



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](#)

공학석사 학위논문

해양원전 안전해석을 위한  
MARS-KS motion model의  
다차원 유동 해석능력 구현

**Implementation of multi-dimensional flow analysis  
capability in MARS-KS motion model  
for marine reactor safety analysis**

2021년 2월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
박 상 욱

해양원전 안전해석을 위한  
MARS-KS motion model의  
다차원 유동 해석능력 구현

Implementation of multi-dimensional flow analysis  
capability in MARS-KS motion model  
for marine reactor safety analysis

지도교수 조 형 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

박 상 욱

박상욱의 석사 학위논문을 인준함

2021년 2월

위 원 장

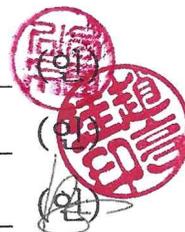
김 응 수

부 위 원 장

조 형 규

위 원

김 형 준



## 초 록

2018년 국제해사기구(IMO)는 ‘IMO 선박 온실가스 감축 초기전략’을 채택하여 선박에서 배출되는 온실가스를 2050년까지 2008년 대비 50% 감축하기 위한 계획을 수립하였다. 국제해사기구의 조치에 따라 친환경 에너지로써 해양원전을 개발하기 위한 국내·외 연구가 활발히 진행되고 있다. 산학연에서 해양원전 개발과 안전성 평가를 위한 연구가 활발히 진행됨에 따라 신규 규제 수요의 발생이 예상되며, 규제기관 차원의 독자적인 검증능력 확보를 위한 기반 연구가 요구된다. 이러한 배경에서 해양원전의 안전성 평가를 위한 MARS-KS motion model의 개선연구를 수행하였다. 연구목표는 MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력의 구현이며, 이를 위해 코드 개선, 개념문제를 통한 검증, 그리고 개선된 코드를 활용한 응용 순으로 연구를 수행하였다. 첫 번째로 MARS-KS motion model에 대해 다음과 같은 7가지 사항을 개선하였다. 사용자 친화적인 코드 구현을 위한 Volume direction unit vector 생성방법의 개선, 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정, 회전 중심에 관한 오류 수정, 매시간 단계마다 정선(Junction) 정보 업데이트, 다차원 유동을 구현하기 위한 축별 압력 수두 계산 및 연결정보 계산식의 개선, 그리고 MARS-KS motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하기 위한 개선연구를 수행하였다. 두 번째는 개선된 MARS-KS motion model에 대한 검증이다. 먼저, 서울대학교에서 MARS-KS motion model의 물

리적 모델 검증(H.K. Beom et al., 2019) 시 사용하였던 개념문제 풀이를 통해 1D 컴포넌트와 교차유동(Cross-flow)에 대한 검증을 수행하였다. 1D 컴포넌트의 검증을 위해 1차원 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 다양한 운동 조건에서 해석하였고, 이론해와 정량적으로 비교하여 코드의 적절성을 확인하였다. 다음으로 교차유동 검증을 위해 단상 조건의 1차원 수직 파이프를 교차정선(Cross-junction)으로 연결하여 강수부를 모사한 개념문제를 선정하였다. 강수부를 모사할 때, 4개 파이프로 구성된 기존 개념문제와 함께 본 연구를 통해 구현할 수 있게 된 6개 파이프와 8개 파이프 개념문제에 대한 검증을 수행하였다. 1D 컴포넌트와 교차유동 검증에 이어 MULTID 컴포넌트 검증을 위해 3차원 슬래브와 환형의 3차원 실린더 개념문제를 선정하였다. 마찬가지로 다양한 운동 조건에 따른 해석결과가 이론해를 적절하게 예측하는지 확인하였다. 또한, 3차원 슬래브를 다양한 외력이 복합적으로 작용하는 운동 조건을 적용하여 Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력을 확인하였다. 마지막 세 번째로 개선된 코드를 열수력 현상 예측에 활용하여 운동 조건에서 유동 불안정성(Flow instability)과 임계열유속(Critical Heat Flux)의 변화 거동을 검토하였다. 먼저, RELAP5 코드를 통해 2상 조건에서 유동 불안정성을 예측한 결과(M. Colombo et al., 2012)를 MARS-KS 해석결과와 비교하였다. 다음으로 MARS-KS motion model을 통해 정지 상태와 운동 조건에서 유동 불안정성으로 인해 나타나는 불안정 영역(Unstable region)을 예측·비교하였다. 유동 불안정성

에 이어, 동일한 해석모델을 사용하여 같은 열속 조건에서 동적운동에 의한 임계열유속의 변화를 확인하였다. 임계열유속이 발생하면 작동 유체에 대한 열전달 효율이 크게 감소하여 벽면 온도가 급격히 증가한다. 따라서 정지 상태와 운동 조건에서 벽면 온도를 비교하여 임계열유속의 발생 여부를 확인하였다. 이와 같은 응용 연구를 통해 개선된 코드의 활용성을 입증하였다.

.....

주요어 : 해양원전, 다차원 유동 해석, 안전해석코드, MARS-KS,  
Motion model, 해양 조건, 확인 및 검증

학 번 : 2019-26252

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 및 목적 .....	1
제 2 절 연구 범위 .....	4
제 2 장 MARS-KS motion model 개선연구 ...	6
제 1 절 Motion model 개요 .....	6
제 2 절 Motion model 개선연구 현황 .....	8
제 3 절 Motion model 개선 .....	13
1. Volume direction unit vector 생성방법 개선 .....	13
2. 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정 .....	16
3. 회전 중심에 관한 오류 수정 .....	17
4. 정선 정보의 업데이트 .....	18
5. 다차원 유동 해석능력 구현 .....	19
6. Motion model의 MULTID 컴포넌트 확장 .....	23
제 3 장 MARS-KS motion model 검증연구 ...	37
제 1 절 1D 컴포넌트 검증 .....	37
1. 마노미터의 운동 .....	38
2. 수직 파이프의 수직요동 .....	41
제 2 절 교차유동 검증 .....	43
1. 4개 파이프의 운동 .....	44
2. 6개 파이프의 운동 .....	45
3. 8개 파이프의 운동 .....	45

제 3 절	MULTID 컴포넌트 검증 .....	47
1.	3차원 슬래브의 운동 .....	47
2.	3차원 실린더의 운동 .....	52
3.	MULTID 컴포넌트 해석능력 확인 .....	55
제 4 장	MARS-KS motion model 응용연구 ...	82
제 1 절	Motion model을 통한 유동 불안정성 예측 ...	83
제 2 절	Motion model을 통한 임계열유속 예측 .....	87
제 5 장	결론 .....	99
용어설명	.....	101
참고문헌	.....	103
부록 1.	MARS-KS motion model 매뉴얼 .....	106
Abstract	.....	110
감사의 글		

## 표 목 차

[표 2.1] 사용자입력옵션 입력 양식 .....	26
[표 3.1] 마노미터 개념문제의 해석결과 .....	58
[표 3.2] 선행연구와의 마노미터 해석결과 비교 .....	58
[표 3.3] 3차원 슬래브(단상 조건) 개념문제 해석결과 ...	59
[표 3.4] 3차원 슬래브(2상 조건) 개념문제 해석결과 .....	59

## 그림 목 차

[그림 2.1] 6 자유도 운동 .....	26
[그림 2.2] MARS-KS motion model 검증 .....	27
[그림 2.3] 경사 정보에 맞는 유동양식 맵 결정 검증 ....	28
[그림 2.4] 다차원 현상 해석을 위한 교차유동 검증 .....	29
[그림 2.5] Volume direction unit vector 계산과정 .....	30
[그림 2.6] Motion model 입력자료 작성예시 .....	30
[그림 2.7] Volume direction unit vector 수동생성 .....	31
[그림 2.8] Volume direction unit vector 자동생성 .....	31
[그림 2.9] Volume direction unit vector 검증결과 .....	32
[그림 2.10] 관성력을 고려한 직선가속도 항 검증 .....	33
[그림 2.11] 회전 중심에 관한 오류 수정 검증 .....	33
[그림 2.12] 정선 정보 업데이트를 위한 개선 .....	34
[그림 2.13] 축별 압력 수두의 계산 .....	35
[그림 2.14] 축별 압력 수두의 계산 검증 .....	35
[그림 2.15] 기존 연결정보의 한계 .....	36
[그림 2.16] 연결정보 계산 방식의 개선 .....	36
[그림 3.1] 마노미터 해석모델 및 운동 조건 .....	60
[그림 3.2] 마노미터 x축 회전운동 해석결과 .....	61
[그림 3.3] 마노미터 y축 직선가속도 운동 해석결과 .....	62
[그림 3.4] 마노미터 복합운동 해석결과 .....	63

[그림 3.5] 마노미터 z축 회전운동 해석결과	63
[그림 3.6] 수직 파이프 해석모델 및 해석결과	64
[그림 3.7] 교차유동 검증 해석모델	65
[그림 3.8] 4개 파이프 개념문제 해석결과	66
[그림 3.9] 6개 파이프 개념문제 해석결과	67
[그림 3.10] 8개 파이프 개념문제 해석결과	68
[그림 3.11] 3차원 슬래브 해석모델	69
[그림 3.12] 3차원 슬래브(단상 조건) 해석결과	71
[그림 3.13] 3차원 슬래브(단상 조건) 압력분포	73
[그림 3.14] 3차원 슬래브(2상 조건) 해석결과	75
[그림 3.15] 3차원 슬래브(2상 조건) 기포율 분포	77
[그림 3.16] 3차원 실린더 해석모델	78
[그림 3.17] 3차원 실린더 개념문제 해석결과	78
[그림 3.18] MULTID 해석능력 확인 ①	79
[그림 3.19] MULTID 해석능력 확인 ②	80
[그림 3.20] MULTID 해석능력 확인 ③	81
[그림 4.1] RELAP5 해석모델	90
[그림 4.2] RELAP5 해석결과	91
[그림 4.3] MARS-KS 해석모델	92
[그림 4.4] MARS-KS 해석결과	93
[그림 4.5] 유동 불안정성 경계 비교결과	94
[그림 4.6] 정지상태 임계열유속 예측(고유량)	95
[그림 4.7] 회전운동 임계열유속 예측(고유량)	96

[그림 4.8] 정지상태 임계열유속 예측(저유량) .....	97
[그림 4.9] 회전운동 임계열유속 예측(저유량) .....	98
[그림 부.1] MARS-KS 입력 매뉴얼 발췌내용 .....	109
[그림 부.2] Motion model 입력자료 작성예시 .....	109

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경 및 목적

기후변화와 관련된 국제협약은 1992년 유엔기후변화협약 (UNFCCC)을 시작으로, 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol), 그리고 2015년 파리협정(Paris Agreement)으로 이어진다. 이러한 국제협약의 공통적인 목표는 온실가스의 배출을 규제하여 지구 온난화를 줄이는 것이다. 한편, 선박에서 배출되는 온실가스의 규제는 1997년 교토의정서에 의해 국제해사기구(IMO)로 위임되었다. 이후 국제해사기구는 1997년 해양오염방지협약(73/78 MARPOL)에서 ‘선박으로부터의 대기오염의 방지를 위한 규칙’을 제정하였고, 2018년에는 ‘IMO 선박 온실가스 감축 초기전략’을 채택하여 선박에서 배출되는 온실가스를 2050년까지 2008년 대비 50% 감축하기 위한 계획을 수립하였다. 국제해사기구의 선박 온실가스 규제조치에 발맞춰 해양원전에 대한 세계 각국의 관심은 날로 증대되고 있다. 해양원전은 친환경 에너지로써 기존 내연기관의 역할을 대신하여 선박 추진을 위한 동력원이나, 해양플랜트의 전력공급원으로 활용될 수 있으며, 충분한 핵연료만 있다면 연료 공급 없이 무제한 운용이 가능하다. 이러한 장점을 바탕으로 해양원전은 북극항로 개척, 극지 탐사, 원해 자원 채취, 오지 전력 공급 등에 다양하게 활용되어 선박 온실가스 감축, 원

전 안전성 향상, 원전 건설비용 문제 등을 해결할 수 있다.

주요 원전기술 보유국에서는 육상원전과 함께 해양원전을 사용하고 있다. 미국의 MIT에서는 연안 부유식 원자력발전소를 개념 설계(J. Buongiorno et al., 2016) 한 바 있다. 그리고 러시아는 2020년 부유식 해상원전을 세계 최초로 가동하였고, 다수의 원자력 추진 쇄빙선을 운용 중이다. 러시아에 이어 중국도 부유식 해상원전을 위한 소형원자로를 건설 중이며, 영국의 원전업체 CORE-POWER 사와 미국 원전업체인 Terra-Power 사는 2020년 선박 추진용 소형원자로 개발을 위한 국제계약을 체결하였다. 이러한 국제 기조에 맞추어 국내에서도 해양원전에 관한 연구가 진행되고 있다. 한국전력기술(KEPCO E&C)은 전기출력 60MW의 해상부유식 소형원자로 BANDI-60s를 개발 중이며 (I.H. Kim et al., 2019), 울산과학기술원(UNIST)은 2019년 초 소형원전연구단 MINERVA를 발족하여 전기출력 18MW의 초소형 해양원전 MicroUranus를 개발하고 있다(J.H. Kim et al., 2019). 산업계의 해양원전 개발과 함께 대한민국 정부에서는 해양 탐사선용 원자력 전력원, 해양 부유식 초소형원자로 기술 등을 미래 원자력 기술로 선정하고 관련 연구를 지원 중이다.

산학연에서 해양원전에 관한 연구가 활발히 진행됨에 따라 안전성 평가를 위한 신규 규제수요의 발생이 예상되며, 규제기관 차원의 독자적인 검증능력 확보를 위한 기반 연구가 요구된다. 이러한 배경에서 해양 조건에서의 원자로 계통 내 열수력 거동을 모사할 수 있는 안전해석코드를 개발하고, 해양원전의 계통안전성 평가를

위한 규제검증 기반기술을 확보하고자 본 연구를 수행하게 되었다. 안전해석코드란 원전의 과도상태나 설계기준사고에서 원자로 계통의 거동 확인을 통해 잠재적 재해를 평가할 수 있는 코드를 말하며, 원자로 인허가에 사용된다. 원자로 인허가를 위한 제반 업무와 원자력시설에 대한 안전규제를 담당하는 한국원자력안전기술원(KINS)에서는 규제검증용 계통안전해석코드로 MARS-KS를 사용 중이다. MARS-KS는 한국원자력연구원(KAERI)이 미국 원자력규제위원회(NRC)의 RELAP5/MOD3(U.S. NRC, 1998) 코드를 기반으로 개발한 코드이며(J.J. Jeong et al., 1999), 원자력 안전규제 전문기관에서 인증받은 안전해석코드지만, 육상원전용 안전해석코드로 개발되었기 때문에 해양원전의 안전해석에는 적용할 수 없다. 과도에 의한 요동은 원자로 내의 노심이나 각종 기기의 열수력 거동에 영향을 미치기 때문에 해양원전에 대한 이론, 실험 및 코드 연구가 뒷받침되어야 한다.

본 연구의 목적은 해양원전의 안전성 평가이며, MARS-KS Motion model의 다차원 유동 해석능력의 구현을 본 연구의 목표로 설정하였다. MARS-KS motion model은 Moving reactor의 안전해석을 위해 개발되었다. 하지만 초기 모델은 개발이 완료되지 않아 이를 사용하기 위해서는 많은 개선이 필요한 상황이었다. 이에 서울대학교에서는 2017년부터 MARS-KS motion model의 개선연구를 수행한 바 있으며(H.K. Beom et al., 2019), 본 연구는 선행연구에 이어서 다차원 유동 해석능력의 구현을 위한 코드 개선 및 검증연구를 수행하였다.

## 제 2 절 연구범위

연구목표인 MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력을 구현하기 위해 코드 개선연구와 함께 개념문제를 통한 검증과 응용연구를 수행하였다. 첫 번째로 MARS-KS motion model에 대해 다음과 같은 7가지 사항을 개선하였다. 사용자 친화적인 코드 구현을 위한 Volume direction unit vector 생성방법의 개선, 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정, 회전 중심에 관한 오류 수정, 매시간 단계마다 정션 정보 업데이트, 다차원 유동을 구현하기 위한 축별 압력 수두 계산 및 연결정보 계산식의 개선, 그리고 MARS-KS motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하였다.

두 번째는 개선된 MARS-KS motion model에 대한 검증이다. 개선된 코드에 대한 체계적 검증을 위해 1D 컴포넌트, 교차유동, 그리고 MULTID 컴포넌트 분야로 나누어 연구를 진행하였으며, 선정된 개념문제의 이론해와 해석결과를 정량적으로 비교하여 코드의 적절성을 확인하였다. 먼저, 1차원 해석능력 확인을 위한 1D 컴포넌트 검증을 위해 서울대학교에서 MARS-KS motion model의 물리적 모델 검증(H.K. Beom et al., 2019) 시 사용되었던 개념문제를 선정하였다. 1차원 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 다양한 운동 조건에서 해석하였고, 이론해와 정량적인 비교를 통해 1D 컴포넌트에서 Motion model이 적절하게 구현되었음을 확인하였다. 다음으로 교차유동 검증을 위해 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)에서 1차원 수직 파이프를 교차정션으로 연결하여

강수부를 모사한 개념문제를 선정하였다. 선행연구에서는 강수부를 모사할 때 2상 조건의 4개 파이프를 사용했지만, 본 연구에서는 단상 조건의 4개 파이프와 함께 6개 파이프 및 8개 파이프 개념문제를 추가하였다. 마지막으로 MULTID 컴포넌트 검증을 위해 3차원 슬래브와 환형의 3차원 실린더 개념문제를 선정하였다. 개념문제는 단상 조건과 2상 조건을 모두 포함하고 있으며, 다양한 운동 조건에서 해석결과가 이론해를 적절하게 예측하는지 확인하였다. 이를 통해 1D 컴포넌트와 함께 MULTID 컴포넌트에서 Motion model이 적절하게 구현되었음을 검증하였다. 또한, 3차원 슬래브를 다양한 외력이 복합적으로 작용하는 운동 조건을 적용하여 Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력을 확인하였다.

세 번째로 개선된 코드를 열수력 현상 예측에 활용하여 운동 조건에서 유동 불안정성과 임계열유속의 변화 거동을 검토하였다. RELAP5 코드를 통해 2상 조건에서 유동 불안정성을 예측한 결과(M. Colombo et al., 2012)를 MARS-KS 해석결과와 비교한 다음, MARS-KS motion model을 통해 정지 상태와 운동 조건에서 유동 불안정성으로 인해 나타나는 불안정 영역(Unstable region)을 예측·비교하였다. 이어서 동일한 해석모델을 활용하여 같은 열속 조건에서 동적운동에 의한 임계열유속의 변화를 살펴보았다. 임계열유속이 나타나면 작동 유체에 대한 열전달 효율이 크게 감소하여 벽면 온도가 급격히 증가한다. 따라서 정지 상태와 운동 조건에서 벽면 온도를 비교하여 임계열유속의 발생 여부를 확인하였다.

## 제 2 장 MARS-KS motion model 개선연구

### 제 1 절 Motion model 개요

MARS-KS는 한국원자력안전기술원에서 사용 중인 규제검증용 계통안전해석코드이다. MARS-KS에는 해양원전의 안전해석을 위한 Motion model이 포함되어 있으며, 이는 식 (2-1)과 같이 체적항이 수정된 운동량 보존 방정식을 통해 운동 조건에 의한 외력을 계산할 수 있다. MARS-KS motion model은 그림 2.1과 같이 직각좌표계에서 축별 회전운동과 병진운동으로 구분되는 6 자유도 운동을 모사한다. 6 자유도에 따른 동적운동은 각 축에 대한 가속도 형태로 나타나며, 가속도 성분은 중력가속도와 함께 직선운동에 의해 나타나는 직선가속도, 회전운동에 의한 접선 방향 오일러가속도와 구심가속도로 구성되어 있다.

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) \\ & = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \left( g - \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{D\Omega}{Dt} \times r + \Omega \times (\Omega \times r) \right) \end{aligned} \quad (2-1)$$

또한, Motion model에서는 3차원 회전형렬을 사용하여 회전운동에 의한 볼륨의 위치를 계산하며, 볼륨의 위치 정보는 외력 계

산을 위한 회전 반경 등으로 사용된다. 3차원 회전행렬은 직각좌표계의 3축을 회전축으로 하며, 양의 회전은 오른손 엄지를 축의 양의 방향으로 놓았을 때 나머지 손가락이 향하는 방향이다. 3차원 회전행렬은 교환법칙이 성립하지 않기 때문에 축의 회전 순서에 따라 다른 결과가 산출된다. MARS-KS motion model은 x축, y축, z축 순으로 회전시킨 3차원 회전행렬을 사용하며, 행렬식은 식 (2-2)와 같다.  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ 은 각각 x, y, z축 중심의 회전각을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 & [M_z][M_y][M_x] \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (2-2)
 \end{aligned}$$

그리고 MARS-KS motion model에는 2가지 운동 조건 입력 방식이 내장되어 있다. 첫 번째는 규칙적인 거동을 모사하기 위한 사인함수 입력방식이다. 이를 통해 사인함수 형태의 진폭을 갖는 직선운동과 회전운동을 구현할 수 있다. 직선운동의 경우, 식 (2-3)을 통해 직선가속도를 계산하며,  $a_{x,y,z}$ ,  $A$ ,  $T$ ,  $\phi$ ,  $a_0$ 은 순서대로 축별 가속도, 진폭, 주기, 위상각, 그리고 초기 가속도를 말한다. 회전운동의 경우에는 식 (2-4)를 통해 회전각을 계산하며,  $\theta_{x,y,z}$ ,  $\omega$ ,  $\theta_0$ 는 축별 회전각, 각속도, 그리고 초기 경사각을 말한다. 두 번째는 시간에 따라 임의의 가속도를 입력할 수 있는 사용

자입력옵션(User-supplied table) 입력방식이며, 표 2.1과 같이 시간에 따른 축별 각가속도 및 직선가속도를 바탕으로 구현된다. 본 옵션 기능을 통해 실제 선박의 불규칙한 움직임을 모사할 수 있다.

$$a_{x,y,z} = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) + a_0 \quad (2-3)$$

$$\theta_{x,y,z} = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) + \omega t + \theta_0 \quad (2-4)$$

## 제 2 절 Motion model 개선연구 현황

초기 Motion model은 개발이 완료되지 않아, 이를 사용하기 위해서는 많은 개선이 필요한 상황이었다. 사용자입력옵션은 옵션 환경만 존재할 뿐 개발이 이루어지지 않아 사용이 불가능하였고, 교차유동과 같은 다차원 유동의 해석 및 MULTID 컴포넌트에서 Motion model이 구현되지 않았다. 이에 서울대학교 원자핵공학과 열수력연구실에서는 2017년부터 MARS-KS motion model의 개선연구를 수행하였다(H.K. Beom et al., 2019).

2017년부터 2019년까지 서울대학교에서 수행된 MARS-KS motion model 개선연구는 크게 3가지 분야로 진행되었다. 첫 번째는 MARS-KS motion model의 검증이다. Motion model의 물리적 모델을 검증하기 위해 그림 2.2-(a)와 같이 1차원 마노미터, 폐쇄루프(Closed loop), 1D 컴포넌트로 구현된 3차원 마노미

터, 그리고 수직 파이프로 구성된 개념문제를 선정하였다. 모든 개념문제의 운동 조건은 사인함수 입력방식을 통해 규칙적인 운동을 모사하였다. 마노미터의 운동 조건은 회전각의 진폭이  $45^\circ$ , 주기가 600 초인 x축 회전운동과  $10 \text{ m/s}^2$  조건의 y축 직선가속도 운동, 그리고 회전운동과 직선가속도 운동을 동시에 적용한 복합운동을 적용하였다. 폐쇄루프의 운동 조건은 회전각의 진폭이  $180^\circ$ , 주기가 600 초인 x축 회전운동, 3차원 마노미터의 운동 조건은 회전각의 진폭이  $30^\circ$ , 주기가 600 초인 x축 회전운동을 적용하였다. 마지막 수직 파이프는 가속도의 진폭이  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 주기가 600 초인 직선 주기 운동 조건을 적용하였다.

Motion model을 검증하기 위해 개념문제의 이론해와 MARS-KS 해석결과를 정량적으로 비교하였으며, 그림 2.2-(b)와 같이 MARS-KS 해석결과가 이론해를 적절하게 예측하였다. 마노미터, 폐쇄루프, 그리고 3차원 마노미터 개념문제는 운동 조건에 따른 수위 변화를 확인하였고, 수직 파이프 개념문제는 직선 주기 운동 조건에서 하단 볼륨의 압력 변화를 확인하였다. 다만, 그림 2.2-(b)의 수직 파이프 해석결과는 운동 방향과 반대의 압력 변화를 나타내고 있으나, 이는 유체에 작용하는 관성력이 반영되지 않았기 때문이며, 본 연구에서 간단한 계산식 수정을 통해 개선하였다. 개념문제를 통해 MARS-KS motion model의 물리적 모델을 검증하였으며, 운동 조건에 따라 외력의 계산과 체적의 위치 변환이 적절하게 계산되는 것을 확인하였다.

두 번째는 MARS-KS motion model의 3가지 개선연구이다.

먼저, 사용자입력옵션을 구현하였다. 초기 Motion model에서는 가속도 입력 환경만 존재할 뿐 임의의 시간에 따른 가속도를 산출하여 외력을 계산하는 과정은 개발되지 않은 상태였다. 이에 따라 입력된 시간-가속도 데이터 값으로부터 선형내삽법을 통해 임의의 시간에서의 가속도를 산출하고, 이를 통해 외력을 계산하도록 코드를 개선하여 사용자입력옵션을 구현하였다. 다음으로 볼륨의 경사 정보에 맞는 유동양식 맵이 결정되도록 계산과정의 알고리즘을 수정하였다. 2상유동에서는 유동 방향에 따라 액체와 기체가 흐르는 형태인 유동양식이 다르게 나타난다. MARS-KS에는 수평 유동양식 맵과 수직 유동양식 맵이 내장되어 있으며, 볼륨의 경사가  $45^\circ$  이하면 수평 유동양식 맵,  $45^\circ$  를 초과하면 수직 유동양식 맵을 적용한다. 하지만 코드 개선 전 유동양식 맵의 결정은 초기 경사 정보에 의해서 한 번만 이루어지므로, 운동 조건에 의해 변경된 볼륨의 경사 정보를 반영하지 못한다. 기존 계산과정의 알고리즘을 개선하여 매시간 단계마다 볼륨의 경사 정보를 통한 유동양식 맵의 결정이 이뤄지도록 하였다. 개선된 코드를 다음과 같은 개념문제로 검증하였다. 1차원 수평 파이프의 액체 및 증기 입구 유량은 각각  $1 \text{ kg/s}$ 이며, 100 초 동안 정상상태에 도달한 후 60 초 동안 수직으로 회전하였을 때 압력과 기포율의 거동을 확인하였다. 그림 2.3과 같이 개선 전에는 적절한 해석결과를 얻을 수 없었지만, 개선 후에는 파이프의 회전에 따라 압력과 기포율이 수평 파이프의 값에서 수직 파이프의 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 마지막 개선사항으로 다차원 현상 해석을 위한 교차

유동의 기초를 마련하였다. 초기 Motion model은 원자로의 노심이나 강수부와 같이 주 유동 방향이 아닌 방향의 유동 흐름인 교차유동이 존재할 경우 해석이 불가하였다. 이를 개선하기 위해 교차유동 방향을 인식할 수 있도록 계산식을 추가하고, 운동 조건에 따른 중력항의 변화를 반영하였다. 개선된 코드는 그림 2.4-(a)와 같이 2상 조건의 4개 파이프를 교차정선으로 연결하여 강수부를 모사한 개념문제를 통해 검증하였으며, 운동 조건은  $45^\circ$  정지 경사와  $30^\circ$  회전운동을 적용하였다. Motion model을 통한 해석결과는 그림 2.4-(b)와 같다. 코드 개선 전, 정지 경사 조건에서는 해석결과가 이론해를 예측하지 못하였으며, 회전운동의 경우 동적운동이 모사되지 않았다. 하지만 코드 개선 후에는 정지 경사와 회전운동 조건에서 해석결과가 이론해를 적절하게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 서울대학교에서 수행된 MARS-KS motion model 개선연구에서는 단상 자연대류 실험장치인 RTF(REX-10 Test Facility)에 대한 검증 및 응용 계산이다. REX-10은 지역난방 및 해수 담수화 등을 목적으로 서울대학교에서 개념설계된 열출력 10 MW의 일체형 원자로이며, RTF는 REX-10의 축소모형 실험장치이다(Y.G. Lee et al., 2012). 먼저, MARS-KS의 해석능력을 검증하기 위해 정상상태에서의 해석결과와 실험값을 비교한 다음, 정지 경사 및 회전운동 조건을 적용하여 운동 조건에서 유량 및 노심 온도 등의 변화 거동을 예측하였다. 또한, 일체형 원자로를 탑재한 선박의 전복 상황을 가정하여 수직의 RTF가 수평 상태를

가 되었을 때 노심 온도 등의 변화 거동을 예측하였다.

MARS-KS motion model 개선연구(H.K. Beom et al., 2019)를 통해 사용자입력옵션, 매시간 볼륨의 경사 정보에 따른 유동양식 맵 결정, 그리고 교차유동의 구현 등 많은 부분이 개선되었지만, 다음과 같은 다차원 유동 해석능력의 한계가 존재한다. 교차유동이 일반화되지 않아서 수직 파이프 등 일부 모델의 해석만 가능하며, 무엇보다 MULTID 컴포넌트에 대한 Motion model의 개발이 고려되지 않았다. MARS-KS는 1차원 시스템 해석을 위한 1D 컴포넌트(One-dimensional component)와 3차원 현상 해석을 위한 다차원 컴포넌트(Multi-dimensional component, 이하 MULTID 컴포넌트)로 구성되어 있다. 운동에 따른 영향은 3차원 공간에서 일어나며, 해양원전의 일부 구성 요소에서는 다차원 흐름이 지배적이기 때문에 해상원전의 안전해석을 수행하기 위해서는 MARS-KS의 1D 컴포넌트와 3차원 해석을 위한 MULTID 컴포넌트에 모두 적용할 수 있는 Motion model이 요구된다. 이에 따라 MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력의 구현을 위한 코드 개선연구를 수행하였다.

## 제 3 절 Motion model 개선

본 연구의 궁극적인 목적은 해양원전의 안전성 평가이며, MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력 구현을 연구 목표로 설정하였다. 이를 위해 다음과 같이 7가지 사항을 개선하였다. 사용자 친화적인 코드 구현을 위한 Volume direction unit vector 생성방법의 개선, 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정, 회전 중심에 관한 오류 수정, 매시간 단계마다 정션 정보 업데이트, 다차원 유동을 구현하기 위한 축별 압력 수두 계산 및 연결정보 계산식의 개선, 그리고 MARS-KS motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하기 위한 개선연구를 수행하였다.

### 1. Volume direction unit vector 생성방법의 개선

본 연구에서 볼륨의 경사를 나타내는 단위벡터를 Volume direction unit vector로 정의하였다. 이는 Motion model을 사용하기 위한 입력자료인 ‘indta.motion.inp’를 통해 생성되며, 볼륨의 유동양식 맵을 결정하기 위한 경사 정보에 사용된다. Volume direction unit vector를 통해 동적운동 시 매시간 변하는 볼륨의 경사 정보를 확인할 수 있으며, 이를 위한 계산과정은 그림 2.5와 같이 3차원 회전행렬을 통해 이루어진다.

본 연구를 통해 Volume direction unit vector의 생성방법을

개선하여 사용자 친화적인 코드를 구현하였다. 기존 코드에서 Volume direction unit vector를 생성하는 과정은 다음과 같다. Motion model을 사용하기 위한 입력자료인 'indta.motion.inp'에는 그림 2.6과 같이 회전 중심좌표, 총 볼륨 수 등 다양한 정보와 함께 모든 볼륨의 중심좌표 및 유동이 나가는 방향의 볼륨면 중심좌표가 입력된다. Motion model에서는 입력된 두 점의 좌표를 통해 그림 2.7과 같이 볼륨의 경사를 나타내는 벡터를 생성하고, 크기가 1이 되도록 정규화(Normalization)하여 Volume direction unit vector를 정의한다. 기존과 같이 입력된 볼륨 좌표를 통해 Volume direction unit vector를 수동생성하는 방법은 단순하고 직관적이지만, 사용자에게 친화적이지 않다. Motion model을 사용하기 위해 해석모델을 구성하는 모든 볼륨의 좌표를 입력해야 하므로, 과도한 입력자료와 입력 오류로 인한 문제가 나타나기 쉽다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 Volume direction unit vector가 자동생성되도록 그림 2.8과 같이 생성방법을 개선하였다. 먼저, x축 방향의 크기가 1인 벡터를 기본으로 둔다. 다음, y축 중심의 회전을 통해 벡터를 볼륨의 경사각만큼 회전시킨다. 이때, y축의 양의 값에서 음의 값을 보았을 때 반시계방향인 양의 회전 방향이므로, 반대 방향의 회전이 이뤄지도록 경사각에 음의 부호를 붙여야 한다. 이후 볼륨의 방위각만큼 z축 중심 회전을 하게 되면 Volume direction unit vector가 생성된다. 이러한 생성방법의 개선을 통해 Volume direction unit vector는 볼륨의 좌

표 정보 없이 자동생성이 가능하다. 다만, 이와 별개로 볼륨의 위치 정보를 제공하기 위해 볼륨 중심좌표 입력은 계속 요구된다.

Volume direction unit vector를 자동생성하기 위해 MARS-KS 코드를 다음과 같이 개선하였다. 먼저, ReadNewProblemM 모듈에서 기존의 수동생성 계산식과 유동이 나가는 방향의 볼륨면 중심좌표 항목을 삭제하였다. 다음, 볼륨 정보가 저장되는 ReadComponentM 모듈에서 볼륨의 방위각과 경사각을 'angle1' 과 'angle2' 의 새로운 변수에 저장하였다. 이러한 각 정보는 ReadNewProblemM 모듈에서 새로 정의된 3차원 회전행렬의 회전각으로 사용된다. 코드 개선을 통해 Volume direction unit vector를 자동생성하고, Motion model을 위한 입력자료를 간소화하였다.

개선된 코드를 다음과 같이 검증하였다. MARS-KS motion model에서  $60^\circ$  의 경사 파이프를 구현하는 방법은 2가지가 있다. 첫 번째는 수직 파이프를  $30^\circ$  만큼 회전시키는 방법이며, 이때 생성되는 Volume direction unit vector는  $90^\circ$  의 경사각을 가진 후 운동 조건에 의해  $60^\circ$  경사로 회전한다. 두 번째는 입력조건에서  $60^\circ$  의 볼륨 경사각을 입력하는 방법이며, 이때 Volume direction unit vector는 입력된 볼륨 경사각에 의해  $60^\circ$  경사를 가진 단위벡터로 자동생성된다. Motion model을 통해 파이프 하단과 상단 볼륨의 압력 차를 확인하였으며, 해석결과는 그림 2.9 와 같다. 그래프에서 검은색 삼각형 표식은 첫 번째 방법을 통해 구현된 기울어진 파이프의 해석결과이며, 빨간색 역삼각형 표식은

두 번째 방법을 통한 해석결과이다. 그리고 초록색 실선은 이론해를 말한다. 첫 번째 방법과 두 번째 방법으로 구현된 파이프의 해석결과가 동일하고, 모든 해석결과가 이론해와 일치함에 따라 개선된 코드를 통해 적절한 Volume direction unit vector가 자동 생성됨을 확인하였다.

## 2. 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정

본 연구를 통해 유체에 관성력이 계산되도록 직선가속도 항을 수정하였다. Motion model의 운동량 보존 방정식에는 좌표계의 직선운동을 계산하기 위한 직선가속도 항이 포함되어 있다. 하지만 기존의 직선가속도 항에서는 외력의 반대 방향으로 작용하는 유체의 관성력이 반영되지 않았으며, 따라서 실제 현상과 반대의 해석결과가 도출되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같이 MARS-KS 코드를 개선하였다. 볼륨의 가속도 계산식이 포함된 ExtraProcedure 모듈에서 직선가속도 항의 부호를 수정하여 유체의 관성력을 반영하였다.

개선된 코드를 검증하기 위해 1차원 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 선정하였다. 그림 2.10-(a)와 같이 물이 절반만 차 있는 1차원 마노미터가 y축 방향 직선가속도 운동을 하게 되면 관성력에 의해 가속도의 반대 방향으로 유체가 이동한다. 코드 개선 전에는 관성력이 반영되지 않아 가속도의 방향과 유체의 이동 방향이 같지만, 개선 후에는 실제 현상과 같이 가속도의 반대 방

향으로 유체가 이동하는 것을 볼 수 있다. 수직 파이프 개념문제는  $z$ 축 방향 직선 주기 운동을 적용하였으며, 가속도의 진폭은  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 주기는 100 초이다. 파이프 하단과 상단 볼륨의 압력 차를 확인하였으며, 해석결과는 그림 2.10-(b)와 같다. 코드 개선 후에는 가속도의 방향에 따른 적절한 압력이 계산되었다.

### 3. 회전 중심에 관한 오류 수정

본 연구를 통해 회전 중심을 고려한 볼륨의 좌표 계산식의 오류를 개선하였다. MARS-KS motion model에서는 다음과 같이 회전 중심에 대한 볼륨의 상대 위치를 계산하여 적절한 회전운동을 구현한다. Motion model을 사용하기 위한 입력자료인 'indta.motion.inp'에는 회전 중심과 볼륨 중심의 좌표 정보가 포함되어 있다. 해당 좌표 정보는 볼륨의 상대 위치를 계산하기 위한 평행이동 계산식에 사용되며, 계산식은 ReadNewProblemM 모듈에서 정의된다. 기존 평행이동 계산식에 부호의 오류가 있었으며, 개념문제를 통해 이를 확인할 수 있다. 그림 2.11과 같이 물이 절반만 차 있는 마노미터에 왼쪽 파이프를 회전축으로 하는  $z$ 축 회전운동을 적용하면 구심가속도에 의해 오른쪽 파이프의 수위가 증가해야 한다. 하지만 개선 전 코드에서는 평행이동 계산식의 오류로 인해 반대의 결과를 확인할 수 있다. 평행이동 계산식의 오류를 개선한 후 동일한 개념문제를 해석한 결과, 운동 조건에 따른 적절한 해석결과를 확인할 수 있다.

## 4. 정선 정보의 업데이트

운동 조건에 의해 해석모델이 회전하게 되면 해석모델을 구성하는 볼륨과 정선 정보가 달라진다. 먼저, 볼륨의 경우에는 운동 조건에 의해 경사 정보가 달라지며, 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)를 통해 경사 정보에 맞는 볼륨의 유동양식 맵이 결정되도록 코드가 개선된 바 있다. 다음으로 정선의 경우에는 경사 정보와 함께 정선으로 연결된 볼륨 간의 거리 및 방향 정보가 달라진다. 따라서 본 연구를 통해 운동 조건에 의해 달라지는 정선 정보가 업데이트되도록 새로운 알고리즘을 추가하였다.

먼저, 정선의 경사 정보에 따라 유동양식 맵을 결정하도록 개선하였다. MARS-KS에는 정선의 수평 유동양식 맵과 수직 유동양식 맵이 내장되어 있으며, 정선의 경사 정보에 따라 적절한 유동양식 맵을 결정한다. 정선의 경사가  $30^\circ$  이하면 수평 유동양식 맵,  $60^\circ$  이상이면 수직 유동양식 맵을 결정하며,  $30^\circ$  와  $60^\circ$  사이는 수직과 수평 유동양식 맵의 내삽 영역이다. 하지만 정선 유동양식 맵의 결정은 초기 경사 정보에 의해 한 번만 이루어지므로, 운동 조건에 의해 변경된 정선의 경사 정보를 반영하지 못한다. 이러한 문제를 개선하기 위해 그림 2.12과 같이 MARS-KS를 개선하였다. 먼저, `updateJunctionProperty`라는 새로운 서브루틴을 정의하여, 정선의 경사 정보를 통한 유동양식 맵의 결정이 이뤄지도록 코드를 구성하였다. 그리고 이러한 계산과정이 매시간 단계마다 이뤄지도록 `ExtraProcedure` 모듈에서 `updateJunction`

-Property 서브루틴을 불러오도록 하였다. ExtraProcedure 모듈에서는 매시간 단계마다 운동 조건에 의한 외력 계산이 수행되므로, updateJunctionProperty 서브루틴에서도 마찬가지로 매시간 단계마다 정선의 경사 정보를 통해 유동양식 맵을 결정하게 된다.

다음으로 운동 조건에 의해 달라지는 볼륨 간의 거리 및 방향 정보를 업데이트하기 위해 updateJunctionProperty 서브루틴에 연결정보 계산식을 추가하였다. 연결정보는 본 연구를 통해 정의된 용어이며, 정선으로 연결된 볼륨 간의 거리 및 방향 정보를 말한다. 연결정보 계산식을 updateJunctionProperty 서브루틴에 추가함으로써 정선의 경사 정보와 함께 매시간 단계마다 볼륨 간의 거리 및 방향 정보를 계산하도록 하였다. 또한, 기존의 연결정보 계산식 대신 새로운 계산식을 개발하였으며, 구체적인 내용은 다음 절인 다차원 유동 해석능력 구현에서 다루고자 한다. 이와 같은 개선을 통해 Motion model에서 적절한 정선 정보가 지속 반영할 수 있도록 하였다.

## 5. 다차원 유동 해석능력 구현

본 연구는 해양원전의 안전성 평가를 위해 MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력 구현을 목표로 수행되었다. 이를 위해 축별 압력 수두 계산 및 연결정보 계산식의 개선을 구현하였다. 첫 번째로 기존 Motion model에서 중력가속도 방향으로만 계산할 수 있었던 압력 수두를 모든 축 방향으로 확장하였다.

Motion model에서는 밀도와 가속도, 그리고 길이 성분의 곱으로 압력 수두를 계산한다. 기존 코드에서는 그림 2.13과 같이 밀도, 가속도 성분인 NetGrav, 그리고 볼륨의 z축 방향 길이를 통해 중력가속도 방향에 국한된 압력 수두를 계산한다. NetGrav는 축별 가속도 성분과 Volume direction unit vector의 내적값이다. 다차원 유동 해석능력을 구현하기 위해서는 축별 압력 수두의 계산이 요구되며, 따라서 MARS-KS 코드를 다음과 같이 개선하였다. 압력 수두의 계산이 이루어지는 HydroSolveM 모듈에서 기존의 NetGrav 및 z축 방향의 길이 대신 그림 2.13과 같이 축별 가속도 및 축별 길이 성분을 통해 압력 수두를 계산하도록 하였다. 개선된 계산식을 통해 중력가속도 방향뿐만 아니라 모든 축 방향에 대한 압력 수두 계산이 가능하다.

개선된 코드를 검증하기 위해 그림 2.14와 같이 물이 절반만 차 있는 4개의 파이프를 교차정선으로 연결하여 강수부를 모사한 개념문제를 선정하였다. y축 방향 직선가속도 운동을 모사했을 때 기존 코드에서는 y축 방향 압력 수두가 계산되지 않아서 파이프 간 수위 차가 발생하지 않지만, 코드 개선 후에는 y축 방향 압력 수두가 계산되어 직선가속도에 의한 파이프 간 수위 차가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

두 번째로 연결정보 계산식을 개선하였다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 연결정보를 연결된 볼륨 간의 거리 및 방향 정보로 정의하였으며, 이는 축별 압력 수두 계산식의 거리 성분으로 사용된다. 초기 모델에서는 볼륨의 길이 성분만으로 연결정보를

계산하였다. 이를테면 횡 방향으로 연결된 볼륨 간의 거리는 두 볼륨의 반지름 합을 통해 구할 수 있다. 그러나 초기 모델에 적용된 연결정보 계산식은 Motion model에 적합하지 않다. 동적운동 시 볼륨의 길이 성분은 운동 조건에 따라 달라지는데, 이를 반영하지 못하기 때문이다. 예를 들어 y축 방향으로 연결된 볼륨이 x축 회전운동을 하게 되면 y축 방향으로 연결된 길이는 줄어들고, z축 방향의 길이는 증가한다. 연결정보가 운동 조건에 따라 변하였지만, 기존 코드에서는 처음 입력된 볼륨의 길이 성분이 연결정보로 사용된다. 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)에서 이러한 문제를 개선하여 Motion model에 적합한 연결정보 계산식을 구현하였다. 개선된 계산식에서는 초기에 사용하였던 볼륨 길이 성분에 Volume direction unit vector를 곱하여, 운동 조건이 반영된 볼륨의 길이 성분을 연결정보로 사용하였다. 하지만 이는 축 방향의 볼륨 연결만 가능하다는 한계가 있다. 볼륨의 길이 성분은 그림 2.15와 같이 직각좌표계 기반이기 때문에 축 방향으로 연결된 볼륨 간의 거리 및 방향 정보는 계산할 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 계산할 수 없다. 예를 들어 4개 파이프를 교차정선으로 연결하여 강수부를 모사한 개념문제와 같이 축 방향으로 볼륨이 연결된 경우는 연결정보의 계산이 가능하지만, 6개 파이프 개념문제와 같이 볼륨 간의 연결 방향이 축 방향과 일치하지 않는 경우에는 연결정보를 계산할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위해 볼륨의 길이 성분을 사용하지 않는 새로운 연결정보 계산식을 구현하였다. 새로운 계산식에서는

연결된 두 볼륨 중심좌표 사이의 벡터를 생성하여, 볼륨 간의 거리 및 방향인 연결정보를 구한다. 이때 사용되는 볼륨의 중심좌표는 Motion model을 사용하기 위한 입력자료인 'indta.motion.inp'에 이미 포함된 정보이므로 코드 개선을 위해 별도로 입력이 요구되는 사항은 없다. 또한, 볼륨의 길이 성분을 사용하지 않기 때문에 축 방향의 볼륨 연결만 가능했던 문제를 해결하여, 다차원 유동 해석능력을 위한 일반화를 구현하였다.

두 볼륨의 중심좌표로 생성된 벡터를 연결정보로 사용하기 위해서는 다음과 같은 과정이 추가로 요구된다. MARS-KS는 연결정보를 계산할 때, 유동이 나가는 볼륨과 유동이 들어가는 볼륨을 분리하여 계산한다. 그림 2.16에서 빨간색으로 표시된 선은 유동이 나가는 볼륨의 연결정보이며, 파란색 선은 유동이 들어오는 볼륨의 연결정보이다. 기존에는 각각의 볼륨에서 연결정보를 계산하였지만, 개선된 계산식에서는 연결된 볼륨 간의 거리 및 방향 정보를 한 번에 계산하므로, 이를 분리하기 위한 별도의 과정이 필요하다. 유동이 나가는 볼륨과 유동이 들어오는 볼륨 각각의 연결정보를 정의하기 위해 볼륨의 중심좌표로 생성된 벡터를 연결된 볼륨의 길이 비를 통해 분리한다. 모든 볼륨의 길이는 MARS-KS를 사용하기 위한 입력자료인 'indta'에 포함된 정보이므로, 마찬가지로 코드 개선을 위해 별도로 입력이 요구되는 사항은 없다.

연결정보 계산식의 개선을 위해 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)를 통해 구현된 MARS-KS motion model을 다음과 같이 수정하였다. 먼저, ExtraProcedure 모듈에서 정의된 기존 연결정

보 계산식을 삭제하였다. 다만, 중력가속도 방향의 계산식은 연결 정보 외에 볼륨의 유동양식 맵을 결정하기 위한 경사 정보로 사용되므로 기존 식을 유지하였다. 다음으로 새로운 연결정보 계산식을 updateJunctionProperty 서브루틴에서 정의하였다. 해당 서브루틴에서 계산식을 정의한 이유는 볼륨 간의 연결이 정션 컴포넌트를 통해 구현되므로 정션 정보에 포함하는 것이 적합하고, updateJunctionProperty 서브루틴을 통해 매시간 단계마다 계산을 수행할 수 있기 때문이다. 개선된 코드의 검증은 제3장 MARS-KS motion model 검증연구를 통해 확인할 수 있다.

## 6. Motion model의 MULTID 컴포넌트 확장

MARS-KS motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하기 위한 개선연구를 수행하였다. MARS-KS는 1차원 시스템 해석을 위한 1D 컴포넌트와 3차원 현상 해석을 위한 MULTID 컴포넌트로 구성되어 있다. 운동에 따른 영향은 3차원 공간에서 일어나며, 해양원전의 일부 구성 요소에서는 다차원 흐름이 지배적이다. 따라서 해상원전의 안전해석을 수행하기 위해서는 MARS-KS의 1D 컴포넌트와 함께 3차원 해석을 위한 MULTID 컴포넌트에 대한 Motion model의 해석능력이 요구된다. 1D 컴포넌트와 MULTID 컴포넌트를 해석하기 위한 Motion model이 서로 독립적이지 않으므로 모든 컴포넌트를 고려한 연구를 수행하게 되었다.

MARS-KS motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하기 위한 개선연구는 다음과 같다. 먼저 앞서 서술한 MARS-KS motion model의 모든 개선사항이 MULTID 컴포넌트에도 적용되도록 하였다. 기본적으로 1D 컴포넌트와 MULTID 컴포넌트에 적용되는 Motion model은 독립적이지 않기 때문에 MARS-KS 코드를 수정하면 별도의 조치 없이 개선된 코드를 통한 MULTID 컴포넌트의 해석이 가능하다. 관성력을 고려한 직선가속도 항 수정, 회전 중심에 관한 오류 수정, 매시간 단계마다 정션 정보 업데이트, 축별 압력 수두 계산, 연결정보의 개선이 이에 해당한다. 하지만 Volume direction unit vector 생성방법의 개선을 MULTID 컴포넌트에서 구현하기 위해서는 다음과 같은 별도의 과정이 요구된다. 앞서 설명한 바와 같이 개선된 Volume direction unit vector는 x축 방향의 크기가 1인 벡터를 볼륨의 방위각 및 경사각만큼 3차원으로 회전시켜 자동생성된다. 이를 위해 ReadNewProblemM 모듈에서 3차원 회�행렬을 사용한 자동생성 계산식을 정의하고, 볼륨 정보가 저장되는 ReadComponentM 모듈에서 볼륨의 방위각과 경사각을 'angle1' 과 'angle2' 의 새로운 변수에 저장한 후 ReadNewProblemM 모듈에서 이를 불러와 자동생성 계산식의 회전각으로 사용한다. MULTID 컴포넌트에서도 같은 방법을 통해 Volume direction unit vector의 자동생성을 구현하였다. 먼저, ReadNewProblemM에 저장된 3차원 회전 계산식은 컴포넌트의 종류와 무관하게 사용할 수 있으므로 1D 컴포넌트와 계산식을 공유한다. 다음, 회전각으로 사용되는 볼륨의

방위각 및 경사각은 컴포넌트별로 분리되어 있으므로 ReadComponentM 모듈에서 MULTID 컴포넌트의 방위각과 경사각을 ‘angle1’ 과 ‘angle2’ 의 새로운 변수에 저장하여 자동생성 계산식의 회전각으로 사용되도록 하였다.

다음으로 MULTID 컴포넌트의 후처리(Post-processing) 기능을 개선하였다. 본 개선연구의 코드 모델인 MARS-KS V1.5 SVN 151 버전에는 3차원 볼륨을 시각화하기 위한 MULTID 컴포넌트의 후처리 기능이 포함되어 있다. 본 기능은 오픈소스 소프트웨어인 Paraview를 이용하여 MULTID 컴포넌트의 해석결과를 3차원으로 모사하기 위해 사용된다. 하지만 정지 상태의 MULTID 컴포넌트를 대상으로 코드가 개발되어서 Motion model을 사용할 경우 동적운동에 따른 위치 변화가 모사되지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같이 MARS-KS를 수정하였다. 먼저, MULTID 컴포넌트의 후처리 기능을 수행하는 WriteForParaview 서브루틴을 수정하여 새로운 WriteForParaview\_Motion 서브루틴을 생성하였다. 그리고 Motion model을 사용할 경우 새로운 서브루틴을 통해 MULTID 컴포넌트의 후처리 기능이 수행되도록 하였으며, 새로운 서브루틴에서는 격자 데이터에 회전운동 정보를 반영하여 동적운동에 따른 MULTID 컴포넌트의 회전운동을 모사할 수 있도록 하였다. 이를 통해 Motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하기 위한 코드 개선연구를 수행하였으며, 다차원 유동 해석능력을 통해 해양원전의 안전해석을 위한 기반을 마련하였다.

표 2.1 사용자입력옵션 입력 양식

시간(s)	각가속도( $^{\circ}/s^2$ )			직선가속도( $m/s^2$ )		
	x축	y축	z축	x축	y축	z축
...	...	...	...	...	...	...

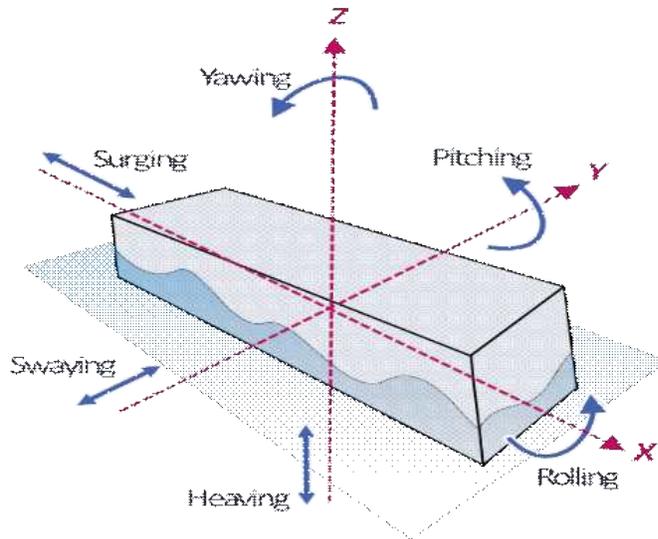
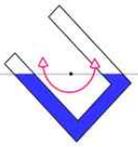
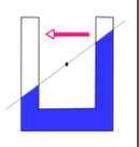
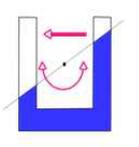
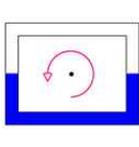
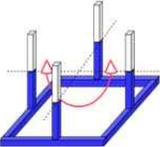
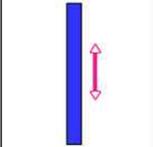
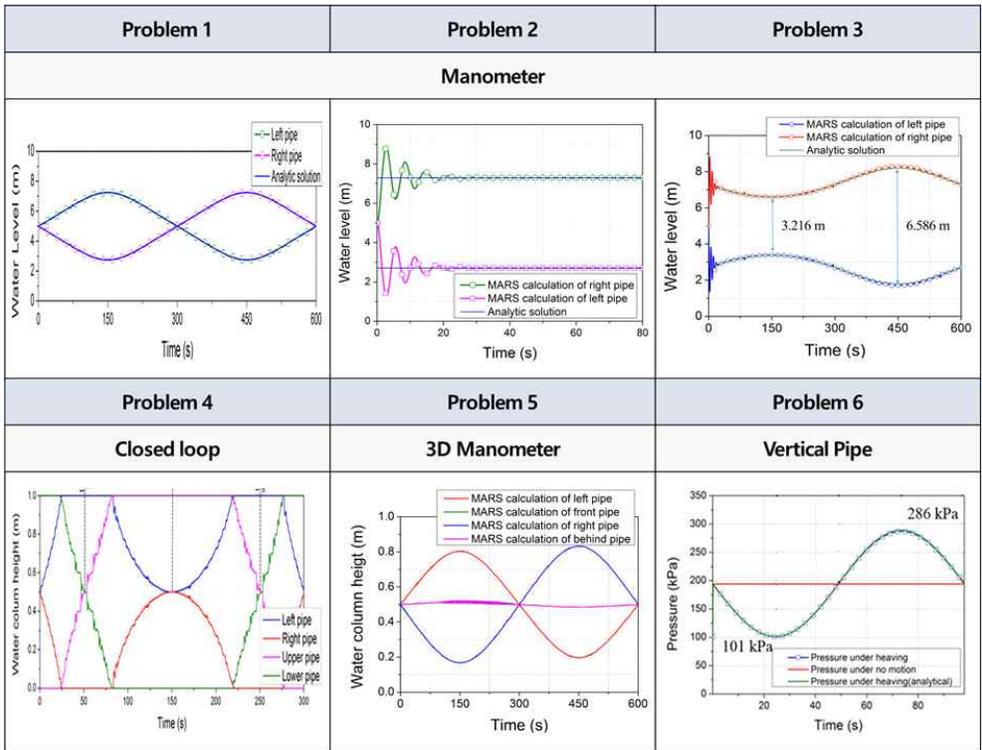


그림 2.1 6 자유도 운동

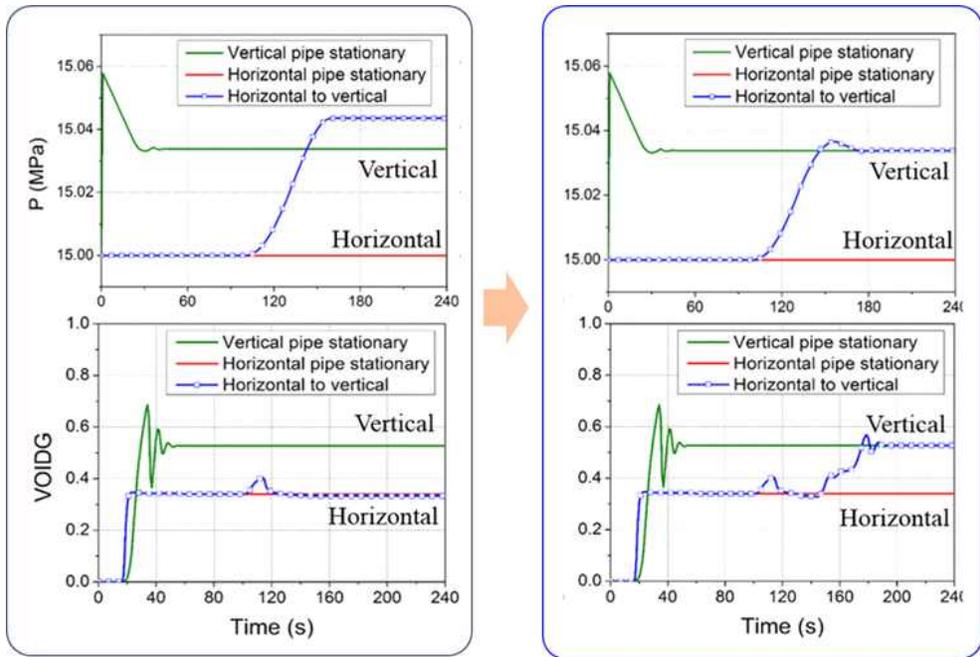
Problem 1	Problem 2	Problem 3	Problem 4	Problem 5	Problem 6
Manometer			Closed loop	3D Manometer	Vertical Pipe
					
45°, 600 s	10 m/s <sup>2</sup>	10 m/s <sup>2</sup> 10°, 600 s	180°, 200 s	30°, 600 s	9.8 m/s <sup>2</sup> , 100 s

(a) 해석모델



(b) 해석결과

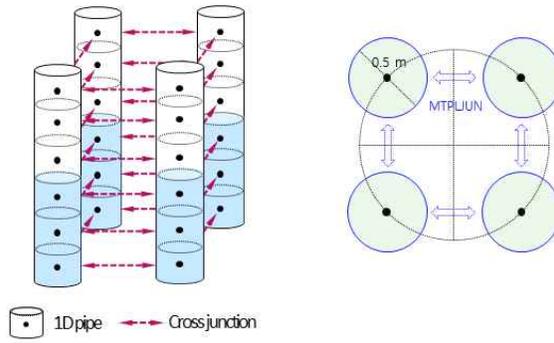
그림 2.2 MARS-KS motion model 검증



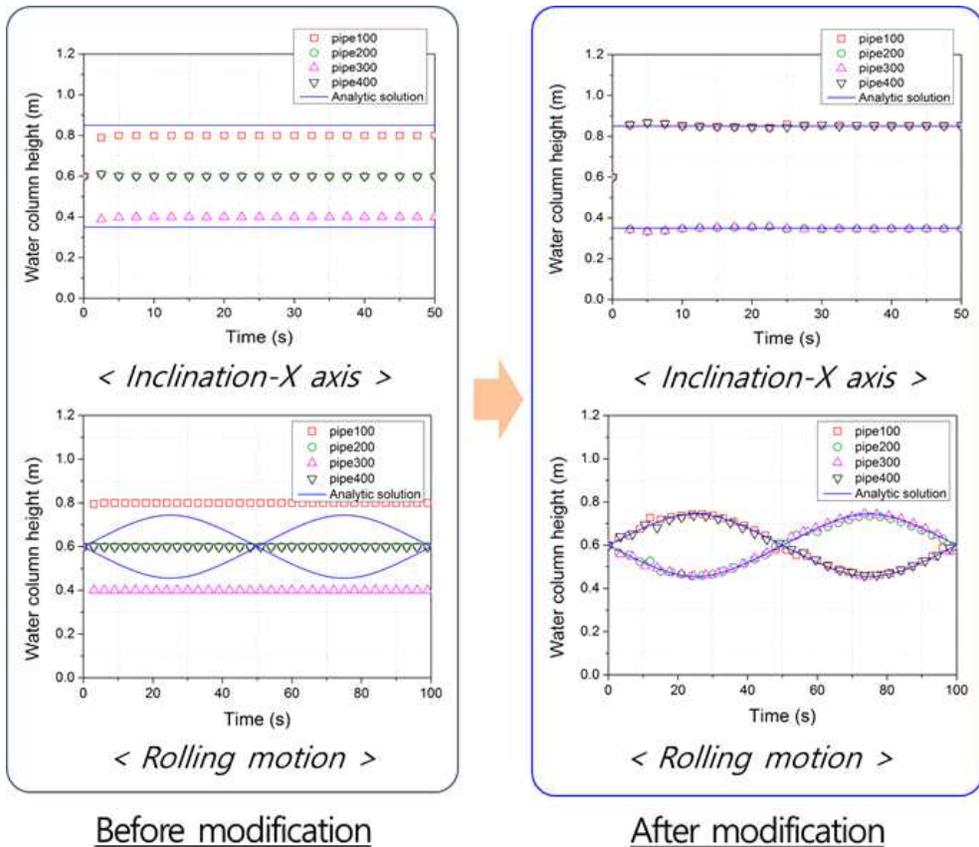
Before modification

After modification

그림 2.3 경사 정보에 맞는 유동양식 맵 결정 검증



(a) 해석모델



(b) 해석결과

그림 2.4 다차원 현상 해석을 위한 교차유동 검증

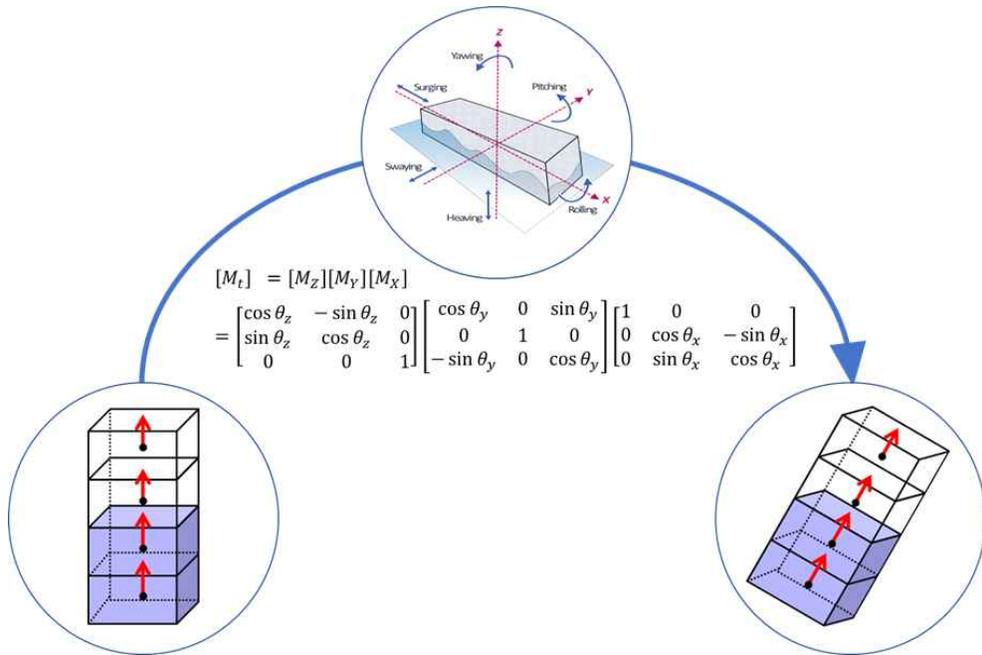


그림 2.5 Volume direction unit vector 계산과정

* rolling motion								
0.0 0.0 0.0								
27		x	y	z		x	y	z
555010000	0.0	-2.25	5.5	0.0	-2.25	5.0		
777010000	0.0	-2.25	4.5	0.0	-2.25	4.0		
777020000	0.0	-2.25	3.5	0.0	-2.25	3.0		
<u>Volume number</u>	<u>Center of the volume</u>			<u>Top of the volume</u>				

그림 2.6 Motion model 입력자료 작성예시

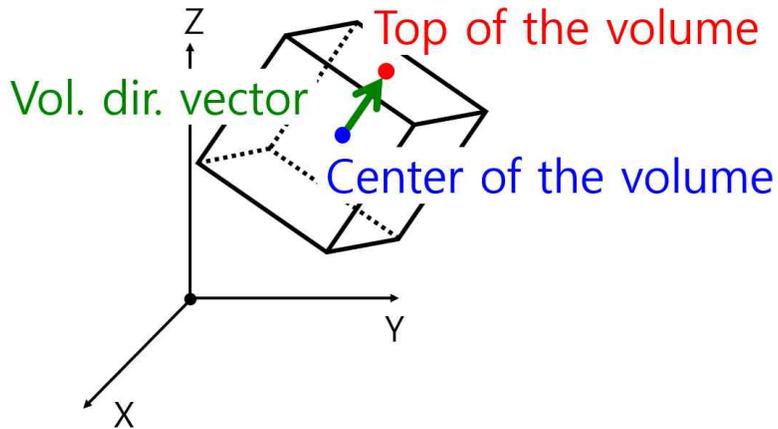


그림 2.7 Volume direction unit vector 수동생성

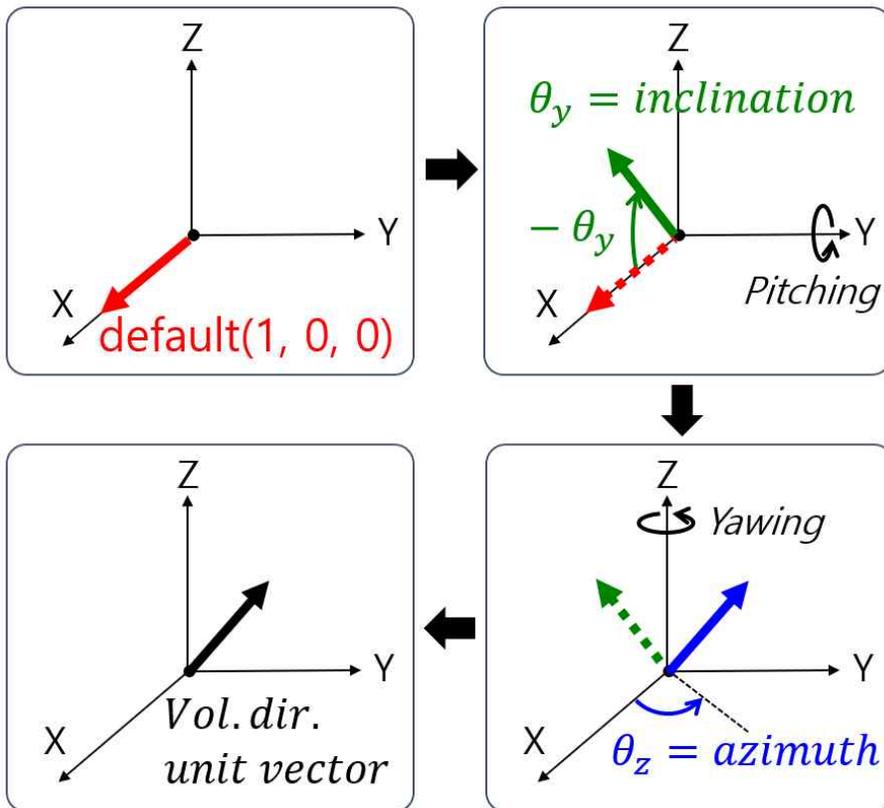


그림 2.8 Volume direction unit vector 자동생성

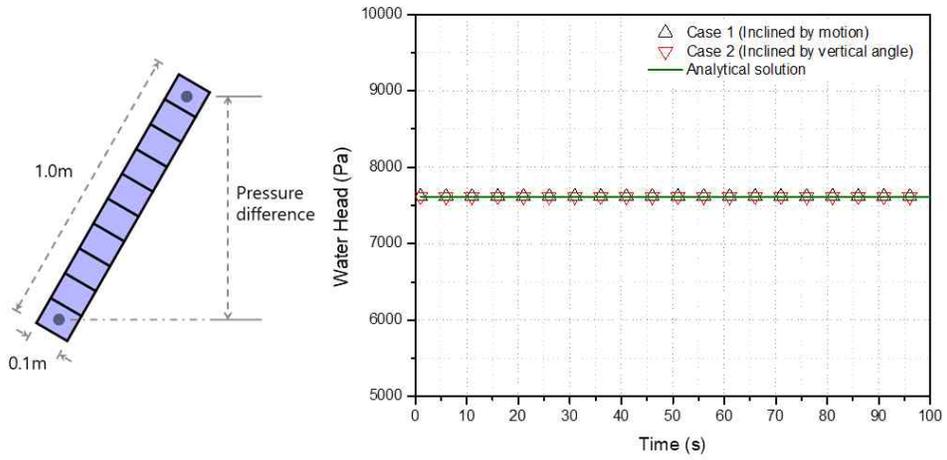
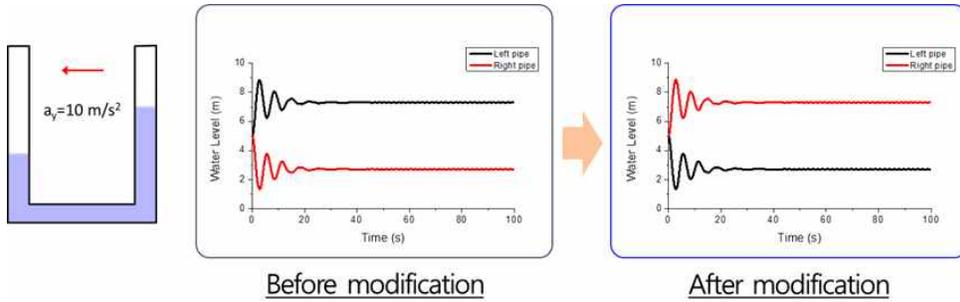
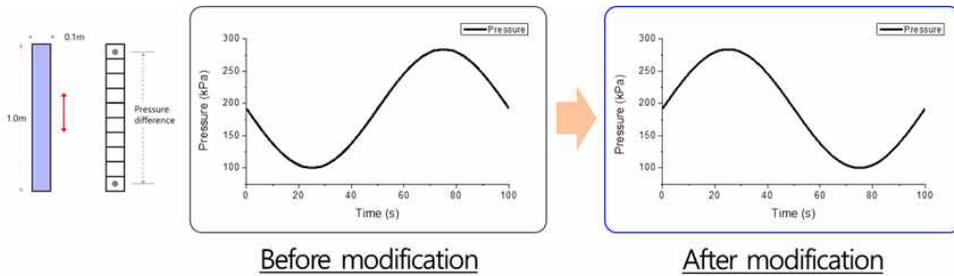


그림 2.9 Volume direction unit vector 검증결과



(a) 1차원 마노미터 개념문제 해석결과



(b) 수직파이프 개념문제 해석결과

그림 2.10 관성력을 고려한 직선가속도 항 검증

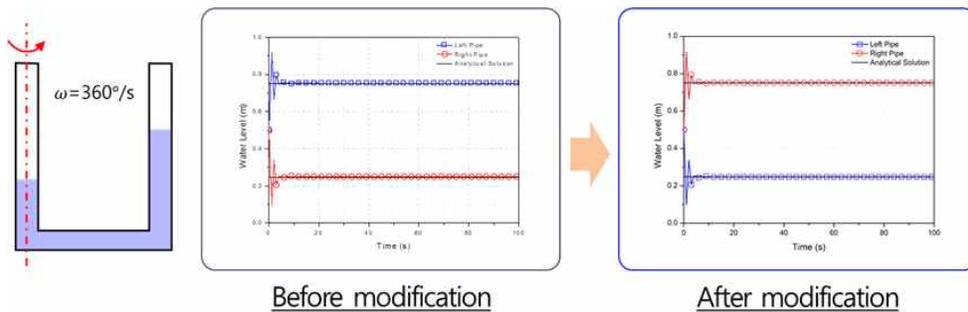


그림 2.11 회전 중심에 관한 오류 수정 검증

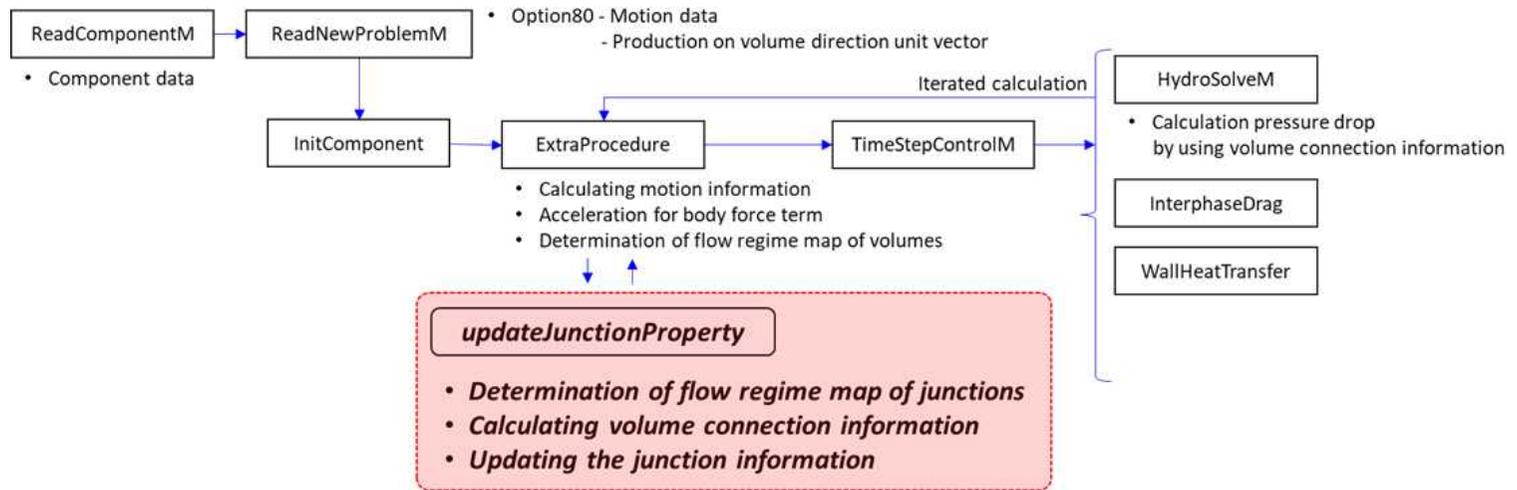


그림 2.12 정선 정보 업데이트를 위한 개선

Before  $dP = -\rho \cdot \text{NetGrav} \cdot \text{Length}_z$

↓

After  $dP = -\rho \cdot (a_x \cdot \text{Length}_x + a_y \cdot \text{Length}_y + a_z \cdot \text{Length}_z)$

\*  $\text{NetGrav} = (a_x, a_y, a_z) \cdot (\text{Dirnx}, \text{Dirny}, \text{Dirnz})$

그림 2.13 축별 압력 수두의 계산

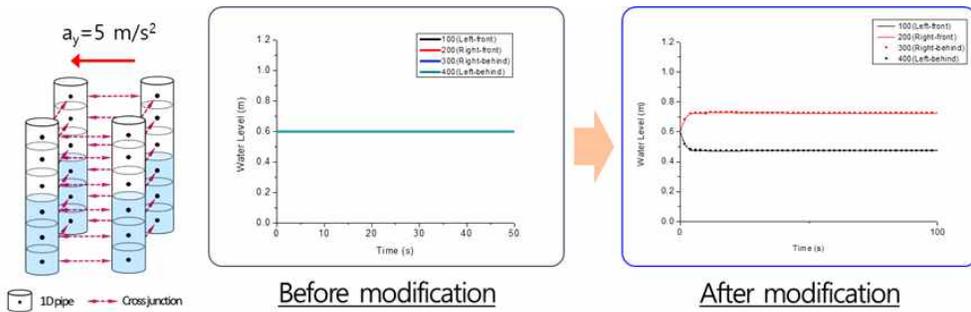


그림 2.14 축별 압력 수두의 계산 검증

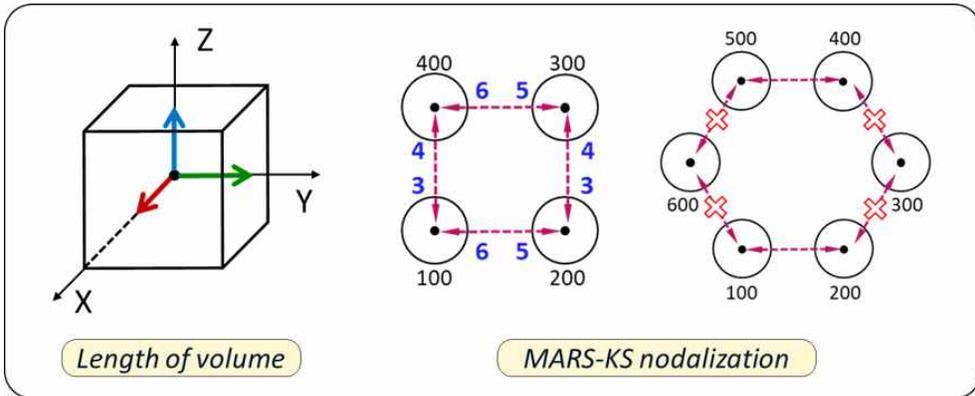
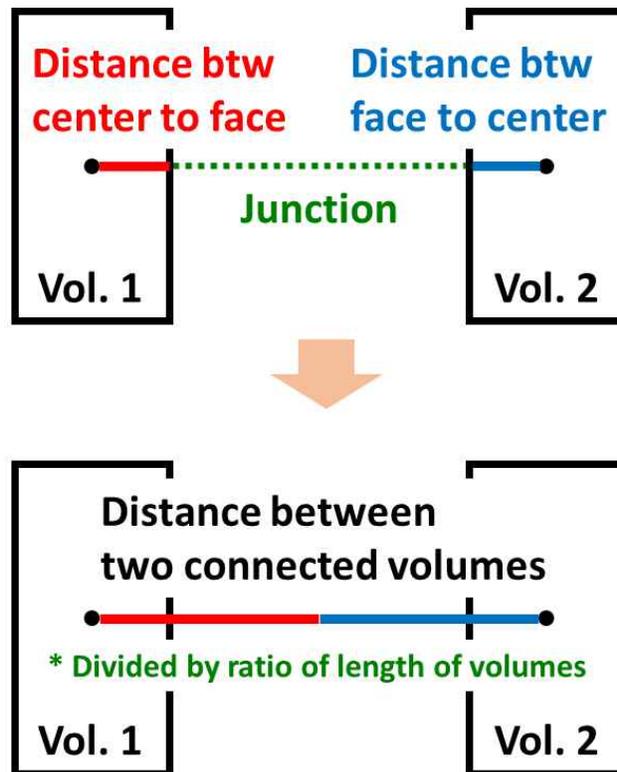


그림 2.15 기존 연결정보의 한계



## 제 3 장 MARS-KS motion model 검증연구

개념문제를 통한 MARS-KS motion model의 검증연구를 수행하였다. 코드의 체계적 검증을 위해 1D 컴포넌트, 교차운동, 그리고 MULTID 컴포넌트 분야로 나누어 연구를 진행하였으며, 선정된 개념문제의 이론해와 해석결과를 정량적으로 비교하여 코드의 적절성을 확인하였다.

### 제 1 절 1D 컴포넌트 검증

1차원 해석능력 확인을 위한 1D 컴포넌트 검증은 1차원 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 통해 수행되었다. 이는 서울대학교에서 MARS-KS motion model의 물리적 모델 검증(H.K. Beom et al., 2019) 시 사용되었던 개념문제와 동일하다. 1차원 파이프로 구성된 형상 조건에서 직선운동 및 회전운동이 독립적 또는 복합적으로 작용할 때 수위나 압력 변화 등이 적절하게 구현되는지 검토하고, 개념문제의 이론해와 MARS-KS 해석결과를 정량적으로 비교하였다. 또한, 운동 조건이 선행연구(H.K. Beom et al., 2019) 조건을 포함하도록 하여, 코드 개선연구가 물리적 모델의 건전성에 미친 영향을 확인하였다.

## 1. 마노미터의 운동

마노미터 개념문제는 운동 조건에서 수위 변화 계산이 용이하여 MARS-KS 해석결과 분석에 적합하다. 검증에 사용된 마노미터의 제원 및 운동 조건은 그림 3.1과 같다. 마노미터는 직경 0.1 m의 1차원 파이프가 연결된 형태이며, 높이는 1.0 m, 폭은 0.5 m이다. 정지 상태의 수위는 0.5 m이며, 작동 유체인 물의 초기 압력은 대기압, 초기 온도는 300 K이다. 마노미터 문제에는 4가지 운동 조건을 부여하였으며, 운동 조건에 따른 마노미터의 수위 변화를 이론해와 비교하였다. 첫 번째 운동 조건은 마노미터의 중심점을 회전 중심으로 하는 x축 회전운동(Rolling motion)이다. 사인함수 입력방식을 통해 사인함수 형태의 회전각이 모사되며, 회전각의 진폭은  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 의 3가지 조건으로 해석하였다. 그리고 회전주기는 600 초이다. 충분히 긴 주기로 인해 회전가속도의 크기가 매우 작으므로 마노미터의 수위는 중력의 영향만 받게 된다. 한편, 마노미터 수위의 이론해는 식 (3-1)에 따라 계산하였다.  $h_0$ 는 정지 상태의 수위를 말하며,  $L$ 은 마노미터의 폭 길이,  $A$ 와  $T$ 는 각각 회전운동의 진폭과 주기이다.

두 번째 운동 조건으로 y축 방향 직선가속도 운동을 적용하였으며,  $5 \text{ m/s}^2$ ,  $10 \text{ m/s}^2$ 의 2가지 가속도 조건으로 해석하였다. 마노미터는 일정한 가속도로 움직이므로 식 (3-2)의 평형 방정식을 통해 이론해를 계산하였다.  $a_y$ 는 y축 방향 가속도 성분이며,

$dx, dy, dz$ 은 축 방향 수위를 말한다.

세 번째 운동 조건은 회전운동과 직선가속도 운동이 동시에 일어나는 복합운동이다. 회전운동은 진폭  $30^\circ$ , 주기 600 초 조건이며, 직선가속도 운동은  $5 \text{ m/s}^2$  조건이다. MARS-KS 해석결과와의 비교를 위한 이론해는 식 (3-1)과 (3-2)를 모두 적용하여 구하였다.

마지막 네 번째 운동 조건은 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)에서는 수행되지 않은 z축 회전운동(Yawing motion)을 추가로 적용하였다. 왼쪽 파이프를 회전축으로 하며,  $120^\circ/\text{s}$ 와  $360^\circ/\text{s}$ 의 일정한 각속도 조건으로 해석하였다. 마노미터가 회전하면 구심가속도에 의해 양쪽 파이프의 수위 차가 생기며, 식 (3-3)을 통해 이론해를 구할 수 있다.  $H$ 는 수위,  $\Omega_z$ 는 운동 조건인 z축 방향 각속도,  $L$ 은 마노미터의 폭 길이, 그리고  $g$ 는 중력 가속도를 말한다.

$$H = H_0 \pm L \cdot \tan\left(A \sin \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3-1)$$

$$a_x dx + a_y dy + a_z dz = 0 \quad (3-2)$$

$$\Delta H = \frac{\Omega_z^2 L^2}{2g} \quad (3-3)$$

마노미터 개념문제의 해석결과와 이론해를 정량적으로 비교하였다. 첫 번째 운동 조건인 x축 회전운동의 해석결과는 그림 3.2와

같다. 그래프에서 파란색 표식은 왼쪽 파이프의 수위, 빨간색 표식은 오른쪽 파이프의 수위, 실선은 이론해를 나타낸다. 이러한 그래프 표식은 마노미터의 모든 해석결과 그래프에서 동일하게 적용하였다. 마노미터의 수위는 회전운동에 의해 사인함수 형태로 나타나며, 모든 진폭 조건에서 해석결과가 실선의 이론해를 잘 예측하고 있다. 해석결과와 이론해의 정량적 비교를 통해 오차를 확인하였다. 오차는 이론해와 해석결과의 차를 이론해로 나눈 상대오차를 백분율로 나타냈으며, 이는 제3장 MARS-KS motion model 검증연구에서 사용된 모든 오차에 동일하게 적용하였다. x축 회전운동 해석결과의 오차는 회전각의 진폭이 최대가 되는 150 초와 450 초에서 확인했으며, 표 3.1과 같이 30° 진폭 조건에서 0.027%, 45° 에서 0.037%, 60° 에서 0.920%의 최대 오차가 발생하였다.

두 번째 y축 방향 직선가속도 운동 조건의 해석결과는 그림 3.3과 같다. 관성력에 의해 가속도 방향의 반대쪽인 왼쪽 파이프 수위가 증가하였으며, 해석결과와 이론해가 잘 일치하고 있다. 이론해와의 정량적 비교결과, 표 3.1과 같이 5 m/s<sup>2</sup> 조건에서 0.017%, 10 m/s<sup>2</sup> 조건에서 0.039%의 최대 오차가 발생하였다.

세 번째 회전운동과 직선가속도 운동이 동시에 적용된 복합운동 조건의 해석결과는 그림 3.4와 같다. y축 방향 직선가속도 운동에 의해 왼쪽 파이프 수위가 높게 형성된 가운데, x축 회전운동에 의한 수위 변화가 사인함수 형태로 나타났다. 마찬가지로 해석결과와 이론해가 동일한 거동을 보이며, 회전각의 진폭이 최대가 되는

150 초와 450 초에서 해석결과와 이론해를 정량적으로 비교한 결과, 표 3.1과 같이 0.078%의 최대 오차가 발생하였다.

마지막으로 z축 회전운동 조건의 해석결과는 그림 3.5와 같다. 왼쪽 파이프가 회전축인 z축 회전운동 조건에서는 구심가속도에 의해 오른쪽 파이프의 수위가 높아진다. 모든 각속도 조건에서 해석결과가 이론해를 잘 예측하고 있으며, 해석결과를 이론해와 비교한 결과, 표 3.1과 같이  $120^\circ /s$  조건에서 0.054%,  $360^\circ /s$  조건에서 0.038%의 최대 오차가 발생하였다.

다음으로 앞서 살펴본 마노미터의 해석결과를 선행연구(H.K. Beom et al., 2019) 해석결과와 비교하여 코드 개선연구가 Motion model 물리적 모델의 건전성에 미친 영향을 확인하였다. 본 연구를 통해 개선된 코드의 정확도와 초기 모델의 정확도를 비교한 결과는 표 3.2와 같다. 개선된 코드를 통해 수행한 마노미터 개념문제의 해석결과가 높은 정확성을 보이고 있으며, Motion model의 초기 물리적 모델을 잘 유지하고 있음을 확인하였다.

## 2. 수직 파이프의 수직요동

마노미터에 이어 수직 파이프 개념문제를 해석하였다. 파이프는 직경이 0.1 m, 높이가 1.0 m이며, 총 10개의 볼륨으로 구성되어 있다. 작동 유체인 물의 초기 압력은 대기압, 초기 온도는 300 K이며, 파이프는 단상 조건이다. 운동 조건은 사인함수 입력방식을 통해 가속도의 진폭이 사인함수 형태를 가지는 z축 방향 직선 주

기 운동(Heaving motion)을 적용하였다. 가속도는  $2 \text{ m/s}^2$ ,  $5 \text{ m/s}^2$ ,  $7 \text{ m/s}^2$ 의 3가지 조건이며, 주기는 600 초이다. 이론해는 식 (3-4)를 통해 파이프의 하단과 상단 볼륨의 압력 차를 계산하였다.  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $H$ 는 두 노드 사이 높이차,  $g$ 는 중력가속도이며,  $a_z$ 와  $T$ 는 직선 주기 운동의 진폭과 주기이다.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho \cdot H \cdot (g + a_z \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}) \quad (3-4)$$

수직파이프 개념문제의 해석모델 및 해석결과는 그림 3.6과 같다. 그래프에서 표식은 해석결과, 실선은 이론해를 나타낸다. 초기의 압력 차이는 하단 볼륨과 상단 볼륨의 높이차에서 발생한다. 운동 조건에 따라 300 초까지는 중력가속도 방향으로 관성력이 작용하며, 300 초 이후에는 반대 방향의 관성력이 작용한다. 모든 가속도 조건에서 해석결과가 실선의 이론해를 잘 예측하고 있다. 이를 정량적으로 비교하기 위해 가속도의 진폭이 최대가 되는 150 초와 450 초에서의 해석결과를 확인하였다. 가속도의 진폭이  $2 \text{ m/s}^2$  인 조건에서 0.025%,  $5 \text{ m/s}^2$  에서는 0.040% 그리고  $7 \text{ m/s}^2$  에서는 0.069%의 최대 오차가 발생하여, 단상 조건인 수직 파이프의 압력 변화가 운동 조건에 따라 적절하게 해석되었음을 확인하였다. 1차원 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 다양한 운동 조건에서 해석하였고, 이론해와 정량적인 비교를 통해 1D 컴포넌트에서 Motion model이 적절하게 구현되었음을 검증하였다.

## 제 2 절 교차유동 검증

다음으로 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)의 개념문제를 일부 수정하여 교차유동 검증에 사용하였다. 선행연구에서 사용된 개념문제는 2상 조건의 1차원 수직 파이프를 교차정선으로 연결하여 강수부를 모사한 형상이며, 4개의 파이프로 구성되어 있다. 본 연구에서는 2상 조건 대신 단상 조건의 수직 파이프를 적용하였으며, 또한, 기존의 4개 파이프 개념문제와 함께 6개 및 8개 파이프로 구성된 개념문제를 추가하였다. 6개 및 8개 파이프로 강수부를 모사한 개념문제는 앞서 살펴본 연결정보 계산식의 개선을 통해 구현할 수 있었다. 교차유동의 검증은 1D 컴포넌트 검증과 마찬가지로 이론해와의 정량적 비교를 통해 수행되었다.

검증을 위한 해석모델은 그림 3.7과 같다. 작동 유체인 물은 대기압과 300 K의 단상 조건이며, 1개의 파이프는 각각 6개의 볼륨으로 구성되어 있다. 각 볼륨의 직경이 0.5 m, 높이가 0.2 m이므로, 파이프의 높이는 1.2 m이며, 4개와 6개, 그리고 8개 파이프의 3가지 개념문제로 구성되어 있다. 운동 조건은 x축을 회전축으로 하는 정지 경사 및 회전운동을 적용하였다. 정지 경사는 수직 상태에서 수평 상태까지 10° 간격의 경사 조건을 입력하였으며, 회전운동은 사인함수 입력방식을 통해 90°의 회전각 진폭과 600초의 주기를 입력하였다. 회전 중심은 전체 형상의 중심점으로 설정하였다.

교차유동을 검증하기 위해 100번 파이프(PIPE 100)를 구성하

는 6개 볼륨의 압력 변화를 확인하였다. 6개 볼륨은 압력 수두가 다르기 때문에 운동 조건에서 압력 변화가 서로 다르게 나타난다. 식 (3-5)를 통해 회전운동에 의해 변하는 압력 수두의 이론해를 구하였다.  $P_a$ 는 가장 상단에 위치한 기준 볼륨의 압력으로 압력 변화의 기준이 된다. 운동 조건에 의해 기준 볼륨과 해석 볼륨 사이의 높이차는 계속 변하므로, 회전형렬을 사용하여 회전각에 따른 두 지점의  $z$ 축 방향 높이차를 계산하고, 밀도  $\rho$ 와 중력가속도  $g$ 를 곱하여 압력 수두를 산출하였다.

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot [(y_2 - y_1)\sin\theta + (z_2 - z_1)\cos\theta] \quad (3-5)$$

## 1. 4개 파이프의 운동

4개 파이프 개념문제의 MARS-KS motion model 해석결과는 그림 3.8과 같다. 그래프에서 표식은 100번 파이프를 구성하는 6개 볼륨의 압력 해석결과이며, 실선은 이론해를 나타낸다. 이러한 그래프 표식은 모든 교차유동 해석결과 그래프에서 동일하다. 먼저, 정지 경사 조건에서 경사각에 따라 압력 변화가 적절하게 나타나는 것을 확인하였으며, 이론해와의 오차는 최대 0.0004%로 매우 작았다. 다음, 4개 파이프 회전운동의 해석결과도 이론해를 잘 예측하였다. 시간에 따른 압력 변화 거동이 타당한 결과를 보였으며, 대표적으로 90° 회전으로 인해 100번 파이프가 수평으로

위치하는 150 초, 450 초에서 모든 볼륨의 압력이 같아지는 것을 확인할 수 있다. 회전각의 진폭이 최대가 되는 150 초와 450 초 지점에서의 해석결과와 이론해를 정량적으로 비교하였으며, 오차는 최대  $2 \times 10^{-5} \%$  수준으로 나타났다.

## 2. 6개 파이프의 운동

6개 파이프 개념문제의 해석결과와 이론해를 비교한 결과는 그림 3.9와 같으며, 운동 조건은 4개 파이프 개념문제와 동일하다. 정지 경사와 회전운동 조건에서의 압력 변화를 확인한 결과, 이론해와의 오차는 각각 0.0004%와 0.0137%이었다. 4개 파이프 개념문제보다 형상의 회전 반경이 더 크기 때문에 압력 변화는 크게 나타났으며, 전체적인 해석결과는 동일한 경향성을 보인다.

## 3. 8개 파이프의 운동

8개 파이프 개념문제의 경우 SMART 증기발생기와 배치가 같다는 특징이 있다. 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발한 SMART 원자로의 경우 증기발생기가 8개로 구성되어 있다. Motion model을 통해 실제 원자로를 해석할 수 있는 기반 능력을 확인하고자 8개 파이프 개념문제를 선정하였다.

해석결과는 그림 3.10과 같으며, 운동 조건은 4개 파이프 개념

문제와 동일하다. 정지 경사 조건에서 이론해와의 오차는 0.0005%, 회전운동 조건에서는 0.0004%의 오차를 가진다. 회전운동에 따른 파이프의 압력 변화 거동은 4개 파이프와 6개 파이프 해석결과와 동일하며, 형상의 회전 반경이 6개 파이프 개념문제보다 더 커졌기 때문에 가장 큰 압력 변화를 보인다. 이처럼 교차정선으로 연결된 3가지 수직 파이프 개념문제를 통해 교차유동 구현이 성공적으로 이뤄졌음을 검증하였으며, 실제 원자로를 해석하기 위한 기반이 마련되었음을 확인하였다.

### 제 3 절 MULTID 컴포넌트 검증

1D 컴포넌트에 이어 MULTID 컴포넌트에 대한 Motion model 검증을 수행하였다. MARS-KS의 MULTID 컴포넌트는 직각좌표계 기반과 원통좌표계 기반의 2가지 입력방식이 있다. 따라서 MULTID 컴포넌트 검증을 위한 해석모델은 직각좌표계 기반의 3차원 슬래브와 원통좌표계 기반의 3차원 실린더로 선정하였다. 개념문제는 단상 조건과 2상 조건을 모두 포함하고 있으며, 다양한 운동 조건에 따른 해석결과가 이론해를 적절하게 예측하는지 확인하였다. 이를 통해 1D 컴포넌트와 함께 MULTID 컴포넌트에서 Motion model이 적절하게 구현되었음을 검증하였다. 또한, 3차원 슬래브를 다양한 외력이 복합적으로 작용하는 운동 조건을 적용하여 Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력을 확인하였다.

#### 1. 3차원 슬래브의 운동

MULTID 컴포넌트 검증을 위한 3차원 슬래브 해석모델의 제원은 그림 3.11과 같다. 해석모델은 총 200개의 볼륨으로 구성된 직사각 형태의 슬래브이다. x, y, z축 방향의 길이는 각각 0.2 m, 1.0 m 1.0 m이며, 물로 가득 차 있는 단상 조건과 물이 절반만 차 있는 2상 조건을 나누어 해석하였다. 작동 유체인 물의 초기 압력은 대기압이며, 초기 온도는 300 K이다. 이론해를 통한 검증을 위해 그림 3.11과 같이 해석모델의 양 끝단에 위치한 두 볼륨

의 압력 차를 계산하였다.

단상 조건 개념문제에서는 5가지 운동 조건을 적용하였다. 첫 번째 운동 조건은 사인함수 입력방식을 통한 x축 회전운동이다. 회전각의 진폭은  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  의 3가지 조건이며, 주기는 600 초이다. 그리고 회전 중심은 슬래브 상단 면의 중심점이다. 두 번째 운동 조건은 y축 회전운동이다. x축 회전운동과 동일하게  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  의 3가지 진폭과 600 초 주기 조건을 적용하였다. 첫 번째와 두 번째 운동 조건에서의 이론해는 교차유동 검증 시 사용하였던 식 (3-5)를 통해 계산하였다. 세 번째 운동 조건으로 y축 방향 직선가속도 운동을 적용하였으며, 가속도는  $5 \text{ m/s}^2$ ,  $15 \text{ m/s}^2$ ,  $20 \text{ m/s}^2$ 의 3가지 조건이다. 직선가속도 운동에서의 이론해는 식 (3-6)과 같이 축별 가속도에 의한 압력을 통해 구하였다.  $dy, dz$ 는 두 볼륨 간의 y, z축 방향 거리이며,  $g_y, g_z$ 는 y, z축 방향 가속도 성분이다. 네 번째로 회전운동과 직선가속도 운동이 동시에 일어나는 복합운동을 부여하였다. 회전운동은  $30^\circ$ 의 진폭과 600 초의 주기를 가지며, 직선가속도는 y축 방향의  $5 \text{ m/s}^2$ 이다. 검증을 위한 이론해는 앞서 살펴본 식 (3-5)와 식 (3-6)을 모두 적용하여 계산하였다. 마지막 다섯 번째 운동 조건은 600 초 주기의 z축 방향 직선 주기 운동이다. 직선 주기 운동의 가속도 변화는 사인함수의 형태를 가지며, 가속도의 진폭이  $2 \text{ m/s}^2$ ,  $5 \text{ m/s}^2$ , 그리고  $10 \text{ m/s}^2$ 인 조건으로 해석하였다. 직선 주기 운동에 따른 압력 변화의 이론해는 수직 파이프의 수직요동 검증 시 사용하였던 식 (3-4)을 통해 계산하였다.

2상 조건 개념문제에서의 운동 조건은 다음과 같다. 첫 번째에서부터 네 번째까지의 운동 조건은 단상 조건 개념문제와 동일하며, 따라서 이론해의 계산식도 같다. 마지막 다섯 번째 운동 조건은 z축 방향 직선 주기 운동 대신 z축 회전운동을 적용하였으며, 60° /s, 360° /s의 2가지 각속도 조건에 대해 해석하였다. 이론해는 식 (3-7)의 등압 곡선 방정식을 통해 계산하였다. 등압곡선 방정식을 적분한 값이 물의 부피와 같을 때, 이는 회전운동에 의한 수면 곡선을 의미한다.

$$P = P_y + P_z = \rho \cdot (a_y dy + a_z dz) \quad (3-6)$$

$$x^2 = \frac{2g}{\Omega^2}(y - H) \quad (3-7)$$

먼저, 단상 조건에서의 해석결과는 그림 3.12와 같으며, 그림 3.13은 동일한 해석결과의 압력분포를 나타낸 것이다. 그리고 운동 조건별 오차를 표 3.3에 명시하였다. 첫 번째 운동 조건인 x축 회전운동의 경우 그림 3.12-(a)와 같이 진폭에 따라 압력의 변화가 다른 거동을 보인다. 이는 다음과 같이 해석결과가 이론해를 잘 예측하고 있음을 보여준다. 해석결과와 이론해는 슬래브의 양 끝단에 위치한 두 볼륨의 압력 차를 보여준다. 양 끝단 볼륨의 압력 차는 양의 회전 방향으로 45°의 경사 조건에서 가장 큰 값을 가지며, 음의 회전 방향으로 45°를 초과하면 볼륨의 높이가 역전되어 음의 값을 가지게 된다. 따라서 양 끝단 볼륨의 압력 차는

회전각이  $45^\circ$  를 넘지 않는 진폭  $30^\circ$  조건에서 단순한 증감 파형을 보이며, 회전각이  $45^\circ$  를 초과하는  $60^\circ$  및  $90^\circ$  조건에서는  $\pm 45^\circ$  경사각을 기준으로 변곡이 발생하거나 음의 값을 보여주고 있다. 이론해와의 정량적인 비교를 위해 회전각의 진폭이 최대가 되는 150 초와 450 초 지점에서의 오차를 확인하였으며, 최대 오차는 진폭  $30^\circ$  에서 0.003%, 진폭  $60^\circ$  에서 0.003%, 진폭  $90^\circ$  에서  $6 \times 10^{-5}\%$  수준으로 나타났다.

두 번째 운동 조건인 y축 회전운동에서는 회전축이 변경됨에 따라 그림 3.12-(b)와 같이 x축 회전운동과는 다른 압력 변화 거동이 나타난다. 해석결과를 이론해와 비교한 결과, Motion model이 적절하게 구현되었음을 검증하였다. 오차는 동일하게 150 초 및 450 초 지점에서 확인하였으며 진폭  $30^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $90^\circ$  에서 모두 0.001%이다.

세 번째 조건인 y축 방향 직선가속도 운동의 해석결과는 그림 3.12-(c)와 같다. 가속도가 커질수록 압력분포의 기울기가 커지면서 2개의 볼륨 간 압력 차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.  $5 \text{ m/s}^2$ 의 가속도 조건에서의 오차는  $-0.003\%$ ,  $15 \text{ m/s}^2$  조건에서는  $-0.002\%$ ,  $20 \text{ m/s}^2$  조건에서는  $-0.001\%$ 로 나타났다.

네 번째 복합운동 조건에서도 그림 3.12-(d)와 같이 이론해와 일치하는 해석결과를 확인하였다. 150 초 및 450 초 지점에서의 오차는 최대 0.0006%이었다. Motion model이 직선가속도에 의한 압력분포와 회전에 의한 외력의 영향을 동시에 해석할 수 있음을 알 수 있다.

마지막 다섯 번째 운동 조건인  $z$ 축 직선 주기 운동의 경우 그림 3.12-(e)와 같이 해석결과가 사인함수 형태의 거동을 보이며, 진폭이 커짐에 따라 압력 차이도 증가하였다. 최대 가속도에 이르는 150 초 및 450 초 지점에서 이론해와 해석결과를 비교하였으며,  $2 \text{ m/s}^2$  조건에서 0.004%,  $5 \text{ m/s}^2$  조건에서 0.003%,  $10 \text{ m/s}^2$  조건에서 0.003%의 최대 오차를 확인하였다.

단상 조건에 이어 2상 조건에서의 해석결과는 그림 3.14과 같으며, 그림 3.15는 동일한 해석결과의 기포율 분포를 나타낸 것이다. 그리고 운동 조건별 오차를 표 3.4에 명시하였다. 단상 조건과 마찬가지로 모든 운동 조건에서 이론해와 일치하는 해석결과를 확인하였다. 하지만 이론해와의 오차는 단상 조건에 비해 다소 증가하는 경향을 보였으며, 이는 2상 조건에서 계산의 불안정성이 반영된 결과로 보인다. 첫 번째  $x$ 축 회전운동의 해석결과는 그림 3.14-(a)와 같으며, 회전각의 진폭이 최대가 되는 150 초 및 450 초 지점에서 이론해와 해석결과를 비교한 오차는 진폭  $30^\circ$ 에서 -0.202%이며,  $60^\circ$ 에서 -1.089%,  $90^\circ$ 에서 -0.410% 수준으로 나타났다.

두 번째  $y$ 축 회전운동의 해석결과는 그림 3.14-(b)와 같으며, 마찬가지로 150 초와 450 초 지점에서의 오차를 확인하였다. 진폭  $30^\circ$ 에서 0.099%,  $60^\circ$ 에서 -0.672%,  $90^\circ$ 에서 14.463% 수준으로 나타났다. 회전각의 진폭이  $90^\circ$ 인 조건에서는 상대적으로 큰 오차가 발생하였다. 이는 2상 조건에서 계산의 불안정성이 나타난 이유도 있지만, 무엇보다  $90^\circ$  회전운동 조건에서는 이론해

가 0에 가까워짐에 따라 상대오차를 통한 오차율이 매우 크게 계산된 원인이 지배적이다.

세 번째 y축 방향 직선가속도 운동의 해석결과는 그림 3.14-(c)와 같으며, 가속도 5 m/s<sup>2</sup>에서 0.319%, 가속도 15 m/s<sup>2</sup>에서 0.353%, 가속도 20 m/s<sup>2</sup>에서 -1.714%의 오차가 발생하였다.

네 번째 복합운동 조건의 해석결과는 그림 3.14-(d)와 같으며, 150 초와 450 초 지점에서 확인한 오차는 -1.690%이다.

마지막 다섯 번째 운동 조건은 단상 조건 개념문제와 달리 z축 회전운동을 적용하였으며, 각속도에 따라 압력 차와 기포율 분포가 다르게 나타난다. 회전 각속도가 큰 경우에는 2상 조건의 유체에 동적운동이 가해지면서, 불안정성으로 인한 해석결과의 진동이 관찰된다. 60° /s 각속도 조건에서는 0.816%, 360° /s 각속도 조건에서는 0.913%의 오차가 확인되었다.

## 2. 3차원 실린더의 운동

3차원 슬래브에 이어 원통좌표계 기반의 3차원 실린더 개념문제를 해석하였다. 원통좌표계 기반 MULTID 컴포넌트의 해석은 다음과 같은 한계를 가진다. 초기 Motion model은 직각좌표계 기반으로 개발되었으며, 선행연구(H.K. Beom et al., 2019)에서는 직각좌표계 기반의 1D 컴포넌트를 대상으로 코드를 개선하였다. 본 연구를 통해 Motion model을 MULTID 컴포넌트까지 확장하

였지만, 여전히 원통좌표계 기반의 MULTID 컴포넌트에 관한 개선연구는 이뤄지지 않은 상황이다. 원통좌표계 기반의 MULTID 컴포넌트를 해석하기 위해서는 운동량 보존 방정식의 체적항을 원통좌표계에 의한 방정식으로 전환해야 한다. 따라서 현재의 Motion model을 통해 원통좌표계 기반의 MULTID 컴포넌트를 해석하기는 어렵다. 다만, 개선된 Motion model이 MULTID 컴포넌트까지 확장되었으며, 주기가 충분히 긴 회전운동을 적용할 경우 회전가속도보다 중력가속도의 영향이 지배적이므로 3차원 실린더의 x축 회전운동 조건을 해석할 수 있다. 본 검증을 통해 Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력을 확인하고, 향후 수행될 개선연구의 기반을 마련하고자 한다.

3차원 실린더 해석모델의 제원은 그림 3.16과 같다. 실린더의 내경 반지름은 1.0 m이며, 두께는 0.05m, 높이는 1.0 m이다.  $\theta$  방향으로 10개의 볼륨, z축 방향으로 10개의 볼륨으로 구성되어 볼륨의 개수는 총 100개이다. 또한, 물이 절반만 차 있는 2상 조건이며, 작동 유체인 물의 초기 압력은 대기압, 초기 온도는 300 K이다. 이론해를 통한 검증을 위해 그림 3.16과 같이 해석모델의 양 끝단에 위치한 두 볼륨의 압력 차를 계산하였다. 운동 조건은 사인함수 입력방식을 통해 x축 회전운동을 적용하였다. 회전각의 진폭은  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  의 3가지 조건이며, 주기는 600 초이다. 그리고 실린더 바닥 면의 중점을 회전 중심으로 설정하였다. 검증을 위한 이론해는 교차유동 검증 시 사용하였던 식 (3-5)를 통해 계산하였다.

3차원 실린더 개념문제의 해석결과는 그림 3.17과 같다. 그래프에서 표식은 해석결과, 실선은 이론해를 나타낸다. x축 회전운동 조건에서의 이론해 및 해석결과는 진폭에 따라 다른 거동을 보인다. 이는 앞서 살펴본 3차원 슬래브의 x축 회전운동 조건에서의 해석결과와 동일하다. 양의 방향으로 약  $60^\circ$  회전할 경우 양 끝단 볼륨의 압력 차는 최댓값을 가지게 되며, 음의 방향으로 약  $30^\circ$  회전할 경우 양 끝단 볼륨의 높이가 역전되어 압력 차는 음의 값을 가지게 된다. 따라서  $90^\circ$  진폭의 해석결과에서는 회전각이  $60^\circ$  를 지날 때마다 최대의 압력 차가 발생하며,  $30^\circ$  진폭의 해석결과에서는 음의 방향으로  $30^\circ$  회전하게 되는 450 초 지점에서 0에 가까운 압력 차를 확인할 수 있다.

이론해와의 정량적인 비교를 위해 회전각의 진폭이 최대에 이르는 150 초 및 450 초 지점에서 오차를 확인하였다. 최대 오차는 진폭  $30^\circ$  에서 38.030%, 진폭  $60^\circ$  에서 6.354%, 진폭  $90^\circ$  에서 0.756% 수준으로 나타났다. 원통좌표계 기반의 3차원 실린더 해석결과의 경우 앞서 살펴본 직각좌표계 기반의 3차원 슬래브 해석결과보다 상대적으로 낮은 정확도를 보이며, 특히 회전각의 진폭이  $30^\circ$  인 조건에서는 약 40%의 큰 오차가 발생하였다. 이러한 문제의 원인은 다음과 같다. 먼저, Motion model이 원통좌표계 기반의 MULTID 컴포넌트까지 확장되지 않았기 때문이다. Motion model을 통해 원통좌표계 기반의 MULTID 컴포넌트를 해석하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 운동량 보존 방정식의 체적항을 원통좌표계에 의한 방정식으로 전환해야 한다. 또한, 2상

조건에서 계산의 불안정성이 나타났기 때문이다. 하지만 무엇보다 가장 큰 원인은  $30^\circ$  회전운동 조건에서 이론해가 0에 가까워짐에 따라 오차율이 매우 크게 계산되었기 때문이다. 특정 조건에서 해석결과의 큰 오차가 발생하였지만, 전반적인 해석결과는 이론해를 비교적 잘 예측하고 있다. 이를 통해 개선된 Motion model이 MULTID 컴포넌트까지 적절하게 확장되었음을 확인할 수 있다.

### 3. MULTID 컴포넌트 해석능력 확인

앞서 살펴본 검증연구에서는 중력가속도가 지배적으로 작용하는 긴 주기의 회전운동 조건만을 적용하였다. 이렇듯 단순한 운동을 적용한 이유는 다양한 외력이 복합적으로 나타나는 조건에서는 검증을 위한 이론해의 계산이 어렵기 때문이다. 해석결과와 이론해를 정량적으로 비교하여 코드의 적절성을 확인하는 검증 과정에서 불필요한 외력의 발생을 기본적으로 배제하였다.

이번에는 MULTID 컴포넌트를 구심력, 접선력 등 다양한 외력이 작용하는 조건으로 해석하였다. 본 연구를 수행하는 목적은 다음과 같다. 먼저, 선박은 해양 환경에서 다양한 외력의 영향을 받으므로, Motion model을 통해 실제 선박이 받는 실 환경을 모사할 수 있는지 확인하기 위함이다. 또한, 과도한 회전각 및 짧은 주기 등 가혹한 운동 조건에서 MULTID 컴포넌트에 대한 Motion model의 해석능력을 확인하기 위함이다.

이를 위한 해석모델로 그림 3.11-(b)와 같이 2상 조건의 3차

원 슬래브를 선정하였으며, MULTID 컴포넌트 검증과 동일하게 양 끝단 볼륨의 압력 차를 해석하였다. Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력 확인을 위한 운동 조건은 크게 3가지로 나누어 수행하였다. 첫 번째로  $60^\circ$  진폭의 x축 회전운동에 대해 600 초 및 6 초 주기의 해석결과를 비교하여, 주기의 영향성을 살펴보았다. 600 초 주기에서의 해석결과는 그림 3.18-(a)와 같으며, 그래프에서 포식은 해석결과, 실선은 이론해를 나타낸다. 이는 모든 해석결과 그래프에서 동일하게 적용된다. 다만, 이론해는 오직 중력가속도만을 고려하여 계산한 값이며, 중력가속도와 다른 외력의 영향을 살펴보기 위해 표시하였다. 따라서 이론해와 해석결과를 정량적으로 비교한 검증은 수행하지 않았다. 그리고 6 초 주기에서의 해석결과는 그림 3.18-(b)와 같으며, 짧은 주기로 인해 접선력, 구심력, 그리고 중력가속도가 복합적으로 작용한다. 해석결과와 이론해가 다소 차이를 보이지만,  $60^\circ$ 의 비교적 작은 진폭 조건이어서 그 정도가 크지 않다.

두 번째로  $180^\circ$  진폭의 x축 회전운동에 대해 600 초 및 10 초 주기의 해석결과를 비교하였다. 첫 번째 해석결과와 비교하여, 큰 진폭에서의 Motion model 해석능력을 확인할 수 있다. 600 초 주기에서의 해석결과는 그림 3.19-(a)와 같으며, 긴 주기로 인해 중력가속도의 영향만 받고 있다. 10 초 주기에서의 해석결과는 그림 3.19-(b)와 같다. 큰 진폭과 짧은 주기로 인해 다양한 외력이 동시에 작용하고 있으며, 이론해와는 상당한 차이를 보인다.

마지막으로  $5^\circ / s$  및  $360^\circ / s$ 의 2가지 각속도 조건으로 x축 회전운동을 적용하였다. 먼저,  $5^\circ / s$  각속도 조건에서의 해석결과는 그림 3.20-(a)와 같다. 양 끝단 볼륨의 압력 차는 양의 값과 음의 값이 반복적으로 나타내는데, 이는 느린 각속도 조건에서 유체가 중력가속도 방향으로 위치하기 때문이다. 다음,  $360^\circ / s$  각속도 조건에서의 해석결과는 그림 3.20-(b)와 같다. 양 끝단 볼륨의 압력 차는  $5^\circ / s$  조건과 달리 양의 값에서 증감을 반복한다. 빠른 회전운동 조건에서는 중력가속도보다 구심력이 지배적으로 작용하여, 유체는 항상 3차원 슬래브의 하단에 위치하게 된다. 따라서 회전각과 무관하게 하단 볼륨의 압력이 상단 볼륨의 압력보다 높게 형성되어, 두 볼륨의 압력 차는 양의 값을 가지게 된다. 또한, 구심가속도 방향에 따라 압력 차는 증감을 반복한다. 구심가속도와 중력가속도의 방향이 일치하는 경우에는 두 볼륨의 압력 차는 증가하며, 일치하지 않는 경우에는 압력 차가 감소한다. 이처럼 Motion model이 다양한 운동 조건에서 외력의 영향을 적절하게 모사하고 있음을 확인하였다.

표 3.1 마노미터 개념문제의 해석결과

운동 조건	x축 회전운동		
	30°	45°	60°
오차	0.027%	0.037%	0.920%
운동 조건	y축 직선가속도 운동		
	5 m/s <sup>2</sup>	10 m/s <sup>2</sup>	-
오차	0.017%	0.039%	-
운동 조건	x축 회전운동 + y축 직선가속도 운동		
	30° +5 m/s <sup>2</sup>	-	-
오차	0.078%	-	-
운동 조건	z축 회전운동		
	120° /s	360° /s	-
오차	0.054%	0.038%	-

표 3.2 선행연구와의 마노미터 해석결과 비교

구 분	선행연구	본 연구
운동 조건	x축 회전운동 (45° )	
오차	0.22%	0.037%
구 분	선행연구	본 연구
운동 조건	y축 직선가속도 운동 (10 m/s <sup>2</sup> )	
오차	0.6%	0.039%

표 3.3 3차원 슬래브(단상 조건) 개념문제 해석결과

운동 조건	x축 회전운동		
	30°	60°	90°
오차	0.003%	0.003%	$6 \times 10^{-5}\%$
운동 조건	y축 회전운동		
	30°	60°	90°
오차	0.001%	0.001%	0.001%
운동 조건	y축 직선가속도 운동		
	5 m/s <sup>2</sup>	15 m/s <sup>2</sup>	20 m/s <sup>2</sup>
오차	-0.003%	-0.002%	-0.001%
운동 조건	x축 회전운동 + y축 직선가속도 운동		
	30° +5 m/s <sup>2</sup>	-	-
오차	0.0006%	-	-
운동 조건	z축 직선 주기 운동		
	회전각	2 m/s <sup>2</sup>	5 m/s <sup>2</sup>
오차	0.004%	0.003%	0.003%

표 3.4 3차원 슬래브(2상 조건) 개념문제 해석결과

운동 조건	x축 회전운동		
	30°	60°	90°
오차	-0.202%	-1.089%	-0.410%
운동 조건	y축 회전운동		
	30°	60°	90°
오차	0.099%	-0.672%	14.463%
운동 조건	y축 직선가속도 운동		
	5 m/s <sup>2</sup>	15 m/s <sup>2</sup>	20 m/s <sup>2</sup>
오차	0.319%	0.353%	-1.714%
운동 조건	x축 회전운동 + y축 직선가속도 운동		
	30° +5 m/s <sup>2</sup>	-	-
오차	-1.690%	-	-

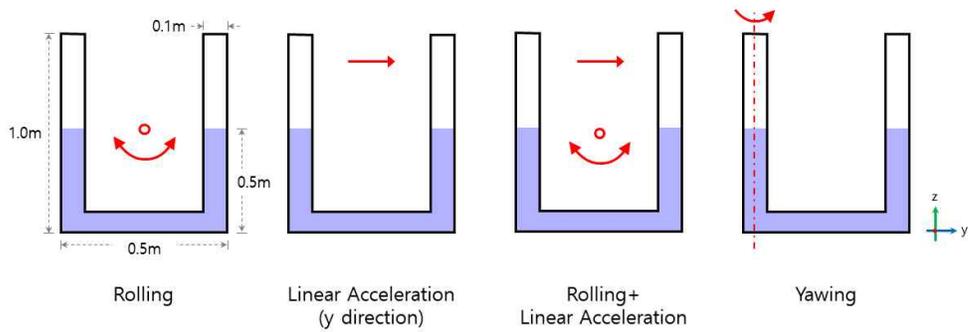
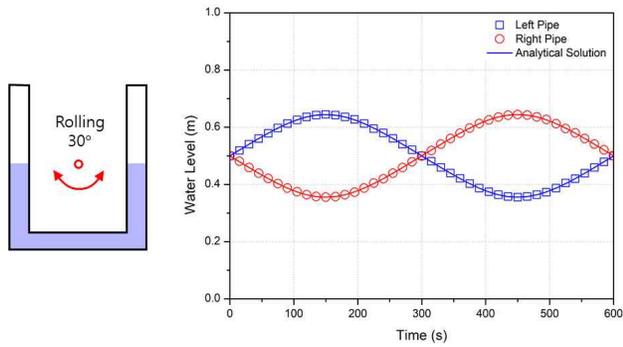
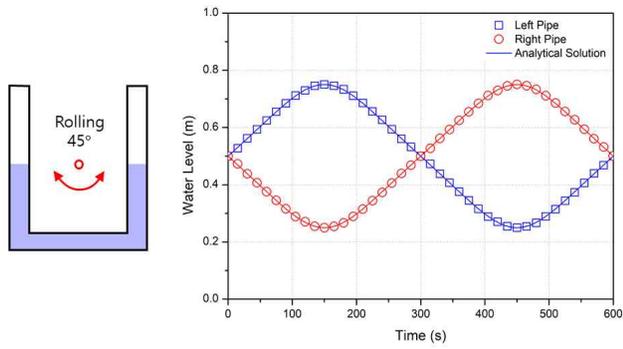


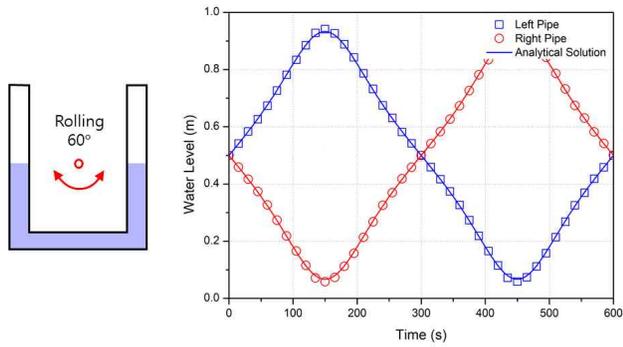
그림 3.1 마노미터 해석모델 및 운동 조건

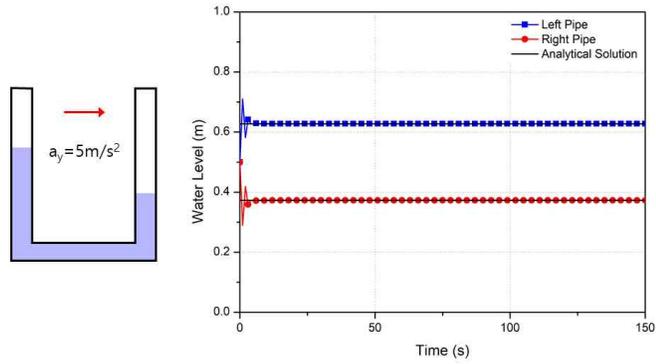


(a) x축 회전운동 (진폭 30°)

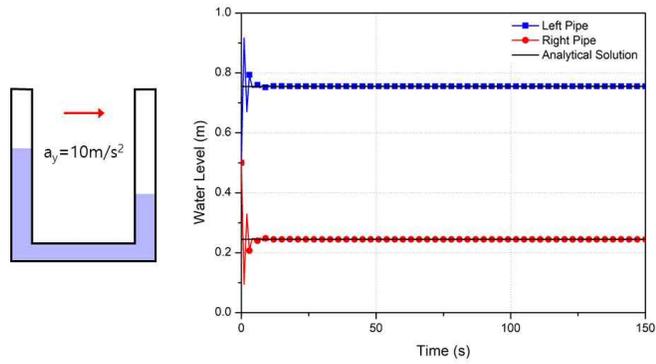


(b) x축 회전운동 (진폭 45°)





(a) y축 직선가속도 운동 ( $a_y = 5 \text{ m/s}^2$ )



(b) y축 직선가속도 운동 ( $a_y = 10 \text{ m/s}^2$ )

그림 3.3 마노미터 y축 직선가속도 운동 해석결과

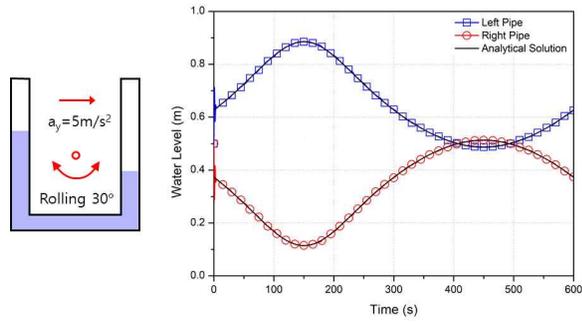
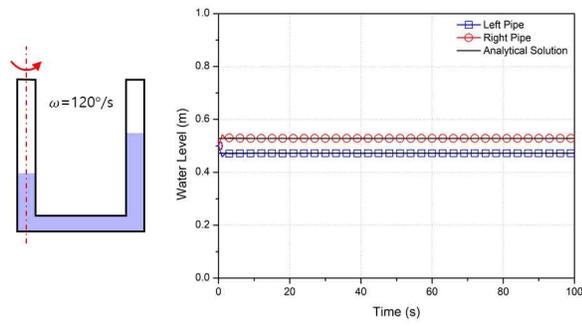
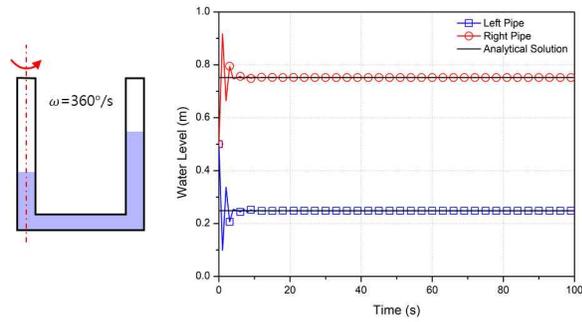


그림 3.4 마노미터 복합운동 해석결과



(a) z축 회전운동 ( $\omega = 120^\circ / \text{s}$ )



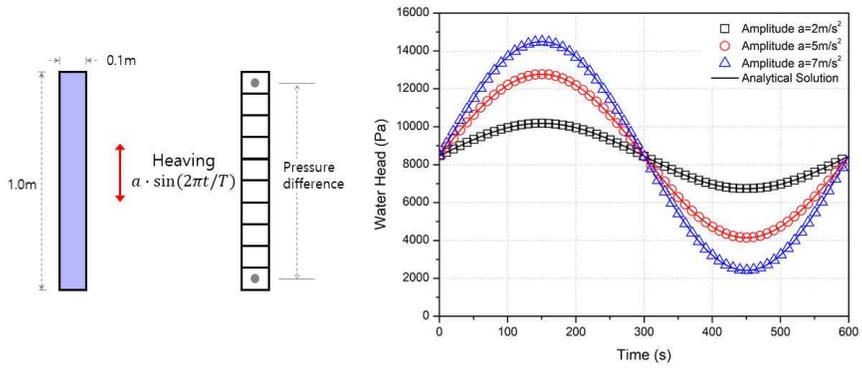
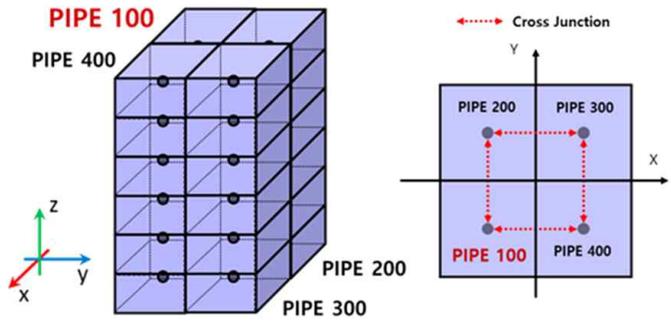
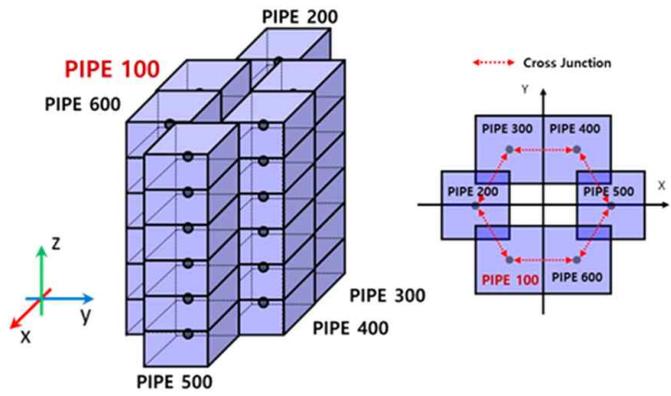


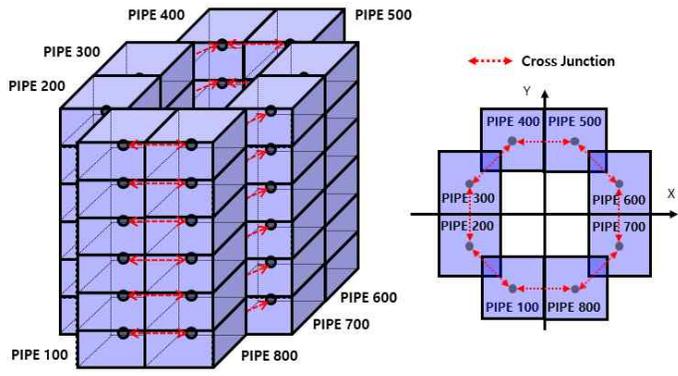
그림 3.6 수직 파이프 해석모델 및 해석결과



(a) 4개 파이프 해석모델

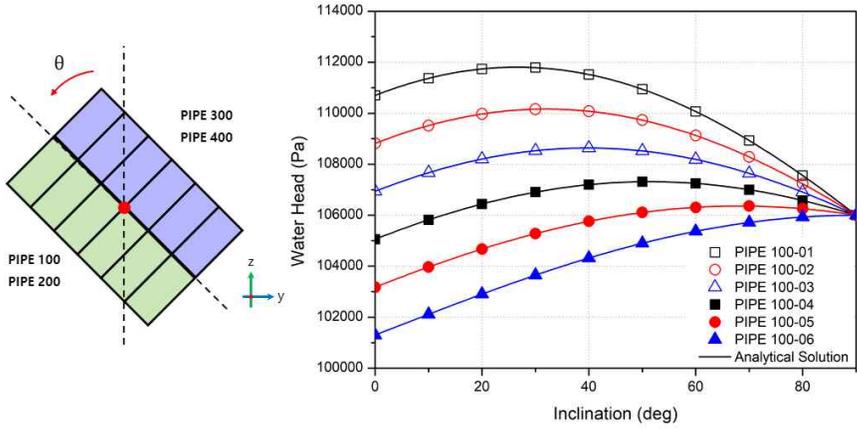


(b) 6개 파이프 해석모델

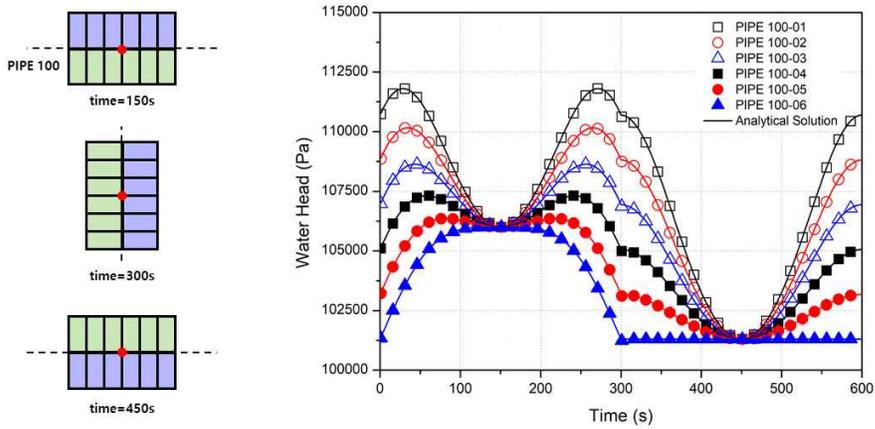


(c) 8개 파이프 해석모델

그림 3.7 교차유동 검증 해석모델

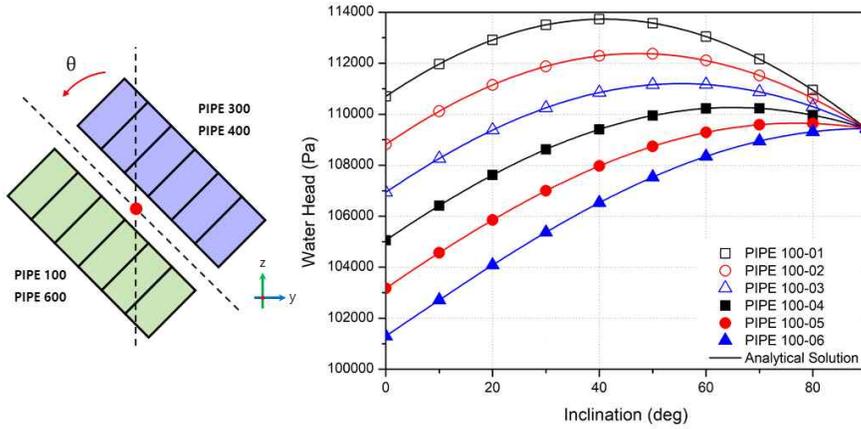


(a) 4개 파이프 정지 경사 해석결과

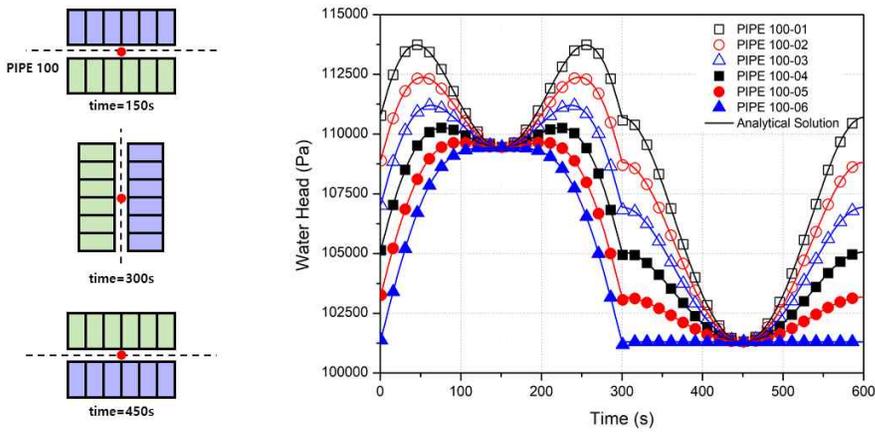


(b) 4개 파이프 회전운동 해석결과

그림 3.8 4개 파이프 개념문제 해석결과

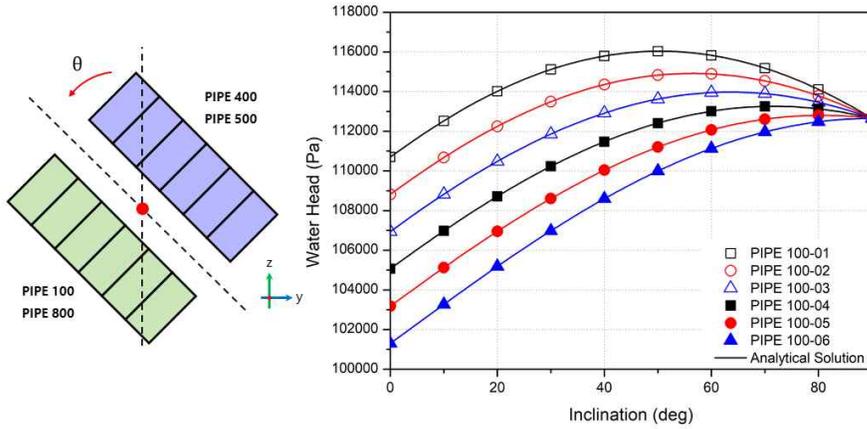


(a) 6개 파이프 정지 경사 해석결과

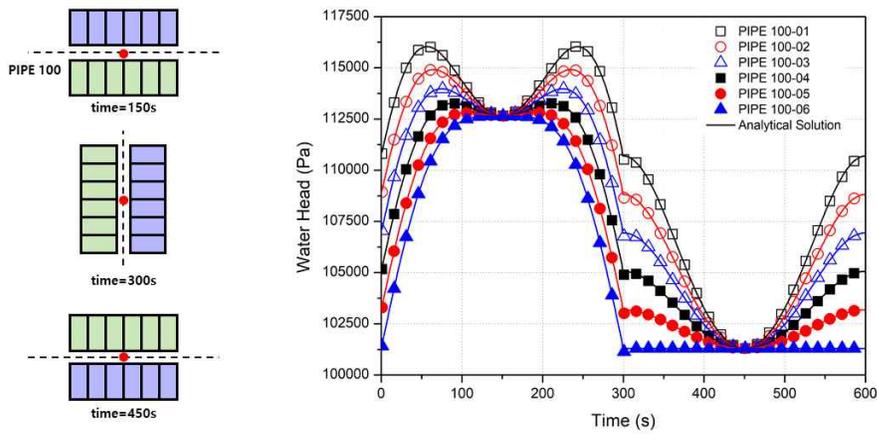


(b) 6개 파이프 회전운동 해석결과

그림 3.9 6개 파이프 개념문제 해석결과

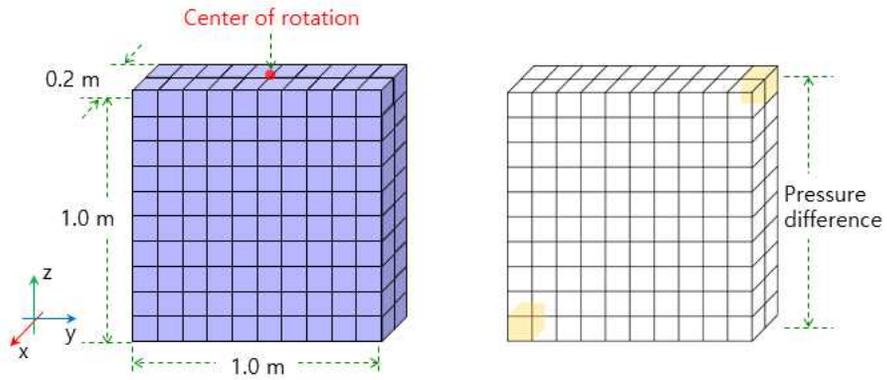


(a) 8개 파이프 정지 경사 해석결과

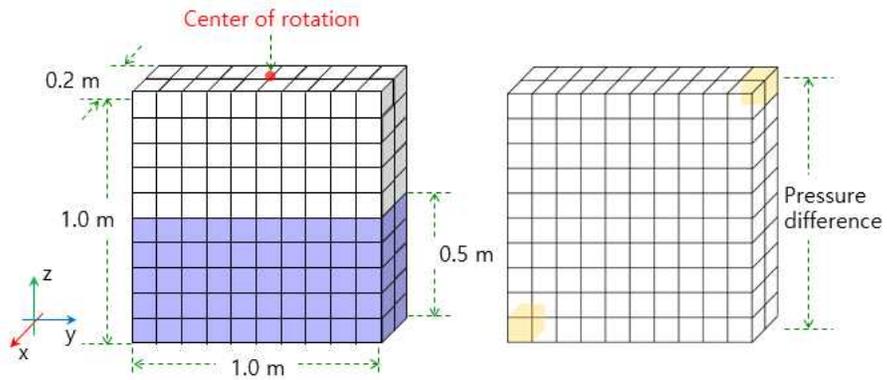


(b) 8개 파이프 회전운동 해석결과

그림 3.10 8개 파이프 개념문제 해석결과

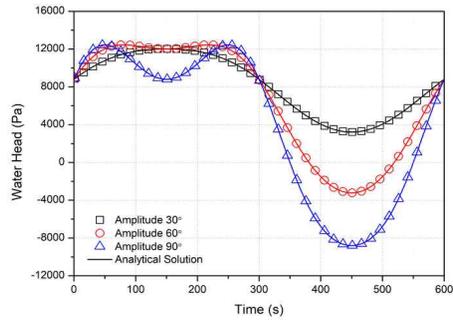
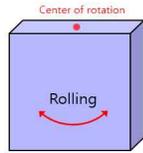


(a) 단상 조건 해석모델

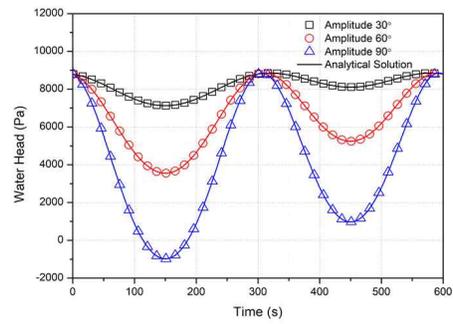
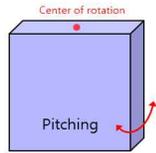


(b) 2상 조건 해석모델

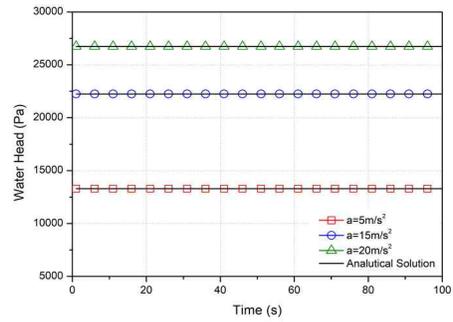
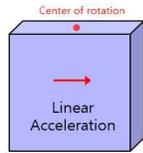
그림 3.11 3차원 슬래브 해석모델

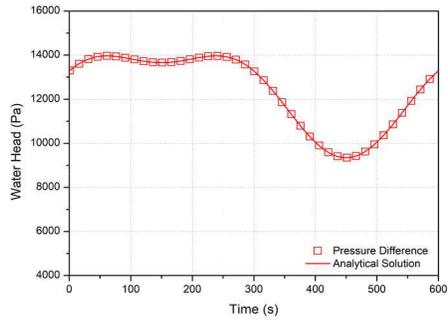
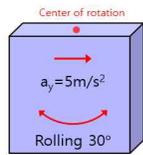


(a) x축 회전운동

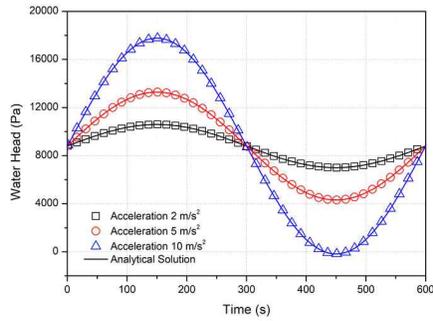
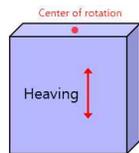


(b) y축 회전운동





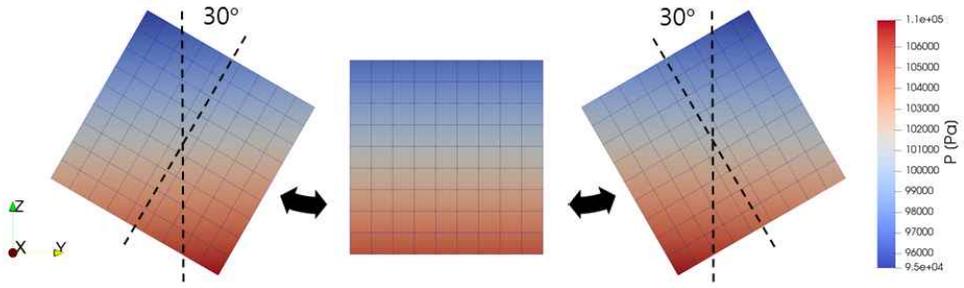
(d) 복합운동



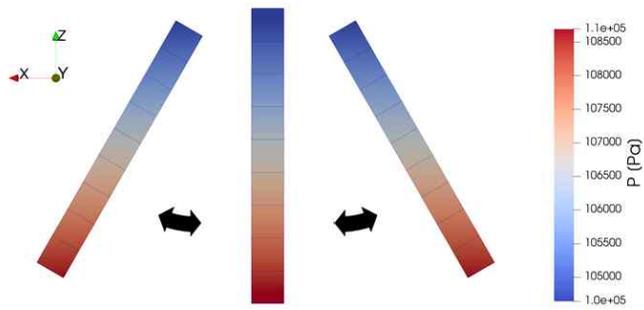
(e) z축 직선 주기 운동

그림 3.12 3차원 슬래브(단상 조건)

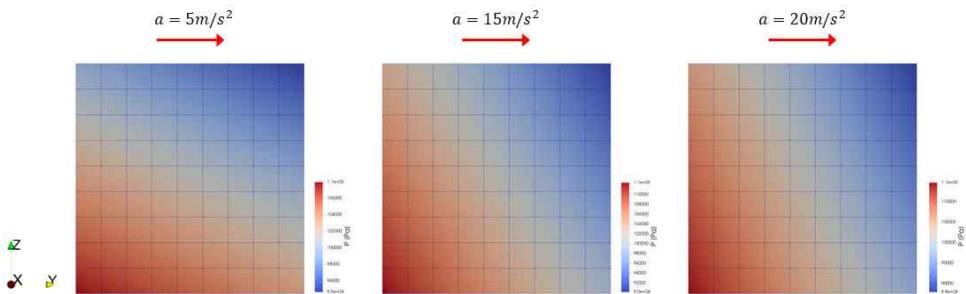
해석결과

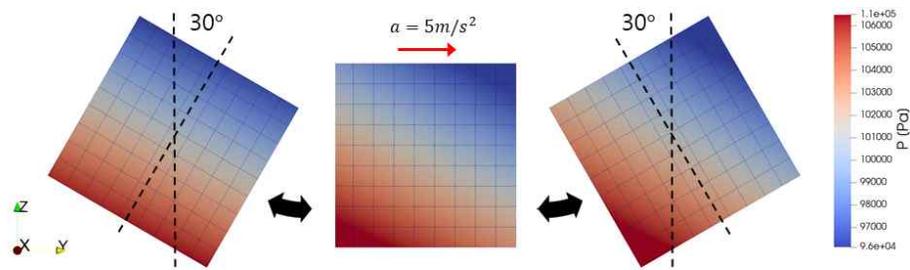


(a) x축 회전운동 (진폭  $30^\circ$ )

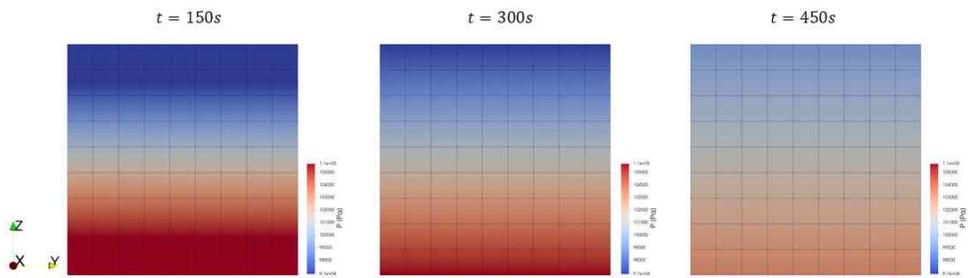


(b) y축 회전운동 (진폭  $30^\circ$ )



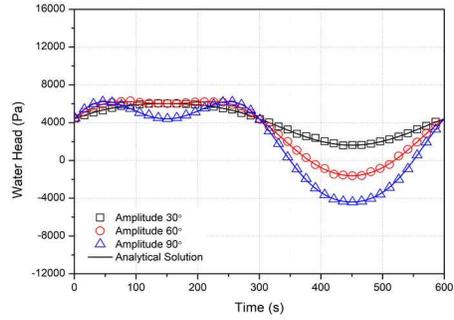
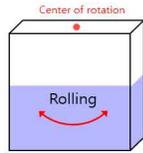


(d) 복합운동

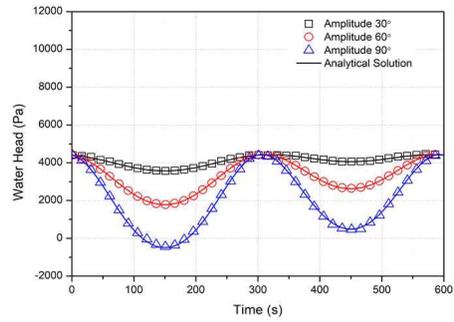
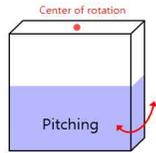


(e) z축 직선 주기 운동 (가속도  $5\text{ m/s}^2$ )

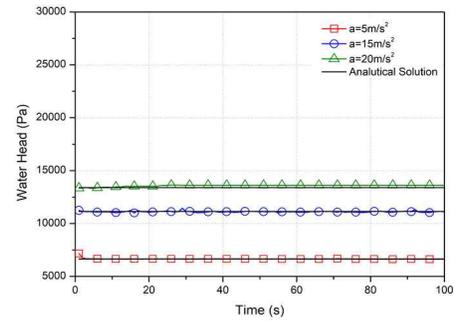
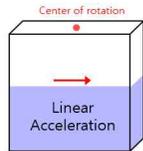
그림 3.13 3차원 슬래브(단상 조건) 압력분포

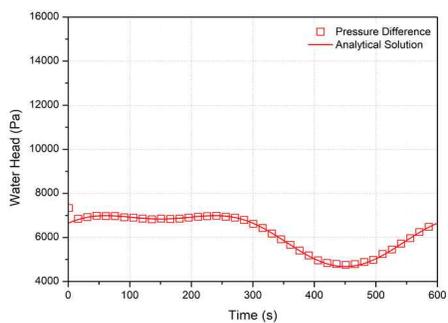
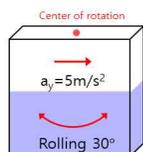


(a) x축 회전운동

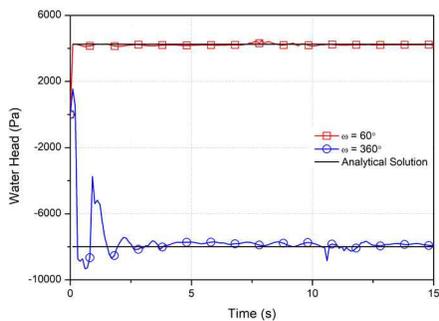
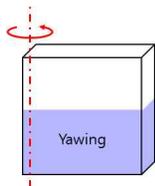


(b) y축 회전운동



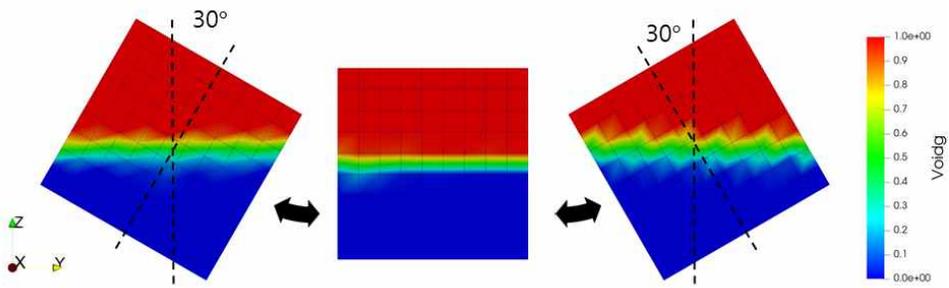


(d) 복합운동

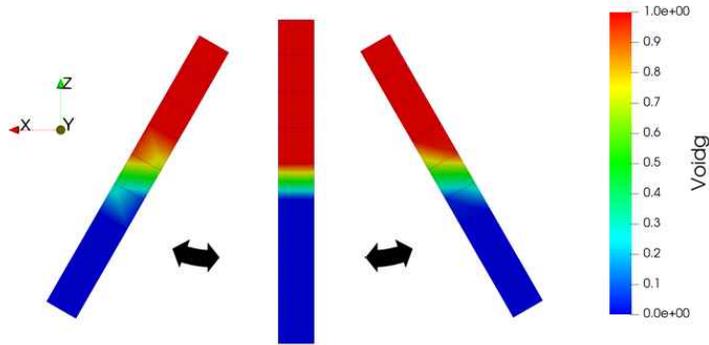


(e) z축 회전운동

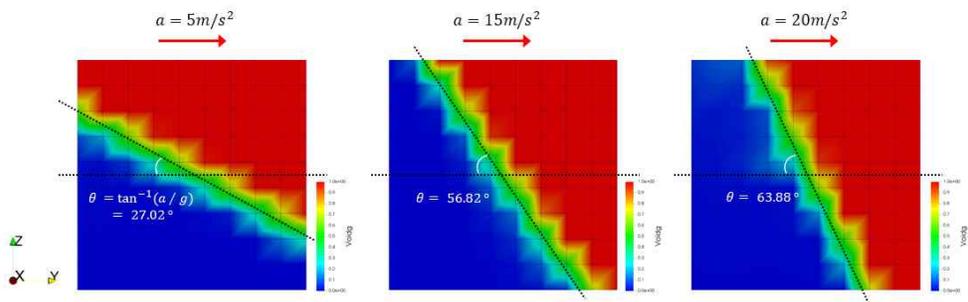
그림 3.14 3차원 슬래브(2상 조건) 해석결과

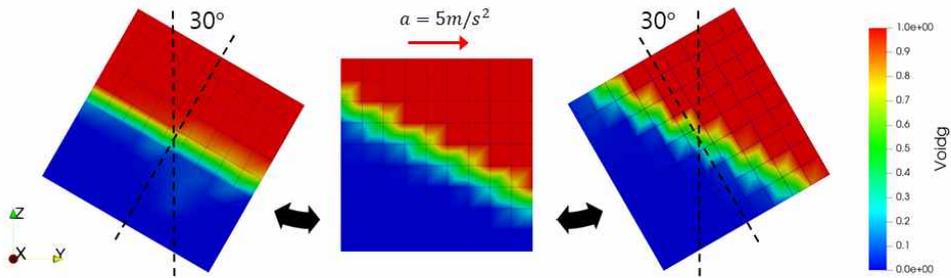


(a) x축 회전운동 (진폭 30°)

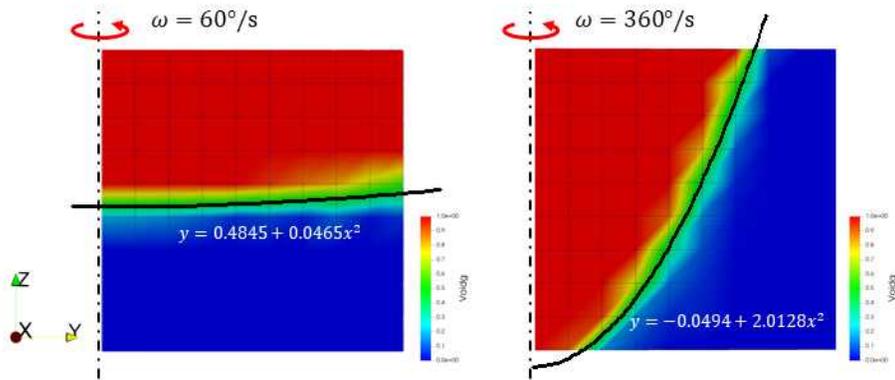


(b) y축 회전운동 (진폭 30°)





(d) 복합운동



(e) z축 회전운동

그림 3.15 3차원 슬래브(2상 조건) 기포율 분포

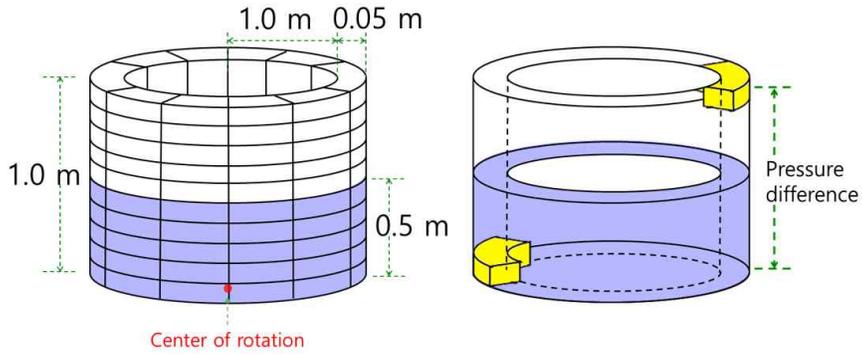


그림 3.16 3차원 실린더 해석모델

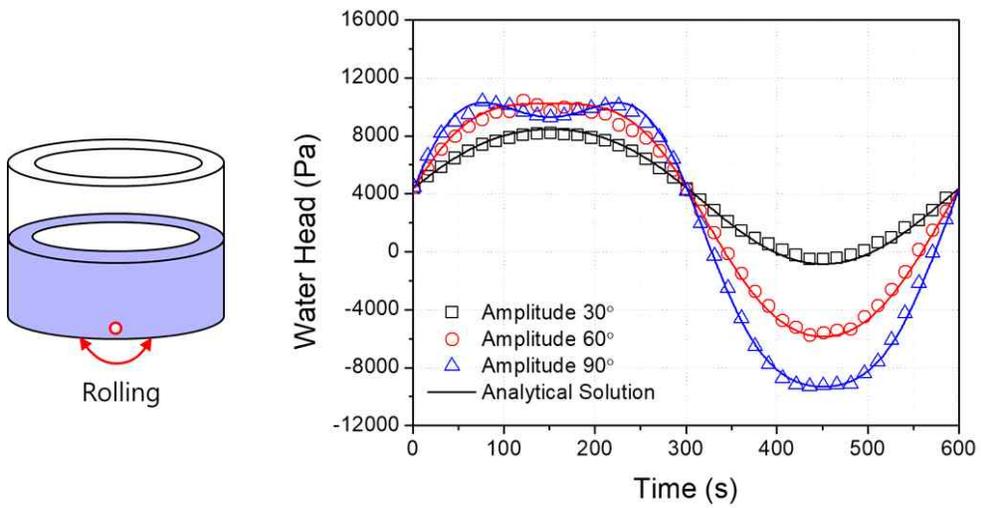
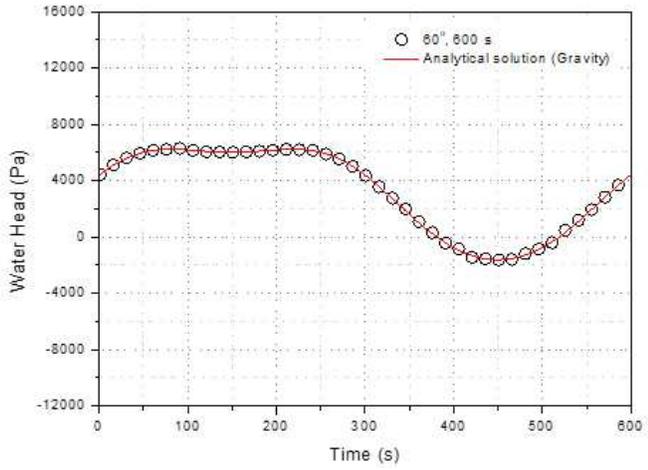
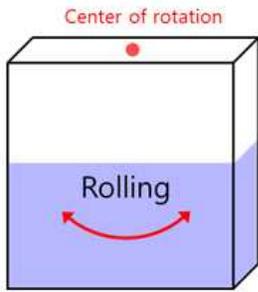
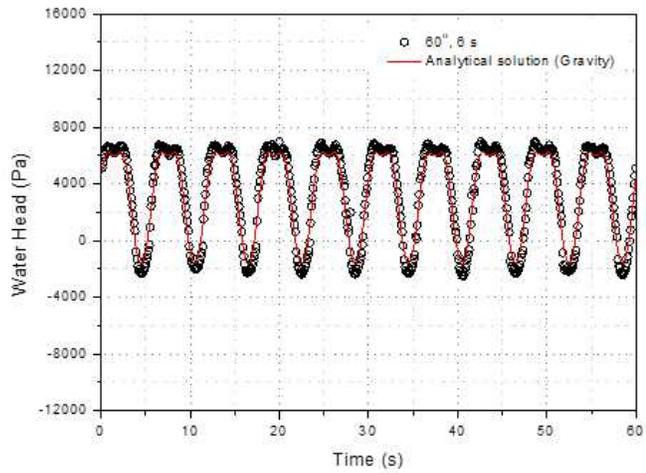
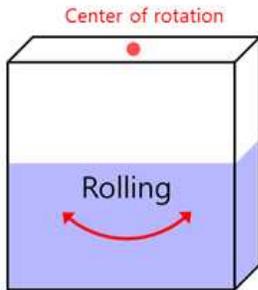


그림 3.17 3차원 실린더 개념문제 해석결과

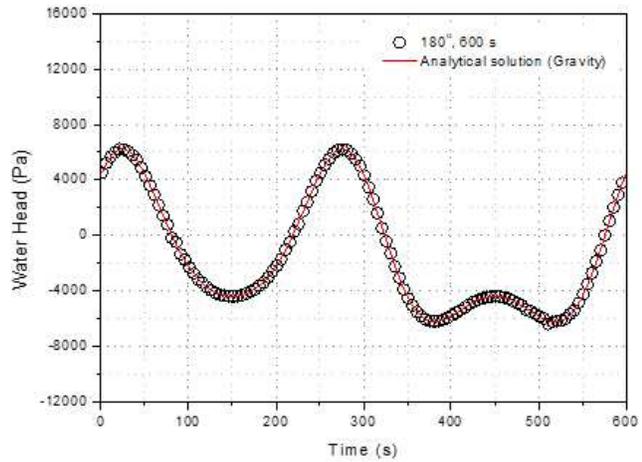
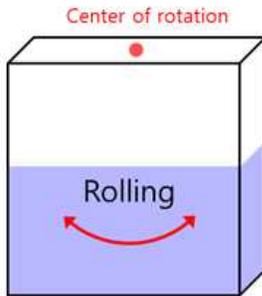


(a) x축 회전운동 (진폭  $60^\circ$  , 주기 600 초)

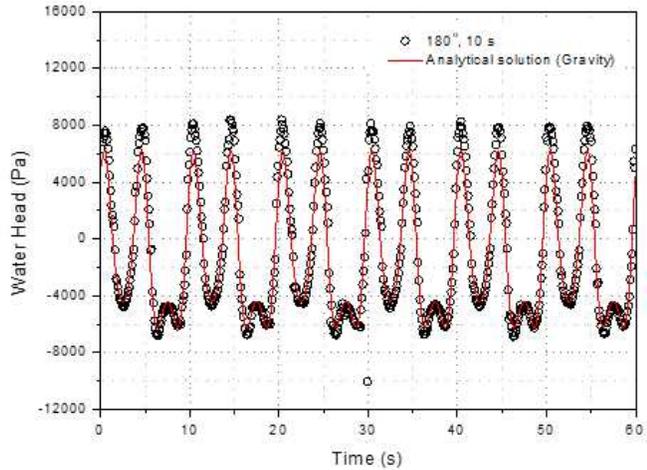
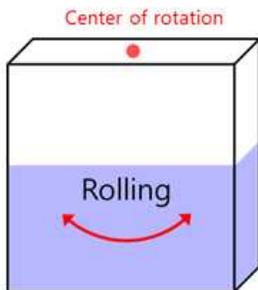


(b) x축 회전운동 (진폭  $60^\circ$  , 주기 6 초)

그림 3.18 MULTID 해석능력 확인 ①

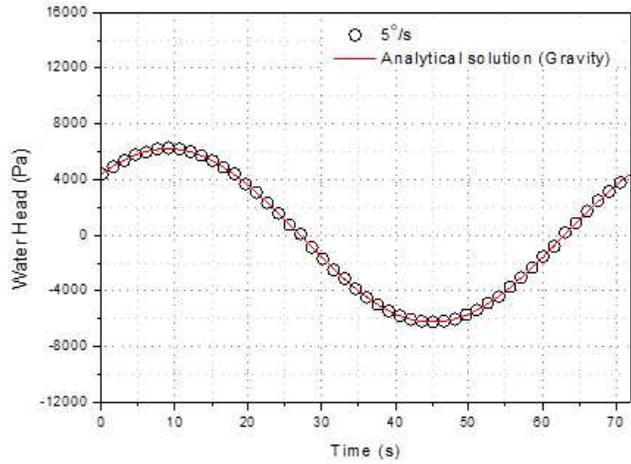
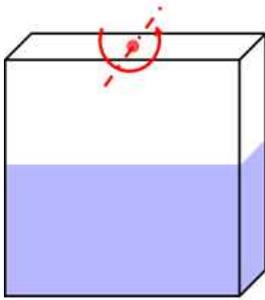


(a) x축 회전운동 (진폭  $180^\circ$  , 주기 600 초)

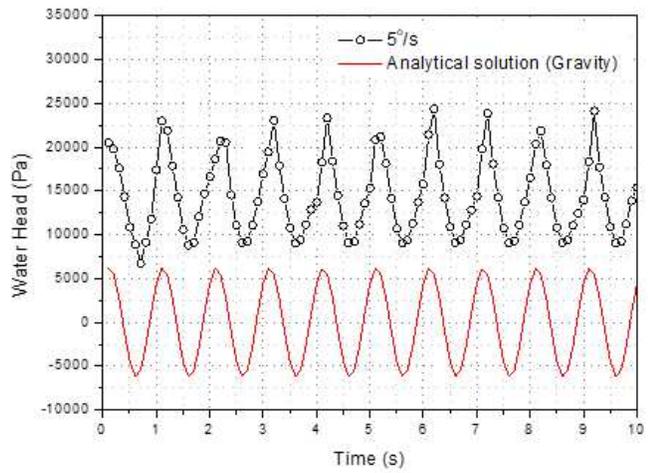
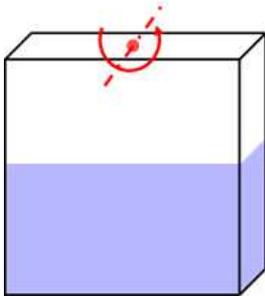


(b) x축 회전운동 (진폭  $180^\circ$  , 주기 10 초)

그림 3.19 MULTID 해석능력 확인 ②



(a) x축 회전운동 ( $\omega = 5^\circ /s$ )



(b) x축 회전운동 ( $\omega = 360^\circ /s$ )

그림 3.20 MULTID 해석능력 확인 ③

## 제 4 장 MARS-KS motion model 응용연구

해양원전은 해양 환경에 의한 외력의 영향을 받는다. 원자로의 작동 유체에 가해진 외력은 주요 열수력 특성 변화의 원인이 될 수 있다. 경사요동 조건에서의 임계열유속 실험 결과(J.S. Hwang et al., 2013)에 따르면 상대적으로 저압, 저유량(dry-out) 조건에서는 경사요동의 진폭이 커짐에 따라 임계열유속의 감소 현상이 나타났으며, 고압, 고유량(Departure from Nucleate Boiling: DNB) 조건에서는 임계열유속의 증가 현상을 확인한 바 있다.

MARS-KS motion model을 통해 운동 조건에서의 열수력 특성을 확인하기 위해서는 외력과 볼륨의 회전을 계산할 수 있는 동적운동 수치 모델과 외력의 영향이 반영된 열수력 모델이 개발되어야 한다. 본 연구를 통해 동적운동 수치 모델과 관련된 코드의 개선은 수행되었지만, 열수력 모델의 경우 개선연구가 이뤄지지 않았다. 현재 MARS-KS 코드에 탑재된 열수력 모델은 육상원전을 기반으로 하며, 따라서 MARS-KS motion model을 통해 해양원전에서 나타나는 열수력 특성을 제대로 모사하기는 어렵다.

이러한 배경에서 Motion model을 통해 2상유동의 열수력 현상을 예측한 본 응용연구는 물리적 의미보다 코드의 활용성을 확인하기 위한 목적이 크다. 운동 조건에서 유체의 열수력 특성이 어떻게 달라지는지를 거시적으로 확인하고, 추후 MARS-KS의 열수력 모델 개선연구를 위한 기반이 되고자 한다.

## 제 1 절 Motion model을 통한 유동 불안정성 예측

원자로의 2상유동에서 나타날 수 있는 유동 불안정성은 열전달 특성에 영향을 미쳐 임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)과 같은 비등위기(Boiling Crisis)의 원인이 될 수 있다. 특히, 해양원전의 경우 해양 조건에 의한 가혹한 환경에 노출되어 있으므로, 동적운동 시 유동 불안정성에 대한 예측은 안전한 원자로 운영을 위해 필수적이다. 유동 불안정성의 정확한 예측을 통해 정상운전을 위한 적절한 운전제한조건을 설정해야 한다.

유동 불안정성은 발생 형태에 따라 크게 정적인 형태와 동적인 형태로 나눌 수 있으며, 각각의 형태에서 세부적인 분류가 가능하다(J.A. Boure et al, 1973). 먼저, 정적인 형태는 유체의 작은 동요에 의해 발생할 수 있으며, 정상상태에 이를 때까지 감쇠되어 사라지게 된다. 세부 종류로는 유동 이탈(Flow excursion), 유동 양식 천이(Flow pattern transition), 그리고 비등위기가 있다. 동적인 형태는 가열 채널 간의 2상유동에서 나타날 수 있으며, 채널 입구와 출구의 압력 변화 등이 발생 원인이 된다. 세부 종류로는 밀도파 진동(Density wave oscillation: DWO) 또는 압력강하 진동(Pressure drop oscillation)이 있다.

Colombo는 미국 원자력규제위원회(NRC)의 열수력 해석코드인 RELAP5를 이용하여 2개 채널의 2상유동에서 나타나는 밀도파 진동(DWO)에 대해 해석한 바 있다(M. Colombo et al, 2012). 해석모델은 그림 4.1과 같다. Time-dependent Junction 컴포넌

트를 사용하여 강제대류를 구현하였으며, 열구조체를 통해 2개 채널에서의 2상유동을 형성하였다. 2개 채널에서 밀도와 진동 형태의 유동 불안정성이 나타나면 채널 간 유량의 교차 진동이 발생하며, 이는 그림 4.2-(a)와 같이 RELAP5 해석결과를 통해 확인할 수 있다. 또한, Colombo는 Ishii가 제안한 무차원화된 안전성 맵(Dimensionless stability map)을 통해 불안정 영역을 예측하였다(M. Ishii, 1971). Ishii는 가열 채널에서 나타나는 유동 불안정성의 예측을 위해 무차원화된 안정성 맵을 제시하였다. 이는 압력과 온도 등의 유체 특성, 그리고 채널의 폭과 길이와 같은 제원이 정해지면 유량, 열출력, 그리고 미포화도에 의해 유동 불안정성이 결정된다는 것을 기반으로 한다. 무차원화된 안정성 맵에서는 식 (4-1)과 같이 유량과 열출력의 무차원수인  $N_{pch}$ (Phase change number)와 식 (4-2)의 미포화도 무차원수  $N_{sub}$ (Subcooling number)을 통해 표현된다. 무차원화된 안정성 맵을 통해 2상유동에서 나타나는 유동 불안정성의 경계를 확인할 수 있다.

$$N_{pch} = \frac{Q}{\Gamma \cdot h_{fg}} \cdot \frac{\nu_{fg}}{\nu_f} \quad (4-1)$$

$$N_{sub} = \frac{\Delta h_{in}}{h_{fg}} \cdot \frac{\nu_{fg}}{\nu_f} \quad (4-2)$$

가열 채널에서 나타나는 유동 불안정성은 무차원화된 안정성 맵에서 전형적인 L자 형태의 경계선을 가진다. 이는 채널의 유량이

일정할 때, 특정 지점을 경계로 미포화도와 열출력의 거동이 반대로 나타남을 의미한다. 안정성 맵에서 경계선을 기준으로 왼쪽은 안정 영역(Stable region)이며, 오른쪽은 불안정 영역(Unstable region)이다. RELAP5를 통해 확인한 2개 채널의 안정성 맵은 그림 4.2-(b)와 같다. Colombo는 2개 채널 외에도 단일 채널과 Bypass 조건에서의 유동 불안정성을 해석하였지만, 본 연구에서는 초록색 네모 표시의 2개 채널 해석결과에 대해서만 다루고자 한다. 실선 및 점선은 특정 건도 조건을 의미한다.

Motion model을 통한 유동 불안정성 예측에 앞서 코드의 해석능력을 확인하였다. MARS-KS를 통해 2개 채널의 유동 불안정성을 해석하고, RELAP5 해석결과와 비교하였다. 해석모델은 그림 4.3과 같다. RELAP5 해석모델을 그대로 모사하여 가열 채널의 직경 및 길이 조건을 동일하게 입력하였다. 채널은 각각 10개의 볼륨으로 구성되어 있다. 작동 유체의 경계조건도 RELAP5 해석모델과 동일하다. 물의 초기 압력은 7.0 MPa이며, 안정성 맵을 확인하기 위한 초기 온도 범위는 424.45 K(미포화도 135 K)부터 555.45 K(미포화도 4 K)까지이다.

먼저, MARS-KS를 통해 2개 채널에서 나타나는 유량 거동을 살펴보았다. 해석결과는 그림 4.4-(a)와 같으며, RELAP5 해석결과와 같이 채널 간 유량의 교차 진동이 발생하였다. 다음으로 무차원화된 안정성 맵을 통해 유동 불안정성의 경계를 살펴보았다. 일정한 압력 및 유량 조건에서는 미포화도에 따라 유동 불안정성이 발생하는 열출력이 다르게 나타난다. 이를 무차원화된 안정성

맵을 통해 표현하면 유동 불안정성의 경계를 확인할 수 있다. 유동 불안정성의 발생 유무에 대한 기준은 유량 진동의 진폭이 정상 상태 유량의 100%에 도달했을 때이며, 이는 Colombo 연구와 동일하게 적용한 사항이다. MARS-KS를 통해 2개 채널의 안정성 맵을 확인한 해석결과는 그림 4.4-(b)와 같다. RELAP5 해석결과와 같이 L자 형태의 유동 불안정성의 경계를 확인할 수 있다. RELAP5와 MARS-KS 해석결과에서 유량 진동의 진폭 및 안정성 맵에서의 유동 불안정성 경계 위치는 다소 다르게 나타났지만, 본 연구가 정량적 비교를 통해 MARS-KS의 유동 불안정성 해석능력을 검증하기 위함이 아니며, 두 가지 코드의 해석결과가 전반적으로 유사한 거동을 보인다는 점에서 MARS-KS의 유동 불안정성 해석능력을 충분히 확인하였다.

이번에는 Motion model을 통해 동적운동 시 불안정 영역의 변화 거동에 대해 검토하였다. 운동 조건으로는 진폭 45도, 주기 10초의 x축 회전운동을 입력하였다. 해석결과는 그림 4.5와 같다. 초록색 네모 표식은 정지 상태에서의 유동 불안정성의 경계이며, 빨간색 세모 표식은 회전운동 조건에서의 유동 불안정성 경계이다. 정지 상태와 회전운동 조건에서 모두 L자 모양의 불안정성 경계를 확인하였다. 하지만 회전운동 조건에서는 불안정 영역이 다소 증가하였는데, 이는 유동 불안정성이 발생한 열출력 조건이 정지 상태보다 더 낮음을 의미한다. 이와 같은 응용연구를 통해 운동 조건에 의한 유동 불안정성의 특성 변화 및 Motion model의 해석능력을 확인하였다.

## 제 2 절 Motion model을 통한 임계열유속 예측

임계열유속은 비등열전달 현상에서 나타나는 특정 임계점으로, 열전달 효율이 급격히 감소하는 지점을 말한다. 원자로 노심에서 임계열유속이 발생하면 높은 온도로 인해 핵연료봉이 손상될 수 있다. 한편, 해양원전은 외력의 영향으로 인해 육상원전과 다른 임계열유속 특성이 나타난다. 경사요동 조건에서의 임계열유속 실험 결과(J.S. Hwang et al., 2013)를 살펴보면 운동 조건에 따라 임계열유속이 달라지는 현상을 관측할 수 있다. 따라서 동적운동 시 임계열유속의 거동 특성을 예측하여, 임계열유속이 발생하지 않도록 원자로를 운전하는 것이 매우 중요하다. 이러한 배경에서 Motion model을 통한 임계열유속의 예측 연구를 수행하였다. 다만, 앞서 설명한 바와 같이 현재 요동 조건에서의 임계열유속 모델은 MARS-KS 내에 직접 구현되어 있지 않기 때문에, 본 연구는 Motion model의 활용적 측면에 한하여 수행되었다.

Motion model을 통해 정지 상태와 회전운동 조건에서 임계열유속의 발생 유무를 비교하였다. 해석모델은 유동 불안정성 예측 시 사용하였던 그림 4.3의 모델과 동일하다. 작동 유체인 물의 초기 압력은 7 MPa, 초기 온도는 555.45 K이며, 운동 조건은 진폭 45도, 주기 10 초의 x축 회전운동이다.

그리고 유량에 따른 차이를 확인하기 위해 고유량 조건과 저유량 조건에 대해 모두 해석하였다. 일반적으로 고유량 조건에서 임계열유속이 발생하면 DNB 현상이 나타난다. 유체의 평균온도가

포화온도에 도달하지 못하였기 때문에, 벽면 근처에서 기포가 폭 발적으로 생성되고, 열전달 효율이 급격히 감소하여 벽면 온도가 상승한다. 높은 열속 조건에서 임계열유속이 발생하므로, 재습윤 없이 벽면 온도가 비가역적으로 발산하는 경향이 있다. 저유량 조건에서 임계열유속이 발생하면 dry-out 현상이 나타난다. 유체의 평균온도가 포화온도에 근접하여 환형류(Annular flow)가 형성되고, 액막이 마르면서 증기에 노출된 벽면 온도가 상승한다. 고유량과 달리 저유량에서는 상대적으로 낮은 열속 조건에서 임계열유속이 발생하여, 재습윤으로 인한 벽면 온도의 진동이 나타난다.

먼저, 고유량 조건에서의 해석결과는 다음과 같다. 이때, 정지 상태와 회전운동에서의 유량 및 열속 조건은  $0.2369 \text{ kg/s}$ ,  $0.88 \text{ MW/m}^2$ 로 동일하다. 정지 상태에서는 열속 조건에 의해 2상유동이 형성된 가운데, 그림 4.6-(a)와 같이 유동 불안정성에 의한 채널 간 유량의 교차 진동이 발생하였다. 벽면 온도는 그림 4.6-(b)와 같이 다소 증가하였지만, 발산 형태는 보이지 않았다. 이를 통해 임계열유속이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 하지만 회전운동 조건에서는 그림 4.7-(a)와 같이 채널 간 유량의 교차진동과 함께 회전운동에 의한 파형이 나타났다. 그리고 임계열유속이 발생하여 그림 4.7-(b)와 같이 벽면 온도가 비가역적으로 발산하는 것을 확인할 수 있다. 벽면 온도의 발산은 고유량 조건에서 나타나는 DNB 현상을 Motion model이 제대로 모사하고 있음을 보여준다.

다음으로 상대적으로 저유량 조건에서의 해석결과이다. 정지 상태와 회전운동에서의 유량 및 열속 조건은  $0.02369$  ,  $0.1$

$MW/m^2$ 이다. 정지 상태에서는 그림 4.8-(a)와 같이 유동 불안정성에 의한 유량의 진동이 발생하였다. 벽면 온도를 살펴보면 임계 열유속이 발생하지 않아, 그림 4.8-(b)와 같이 약간의 진동 형태의 거동만 보인다. 하지만 회전운동의 경우 그림 4.9-(a)와 같이 유량의 진동과 함께 운동 조건에 의한 큰 폭의 파형이 나타났다. 또한, 임계열유속이 발생하여 그림 4.9-(b)와 같이 벽면 온도의 진동이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 벽면 온도의 진동은 저유량 조건에서 나타나는 대표적인 dry-out 현상이다. Motion model은 고유량 조건과 마찬가지로 저유량 조건에서도 임계열유속에 의한 현상을 제대로 모사하고 있으며, 또한, 동적운동 시 임계열유속의 거동이 달라질 수 있음을 보여준다.

Motion model을 통해 유동 불안정성과 임계열유속 현상을 예측하였다. 앞서 설명한 바와 같이 열수력 모델의 개선이 이뤄지지 않았기 때문에, 본 연구는 물리적 의미보다 코드의 활용적 측면을 확인하기 위해 수행되었다. 동적운동 시 유체의 열수력 특성이 어떻게 달라질 수 있는지 해석적으로 확인하였으며, 이와 같은 응용 연구가 향후 열수력 모델 개선연구의 기반이 되기를 기대한다.

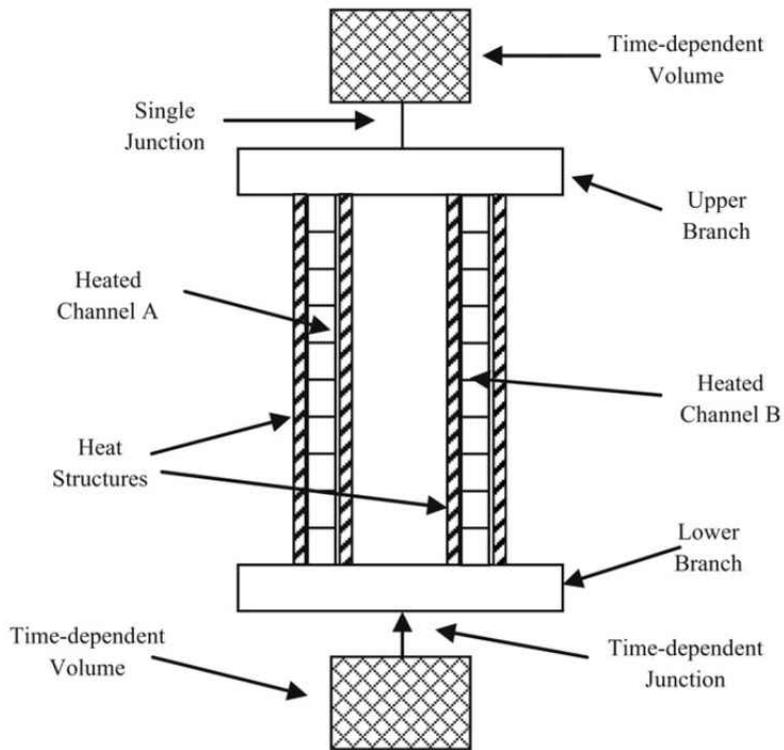
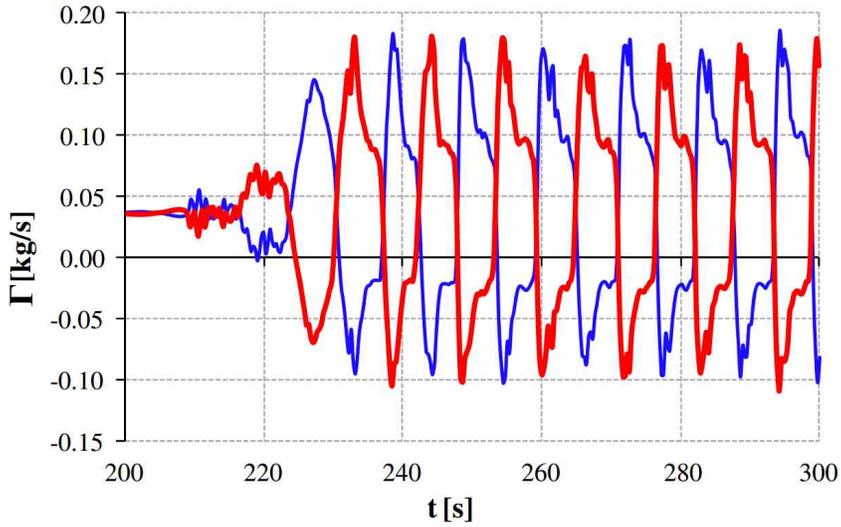
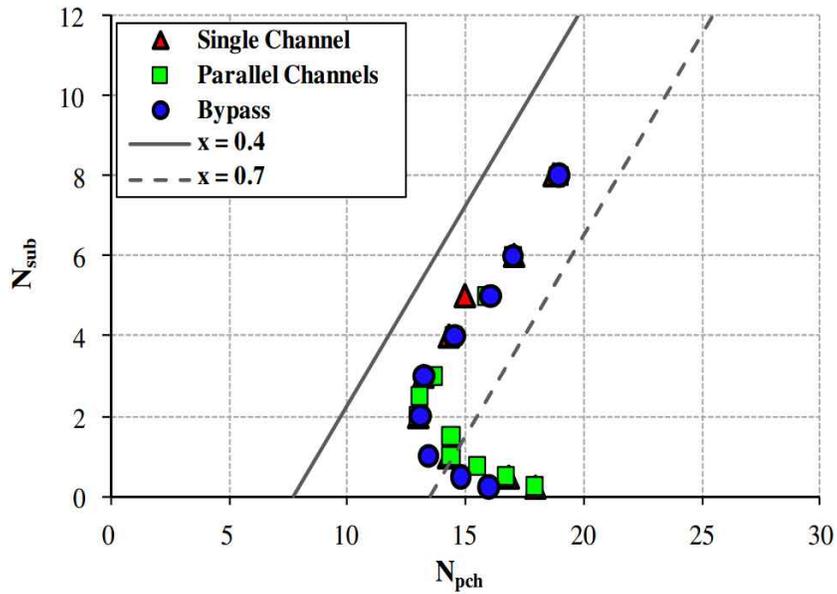


그림 4.1 RELAP5 해석모델(M. Colombo et al., 2012)



(a) 유량



(b) 안정성 맵

그림 4.2 RELAP5 해석결과(M. Colombo et al., 2012)

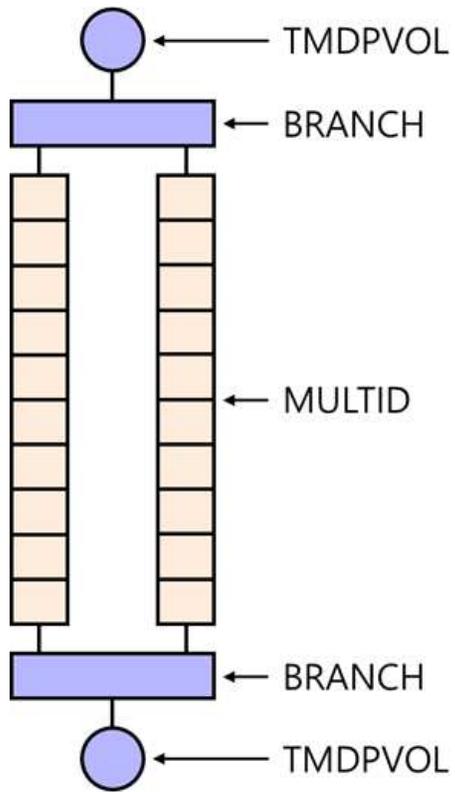
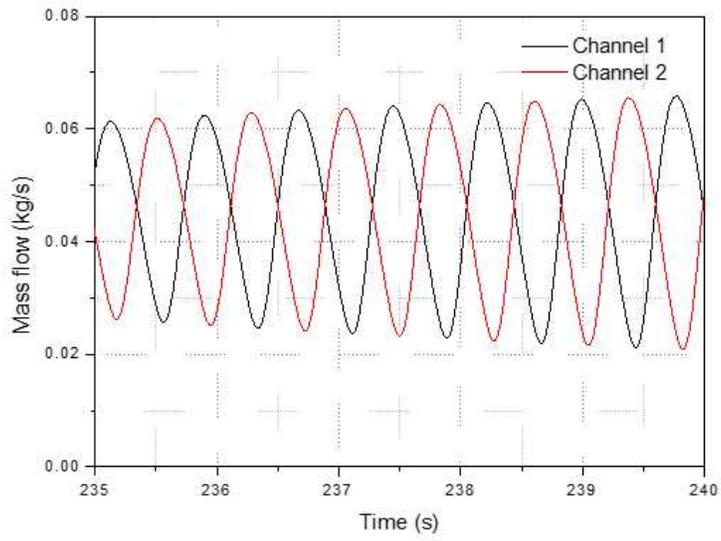
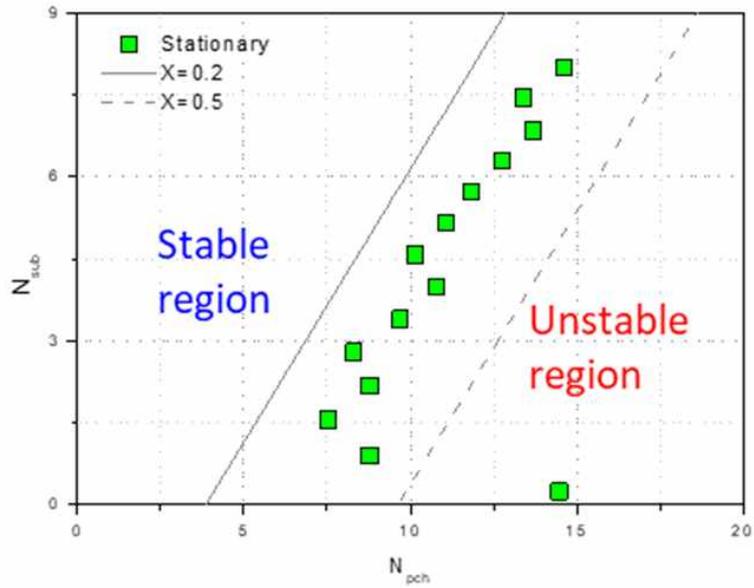


그림 4.3 MARS-KS 해석모델



(a) 유량



(b) 안정성 맵

그림 4.4 MARS-KS 해석결과

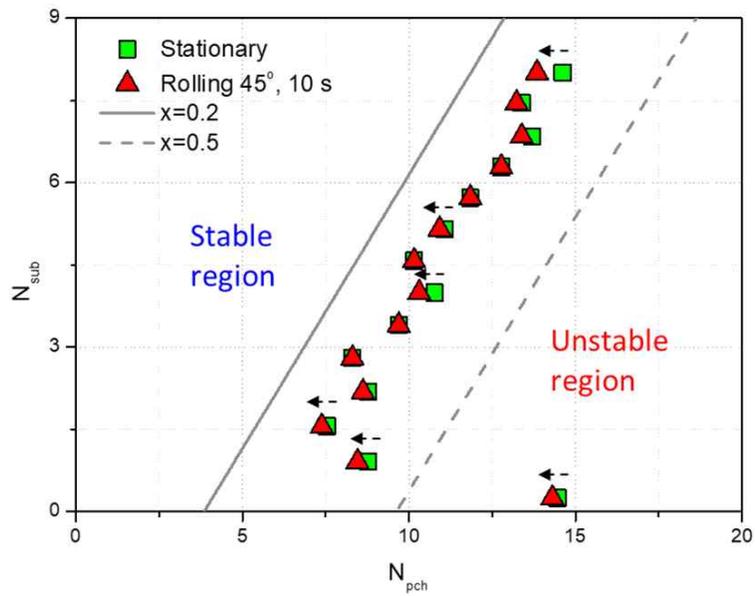
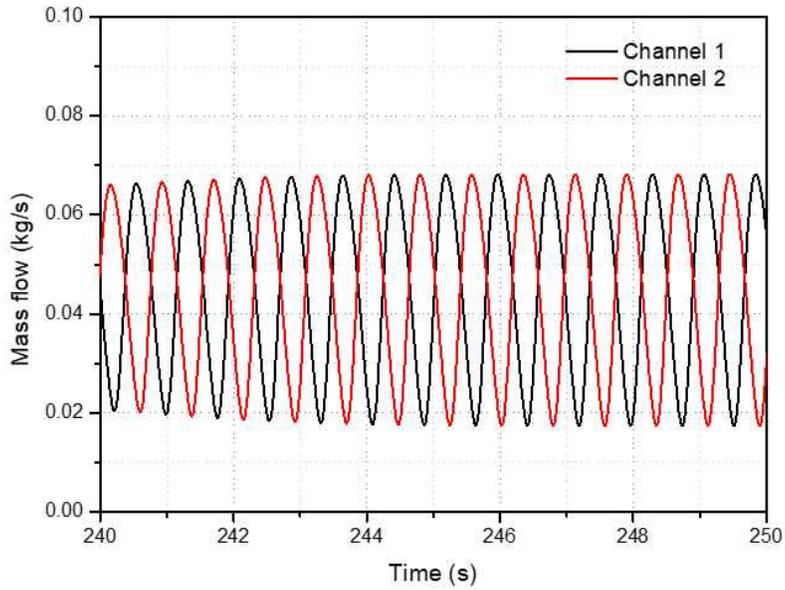
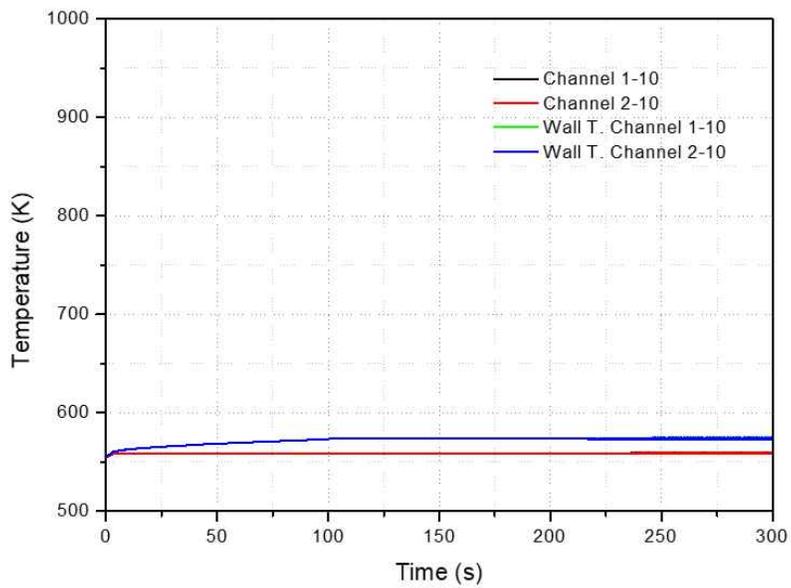


그림 4.5 유동 불안정성 경계 비교결과

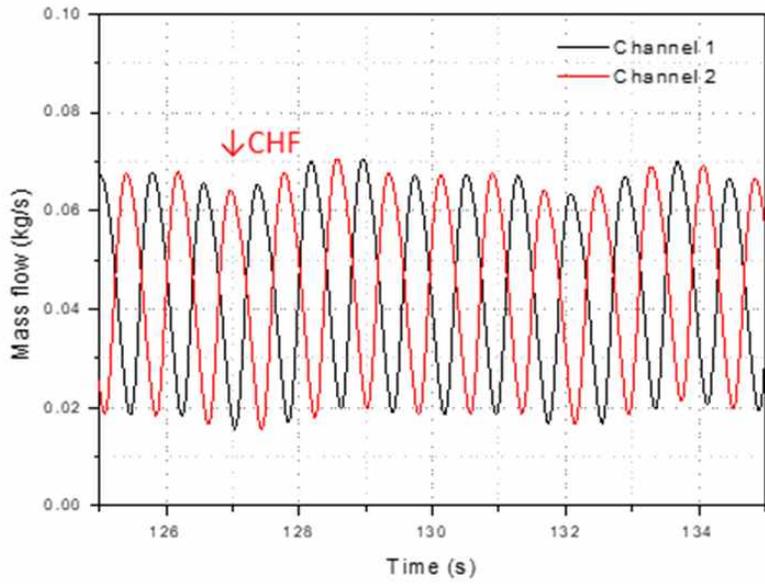


(a) 유량

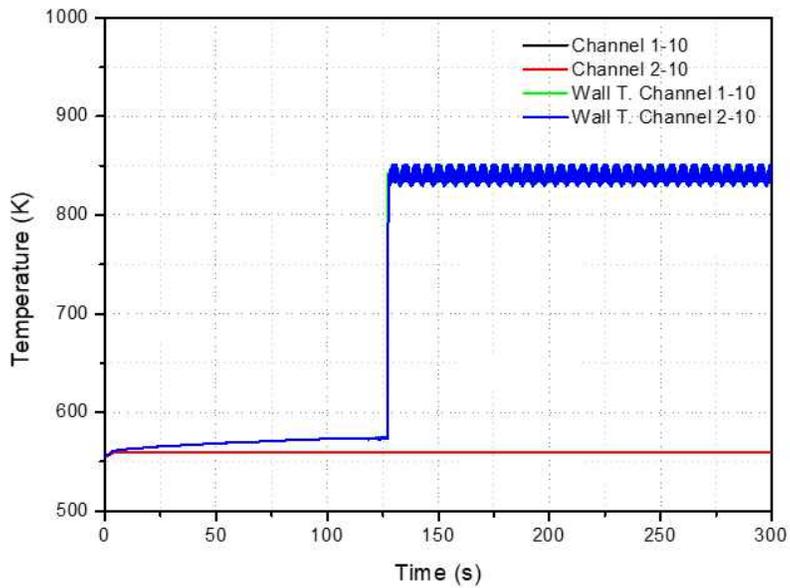


(b) 벽면 온도

그림 4.6 정지상태 임계열유속 예측(고유량)

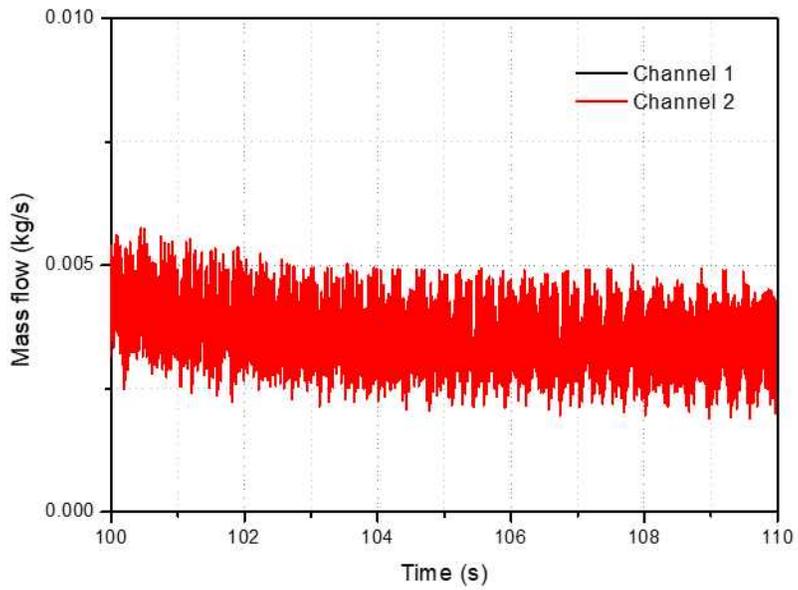


(a) 유량

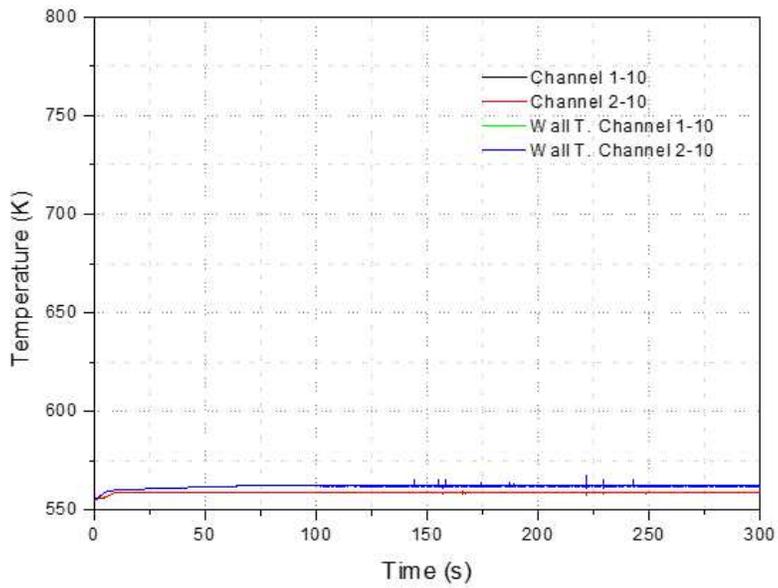


(b) 벽면 온도

그림 4.7 회전운동 임계열유속 예측(고유량)

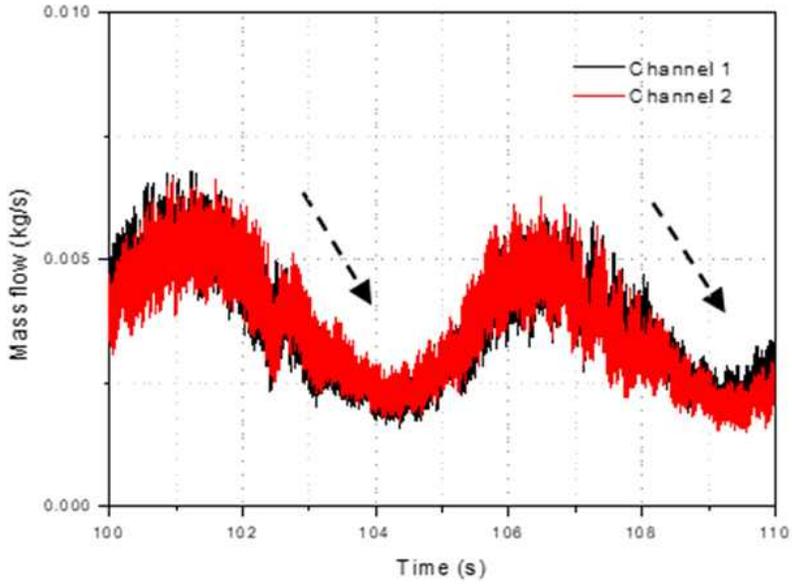


(a) 유량

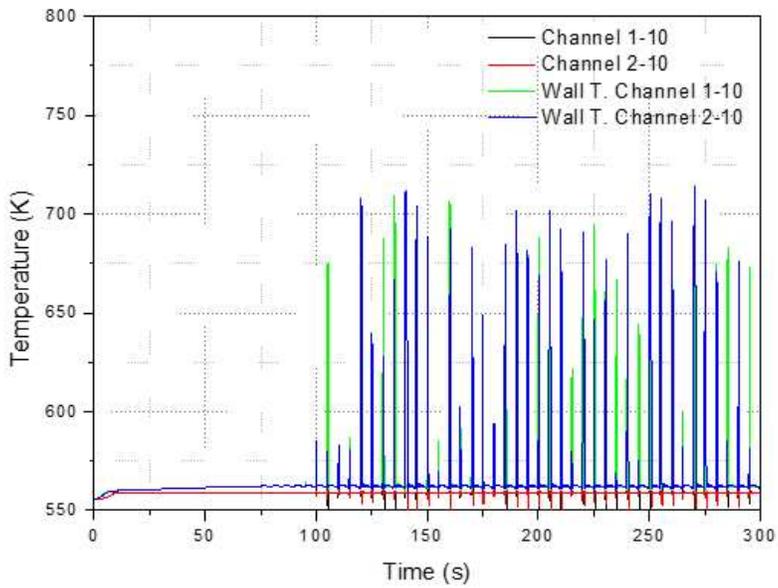


(b) 벽면 온도

그림 4.8 정지상태 임계열유속 예측(저유량)



(a) 유량



(b) 벽면 온도

그림 4.9 회전운동 임계열유속 예측(저유량)

## 제 5 장 결 론

MARS-KS motion model의 다차원 유동 해석능력을 구현하고, 개념문제를 통해 이를 검증하였다. 나아가 개선된 코드로 운동 조건에서의 열수력 현상을 예측하여, 해양원전 안전해석코드의 활용성을 입증하였다.

본 연구를 통해 7가지 사항을 개선하였다. 먼저, 입력 파일의 생성 시간 및 인적 오류를 줄이기 위해 Volume direction unit vector의 생성방법을 개선하였으며, 관성력을 고려한 직선가속도 항 및 회전 중심에 관한 오류를 수정하였다. 또한, 매시간 단계마다 정선 정보를 업데이트하도록 새로운 알고리즘을 추가하였으며, 다차원 유동을 구현하기 위한 축별 압력 수두 계산 및 연결정보 계산식을 개선하였다. 마지막으로 Motion model을 MULTID 컴포넌트로 확장하여, 3차원 해석을 위한 기반을 구축하였다.

개선된 코드는 다양한 개념문제를 통해 검증하였다. 1차원 파이프 구성된 마노미터와 수직 파이프 개념문제를 통해 1D 컴포넌트 검증을 수행하였으며, 교차유동 검증을 위해 1차원 파이프와 교차정선으로 강수부를 모사한 개념문제를 선정하였다. 그리고 MULTID 컴포넌트 검증을 위해 3차원 슬래브, 3차원 실린더 개념문제를 해석하였다. 또한, 외력이 복합적으로 작용하는 운동 조건을 적용하여, Motion model의 MULTID 컴포넌트 해석능력을 확인하였다.

마지막으로 응용연구를 통해 2상유동에서 나타나는 유동 불안

정성과 임계열유속을 예측하였다. Motion model을 사용하여 정지 상태와 회전운동 조건에서 열수력 현상이 어떻게 달라지는지 비교하였다. 해석결과, 회전운동 조건에서 안정성 맵의 불안정 영역이 증가하였으며, 운동 조건에 의해 임계열유속의 변화를 확인하였다. 이처럼 개선된 코드를 활용하여 해양원전의 열수력 현상을 예측할 수 있음을 입증하였다.

MARS-KS는 원자력 안전규제 전문기관인 한국원자력안전기술원(KINS)의 규제검증용 안전해석코드이며, 해양원전 개발 시 MARS-KS motion model은 규제 측면에서 높은 활용성을 가질 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 코드의 다차원 유동 해석능력을 구현하여 해양원전 안전해석을 위한 기반을 마련하였다. 개선된 Motion model은 공식 MARS-KS 버전에 이식하기 위한 절차를 진행 중이며, 이를 통해 규제기관의 독자적인 검증능력 확보에 기여하였다. 향후 동적운동을 고려한 열수력 모델 및 MARS-KS 부품모델 등의 개선이 이루어질 것으로 보이며, MARS-KS motion model이 높은 신뢰도의 해양원전 안전해석코드로 발전할 것을 기대한다.

## 용 어 설 명

$A$	amplitude of oscillation
$a_0$	initial x/y/z acceleration, $\text{m/s}^2$
$a_{x,y,z}$	acceleration of each axis ( $\text{m/s}^2$ )
$g$	acceleration of gravity, $\text{m/s}^2$
$H$	height, m
$h_0$	initial water level, m
$h$	enthalpy, J/kg
$h_{fg}$	latent heat, J/kg
$L$	length or diameter of the manometer, m
$M_{x,y,z}$	rotation matrix of x/y/z-axis
$N_{pch}$	Phase change number
$N_{sub}$	Subcooling number
$P$	pressure, Pa
$P_a$	atmospheric pressure, Pa
$P_{x,y,z}$	pressure of x/y/z-axis
$Q$	thermal power, W
$r$	radius of gyration, m
$T$	period of oscillation
$t$	current time step
$u$	velocity, m/s

*Greek letters*

$\Gamma$	mass flow rate, kg/s
$\Omega$	angular velocity, degree/s
$\theta_0$	initial roll/pitch/yaw angle, degree
$\theta_{x,y,z}$	rotational angle of each axis, degree
$\rho$	density, kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	sheer stress, Pa
$\phi$	phase angle, degree
$\omega$	angular velocity, degree/s
$\nu$	specific volume, m <sup>3</sup> /kg
$\nu_{fg}$	$\nu_g - \nu_f$

*Subscripts*

$in$	inlet
$f$	liquid
$g$	gas

## 참 고 문 헌

H.K. Beom, G. W. Kim, G. C. Park, H. K. Cho, Verification and improvement of dynamic motion model in MARS for marine reactor thermal-hydraulic analysis under ocean condition, Nuclear Engineering and Technology, 51 (2019) 1231-1240.

H.K. Beom, Improvement of dynamic motion model in MARS-KS for marine reactor thermal-hydraulic analysis, Master thesis, Seoul National University, Dept. Nuclear Engineering (2019)

I.H. Kim, J. Won, T. Bae, K. Yi, H.R. Choi, G.S. Kim, S.K. Lee, S. Kim, C.K. Chung, B.G. Kim, J.T. Seo, B.J. Lee, Development of BANDI-60S for a Floating Nuclear Power Plant, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Goyang, Korea, October 24-25, (2019).

J.A. Boure, A.E. Bergles, L.S. Tong, Review of two-phase flow instability, Nuclear Engineering and Design 25 (1973) 165-192.

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

J.H. Kim, I.S. Hwang, I.C. Bang, J. Lee, T. Kim, J. Lee, Current Status of Small & Modular Reactor R&D in Republic of Korea, The 17th IAEA INPRO Dialogue Forum on Opportunities and Challenges in Small Modular Reactors, Ulsan, Korea, July 3, (2019).

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

M. Ishii, Thermally induced flow instability in two-phase mixtures in thermal equilibrium, Doctor thesis, Georgia Institute of Technology, Dept. Mechanical Engineering (1971).

M. Colombo, A. Cammi, D. Papini, M.E. Ricotti, RELAP5/MOD3.3 study on density wave instabilities in single channel and two parallel channels, Progress in Nuclear Energy 56 (2012) 15-23.

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

U.S. Nuclear Regulatory Commission, RELAP/MOD3 Code Manual  
Volume I: Code Structure, system models, and solution methods,  
NUREG/CR-5535 (1998).

## 부록 1. MARS-KS motion model 매뉴얼

### 1. MARS-KS motion model 입력 작성법

MARS-KS motion model을 사용하기 위해서는 MARS-KS 입력자료(indta)와 Motion model 입력자료(indta.motion.inp)가 필요하다. MARS-KS 입력자료에서는 해석에 필요한 모델링 정보를 제공하며, Motion model 입력자료는 동적운동 해석에 필요한 볼륨의 위치 정보 및 운동 조건 등을 제공한다. MARS-KS의 Motion model은 80번 옵션을 통해 사용할 수 있으며, 입력자료(indta)의 1번 카드에서 옵션 번호를 입력하면 된다. 80번 옵션은 움직이는 원자로 모델(The moving reactor model)을 해석하기 위한 Motion model이며, 옵션을 활성화하면 운동 조건에 의한 외력 계산 및 좌표 변환 등의 계산이 수행된다.

Motion model을 사용하기 위해서는 다음 사항을 주의해야 한다. 개선된 코드에서는 MARS-KS 입력자료의 경사각 및 방위각 정보를 이용하여 Volume direction unit vector를 자동생성한다. 따라서 입력자료에서 모든 컴포넌트의 경사각 및 방위각을 정확하게 입력해야 한다. 이를 정확하게 입력하지 않으면 Volume direction unit vector가 제대로 생성되지 않는다는 점을 유의해야 한다. 이해를 돕기 위해 MARS-KS 입력 매뉴얼을 발췌하였다. 그림 부.1은 MARS-KS 입력자료에서 Single-Volume 컴포넌트의 기하학적 정보를 입력하는 CCC0101번 카드의 작성 방법

이다. 해당 카드의 네 번째 입력값인 W4 항에서 볼륨의 방위각, 다섯 번째 입력값인 W5 항에서 볼륨의 경사각을 입력할 수 있다. 상기 주의사항을 고려한 MARS-KS 입력자료의 작성이 필요하며, 모든 컴포넌트에도 공통적으로 적용되는 사항이다. 그 외의 MARS-KS 입력자료 작성은 기존 매뉴얼을 준용한다.

Motion model 입력자료의 작성예시는 그림 부.2와 같다. 입력 자료에는 회전 중심의 좌표, 모델링에 사용된 전체 볼륨 수, 각 볼륨별 중심좌표, 그리고 운동 조건이 차례로 입력되어야 한다. 항목별 입력방법과 주의해야 할 사항은 다음과 같다.

- ① 회전 중심: 회전운동의 중심이 되는 점의 좌표를 입력한다.
- ② 전체 볼륨 수: 정선을 제외한 전체 볼륨의 수를 입력한다.
- ③ 볼륨 번호 및 볼륨 중심좌표: 볼륨의 번호 및 중심좌표를 입력한다. 입력된 볼륨 정보의 개수는 ②에서 입력한 전체 볼륨 수와 일치해야 한다.
- ④ 운동 조건 입력 옵션: Motion model에서는 옵션 번호에 따라 2가지 방법으로 운동 조건을 입력할 수 있다. 먼저, 0번 옵션을 입력하면 회전운동의 진폭 또는 병진운동의 가속도가 사인함수를 그리는 규칙적인 운동 방식이 사용된다. 다음, 1번 옵션을 입력하면 사용자입력옵션을 사용하여 시간에 따라 임의의 각가속도 및 직선가속도를 입력하는 운동 방식이 사용된다. 세부 입력내용은 ⑤ 운동 조건의 내용을 따른다.
- ⑤ 운동 조건: ④ 운동 조건 입력 옵션에 따라 Motion model 입력자료에서 작성해야 하는 내용이 다르며, 옵션별 작성예

시는 그림 부.2에 포함되어 있다. 옵션 번호가 0번인 사인함수의 규칙적인 운동에서는 x축, y축, z축 중심의 3가지 회전운동과 x축, y축, z축 방향의 3가지 병진운동을 입력한다. 회전운동에서는 사인함수 형태의 회전각이 반영되며, 진폭, 주기, 위상각, 각속도, 그리고 초기 경사각을 순서대로 입력한다. 사용하는 각의 단위는 ‘degree’이며, 시간은 ‘second’이다. 다음, 병진운동에서는 사인함수 형태의 가속도가 반영되며, 진폭, 주기, 위상각, 초기 가속도를 순서대로 입력한다. 가속도의 단위는 ‘m/s<sup>2</sup>’이다. 옵션 번호가 1번인 사용자입력옵션에서는 x축, y축, z축 순서의 초기 경사각과 초기 각속도, 운동 데이터 개수, 시간에 따른 임의의 가속도를 입력한다. 임의의 가속도에 필요한 변수는 6개이며, x축, y축, z축 중심의 회전 각가속도와 x축, y축, z축 방향의 직선가속도를 차례로 입력한다. 사용하는 각의 단위는 ‘degree’, 시간은 ‘second’, 길이는 ‘m’이다.

## 2. MULTID 컴포넌트의 Motion model 매뉴얼

Motion model을 통해 MULTID 컴포넌트를 해석하기 위해서는 MARS-KS 입력자료(indta)와 Motion model 입력자료(indta.motion.inp)가 필요하다. MARS-KS 입력자료 및 Motion model 입력자료의 작성은 기존 매뉴얼과 함께 앞서 살펴본 MARS-KS motion model 입력 작성법을 준용한다.

### 8.2.1 Single-Volume X-Coordinate Volume Data, CCC0101-0109

This card (or cards) is required for a single-volume component. The nine words can be entered on one or more cards, and the card numbers need not be consecutive.

W4(R) Azimuthal angle (degrees). The absolute value of this angle must be  $\leq 360$  degrees and is defined as a positional quantity. This quantity is not used in the calculation but is specified for possible automated drawing of nodalization diagrams.

W5(R) Inclination angle (degrees). The absolute value of this angle must be  $\leq 90$  degrees. The angle 0 degrees is horizontal; and positive angles have an upward inclination, i.e., the inlet is at the lowest elevation. This angle is used in the interphase drag calculation.

그림 부.1 MARS-KS 입력 매뉴얼 발췌내용

```

*motion
0.0 0.0 0.0 ①
25 ②
100010000 -1.365 -1.365 -0.75 ③
100020000 -1.365 -1.365 -0.25
100030000 -1.365 -1.365 0.25
100040000 -1.365 -1.365 0.75
200010000 -1.365 1.365 -0.75
200020000 -1.365 1.365 -0.25
200030000 -1.365 1.365 0.25
200040000 -1.365 1.365 0.75
300010000 1.365 1.365 -0.75
300020000 1.365 1.365 -0.25
300030000 1.365 1.365 0.25
300040000 1.365 1.365 0.75
400010000 1.365 -1.365 -0.75
400020000 1.365 -1.365 -0.25
400030000 1.365 -1.365 0.25
400040000 1.365 -1.365 0.75
500010000 0.0 0.0 -0.75
500020000 0.0 0.0 -0.25
500030000 0.0 0.0 0.25
500040000 0.0 0.0 0.75
600010000 0.0 0.0 -0.75
600020000 0.0 0.0 -0.25
600030000 0.0 0.0 0.25
600040000 0.0 0.0 0.75
700010000 0.0 0.0 1.25
0 ④
0.0 0.0 0.0 0.0 20.0 *roll motion
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 *pitch motion
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 *yaw motion
0.0 0.0 0.0 0.0 *x-acceleration
0.0 0.0 0.0 0.0 *y-acceleration
0.0 0.0 0.0 0.0 *z-acceleration

```

- ① 회전 중심 (Reference point)
- ② 전체 노드 수 (Number of nodes)
- ③ 노드 번호 / 노드 중심 좌표 (Node number / Center point)
- ④ 옵션 (0: Sinusoidal function / 1: User-supplied table)

Sinusoidal function

Angular motion:  $\theta = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) + \omega t + \theta_0$

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

A : Amplitude T : Period  
 $\phi$  : Phase angle  $\theta_0$  : Initial angle  
 $\omega$  : Initial angular speed  
 $a_0$  : Initial acceleration

User-supplied table

Time (s)	Angular acceleration (deg/s <sup>2</sup> )			Translational acceleration (m/s <sup>2</sup> )		
	Rolling	Pitching	Yawing	Surging	Swaying	Heaving
...	...	...	...	...	...	...

0.0 0.0 0.0 초기 경사각 (x, y, z) [deg]  
0.0 0.0 0.0 초기 각속도 (x, y, z) [deg/s]  
100 운동 데이터 개수 (< 1000)  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
2.5 2.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
...  
100.0 4.0 0.0 0.0 0.0 0.0

그림 부.2 Motion model 입력자료 작성예시

Abstract

Implementation of  
multi-dimensional flow analysis  
capability in MARS-KS motion  
model for marine reactor safety  
analysis

Sang Wook Park  
Nuclear Engineering  
The Graduate School  
Seoul National University

In 2018, International Maritime Organization(IMO) adopted an initial strategy on the reduction of greenhouse gas emissions from ships to reduce the total annual greenhouse gas emissions by at least 50% by 2050 compared to 2008 levels. Thus, researches for marine reactor development as eco-friendly energy and safety

analysis of marine reactor are actively being conducted. It is expected that new regulatory demand arises, and fundamental research is required to secure independent verification capability at the level of regulatory agencies.

In this background, an improvement study for the MARS-KS motion model was conducted for marine reactor safety analysis. The goal of the study is to implement the multi-dimensional flow analysis capability in MARS-KS motion model. The research was conducted in the order of code improvement, verification, and application study. First, the 7 code improvements were performed. Improvement of volume direction unit vector generation method for user-friendly code implementation, correction of linear acceleration term considering inertial force, correction of the formula for the volume's position under the rotational condition, update of junction property, calculation of pressure drop along each axis and improvement of connection information formula between connected volumes to realize multi-dimensional flow analysis. And improvement study was conducted to extend the MARS-KS motion model to the MULTID component.

The second is the verification of the improved code. First, 1D component and cross-flow verification was

performed by solving the conceptual problem used in the previous research for the MARS-KS motion model at Seoul National University (H.K. Beom et al., 2019). For the verification of the 1D component, the manometer and vertical pipe conceptual problem were analyzed under various motion conditions, and analysis results were compared quantitatively with the analytical solution. Next, for cross-flow verification, a conceptual problem simulating the downcomer in the reactor was selected by connecting 1D vertical pipes with a cross-junction. When simulating the downcomer in the reactor, the six-pipe and eight-pipe conceptual problems that could be implemented through this study were verified with the existing conceptual problem consisting of four-pipe. Following the verification of 1D component and cross-flow, the conceptual problems for a 3D slab and an annular 3D cylinder were selected for the verification of the MULTID component. Likewise, it was analyzed under various motion conditions. In addition, analysis capability of the motion model for MULTID component was confirmed by applying the motion conditions in which various external forces act on the 3D slab.

Finally, the modified code was used to predict the thermal-hydraulic phenomena, and the change of flow

instability and critical heat flux under motion conditions was examined. First, the results of predicting the flow instability under two-phase conditions through the RELAP5 code (M. Colombo et al., 2012) were compared with the MARS-KS analysis results. Next, utilizing the MARS-KS motion model, the unstable region that appears due to flow instability in stationary and motion conditions was predicted and compared. The change of critical heat flux due to dynamic motion under the same heat flux condition was also examined using the same analytical model. When the critical heat flux appears, the heat transfer efficiency to the working fluid greatly decreases, thus the wall temperature increases rapidly. From this, it was confirmed whether the critical heat flux occurs in the stationary and motion conditions. Through this application study, the usability of the improved code was verified.

.....

**Keywords :** Marine reactor, Multi-dimensional flow analysis, Safety analysis code, MARS-KS, Motion model, Ocean condition, Verification

***Student Number :*** 2019-26252