2002 추계학술회의 논문집
한국원자력학회

MARS 코드 1차원 및 3차원 모듈과 MASTER 코드를 이용한 "계통열수력-3차원 노심 동특성" 통합계산 결과 비교

Comparison of "System Thermal-hydraulics – 3 Dimensional Reactor Kinetics" Coupled Calculations using the MARS 1D and 3D Modules and the MASTER Code

정재준, 주한규, 이원재, 지성균, 정법동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소는 1998년부터 "계통열수력 – 다차원 노심동특성" 통합코드 MARS/MASTER를 개발해왔다. 그런데, 기존의 MARS/MASTER를 이용하여 통합계산을 수행하려면 반드시 MARS 코드 "3차원(3D) 모듈"의 열수력 및 열전도체 모델을 써야 하는 제약점이 있었다. 경우에 따라 상세한 3차원 노심동특성 모의는 필요하지만 열수력 현상은 1차원 모의로 충분할 수 있다. 그래서, 본 연구에서는 "MARS 1차원(1D) 모듈과 MASTER"를 연계/통합함으로써 이와 같은 제약점을 해소하였고, OECD의 주증기관 파단사고 평가문제를 이용하여 통합코드의 새로운 기능을 기존의 MARS/ MASTER와 비교/평가하였다.

Abstract

KAERI has developed the coupled "system thermal-hydraulics – 3 dimensional reactor kinetics" code, MARS/MASTER since 1998. However, there is a limitation in the existing MARS/MASTER code; that is, to perform the coupled calculations using MARS/MASTER, we have to utilize the hydrodynamic model and the heat structure model of the MARS "3D module." In some transients, reactor kinetics behavior is strongly multi-dimensional, but core thermal-hydraulic behavior remains in one-dimensional manner. For efficient analysis of such transients, we coupled the MARS 1D module with MASTER. The new feature has been assessed by the "OECD NEA Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark Exercise III" simulations.

1. 서론

최근 몇 년간에 걸쳐 전 세계적으로 "계통열수력 – 다차원 노심동특성" 통합 코드의 개발이 활발하게 진행되어 왔다. 한국원자력연구소(이하 한원(연)이라 함)는 통합코드 개발의 일환으로 1998년부터 다차원 최적 열수력계통 코드 MARS(Lee, W. J., 1998 & 1999)와 3차원 노심 동특성 코드 MASTER(Cho, B. O., 1999)를 통합하여 MARS/MASTER를 개발하였다(Jeong, J.-J., 1998; Joo, H. G., 1998).

1999년도부터 한원(연)은 MARS/MASTER 코드를 외국의 통합 코드들과 비교평가하기 위해

OECD NEA가 주관하는 MSLB Benchmark Program(Ivanov, 1997)에 참여하였다. 이 문제는 미국 TMI-1 가압경수형 원자로의 가상적인 주증기관 파단사고를 상정한 것으로 다음과 같이 세 가지의 표준문제로 나누어 출제되었다:

- Exercise I: "원자로 계통 및 노심 전체"를 모의하되, 노심은 점운동 방정식으로 모의함.
- Exercise II: "원자로심"을 통합코드로 모의함.
- Exercise III: "원자로 계통 및 노심 전체"를 통합코드로 모의함.

한원(연)은 Exercise II & III에 공식적으로 참여하였으며(Joo, H.G., 1999; Jeong, J.-J., 2000), 이를 통해 MARS/MASTER 코드의 우수성을 평가받은 바 있다(Ivanov, 2000). 참고로, 그림 1은 여러 참여기관이 제출한 Exercise III의 노심 총출력 거동을 비교한 것이다. "MARS 3D – MASTER"를 이용한 해석결과는 CEA의 "FLICA – CRONOS", Siemens의 "RELAP5 – PANBOX", 미국 퍼듀 대학의 "TRAC – PARCS" 등의 해(Solution)와 아주 유사한 것으로 나타났다.

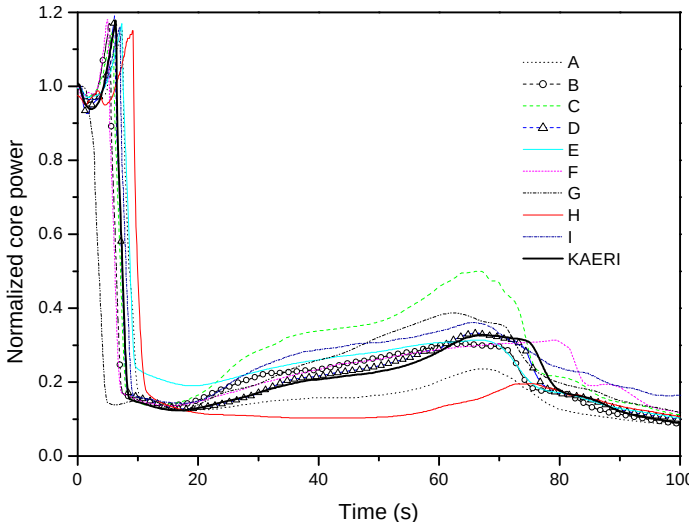


그림 1. OECD MSLB Benchmark Exercise III: 노심총출력 거동의 비교(Ivanov, 2000)

2000년도에 MARA/MASTER는 더욱 개선되어 이른바 "상세 열수력 계산" 기능을 갖추게 되었다. 즉, 기존의 MARS/MASTER는 MASTER 코드 내부의 3차원 노심 동특성 모듈만 이용했는데, 개선된 Version에서는 MASTER에 내장된 부수로 코드 COBRA-III/CP를 활용하여 노심의 열수력 계산을 더욱 상세하게 수행할 수 있다. 이 기능을 쓰면 각각의 핵연료집합체를 횡방향으로 4 등분까지 분할하여 모의할 수 있다. 이에 반해 계산 소요시간은 전체 계산시간의 10 ~ 30 % 정도가 추가되기 때문에 비용-효과 측면에서 아주 우수한 것으로 나타났다(Jeong, J.J., 2001; Joo. H.G., 2001).

그런데, 기존의 MARS 코드(Version 2.0 혹은2.1)로 통합계산을 수행하려면 반드시 MARS "3D 모듈"의 열수력 및 열전도체 모델을 써야 한다. 이는 MASTER 코드가 MARS "3D 모듈"의 열수력 모델 (Hydrodynamic model) 및 열전도체 모델(Heat structure model)과 연계되어 있기 때문이다. 그러나, 경우에 따라 다차원 노심동특성 모의는 필요하지만 열수력 현상은 1차원 모의로 충분할 수도 있다. 예를 들어 Rod Ejection 사고가 발생하면 노심동특성의 과도현상은 다차원적으로 아주 빠르게 진행되지만, 관심있는 시간 영역에서 계통 열수력은 여전히 1차원적 상태로 간주할 수 있다. 이와 같은 경우의 통합계산을 위해 MARS 3D 열수력 모델을 쓰는 것은 비효율적이다.

따라서, MASTER를 MARS 1D 모듈의 열수력 및 열전도체 모델과 연계통합하는 업무의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 "MARS 1D 모듈과 MASTER"의 연계통합 방법 및 결과에 관해 논한다. 제 2절에서 연계통합 방법에 관해 간략하게 설명한다. 제 3절에서는 연계통합의 건전성을 보기 위해 OECD NEA MSLB Benchmark Exercise III를 모의하였으며, 해석결과는 기존의 "MARS 3D 모듈과 MASTER"의 통합계산결과와 비교, 평가하였다. 이를 통해 새로 개발된 기능의 건전성 및 유용성을 확인하였다. 제 4절에는 결론을 기술하였다.

2. MARS 1D 모듈과 MASTER의 연계통합

그림 2는 기존 MARS 1D 모듈의 열수력 모델, 열전도체 모델 및 노심동특성 모델의 상관관계를 보여준다. 노심동특성 모델은 열출력을 계산하여 열전도체 모델으로 전달한다. 한편, 열수력 모델 및 열전도체 모델에서는 각각 감소재 밀도 및 핵연료봉 온도를 계산하여 노심동특성 모델로 전달한다. 본 연구는 현재 MARS 1D 모듈의 노심동특성 모델, 즉, Point Kinetics Model을 MASTER 코드로 대체하는 업무로 규정할 수 있다.

그림 3은 노심동특성 모델을 중심으로 본 MARS 코드의 구조이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 노심동특성 모델, 열수력 모델, 열전도체 모델은 Explicit하게 연계된다. 따라서 기존의 노심동특성 모델을 MASTER Kinetics Model로 대체하여도 계산 순서상의 변화는 없다.

MARS 1D 모듈과 MASTER 코드의 연계통합 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 기존 MARS/MASTER에서와 동일하다(Jeong, J.-J., 1998). 또한, MARS 1D 모듈에서는 기존의 MASTER DLL을 그대로 쓰기 때문에 MASTER DLL의 Arguments도 동일하다.

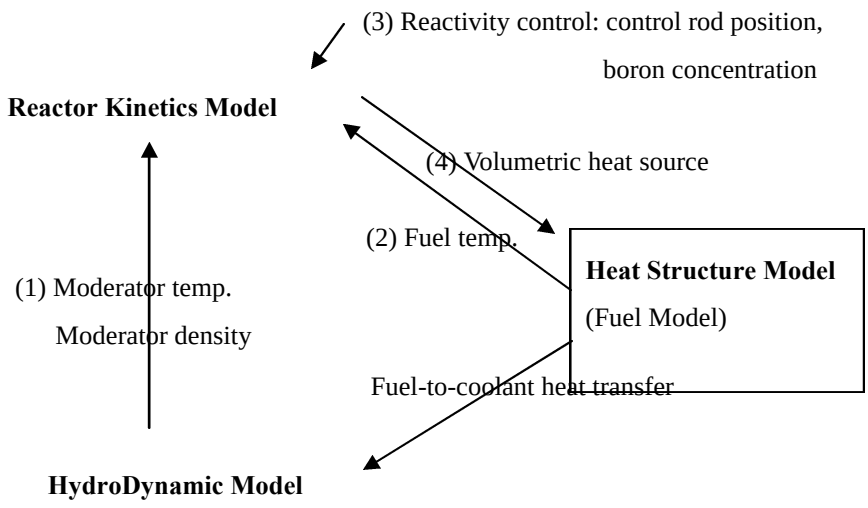


그림 2. 열수력 모델과 Reactor Kinetics Model의 상관관계

```
MARS2.1 - ..
        rcompn;              !reads the 1D module HDM(Hydrodynamic Model) data
          ..
          rhtcmp;            !reads the 1D module HSM data
         rrkin;              !reads the 1D module RKM(Reactor Kinetics Model) data
         ..
         icompn              !Initialize ...
         ihtcmp
         irkin
         ……
    100  dtstep
         timstp
         tstate
         htadv:              !HSM      Transient calculation
         ..
         hydro               !HDM
         ..
         rkin                !Transient calc. of RKM
         goto 100
```

그림 3. 노심모델 관점에서 본 MARS 코드의 부 프로그램 구조

그림 4는 MARS/MASTER의 정보교환 내용을 개념적으로 보여준다. 그림 4에 나타난 바와 같이 MARS/MASTER에는 두 가지의 통합계산 양식이 있다. 편의상 두 양식을 각각 "기본 계산" 양식과 "상세 계산" 양식으로 명명하였다[1]:

- 기본 계산: MARS 1D 혹은 3D 열수력 및 열전도체 모델에서 각각 계산된 냉각재 밀도와 핵연료 온도를 MASTER 노심 동특성 모듈로 전달하고, 이 값들을 근거로 MASTER 노심 동특성 모듈에서 계산된 노심 열출력을 되돌려 받는다.
- 상세 계산: MARS 1D 혹은 3D 열수력 모델에서 계산된 (i) 노심입구 유량, (ii) 노심입구 냉각재 온도, (iii) 노심출구의 압력을 MASTER 코드에 내장된 COBRA-III/CP로 전달한다. COBRA-III/CP에서는 이들을 경계조건으로 활용하여 노심 열수력을 상세하게 계산하고 결과를 MASTER 노심동특성 모듈로 전달한다. 그 다음, MASTER 노심 동특성 모듈은 상세열수력 조건을 활용하여 노심 열출력을 계산하고 MARS 열전도체 모듈로 전달한다.

이들 두 가지 계산양식은 MARS 1D 모듈과 MASTER의 연계통합에도 동일하게 사용된다. 또한, MARS의 열수력/열전도체 Mesh와 3D 노심동특성 Mesh간의 상이점을 처리하기 위한 Data Mapping 방법도 기존의 방법을 그대로 사용한다(Joo, H.G., 1998).

[1] "기본 계산"과 "상세 계산"이라는 용어는 "Base case calculation"과 "Refined calculation"로 표현하였는데(Jeong, J.-J., 2001), 연계통합 계산의 형태를 기준으로 하여 "Single coupled"와 "Double coupled"로도 표기하였다(Joo, H.G., 2001).

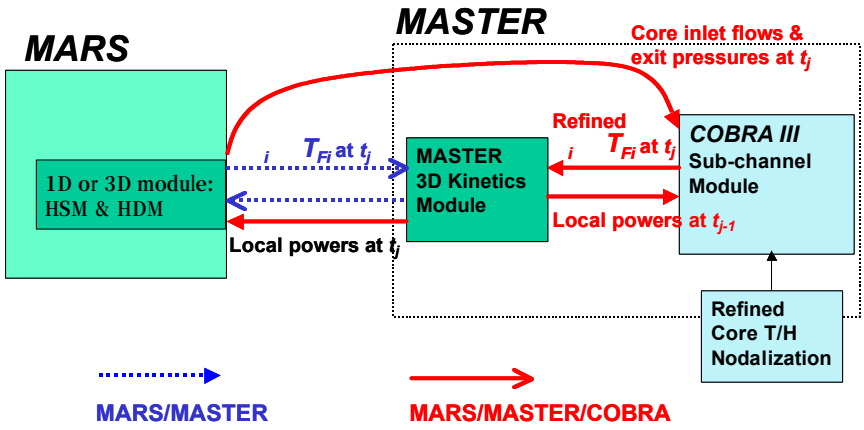


그림 4. MARS/MASTER 코드의 두 가지 계산 양식

3. OECD/NEA Main Steam Line Break Benchmark Exercise III 모의 및 평가

본 절에서는 "MARS 1D 모듈과 MASTER" 연계통합의 건전성을 보기 위해 OECD NEA MSLB Benchmark Exercise III를 모의하고, 계산결과를 기존의 "MARS 3D 모듈과 MASTER"의 통합계산 결과와 비교평가하였다.

3.1. 문제 개요

이 문제의 참조발전소는 TMI-1 가압경수형 원자력 발전소이다. 이 발전소의 정격 노심 열출력은 2772 MWt이며, 고온관 2개와 저온관 4개, Once-through type 증기발생기 2개가 설치되어 있다. 각 증기발생기에는 2개의 증기 출구노즐이 있다. 총 4개의 증기관은 공통관에 연결되어 터빈으로 고압의 과열증기를 공급한다. 원자로심은 총 177개의 핵연료 집합체와 64개의 반사체 집합체로 구성된다. Active core의 길이는 3.5712 m이다. 기타 발전소 설계 특성 및 사고시의 조건은 참고문헌[Ivanov, 1997]에 상세히 기술되어 있다.

MSLB Benchmark Problem은 가압기가 설치된 냉각루프의 증기관중에서 한 쪽은 양단파열(Double-ended break)을 가정하며 나머지 한쪽은 8" 슬롯 파단(Slot break)을 가정한 사고이다. 정지제어봉의 Rod Worth와 관련하여 두 가지 시나리오가 주어지는데, 여기에서는 이른바 Second scenario를 썼다.[2]

이 사고의 초기조건으로 전출력 정상상태 운전을 가정한다(제 3.3절의 표 1참조). 사고 시나리오 및 가정은 다음과 같다:

- 전출력 운전중, 주증기관 파단사고가 발생한다(이 때를 t=0 초로 둔다).
- 원자로정지 직후에 증기관 차단밸브가 닫힌다. 원자로냉각재 펌프는 계속 작동된다.
- 원자로는 고출력(전출력의 114 %, 0.4 초 지연)이나 가압기 저압력(1935 psia, 0.5 초 지연)으로 정지된다.
- 고압안전주입계통은 일차계통압력이 1645 psia에 이르면 25초 지연되어 작동한다. 이때

[2] Original scenario 를 쓰면, 점운동 방정식에서는 Return to power 가 나타나지만 3 차원 노심동특성 코드에서는 그렇지 않기 때문에, Rod Worth 를 약간 줄여서 Return to power 가 명확하게 나타나도록 수정한 Scenario 를 Second scenario 라 한다.

붕소주입에 의한 부반응도 주입효과는 무시한다.

3.2. MARS/MASTER 코드의 입력모델

MSLB Benchmark Problem을 해석하기 위해 사용된 MARS/MASTER 코드의 입력 모델은 그림 5 ~ 9에 나와있다. 설명의 편의상 "MARS 3D 모듈"을 이용한 통합계산의 입력모델과 "MARS 1D 모듈" 입력모델의 설명을 병행하였다. 그리고, 다음 절에서 설명할 통합계산의 이름을 다음과 같이 정의한다:

- 1D 기본 계산: MARS 1D Module + MASTER 계산
- 1D 상세 계산: MARS 1D Module + MASTER + COBRA-III/CP 계산[3]
- 3D 기본 계산: MARS 3D Module + MASTER 계산
- 3D 상세 계산: MARS 3D Module + MASTER + COBRA-III/CP 계산

위의 네 가지 계산은 노심영역의 열수력 모델 방법에 따라 각각 "2 Channel – Base", "2 Channel – Refined", "18 Channel – Base", "18 Channel – Refined"으로도 표현하였다.

그림 5는 총 157개의 Volume과 156개의 Junction으로 구성된 원자로 냉각계통의 입력 모델(MARS 1D 모듈의 입력모델)을 나타낸다. 주증기관이 파단되면, 파단부위로 증기가 급격히 방출되며, 증기방출은 증기발생기 2차측의 냉각재 재고량이 고갈될 때까지 지속된다. 이와 같은 거동을 잘 모의하기 위해서는 원자로 뿐만 아니라 증기발생기 및 증기관도 정확히 모델링할 필요가 있다. 따라서 그림 5에 나타난 바와 같이 증기발생기 및 증기관을 비교적 상세하게 나누었다. 증기관 하나는 24" 배관의 양단 파열을, 나머지 한쪽은 8" 연결관의 슬롯 형태 파단을 모델링하기 위해 Trip valve를 썼다. 건전한 증기발생기에 연결된 증기관 2개는 하나로 통합하여 모델링 함으로써 계산 효율을 도모했다. 증기발생기 세관을 통한 열전달을 모의하기 위해 열전도체 모델을 썼으며, 나머지 구조물에 대한 열전도체 모델링은 하지 않았다.

그림 6은 MARS 3D 모듈에 의해 모의되는 원자로 용기의 입력모델을 나타낸다. 원자로는 3 sections, 59 channels, 94 gaps(총 377개의 열수력 제어체적)으로 모델링하였다. Section 1은 원자로용기의 바닥에서 원자로심 하단까지를 나타내고, Section 2는 원자로용기 상부 플랜지까지, Section 3은 원자로용기 상단까지를 나타낸다. 원자로 용기에는 저온관 4개와 고온관 2개가 대칭형으로 연결되어 있으므로 하향유로(Downcomer)를 6개 채널로 모델링하였다. 저온관은 채널 49, 51, 52, 54의 8번째 Mesh에 연결되며, 고온관은 채널 44와 47의 8번째 Mesh에 연결된다.

원자로심 부분은 그림 7과 같이 "18 Channel" 노심과 "6 Channel" Reflector(Bypass region)로 모의한다. 축방향으로는 6개의 Mesh로 나누었다 (그림 6의 Elevation 참조). 각각의 채널에는 평균적인 핵연료의 거동을 모의하기 위해 Heat structure model을 하나씩 두었다. 이 핵연료의 열원은 MASTER 코드에 의해 계산된다. 그림 6(혹은 그림 7)의 채널 35와 36 사이가 고착된 제어봉의 위치이다.

---

[3] "기본 계산"과 "상세 계산"의 MARS 입력자료는 동일하며, MASTER 입력의 MAS_INP 자료 (icouple)가 서로 다르다.

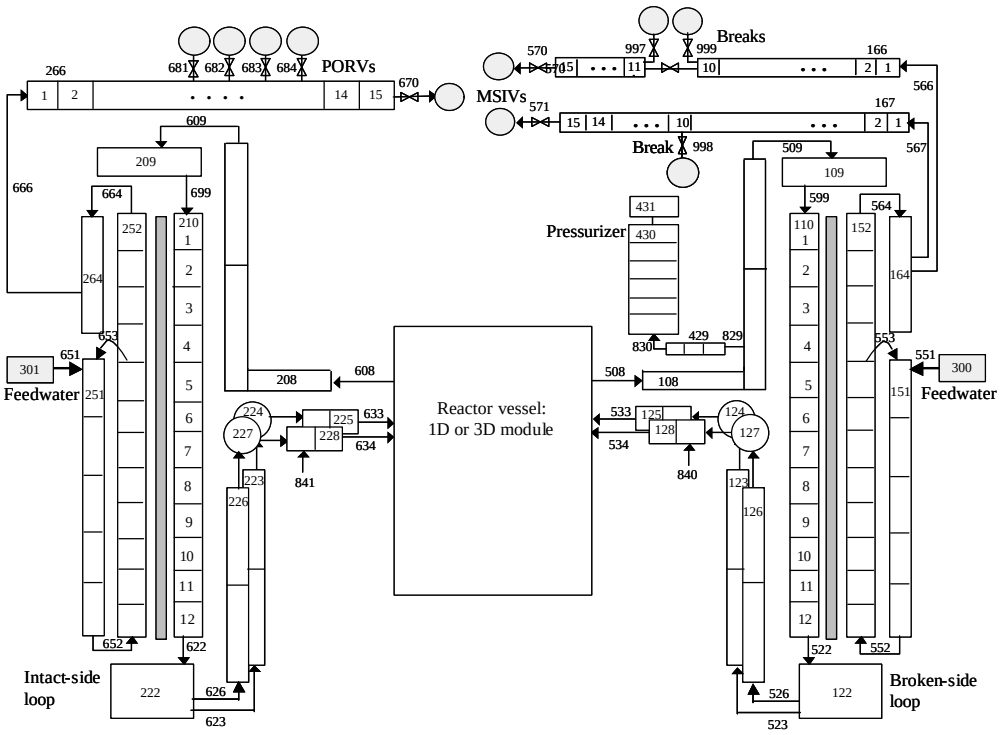


그림 5. MSLB Benchmark Problem 해석을 위한 TMI-1 발전소의 냉각계통 Nodalization

MARS 1D 모듈을 이용한 원자로용기 입력 모델(총 51개 제어체적)은 그림 8에 나와있다. 여기에서는 원자로를 단순히 Broken side와 Intact side로 양분하였다. 즉, 원자로심은 크게 "2 Channel"로 나누어 각각을 "Pipe" 컴포넌트로 모델링하였다. 즉, 그림 6의 노심영역 Channel 25, 26, 27, 31, 32, 33, 37, 38, 39는 그림 8의 Pipe 402와 상응하며, 그림 6의 Channel 28, 29, 30, 34, 35, 36, 40, 41, 42는 그림 8의 Pipe 412에 상응한다. 다만, 핵연료 모델은 MARS 3D 입력모델과 마찬가지로 18개 Heat structure로 모델링하였다. 이들은 Pipe 402와 412에 각각 9개씩 포함된다.

MASTER 노심동특성 모듈에서는 각각의 핵연료 집합체(총 177 개)를 하나의 Radial mesh로 두고, 축 방향으로 28개 Mesh로 나누어 모델링하였다(그림 9 참조). MARS와 MASTER 코드의 노심 격자모델은 상이한데 일반적인 Linear interpolation을 이용하여 Mapping한다(Joo, H.G., 1998). 이 MASTER 입력모델은 MARS 1D 및 3D 모듈을 이용한 통합계산에 공통적으로 사용하였다.

한편, "상세 계산" 기능을 수행하기 위해 COBRA-III/CP의 노심(Active core) 입력자료가 필요하다. 그런데, 현재 MARS/MASTER의 COBRA-III/CP와 MASTER 노심 동특성 모듈은 노심 격자모델을 공유한다. 단, 노심의 축방향 Mesh는 별도로 입력할 수 있는데, 이 문제에서는 노심을 축 방향으로 높이가 일정한 24개 Mesh (14.88 cm/mesh)로 나누었다.

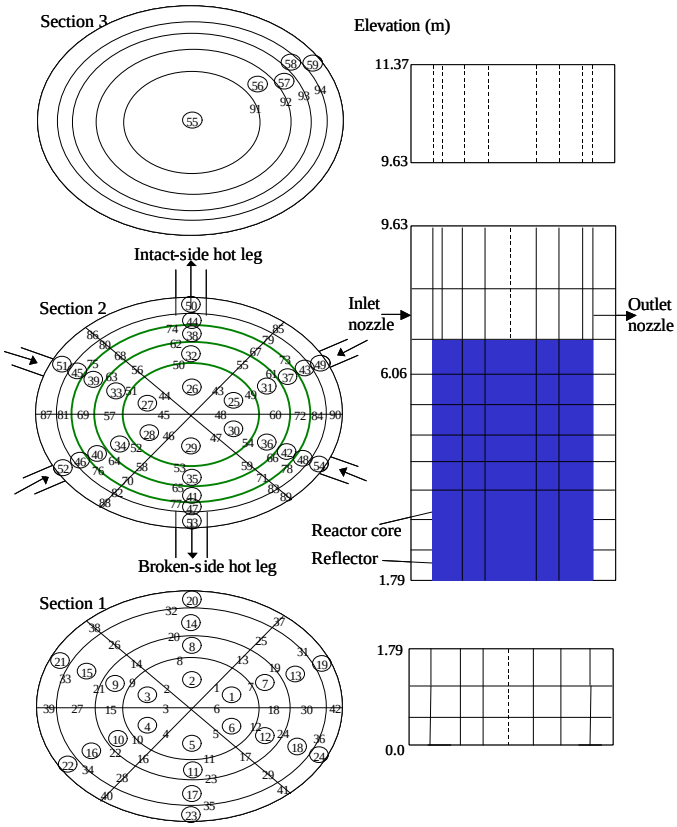


그림 6. MSLB Benchmark Problem 해석을 위한 TMI-1 원자로용기 Nodalization

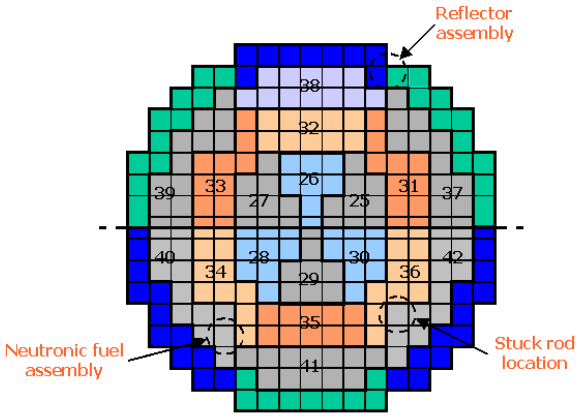


그림 7. MSLB Benchmark Problem 해석을 위한 TMI-1 노심의 MARS 3D Module Radial mesh.

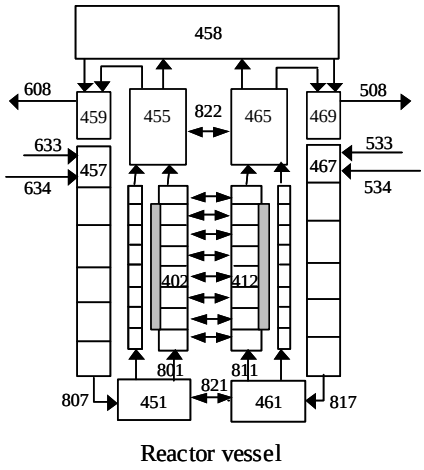


그림 8. MSLB Benchmark Problem 해석을 위한 TMI-1 원자로의 MARS 1D Module Nodalization.

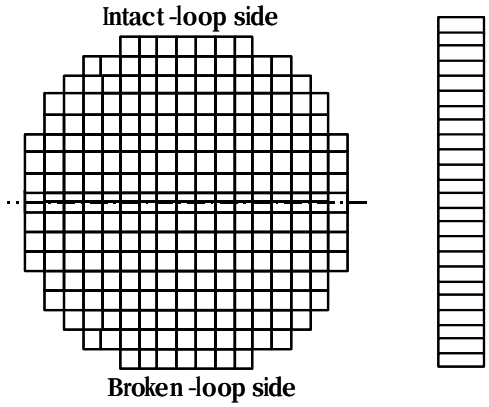


그림 9. MSLB Benchmark Problem 해석을 위한 TMI-1 원자로의 MASTER Nodalization.

3.3. MARS/MASTER 코드의 해석결과

(1) 정상상태 계산결과

표 1은 MARS 3D 모듈 및 1D 모듈을 이용한 통합계산의 초기 정상상태 계산결과를 보여준다. 각 계산은 다시 "기본 계산"과 "상세 계산"으로 나누어진다. 기본 계산과 상세계산 결과(Joo, H.G., 2001)를 보면 원자로심의 국부적인 변수는 다소 차이를 보이지만 계통 전체의 거시적인 변수에는 큰 차이가 없으므로 표 1에는 "기본 계산"의 결과만 열거하였다. 두 계산의 초기조건은 주어진 조건과 잘 일치한다. 그러나, 노심내부의 유량분포 등과 같이 과도현상에 영향을 줄 수 있는 일부 초기조건은 참조자료가 없어서 Exercise II에서의 초기조건과 유사하도록 입력자료를 수정했다. 또한 증기발생기의 냉각재 재고량이 다소 과대평가되었다. 특히, MARS 1D 계산의 증기발생기의 냉각재 재고량은 상당히 과대평가되었는데, 급수관 내부의 냉각재 재고량 등을 감안하면 실제 재고량의 상대 오차는 절반 이하로 감소하여 과도현상의 진행에는 거의 영향을 미치지 않는다.

표 1. OECD MSLB Benchmark Problem의 초기조건

Parameter	Spec. Value	MARS 3D 계산	MARS 1D 계산
Core Power, MW	2772.0	2772.0	2772.0
RCS cold leg temperature, K	563.76	563.9	563.8
RCS hot leg temperature, K	591.43	591.9	591.7
Lower plenum pressure, MPa	15.36	15.37	15.39
Outlet plenum pressure, MPa	15.17	15.15	15.15
RCS pressure, MPa	14.96	14.96	14.96
Total RCS flow rate, kg/s	17602.2	17606.2	17392.4
Core flow rate, kg/s	16052.4	16052.2	15779.9
Bypass flow rate, kg/s	1549.8	1557.9	1612.2
Pressurizer Level, m	5.59	5.599	5.589
Steam Flow per OTSG, kg/s	761.59	761.59	768.05
OTSG outlet pressure, MPa	6.41	6.41	6.51
OTSG outlet temperature, K	572.63	569.1	564.7
OTSG superheat, K	19.67	16.0	10.61
Initial SG inventory, kg	26000	27475.0	28561.0
Feedwater temperature, K	510.93	510.93	510.93

그림 10은 정상상태 노심의 횡방향 출력분포(Radial power distribution; MARS 3D 상세계산 결과임. 1D 계산의 결과도 거의 유사함)를 보여 준다. 횡방향 출력분포는 거의 대칭으로 계산되었다. MARS 1D 및 3D 상세계산에서 정상상태 노심의 유효 증배계수(K_{eff})는 각각 1.003559 및 1.003417로 나타났다.

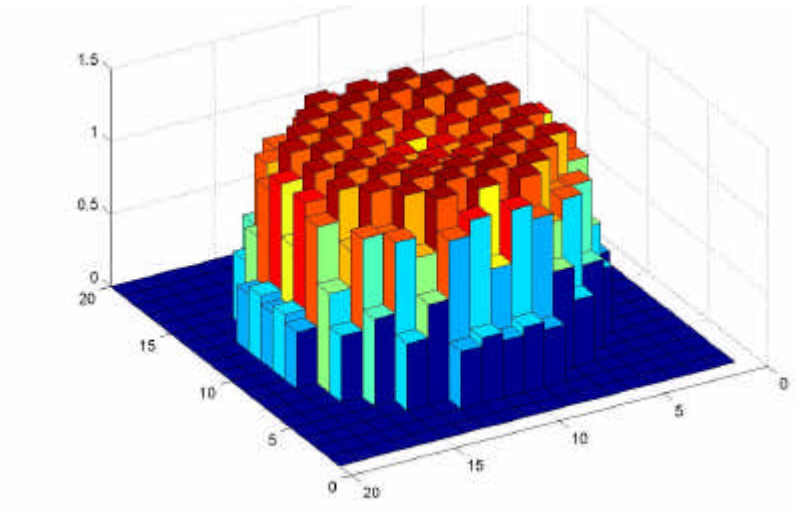


그림 10. 정상상태 노심의 횡방향 출력분포

(2) MSLB 계산결과

그림 11 ~ 16은 네 가지 계산의 과도현상 해석결과를 보여준다.[4] 주 증기관 파단과 동시에 파단부에는 임계유동이 형성되며, 파단된 증기발생기가 완전히 고갈되는 약 80초에 이르기까지 증기가 계속 방출된다 (그림 11과 12 참조). 원자로 정지 신호가 발생하면 주증기관 차단밸브가 즉시 작동되기 때문에 건전한 증기발생기의 증기 유로는 차단된다. 그러나, 파단 유로는 주증기관 차단밸브에 의해 격리되지 않기 때문에 파단된 쪽 증기발생기의 증기방출은 계속된다(그림 5의 파단 위치 참조).

그림 13은 파단된 증기관 쪽의 일차계통의 저온관 온도 거동을 나타낸다. 주 증기관 파단에 의해 일차계통이 과도하게 냉각되어, 일차측 냉각재 온도는 급격히 감소한다. 그렇지만, 파단후 약 80초가 경과하여 증기발생기가 고갈되면 일차측의 열제거원이 상실되어 일차측 냉각재 온도는 다시 증가하기 시작한다.

그림 14는 가압기 상부의 압력 거동을 보여준다. MARS 1D "기본 계산"에서 일차계통 저압력에 의한 고압안전주입 신호는 11.03 초에 발생하며 36.03초부터 실제 주입이 시작된다. 한편, MARS 3D "기본 계산"에서 고압안전주입 신호는 11.7초에 발생하였다. 그림 14를 보면, 25초에서 50초 사이에 1D 계산과 3D 계산의 일차계통의 감압속도가 상당히 다르게 나타났는데 이는 두 모듈의 과냉각 비등 모델의 차이에서 기인한 것으로 보인다.

원자로의 출력거동은 그림 15에 나와 있다. 주증기관 파단 직후에 급격한 열제거로 인해 일차측의 압력이 급격하게 감소하면서 일차측 냉각재가 팽창하므로 부반응도 주입효과가 발생하여 노심출력은 ~95 % 수준으로 떨어진다. 그렇지만, 냉각재 온도감소에 의한 정반응도 주입효과 때문에 노심출력은 다시 증가하여 약 5초 전후에는 정격출력의 114 %에 도달한다. 원자로 정지신호는 원자로 고출력 신호 (정격출력의 114 %) 혹은 일차계통 저압력 신호 (13.41 MPa)에 의해 발생한다. 이 문제에서 두 가지 신호는 약 1초 정도의 차이를 두고 발생하였는데, MARS 1D 계산에서는 원자로 고출력 신호가 먼저 발생하였으나, MARS 3D 계산에서는 일차계통 저압력 신호가 먼저 발생하였다. 원자로 정지신호 발생후[5] 0.4초가 경과하면 정지 제어봉이 삽입되면서 노심출력은 ~15 % 수준으로 떨어진다. 약 18초에 이르면 냉각재 온도감소에 의한 정반응도 주입효과로 노심출력이 증가하기 시작하여 65 ~ 68 초에 이르면 최대 ~ 33 %까지 증가한다. 그 후, 파손 증기발생기의 고갈로 인해 정반응도 주입효과가 사라지면서 노심출력은 다시 감소한다.

그림 11 ~ 15의 결과는 원자로 계통의 거시적인 거동을 보여 주는 것으로, 네 가지 다른 계산이 사실상 거의 동일한 결과를 낳았다고 볼 수 있다. 이에 반해, 그림 16은 노심내부의 국부적인 현상을 나타내는 첨두출력계수(국부 최대 선출력 / 전출력 정상상태 평균선출력) 거동을

---

[4] 네 가지 계산결과는 그림 11 ~ 16 에서 다음과 같이 표시됨:
- 1D 기본 계산: 2 channel – B (Base)
- 1D 상세 계산: 2 channel – R (Refined)
- 3D 기본 계산: 18 channel – B
- 3D 상세 계산: 18 channel – R

[5] 원자로 정지 신호 발생 시점:
MARS 1D 기본계산 – 4.98 초, MARS 1D 상세 계산 – 5.46 초,
MARS 3D 기본계산 – 5.67 초, MARS 3D 상세 계산 – 5.61 초.

비교한 것인데 네 가지 계산 결과가 서로 현저히 다르게 나타났다. 우선 1D 계산(2 channel 계산)에서 3D 계산(18 channel 계산)으로 바뀌면 첨두출력계수가 상당히 감소하며, "기본 계산"에서 "상세 계산"으로 바뀌면 첨두출력계수는 더욱 큰 폭으로 감소한다. 두 가지 효과가 동시에 반영되면, 즉, 1D 기본 계산에서 3D 상세 계산으로 바꾸면 첨두출력계수 최대값은 3.05에서 1.91로 감소한다. 이와 같은 차이는 감속재 밀도 및 핵연료 온도의 반응도 궤환효과를 국부적으로 상세하게 계산하기 때문이다. 1D 계산에서 3D 계산으로 바뀌면 감속재 밀도의 반응도 궤환 효과가 더욱 상세하게 계산되며, "기본 계산"에서 "상세 계산"으로 바뀌면 감속재 밀도뿐만 아니라 핵연료 온도의 반응도 궤환 효과가 더욱 상세하게 계산되기 때문이다.

그림 17은 파단후 66초 경과시 MARS 1D "상세 계산" 및 파단후 68초 경과시 MARS 3D "상세계산"의 노심 횡방향 출력분포를 나타낸다. 출력이 가장 높은 부분(채널 36 부근)이 제어봉이 고착된 곳이다. 노심 동특성 계산이 다차원적으로 수행되어야 함을 분명히 보여주는데, 두 계산의 출력분포는 거의 유사하다. 따라서, 이 문제의 경우에 다차원 열수력 계산의 영향 보다 다차원 노심동특성 계산의 영향이 더 중요한 것으로 보인다.

지금까지의 해석결과를 보면, 새로 개발된 "MARS 1D + MASTER" 통합계산 기능이 건전하게 작동하고 있으며, 1D 모듈 계산결과는 3D 모듈 계산결과와 유사성 및 일관성을 갖추고 있다.

본 계산은 1.7 GHz Pentium IV 프로세서를 장착한 개인용 컴퓨터(Windows 2000)에서 수행되었으며, 과도현상 100초를 해석하는데 소요된 계산시간은 표 2에 열거되어 있다. 표 2의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다:

- 3D 모듈을 이용한 계산 시간은 1D 모듈 계산 시간에 비해 3.1 ~ 3.4 배 크다.
- "상세 계산" 시간은 "기본 계산" 시간에 비해 1.08 ~ 1.2 배 크다. 즉, COBRA-III/CP의 계산시간이 ~100 초 정도 추가된다.
- 3D 노심 동특성 모듈의 계산시간(COBRA-III/CP의 계산시간 제외)은 전체에서 9 ~ 27 % 정도이다.

각 계산의 결과 및 계산 소요시간을 보면 "1D 상세계산"이 비용-효과측면에서 아주 유용한 통합계산 수단으로 평가된다. 특히 노심 동특성의 과도현상은 다차원적으로 진행되지만 계통 열수력은 여전히 1차원적 상태로 머무르는 사고의 통합계산에 이 기능은 아주 효과적으로 활용될 수 있다.

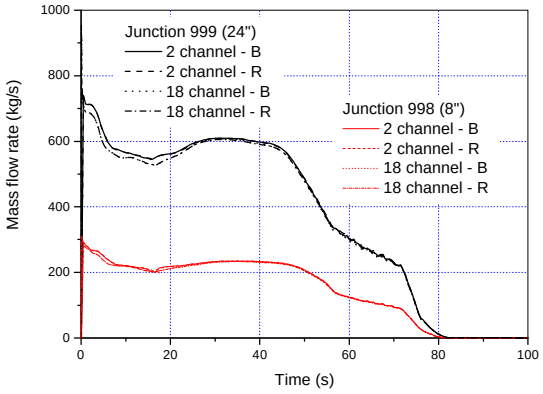


그림 11. 파단 유량 거동

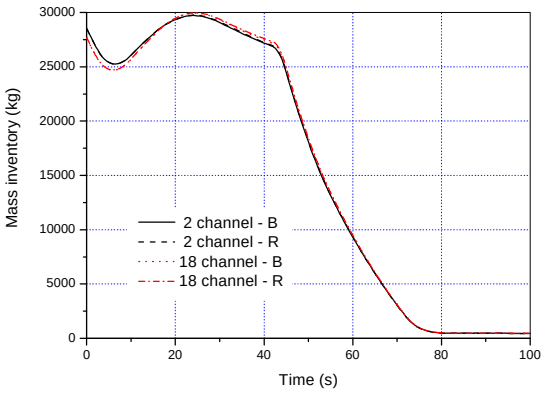


그림 12. 증기발생기 2차측 냉각재 재고량 거동

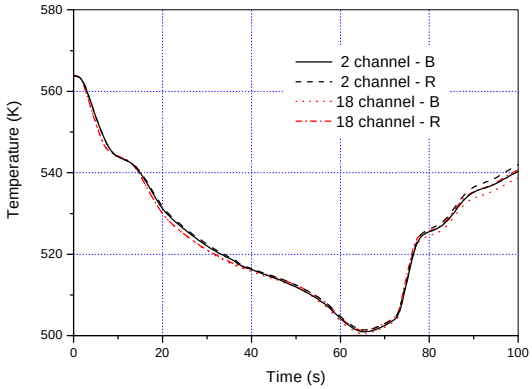


그림 13. 저온관 온도 거동 비교

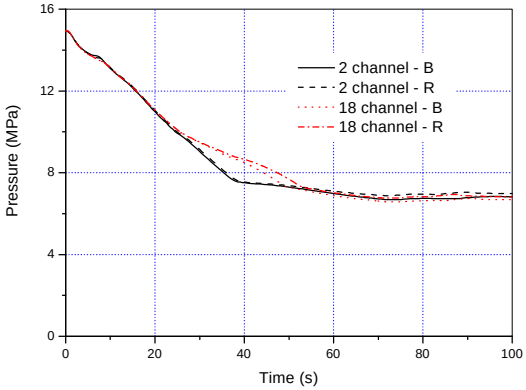


그림 14. 가압기 압력 거동 비교

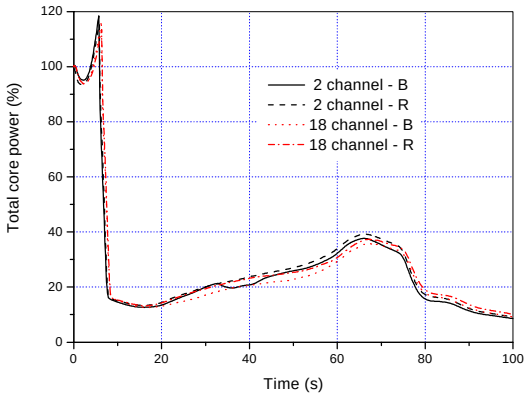


그림 15. 노심 총 출력 거동 비교

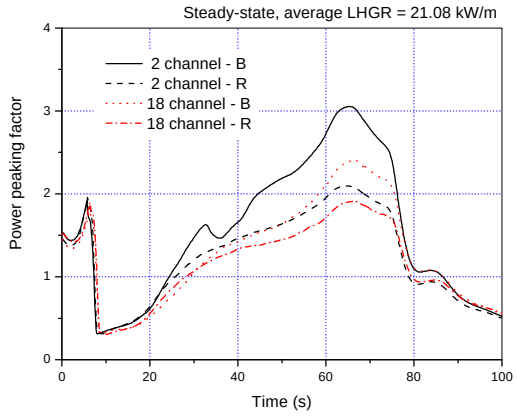
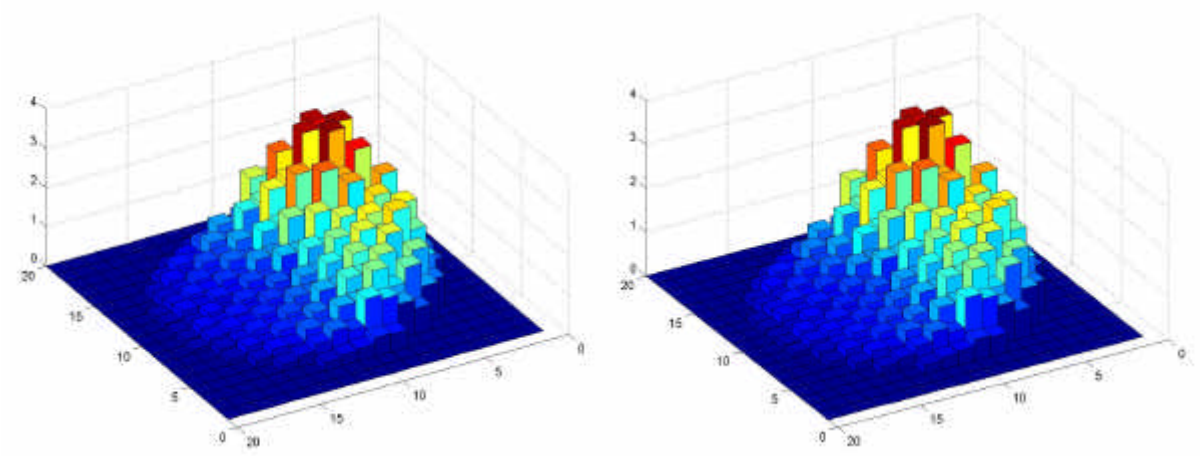


그림 16. Power peaking factor 거동 비교



(1) 파단후 66초의 1D "상세 계산" 결과 (2) 파단후 68초의 3D "상세 계산" 결과

그림 17. MARS 코드의 노심 횡 방향 출력분포(가장 높은 부분이 Stuck rod 위치).

표 2. MARS/MASTER 통합계산의 계산시간 비교 (MSLB Exercise III, “100 s” transient 계산)

Case	Core T/H model	No of time steps	CPU time (s)	
			Total	MASTER
1D 기본	2 channels, 6 vertical meshes.	12,623	461.7	125.1
1D 상세	2 channels, 6 vertical meshes, With COBRA-III/CP.	12,685	554.1	222.2
3D 기본	18 channels, 6 vertical meshes.	13,274	1589.3	136.8
3D 상세	18 channels, 6 vertical meshes, With COBRA-III/CP.	13,304	1713.2	241.3

㈜ 총 열수력 제어체적의 수: 1D 계산 - 208개, 3D 계산 - 534개.

4. 결론

본 연구에서는 “MARS 1D 모듈과 MASTER”의 연계통합을 수행하고, 통합코드의 성능을 기존의 MARS/MASTER와 비교/평가하였다. 연계통합의 건전성을 보기 위해 OECD NEA MSLB Benchmark Exercise III를 모의하였으며, 해석결과는 기존의 “MARS 3D 모듈과 MASTER”의 통합계산 결과와 비교-평가하였다. 이를 통해, 새로 개발된 “MARS 1D + MASTER” 통합계산 기능이 건전하게 작동하고 있으며, 1D 모듈 계산결과는 3D 모듈 계산결과와 유사성 및 일관성을 갖추고 있음을 보였다. 특히, “MARS 1D + MASTER” 통합계산 기능이 노심동특성 과도현상은 다차원적으로 진행되지만 계통 열수력은 일차원적 상태로 머무르는 사고의 통합계산에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 과제의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

Cho, B.O. al., "MASTER-2.0: Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," KAERI/TR-1211/99, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Jan. 1999.

Ivanov, K., Beam, T., and Baratta, A., “PWR MSLB Benchmark, Final Specifications,” NEA/NSC/DOC(97)15, OECD Nuclear Energy Agency, 1997.

Ivanov, K., Presentation Material for MSLB Exercise III Results Comparison, 4-th Workshop for OECD PWR MSLB Benchmark, Paris, France, Jan. 24 – 25, 2000.

Jeong, J.-J. et al., "Development of a Draft Version of MARS/MASTER; A Coupled Code of MARS 1.3 and MASTER 2.0,” *Proc. KNS ’98 Autumn Meeting*, Seoul, Korea, October 29-30, 1998.

Jeong, J.-J., Joo, H.G.. et al., “MARS/MASTER Solution to OECD Main Steam Line Break Benchmark

Exercise III", *J. Korean Nuclear Society,* vol. 32, no. 3, pp. 214-226 (2000).

Jeong, J.-J. et al., "MARS/MASTER Coupled System Calculation of the OECD MSLB Benchmark Exercise III with Refined Core Thermal-Hydraulic Nodalization," Proc. 9-th Intl. Conf. Nuclear Engineering (ICONE-9), Nice, France, April 8-12, 2001.

Joo, H. G.. et al., "Development and Verification of the MASTER Dynamic Link Library (DLL) for Integration into a System Thermal-Hydraulic Code, KAERI/TR-1174/98, KAERI (1998).

Joo, H. G. *et. al.,* "Analysis of OECD MSLB Benchmark Exercise II using the MASTER Code," *Proc. Int. Conf. Math. Comp. Reac. Phys. Env. Anal. Nucl. Appl.*, Madrid, Spain, Sept. 27-30, 1999.

Joo, H. G. et al., "Significance of Refined Core Thermal-Hydraulic Nodalization in the MSLB Analysis", 2001 ANS Annual Meeting, June 19, 2001.

Lee, W. J. *et. al., "*Development of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and its Verification," KAERI/TR-1108/98, KAERI, 1998.

Lee, W. J. *et. al., "*Improved Features of MARS 1.4 and Verification," KAERI/TR-1386/99, KAERI, 1999.