를 모사하였다. 2개의 주냉각재 펌프중 1개가 정지하면 노심유량이 순간적으로 감소하게 되어 원자로 냉각재 온도가 증가하지만, 음의 반응도 온도계수에 의해 노심 출력은 줄어들게 된다. 그러나 냉각재 유량의 감소로 인해 증기발생기 출구 온도는 낮아진다. 본 계산은 정확한 사고해석을 목적으로 한 계산이 아니고 펌프 정지에 의한 유량분포의 불균형으로 인한 영향을 파악해 보기 위한 것이므로, 펌프 정지에 의한 유량분포와 이에 따른 증기발생기로 유입되는 유량의 불균형 정도만 평가하였다. 그림10은 펌프정지후 30초후의 속도 분포를 나타낸것으로 정지된 펌프(8번 노드위치)로 인해 증기발생기로 들어가는 유량의 불균형이 발생한다. 이로 인해 기동중인 펌프(2번 노드)에서 유출된 냉각수가 유량분배판에 의해 환형으로 퍼지면서 정지된 펌프가 위치한 방향으로 더 많은 유량이 흐르게 되어 그림11에서 보는 바와 같이 펌프정지후 초기에는 정지된 펌프쪽에 위치한 증기발생기(167,168,169)의 유량이 다른 증기발생기의 유량보다 증가한다. 그러나 불균형한 유량분포를 이루더라도 노심하부에서 유량혼합이 잘 이루어져 노심으로 들어가는 온도분포는 일정하게 나타났다.

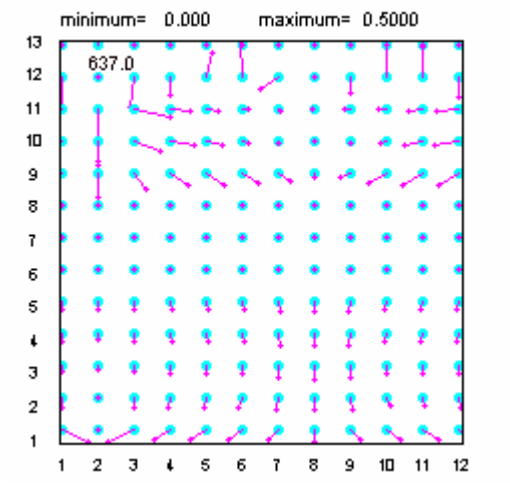


그림10. 펌프 정지후 30초후의 속도분포

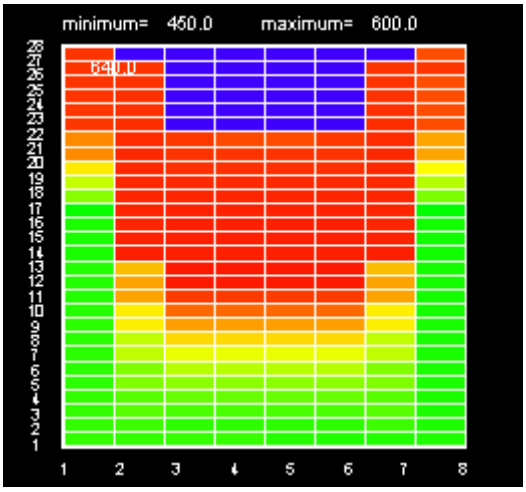


그림11. 펌프 정지후 온도 분포

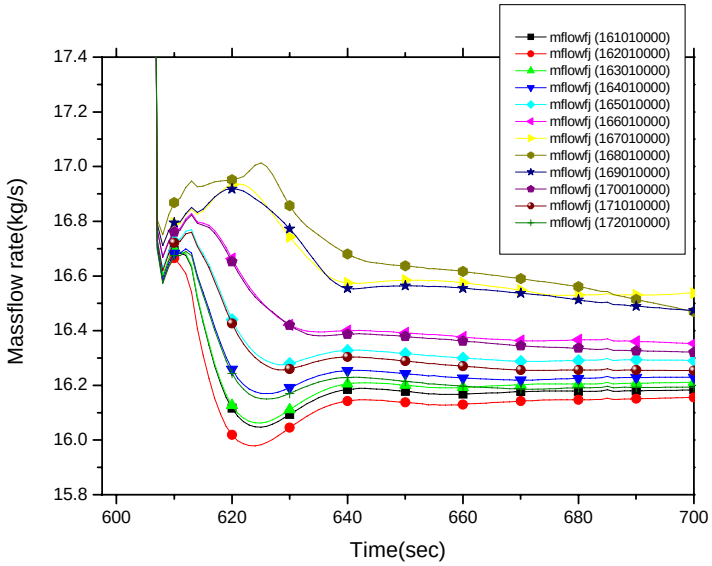


그림12. 증기발생기로 유입되는 유량

5. 결 론 및 향후 연구 방향

MARS의 MULTID 컴포넌트를 일체형원자로와 같이 복잡한 유로를 갖는 시스템에 적용하여 정상상태 및 천이상태에 대해 계산한 결과, 다차원 유동 혼합 및 유량분포에 대해 적절히 계산됨을 확인할 수 있었다. MULTID 컴포넌트를 이용한 MARS의 전체 계산시간은 P4-2.4GHz CPU로 계산

할 경우 real time의 10배정도의 시간이 소요되지만 국부적 다차원상태가 아닌 시스템전체 거동의 다차원상태를 평가함에 있어 많은 계산시간이 필요한 CFD 해석코드에 비해 적절한 계산시간이라 판단되어 진다.

마지막으로 시스템 계통의 다차원계산에 대한 비교 자료가 부족하여 정확한 비교 계산을 수행하는데는 아직까지 많은 어려움이 따른다. 향후 이에대한 적절한 자료확보를 통한 비교계산을 통하여 좀더 정확한 평가가 이루어져야 할 것이다.

6. 참고문헌

[1] 이원재 외 “원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/ 최적열수력계통분석코드 개발”, KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소 (2002)

[2] 정법동 외, “열수력 계통분석코드MARS의 다차원 컴포넌트, MULTID의 개발” 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(2003)

[3] 윤한영 외, “일체형원자로 3차원 유동장 해석코드 개발”, 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2003)

[4] RELAP5-3D Development Team, “RELAP5-3D Code Manuals, Volumes I, II, IV, and V,” Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL- EXT-98-00834, Revision 1.1b. (1999)

[5] 정법동 외, “MARS2.2 Code manual, Input requirements”, KAERI/TR-2529/2003, 한국원자력연구소 (2003)

[6] 장문희 외, 일체형원자로 기본설계보고서, KAERI/TR-2142/2002, 한국원자력연구소(2002)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.