creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

선박용 원자로 열수력 해석을 위한 MARS-KS 동적운동모델 개선

Improvement of dynamic motion model in MARS-KS for marine reactor thermal-hydraulic analysis

2019년 2월

서울대학교 대학원

원자핵공학과

범 희 관

선박용 원자로 열수력 해석을 위한 MARS-KS 동적운동모델 개선

Improvement of dynamic motion model in MARS-KS for marine reactor thermal-hydraulic analysis

지도교수 조 형 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2019년 2월

서울대학교 대학원
원자핵공학과
범 희 관

범희관의 석사 학위논문을 인준함
2019년 2월

위 원 장 심 형 진 (인)

부위원장 조 형 규 (인)

위 원 김 수 형 (인)

초 록

선박용 원자로는 지상의 원자력발전소와는 다르게 해양 조건에 의해서 발생하는 외력의 영향을 받는다. 이러한 외력은 추가적인 가속도를 일으키고 선박용 원자로의 각 시스템 및 계통에 영향을 줄 수 있다. 따라서 선박용 원자로를 설계하고 안전성을 평가하기 위해서는 해양 조건에 의해 발생하는 효과를 고려 할 수 있는 열수력 안전해석 코드가 필요하다. 본 연구는 궁극적으로 선박용 원자로의 안전해석 코드를 이용한 실제적인 안전성 평가의 기반을 수립하고자 진행 되었다. 이를 위한 연구 목표로 안전해석코드인 MARS-KS의 동적운동모델을 확인, 검증하고 일부 문제점을 개선하였다. 원자로 시스템 해석 코드인 MARS는 동적운동모델을 포함하고 있으며, 이 모델은 운동량 방정식에 포함된 체적힘 항을 계산하여 MARS가 선박의 3차원 운동에서 나타나는 열수력 현상을 시뮬레이션 할 수 있도록 한다. 연구 목표 달성을 위해 크게 3가지 분야로 나누어서 연구를 진행하였다. 첫 번째는 MARS 동적운동모델에 대한 확인 및 검증이다. 우선 코드 내에 포함된 물리적 모델에 대해서 파악하였고, 동적운동모델이 해양조건에 따른 유체의 운동을 정확하게 모사할 수 있다는 것을 해석해를 통해 정량적으로 확인하였다. 그리고 열수력 시스템 해석의 검증을 위해 Murata의 횡요동 조건 단상 자연대류 실험에 대한 해석을 수행하였다. 두 번째는 동적운동모델에 대한 3가지 개선이다. 먼저 사용자입력옵션을 구현해서 실제 선박의 운동과 같은 불규칙한 운동을

모사 할 수 있도록 하였다. 다음으로 동적운동모델이 활성화 된 경우 매 시간 단계마다 체적의 경사 정보를 계산해서 유동양식 맵을 결정하는데 반영되도록 알고리즘을 개선했다. 마지막으로 교차유동을 구현하였다. 체적의 면 정보를 이용해 주 유동흐름의 1차원 방향뿐만 아니라 3차원 교차유동의 입력이 가능하도록 하였고, 강수부에 대한 안전해석에 활용될 수 있도록 하였다. 세 번째는 일체형 선박용 원자로를 탑재한 선박을 가정하고 동적운동모델을 적용해 보았다. 이를 위해 단상 자연대류 실험장치인 RTF(REX-10 Test Facility)를 이용하였다. 우선 RTF 정상상태에서 MARS의 해석능력을 검증하였고, 동적운동모델을 적용하기 위해 동적조건 상황을 시뮬레이션 해 보았다. 그리고 발생 가능한 해양 사고 상황 시 선박용 원자로 안전성을 평가할 수 있는 안전해석을 수행하였다.

주요어 : 선박용 원자로
시스템 해석코드
해양조건
동적운동모델
확인 및 검증
학 번 : 2017-27531

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구 범위 ····· 3

제 2 장 MARS 동적운동모델 확인 및 검증 ····· 5

제 1 절 물리적 모델 파악 ····· 6

제 2 절 개념문제를 통한 동적운동모델 확인 ····· 11

1. 마노미터 운동 ····· 11

2. 페쇄루프 회전 운동 ····· 14

3. 3차원 마노미터 횡요동 ····· 15

4. 수직파이프의 수직요동 ····· 16

제 3 절 Murata 실험을 통한 동적운동모델 검증 ····· 17

1. Murata 실험장치 구성 ····· 17

2. MARS 해석 결과 ····· 18

제 3 장 MARS 동적운동모델 개선 ····· 37

제 1 절 사용자입력옵션 구현 ····· 37

제 2 절 체적 경사정보 유동양식 맵 결정에 반영 ····· 41

제 3 절 교차유동(crossflow) 구현 ····· 45

제 4 장 RTF 테스트를 이용한 동적운동모델 적용 ····· 64

제 1 절 RTF(REX-10 Test Facility) 실험장치 ····· 65

제 2 절 MARS 해석 능력 검증 ····· 67

제 3 절 동적조건에서의 RTF 테스트 ····· 69
제 4 절 해양 사고 상황 시 RTF 해석 ····· 71

제 5 장 결론 ····· 81

용어설명 ····· 83
참고문헌 ····· 85
부록 1. 동적운동모델 입력파일 작성법 ····· 89
Abstract ····· 93
감사의 글

표 목 차

[표 2.1] MARS 동적운동모델 검증을 위한 개념문제 …… 22
[표 2.2] Murata 실험 경계조건 …… 22
[표 3.1] 사용자입력옵션 입력 형태 …… 48
[표 3.2] 경사변화에 따른 유동양식 변화 확인 결과 …… 48
[표 3.3] 유동양식 변화 검증 경계조건 …… 48
[표 4.1] RTF의 REX-10에 대한 척도비 …… 73
[표 4.2] RTF 정상상태 계산 결과 …… 73
[표 부.1] MARS 동적운동모델 사용자입력옵션 양식 …… 90
[표 부.2] MARS 동적운동모델 사인함수옵션 입력내용 ‥ 92

그 림 목 차

[그림 2.1] 선박의 6가지 자유도 운동 ····· 23
[그림 2.2] 각 축에 대한 회전 ····· 23
[그림 2.3] x축 회전에 의한 원심력과 접선력 ····· 24
[그림 2.4] MARS 계산을 위한 마노미터 노드화 ····· 25
[그림 2.5] 횡요동에 의한 수면 높이 계산 개념 ····· 26
[그림 2.6] 마노미터 횡요동에 대한 MARS 계산 결과 ···· 26
[그림 2.7] 병진운동에 의한 수면 높이 계산 개념 ····· 27
[그림 2.8] 병진운동에 대한 MARS 계산 결과 ····· 27
[그림 2.9] 복합운동에 대한 MARS 계산 결과 ····· 28
[그림 2.10] 폐쇄루프 횡요동에 대한 MARS 계산 결과 ····· 29
[그림 2.11] 3차원 마노미터의 횡요동 개념문제 ····· 30
[그림 2.12] 3차원 마노미터 횡요동 MARS 계산 결과 ····· 30
[그림 2.13] 수직요동에 대한 MARS 계산 결과 ····· 31
[그림 2.14] Murata 실험장치 ····· 32
[그림 2.15] MARS 계산을 위한 실험장치 노드화 ····· 32
[그림 2.16] 예비실험 1 계산 결과 ····· 33
[그림 2.17] 예비실험 2 계산 결과 (a) 실험, (b) MARS ····· 34

[그림 2.18] 주 실험 계산 결과 (a) 주기 5초,
(b) 주기 10초, (c) 주기 20초 ····· 35
[그림 3.1] 사용자입력옵션 검증 결과 ····· 49
[그림 3.2] 침수선박 시뮬레이션 결과 ····· 49
[그림 3.3] 사용자입력옵션을 이용한 MARS 계산 결과 ·· 50
[그림 3.4] 이상유동 개념문제 ····· 50
[그림 3.5] MARS 계산을 위한 모듈 구조 ····· 51
[그림 3.6] MARS 코드 내 동적운동모델 계산 절차 ····· 52
[그림 3.7] MARS 개선 결과 (a) 수평 → 수직,
(b) 수직 → 수평 ····· 53
[그림 3.8] 유동양식에 따른 MARS 개선 결과 ····· 54
[그림 3.9] 비등에서의 코드 개선 검증 결과
(a) void : 0.1, (b) Void : 0.5, (c) Void : 0.7
····· 54
[그림 3.10] 응축에서의 코드 개선 검증 결과
(a) Void : 0.4, (b) Void : 0.2, (c) Void : 0.0
····· 56
[그림 3.11] 교차유동(cross flow) 구현을 위한
유동흐름 ····· 58
[그림 3.12] 동적운동에 따른 교차유동 간 높이변화
발생 ····· 58
[그림 3.13] 교차유동 검증을 위한 2차원 개념문제 ····· 59
[그림 3.14] 2차원 교차유동 검증 결과

(a) 경사변화 (b) 횡요동 ····· 59
[그림 3.15] 교차유동 검증을 위한 3차원 개념문제 ····· 60
[그림 3.16] 코드 수정 전 계산 결과 ····· 61
[그림 3.17] 코드 수정 전 교차유동 연결 상태 ····· 61
[그림 3.18] 코드 수정 후 경사조건에서 3차원 교차유동
검증 결과 (a) x축, (b) y축 ····· 62
[그림 3.19] 코드 수정 후 요동에서 3차원 교차유동
검증 결과 (a) 횡요동, (b) 종요동 ····· 63
[그림 4.1] RTF (REX-10 Test Facility) ····· 74
[그림 4.2] RTF의 시스템 구성 ····· 75
[그림 4.3] RTF 시스템 노드화
(a) 1개 루프, (b) 2개 루프 ····· 76
[그림 4.4] RTF 정상상태 시뮬레이션 결과 비교 ····· 78
[그림 4.5] 경사조건에 대한 MARS 계산 결과 ····· 78
[그림 4.6] 횡요동 조건에 대한 MARS 계산 결과 ····· 79
[그림 4.7] 기상 불량 시 RTF 안전해석
(a) 횡요동, (b) 상하요동 ····· 80
[그림 4.8] 선박 전복 시 RTF 안전해석 ····· 80
[그림 부.1] motion.inp 파일 작성 예시 ····· 91

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

원자력의 해양이용은 미국, 러시아, 영국, 중국 등 주요 국가들을 포함하여 활발하게 진행되고 있다. 현재도 약 200여 기의 해양 원자로가 운용 중이고, 1950년대부터 2018년 현재까지 약 700여 기의 해양 원자로가 제작되었다 (World Nuclear Association, 2018). 과거에는 주로 핵추진 잠수함이나 핵추진 항공모함 등 군사적 이용이 대부분 이였으며, 그 외에 미국의 Savannah호, 독일의 Otto Hahn호, 일본의 Mutsu호 같은 원자력 상선을 건조하여 연구 및 경제성을 평가한 사례들이 있다. 하지만 미래에는 기술 발전과 해양 원전이 가지는 안전성 및 환경적 장점 등을 고려하여 그 활용성이 더욱 증가될 것으로 평가된다. 특히, 미국의 MIT에서 개념설계한 시추선 형태의 연안 부유식 원자력 발전소 (J. Buongiorno et al., 2016), 한국의 KAIST에서 개념설계한 부유식 원자력 발전소 (K. Lee et al., 2013)와 같은 최근의 연구 결과들은 환경보존과 안전성이라는 해양 원전이 가지는 장점을 잘 나타내 준다. 러시아에서는 선박용 원자로를 개발하여 운용 중에 있는데, 북극 탐사 및 물자 수송이 가능한 쇄빙선과, 극지방의 도서 지역 전력 공급에 활용될 수 있는 원자력 발전 선박 등을 개발하였다.

한편, 선박용 원자로나 부유식 원자로 같은 경우 해양 조건에 의해서 발생하는 파도나 조류, 선박 기동에 의한 외력의 영향을 받기 때문에 지상 원자로와는 다른 조건에서 작동하게 된다. 이런 외력은 원자로에 추가적인 가속도를 유발하고 원자로 각 시스템 및 기기들에 영향을 미치게 된다. 특히, 유체의 운동에 많은 영향을 주기 때문에 주요 열수력 변수들의 변화가 예상된다. 따라서 선박용 원자로의 성능 및 안전성을 평가하기 위해서는 이런 해양 조건의 특징을 반영할 수 있는 열수력 안전해석 코드가 필요하다.

본 연구에서는 안전해석 코드를 이용한 선박용 원자로의 실제적인 안전성 평가를 목적으로 하였다. 이를 위하여, MARS 동적운동 모델에 대한 검증 및 개선을 하였다. MARS-KS (이하 MARS) (J.J. Jeong et al., 1999)는 한국원자력연구원에서 시스템 해석 코드인 RELAP5/MOD3 (U.S. NRC, 1998) 및 부수로 해석에 사용되는 COBRA-TF (J.J. Jeong et al., 2010) 를 통합하여 만든 시스템 스케일의 열수력 코드로써 한국의 지상 원자력발전소 규제에 이용되고 있다. 또한 MARS 코드에는 선박용 원자로를 시뮬레이션하기 위한 해양 환경을 모사하는 동적운동모델이 포함되어 있다. 그러나 동적운동모델은 코드 유지 관리 프로그램에 따라 관리되지 않았고, 관련된 체계적인 확인 및 검증에 대해서 발표된 연구 실적은 없었다. 따라서 본 연구에서는 MARS 동적운동모델에 대한 검증 및 개선을 수행했다.

제 2 절 연구범위

MARS 동적운동모델 검증 및 개선이라는 연구 목표를 달성하기 위해 3가지 분야로 나누어서 연구를 진행하였다. 첫 번째는 MARS 동적 운동모델에 대한 확인 및 검증이다. 코드 내에 포함된 물리적 모델을 파악하였고, 해양 조건에 의해 발생하는 3차원 운동이 MARS 코드의 운동량 방정식에 포함된 체적힘에 반영되는 것을 확인했다. 그리고 개념문제 검증을 통해 동적운동모델이 해양조건에 따른 유체의 운동을 합리적인 정확성을 가지고 모사할 수 있다는 것을 정량적으로 확인하였다. 그리고 동적운동모델에 대한 원자로 시스템 열수력 해석의 검증을 위하여 Murata의 횡요동 조건에서의 단상 자연대류 실험에 대한 해석을 하였다. 그 결과 MARS 동적운동모델의 유효성을 검증하였고, 실험 결과에서 나타난 유량 진동의 진폭은 횡요동 관성력에 주 영향을 받는다는 경향성을 코드에서도 동일하게 확인 하였다.

두 번째는 동적운동모델에 대한 3가지 개선이다. 먼저 사용자입력옵션을 구현해서 MARS가 실제 선박의 운동과 같은 불규칙한 운동을 시뮬레이션 할 수 있게 하였다. 그리고 해당 옵션을 적용하여 사고 상황으로 침몰하는 선박의 불규칙한 경사변화를 코드 내에서 시뮬레이션해 보았다. 침몰에 따른 불규칙한 경사변화는 조선공학 분야에서 사용하는 소프트웨어에서 제공되는 데이터를 이용하였고, 이를 이용해 사용자입력옵션 입력 자료를 작성 하여 해석을 수행하였다. 다음 개선사항으로는 동적운동모델이 활성화

된 경우에 매 시간 단계마다 체적의 경사 정보를 계산해서 유동양식 맵을 결정하는데 반영되도록 알고리즘을 개선한 것이다. 이상유동의 기포율과 압력은 MARS내의 수평 및 수직관 유동양식에 따라 다르게 나타날 수 있는데, 코드 개선 후에는 동적운동에 따라 체적 경사 변화가 발생해도 경사에 따라 수평 및 수직관 중 올바른 유동양식 맵이 선택되도록 개선되었다. 마지막 개선으로 동적운동모델 내에서 교차유동을 구현하였다. 기존 코드에서는 동적운동모델에 교차유동을 구현할 수 있는 내용이 포함되어 있지 않았기 때문에 이를 추가하였다. 체적의 면 정보를 이용해 주 유동 흐름의 1차원 방향뿐만 아니라 3차원 교차유동이 구현될 수 있도록 하였다. 또한 동적운동 시 발생하는 두 체적 간의 경사정보를 계산할 수 있는 절차를 추가하였고, 이 결과는 강수부에 대한 안전해석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

세 번째는 단상 자연대류 실험장치인 RTF(REX-10 Test Facility)에 대한 검증 및 응용 계산을 수행 하였다. 우선 MARS에 대한 검증을 위해 RTF 정상상태에 대한 해석을 하였고, 경사 및 횡요동 상황과 같은 동적조건에 대해 동적운동모델을 적용해 보았다. 그리고 일체형 선박용 원자로를 탑재한 선박을 가정하고, 기상 불량이나 선박 좌초와 같은 발생 가능한 해양 사고 상황 시 원자로 안전성을 평가할 수 있는 안전해석을 수행하였다.

제 2 장 MARS 동적운동모델 확인 및 검증

MARS의 동적운동모델은 개발된 이후 이와 관련된 검증 및 연구 실적이 발표된 적은 없다. 따라서 우선 MARS 동적운동모델에 대한 확인 및 검증을 하였다.

일반적으로 코드 개발의 품질 및 신뢰성 향상은 확인(verification)과 검증(validation) 단계를 거치는데, 코드 확인 작업은 코드의 요구사항 및 설계의 적정성을 평가하는 과정으로 단계별 산출물 간의 일치성을 확인하는 과정이다. 그리고 코드 검증 작업은 코드가 지정된 기능을 정확히 수행하는가 여부를 밝히는 과정으로 사용자의 요구사항이 충족되었음을 시험을 통해 객관적으로 검증하는 과정이다 (IEEE, 1998).

따라서 제2장에서는 MARS 동적운동모델에 대해 우선 코드 내에 포함된 물리적 모델에 대해서 파악하고, 동적운동모델이 선박의 동적조건에 의해서 발생하는 유체의 운동을 적절하게 시뮬레이션 할 수 있는지를 해석해와 결과를 정량적으로 비교할 수 있는 개념문제를 통해서 확인(verification)하였다. 다음으로 Murata의 단상 자연대류 실험장치에서 횡요동 영향을 평가하는 실험을 MARS 동적운동모델을 이용해 시뮬레이션 해서 결과를 비교하는 검증(validation)을 수행하였다.

제 1 절 물리적 모델 파악

조류나 파도, 선박의 기동에 의해서 발생하는 해양에서의 선박의 3차원 움직임은 6개의 자유도를 갖는 운동으로 표현할 수 있다. 그림 2.1에서와 같이 6자유도 운동은 3개의 병진운동과 3개의 회전운동으로 구분된다. x축은 선박의 선수 방향에서 선미 방향으로 연장되는 축을 지칭하고, y축은 x축과 수직으로 선박의 횡방향으로 연장된 선이다. z축은 선박의 회전 중심에서 수직으로 상승하는 축이다. 각 운동에 대한 용어는 다음과 같다.

- 전후요동(surging) : x축을 따라 움직이는 평행 운동
- 좌우요동(swaying) : y축을 따라 움직이는 평행 운동
- 상하요동(heaving) : z축을 따라 움직이는 평행 운동
- 횡요동(rolling) : x축을 중심으로 회전하는 운동
- 종요동(pitching) : y축을 중심으로 회전하는 운동
- 선수요동(yawing) : z축을 중심으로 회전하는 운동

위의 6개의 운동과 중력에 의해 모사되는 선박의 움직임은 각 축에 대한 가속도 형태로 나타난다. 가속도 성분은 분류하면, 각 축의 병진 운동으로 발생하는 3개의 직선 가속도, 각 축의 회전 운동으로 발생하는 접선력과 원심력, 그리고 중력에 의한 가속도

가 있다. 이 가속도들을 합해서 구하게 되는 최종 가속도는 체적힘 가속도로 변환되고, 질량보존, 에너지보존, 운동량보존과 같은 기본 장 방정식 중 운동량보존 방정식에 반영된다. 체적힘(B_x)이 반영된 MARS의 운동량 방정식은 아래 식 (2.1)과 같다.

$$\alpha_g\rho_g\frac{\partial v_g}{\partial t}+\alpha_f\rho_f\frac{\partial v_f}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_g\rho_g\frac{\partial v_g^2}{\partial x}+\frac{1}{2}\alpha_f\rho_f\frac{\partial v_f^2}{\partial x}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho_m B_x \\ -\alpha_g\rho_g FWG v_g-\alpha_f\rho_f FWF v_f-\Gamma_g(v_g-v_f) \tag{2.1}$$

한편, 외력의 수학적 계산을 위해 좌표 변환을 고려하여야 한다. 3차원 운동에 의한 선박의 운동을 나타내기 위해서 MARS에서는 오른손 좌표계를 사용하는데, 축에 대한 양의 회전은 원점을 향한 축의 양의 방향에서 보았을 때 반시계 방향이다. 3축에 대한 회전은 그림 2.2와 같다. x, y, z 각 축에 대한 회전을 나타내는 아래 식 (2.2−4)를 곱해서 전체 회전 행렬을 구할 수 있다.

− x축으로 회전(θ_x), 식 (2.2)

$$[M_x]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x\\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x\end{bmatrix} \tag{2.2}$$

- y축으로 회전(θ_y), 식 (2.3)

$$[M_y] = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

- z축으로 회전(θ_z), 식 (2.4)

$$[M_z] = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

따라서 x-y-z 순서로 회전 된 시스템의 전체 회전 행렬은 최종적으로 다음 식 (2.5)와 같다.

$$[M_t] = [M_z][M_y][M_x] \tag{2.5}$$

이 전체 회전 행렬은 주어진 원점에서 각 축을 중심으로 회전한 모든 점의 최종 벡터 위치를 얻는데 사용한다. 또한, 회전에 의해서 각 축에서 각각 원심력과 접선력이 발생한다. 그림 2.3은 그 중 x축에 대한 회전으로 발생한 원심력과 접선력을 나타내고 있고 아래 식 (2.6-11)은 x, y, z 각 축에 대한 접선력과 원심력을 모두 나타낸다.

- x축으로 회전, 식 (2.6-7)

구심 가속도 (Centrifugal acceleration)

$$\omega_{cx} = w_x^2(P_y\underline{j} + P_z\underline{k}) = w_x^2 r_x(\cos\theta_x\underline{j} + \sin\theta_x\underline{k}) \quad (2.6)$$

접선 가속도 (Tangential acceleration)

$$\omega_{Tx} = w_{ax}(-P_z\underline{j} + P_y\underline{k}) = w_{ax} r_x(-\sin\theta_x\underline{j} + \cos\theta_x\underline{k}) \quad (2.7)$$

- y축으로 회전, 식 (2.8-9)

구심 가속도 (Centrifugal acceleration)

$$\omega_{cy} = w_y^2(P_z\underline{k} + P_x\underline{i}) = w_y^2 r_z(\cos\theta_y\underline{k} + \sin\theta_y\underline{i}) \quad (2.8)$$

접선 가속도 (Tangential acceleration)

$$\omega_{Ty} = w_{ay}(-P_x\underline{k} + P_z\underline{i}) = w_{ay} r_y(-\sin\theta_y\underline{k} + \cos\theta_y\underline{i}) \quad (2.9)$$

- z축으로 회전, 식 (2.10-11)

구심 가속도 (Centrifugal acceleration)

$$\omega_{cz} = w_z^2(P_x\underline{i} + P_y\underline{i}) = w_z^2 r_z(\cos\theta_z\underline{i} + \sin\theta_z\underline{j}) \quad (2.10)$$

접선 가속도 (Tangential acceleration)

$$\omega_{Tz} = w_{az}(-P_y\underline{i} + P_x\underline{j}) = w_{az} r_z(-\sin\theta_z\underline{i} + \cos\theta_z\underline{j}) \quad (2.11)$$

위 식에서 얻어진 각 축의 구심 및 접선 가속도와 각 축의 병진 가속도 및 중력 가속도를 더해주면 식 (2.12)와 같이 전체 가속도를 구할 수 있고 위의 식 (2.1)의 체적힘 항에 반영된다.

$$
\begin{aligned}
&\underline{a}_{net} = g\underline{k} && \text{중력}\\
&+ \underline{a}_{ref} && \text{선형 가속도}\\
&+ \omega_x^2 \sqrt{(P_y^2+P_z^2)}\ (P_y\underline{j}+P_z\underline{k})^{new} / \sqrt{(P_y^2+P_z^2)} && \text{x축(구심)}\\
&+ \omega_y^2 \sqrt{(P_x^2+P_z^2)}\ (P_x\underline{i}+P_z\underline{k})^{new} / \sqrt{(P_x^2+P_z^2)} && \text{y축(구심)}\\
&+ \omega_z^2 \sqrt{(P_x^2+P_y^2)}\ (P_x\underline{i}+P_y\underline{j})^{new} / \sqrt{(P_x^2+P_y^2)} && \text{z축(구심)}\\
&+ \omega_{ax} \sqrt{(P_y^2+P_z^2)}\ (-P_z\underline{j}+P_y\underline{k})^{new} / \sqrt{(P_y^2+P_z^2)} && \text{x축(접선)}\\
&+ \omega_{ay} \sqrt{(P_x^2+P_z^2)}\ (P_z\underline{i}-P_x\underline{k})^{new} / \sqrt{(P_x^2+P_z^2)} && \text{y축(접선)}\\
&+ \omega_{az} \sqrt{(P_x^2+P_y^2)}\ (P_y\underline{i}-P_x\underline{j})^{new} / \sqrt{(P_x^2+P_y^2)} && \text{z축(접선)}
\end{aligned}
\qquad (2.12)
$$

제 2 절 개념문제를 통한 동적운동모델 확인

지금까지 MARS 내에 포함된 동적운동모델에 대한 물리적 모델에 대해서 살펴보았다. 이번 절에서는 MARS 동적운동모델이 동적조건에 의해 발생하는 유체의 운동을 합리적인 정확도를 가지고 모사할 수 있는지 개념문제를 통해 확인하였다. 개념문제는 해양조건에서 발생 할 수 있는 6자유도 운동과 관련된 회전운동과 병진운동을 모두 고려하였다. 특히, 선박용 원자로의 안전에 직접 영향을 미칠 수 있는 횡요동과 수직요동이 포함되는 6가지 개념문제를 선정하였다. 개념문제는 해석해와의 비교를 통해 정량적으로 검증하였다. 한편 해석해와 비교를 위해 MARS 계산 시 벽면 마찰과 에너지 손실은 없는 것으로 가정하였다. 개념문제의 세부 경계조건은 표 2.1과 같다.

1. 마노미터 운동

먼저 횡요동과 병진운동에서 해석해를 비교적 간단하게 얻을 수 있는 마노미터를 이용하여 검증을 수행하였다. 이 문제를 이용하면 운동 조건에서 변화하는 중력을 정확하게 계산할 수 있는데 이러한 마노미터의 운동은 원자로 사고 상황 시 비상 냉각수가 강수부에 축적되고 중력수두에 의해 유량이 원자로 노심에 제공되는 현상과 관련이 있다. 마노미터를 이용하여 횡요동과 병진운동을

고려한 3가지 개념문제를 선정하였다. MARS 계산을 위한 마노미터의 노드화는 그림 2.4와 같고 기하학적인 구조와 운동 조건은 표 2.1에 명시하였다. 마노미터의 압력은 대기압이고, 물의 온도는 50 ℃이다.

가. Case 1 : 마노미터의 횡요동

가속도를 무시할 수 있을 정도로 횡요동의 속도가 충분히 작아졌을 경우 마노미터의 자유표면은 일정하게 유지되고 각 파이프에서 물의 높이는 횡요동에 의해 변화하게 된다. 횡요동에 의해 왼쪽과 오른쪽 파이프 물의 높이 변화에 대한 해석해를 구한 후 MARS 계산 결과와 비교하였다. 마노미터 횡요동 운동의 진폭과 주기는 각각 45° 와 600 초이다. 이렇게 매우 느린 주기의 운동을 주었을 때 횡요동에 의해 발생하는 원심력과 접선력의 크기는 무시할 수 있을 정도로 작아진다.

그림 2.5에서 보듯이 횡요동 중 회전 참조점을 기준으로 연결한 수위선을 유지하면서 마노미터의 양쪽 파이프 수위가 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 해석해는 일정한 수위선과 변화하는 마노미터 양쪽 파이프의 수위를 비교해서 구할 수 있다. MARS 계산 결과는 그림 2.6과 같다. 횡요동의 최대 진폭이 되는 150 초와 450 초에 마노미터 양쪽 파이프에서 가장 큰 수위 차가 발생했는데, MARS 계산 결과와 해석해는 ±0.011 m(0.22%)의 오차를 보이며 잘 일치하는 것을 확인하였다.

나. Case 2 : 마노미터의 병진운동

마노미터의 수평 방향으로 일정한 가속도가 작용한다면 마노미터의 양쪽 파이프 수위는 그림 2.7과 같은 일정한 높이차가 발생하게 된다. 높이차에 대한 해석해는 힘 평형 계산을 통해서 구할 수 있다. 가속도를 각 축으로 나눠서 아래와 같이 평형 방정식에 대입하면 해석해를 구할 수 있다 (F.M. White, 2011).

가속도 : $a_x = 0,\ a_y = -a_T,\ a_z = -g,$ (2.13)

평형 방정식 : $a_x dx + a_y dy + a_z dz = 0,$ (2.14)

높이차 : $z = -\dfrac{a_y}{a_z} y$ (2.15)

수평 가속도가 10 m/s^{2}인 경우 MARS 계산 결과는 그림 2.8과 같다. 처음 수평 가속도가 부여되고 운동이 시작할 때 물의 관성에 의한 진동이 나타난다. 20 초 후 진동이 감소하면서 마노미터의 양쪽 파이프 수위의 높이차는 일정하게 유지된다. MARS 계산 결과는 해석해와 0.6% 이내의 차이로 현상을 정확하게 예측하였다.

다. Case 3 : 마노미터의 복합운동

앞서 두 개념문제를 통해 MARS가 횡요동 및 병진운동에 대해 유체의 운동을 합리적인 정확도로 모사할 수 있음을 확인하였다.

하지만 실제 해양 조건에서는 조류와 파도의 영향으로 횡요동과 병진운동이 동시에 발생한다. 따라서 이러한 복합운동을 시뮬레이션 할 수 있는 능력은 선박용 원자로 열수력 해석에 있어서 중요하다. 복합운동에 대한 해석해는 이전 두 개념문제의 해석해를 얻는 절차를 중첩해서 구할 수 있다. 병진운동에 의해 발생하는 양쪽 파이프의 수위의 높이차에 회전 운동에 의해 발생하는 수위 변화를 더해주면 된다. 복합운동의 경계조건은 표 2.1과 같다. 직선 가속도는 10 m/s^2이고, 횡요동의 진폭은 10 °, 주기는 600 초이다. MARS 계산 결과 그림 2.9와 같이 해석해와 오차는 0.06 ~ 2.92%의 오차가 발생했다. 결과적으로 MARS는 회전운동과 병진운동이 복합된 운동에 대해서 유체의 운동을 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

2. 페쇄루프 회전 운동

페쇄루프 회전 운동 개념문제는 MARS가 진폭이 180°, 즉 루프가 완전히 전복되는 급격한 횡요동에서도 상분리 및 수위 변화를 모사할 수 있는지 확인하기 위해 선택하였다. 이 페쇄루프의 구조 및 운동 조건은 표 2.1과 같다. 4개의 길이 1 m 파이프가 페쇄루프를 구성하였고, 압력은 대기압, 물의 온도는 50 ℃이다. 수위 변화는 마노미터와 동일하게 각 체적의 시간에 따른 액체분율(liquid fraction)을 통해서 확인하였다. 그림 2.10에서 보듯이 페쇄루프의 수위는 예측대로 일정한 수위선을 유지하였으며, MARS가 회전 운동에 의해 발생하는 루프 내 유체의 운동을 모사

할 수 있음을 확인하였다.

3. 3차원 마노미터 횡요동

MARS는 1차원 해석 코드이지만, 동적운동모델의 입력 파일에서는 참조점을 기준으로 체적에 대한 3차원적인 상대위치 입력이 가능하다. 따라서 동적운동모델이 3차원 형상에 대한 유체의 운동을 모사할 수 있는지 확인하기 위하여 그림 2.11과 같이 3차원 마노미터의 횡요동 개념문제를 선정하였다. 각 파이프의 길이는 1 m이고, 밑변에 사각형을 이루는 4개의 파이프를 연결하고, 밑변 각 파이프의 중심에 수직 방향으로 4개의 파이프를 연결하는 3차원 마노미터 형상을 만들었다. 밑변의 각 파이프에는 물을 가득 채우고 수직 파이프에는 절반의 물을 채웠다. 압력은 대기압, 물의 온도는 50 ℃이다. 3차원 마노미터는 회전 참조점을 지나는 x축을 기준으로 횡요동을 하게 된다. 따라서 x축 위에 위치한 앞쪽과 뒤쪽 파이프는 횡요동에 대한 영향을 받지 않고 수위 변화가 없어야 한다. 반면 좌, 우에 위치한 파이프는 앞서 검증한 2차원 마노미터의 경우와 동일하게 횡요동에 따라 수위가 변하게 된다. 그림 2.12는 MARS 계산 결과로써 3차원 마노미터의 각 파이프에서 발생하는 시간에 따른 수위 변화를 나타낸 것이다. 해석해와 비교 결과 최대 오차는 x축에 위치한 파이프 0.02 m(4.04%), y축에 위치한 파이프 0.015 m(2.92%)로 3차원 형상에 대해서도 MARS 동적운동모델이 유체의 운동을 비교적 정확하게 모사하는 것을 확인하였다.

4. 수직파이프의 수직요동

MARS 동적운동모델을 이용하여 수직요동에 대한 개념문제를 해석하였다. 이 수직파이프의 압력은 대기압이고 구조 및 운동 조건은 표 2.1과 같다. 수직파이프에 단상의 물 유량을 1 kg/s로 일정하게 흐르도록 하였다. 그리고 중력 가속도와 같은 9.8 m/s^{2}의 가속도를 가진 수직요동을 z축 방향으로 주었다. 10 m의 수직파이프는 0.2 m로 구성된 50개의 노드로 나뉘도록 MARS 입력을 만들었으며, 이 상태에서 수직파이프 입구(1번 노드)에서의 압력 변화 값에 대해서 해석해와 MARS 계산 결과를 비교하였다. 수직요동으로 인한 가속도 변화는 사인함수의 형태이기 때문에 수직파이프 입구에서의 압력변화에 대한 해석해를 구하는 식은 아래와 같다.

$$P = P_a + [\rho \cdot h \cdot (g - a_z \cdot \sin\frac{2\pi t}{T})] \qquad (2.16)$$

수직파이프 입구에서의 압력 변화에 대한 MARS 코드의 계산 결과는 그림 2.13과 같다. 수직파이프가 상승함에 따라 입구 압력이 감소하고 수직파이프가 하강함에 따라 입구 압력 값이 증가한다. 해석해와 비교 결과 오차는 0.5% 이내로 발생했으며, MARS가 수직요동을 비교적 정확하게 모사할 수 있음을 확인하였다.

제 3 절 Murata 실험을 통한 동적운동모델 검증

지금까지 MARS 동적운동모델에 대해서 물리적 모델을 파악하였고 개념문제를 통해 유체의 운동을 합리적인 정확성을 가지고 모사할 수 있다는 것을 확인하였다. 이번에는 MARS 동적운동모델에 대한 시스템 스케일 해석 능력을 검증(validation)하기 위해 횡요동 조건에서 수행한 자연대류 실험 결과에 대한 해석을 수행하였다.

1. Murata 실험장치 구성

Murata의 실험 (H. Murata et al., 1990)은 일본에서 개념설계한 330 MWt급 일체형 원자로인 NSR-7을 기준으로 제작된 실험장치를 이용한 것으로 횡요동에 의해 발생하는 자연대류 선박용 원자로의 거동을 해석하기 위한 실험이다.

실험장치 구성은 그림 2.14과 같다. 장치는 노심, 증기발생기, 연결 파이프(고온관 및 저온관)로 구성되어 있다. 참고 노형인 NSR-7에 대한 엄격한 척도법이 적용되지는 않았지만, 자연대류를 이용한 냉각재 순환방식이기 때문에 실험장치의 노심 및 증기발생기 등 주요구성 계통의 높이는 NSR-7과 동일하게 제작 되었다. 실험장치의 작동 압력은 대기압이고, 증기발생기는 원통다관식(shell-and-tube type) 형상이고, 구성된 6줄의 열교환 튜브의 지름은 34 mm이다. 노심은 지름 10.5 mm, 높이 1500 mm의

120개 히터 봉으로 구성되어 있고 각 연결 파이프의 지름은 54.9 mm 이다.

2. MARS 해석 결과

Murata의 실험에서는 단상 자연대류에서 횡요동이 유량에 미치는 영향을 확인하려고 하였다. 시험의 경계 조건은 표 2.2과 같다. 먼저 2개의 예비실험을 하였고 이후 주 실험을 하였다. 예비실험 1은 횡요동이 없는 상황에서 히터 출력를 40 kW와 60 kW로 변경시키면서 자연대류 유량을 확인하였다. 예비실험 2는 히터 출력이 없는 상태에서 횡요동에 의해서만 발생하는 유량을 확인하였다. 주 실험에서는 예비실험과 동일한 60 kW의 히터 출력에서 발생하는 자연대류 효과와 횡요동에 의해서 발생하는 효과를 더해서 유량에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 동일한 조건에서 횡요동의 주기를 5 초, 10 초, 20 초로 변경시키면서 횡요동 주기에 따른 영향도 평가하였다.

실험 장치를 해석하기 위한 MARS 노드화는 그림 2.15와 같다. 냉각재는 노심에서 상승관을 통해 올라가고 이후 2개의 고온관을 통해 증기발생기로 들어간다. 증기발생기를 통해 나온 냉각재는 다시 2개의 저온관으로 나누어지고 이 저온관은 노심 하부로 연결된다. 특히, 각 고온관과 저온관의 유량 비교를 용이하게 하기 위해서 정면을 기준으로 좌측은 A, 우측은 B로 구분하였다.

본격적으로 예비실험 및 주 실험에 대한 해석을 하기 전 MARS

코드를 이용해 노드화 하는 과정에서 실험 결과를 잘 예측할 수 있도록 하기 위해서는 고려해야 될 사항들이 있다. 먼저 실험장치 형상에 의해 발생하는 손실 계수(form loss)를 MARS 입력 파일에서 작성해야 한다. 이 값은 동일한 NSR-7을 대상으로 한 실험에서 (I. Iyori et al., 1987) 얻을 수 있었다. 노심에서는 27.1, 고온관에서는 3.6, 저온관에서는 2.1의 형상 손실 계수를 입력하였다. 다음으로 실험 장치 전체에서의 물의 양을 코드 계산 시에도 동일하게 입력하는 것이 중요하다. 특히 실험 장치의 증기발생기는 원통다관식 형상이고, 6줄의 열교환 튜브가 11번 굴절하여 증기발생기 내에 위치하고 있기 때문에 열교환 튜브의 부피를 계산하고, 이 값에 해당되는 값 만큼 증기발생기의 부피를 감소시켜야 한다. 마찬가지로 노심에도 120개의 히터봉으로 구성되어 있기 때문에 이에 대한 부피를 고려해줘서 실제 실험장치와 동일한 조건에서 계산이 될 수 있도록 하였다.

예비실험 1의 결과는 그림 2.16과 같다. 본 실험은 1990년에 수행된 실험으로 실험 결과에 대한 데이터는 확보하지 못했기 때문에 논문상에 명시된 그래프들에서 결과 값을 계산하였다. 특히 예비실험 1의 경우 많은 실험을 하였고 히터 출력에 따라 얻어지는 값들을 평균화 하여 아래와 같은 히터 출력에 따른 유량을 산출할 수 있는 식을 만들었다.

$$w_{core} = 172.7 Q_{SCR}^{0.54} \qquad (2.17)$$

실험 결과 히터 출력 40 kW시 노심에서의 유량은 1260 kg/h, 60 kW시 노심에서의 유량은 1548 kg/h였으며, 이들 값들을 MARS가 잘 예측함을 확인하였다. 예비실험 2의 결과는 그림 2.17과 같다. 예비실험 2는 자연대류가 없는 경우 횡요동에 의해서만 발생하는 유량을 확인한 것이다. 그 결과 횡요동이 발생하면 노심에서는 유량이 거의 없고, 상·하에 위치한 연결된 2개의 관에서는 200 kg/h의 유량이 발생하고 횡요동 주기에 따라 유량 진동이 발생하는 것을 확인했다. 실험 값과 MARS 계산 결과가 200 kg/h로 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 실험에서는 실험 시작 후 횡요동이 발생하면서 주기와는 다르게 유량 진동의 위상 차이가 발생하였지만 MARS 계산에서 발생하는 유량 차이와 일치 하지 않았다. 그 이유는 실험 결과를 나타내는 그래프는 여러 실험 결과를 평균한 결과일 뿐만 아니라, 또한 실험에서 횡요동이 시작되면서 일정한 유량 진동이 발생하기까지의 과도 상태는 MARS에서 동일하게 모사하지 않기 때문으로 보인다.

주 실험의 결과는 그림 2.18과 같다. 실험에서는 동일한 자연대류 조건에서 횡요동 주기를 변경시키면서 횡요동 주기의 영향을 확인하고자 하였다. 그 결과 횡요동 주기가 짧아질수록 유량 진동의 진폭이 커지는 것을 알 수 있었다. 이것은 유량 진동의 진폭을 결정하는데 있어서 횡요동에 의해 발생하는 관성력이 주 원인임을 의미한다. 만약 횡요동에 의한 관성력의 영향이 작다면 유량은 횡요동 주기에는 영향을 받지 않고, 횡요동 진폭에만 영향을 받아야

하기 때문이다. MARS 계산 결과도 주 실험의 결과와 같은 경향을 나타낸다. 하지만 횡요동 주기 3가지 모두 실험 값과 MARS 계산 결과의 유량이 동일한 값을 나타내지는 않는다. 특히, 실험 값에서는 노심의 유량 진동이 거의 없지만 MARS 계산 결과에서는 노심의 유량 진동이 발생한다. 이는 횡요동에 의해 연결 파이프에서 발생하는 유량 진동의 진폭이 유량이 높아지는 쪽과 낮아지는 쪽이 일치하지 않음을 의미한다. 즉, 이러한 MARS 계산 결과는 횡요동에 의해 유량이 많아진 쪽 연결 파이프 보다 유량이 낮아진 쪽 연결 파이프에서 더 많이 낮아졌기 때문으로 풀이된다.

표 2.1 MARS 동적운동모델 검증을 위한 개념문제

구 분	문제 1	문제 2	문제 3
	마노미터		
길이	10 m (5 m 물)		
간격	4.5 m		
지름	0.254 m		
운동 조건	횡요동 – 45˚, 600 s	직선가속 – 10 m/s^2	직선가속 – 10 m/s^2 횡요동 – 10˚, 600 s
구 분	문제 4	문제 5	문제 6
	폐쇄루프	3차원 마노미터	수직파이프
길이	1 m (0.5 m 물)	1 m (0.5 m 물)	10 m (10 m 물)
간격	1 m	1.1 m	–
지름	0.254 m	0.0254 m	0.254 m
운동 조건	횡요동 – 180˚, 200 s	횡요동 – 30˚, 600 s	수직요동 – 9.8 m/s^2, 100 s

표 2.2 Murata 실험 경계조건

구 분	횡요동 조건	히터 출력	이차계통 유량
예비실험 1	–	40, 60 kW	2, 3, 4 m^3/h
예비실험 2	진폭 : 22.5 ˚ 주기 :5, 10, 20 초	0 kW	0 m^3/h
주 실험		60 kW	2, 3, 4 m^3/h

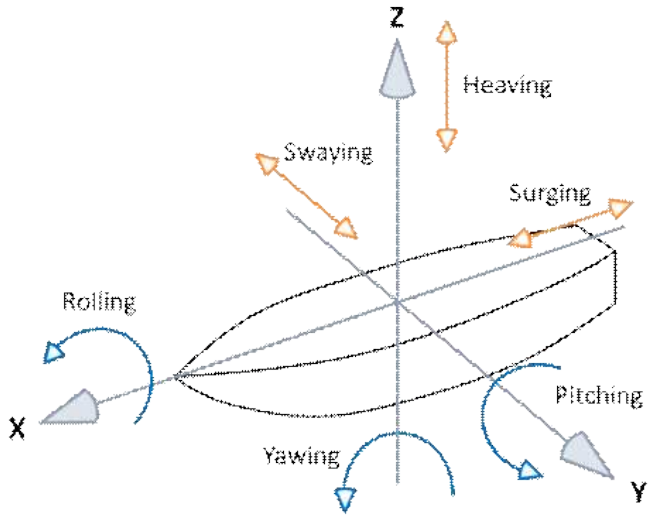


그림 2.1 선박의 6가지 자유도 운동

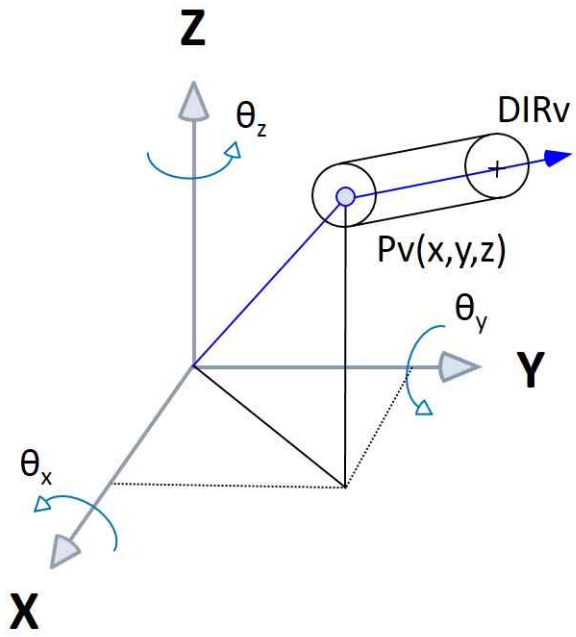


그림 2.2 각 축에 대한 회전

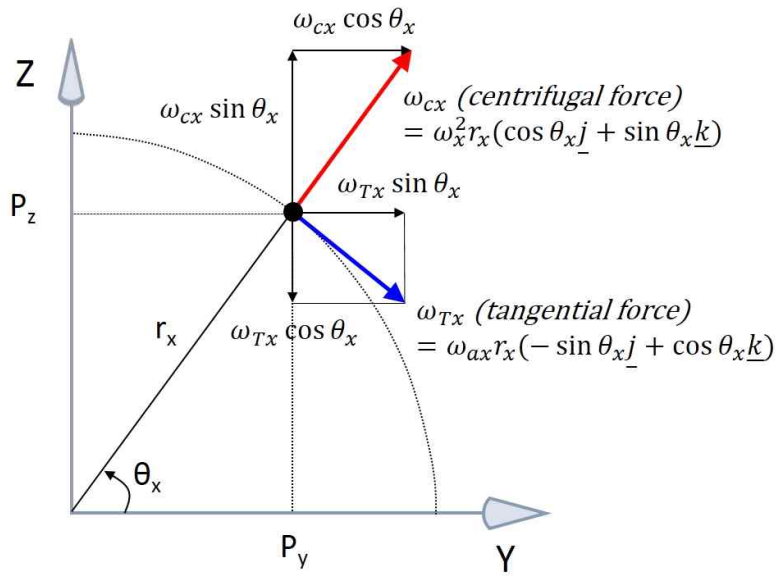


그림 2.3 x축 회전에 의한 원심력과 접선력

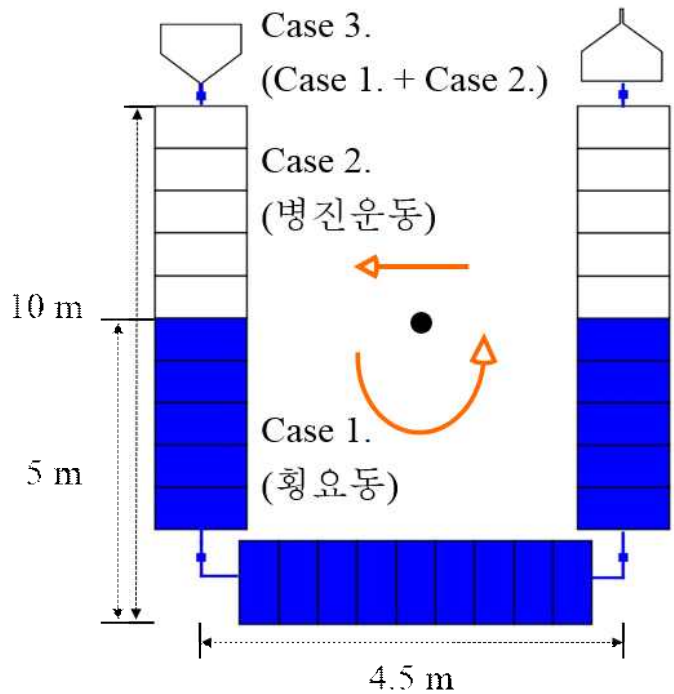


그림 2.4 MARS 계산을 위한 마노미터 노드화

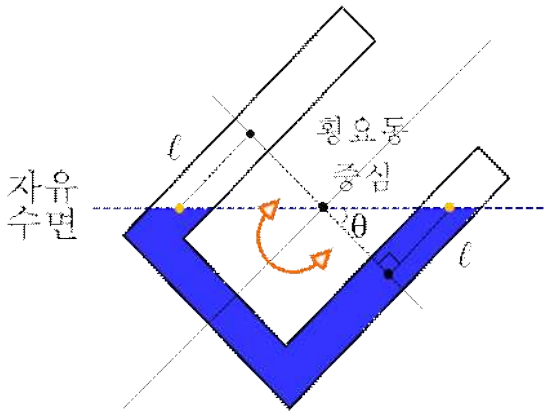


그림 2.5 횡요동에 의한 수면 높이 계산 개념

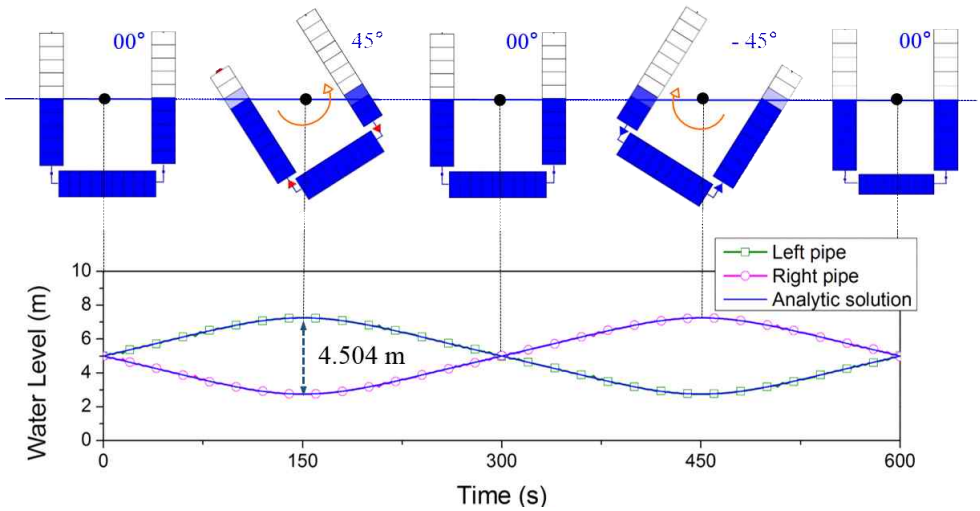


그림 2.6 마노미터 횡요동에 대한 MARS 계산 결과

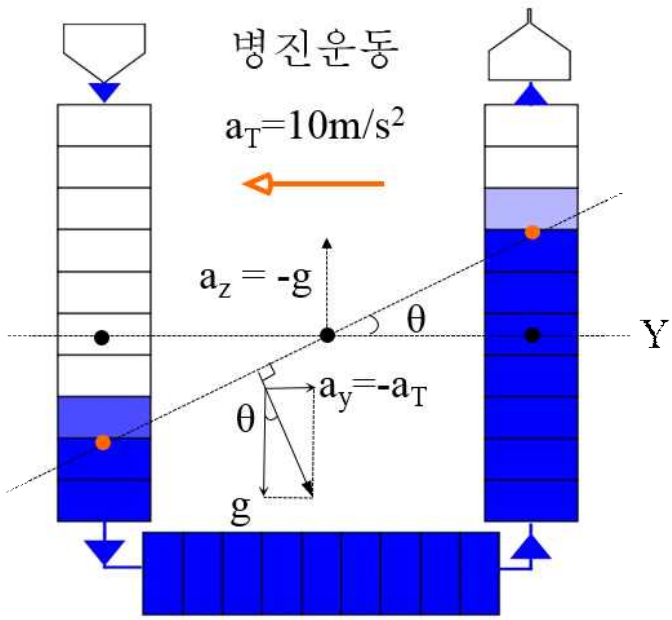


그림 2.7 병진운동에 의한 수면 높이 계산 개념

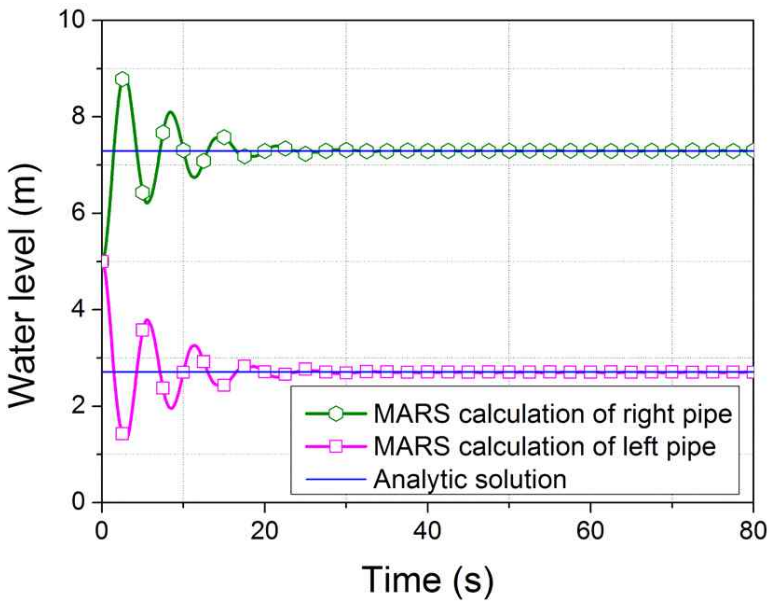


그림 2.8 병진운동에 대한 MARS 계산 결과

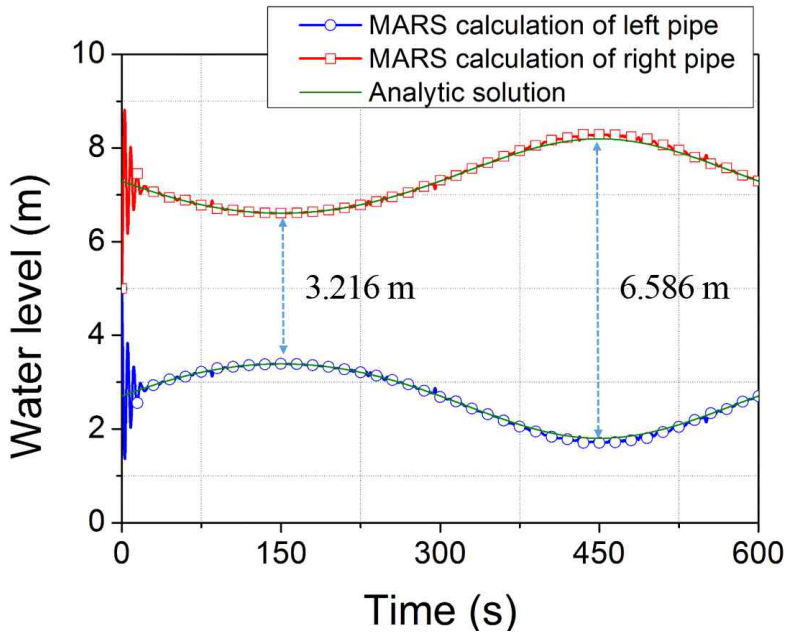


그림 2.9 복합운동에 대한 MARS 계산 결과

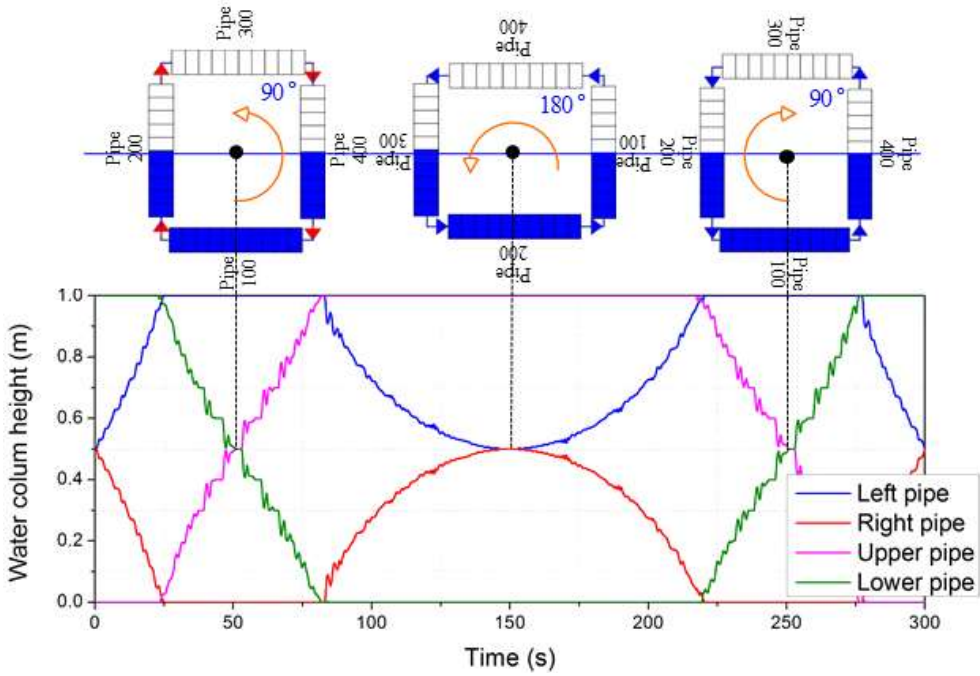


그림 2.10 폐쇄루프 횡요동에 대한 MARS 계산 결과

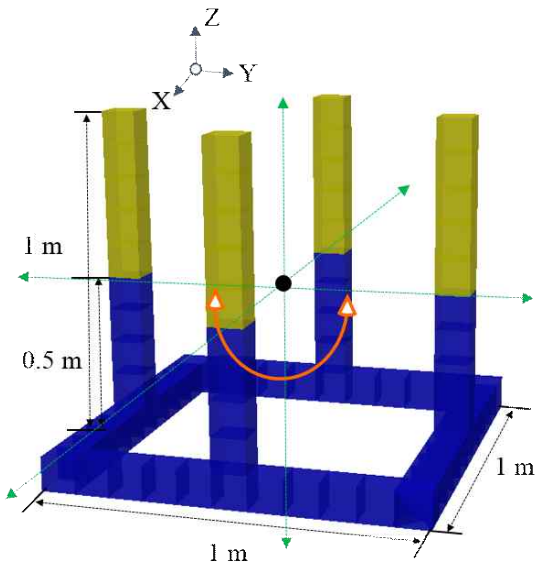


그림 2.11 3차원 마노미터의 횡요동 개념문제

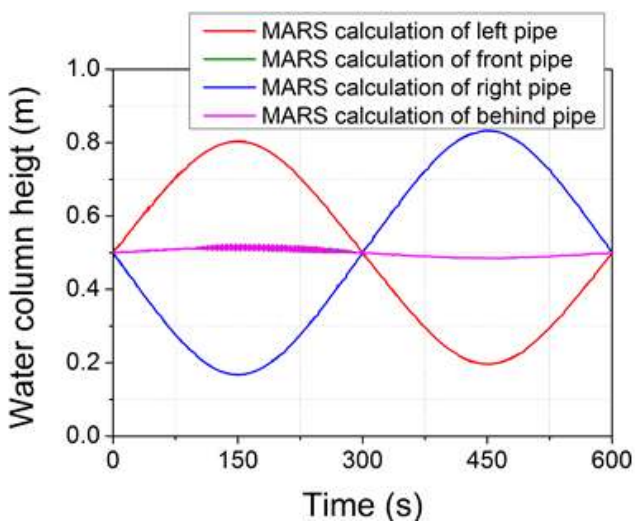


그림 2.12 3차원 마노미터 횡요동 MARS 계산 결과

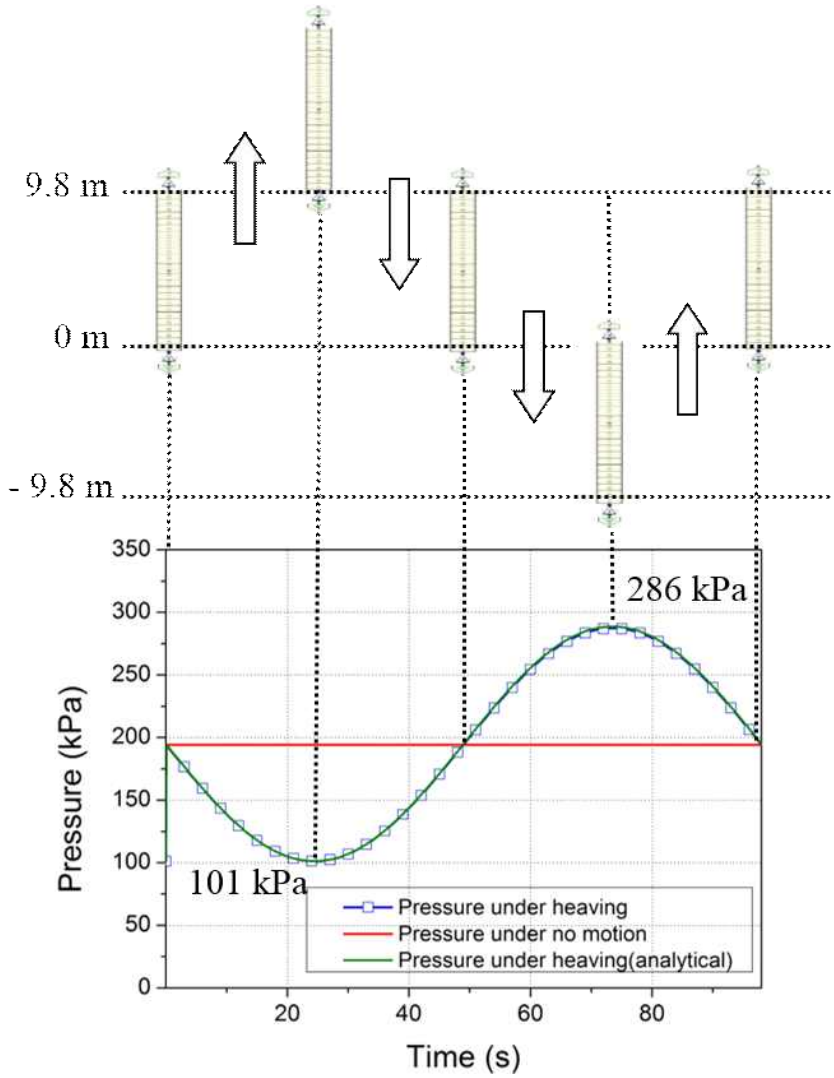


그림 2.13 수직요동에 대한 MARS 계산 결과

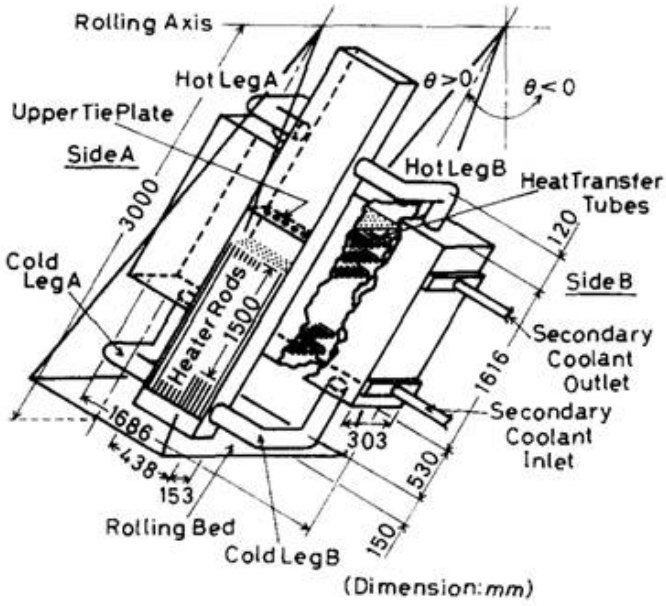


그림 2.14 Murata 실험장치

(H. Murata et al., 1990)

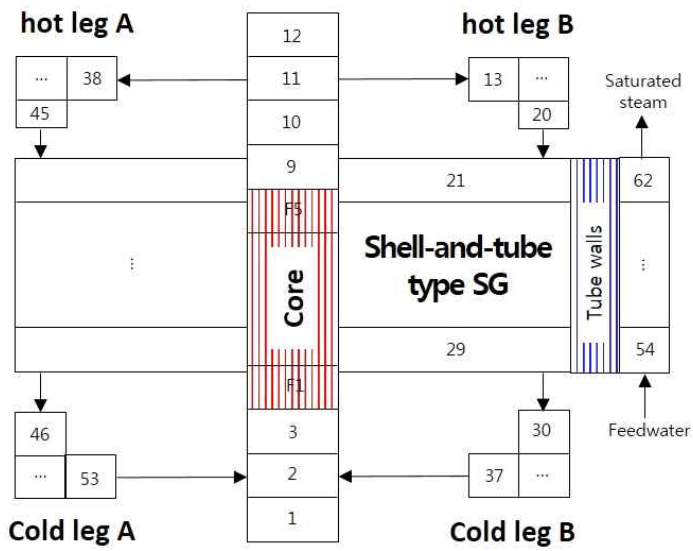


그림 2.15 MARS 계산을 위한 실험장치 노드화

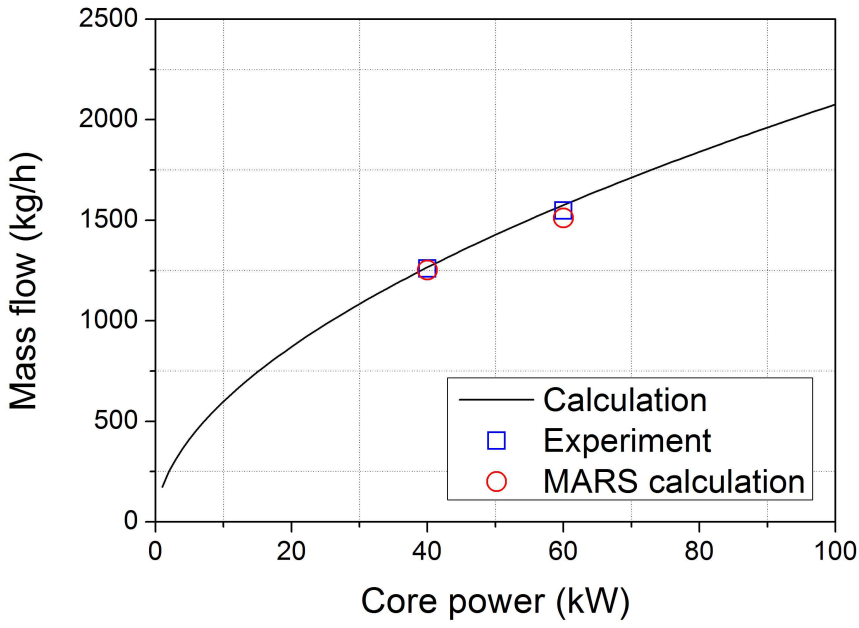
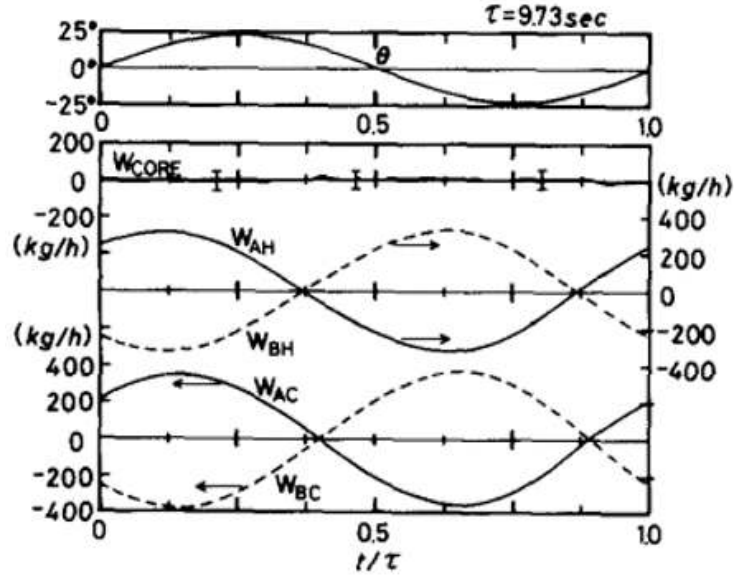
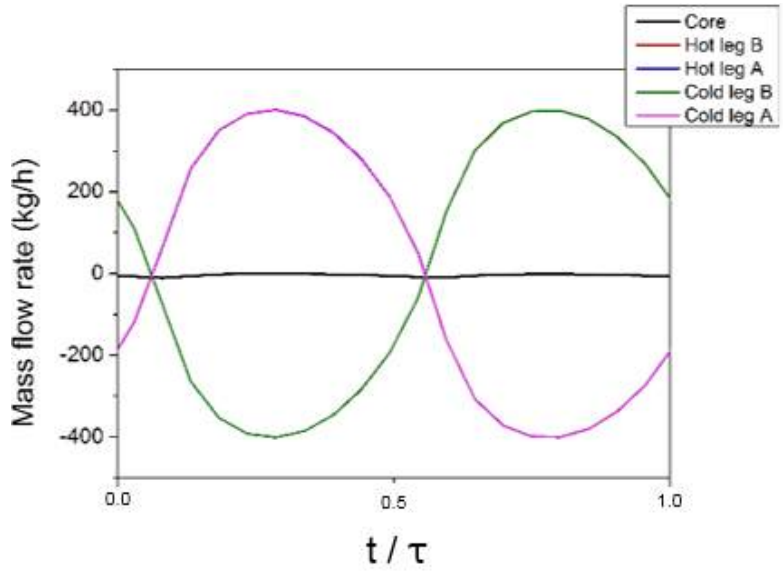


그림 2.16 예비실험 1 계산 결과

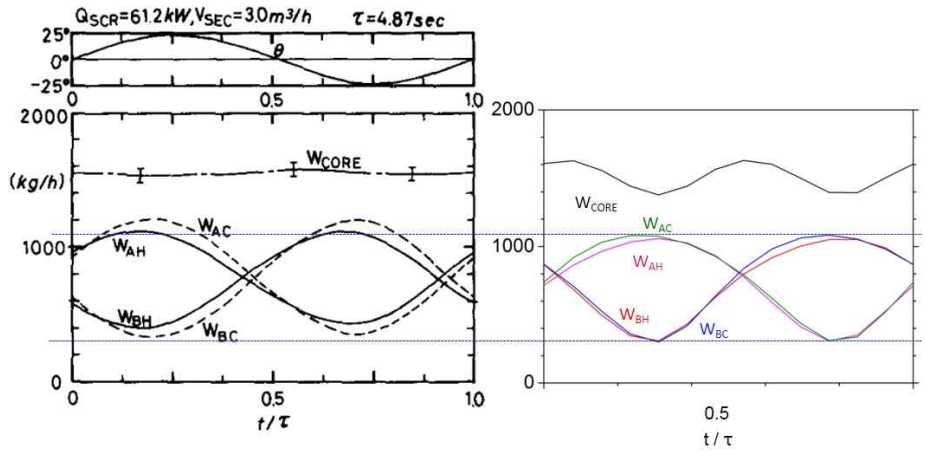


(a)

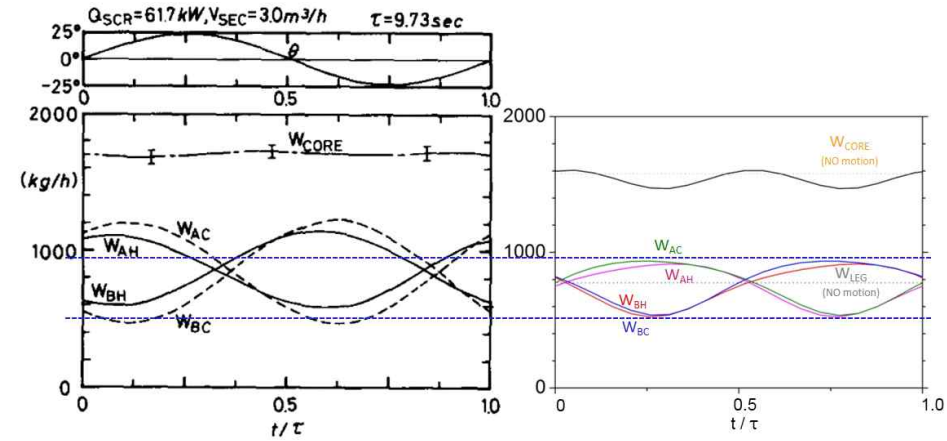


(b)

그림 2.17 예비실험 2 계산 결과 (a) 실험, (b) MARS



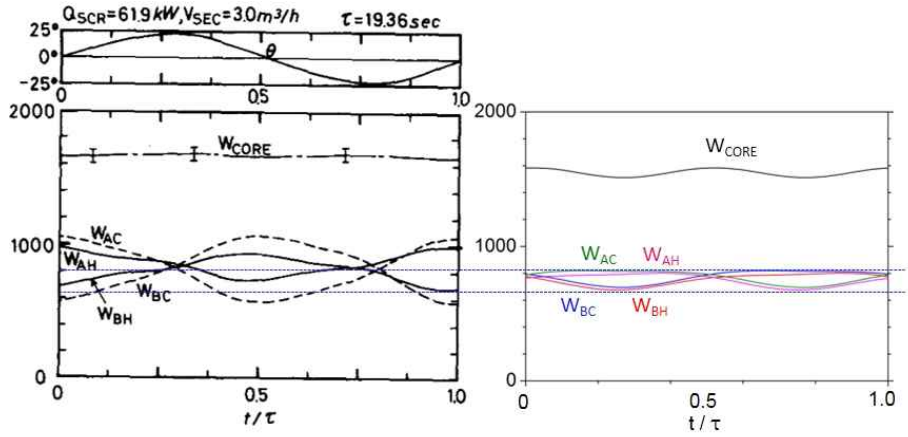
(a)



(b)

그림 2.18 주 실험 계산 결과

(a) 주기 5초, (b) 주기 10초



(c)

그림 2.18 주 실험 계산 결과 (계속)

(c) 주기 20초

제 3 장 MARS 동적운동모델 개선

MARS 동적운동모델에 대한 검증 결과 세 가지 사항에 대해서 개선이 필요한 것을 확인하였다. 첫 째는 실제 해양 조건과 같은 불규칙한 운동을 모사하기 위한 사용자입력옵션이고, 두 번째는 요동에 의해 변화하는 체적의 경사 조건을 매 시간단계마다 계산해서 유동양식 맵을 결정하는데 반영되도록 하는 것이다. 세 번째는 동적운동모델에서 교차유동(crossflow)이 모델링 될 수 있도록 개선한 것이다.

제 1 절 사용자입력옵션(user-supplied table) 구현

MARS 동적운동모델에서 해양 조건을 모사할 수 있는 경계조건을 입력하는 방법은 사인함수와 사용자입력옵션 2가지가 있다. 사인함수는 회전 운동에 따른 각도 값과 직선 운동에 대한 가속도 값을 아래 식과 같이 사인함수의 형태로 입력한다.

$$\text{회전운동 : } \theta^{\circ} = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T}+\phi\right)+\omega t+\theta_0, \tag{3.1}$$

$$\text{병진운동 : } a_{x,y,z} = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T}+\phi\right)+a_0 \tag{3.2}$$

A는 진동의 진폭이고, T는 진동의 주기, ϕ는 가속도의 위상각, ω

는 초기 각속도, a_0는 x/y/z 방향의 초기 체적 가속도, θ_0는 초기 각도이다. 사용자입력옵션은 표 3.1에서와 같이 시간에 따른 각가속도 값과 병진가속도 값을 입력해서 선박의 운동을 모사할 수 있다.

사인함수 입력방법의 경우 일정한 주기 및 진폭 입력을 통해 제한된 형태의 운동만 모사할 수 있지만 사용자입력옵션의 경우에는 사용자가 시간에 따라 임의의 가속도를 입력 할 수 있는 특징이 있다. 따라서 이 기능을 사용하면 실제 해상에서 선박에 발생하는 것과 같은 불규칙한 움직임을 모사할 수 있다. 하지만 현재 MARS의 동적운동모델에서는 사용자입력옵션에 대한 가속도 입력 환경만 존재하고 가속도를 이용해 체적힘을 구하고 이를 운동량방정식에 반영하는 것은 구현되지 않았다. 따라서 사용자입력옵션을 구현하기 위한 계산 알고리즘을 코드에 추가하였다. 먼저 사용자입력옵션 입력 데이터 값을 이용해서 식 (3.3)과 같이 현재 시간단계에서의 가속도 값 (a)을 선형내삽법 (linear interpolation)을 통해서 구하였다. 두 번째로, 각속도와 각도는 식 (3.4−5)와 같이 시간에 대한 1차 적분을 통해서 구하였다. 마지막으로 이 값들을 동적 운동에 따른 좌표 변환과 운동량 방정식의 체적힘을 계산하는데 반영되도록 하였다.

가속도 : $a = \frac{a(i+1)-a}{t(i+1)-t(i)} \bullet (t-t(i))+a(i),$ (3.3)

속도 : $v=v+a \bullet dt,$ (3.4)

각도 : $\theta=\theta+v \bullet dt$ (3.5)

t는 현재 시간 단계이고, a와 $t(i)$는 사용자입력옵션 입력 데이터 중 i번째 가속도와 시간을 의미한다.

사용자입력옵션 검증을 위해 제 2장에서 사인함수를 이용해서 만든 개념문제 중 마노미터의 동적운동을 재현하였다. 횡요동의 경계조건으로 진폭은 45° 로 동일하지만 주기는 600초에서 12초로 짧게 하였다. 횡요동에 해당되는 가속도 값은 사용자입력옵션을 통해 MARS에 제공하였다. 횡요동 운동에 따른 마노미터 좌·우 파이프의 수위 변화는 그림 3.1과 같이 최대 오차 1.7%로 사인함수의 결과와 잘 일치하였다. 따라서 사용자입력옵션이 MARS 코드에서 잘 구현되었다고 할 수 있다.

해양 조건 하에서 현실적인 동적운동을 모사하기 위한 사용자입력옵션의 유용성을 확인하기 위하여, 조선공학 분야의 시뮬레이션 소프트웨어 (J.S. Kim et al., 2017)를 사용자입력옵션 경계조건 설정에 활용하였다. 이 소프트웨어는 손상된 동체의 침수과정을 시뮬레이션하고 침몰 확률 평가 및 침몰 예정시간을 추정하기 위해서 개발되었다. 이 소프트웨어는 선박 침수 시뮬레이션을 통해 매 시간마다의 3차원 경사각 변화를 계산할 수 있어, 동적운동모

델의 사용자입력옵션에 적용할 수 있다. 그림 3.2는 선박에서 침수가 발생하고 일정 시간 경과 후 침몰하는 선박의 운동을 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. 이번 시뮬레이션에서는 미국 군함인 USS Arleigh Burke를 기준으로 하였으며, 길이는 154m, 배수량은 9,260톤이다. 시뮬레이션 방법은 우선 선박의 기본 제원을 입력하고 침수되어서 들어오는 물의 양을 계산하면서, 변화하는 무게중심과 각 지점에 대한 부력 계산을 매 시간 단계마다 수행하는 것이다. 시뮬레이션 결과 이 선박은 113초의 시간 동안 침수되면서 x축으로 35°, y축으로 5° 의 경사로 기울어진 후에 침몰하였다. 침몰에 따른 불규칙한 기울기 변화 데이터를 표로 작성하여, 경사 값을 가속도로 변환시키고 사용자입력옵션에 적용하였다.

사용자입력옵션을 이용하여 MARS에서 침수선박의 경사 변화를 재현하기 위해 길이 10 m, 직경 0.254 m의 수직 파이프를 구성하였다. 출구에서의 압력은 15 MPa 이고, 입구에서의 물 유량은 1 kg/s로 하였다. 결과 검증은 수직 파이프 입구의 압력 값을 침수 시작과 종료상태를 과도해석이 모사하는지를 확인함으로써 이루어졌다. 그림 3.3과 같이 처음 계산 시작 시의 압력 값이 변화하여 특정 경사의 예상 된 값에 도달했음이 확인되었다. 따라서 MARS에서 사용자입력옵션을 이용하면 선박 운동 해석 소프트웨어에서 전송된 시뮬레이션 데이터를 가지고 실제 해상에서와 같은 불규칙한 움직임을 모사할 수 있음을 확인하였다. 이 기능은 선박용 원자로의 좌초나 침몰과 같은 사고 상황을 가정한 안전해석에 매우 효과적으로 사용 될 수 있을 것이다.

제 2 절 체적 경사 정보 유동양식 맵 결정에 반영

MARS 동적운동모델을 이용해서 선박의 운동을 모사하게 되면, 체적의 기울기는 시간에 따라 변화한다. 이 경우 코드는 변화된 체적의 기울기를 유동양식 맵(flow regime map)과 같은 관련되는 모델들에 반드시 반영해 주어야 한다. 현재 MARS 코드에는 2가지 유동양식 맵이 내장되어 있다. 체적의 경사가 $0^\circ \leq |\theta| \leq 45^\circ$ 이면 수평 유동양식 맵을 적용하고, $45^\circ < |\theta| \leq 90^\circ$ 인 경우에는 수직 유동양식 맵을 적용한다 (U.S. NRC, 1998). 만약 이상유동이 형성된 수평 파이프가 90° 회전하여 수직 파이프가 되는 경우 코드는 파이프의 기울기 변화를 반영하기 위해서 수평에서 수직으로 유동양식 맵을 변경해야 한다. 동적운동에 의해 발생하는 파이프의 경사 변화에 따라 유동양식 맵도 변화하는지 검증하기 위해 그림 3.4와 같은 개념문제를 선정하였다.

이 파이프의 형상은 앞서 사용자입력옵션 침수 상황 모사를 재현할 때 사용한 것과 동일하다. 그러나 파이프 입구의 액체 및 증기 유량은 각각 1 kg/s인 2상유동을 모사하였다. 계산은 먼저 파이프가 수평상태에 정지해있으면서 유동이 100초 동안 정상상태에 도달하는 것으로 시작한다. 그 후 파이프를 60초 동안 회전시켜 파이프의 경사를 수평에서 수직으로 변경한 후 운동을 정지한다. 회전이 완료된 후 파이프는 새로운 정상상태에 도달하게 되고, 이 결과를 동적 운동 없이 초기부터 수평 또는 수직 상태인 파이프에 대해서 각각 비교하였다. 표 3.2는 정상상태의 경우와 회전

운동을 한 경우에 MARS에서 계산한 유동양식을 보여준다. 회전이 없는 정상 상태의 경우에 부여 된 유동 조건에서 수평 파이프는 수평성층류(horizontal stratified flow)가 되고, 수직 파이프는 슬러그류(slug flow)가 형성된다. 따라서 MARS 코드에서 계산하는 회전하는 파이프의 유동양식은 수평 상태에서는 수평성층류가 형성되었다가 수직 상태로 회전한 후에는 슬러그류로 변할 것으로 예측하였다. 하지만 표 3.2에서 볼 수 있듯이 파이프가 수직으로 회전을 한 후에도 수평 상태에서의 유동양식인 수평성층류로 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 출구에서의 기포율은 그림 3-7(a)에서와 같이 회전 후에도 정상상태의 수직 파이프의 값에 수렴하지 않았다. 이는 MARS 코드에서 유동양식 맵의 결정을 처음 계산 시작 시 한번 만 수행하기 때문이다. 동적 운동에 의해 체적의 경사 변화가 발생할 경우 변화된 경사 정보를 반영해서 코드에서는 현 시간의 경사정보에 맞게 다시 유동양식 맵을 결정해야 하지만 이를 반영하지 못하고 초기 입력된 유동양식 맵이 계속 유지되는 것이다.

이 문제를 해결하기 위하여 코드 개선을 수행하였다. 동적운동 모델이 적용된 경우에는 체적의 경사 정보를 매 시간 단계마다 계산하고 유동양식 맵 결정에 반영되도록 하였다. 우선 MARS 동적운동모델이 코드 내에서 계산되는 절차에 대한 확인이 필요하다. MARS 동적운동모델은 모델 옵션 '80' 을 통해서 활성화 되는데, 그림 3.5는 MARS 코드 계산을 위한 모듈 구조를 나타내고, 그림 3.6은 옵션이 활성화 되었을 경우 코드 계산 절차를 나타낸

다. ReadComponent 모듈에서는 코드 입력 파일에서 생성한 각 체적들의 부피, 기울기, 길이 등과 같은 정보를 계산한다. 다음으로 ReadNewProblemM 모듈에서는 동적운동모델 입력 파일에 대한 정보를 반영한다. 동적운동모델 입력 파일에 대한 세부 정보는 부록에 기술하였다. 다음으로 InitComponent 모듈에서는 수평과 수직 유동양식 맵을 결정한다. 이후 TimeStepControl 모듈에서 매 시간단계마다 계산이 필요한 정보들을 계산해서 다른 모듈에 반영하고 피드백 되지만, 동적운동모델이 활성화 되면 피드백이 TimeStepControl 모듈 앞의 ExtraProcedure 모듈에 이루어지게 되고 동적운동에 의해 발생하는 체적힘 계산을 수행하게 된다. 따라서 ExtraProcedure에 포함된 동적운동모델에 체적 경사 정보 계산 및 유동양식 맵 결정을 할 수 있는 비교적 간단한 알고리즘을 포함시키게 되면 매 시간단계 마다 이에 대한 계산이 가능해지고 그 결과를 다른 모듈들에 반영할 수 있게 된다.

개선 결과를 검증하기 위하여 그림 3.4의 개념문제를 다시 한 번 시뮬레이션 하였다. 검증은 파이프 입구에서의 압력과 출구에서의 기포율이 처음부터 수평, 수직인 정상상태 파이프의 값과 수평 상태에서 동적 운동을 통해 수직 파이프가 되는 파이프의 값하고 일치하는지를 확인하였다.

결과는 그림 3.7과 같다. 코드 수정 전의 압력과 기포율은 파이프의 기울기가 수평에서 수직이 되는 경우에 정상상태의 값과 큰 차이를 보인다(그림 3.7(a)). 기포율은 유동양식에 크게 영향을 받고 이 결과는 압력 계산에 반영된다. 하지만 수직 파이프를 회

전하여 수평이 되게 한 경우에는 기포율은 큰 차이를 보였으나, 압력은 잘 수렴하는 것을 볼 수 있다(그림 3.7(b)). 이것은 수평이 된 경우 부력이 감소하고, 이 계산에서는 벽면 마찰을 고려하지 않았으며, 따라서 수평이 된 경우의 압력 감소가 기포율에 의한 영향을 작게 받기 때문이다. 코드 수정 후에는 결과는 회전 후 예측된 정상상태의 값에 잘 수렴한다. 또한 이 개선 결과를 다른 유동양식에서도 잘 적용되는지 확인해 보았다. 파이프의 액체 및 증기 유량을 조절하여 유동양식을 변경하였으며, 그 결과는 그림 3.8과 같이 기포류(bubbly flow), 환상류(annular mist), 슬러그류(slug flow)와 같은 다른 유동양식에도 잘 적용되는 것을 확인하였다. 다음으로 2상유동을 만들기 위한 경계조건을 다르게 구성하여, 열구조체를 통해 유체에 열을 가하여 이상유동이 형성된 상황에 대한 검증을 수행하였다. 검증 조건은 표 3.3과 같다. 비등과 응축에 대해서 열유속을 경계조건으로 3가지 기포율이 발생하는 상황에 대해서 각각 검증하였다. 또한 앞서 개념문제 검증과 마찬가지로 수평에서 수직, 수직에서 수평으로 경사를 변경한 경우를 모두 확인하였다. 그 결과 그림 3.9-10과 같이 열구조체를 이용한 경우에도 동적운동에 따른 체적 경사 변화 후, 압력과 기포율의 수렴 값이 처음부터 정상상태인 체적의 값에 잘 수렴하였고, 결과적으로 코드 수정 후 동적운동에 따라 변화하는 체적 경사 정보가 유동양식 맵 결정에 잘 반영되는 것을 확인하였다.

제 3 절 교차유동(cross flow) 구현

MARS 코드에서는 체적간의 연결은 junction을 통해 이루어진다. MARS는 1D 코드이기 때문에 유동의 흐름은 1차원적으로 해석된다. 하지만 원자력발전소 등 실제 현상을 코드에서 모델링 하는데 있어서 다차원 현상이 중요한 곳에서는 보다 현실적인 해석을 위해 교차유동을 고려하여야 하며, MARS 코드에서 이 기능은 구현되어 있다. 특히, 일체형 원자로의 강수부(downcomer) 등을 모델링하거나 관련된 사고 해석을 수행하기 위해서는 교차유동이 중요하다. 강수부의 주 유동방향은 아래로 향하고 있지만, 사고 시 횡 방향으로도 유동흐름이 발생하고 코드에서는 이를 해석할 수 있어야하기 때문이다.

MARS에서는 그림 3.11과 같이 체적의 유동 방향에 따른 면을 구분한다. 면을 기준으로 유동흐름의 방향은 6개로 나뉘는데, 주 유동 방향의 경우 체적 으로 들어오는 경우는 Face 1, 체적 밖으로 나가는 경우가 Face 2이다. 마찬가지로 Face 3~6은 주 유동 방향과 다른 2개의 축에 대한 교차유동을 나타내며, 유동이 체적에 대해 들어오는 방향과 나가는 방향을 구분한다.

하지만 현재 코드에서는 동적운동모델이 작동하는 경우 교차유동이 구현되지 않는다. 주 유동흐름 (Face 1~2)만 인식할 수 있도록 코드가 작성되어 있기 때문이다. 따라서 동적조건에서는 앞서 언급한 일체형 원자로의 강수부 내의 교차유동에 대한 해석이 불가능한 상태이다. 이를 개선하기 위하여 2단계의 절차를 통해

코드를 개선하였다. 첫 번째는 동적운동모델이 적용된 상태에서도 교차유동이 구현될 수 있도록 주 유동흐름 외에 Face 3~6를 인식할 수 있는 절차를 코드 내 동적운동모델을 계산하는 모듈인 ExtraProcedure 에 추가하였다. 두 번째는 그림 3.12와 같이 연결된 두 체적 간에 기울어짐이나 회전과 같은 동적 조건에 의해 변화하게 되는 중력항에 대한 값을, 교차유동으로 연결된 체적간에 계산할 수 있도록 한 것이다. 이 절차는 유체역학계산을 수행하는 HydroSolveM 모듈내에 추가 하였다.

개선 결과를 검증하기 위해 먼저 Face 3, 4를 추가한 2차원 개념문제를 통해 확인해 보았다. 그림 3.13과 같이 길이 1.2 m, 지름 0.254 m의 동일한 6개의 수직 파이프에 0.4 m의 물을 채웠다. 파이프들의 주 유동흐름은 수직 방향이고, 각 파이프들은 교차유동인 수평방향으로 연결시켰다. 그리고 기울기 30° 의 경사조건과, 진폭 30° , 주기 100 초의 횡요동 조건에서 유동의 흐름을 확인하였다. 교차유동으로 연결된 파이프들은 기울기 변화에 따라 유동이 발생해야 한다. 검증 결과를 확인하기 위해 6개의 파이프 중 100번 파이프의 수위 변화를 해석해와 비교해 보았다. 그 결과 그림 3.14와 같이 경사조건에서는 0.02%, 횡요동 조건에서는 0.78% 이내로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

두 번째 검증은 Face 5, 6까지 추가한 3차원 강수부 개념문제를 통해 확인해 보았다. 그림 3.15와 같이 4개의 파이프로 이루어진 강수부를 구성하였다. 각 파이프의 지름은 0.5 m이고 높이는 1.2 m이며, 0.6 m의 물이 채워져 있다. 검증을 위한 동적운동은

경사 및 회전운동이다. 경사조건은 x축으로 45°, y축으로 45° 기울어진 2가지 상황에 대해서 각각 결과를 확인하였다. 회전운동은 횡요동 운동, 종요동 운동에 대해서 각각 결과를 확인하였다. 경사조건에 대한 MARS 결과는 그림 3.18과 같다. 우선 코드를 수정하기 전의 결과를 보면 동적조건에 상관없이 수위는 그림 3.16과 같이 일정하게 기울어진 상태를 보인다. 그 이유는 그림 3.17과 같이 교차유동에 해당하는 면을 입력하여 주 유동흐름 방향으로만 인식하기 때문이다. 따라서 주 유동흐름에서 체적 밖으로 나가는 방향이 오히려 다음 체적으로 들어가는 방향보다 높은 위치에 있기 때문에 중력 방향으로 관성력이 생겨서 체적 간에 수위가 발생하는 것이다. 코드 수정 후의 결과를 검증하기 위한 해석해는 제2장의 개념문제 검증과 마찬가지로 기울어진 각도와 파이프의 지름에 의해서 변화하는 수위 값을 통해 구할 수 있다. 오차는 x축으로 경사 시 1.6%, y축으로 경사 시 1.7%로 비교적 잘 일치하는 것을 확인했다. 횡요동 조건에 대한 MARS 계산 결과는 그림 3.19와 같다. 횡요동 계산에 대한 해석해는 경사조건과 동일한 방법으로 구하였으며, 그 결과 오차는 횡요동 시 0.4%, 종요동 시 1.1%로 발생했고, 결과적으로 3차원 형태의 수직 파이프에서도 교차유동이 잘 구현되는 것을 확인할 수 있었다.

표 3.1 사용자입력옵션 입력 형태

시간 (s)	각가속도 (rad/s²)			병진가속도 (m/s²)		
	횡요동	종요동	선수요동	전후요동	좌우요동	상하요동
…	…	…	…	…	…	…

표 3.2 경사변화에 따른 유동양식 변화 확인 결과

조 건	수평관 유동양식	수직관 유동양식
정상상태	HST	SLG
수평 → 수직	HST	HST
HST : Horizontal stratified flow SLG : Slug flow		

표 3.3 유동양식 변화 검증 경계조건

구 분	비 등			응 축		
Mass flow rate (kg/s)	1 (Liquid)			1 (Gas)		
Heat flux (kW/m²)	25	100	230	−1	−50	−100
Outlet void fraction	0.1	0.5	0.7	0.4	0.2	0.0

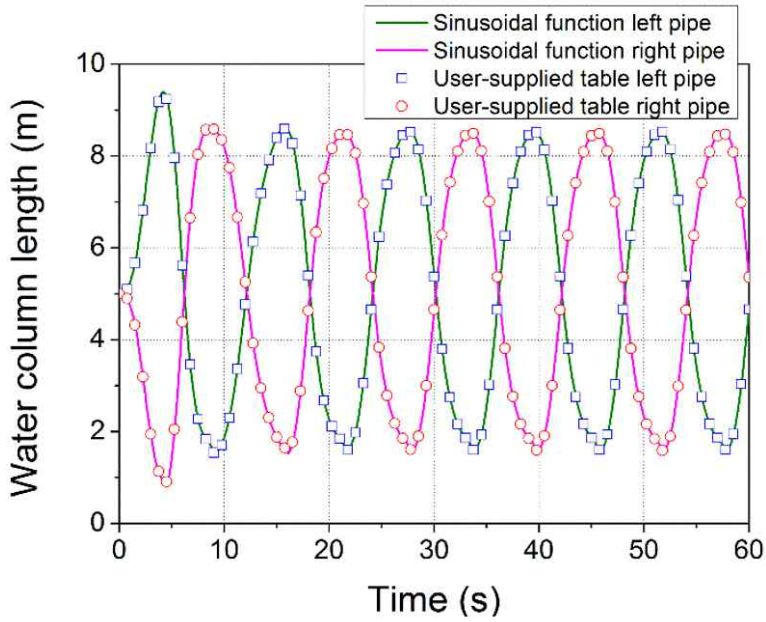


그림 3.1 사용자입력옵션 검증 결과

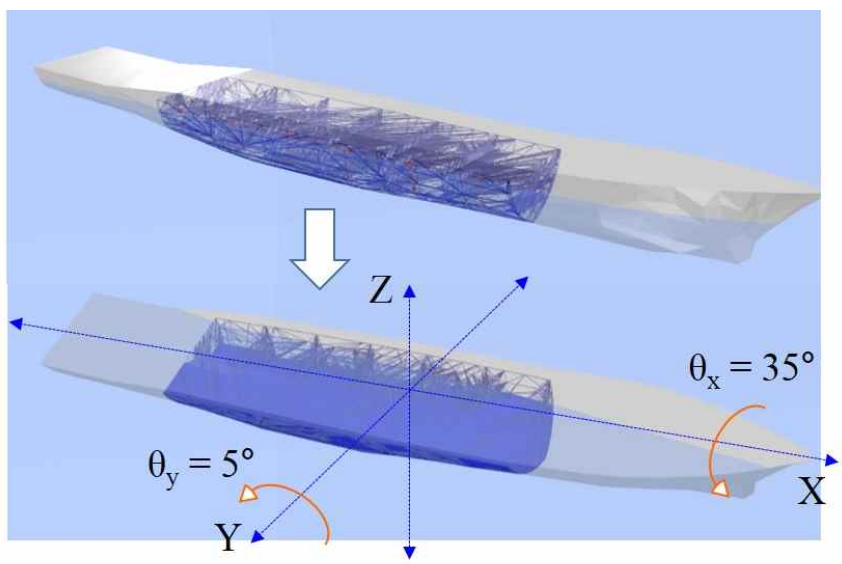


그림 3.2 침수선박 시뮬레이션 결과

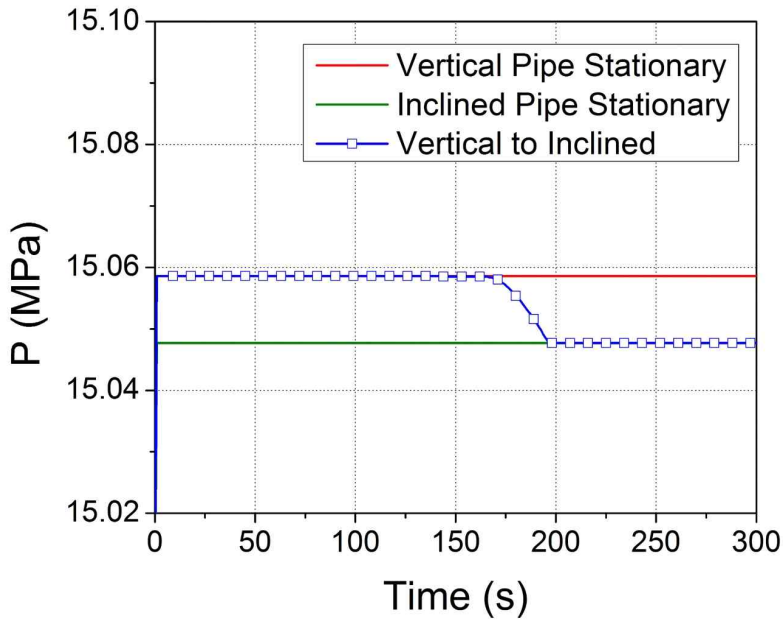


그림 3.3 사용자입력옵션을 이용한 MARS 계산 결과

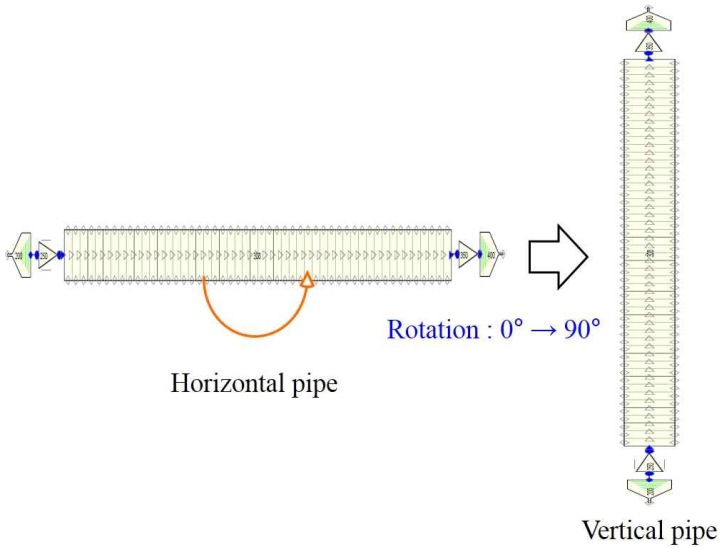


그림 3.4 이상유동 개념문제

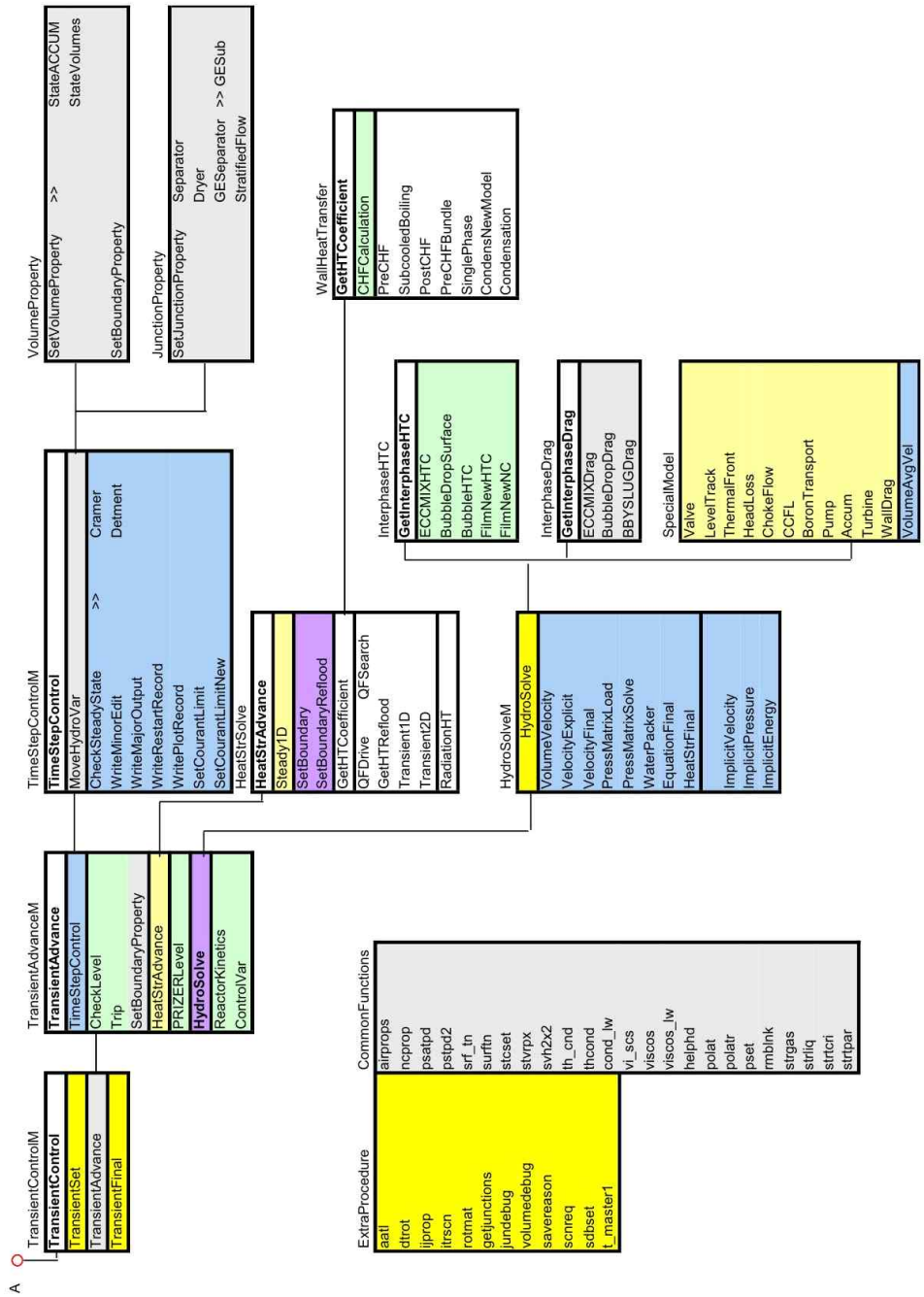


그림 3.5 MARS 계산을 위한 모듈 구조
(J.J. Jeong et al., 1999)

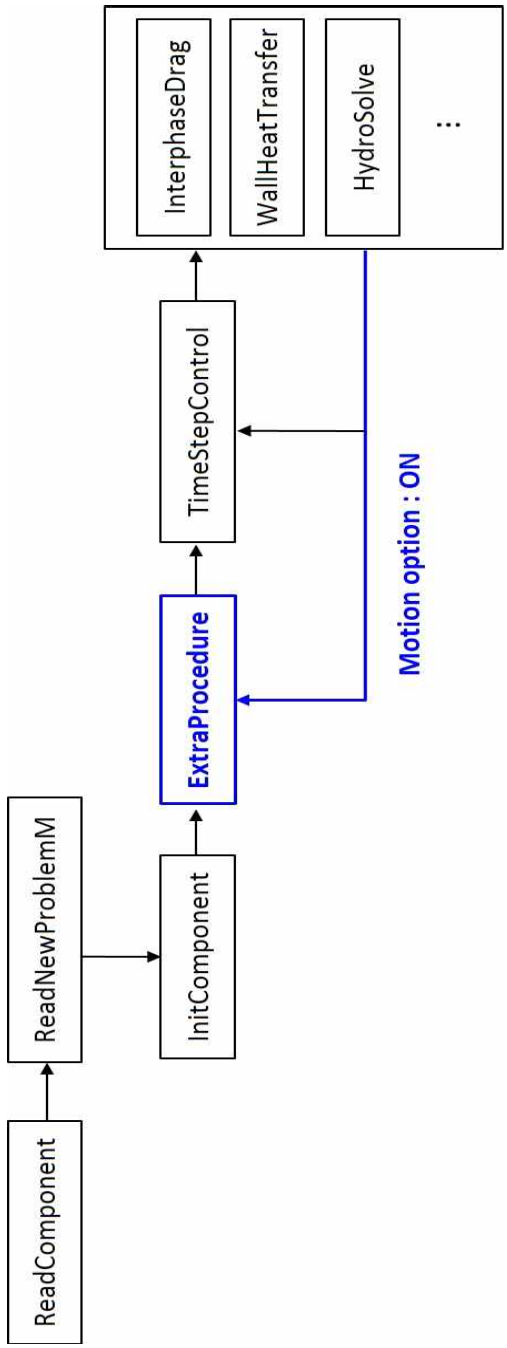


그림 3.6 MARS 코드 내 동적운동모델 계산 절차

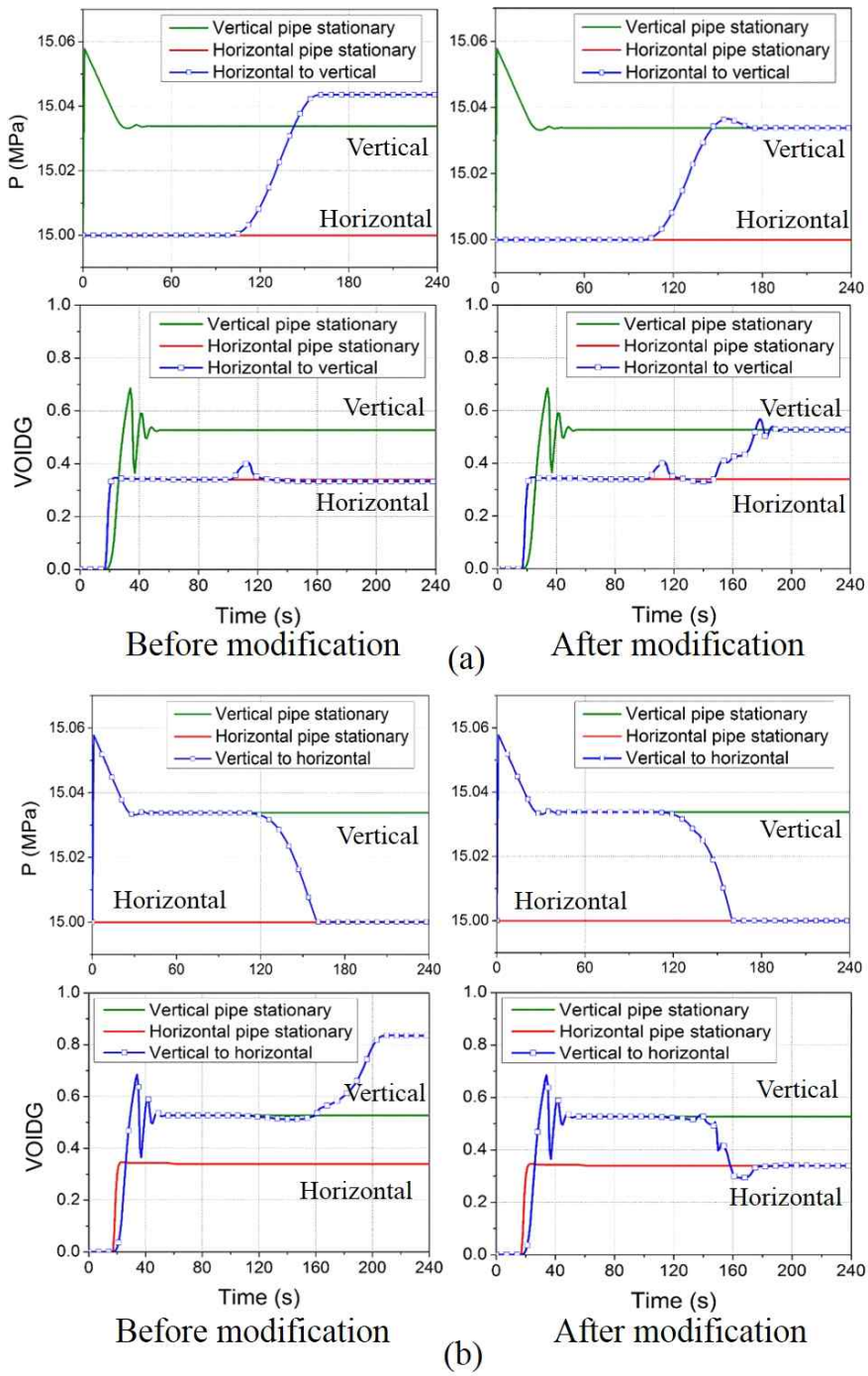


그림 3.7 MARS 개선 결과 (a) 수평 → 수직, (b) 수직 → 수평

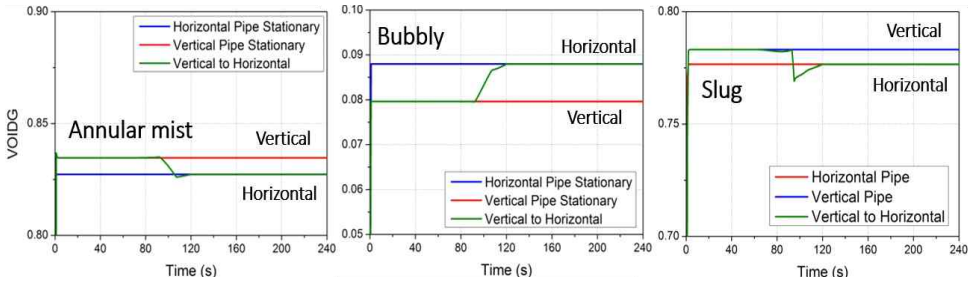


그림 3.8 유동양식에 따른 MARS 개선 결과

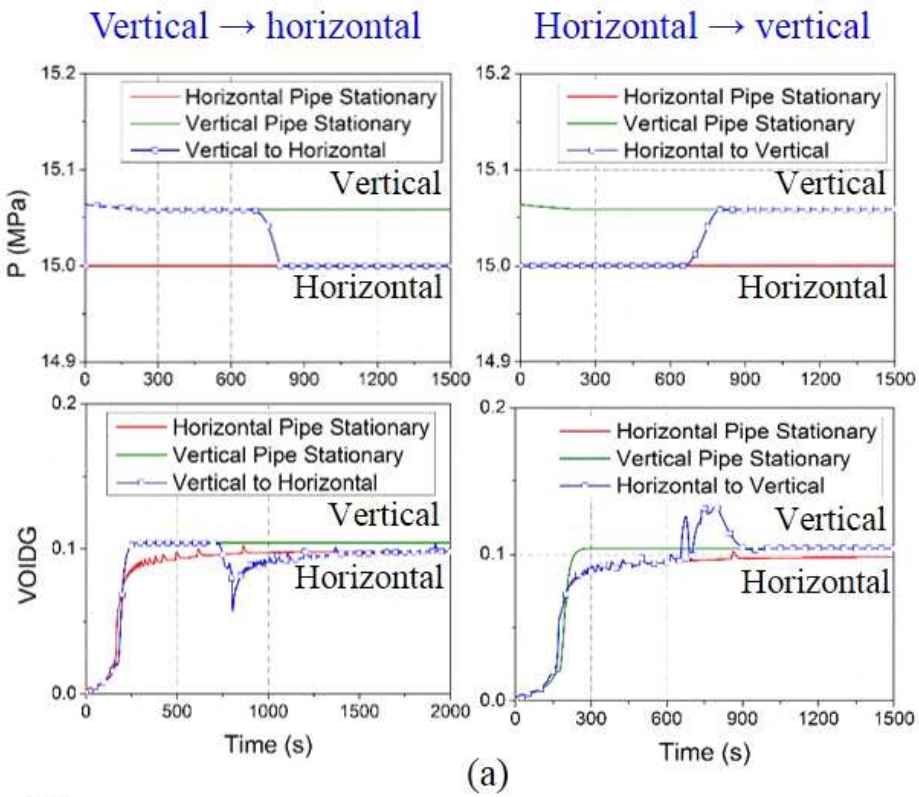
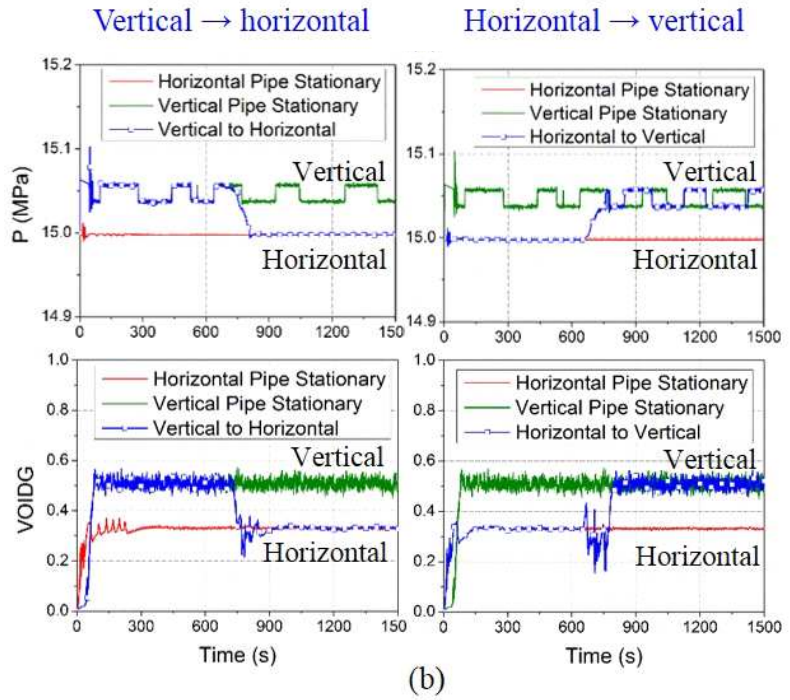
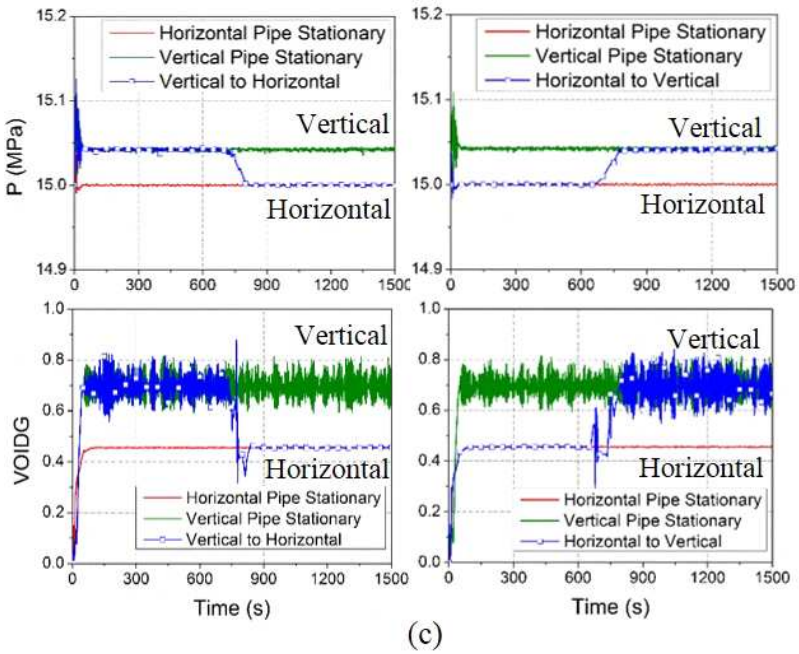


그림 3.9 비등에서의 코드 개선 검증 결과

(a) void : 0.1



(b)



(c)

그림 3.9 비등에서의 코드 개선 검증 결과 (계속)

(b) Void : 0.5, (c) Void : 0.7

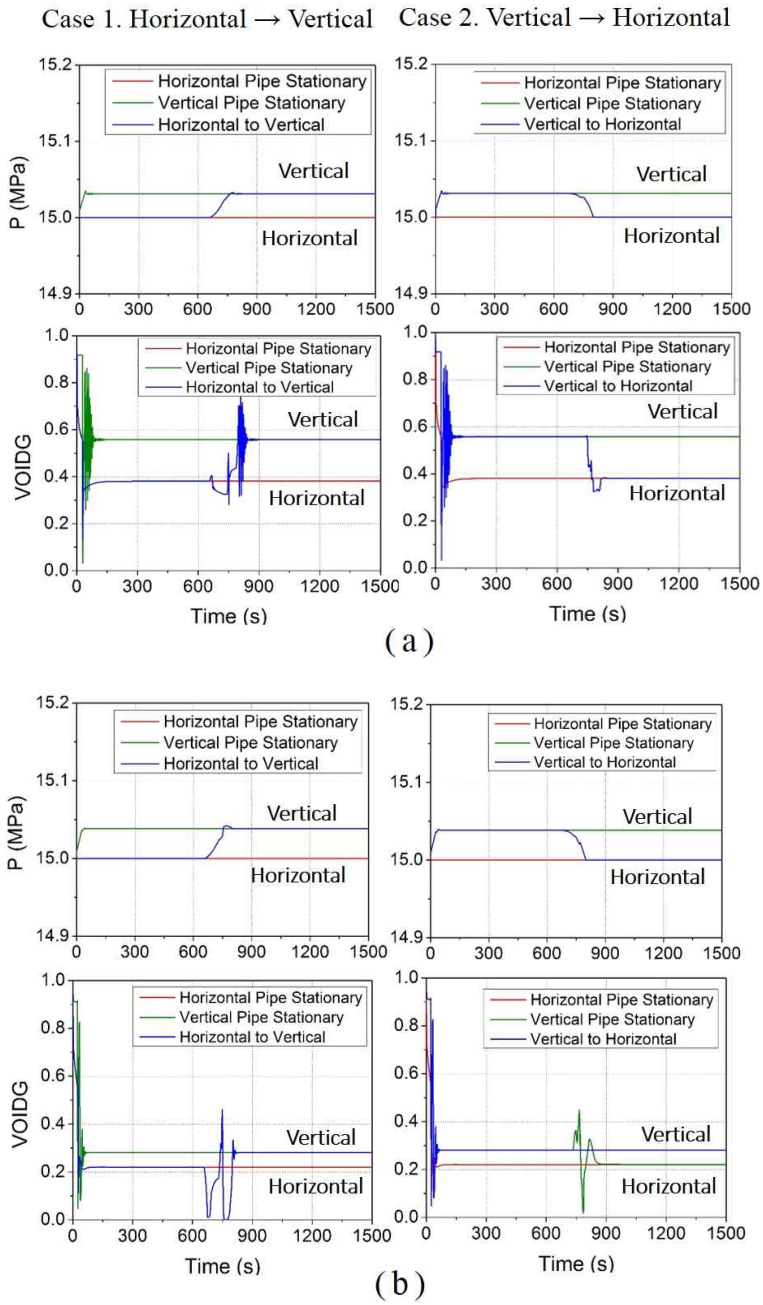


그림 3.10 응축에서의 코드 개선 검증 결과

(a) Void : 0.4, (b) Void : 0.2,

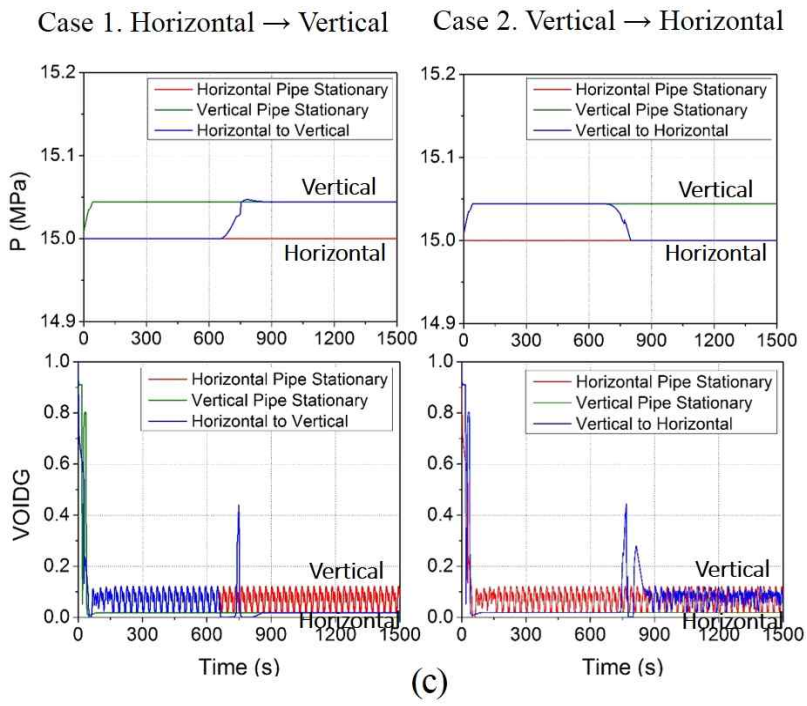


그림 3.10 응축에서의 코드 개선 검증 결과 (계속)

(c) Void : 0.0

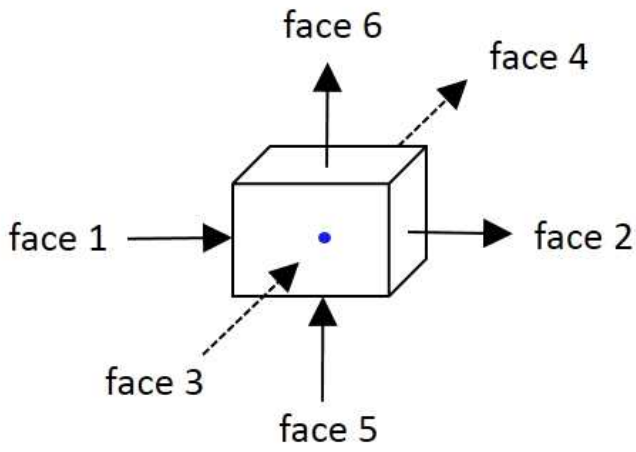


그림 3.11 교차유동(cross flow) 구현을 위한 유동흐름

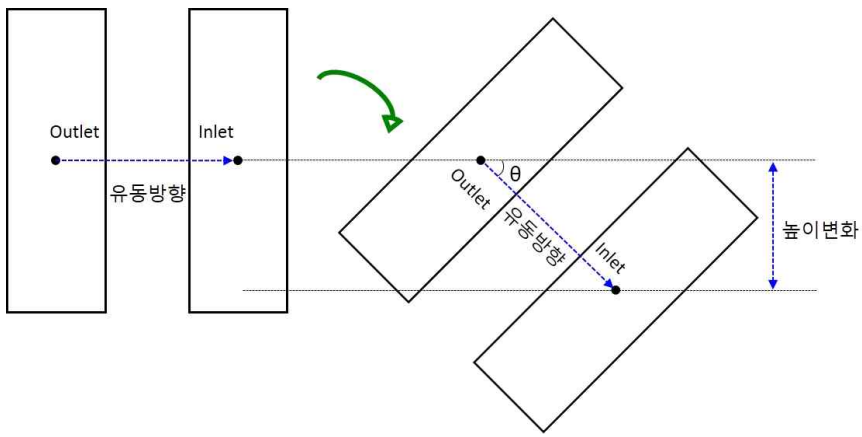


그림 3.12 동적운동에 따른 교차유동 간 높이변화 발생

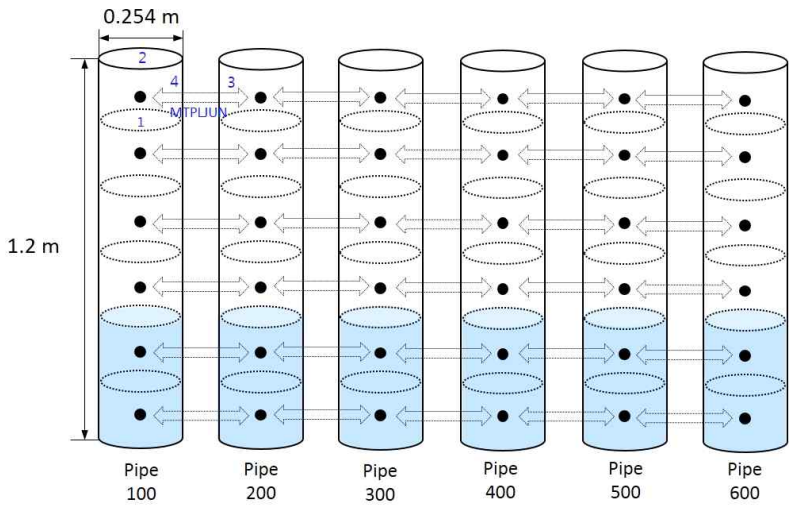
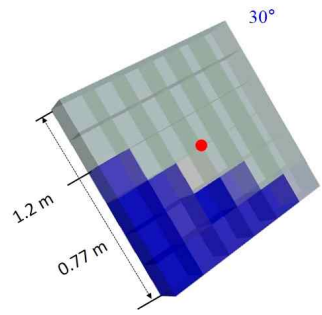
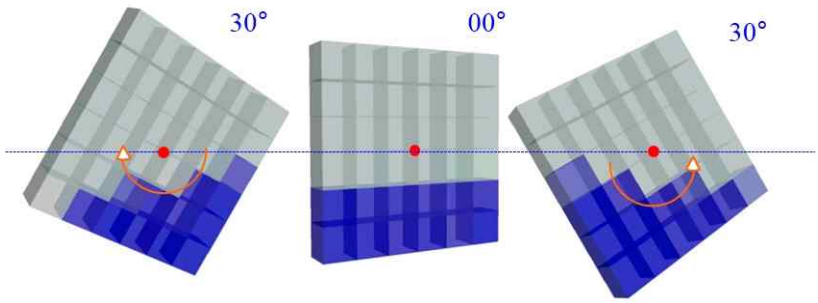


그림 3.13 교차유동 검증을 위한 2차원 개념문제



(a)



(b)

그림 3.14 2차원 교차유동 검증 결과 (a) 경사변화 (b) 횡요동

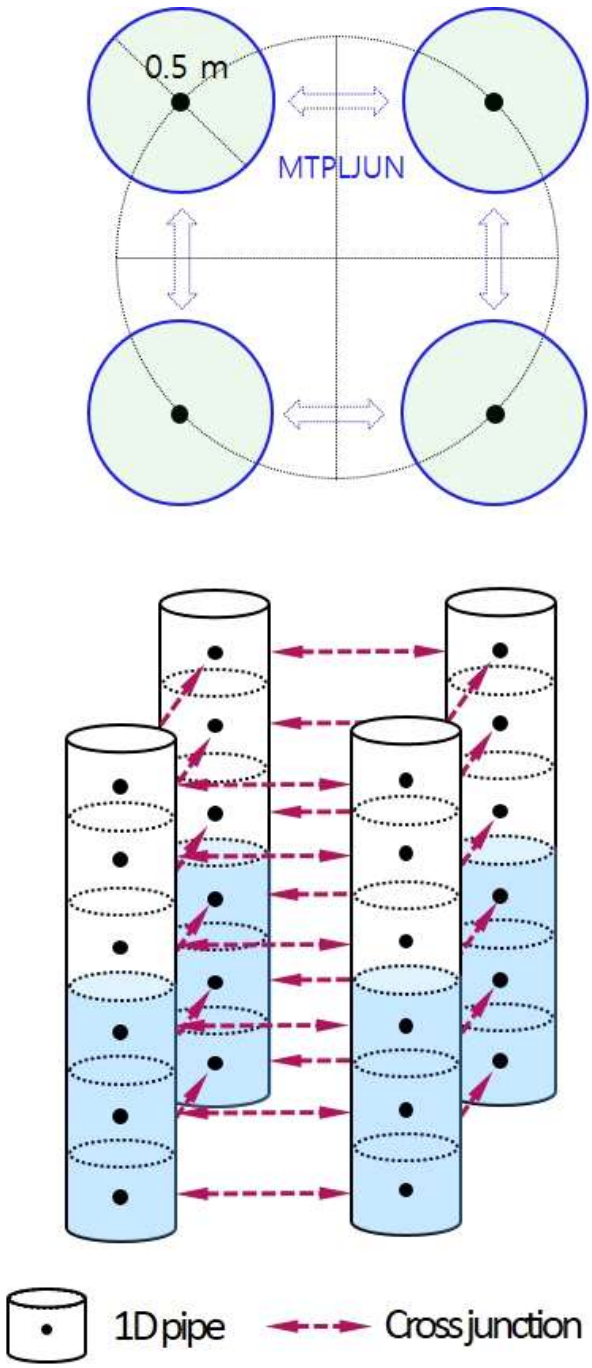


그림 3.15 교차유동 검증을 위한 3차원 개념문제

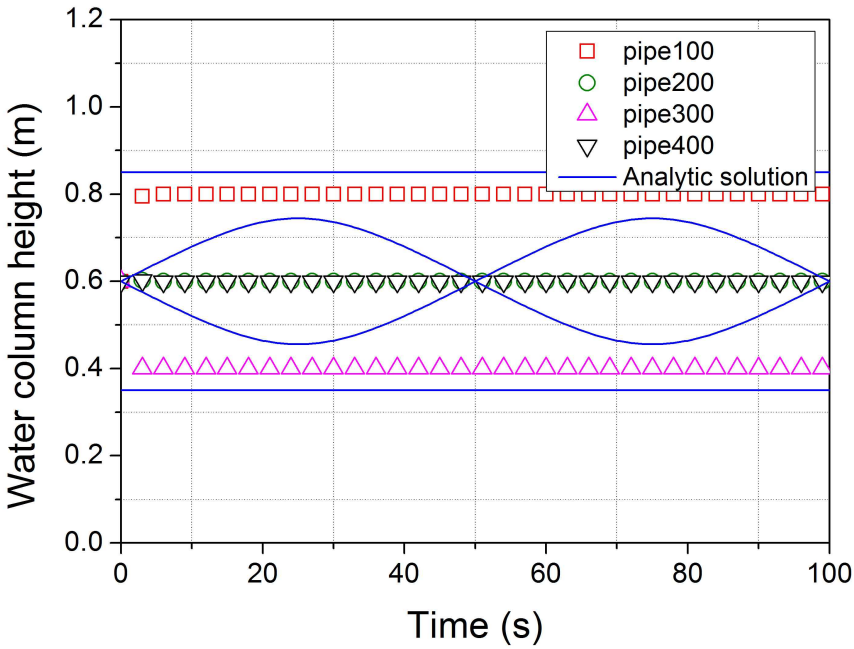


그림 3.16 코드 수정 전 계산 결과

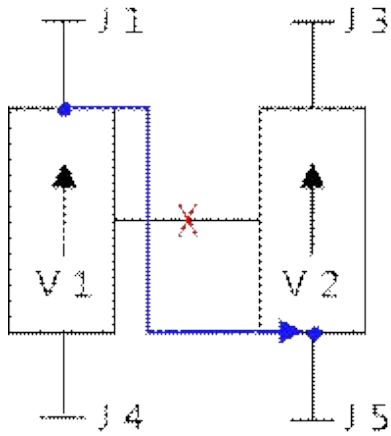
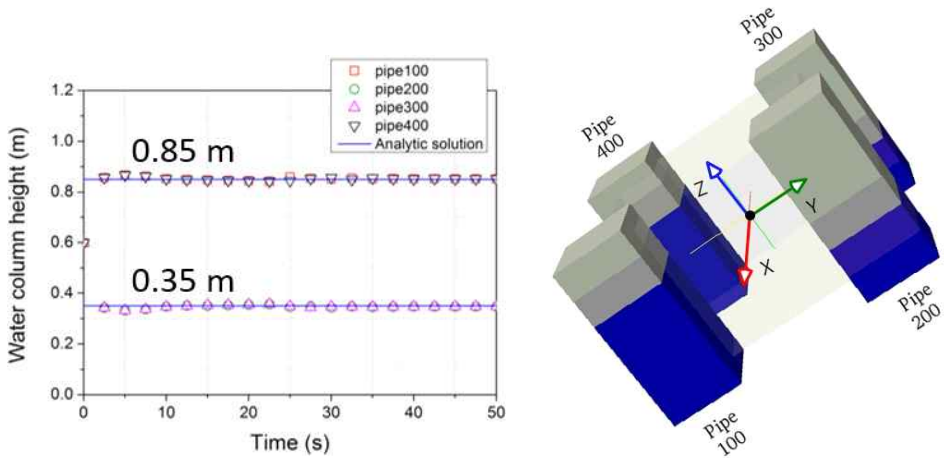
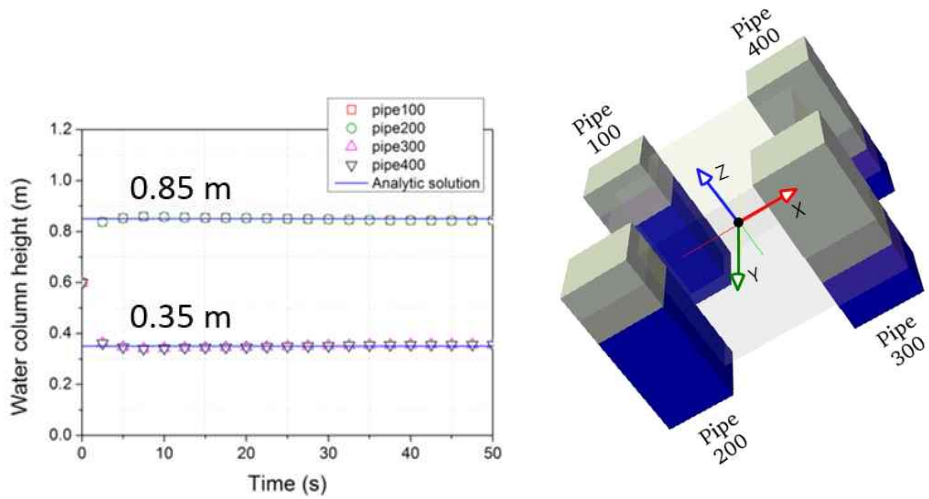


그림 3.17 코드 수정 전 교차유동 연결 상태



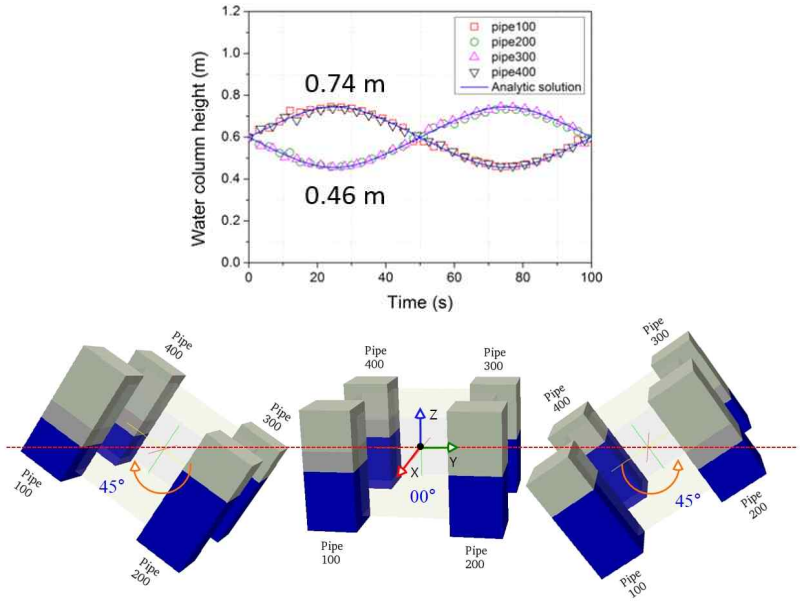
(a)



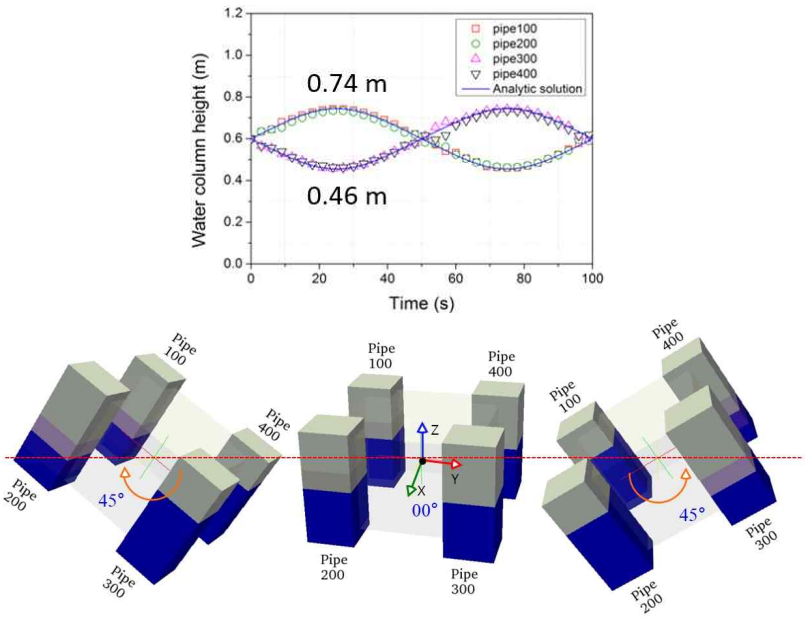
(b)

그림 3.18 코드 수정 후 경사조건에서 3차원 교차유동 검증 결과

(a) x축, (b) y축



(a)



(b)

그림 3.19 코드 수정 후 요동에서 3차원 교차유동 검증 결과

(a) 횡요동, (b) 종요동

제 4 장 RTF 테스트를 이용한 동적운동모델 적용

향후 우리나라에서 선박용 원자로를 개발하게 된다면 계통 구성 방식에서 일체형 원자로를 선택할 가능성이 높다. 일체형 원자로를 선박용 원자로로 개발 시 일반적인 분리형 원자로와는 다른 장점들이 있기 때문이다. 우선 대형파단에 의한 냉각재상실사고가 원천적으로 차단되는데 이는 일체형으로 기기를 구성함으로써 대형배관이 없어졌기 때문이다. 따라서 사고 시 노심으로 냉각재를 주입하는 비상노심냉각계통의 설계가 분리형보다 단순하다. 그리고 냉각재 순환회로가 분리형보다 단순하고 짧아서 유체저항이 작기 때문에 자연순환에서 분리형보다 유리하다. 이는 펌프가 제기능을 하지 못하여 자연순환에 의한 냉각이 필요할 시 자연 대류에 의한 냉각을 더 용이하게 하며, 피동잔열제거계통이 더 잘 기능할 수 있게 한다. 그리고 1차 계통의 크기가 현저히 감소한다. 분리형의 경우 원자로 용기보다 높이 위치하고 있는 2개의 (OPR1000 기준) 증기발생기의 높이만 하여도 약 20 m에 달하지만 일체형의 증기발생기는 작은 모듈형으로 원자로 압력용기내에 위치하여, 계통이 차지하는 공간을 크게 감소시킨다. 특히, 우리나라에서 독자 개발한 열출력 330 MWt의 스마트 원자로(System- integrated Modular Advanced ReacTor, SMART)는 1997년 개발이 시작되었고 개념설계, 기본설계, 표준설계 등의 일련 설계와 기술검증을 거쳐, 2012년 표준설계인가를 획득함으로써 기술개발이 완료된 원자로로 평가되는 등 높은 기술력을 갖추고 있다 (K.K. Kim

et al., 2014).

따라서 제 4장에서는 지금까지 수행한 MARS 동적운동모델에 대한 확인·검증 및 개선결과를 바탕으로 실제 선박에 일체형 원자로가 탑재되었다는 가정을 가지고 해석을 해 보았다. 이를 위해서 일체형 원자로를 시뮬레이션 하기 위해 제작된 RTF (REX-10 Test Facility)를 이용하였다. 우선, 동적조건이 없는 정상상태에 대한 시뮬레이션을 통해 MARS의 해석 능력을 검증하였고, 이후 선박용 원자로로 탑재되었다는 가정아래 동적조건 및 해양 사고 상황 시 동적운동모델에 대한 적용을 해보았다.

제 1 절 RTF(REX-10 Test Facility) 실험장치

앞서 제2장에서 Murata 실험 검증을 통해 MARS 동적운동모델이 자연대류 횡요동 조건에서 실험 결과와 비교적 유사한 결과를 보인다는 것을 확인하였다. 이번에는 RTF 실험 결과에 대한 검증을 수행하였다. RTF는 서울대학교에서 개념 설계한 REX-10 (Regional Energy rX-10MW_{th})의 축소모형인 실험 장치이다. REX-10은 (Y.G. Lee et al., 2012) 지역난방 및 해수 담수화 등의 목적으로 개념 설계된 소형 원자로이며, 원자로압력용기 (Reactor Pressure Vessel) 안에 노심, 주 냉각재 펌프, 증기 발생기 및 가압기가 모두 있는 일체형 원자로이다. 특히, 일차 계통 내에 물을 순환시키는 펌프가 존재하지 않고, 물의 온도차에 따른 자연대류를 이용해 냉각재를 순환시키는 특징을 가지고 있다.

RTF는 REX-10의 정상 상태와 사고 시의 자연대류 특징을 검증하기 위한 장치이기 때문에 표 4.1과 같이 자연대류 척도법을 고려하여 제작되었다. 특히, 자연대류 실험장치 제작 시 높이 비는 실제 원자로와 동일하게 유지하는데, 이는 원자로 내 노심과 증기발생기의 높이 차이가 자연대류 유량에 큰 영향을 미치기 때문이다. 다음은 운동량방정식에서 유도된 정상상태 자연대류 유량을 정량적으로 표현한 식이다 (E.E. Lewis, 1977).

$$W_{NC} = \left[\frac{2\bar{\rho}^2 g\beta P}{C_p R} (\bar{Z}_{SG} - \bar{Z}_{core}) \right]^{1/3} \tag{4.1}$$

R은 다음 식과 같이 정의된 루프의 전체 유동저항을 나타낸다.

$$R = \sum_k f_k \frac{L_k}{D_{hk} A_k^2} + \sum_j \frac{K_j}{A_j^2} \tag{4.2}$$

RTF는 200 kW의 최대 열출력을 갖고 일차계통 작동 압력은 2.0 MPa이고 이차계통 압력은 0.1 MPa로 설계되었다. RTF의 주요 구성은 그림 4.1과 같다. 전기히터, 상승관 (riser), 고온관 (hot leg), 관류형 열교환기 (helical-coil heat exchanger)로 구성된다. 그림 4.2는 RTF의 세부 구성을 나타낸다. 노심 영역은 정사각형으로 배열된 60개의 전기 히터로 구성되고 유효 가열 길

이는 REX-10과 동일한 1.0 m이다. 노심에서 가열된 1차 냉각재는 상승관을 지나 4개의 고온관을 통해 열교환기를 거치게 되고, 이후 강수부를 지나 다시 노심으로 공급된다.

제 2 절 MARS 해석 능력 검증

동적조건에 MARS 동적운동모델을 적용하기 전 우선 RTF 해석 능력을 검증하기 위해 정상 상태 시뮬레이션을 수행하였다. 히터 출력을 70 kW, 140 kW, 170 kW로 변화시키면서 유량 및 온도 변화를 확인하였고, 이 결과가 실험 값과 일치하는지를 검증하였다. 또한 추가로 동일한 조건에서 RTF를 TASS/SMR 코드로 해석한 결과 (이제희, 2013)도 함께 비교하였다. TASS/SMR은 기존의 상용원자로와 상이한 구조와 열수력 특성을 가지고 있는 SMART형 원자로에 적합한 사고해석을 하기 위해 개발된 코드다. TASS/SMR 코드는 계통 분석 코드이며, 원자로 냉각재 계통, 이차 계통 및 피동잔열제거계통 (Passive Residual Heat Removal System; PRHRS)을 모의할 수 있는 열수력 전산코드로 SMART의 정상, 비정상 및 사고 상태의 과도기를 계산할 수 있는 특징이 있다.

정상상태 시뮬레이션을 위한 MARS 노드화는 그림 4.3과 같다. 그림 4.3-(a)는 RTF를 하나의 루프로 노드화 한 것이고, 그림 4.3-(b)는 RTF를 두 개의 루프로 노드화 한 것이다. 실제 RTF는 노심에서 냉각재가 가열된 이후 자연대류를 통해 상승관을 올

라가고 4개의 고온관을 통해 나뉘게 된다. 동적 운동이 없는 상태에서는 RTF를 하나의 루프로 단순화하여 노드화하여도 결과 값에 차이가 없지만, 동적 운동이 있는 경우 루프의 형태 및 위치에 따라서 유량 및 온도가 영향을 받는다. 따라서 MARS 동적운동모델을 이용한 사실적인 시뮬레이션을 위해 두 개의 루프로 노드화를 재수행 하였다. 정상상태에 대한 시뮬레이션 결과는 표 4.3과 같으며, 결과 분석을 위해 실험 결과, TASS/SMR (1 루프) 계산 결과, MARS (① 1 루프, ② 2 루프) 계산 결과를 비교하였다. 결과를 보면 히터 출력에 비례하여 유량 및 온도가 증가하는 것을 알 수 있었고, 이는 실험 및 TASS/SMR 계산 결과와 유사하였다. 히터 출력이 70 kW 인 경우 유량은 노심에서는 0.1%의 오차를 보였고, 고온관에서 0.5%, 저온관에서 3.2%, 2차 계통 출구에서의 급수 온도는 3.4%의 오차를 보였다. 히터 출력이 140 kW 인 경우 유량은 노심에서는 1.7%의 오차를 보였고, 고온관에서 0.1%, 저온관에서 1.2%, 2차 계통 출구에서의 급수 온도는 1.4%의 오차를 보였다. 히터 출력이 170 kW 인 경우 유량은 노심에서는 1.1%의 오차를 보였고, 고온관에서 0.2%, 저온관에서 0.7%, 2차 계통 출구에서의 급수 온도는 0.2%의 오차를 보였다. 히터 출력 변화가 오차의 크기에 영향을 주지 않는 결과를 확인했고, 그림 4.4와 같이 실험결과와 TASS/SMR 간 발생한 오차와 유사한 정도의 오차를, 실험결과와 MARS 간 결과에서 볼 수 있었기 때문에 MARS를 2 루프로 노드화한 결과가 RTF의 정상상태 자연대류를 잘 해석하는 것을 검증할 수 있었다.

제 3 절 동적조건에서의 RTF 테스트

RTF에 대해서 MARS 동적운동모델을 이용하여 동적 조건에 대한 테스트를 수행하였다. RTF 실험장치는 동적조건을 고려하여 설계된 실험장치가 아니기 때문에 실험 값과 비교할 수 있는 데이터는 없지만, 앞서 수행했던 동적운동모델에 대한 확인·검증 및 개선, Murata 실험 및 RTF 정상상태 실험에 대한 검증을 바탕으로 MARS 동적운동모델에 대해 신뢰할 수 있는 결과를 도출했기 때문에 동적조건에서 RTF의 열수력 거동에 대한 해석 결과를 신뢰 할 수 있다고 판단했다. MARS 동적운동모델을 이용한 RTF 동적조건 테스트는 경사조건 및 횡요동 조건에서 수행하였다. 동적조건에 대한 경계조건으로 경사조건은 x축으로 기울기 45°, 횡요동 조건은 진폭 30°, 주기 100 초로 하였다. 또한, 제 3장에서 개선하였던 교차유동을 적용하였다. 그 이유는 RTF의 냉각재는 노심에서 상승관을 통해 고온관으로 분리된 후 열교환기 및 강수부에서는 다시 연결된 상태를 유지해야 하지만 교차유동을 적용하지 않을 경우 분리된 상태가 유지되기 때문에 유동흐름을 사실적으로 모사할 수 없기 때문이다.

그림 4.5는 경사조건에 대한 결과를 나타낸다. 경사조건이 없는 경우와 비교 시, 우선 경사로 인해서 자연대류 높이가 낮아졌기 때문에 유량 감소 (14%) 및 노심 온도 상승 (9%)이 발생했다. 추가로 강수부에 대해 교차유동을 적용하지 않은 경우와 비교해 보았다. 교차유동을 적용하면 교차유동을 적용하지 않은 동적조건

과 비교해서 유량도 일부 감소하고 기울어진 방향에 따라서 두 고온관 사이에 유량 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 교차유동을 적용하게 되면 냉각재가 강수부를 통과하면서, 강수부 내의 높이차에 의해 발생하는 교차유동이 발생하기 때문이다. 그림 4.6은 횡요동 조건에 대한 결과를 나타낸다. 횡요동 주기에 따라 유량 진동이 발생한다. 동적조건이 없는 경우와 비교 시 경사조건과 마찬가지로 유량은 감소하였고, 온도는 상승하였다. 또한 횡요동 조건에서 교차유동을 적용하지 않은 경우에는 강수부를 모사한 두 개의 파이프에서 동일한 위상을 가지는 진동이 발생하였으나, 교차유동을 적용하면 두 파이프 간에 위상차가 발생하게 된다. 이는 앞의 경사조건과 마찬가지로 횡요동에 따라 두 파이프에서 발생하는 높이차가 서로 간 유량 차이를 유발하기 때문이다. 결과적으로 MARS 동적운동모델이 RTF의 동적조건을 합리적으로 시뮬레이션 하는 것을 확인하였고 특히, 동적조건에서 강수부를 사실적으로 노드화하기 위한 교차유동의 중요성을 확인하였다.

제 4 절 해양 사고 상황 시 RTF 해석

원자로 안전성 평가를 위해서 사고 해석에 대한 많은 연구가 필요하다. 대표적으로 냉각재상실사고, 증기관 파단사고, 전원상실사고, 제어봉집합체 이탈사고 등이 있다. 하지만 선박용 원자로 안전해석을 위해서는 원자로 자체에 발생하는 사고뿐만 아니라 추가적으로 해양 사고 발생 시 원자로 거동에 대한 해석도 반드시 수행되어야 한다. 따라서 RTF를 이용해서 해양에서 발생 가능성이 높은 두 가지 사고에 대한 안전해석을 수행하였다.

첫 번째는 기상 불량 상황이다. 국제해사기구에서는 원자력 상선에 대한 기상 안전규정을 별도로 제정하였다 (IMO, 1982). 횡요동은 진폭이 45° 를 넘지 않아야 하고, 상하요동의 진폭은 1 g 를 넘지 않도록 한 것이다. 따라서 위 조건을 RTF에 적용하여 보았다. 횡요동 및 상하요동에 대한 진폭 기준은 있으나 주기 기준은 없기 때문에 두 동적조건 모두 주기는 20 초를 임의로 부여하였다. 결과는 그림 4.7과 같다. 먼저 횡요동 조건에서는 동적조건이 없는 경우에 비교해서 유량이 감소하였으며, 유량 진동의 진폭이 상대적으로 크게 발생하였고, 노심에서 냉각재 온도도 상승하였다. 상하요동 조건에서도 노심 냉각재 온도 상승은 동일하나 횡요동 조건에 비해서 유량 진동의 진폭이 매우 크게 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 20 초의 짧은 상하요동 주기로 인해 유량 진동이 대칭적으로 발생하기 때문에 전체적인 온도 변화폭이 크지는 않았다. 하지만 상하요동은 중력과 함께 작용하기 때문에 원자로

유량에 더 큰 영향을 줌으로써 안전에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단 할 수 있었다.

두 번째는 선박의 전복 상황이다. 선박의 전복 상황을 모사하기 위한 경계조건으로 RTF는 0 ~ 300 초 동안 정상상태를 유지하고 이후 60 초 동안 기울어짐이 발생하여 수직이었던 RTF가 수평 상태가 되도록 하였다. 결과는 그림 4.8과 같다. 결과에서 볼 수 있듯이 선박이 전복 된 후 노심 및 고온관의 유량이 0에 가깝게 내려간 것을 볼 수 있다. 냉각재 유량이 거의 없어짐에 따라 노심 온도는 짧은 시간에 급격하게 상승했고, 곧바로 비등이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 RTF가 냉각재 순환 펌프가 없이 자연대류에 의해서만 냉각재를 순환할 수 있기 때문인데, 선박 전복 후 히터와 열교환기의 높이차가 없어지게 되고, 냉각재 구동력이 상실되기 때문이다. 따라서 냉각재 펌프가 없는 자연대류 원자로를 선박용 원자로로 사용하게 되는 경우 사고 상황 시 노심의 열 제거를 위한 추가적인 안전장치가 반드시 필요함을 알 수 있었다.

<표 4.1> RTF의 REX-10에 대한 척도비

(Y.G. Lee et al., 2012)

Parameters	Scailing ration
Time	1/1
Operating pressure	1/1
Core $\triangle T$	1/1
Height	1/1
Diameter	1/7.071
Area	1/50
Volume	1/50
Core power	1/50
Mass flow rate	1/50

<표 4.2> RTF 정상상태 계산 결과

Power (kW)	Core mass flow rate(kg/s)				Hot leg (℃)			
	Exp.	TASS/SMR	① MARS (error)	② MARS (error)	Exp.	TASS/SMR	① MARS (error)	② MARS (error)
70.55	0.307	0.302	0.310 (0.9%)	0.304 (0.1%)	106.95	106.46	106.75 (0.2%)	107.52 (0.5%)
141.55	0.409	0.405	0.412 (0.7%)	0.402 (1.7%)	157.98	156.82	156.56 (0.9%)	157.8 (0.1%)
170.10	0.436	0.437	0.451 (3.4%)	0.441 (1.1%)	174.36	174.44	172.52 (2.1%)	173.94 (0.2%)
Power (kW)	Cold leg (℃)				Feedwater outlet (℃)			
	Exp.	TASS/SMR	① MARS (error)	② MARS (error)	Exp.	TASS/SMR	① MARS (error)	② MARS (error)
70.55	50.63	50.68	52.66 (4.0%)	52.3 (3.2%)	37.49	38.79	38.79 (3.4%)	38.8 (3.4%)
141.55	74.15	74.53	75.73 (2.1%)	75.04 (1.2%)	56.90	57.72	57.69 (1.3%)	57.7 (1.4%)
170.10	83.31	83.28	84.7 (1.6%)	83.95 (0.7%)	65.04	65.32	65.13 (0.1%)	65.15 (0.2%)

그림 4.1 RTF (REX-10 Test Facility)

(Y.G. Lee et al., 2012)

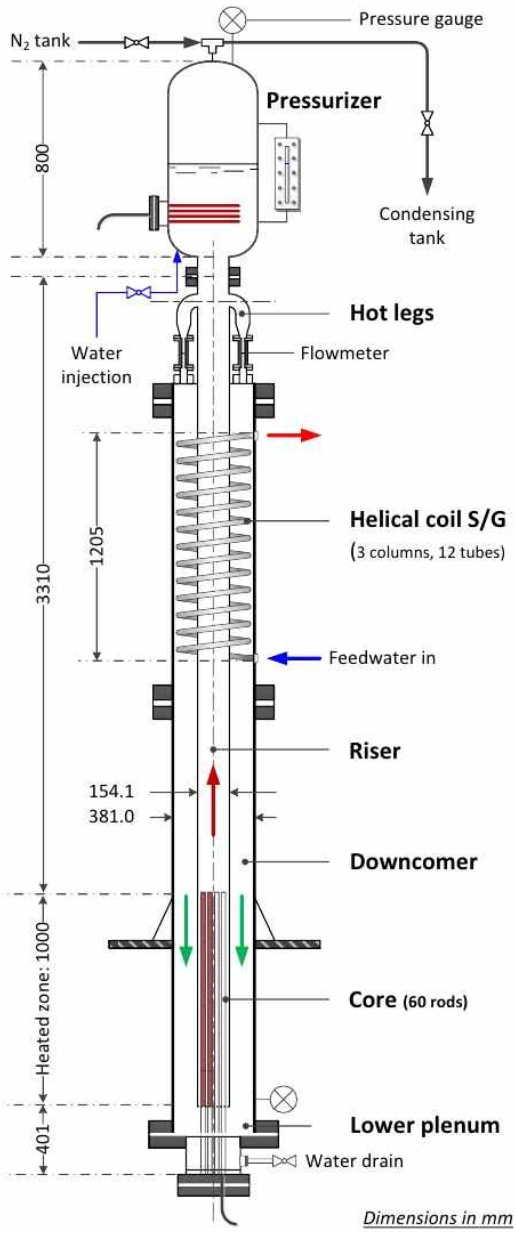
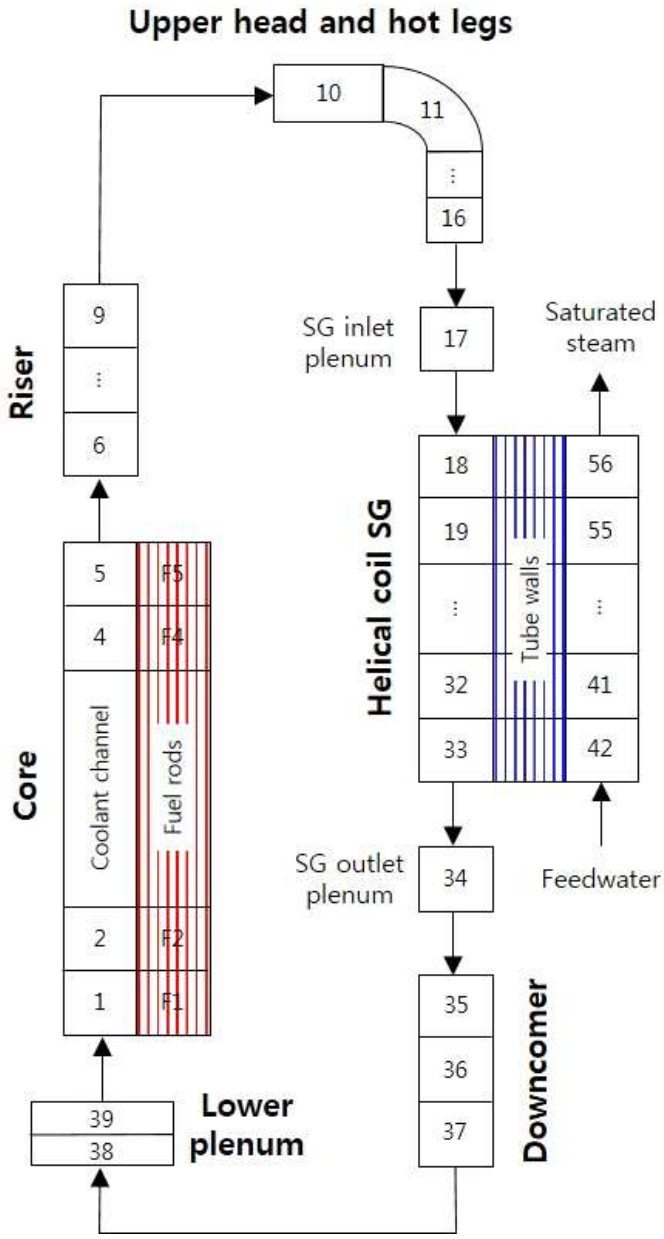


그림 4.2 RTF의 시스템 구성

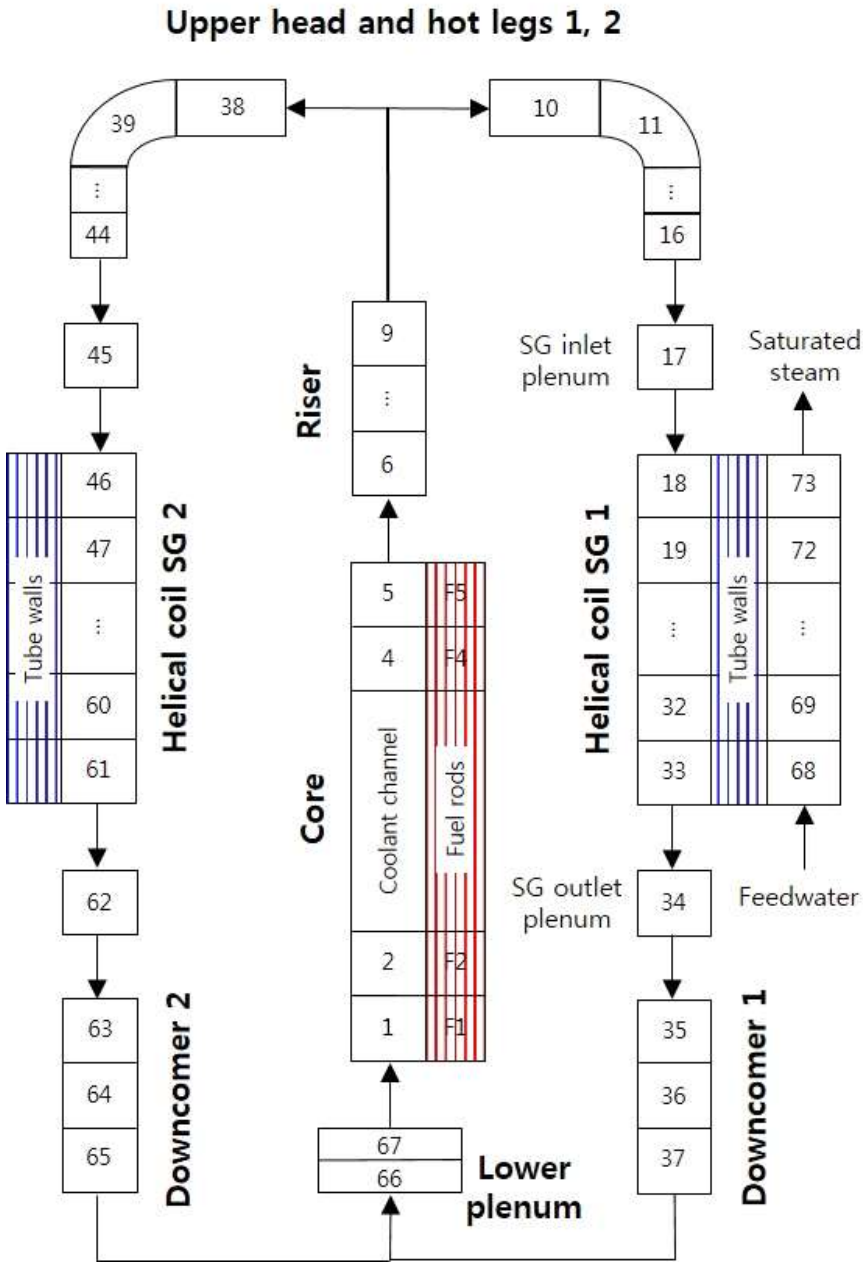
(Y.G. Lee et al., 2012)



(a)

그림 4.3 RTF 시스템 노드화

(a) 1개 루프



(b)

그림 4.3 RTF 시스템 노드화(계속)

(b) 2개 루프

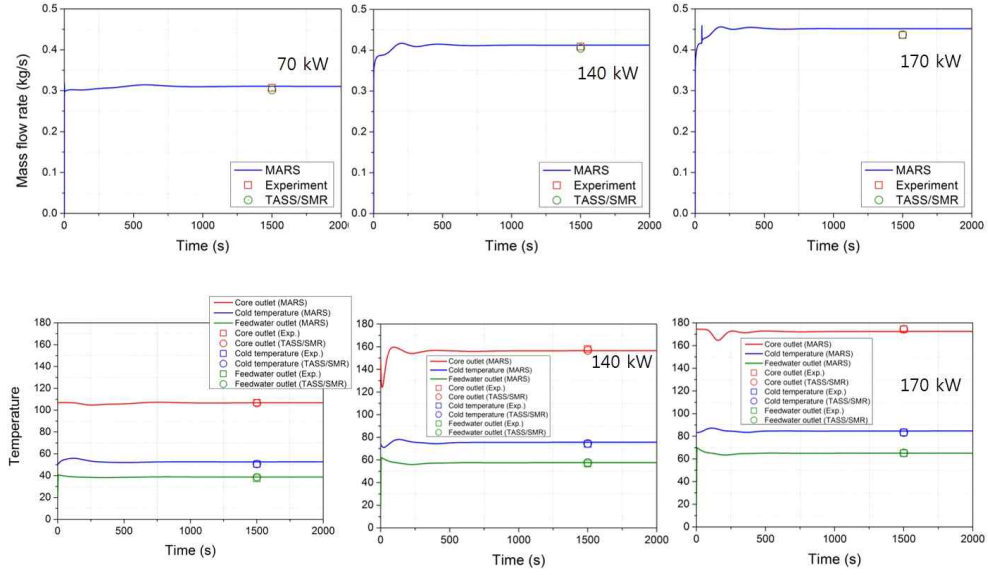


그림 4.4 RTF 정상상태 시뮬레이션 결과 비교

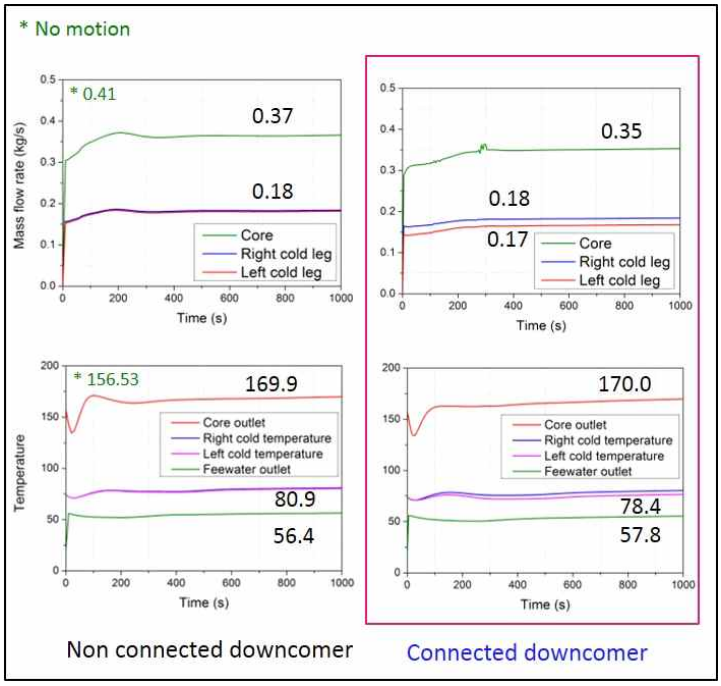


그림 4.5 경사조건에 대한 MARS 계산 결과

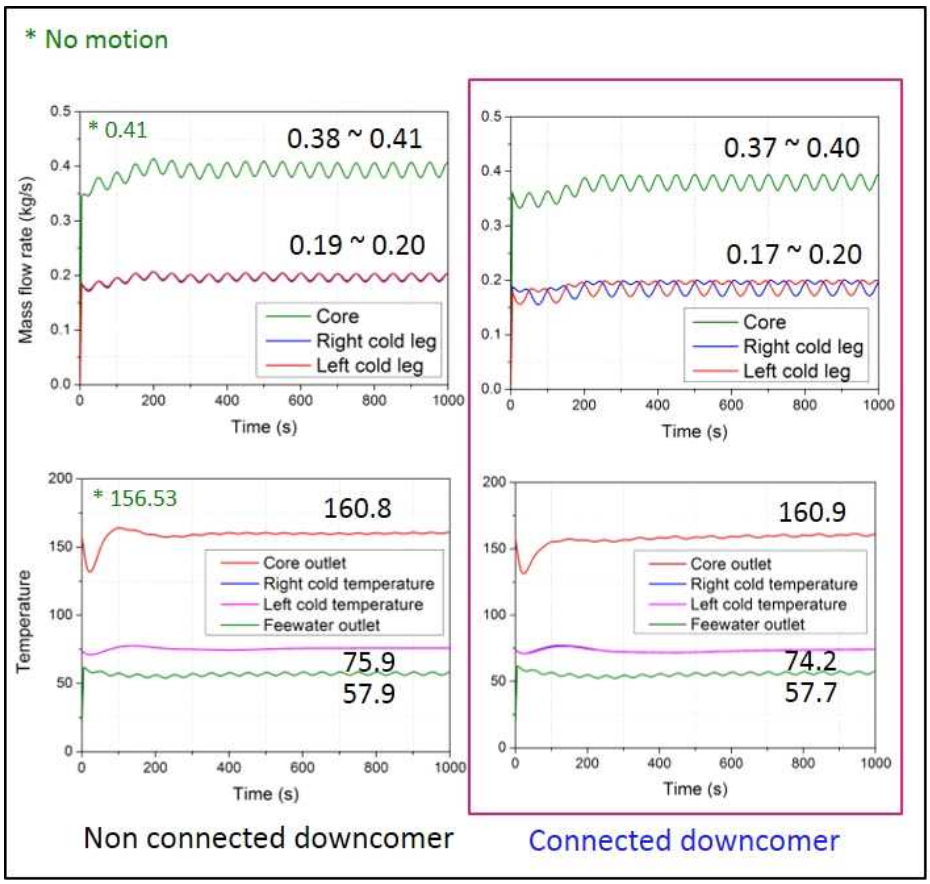
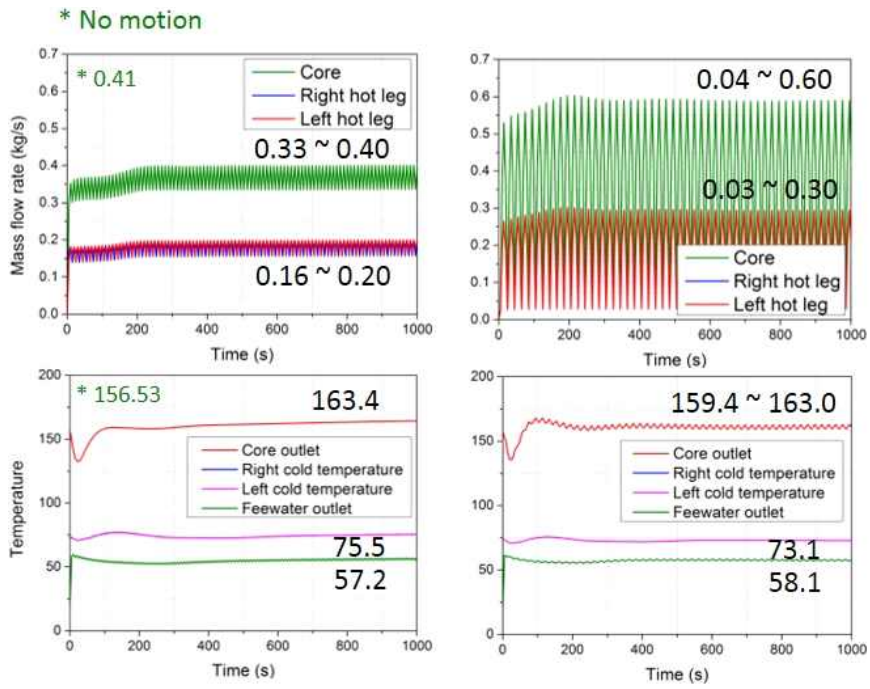


그림 4.6 횡요동 조건에 대한 MARS 계산 결과



(a) (b)

그림 4.7 기상 불량 시 RTF 안전해석

(a) 횡요동, (b) 상하요동

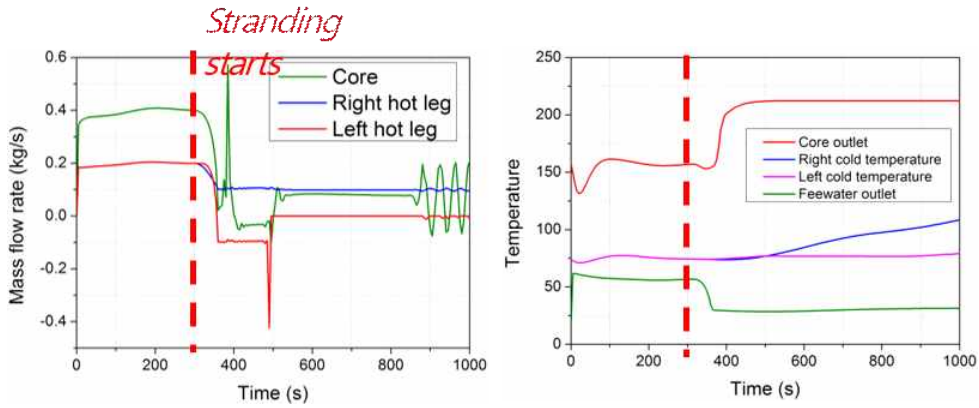


그림 4.8 선박 전복 시 RTF 안전해석 결과

제 5 장 결 론

안전해석 코드를 이용해 선박용 원자로의 실제적인 안전성 평가를 목적으로 연구를 수행하였다. 이를 위한 연구 목표로 MARS 동적운동모델에 대한 검증 및 개선을 하였다.

MARS 동적운동모델의 물리적 모델은 선박의 3차원 움직임을 모사할 수 있도록 체적힘을 계산하고 운동량방정식에 반영한다. 또한 MARS 동적운동모델이 유체의 운동을 합리적인 정확성을 가지고 모사할 수 있다는 것을 개념문제를 통해 확인하였다. 개념문제는 해양 조건에서 발생 가능한 6-자유도 운동과 관련된 회전운동과 병진운동을 모두 고려하였다. 그리고 MARS 동적운동모델의 시스템 스케일 해석능력 검증을 위해 실험 결과를 해석하였다. Murata의 횡요동 조건 단상 자연대류 실험 검증을 통해 유량 진동의 진폭이 횡요동 관성력에 주 영향을 받는 것을 확인했다.

MARS 동적운동모델과 관련된 3가지 개선을 하였다. 먼저 실제 해양 조건과 같은 불규칙한 운동을 모사할 수 있는 사용자입력옵션을 구현하였다. 개선 전의 코드는 변수 입력 환경만 존재하였지만, 사용자가 입력한 임의의 가속도를 이용해 운동량 방정식에 포함되는 체적힘을 계산할 수 있는 알고리즘을 추가하였다. 사용자입력옵션의 유용성을 확인하기 위해 사고 상황 시 침몰 선박의 불규칙한 경사변화를 시뮬레이션 하였고, 선박용 원자로의 좌초나 침몰과 같은 사과 상황 시 안전해석에 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 다음으로 동적운동모델이 적용된 경우 체적의 경

사 정보를 매 시간 단계마다 계산하고 유동양식 맵을 결정하는데 반영되도록 코드를 수정하였다. 수정된 결과는 수직에서 수평, 수평에서 수직으로 회전하는 파이프 개념문제를 통해 검증하였다. 또한, 열구조체를 이용한 비등과 응축에 대해서도 각각 검증하였고, 코드 수정 후 동적운동에 따라 변화하는 체적의 경사 정보가 유동양식 맵 결정에 잘 반영되는 것을 확인하였다. 마지막으로는 교차유동을 구현하였다. 기존의 동적운동모델에서 모델링할 수 없었던 교차유동을 추가하였고, 연결된 교차유동 간의 높이 차이로 생기는 중력 방향 관성력을 계산하도록 하였다. 수정된 결과는 2차원 및 3차원 개념문제를 통해 확인하였고, 교차유동을 통한 체적 간의 연결이 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

단상 자연대류 실험장치인 RTF(REX-10 Test Facility)를 통해 동적운동모델을 적용한 계산을 수행 하였다. 먼저 정상 상태 유량 및 온도에 대해 RTF 실험 결과와 TASS/SMR, MARS 계산 결과를 비교했고 잘 일치하는 것을 확인했다. 그리고 동적운동모델을 적용하기 위하여 경사 및 횡요동의 동적조건에서 유량 및 온도 변화를 확인하였고, 동적조건에서는 유량은 감소하고, 온도는 상승하였다. 이 때 RTF 강수부에 대해서는 코드 개선 결과인 교차유동을 적용하여 해석하였다. 추가적으로 일체형 선박용 원자로를 탑재한 선박을 가정하고, 발생 가능한 해양 사고 상황인 기상 불량과 선박 전복 시 원자로 안전성을 평가할 수 있는 안전해석을 수행하였다.

명 명 법

A	amplitude of oscillation or surface area, m^2
$\underline{a}_{net}$	net body force acceleration, m/s^2
$\underline{a}_{ref}$	translational acceleration, m/s^2
a_z	amplitude of the heaving motion
a_0	initial x/y/z acceleration, m/s^2
$a_{x,y,z}$	acceleration of each axis (m/s^2) or a_z is the amplitude of the heaving motion
B_x	body force acceleration, m/s^2
C_p	specific heat at constant pressure, J/Kg·K
D_h	hydraulic diameter, m
FWG	gas wall drag coefficient, /s
FWF	liquid wall drag coefficient, /s
f	darcy friction factor
g	acceleration of gravity, m/s^2
h	height of the pipe , m
K	loss coefficient
L	length, m
M	rotation matrix
P	pressure, Pa
P_a	atmospheric pressure, Pa
$P_{x,y,z}$	position of x/y/z-axis
R	overall flow resistance, $/m^4$
T	period of oscillation

t	current time step
v_f	liquid velocity, m/s
v_g	liquid velocity, m/s
W_{NC}	Mass flow rate of natural circulation, kg/s
w	initial angular speed

Greek letters

β	total delayed neutron fraction
Γ_g	volumetric vaporization rate, kg/m^{3}s
θ_0	initial roll/pitch/yaw angle, rad
θ_x	rolling angle, rad
θy	pitching angle, rad
θ_z	yawing angle, rad
ρ	density of water, kg/m^3
ρ_g	gas density, kg/m^3
ρ_f	liquid density, kg/m^3
ρ_m	mixture density, kg/m^3
$\bar{\rho}$	core-averaged density of coolant, kg/m^3
ϕ	phase angle for acceleration, rad
ω	angular velocity, rad/s
ω_a	angular acceleration, rad/s^2
ω_c	centrifugal force, N
ω_T	tangential force, N

참 고 문 헌

E. E. Lewis, Nuclear power reactor safety, John Wiley & Sons, New York, (1977).

F.M. White, Fluid Mechanics 7th Edition, McGraw Hill, NY 10020, (2011).

H.K. Beom, G.W. Kim, G.C. Park, H.K. Cho, Verification of dynamic motion model for ocean condition in MARS using conceptual problems, In: Proceedings of KNS Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, October 26-27, (2017).

H.K. Beom, G.W. Kim, G.C. Park, H.K. Cho, Modification of the dynamic motion model in MARS for marine reactor thermal-hydraulic analysis, In: Proceedings of KNS Spring Meeting, Jeju, Korea, May 17-18, (2018).

H. Murata, I. Iyori, M. Kobayashi, Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion, Nuclear Engineering and Design 118 (1990) 141-154.

IEEE, IEEE Standard 1012 for software verification and validation, an American National Standard. (1998).

I. Iyori, I. Aya, H. Murata, M. Kobayashi, H. Nariai, Natural

circulation of integrated-type marine reactor at inclined attitude, Nuclear Engineering and Design 99 (1987) 423-430.

International Maritime Organization, Code of safety for nuclear merchant ships, London, UK, (1982).

J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas, The Offshore Floating Nuclear Plant Concept, Nuclear Technology 194 (2016) 1-14.

J.J. Jeong, K.S. Ha, B.D. Chung, W. J. Lee, Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.1., Annals of Nuclear Energy 26 (1999) 1611-1642.

J.J. Jeong, S.W. Lee, J.Y. Cho, B.D. Chung, A coupled analysis of system thermal-hydraulics and three-dimensional reactor kinetics for a 12-finger control element assembly drop event in a PWR plant, Annals of Nuclear Energy 37 (2010) 1580-1587.

J.H. Kim, Development of RETRAN-03 code for thermal-hydraulic analysis of nuclear reactor under multi-dimensional motions, Master thesis, Seoul National University, Dept. Nuclear Engineering (1996) (In Korean)

J.H. Kim, T.W. Kim, S.M. Lee, G.C. Park, Study on the natural circulation characteristics of the integral type reactor for vertical

and inclined conditions, Nuclear Engineering and Design 207 (2001) 21-31.

J.S. Kim, M.I. Roh, S.H. Ham, A method for intermediate flooding and sinking simulation of a damaged floater in time domain, Journal of computational design and engineering 4 (2017) 1-13.

J.S. Hwang, Experiment on critical heat flux under rolling condition for TAPINS-M code development, Doctoral thesis, Seoul National University, Dept. Nuclear Engineering (2013).

K.K. Kim et al., SMART: The First Licensed Advance Integral Reactor, Journal of Energy and Power Engineering 8, (2014) 94-102.

K. Lee, K.H. Lee, J.I. Lee, Y.H. Jeong, P.S. Lee, A new design concept for offshore nuclear power plants with enhanced safety features, Nuclear Engineering and Design 254 (2013) 129-41.

T. Ishida, I. Tomiai, Development of analysis code for thermal hydrodynamics of marine reactor under multi-dimensional ship motions, RETRAN-02/GRAV, JAERI-M 91-226 (1992).

U.S. Nuclear Regulatory Commission, RELAP/MOD3 Code Manual Volume I: Code Structure, system models, and solution methods,

NUREG/CR-5535 (1998).

World Nuclear Association, http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx, (검색일: 2018. 11. 30).

Y.G. Lee, J.W. Kim, G.C. Park, Development of a thermal-hydraulic system code, TAPINS, for 10MW regional energy reactor, Nuclear Engineering and Design 249 (2012) 364-378

Y.G. Lee, G.C. Park, TAPINS: A thermal-hydraulic system code for transient analysis of a fully-passive integral PWR, Nuclear Engineering and Technology 45 (2013) 439-458.

이제희, TASS/SMR을 이용한 소형 지역난방로 REX-10의 사고해석 연구, 서울대학교, 학사학위논문 (2013)

부록 1. MARS 동적운동모델 사용법

우선 MARS 동적운동모델은 입력 파일에서 모델 옵션 '80'을 입력 시켜주면 활성화 된다. 그리고 동적운동모델을 작동하기 위해서는 'motion.inp'이라는 추가 입력 파일 작성이 필요하다. 이 추가 입력 파일을 통해서 각 노드의 개수, 상대적인 위치, 6자유도 운동 모사를 위한 동적운동 선택, 진폭과 주기 입력 등을 할 수 있다. 그림 부.1은 x축에서 횡요동 운동을 하는 마노미터 형상에 대한 'motion.inp' 파일 작성 예시이고 세부 작성 방법 및 절차는 아래와 같다.

① 운동 중심 위치를 입력한다. 운동 중심 위치를 기준으로 회전 또는 병진 운동을 하게 된다. 그림 부.1 오른쪽에 있는 마노미터의 운동 기준점을 의미하며, x/y/z축에 대하여 0.0, 0.0, 0.0으로 설정하였다.

② 전체 노드 개수를 입력한다.

③ MARS 입력파일에서 작성한 전체 노드 번호를 각각 입력한다. 그림 부.1에서는 555, 888의 번호를 갖는 2개의 TDMPVOL과 777, 779, 781의 번호를 갖는 3개의 PIPE에 대하여 입력하였다.

④ x/y/z 각 축에 대한 노드 중심의 위치를 입력한다. ①에서 입력한 운동 중심을 기준으로 각 축에 대한 노드의 상대적 위치를 입력한다. 단위는 m 이다. 그림 부.1는 x축 선상에 위치한 마노미터를 입력하였기 때문에 x축 값은 변화가 없으며, y/z축의 위치만 변화한다.

⑤ x/y/z 각 축에 대한 노드 면의 위치를 입력한다. ④와 같

은 방법으로 운동 중심을 기준으로 한 각 축의 상대적 위치를 적는다.

⑥ 동적운동에 대한 경계조건 옵션을 입력한다. 경계조건 옵션은 두 가지 방법이 있는데 사인함수옵션('1')과 사용자입력옵션('0')이다. 사인함수옵션의 직선운동은 식 (부.1)과 같이 가속도 값을 사인함수 형태로 입력한다. 회전운동은 식 (부.2)와 같이 회전에 의한 각도 값을 사인함수의 형태로 입력한다.

$$\text{직선운동 : } a_{x,y,z} = A\sin(\frac{2\pi t}{T}+\phi)+a_0 \qquad \text{(부.1)}$$

$$\text{회전운동 : } \theta^\circ = A\sin(\frac{2\pi t}{T}+\phi)+wt+\theta_0 \qquad \text{(부.2)}$$

사용자입력옵션은 표 부.1과 같이 시간에 따른 임의의 가속도 값을 사용자가 입력 할 수 있다.

표 부.1 MARS 동적운동모델 사용자입력옵션 양식

Time (s)	Angular acceleration (rad/s²)			Translational acceleration (m/s²)		
	Rolling	Pitching	Yawing	Surging	Swaying	Heaving
…	…	…	…	…	…	…

⑦, ⑧ 사인함수옵션의 회전운동, 직선운동 세부 입력 내용은 표 부-2와 같다.

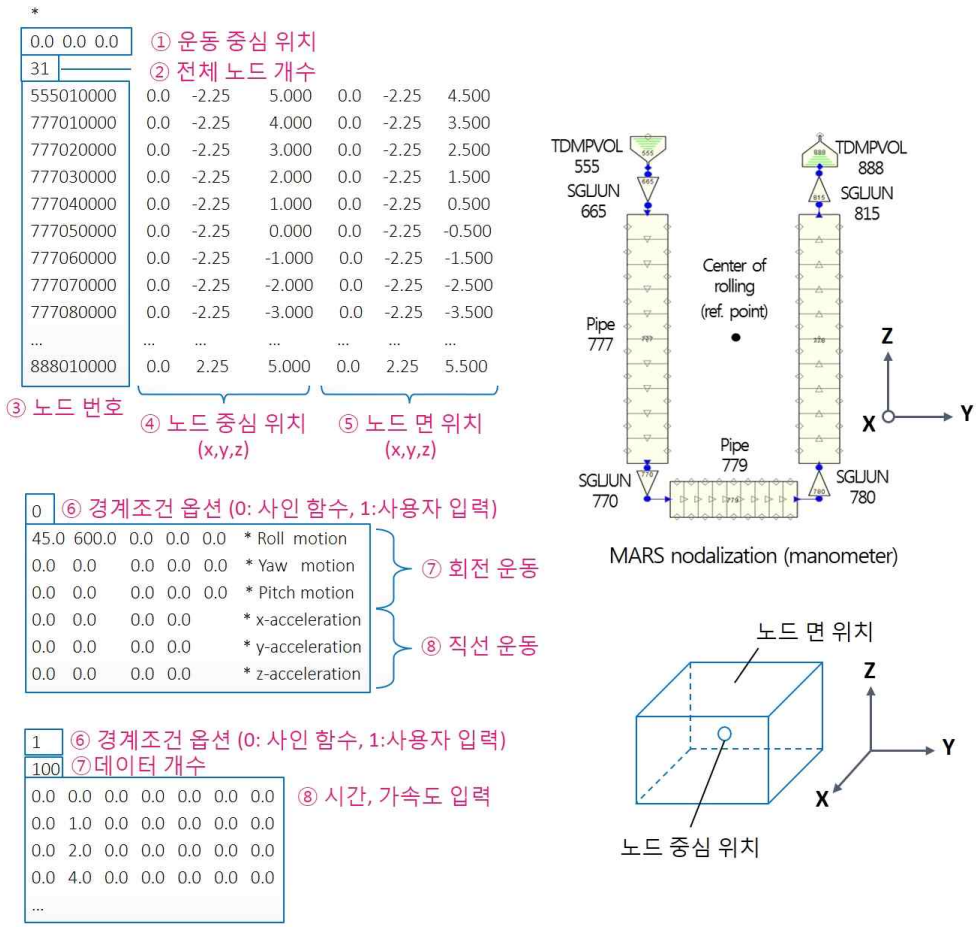


그림 부.1 motion.inp 파일 작성 예시

표 부.2 MARS 동적운동모델 사인함수옵션 입력내용

wthxA, wthxT, wthxP, wthx0, thwx0	*** Roll motion**
wthyA, wthyT, wthyP, wthy0, thwy0	*** Yaw motion**
wthzA, wthzT, wthzP, wthz0, thwz0	*** Pitch motion**
accxA, accxT, accxP, accxB	*** x-acceleration**
accyA, accyT, accyP, accyB	*** y-acceleration**
acczA, acczT, acczP, acczB	*** z-acceleration**

- wthxA : amplitude of oscillation (roll, x)
- wthyA : amplitude of oscillation (pitch, y)
- wthzA : amplitude of oscillation (yaw, z)
- wthx0 : initial constant roll speed
- wthy0 : initial constant pitch speed
- wthz0 : initial constant yaw speed
- wthxT : period of oscillation (roll, x)
- wthyT : period of oscillation (pitch, y)
- wthzT : period of oscillation (yaw, z)
- wthxP : phase angle for roll speed
- wthyP : phase angle for pitch speed
- wthzP : phase angle for yaw, speed
- thwx0 : initial roll angle
- thwy0 : initial pitch angle
- thwz0 : initial yaw angle
- accxA : mplitude of oscillation in x-acceleration (m/s/s)
- accyA : amplitude of oscillation in y-acceleration (m/s/s)
- acczA : amplitude of oscillation in z-acceleration (m/s/s)
- accxB : body acc. in x-direction (m/s/s) do not include gravity
- accyB : body acc. in y-direction (m/s/s) do not include gravity
- acczB : body acc. in z-direction (m/s/s) do not include gravity
- accxT : period of oscillation for x-acceleration (/s)
- accyT : period of oscillation for y-acceleration (/s)
- acczT : period of oscillation for z-acceleration (/s)
- accxP : phase angle for x-acceleration
- accyP : phase angle for y-acceleration
- acczP : phase angle for z-acceleration

Abstract

Improvement of dynamic motion model in MARS-KS for marine reactor thermal-hydraulic analysis

Hee Kwan Beom
Nuclear Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Unlike land-based nuclear power plants, marine or floating reactors are affected by external forces due to ocean conditions. These external forces can cause additional accelerations and affect each systems and equipments of the marine reactor. Therefore, in designing a marine reactor and evaluating its performance and stability, a thermal hydraulic safety analysis code is necessary for the

thermal hydrodynamic effects of ship motion. The purpose of this study is to evaluate the safety of marine reactors using safety analysis code. For this purpose, the dynamic motion model in MARS was verified and improved. MARS, which is a reactor system analysis code, includes a dynamic motion model that can simulate the thermal-hydraulic phenomena under three-dimensional motion by calculating the body force term included in the momentum equation. Research was conducted in three major topics to achieve the research objective. The first topic is the verification and validation of the dynamic motion model in MARS. The mathematical formulation contained in the code was confirmed and it was verified that the dynamic motion model can simulate the fluid motion in accordance with ocean conditions with reasonable accuracies. And the system scale validation for the dynamic motion model was performed by comparing the Murata's experimental results. As a Second topic, three modifications were made to the dynamic motion model; first, a user-supplied table to simulate realistic ship motions was implemented, second, the flow regime map determination algorithm was improved by calculating the volume inclination information at every time step, when the

dynamic motion model was activated, and third, revised model for the cross flow was implemented, and it can be used for the safety analysis of the downcomer. In the third topic, The capability of MARS in steady state through a single phase natural circulation experiment of RTF (REX-10 Test Facility)was validated, and the code simulated the motion condition to apply the dynamic motion model for a ship equipped with integral type reactor. And then, safety analysis to evaluate marine reactor safety in case of possible marine accidents was performed.

Keywords : Dynamic motion model
System analysis code
Marine reactor
Ocean condition
Verification and validation

Student Number : 2017-27531