



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](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

다물체동역학과 입자완화유체동역학의 연성해석
프로그램 개발과 파력발전시스템 동역학해석



2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

전 철 응

공 학 박 사 학 위 논 문

다물체동역학과 입자완화유체동역학의 연성해석
프로그램 개발과 파력발전시스템 동역학해석

지도교수 손 정 현

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

전 철 응

전철웅의 공학박사 학위논문을 인준함

2018년 8월



위 원 장 공학박사 유 완 석 (인)

위 원 공학박사 김 찬 중 (인)

위 원 공학박사 유 동 인 (인)

위 원 공학박사 이 재 욱 (인)

위 원 공학박사 손 정 현 (인)

목 차

List of Tables	IV
List of Figures	V
List of Nomenclature	X
1. 서 론	1
1.1. 연구 배경과 동향	1
1.1.1. 파력발전기(wave energy converter)	1
1.1.2. 입자완화유체동역학(smoothed particle hydrodynamics, SPH)	5
1.1.3. 연성 해석(coupled analysis)	9
1.2. 연구 목적 및 범위	11
2. 입자완화유체동역학 해석 프로그램	13
2.1. 입자완화유체동역학 개요	13
2.1.1. 입자완화유체동역학 보간법	13
2.1.2. 커널 함수	15
2.1.3. SPH gradient	20
2.1.4. SPH divergence	22
2.2. 비압축성 입자완화유체동역학	23
2.2.1. 비압축성 입자완화유체동역학 알고리즘	23
2.2.2. 예측단계의 이산화방정식	27
2.2.3. 압력 포아송 방정식	28
2.2.4. 수정단계의 이산화방정식	29
2.2.5. 경계조건	30

2.3. 비압축성 입자완화유체동역학 해석 프로그램	34
2.3.1. 비압축성 입자완화유체동역학 알고리즘	35
2.3.2. 압력-포아송 방정식 계산 알고리즘	36
2.3.3. Neighboring cell 알고리즘	38
2.3.4. 예측-수정 단계에 의한 적분	39
2.4. GPGPU 병렬 컴퓨팅	41
2.5. 상용 해석프로그램을 이용한 검증	44
2.5.1. 댐 붕괴 시뮬레이션	44
2.5.2. Lid-driven cavity flow 시뮬레이션	52
3. 다물체동역학 해석 프로그램	56
3.1. 3차원 시스템의 운동방정식	56
3.2. HHT-I3 내재적 수치적분	59
3.3. 해석적 미분방정식	63
3.4. 기구 구속방정식	66
3.5. 다물체동역학 해석 프로그램 구성	70
3.6. 상용 해석프로그램을 이용한 검증	79
4. ISPH와 MBD 연성해석 프로그램	89
4.1. 유체와 부유체의 상호작용	91
4.2. 조파기 및 소파기 모델	95
4.3. 파랑 계측 실험	98
4.3.1. 실험 장치 구성	98
4.3.2. 조파기 운동 계측 및 모델링	101
4.3.3. 파고 계측	108
4.4. 부유체 운동 계측 실험	111
4.4.1 부유체 및 구속 장치	111

4.4.2 부유체 진자 운동 계측	113
4.5. 해석 프로그램 검증	114
4.5.1 파랑 재현 시뮬레이션 검증	114
4.5.2 부유체 진자 운동 검증	121
5. 부유식 파력발전시스템 적용 및 분석	126
5.1. 부유식 파력발전시스템 구성	126
5.1.1. 동수력 서브시스템	128
5.1.2. 동력인출장치	129
5.2. 부유식 파력발전시스템 모델링	134
5.3. 규칙파에서의 부유식 파력발전시스템 해석	136
5.4. 불규칙파에서의 부유식 파력발전시스템 해석	142
6. 결 론	148
참고문헌	151

List of Tables

Table 1.1	Summary of previous researches about the wave energy converter	4
Table 1.2	Summary of previous researches about the SPH	8
Table 1.3	Summary of previous researches about the coupled analysis	10
Table 2.1	Development environments for parallel processing	34
Table 2.2	RMS errors of developed program according to lid-driven cavity flow	54
Table 3.1	Property of rigid bodies	80
Table 3.2	Location of kinematic joints	80
Table 4.1	Amplitude and frequency of a wave maker	102
Table 4.2	Experimental results according to the wave conditions	108
Table 4.3	Measurement results of pendulum motion	113
Table 4.4	Comparison of simulations with experiments	115
Table 4.5	Comparison of pendulum motion angle	122
Table 5.1	Position data of analysis model	134
Table 5.2	Wave conditions for irregular wave generation	143

List of Figures

Figure 1.1	Examples of various types of wave energy converter	3
Figure 1.2	Taylor-Green vortices case	6
Figure 1.3	Example of SPH applications	7
Figure 2.1	Support domain and kernel function of a particle	16
Figure 2.2	Kernel of the 5th Wendland and the 5th B-spline kernels	19
Figure 2.3	First derivatives of the 5th Wendland and the 5th B-spline	19
Figure 2.4	Truncation of the kernel support at the wall	30
Figure 2.5	Sketch of three main techniques for wall boundary model	32
Figure 2.6	Particle arrangements at the edge	32
Figure 2.7	Searching of free surface particles	33
Figure 2.8	Flow chart of ISPH	35
Figure 2.9	Flow chart of unpreconditioned Bi-CGSTAB	37
Figure 2.10	Index table of neighboring cell searching	38
Figure 2.11	Flow chart of ISPH solver with parallel computing	42
Figure 2.12	Computational time of CPU and GPU	43
Figure 2.13	Schematic of 2D dam breaking model	46
Figure 2.14	Velocity of 2D dam breaking	47
Figure 2.15	Pressure of 2D dam breaking	48
Figure 2.16	Schematic of 3D dam breaking model	49
Figure 2.17	Velocity of 3D dam breaking	50

Figure 2.18	Pressure of 3D dam breaking	51
Figure 2.19	Schematics of lid-driven cavity flow model	53
Figure 2.20	Velocity of lid-driven cavity flow simulation	54
Figure 2.21	Pressure of lid-driven cavity flow simulation	55
Figure 2.22	Numeric results of lid-driven cavity flow simulation	55
Figure 3.1	Definition of the body-fixed vectors	66
Figure 3.2	Flow chart of multi-body dynamics solver with HHT	70
Figure 3.3	Diagram of multi-body dynamics program	71
Figure 3.4	Schematic of revolute joint	76
Figure 3.5	Schematic of universal joint	77
Figure 3.6	Schematic of translational joint	77
Figure 3.7	Schematic of translational spring-damper-actuator	78
Figure 3.8	Schematic diagram of spatial slider-crank model	79
Figure 3.9	Position of the crank (★:RecurDyn, ○:House code)	81
Figure 3.10	Velocity of the crank (★:RecurDyn, ○:House code)	81
Figure 3.11	Acceleration of the crank (★:RecurDyn, ○:House code)	82
Figure 3.12	Angular velocity and acceleration of the crank (★:RecurDyn, ○:House code)	82
Figure 3.13	Position of the rod (★:RecurDyn, ○:House code)	83
Figure 3.14	Velocity of the rod (★:RecurDyn, ○:House code)	84
Figure 3.15	Angular velocity of the rod (★:RecurDyn, ○:House code)	85
Figure 3.16	Acceleration of the rod (★:RecurDyn, ○:House code)	86
Figure 3.17	Angular acceleration of the rod(★:RecurDyn, ○:House code)	87

Figure 3.18	Motion of the slider in the x-direction(★:RecurDyn, ○:House code)	88
Figure 4.1	Flow chart of the coupled analysis program	90
Figure 4.2	Definition of body in SPH	91
Figure 4.3	Vertical position of the body according to the ratio	94
Figure 4.4	Vertical velocity of the body according to the ratio	94
Figure 4.5	Wave shape generated by the paddle	95
Figure 4.6	Motion of wave maker at 1(m) stroke and 2π frequency	96
Figure 4.7	Profile of exponential damping function according to the α	97
Figure 4.8	Schematic diagram of wave tank for experiment	98
Figure 4.9	Wave generated by wave maker	99
Figure 4.10	Capacitance type wave height amplifier	99
Figure 4.11	Example of scene analysis using TEMA program	100
Figure 4.12	Tracking points for the wave maker behavior measurement	102
Figure 4.13	Motion of wave maker at 1.0(s) and 50(mm)	103
Figure 4.14	Motion of wave maker at 1.2(s) and 50(mm)	103
Figure 4.15	Motion of wave maker at 1.4(s) and 50(mm)	104
Figure 4.16	Motion of wave maker at 1.0(s) and 80(mm)	104
Figure 4.17	Motion of wave maker at 1.2(s) and 80(mm)	105
Figure 4.18	Motion of wave maker at 1.4(s) and 80(mm)	105
Figure 4.19	Motion of wave maker at 1.0(s) and 100(mm)	106
Figure 4.20	Motion of wave maker at 1.2(s) and 100(mm)	106
Figure 4.21	Motion of wave maker at 1.4(s) and 100(mm)	107
Figure 4.22	Wave height at 1.0(s) and 50(mm)	109

Figure 4.23	Wave height at 1.2(s) and 50(mm)	109
Figure 4.24	Wave height at 1.4(s) and 50(mm)	110
Figure 4.25	Dimension of a cylinder buoy	111
Figure 4.26	Equipment for pendulum motion	112
Figure 4.27	Schematic for the measurement experiment of pendulum motion	112
Figure 4.28	Wave simulation model	114
Figure 4.29	Comparison result of case 1	116
Figure 4.30	Comparison result of case 2	116
Figure 4.31	Comparison result of case 3	117
Figure 4.32	Comparison result of case 4	117
Figure 4.33	Comparison result of case 5	118
Figure 4.34	Comparison result of case 6	118
Figure 4.35	Comparison result of case 7	119
Figure 4.36	Comparison result of case 8	119
Figure 4.37	Comparison result of case 9	120
Figure 4.38	Definition of pendulum motion angle	122
Figure 4.39	Comparison of pendulum motion angle at 1.0(s) and 50(mm)	123
Figure 4.40	Comparison of pendulum motion angle at 1.2(s) and 50(mm)	123
Figure 4.41	Comparison of pendulum motion angle at 1.4(s) and 50(mm)	124
Figure 4.42	Comparison of pendulum motion angle at 1.0(s) and 80(mm)	124
Figure 4.43	Comparison of pendulum motion angle at 1.2(s) and 80(mm)	125
Figure 5.1	Wave energy converter system design breakdown[46]	127
Figure 5.2	Schematic diagram of buoy-rope connection	128

Figure 5.3	Schematic diagram of wave energy converter system	130
Figure 5.4	Definition of distance constraint equation	130
Figure 5.5	Schematic diagram of power-take-off(PTO) module	132
Figure 5.6	Schematic of the simulation model for coupled analysis	136
Figure 5.7	Vertical position of the buoy under regular wave	138
Figure 5.8	Horizontal position of the buoy under regular wave	138
Figure 5.9	Rotation angle of the drums under regular wave	139
Figure 5.10	Angular velocity of the drums under regular wave	139
Figure 5.11	Tension of ropes under regular wave	140
Figure 5.12	Angular velocity of the generators under regular wave	140
Figure 5.13	Power of the generators under regular wave	141
Figure 5.14	Motion of the wave maker for irregular wave	143
Figure 5.15	Vertical position of the buoy under irregular wave	144
Figure 5.16	Horizontal position of the buoy under irregular wave	144
Figure 5.17	Rotation angle of the drums under irregular wave	145
Figure 5.18	Angular velocity of the drums under irregular wave	145
Figure 5.19	Tension of ropes under irregular wave	146
Figure 5.20	Angular velocity of the generators under irregular wave	146
Figure 5.21	Power of the generators under irregular wave	147

List of Nomenclature

Greek symbols

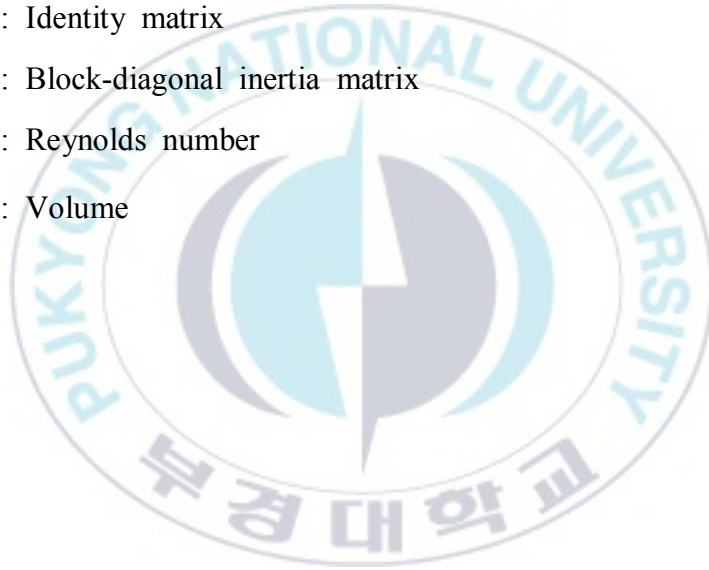
α, β, γ	: Constant value	
ψ_d	: Normalizing constant for ‘d’ dimension	
ρ	: Density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_0	: Reference density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ν	: Kinematic molecular viscosity	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ν_T	: Kinematic eddy viscosity	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ν_E	: Effective kinematic viscosity($\nu + \nu_T$)	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
Ω	: Computational domain	
λ	: Lagrangian multiplier	
Φ	: Constraint equations	
Φ_q	: Jacobian of constraint equations	

Roman symbols

a, b	: Order number in SPH	
c_0	: Sound of speed	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
d	: Dimensional number	
e_0, e_1, e_2, e_3	: Euler parameters	
g	: Gravity acceleration	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$

i, j	: Order number in MBD	
m	: Mass	[kg]
δr	: Initial particle spacing	[m]
$\mathbf{s}'$	: Body fixed vector	[m]
x, y, z	: Cartesian coordinates	[m]
Δt	: Time step	[sec]
$\mathbf{f}_{i,j}, \mathbf{g}_{i,j}, \mathbf{h}_{i,j}$	: Body fixed axis for i and j body	
q	: Generalized coordinates	[m]
$\dot{q}$	: First derivatives of generalized coordinates	[m·s ⁻¹]
$\ddot{q}$	: Second derivatives of generalized coordinates	[m·s ⁻²]
$\mathbf{r}$	: Position vector	[m]
$\mathbf{u}$	: Velocity vector	[m·s ⁻¹]
$\mathbf{u}^*$	: Vector of auxiliary velocity in SPH	[m·s ⁻¹]
$\mathbf{r}_{ab}$	: Distance vector between two points	[m]
$\mathbf{n}'$	: Torque vector	[kg·m ² ·s ⁻²]
p	: Pressure	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻²]
$\mathbf{p}$	: Vector of Euler parameters	
$\tilde{\mathbf{e}}$	: 3 by 3 skew-symmetric matrix	
$\overline{A}$	: Arbitrary physical quantity in SPH	
$\mathbf{A}$	: Transformation matrix	
$\mathbf{M}$	: Mass matrix	[kg]

C	: Damping matrix	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
C_{shift}	: Shifting coefficient	
K	: Stiffness matrix	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}]$
F	: Force vector	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}]$
F_f	: Hydraulic force vector	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}]$
F_b	: Buoyancy force vector	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}]$
I	: Identity matrix	
J'	: Block-diagonal inertia matrix	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
R_e	: Reynolds number	
V	: Volume	$[\text{m}^3]$



1. 서론

1.1. 연구 배경과 동향

1.1.1. 파력발전기(wave energy converter)

파력발전은 전기에너지를 생산하기 위해서 파도의 운동에너지와 위치에너지를 이용하는 발전방식이다. 파력발전기의 유형은 크게 세 가지로 구분되며, 가동 물체형, 진동수주형, 월파형의 작동원리로 분류된다. 파력발전은 무한 재생가능하고 전기에너지를 생산하는데 환경오염의 위험성이 거의 없는 해양에너지를 이용하기 때문에 육상의 화석연료의 고갈 및 환경오염과 위험성이 높은 원자력을 대체할 수 있는 청정에너지로 각광받고 있다. 지형이 반도로 이루어져 삼면이 바다와 접하고 있는 국내 해역의 전체 파력에너지는 650만 kW이고, 이의 10%인 65만 kW를 이용하더라도 22만 가구에 전력공급이 가능하다. 국내의 파력발전은 2003년부터 시작되어 최초로 2006년 150W급 소형파력발전장치가 제주 차귀도 해역에 설치되어 시험 가동되었다[47]. 최근에는 해양수산부에서 2016년 7월에 제주시 한경면 용수리에 500kW급 시험파력발전소를 준공하고 1년여간 시험운영을 해왔으며, 2017년에 상용화를 하여 연간 580MWh 규모 전력을 생산할 계획이다[48]. 또한 ㈜인진에서 개발한 낮은 수심에서도 전기 생산이 가능한 부유식 파력발전기가 2016년에 제주 북촌에 준공되어 시운전중에 있으며, 상용화를 준비하고 있다.

국외의 경우 스코틀랜드의 Islay, 포르투갈 Azores의 Pico공장, 스페인의 Mutriku방파제, 일본의 Sagata 항구에는 현재 진동수주형 파력발전 시스템이 운영되고 있다. 또한 스코틀랜드는 2020년까지 6개의 파력과 5개의 조력 발전 계획을 가지고 북쪽 해안에 1.6GW를 발전하여 총 70,000가구에

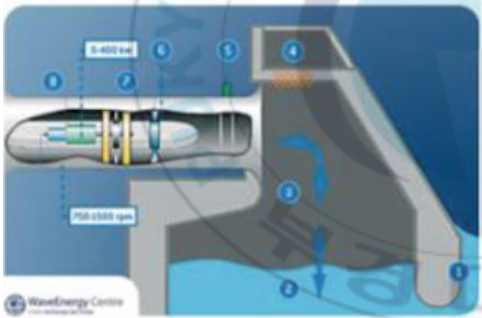
전기 공급을 계획하고 있다. 영국에서는 Wavegen사가 2000년에 스코틀랜드 서부 해안에 진동수주형 파력발전기인 Limpet을 설치하였다. 스코틀랜드의 Pelamis사는 2008년에 세계 최초의 상업용 파력발전 장치를 개발하였으며, Aquamarine Power사는 2009년에 유럽 해양 에너지센터에 315kW 규모의 발전기를 설치하여 2년간의 시험 운영 기간 동안 6,000가구 이상에 전력을 공급하였고, 2011년에 800kW급 오이스터(Oyster) 800을 개발하여 2년간 시험운영 하였다. 파력발전장치는 하나 이상의 구성품들이 서로 연결되어 파력에 의해 기구적인 운동을 함으로써 전기를 생산한다[47]. Figure 1.1은 Pelamis의 E.ON P2 파력발전시스템과 Portugal과 Japan에 설치되어 있는 파력발전시스템을 보여준다.

수치해석을 이용한 파랑 조건에서 파력발전시스템 해석은 다양한 해석 프로그램들에 의해 수행되어 왔다. Yu[1]는 WEC-Sim을 이용하여 부유 진동식 파력발전시스템을 설계하였으며, Simmons[2]도 WEC-Sim을 이용하여 동력인출장치의 힘들을 실험적으로 검증하는 연구를 수행하였다. Kim[3]은 다물체동역학 해석 프로그램 RecurDyn을 이용하여 파랑을 Morison등[4]이 제안한 파랑하중 모델을 사용하여 부유식 파력발전시스템의 흡수 효율에 대한 연구를 수행하였다. WEC-Sim은 매트랩 코드 기반으로 radiation and diffraction method를 사용하여 파력발전시스템의 성능을 평가한다. 다물체 모델, 동력인출장치 및 계류 힘등 다양한 기능들을 지원하지만 활용범위가 넓지 않고, 파도가 부서지는 비선형성이 강한 파랑의 모사가 불가능하다. 그 외에도 파력발전시스템과 관련하여 Jeong[5]은 부유식 파력발전시스템의 계류 시스템의 특성을 수치해석적으로 분석하였으며, Josh[6]는 계류용 밧줄을 수학적 모델링 및 검토를 통해 수학적 모델에 대한 최적의 계산효율성 및 정확성을 위한 방법들을 제시하였다. Kang[7]은 전산유체동역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 이용하여 진동수주

형 파력발전장치의 횡류 공기 터빈의 성능을 평가하고 실험을 통해 결과를 검증하였다.



(a) E.ON P2 Pelamis operating in Orkney.



(b) The Pico OWC, schematics (left) and in action (right)



(c) Mutriku OWC breakwater

Figure 1.1 Examples of various types of wave energy converter

Table 1.1 Summary of previous researches about the wave energy converter

Yu[1]	The oscillating surge wave energy converter was designed by using WEC-Sim open source program.
Simmons[2]	The force of power take-off was experimently verified by using WEC-Sim open source program.
Kim[3]	The absorption efficiency of floating body wave energy converter is analyzed by using commercial progrma RecurDyn and Morison equation.
Jeong[5]	A suitable mooring system is selected to apply on to a floating wave energy system by studying the characteristics of its motion and response using a numerical analysis.
Josh[6]	This paper reviews the mathematical modelling of the mooring systems for wave energy converters, detailing the relevant material developed in other offshore industries and presenting the published usage of mooring models for wave energy converter analysis.
Kang[7]	A numerical analysis of the full-scaled turbine for oscillating water columns wave energy converter is conducted by CFD in order to acquire its performance characteristics in various range of the flow rate with different rotational speed of the rotor. CFD results are verified by the experiment result.

1.1.2. 입자완화유체동역학(smoothed particle hydrodynamics, SPH)

유체의 흐름을 수치적으로 계산하는 방법으로 크게 오일러리안(Eulerian)과 라그랑지안(Lagrangian) 기법으로 분류된다. 격자법에 기반한 오일러리안 기법은 전산유체동역학에서 오래전부터 많은 연구자들에 의해 발전되어 왔다. 하지만 오일러리안 기법을 이용한 접근은 큰 변형이나 복잡한 자유수면 문제 해석이 어렵다는 단점이 있다. 반면에 라그랑지안 기법은 유체를 입자로 표현하고 각각의 입자들에 대해서 시간과 공간에서 다루기 때문에 앞서 언급한 오일러리안 기법에서 다루기 힘들었던 문제를 보다 쉽게 응용할 수 있다.

본 연구에서는 유체 모델링하고 해양 환경을 표현하기 위해서 라그랑지안 기법으로 격자 구성이 필요하지 않는 입자완화유체동역학을 사용한다. 입자완화유체동역학(smoothed particle hydrodynamics, SPH)은 천체물리학 문제를 다루기 위해서 1977년에 처음 개발되었다[8]. 입자완화유체동역학은 지금까지도 천체물리학 문제에 적용되고 있지만 현재는 대부분이 유체 흐름 계산에 응용되고 있으며, 특히 자유수면 문제[9][10][11] 및 유체에서 부유물의 운동[12] 그리고 충격 문제[13] 예측하는데 사용되고 있다.

입자완화유체동역학에서 비압축성 유체의 흐름은 크게 두 가지 접근방법에 의해 표현될 수 있다. 첫 번째는 약압축성 입자완화유체동역학(weakly compressible smoothed particle hydrodynamics, WCSPH)이며, 두 번째는 거의 비압축성에 가까운 유체의 비압축성을 고려한 비압축성 입자완화유체동역학(incompressible smoothed particle hydrodynamics, ISPH)이다. WCSPH에서 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes Equation, NSE)는 상태방정식을 사용하는 라그랑지안 방식으로 해석된다. 상태방정식에서 압력을 계산하기 위해서 밀도에 높은 곱수의 상수 값을 사용하기 때문에 작은 밀도의 에러에도 매우 큰 압력 에러 영역이 생기는 단점이 있다. 이러한 WCSPH

의 단점을 보완하기 위해서 ISPH 기법이 개발되었는데, ISPH는 투영법을 통해서 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 계산한다. Cummins와 Rudman이 [14] 제안한 투영법이 제일 먼저 비압축성 유체 해석에 적용되었다. 후에 Lee[15, 16]은 Cummins와 Rudman이 제안한 방법을 향상시켰으며, 기존 SPH 기법에서 비압축성 알고리즘을 적용하여 truly incompressible SPH 기법을 개발하였다. 투영법에 기반한 ISPH 기법은 압력장을 정확하게 표현하지만 이방성이 강하고 균일하지 않은 입자들의 배열을 야기하기 때문에 결과적으로 폭발 현상을 야기한다. 이러한 현상에 대한 하나의 예제로 Figure 1.2와 같은 Taylor-Green vortices 문제를 살펴볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Xu등[17]은 Fick 이론에 기반한 입자 이동 방법을 제안하여 입자들이 균일한 배열이 되도록 강제하였다. Figure 1.3에서 SPH의 자유수면 해석과 유체와 구조물의 충격문제에 활용된 예를 보여준다.

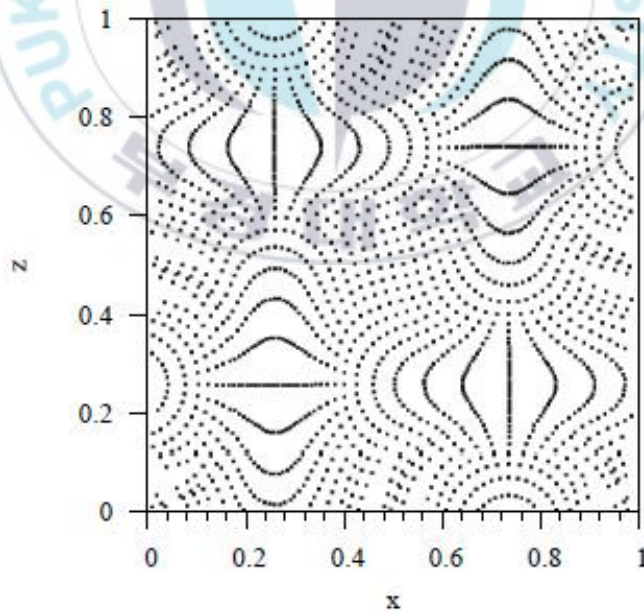
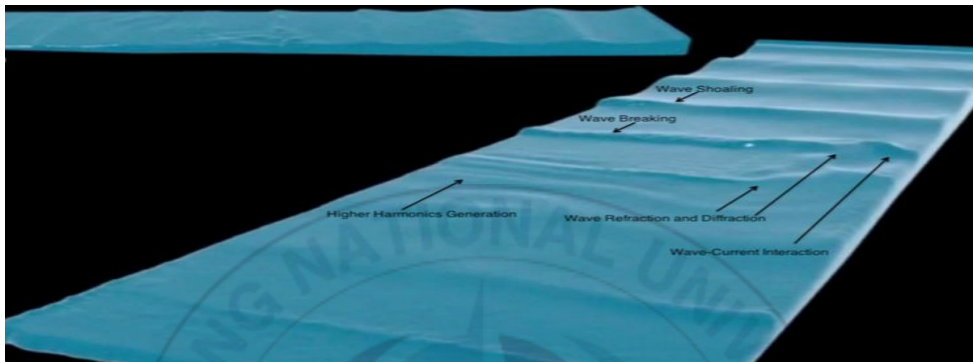


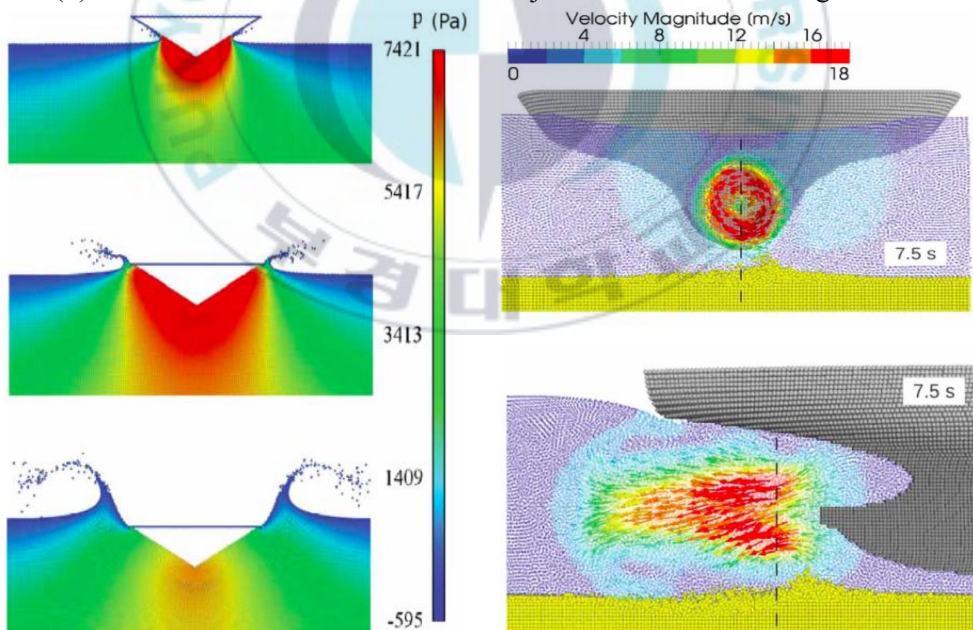
Figure 1.2 Taylor-Green vortices case



(a) wave interaction with a rubble mound breakwater



(b) 3-D nearshore circulations and trajectories under breaking waves



(c) fluid-structure impact

(d) scour by a ship propeller

Figure 1.3 Example of SPH applications

Table 1.2 Summary of previous researches about the SPH

Lucy[8]	A finite-size particle scheme for the numerical solution of two and three-dimensional gasdynamic problems of astronomical interest is described and tested.
Monaghan[9]	To calculate the incompressible flow of the free surface, SPH method is improved. This paper shows the free surface simulations that are a dam-breaking, a bore, the simulation of a wave maker, and the propagation of waves towards a beach.
Altomare[10]	The three-dimensional fluid-structure interaction for waves approaching a rubble mound breakwater is presented by using DualSPHysics.
Farahani[11]	A simplified bar/rip channel system on a beach is analysis by using SPH. The results are compared with the previous laboratory measurements and show good agreement.
Ulrich[12]	A numerical procedure based on the Lagrangian SPH is developed. The developed program is applied to analyze the induced scouring of the harbour bottom of ship.
Skillen[13]	Truly incompressible SPH technique is conducted to analyze the free surface flows. the free surface boundary treatment is improved. Wave-body impact problem is analyzed by using the improved free surface boundary treatment.
Cummins & Rudman[14]	A new formulation is introduced for enforcing incompressibility in SPH. This paper shows good agreement with finite difference solutions for a vortex spin-down and Rayleigh-Taylor instability by SPH projection technique.
Lee[15, 16]	Truly incompressible SPH method is developed. This paper is introduced the difference between ISPH and WCSPH through the various examples.
Xu[17]	A new divergence-free ISPH approach is proposed which maintains accuracy and stability while remaining mesh free without increasing computational cost by slightly shifting particles away from streamlines.

1.1.3. 연성 해석(coupled analysis)

컴퓨터의 성능의 발전과 더불어 컴퓨터를 이용한 해석 기술이 향상되면서 복잡한 문제들을 빠르게 해석할 수 있게 되었다. 해석기술의 발전은 해석 시간의 단축뿐만 아니라 해석 범위의 확장을 가능케 함으로써 다양한 역학 문제를 다룰 수 있게 되었다. 그중에서도 최근에 두 가지 이상의 역학이 포함된 문제 해석을 위한 연구가 이슈가 되고 있다.

본 연구에서는 부유식 파력발전시스템의 동적거동 해석을 위해 입자완화 유체동역학과 다물체동역학의 연성해석 프로그램을 개발하였다. 입자완화 유체동역학 기법이 적용된 상용 프로그램은 대표적으로 ABAQUS와 ANSYS Fluids 그리고 Particleworks가 있다. 기본적으로 ABAQUS와 ANSYS는 격자법에 기반하여 유체의 유동 해석 및 구조물의 응력해석 프로그램으로써 최근에 입자법에 기반한 유체 표현 및 구조물과의 접촉 해석 툴을 제공하고 있다. Particleworks는 MPS(moving particle semi-implicit method) 기법을 이용한 입자기반의 유체해석 프로그램이다. 하지만 세 프로그램 모두 다물체동역학 해석 솔버 부재로 인해 다물체동역학 시스템과의 연성해석이 어렵다는 단점이 있다. 반대로 대표적인 다물체동역학 상용툴로 RecurDyn, ADMAS, DAFUL등이 있지만 유체에 의한 힘을 고려하기 위해서는 Morison 방정식과 같은 수식적인 표현으로 유체력을 적용할 수 밖에 없는 한계로 인해 다양한 해상조건과 부유체를 고려한 연성해석이 어렵다. 최근에는 RecurDyn과 Particleworks를 이용한 다물체동역학과 입자완화유체동역학의 연성해석이 가능하도록 인터페이스 툴과 GPGPU기반의 병렬컴퓨팅을 지원하고 있다. 이러한 상용 프로그램뿐만 아니라 실험실 자체 솔버 개발을 통한 연성해석 연구가 해외에서 수행되고 있다. Yeylaghi[18]와 5명은 자체 OpenMP기반 3차원 병렬 ISPH 솔버를 개발하여 2차원 및 3차원 환경에서 지면 및 해저 산사태를 시뮬레이션하고 실험

데이터와 비교하여 좋은 일치성을 보임을 확인하였다. 하지만 기구 구속 및 계류장치를 포함하고 있지 않아 완전한 파력발전시스템을 고려하지 못하였다. 그리고 2007년에 첫 번째 버전을 공개하고 현재까지 지속적으로 개발되고 있는 sphysics 프로젝트의 오픈소스가 있다. Sphysics는 미국의 Johns Hopkins 대학, 스페인의 Vigo 대학 그리고 영국의 Manchester 대학에서 총 13명의 개발자들이 공동으로 SPH 해석 프로그램을 개발하는 프로젝트이다. CPU기반의 순차 해석 솔버 뿐만 아니라 OpenMP와 GPGPU 기반의 CUDA를 이용한 병렬해석을 지원하는 DualSPHysics를 지원하고 있다. DualSPHysics는 WCSPH기반으로 개발되고 있으며, 아직까지 ISPH기반의 솔버는 지원하지 않고 있다. DualSPHysics를 이용한 연구에서 Verbrugghe[19]와 6명은 OceanWave3D와 DualSPHysics 그리고 Python을 이용하여 OpenMPI로 세 솔버간의 통신을 통해 파랑을 재현하고 구조물과의 접촉해석을 연구하였다.

Table 1.3 Summary of previous researches about the coupled analysis

Yeylaghi[18]	This paper presents a comprehensive modeling of landslide generated waves using parallel ISPH code. The results are compared with experimental data and show good agreement.
Verbrugghe[19]	This paper presents a two-way coupling methodology for wave propagation and wave-structure interaction with SPH. To analyze the coupling problems, DualSPHysics, OceanWave3D, OpenMPI and Python are used. The coupling methodology proves that it is able to propagate waves and shows a good agreement with theoretical and experimental results.

1.2. 연구 목적 및 범위

실생활에 필요한 전기에너지 생산을 위해 사용되는 화석연료로 인한 환경문제와 화석연료 자원의 고갈 문제는 오래전부터 다루어져왔다. 이러한 문제에 대한 해결 방안의 하나로 무한하고 청정에너지인 해양 에너지를 이용하는 방법이 있다. 해양 에너지를 활용하기 위해서 국내외적으로 다양한 파력발전시스템이 개발되고 상용화를 위한 준비 과정으로 시험 운용되고 있다. 이러한 파력발전시스템 개발에 있어 개발된 파력발전시스템이 원하는 성능을 발휘하는지 여부와 안정성에 대한 평가가 무엇보다 중요하다. 기존에는 파력발전시스템의 성능을 평가하기 위해서 대부분 실험을 통한 연구가 수행되어 왔다. 하지만 실험 연구는 상당히 많은 시간과 비용을 요구하기 때문에 발생 가능한 수많은 해양 조건과 파력발전시스템의 모든 설계변수를 고려하기에는 한계가 있다.

컴퓨터를 이용한 해석연구는 실험연구의 한계를 극복할 수 있는 좋은 방안중의 하나이다. 해양에너지를 이용한 파력발전시스템의 성능 분석이 가능한 상용화 되고 있는 해석 프로그램들이 있다. 하지만 기존 해석툴들은 격자법 혹은 Morison 방정식에 기반한 방법을 사용하기 때문에 고려할 수 있는 해상조건에 제한이 있고 비선형성이 강한 거친 파도 조건에 대한 해석이 어렵다. 또한 유체의 거동만이 파력발전시스템에 영향을 주기 때문에 부유식 파력발전시스템과 같이 부유체의 거동이 유체의 거동에 영향을 주는 경우에는 적용하기 어렵다. 입자완화유체동역학은 다양한 유체의 거동 표현이 가능하여 기존 해석 기법들의 한계를 극복할 수 있다. 하지만 기존 수치기법들에 비해 해의 정확도가 떨어지기 때문에 현재까지도 해의 정확성을 높이기 위한 연구들이 수행되고 있다.

본 연구를 통해서 파랑의 재현을 위해 입자완화유체동역학을 이용한 유체 해석 프로그램과 파력발전시스템의 모델링 및 동역학 해석을 위한 다물

체동역학 해석 프로그램을 각각 개발하였다. 두 해석 기법의 연성해석 알고리즘을 개발하여 유체와 다물체시스템의 연성해석 프로그램인 FAMCAP(Fluid and Multibody Dynamics Coupled Analysis Program)을 개발하였다. 개발한 FAMCAP 프로그램을 사용하여 부유식 파력발전시스템을 모델링하고 규칙파와 불규칙파에 대해서 부유식 파력발전시스템의 운동을 시뮬레이션 하였다. 실험을 통해 파랑의 거동 및 부유체와의 상호작용 문제에 대한 시뮬레이션 해석 결과의 정확성을 검증 하였다.



2. 입자완화유체동역학 해석 프로그램

2.1. 입자완화유체동역학 개요

2.1.1. 입자완화유체동역학 보간법

입자완화유체동역학은 유체를 입자로 표현되며 각각의 유체 입자들은 질량, 밀도, 압력, 속도 그리고 위치등의 정보들을 가진다. 비압축성 입자완화유체동역학에서는 질량과 밀도는 상수로 두고, 압력과 속도 그리고 위치등 다른 물리량들은 매 시간간격마다 계산한다. 입자완화유체동역학의 보간은 임의로 분포된 입자 점들로부터 유체입자의 물리량들을 추정하는 것이다. 입자완화유체동역학은 격자법과는 달리 격자를 필요로 하지 않기 때문에 하나의 유체 입자 위치 점을 중심으로 2차원에서는 원으로 3차원에서는 구의 영역내에서 보간하게 된다. 하나의 유체 입자점에서의 입자완화유체동역학의 보간은 임의의 함수와 델타-디랙 분포(delta Dirac distribution) 사이의 합성에 의해서 얻어진다. 위치 $\mathbf{r}$ 에서 임의의 물리량 $\overline{A}$ 의 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{A}(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} \overline{A}(\mathbf{r}') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.1)$$

식(2.1)에서 Ω 는 유체 영역의 부피이며, $d\mathbf{r}'$ 은 요소 부피이다. 식(2.1)에서 디랙분포는 커널함수(kernel function)로 근사화된다. 결과적으로 입자완화유체동역학에서 말하는 ‘완화’는 커널함수의 선택에 의해 결정된다. 식(2.1)의 연속식은 최종적으로 식(2.2)과 같이 $\mathbf{r}_a$ 에 위치한 유체입자 a 의 보간점 주위에 위치한 입자들에 대한 합으로 근사화 된다.

$$\bar{A}(\mathbf{r}_a) = \sum_b V_b \bar{A}_b w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 b 는 입자 a 에 이웃한 입자들을 의미하며 $\mathbf{r}_{ab}$ 는 입자 a 와 b 사이의 상대거리를 나타내는 벡터이다. V_b 는 입자 b 의 부피이며 m_b/ρ_b 로 표현된다. $\bar{A}_b$ 는 $\bar{A}(\mathbf{r}_b)$ 에 의해서 계산된 입자 b 의 물리량을 의미한다. 커널 함수 $w(\mathbf{r}_{ab})$ 은 식(2.3)과 같이 표현된다.

$$w(\mathbf{r}_{ab}) = \frac{1}{h^d} f\left(\frac{\mathbf{r}_{ab}}{h}\right) \quad (2.3)$$

위 식에서 d 는 해석 차원수이며 h 는 커널의 완화길이다.



2.1.2. 커널 함수

커널 함수는 $\mathbf{r}_a$ 와 $\mathbf{r}_b$ 의 사이가 거리가 감소할수록 값은 더 커지면서 완화된다. 커널 함수는 중심 $\mathbf{r}$ 에서 Ω_r 로 표현되는 유한한 공간에서 정의되는데, 유한한 공간은 완화길이 h 에 의해 크기가 결정된다. 커널 함수는 미분영역에서의 보간을 위해 충분히 완화된 함수가 되어야 한다. 그리고 식(2.4)와 같이 완화길이가 0으로 갈 때 커널 함수는 디랙 분포 경향을 가져야한다.

$$\lim_{h \rightarrow 0} w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (2.4)$$

식(2.4)의 연속 보간의 정확성을 고려하여 임의의 물리량 $\bar{A}(\mathbf{r}')$ 의 2차 테일러 확장을 적용하면 식(2.5)와 같이 표현된다.

$$\bar{A}(\mathbf{r}') = \bar{A}(\mathbf{r}) - \frac{\partial \bar{A}}{\partial \mathbf{r}} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}') + O(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2) \quad (2.5)$$

식(2.5)를 식(2.1)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\bar{A}(\mathbf{r}) = \bar{A}(\mathbf{r}, t) \int_{\Omega_r} w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' - \frac{\partial \bar{A}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \int_{\Omega_r} w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') (\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' + O(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2) \quad (2.6)$$

식(2.6)에서 1차 연속 SPH 보간을 얻기 위해서는 다음 두 개의 조건이 만족되어야 한다.

$$\int_{\Omega} w(\mathbf{r}-\mathbf{r}')d\mathbf{r}'=1 \quad (2.7)$$

$$\int_{\Omega_r} w(\mathbf{r}-\mathbf{r}')(\mathbf{r}-\mathbf{r}')d\mathbf{r}'=0 \quad (2.8)$$

식(2.7)은 커널함수의 노멀라이징 조건이며, 식(2.8)은 커널 함수의 짝함수이고, Ω_r 영역의 중심에서 대칭이어야 한다는 조건을 의미한다. Figure 2.1는 유체 입자 a 에 대한 support domain과 정규화로 표현되는 커널 함수를 보여주며 앞서 설명한 커널 함수가 가져야 하는 속성들을 도식적으로 보여준다. Figure 2.1를 통해서 알 수 있듯이 하나의 유체 입자 a 에 대한 물리량은 support domain내의 주변 유체 입자와의 상대 거리에 따라서 커널 함수의 의해 거리가 가까운 입자일수록 영향을 크게 받는다. 커널 함수는 앞서 설명한 속성들을 만족하기 위해서 다항식의 형태로 표현되며, 다항식 형태의 커널 함수는 식(2.9)와 같이 표현된다.

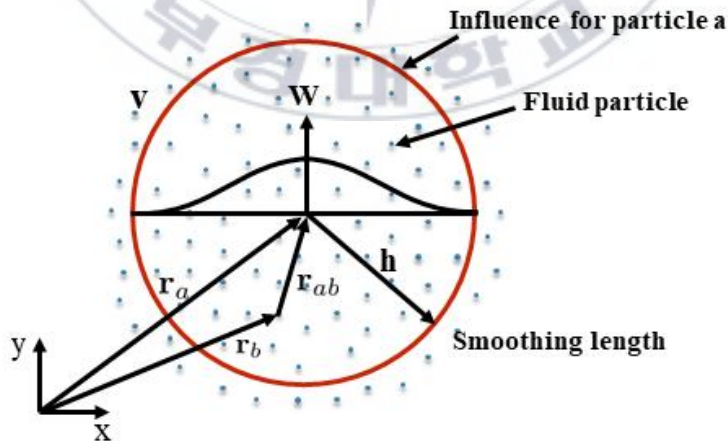


Figure 2.1 Support domain and kernel function of a particle

$$\begin{cases} w(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) = \frac{\psi_d}{h^d} f(q) \\ q = \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{h} \end{cases} \quad (2.9)$$

ψ_d 는 노멀라이징 상수(normalizing constant)로써 2차원, 3차원 문제에 따라 다른 값을 가지며, $f(q)$ 는 커널 함수이다. 본 연구에서는 5차 Wendland 커널함수와 5차 B-spline 커널함수를 사용하였다.

5차 Wendland 커널함수와 1차 미분 함수를 식(2.10)과 식(2.11)에 각각 나타내었다.

$$f(q) = \begin{cases} \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (1 + 2q) & 0 \leq q \leq 2 \\ 0 & 2 \leq q \end{cases} \quad (2.10)$$

$$f'(q) = \begin{cases} -5q \left(1 - \frac{q}{2}\right)^3 & 0 \leq q \leq 2 \\ 0 & 2 \leq q \end{cases} \quad (2.11)$$

2차원 및 3차원에서의 노멀라이징 상수 값을 식(2.12)에 나타내었다.

$$\psi_2 = \frac{7}{4\pi}, \quad \psi_3 = \frac{21}{16\pi} \quad \text{in Wendland kernel} \quad (2.12)$$

5차 B-spline 커널함수는 식(2.13)과 같으며 1차 미분함수는 식(2.14)와 같다.

$$f(q) = \begin{cases} (3-q)^5 - 6(2-q)^5 + 15(1-q)^5 & 0 \leq q \leq 1 \\ (3-q)^5 - 6(2-q)^5 & 1 \leq q \leq 2 \\ (3-q)^5 & 2 \leq q \leq 3 \\ 0 & 3 < q \end{cases} \quad (2.13)$$

$$f'(q) = -5 \begin{cases} (3-q)^4 - 6(2-q)^4 + 15(1-q)^4 & 0 \leq q \leq 1 \\ (3-q)^4 - 6(2-q)^4 & 1 \leq q \leq 2 \\ (3-q)^4 & 2 \leq q \leq 3 \\ 0 & 3 < q \end{cases} \quad (2.14)$$

5차 B-spline 커널함수의 노멀라이징 상수 값은 식(2.15)와 같다.

$$\psi_2 = \frac{7}{478\pi}, \quad \psi_3 = \frac{1}{120\pi} \quad \text{in B-spline kernel} \quad (2.15)$$

Figure 2.2와 Figure 2.3은 각각 5차 B-spline과 5차 Wendland 커널 함수와 1차 미분에 대한 값들을 보여준다.

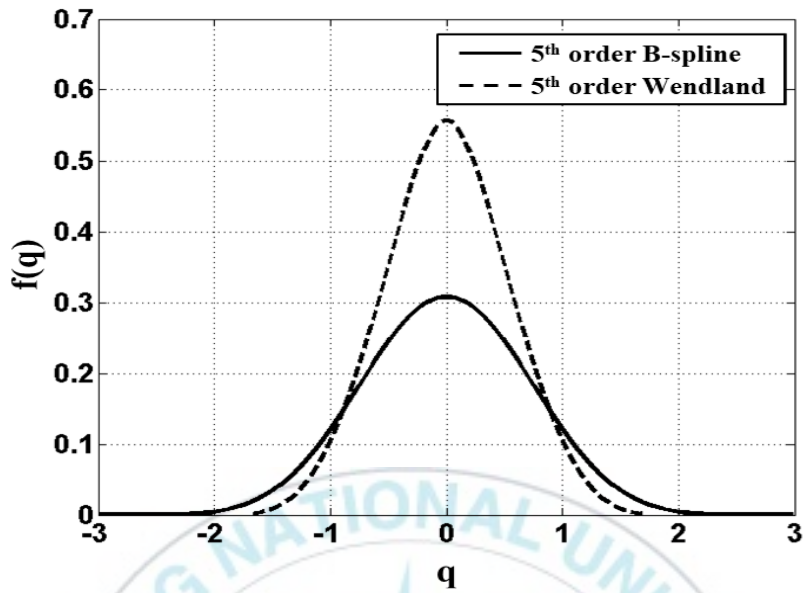


Figure 2.2 Kernel of the 5th Wendland and the 5th B-spline kernels

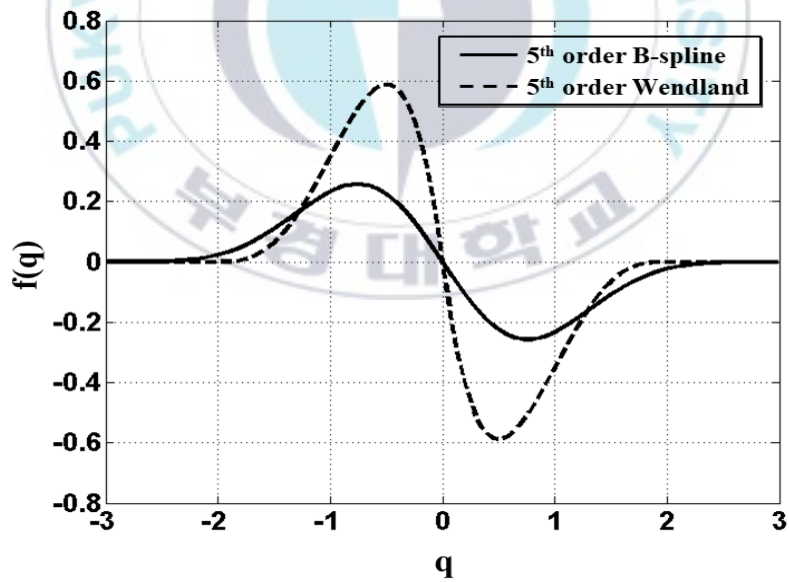


Figure 2.3 First derivatives of the 5th Wendland and the 5th B-spline

2.1.3. SPH gradient

식(2.1)의 연속식에서 위치 $\mathbf{r}$ 에서 임의의 물리량 $\bar{A}$ 의 gradient는 식(2.16)과 같다.

$$\begin{aligned}\nabla \bar{A}(\mathbf{r}) &= \int_{\Omega} \frac{\partial \bar{A}(\mathbf{r}')}{\partial \mathbf{r}'} w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \\ &= - \int_{\partial\Omega \cap \Omega_r} \bar{A}(\mathbf{r}') w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{n}(\mathbf{r}') dS' - \int_{\Omega \cap \Omega_r} \bar{A}(\mathbf{r}') \frac{\partial w(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{r}'} d\mathbf{r}'\end{aligned}\quad (2.16)$$

여기서, $\partial\Omega$ 는 경계영역을 나타내며, $\mathbf{n}(\mathbf{r}')$ 는 경계의 안쪽으로 향하는 법선 벡터, dS' 은 $\partial\Omega \cap \Omega$ 의 표면요소를 나타낸다. SPH기법에서 표면의 적분식은 0으로 고려되고 커널은 반경방향으로 대칭이기 때문에 식(2.17)과 같이 gradient는 역 대칭이 된다. 따라서 연속식의 경우 임의의 물리량 $\bar{A}$ 에 대한 gradient는 식(2.18)이 된다. SPH gradient의 연속 보간식에 상응하는 이산화된 보간식은 식(2.19)에 나타내었다.

$$\frac{\partial w_h(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{r}'} = - \frac{\partial w_h(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{r}} = - \nabla w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (2.17)$$

$$\nabla \bar{A}(\mathbf{r}) = - \int_{\Omega \cap \Omega_r} \bar{A}(\mathbf{r}') \frac{\partial w(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \mathbf{r}'} d\mathbf{r}' = \int_{\Omega \cap \Omega_r} \bar{A}(\mathbf{r}') \nabla w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.18)$$

$$\nabla_a \bar{A}_b = \sum_b V_b \bar{A}_b \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.19)$$

식(2.18)에서 $\mathbf{r}_{ab} = |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b|$ 이며, 상수의 gradient는 0이 아니기 때문에 또

다른 SPH gradient 표현이 필요하다. 식(2.20)에 대해 위에서 설명한 것과 같은 계산과정을 통해서 식(2.21)의 다른 gradient 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \bar{A} = \frac{1}{\rho} [\nabla (\rho \bar{A}) - \bar{A} \nabla \rho] \quad (2.20)$$

$$\nabla_a \bar{A}_b = -\frac{1}{\rho_a} \sum_b m_b \bar{A}_{ab} \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.21)$$

위 식에서 $\bar{A}_{ab} = \bar{A}_a - \bar{A}_b$ 를 의미한다. 하지만 Navier-Stokes 방정식에서 압력항 계산에 gradient 연산자가 사용되기 때문에, 선운동량 보존을 위한 gradient 표현이 필요하다. 작용-반작용 원리는 역 대칭 gradient를 요구하기 때문에 새로운 SPH gradient는 다음 식(2.22)를 유도하여 얻을 수 있으며, 식(2.23)과 같이 표현된다.

$$\nabla \bar{A} = \rho \nabla \left(\frac{\bar{A}}{\rho} \right) + \frac{\bar{A}}{\rho} \nabla \rho \quad (2.22)$$

$$\nabla_a^+ \bar{A}_b = \rho_a \sum_b m_b \left(\frac{\bar{A}_a}{\rho_a^2} + \frac{\bar{A}_b}{\rho_b^2} \right) \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.23)$$

2.1.4. SPH divergence

SPH divergence는 $\nabla \cdot \bar{A}$ 의 연속식으로부터 SPH gradient와 유사하게 유도되며, SPH divergence와 다른 두 표현인 대칭일 때와 역 대칭일 때는 각각 식(2.24), 식(2.25) 그리고 식(2.26)과 같다.

$$D_a \bar{A}_b = \sum_b V_b \bar{A}_b \cdot \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.24)$$

$$\nabla_a^- \cdot \bar{A}_b = -\frac{1}{\rho_a} \sum_b m_b \bar{A}_{ab} \cdot \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.25)$$

$$\nabla_a^+ \cdot \bar{A}_b = \rho_a \sum_b m_b \left(\frac{\bar{A}_a}{\rho_a^2} + \frac{\bar{A}_b}{\rho_b^2} \right) \cdot \nabla w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.26)$$

2.2. 비압축성 입자완화유체동역학

앞서 설명하였듯이 WCSPH에서의 상태방정식에 의한 약간의 밀도 에러에도 심한 압력 변동이 발생할 수 있는 문제를 배제하기 위해서 본 연구에서는 비압축성 입자완화유체동역학 방법을 사용하였다.

2.2.1. 비압축성 입자완화유체동역학 알고리즘

비압축성 입자완화유체동역학에서는 압력과 속도를 주요 변수로써 계산하게 되며 밀도는 상수로 고려되기 때문에 연속방정식은 식(2.27)으로 표현된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.27)$$

비압축성 입자완화유체동역학은 크게 예측단계와 수정단계의 두 개의 계산과정을 통해서 유체의 거동이 결정된다. 예측단계에서는 점성력과 외력을 통해서 중간속도 $\mathbf{u}^*$ 를 식(2.28)과 식(2.29)로 계산한다.

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = \nabla \cdot (\nu_E \nabla \mathbf{u}^n) + \mathbf{F} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n + (\nabla \cdot (\nu_E \nabla \mathbf{u}^n) + \mathbf{F}) \Delta t \quad (2.29)$$

위 식에서 Δt 는 시간간격이며, ν_E 는 유효 점성계수로 동점성 ν 와 난류 점성 ν_T 의 합이다. $\mathbf{F}$ 는 외력이고 $\mathbf{u}^n$ 은 n시간에서의 속도이다. 수정단계에서는 $\mathbf{u}^*$ 와 압력에 의해서 식(2.31)과 같이 $\mathbf{u}^{n+1}$ 를 계산된다.

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (2.31)$$

중간속도 $\mathbf{u}^*$ 는 식(2.32)와 같이 무발산 속도장(divergence-free velocity field)과 비회전 압력장(curl-free pressure gradient field)으로 투영될 수 있다 [15].

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} \right) = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \right) \quad (2.32)$$

$\mathbf{u}^{n+1}$ 은 $n+1$ 시간에서의 속도이며 p^{n+1} 은 $n+1$ 시간에서의 압력을 나타낸다. $n+1$ 시간에서의 압력은 식(2.32)에서 $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0$ 을 강제함으로써 식(2.34)의 압력-포아송 방정식(pressure poisson equaton, PPE)으로 정리된다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \right) = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad (2.33)$$

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad (2.34)$$

식(2.34)에서 ∇^2 는 라플라시안 연산자이다. 입자의 위치는 식(2.35)와 같이 $n+1$ 에서의 속도의 시간적분으로 계산된다.

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{r}^n + \mathbf{u}^{n+1} \Delta t \quad (2.35)$$

이러한 비압축성 입자완화유체동역학 알고리즘은 완화된 압력장을 제공하지만 불균일한 입자 배열과 큰 이방성으로 인한 입자들 사이의 간격이 부풀려지는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 Taylor-Green vortex 문제에서 확인할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 Xu 등[17]이 입자들의 균일한 배열을 강제하기 위해서 확산에 대한 픽스 법칙(Fick's law)에 기반하여 입자들을 이동시키는 것을 제안했으며, Lind 등[20]이 자유수면에도 적용함으로써 이 방법을 발전시켰다. 식(2.35)에 의해 이동된 입자들은 매 시간 간격마다 식(2.36)의 $\delta \mathbf{r}$ 만큼 이동시킴으로서 입자의 불안정한 거동을 줄인다.

$$\delta \mathbf{r} = -C_{shift} \alpha \mathbf{R} \quad (2.36)$$

C_{shift} 는 상수이며 일반적으로 0.01 - 0.1 사이의 값이 사용된다. α 는 이동 크기으로써 최대 입자 속도와 시간간격의 곱에 의해서 계산된다. $\mathbf{R}$ 은 이동 벡터로써 식(37)에 의해서 계산된다.

$$\mathbf{R}_a = \sum_{b=1}^M \frac{\bar{r}_a^{-2}}{r_{ab}^2} \mathbf{n}_{ab} \quad (2.37)$$

r_{ij} 는 입자들 사이의 거리이며 $\bar{r}_i$ 는 입자 i 와 이웃한 입자들간의 평균 거리로 식(2.38)에 의해서 계산된다. $\mathbf{n}_{ab}$ 는 a입자와 b입자 사이의 단위거리

벡터이다. $\mathbf{r}_{ab}$ 의 합은 입자 사이의 공간들에 대한 이방성을 정확하게 나타내며, $\bar{r}_i^2/r_{ij}^2$ 는 비교적 멀리 있는 이웃한 입자에 의한 영향을 줄이기 위한 가중함수로써 사용된다.

$$\bar{r}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} r_{ij} \quad (2.38)$$

위 식에서 n_i 는 i 입자에 대해서 완화길이 내에서 이웃한 입자들의 수이다. 입자들을 $\delta \mathbf{r}_i$ 만큼 강제적으로 이동한 만큼 속도 또한 그에 상응하는 만큼의 수정이 요구되며, 식(2.39)에 나타낸 테일러 전개식을 이용하여 입자의 속도를 수정한다.

$$\mathbf{u}_a^{n+1} \leftarrow \mathbf{u}_a^{n+1} + \nabla \mathbf{u}_a^{n+1} \cdot \delta \mathbf{r}_a + O(\delta \mathbf{r}_a^2) \quad (2.39)$$

2.2.2. 예측단계의 이산화방정식

앞서 설명하였듯이 예측단계에서는 입자의 점성항과 외력항에 대해서 입자의 중간속도 $\mathbf{u}^*$ 를 계산한다. 점성항에 대한 이산화방정식은 Cleary와 Monaghan[21]이 제안한 식(2.40)을 사용하여 계산한다.

$$\nabla \cdot (\nu_k \nabla \mathbf{u}_a) \approx \sum_b m_b \delta \frac{\nu_{E,a} + \nu_{E,b}}{\rho_a + \rho_b} \frac{\mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2} \nabla_a w(r_{ab}) \quad (2.40)$$

위 식에서 ρ 는 유체의 밀도, m 은 질량 그리고 η^2 은 분모가 0이 되는 것을 방지하기 위한 작은 값의 파라미터로써 보통 $0.01h^2$ 의 값을 사용한다. 결과적으로 중간속도에 대한 이산화방정식은 식(2.41)과 같다.

$$\frac{d\mathbf{u}_a^*}{dt} \approx \frac{d\mathbf{u}_a^n}{dt} + \left(\sum_b m_b \delta \frac{\nu_{E,a} + \nu_{E,b}}{\rho_a + \rho_b} \frac{\mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2} \nabla_a w(r_{ab}) + \mathbf{F}_a \right) \quad (2.41)$$

예측단계에서는 중간속도 $\mathbf{u}^*$ 뿐만 아니라 중간속도의 divergence도 식(2.42)로 계산된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* \approx -\frac{1}{\rho_a} \sum_b m_b \mathbf{u}_{ab} \cdot \nabla_a w(r_{ab}) \quad (2.42)$$

식(2.42)은 압력-포아송 방정식의 오른쪽 항으로 사용된다.

2.2.3. 압력 포아송 방정식

본 연구에서는 식(2.43)의 근사 라플라시안 연산자(approximate Laplacian operator)[15]를 사용하여 압력을 계산하였다. 이 외에도 포아송 방정식을 계산하는 방법들이 있는데 Cummins등[22]이 exact projection operator와 approximate projection operator를 제안하였다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_a} \nabla p \right)_a \approx \frac{2}{\rho_a^2} \sum_b m_b \frac{p_{ab} \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a w(r_{ab})}{r_{ab}^2 + \eta^2} \quad (2.43)$$

$p_{ab} = p_a - p_b$ 을 의미한다. 압력-포아송 방정식은 식(2.44)와 같이 표현되며, $AP=B$ 와 같은 선형방정식으로 표현될 수 있다. A 는 압력에 대한 계수들의 행렬이며 B 는 중간속도 $\mathbf{u}^*$ 의 divergence이며, P 는 입자들의 압력 벡터이다.

$$\nabla^2 p_a = \frac{\rho_a}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}_a^* \quad (2.44)$$

∇^2 는 라플라시안 연산자이다. 식(2.44)에 식(2.42)와 식(2.43)을 각각 대입하여 정리하면 식(2.45)가 된다.

$$\frac{2}{\rho_a} \sum_b m_b \frac{p_{ab} \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a w(r_{ab})}{r_{ab}^2 + \eta^2} = \frac{1}{\Delta t} \sum_b m_b \mathbf{u}_{ab} \cdot \nabla_a w(r_{ab}) \quad (2.45)$$

2.2.4. 수정단계의 이산화방정식

수정단계에서는 압력-포아송 방정식으로부터 계산된 압력 p^{n+1} 에 대한 압력 gradient로 식(2.46)과 같이 계산된다.

$$\frac{d\mathbf{u}_a}{dt} \approx \frac{d\mathbf{u}_a^*}{dt} - \sum_b m_b \left(\frac{p_b^{n+1}}{\rho_b^2} + \frac{p_a^{n+1}}{\rho_a^2} \right) \nabla_a w(r_{ab}) \quad (2.46)$$



2.2.5. 경계조건

비압축성 입자완화유체동역학에서 경계는 유체와 마찬가지로 입자로 모델링되며, 압력을 제외한 경계입자의 물성치는 일반적으로 유체의 물성치와 동일한 값을 사용한다. 여기서 경계는 유체입자가 통과할 수 없는 벽을 의미한다. 경계에 인접한 유체 입자의 경우 Figure 2.4과 같이 경계에 의해서 커널이 절단되기 때문에 이웃한 입자들의 수가 적어 유체 입자가 경계를 통과하는 문제가 발생한다. 이러한 유체입자가 경계를 통과하는 문제를 해결하기 위한 몇 가지 경계조건이 필요한데, 반발력 모델과 경계 바깥쪽에 더미 입자[23] 혹은 미러 입자[24]를 생성하는 방법이 대표적인데, Figure 2.5에 각 방법을 도시하였다. Monaghan[25]이 Lennard-Jones potential로부터 제안한 반발력 모델은 이용하기가 쉽고 계산 비용이 저렴하고 복잡한 형상에도 쉽게 적용할 수 있지만, 입자의 비물리적인 거동을 야기하는 문제가 있다.

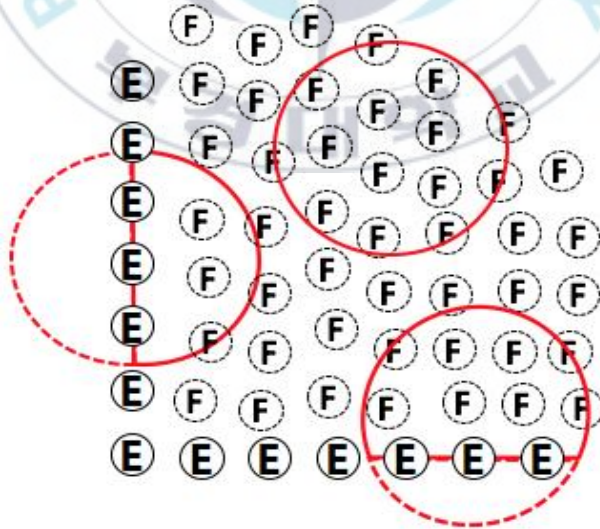


Figure 2.4 Truncation of the kernel support at the wall

더미입자법에서는 다른 경계조건과는 달리 경계 입자를 따로 생성하지 않고 경계에 인접한 유체 입자들에 대해서 경계면 반대편에 입자들을 생성하여 유체입자가 경계를 벗어나지 못하도록 한다. 본 연구에서 고려된 더미 입자법은 경계 바깥쪽에 별도의 더미 입자를 생성하여 경계에 인접한 유체 입자의 커널 절단 효과가 발생하지 않도록 하는 방법이다. 더미 입자들은 초기 경계면에서 초기 입자 간격만큼 규칙적으로 배치되며, 전체 시뮬레이션 동안에 0의 속도를 가지지만 움직이는 경계를 표현할 때는 경계면과 같은 속도를 가진다. 더미 입자들은 일직선의 경계면에 대해서는 바깥 법선 방향으로 일정한 간격으로 배치되지만 모서리나 구형의 경계에 대해서는 다른 배치법을 가진다. 더미 입자들의 밀도, 질량, 동점성 계수는 모두 유체 입자의 물성치와 같은 값을 가진다. 위치와 속도는 움직이는 경계조건이 없다면 초기 값으로 고정된다. 본 연구에서는 더미 입자법으로 경계조건을 정의하였으며, 선과 꼭지점에 대한 입자 배치를 Figure 2.6에 나타내었다. 영문자 F, B는 각각 유체입자, 경계입자, 더미입자를 의미하며 경계입자와 더미입자에 부여된 숫자는 같은 압력 값을 갖는다는 것을 의미한다. 다시 말하면, 같은 숫자를 가지는 경계입자와 더미입자는 서로 같은 압력을 가진다는 것이다. 압력 포아송 방정식에서 더미 입자들은 압력계산에서 제외되며 유체입자와 경계입자의 압력만 계산되기 때문에 압력 포아송 방정식의 계산 후에 경계입자의 압력을 연결된 더미 입자에 부여한다.

위에서 설명한 경계 뿐만 아니라 자유수면 문제를 계산하기 위해서는 자유수면 경계에 대한 판별이 필요하다. WCSPH의 경우 Figure 2.7과 같이 이웃한 입자들의 부재로 자유수면에 인접한 입자들의 밀도가 0이 되는 경향을 나타내며, 상태방정식에 의해 유체의 압력이 0이 된다. ISPH에서는 압력-포아송 방정식으로 인한 주변 입자의 영향으로 인해 0보다 큰 값을

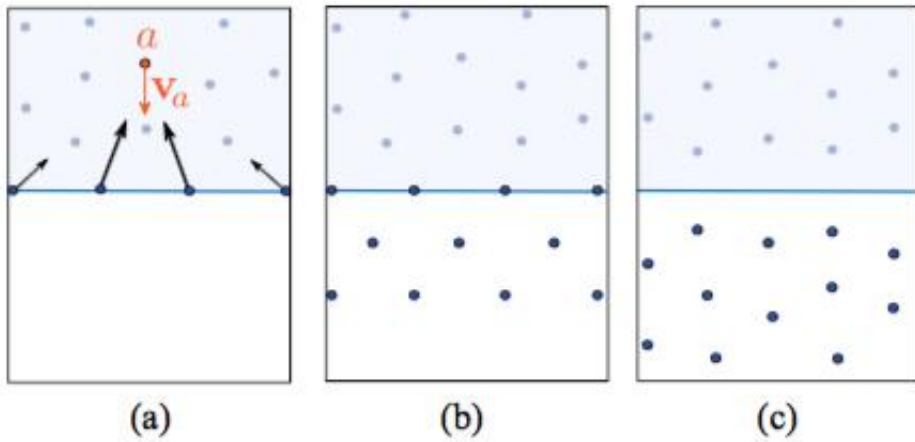


Figure 2.5 Sketch of three main techniques for wall boundary model. (a) Boundary forces; (b) Dummy particles; (c) Mirror particles

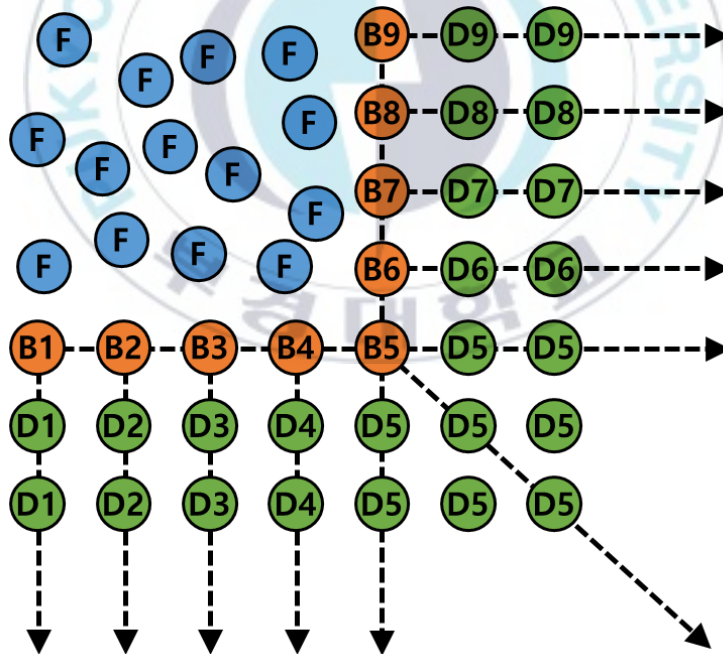


Figure 2.6 Particle arrangement at the edge

가지게 되며 Dirichlet 조건을 만족시키기 위해서 자유수면의 위치하는 입자들의 압력을 0으로 강제할 필요가 있다. 자유수면을 판별하기 위해서 입자 위치의 발산 값을 이용하여 자유수면 입자를 결정하였다[15]. 입자 위치의 발산에 대한 이산화된 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{r} = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a w(\mathbf{r}_{ab}) \quad (2.47)$$

2차원 공간에서 발산값이 1.5이하이면 해당입자는 자유수면이라고 정의되며, 3차원 공간에서는 2.4이하가 되는 입자를 자유수면이라고 정의한다.

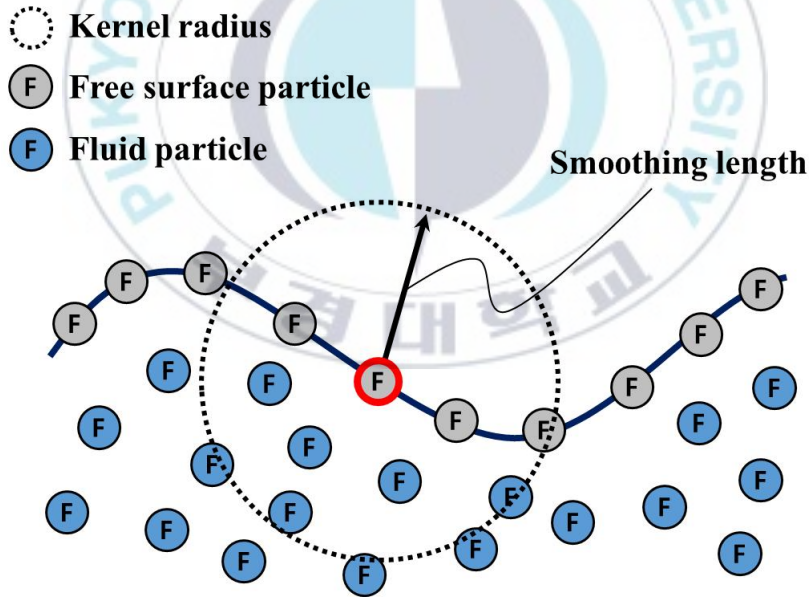


Figure 2.7 Searching of free surface particles

2.3. 비압축성 입자완화유체동역학 해석 프로그램

유체의 파랑을 재현하기 위해서 ISPH 기법을 이용한 입자기반 유체거동 해석프로그램을 개발하였다. ISPH는 semi-implicit 방법으로 예측단계와 수정단계에 의해서 유체의 거동이 결정된다. 프로그램은 크게 세 가지 파트로 구성되는데, GUI 방식의 전처리, C++ 언어를 이용한 해석 솔버, OpenGL을 이용한 후처리이다. 본 논문에서는 전처리기와 후처리에 대한 설명은 생략하고 해석 솔버 부분만 상세히 기술한다. 개발된 ISPH 해석 프로그램은 해양의 파랑을 재현하기 위해서 사용되었으며, 파랑 재현 시뮬레이션은 다량의 유체입자와 긴 해석 시간을 필요로 하기 때문에 많은 계산시간을 필요로 한다. 병렬 컴퓨팅은 이러한 계산시간을 줄일 수 있는 좋은 방법으로, 개발 프로그램은 순차 해석 솔버 뿐만 아니라 GPGPU기반의 병렬 컴퓨팅을 적용하여 빠른 계산이 가능하다. 순차 및 병렬 프로그램의 개발 환경은 Table 2.1와 같다.

Table 2.1 The development environments for parallel processing

CPU	
OS	Window 10 Pro
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-3770K @3.50GHz
Memory	16.0GB
System type	64 bit processor
GPU	
Product	Nvidia Tesla k20c
Cores	2496
Memory	5.0GB
Bandwidth	208 GB/s
Clock speed	706 MHz
FP performance	3,524 GFLOPS(float), 1,175 GFLOPS(double)

2.3.1. 비압축성 입자완화유체동역학 알고리즘

해석 솔버에서는 정의된 해석 모델에 대해서 입자를 생성하고 이웃한 입자들을 검색한다. 예측단계에서는 점성력과 외력에 의한 단위질량당 가속도를 계산하고 시간 적분을 통해 $\mathbf{u}^*$ 를 계산한다. 계산된 $\mathbf{u}^*$ 는 다음 계산단계인 압력-포아송 방정식의 우측항으로 고려되어 유체의 압력을 계산한다. 수정단계에서는 압력포아송 방정식으로부터 계산된 압력을 통해 최종적으로 유체의 단위질량당 가속도와 속도를 결정한다. 유체의 위치는 계산된 속도 $\mathbf{u}^{n+1}$ 의 시간적분으로 계산된다. 앞에서 설명한 계산과정은 Figure 2.8에 나타낸 계산 알고리즘에서 확인할 수 있다.

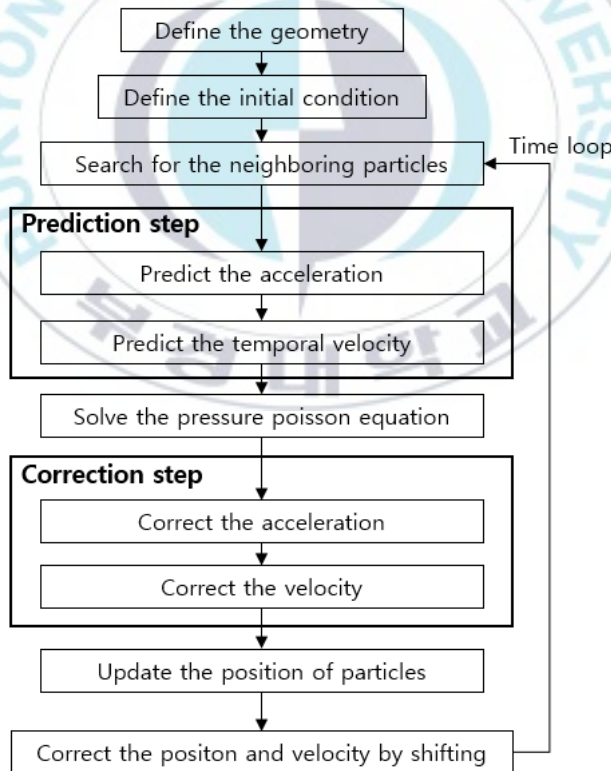


Figure 2.8 Flow chart of ISPH

2.3.2. 압력-포아송 방정식 계산 알고리즘

압력-포아송 방정식은 선형 방정식 형태로 표현될 수 있다. 따라서 압력-포아송 방정식의 선형방정식 풀이를 통해 압력을 계산할 수 있다. 압력-포아송 방정식의 선형방정식을 풀기 위해 Bi-CGSTAB을 이용하였다. Bi-CGSTAB은 공역구배법(conjugate gradient method)중의 하나로 대칭문제 뿐만 아니라 비대칭 문제에 적용될 수 있다. 압력-포아송 방정식은 식(2.48)과 같이 선형방정식 형태로 표현될 수 있으며, 우측항과 좌측항은 각각 식(2.43)과 식(2.44)의 이산화된 식과 같다.

$$Lp_a = b_a \quad (2.48)$$

Bi-CGSTAB은 반복법에 의해서 해를 구하기 때문에 초기 값(initial guess)가 필요하며, 이는 t_{n-1} 에서의 압력을 사용하여 초기 잔차 값(residual) r_a^0 를 계산한다. 반복 계산을 통해 수렴해를 얻기 위해서 4개의 상수 변수와 2개의 벡터 변수를 필요로 하며 이를 각각 $\gamma, \alpha, \beta, \omega$ 와 그리고 ζ_a, η_a 로 정의한다. 초기 잔차와 6개의 변수를 이용하여 Figure 2.9에 나타낸 계산 순서에 의해 선형방정식의 해를 계산한다. 선형방정식의 해는 $\hat{r}_a^0$ 의 초기 잔차와 반복과정에서 갱신되는 r_a^i 와 값을 비교하여 허용오차 θ 이하가 되면 정해에 수렴했다고 판단한다. Figure 2.9에서 연산자 $\|r\|$ 은 식(2.49)와 같으며, (U, V) 는 두 벡터의 내적으로 식(2.50)과 같이 계산된다.

$$\|r\| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N r_a^2} \quad \text{식(2.49)}$$

$$(u, v) \sum_{i=1}^N u_i v_i \quad (2.50)$$

위 식에서 N 은 입자의 수를 의미한다.

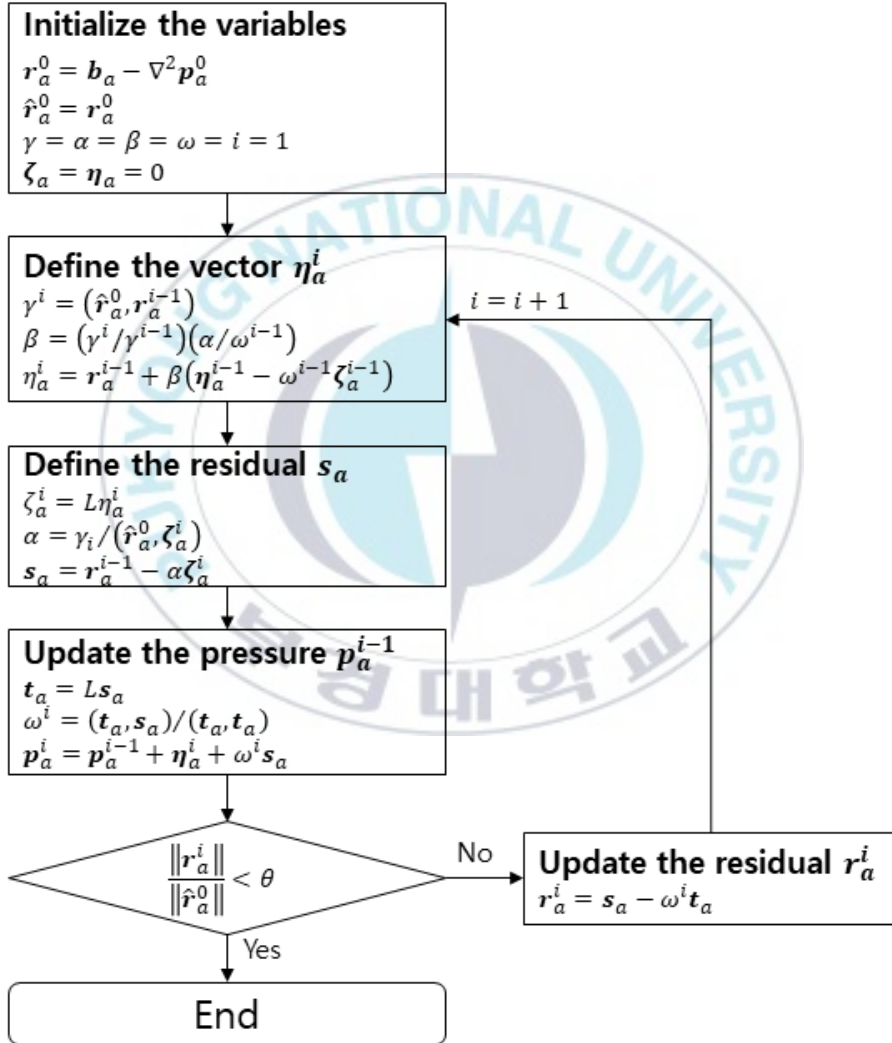


Figure 2.9 Flow chart of unpreconditioned Bi-CGSTAB

2.3.3. Neighboring cell 알고리즘

SPH에서 하나의 유체입자에 대해서 완화길이 내에 있는 주변 입자들에 대한 영향을 고려하기 위한 주변입자 탐색에 neighboring cell 알고리즘을 적용하였다. Figure 2.10의 왼쪽에는 각각 여러개의 셀로 나누어진 2차원 공간상에 입자들이 위치하고 있는 것을 보여주고 있으며, 오른쪽 테이블은 각 입자가 위치하고 있는 cell의 인덱스를 보여준다. 오른쪽 테이블처럼 입자의 인덱스와 입자가 위치하고 있는 cell의 인덱스를 정리하고 cell의 인덱스에 대해서 오름차순으로 정렬하게 되면 각 cell에 위치하고 있는 입자의 인덱스와 개수를 알 수 있다. 하나의 셀에 위치한 입자들의 정보를 통해서 유체입자 a가 포함되어 있는 셀을 기준으로 주변 셀에 포함되어 있는 입자들 b와의 거리를 계산하고 그 값이 완화길이보다 작으면 커널함수를 통해 입자 b와의 영향을 계산한다.

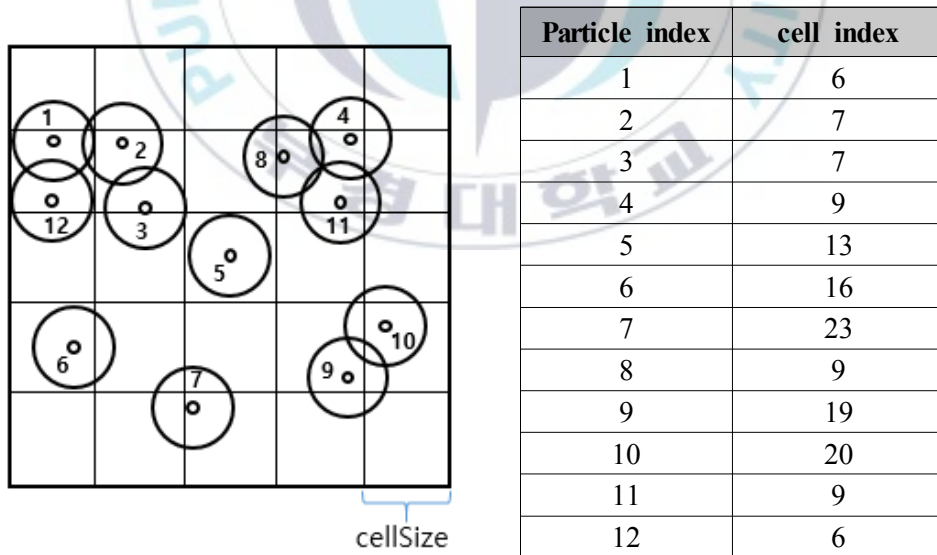


Figure 2.10 Index table of neighboring cell searching

2.3.4. 예측-수정 단계에 의한 적분

2.2.2절과 2.2.4절의 계산으로 중간속도 $\mathbf{u}_a^*$ 와 $n+1$ 시간에서의 속도 $\mathbf{u}_a^{n+1}$ 그리고 위치 $\mathbf{r}_a^{n+1}$ 는 식(2.50)과 같이 적분된다. 중간속도 $\mathbf{u}_a^*$ 의 계산식에서 $\mathbf{F}_a^n$ 은 중력을 포함하는 외력과 점성항으로 구성된 힘이다. 중간속도는 예측단계에서 적분식에 의해 계산되며, 수정단계에서 압력-포아송 방정식에 의해 계산된 압력에 대한 gradient로 $n+1$ 에서의 속도와 위치를 계산한다.

$$\begin{cases} \mathbf{u}_a^* = \mathbf{u}_a^n + \Delta t \mathbf{F}_a^n \\ \mathbf{u}_a^{n+1} = \mathbf{u}_a^* - \Delta t \left(\frac{1}{\rho} \nabla p_a^{n+1} \right) \\ \mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \Delta t (\mathbf{u}_a^{n+1}) \end{cases} \quad (2.50)$$

시간간격 Δt 는 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건(Δt_{CFL}), 관성력($\Delta t_{for \infty}$) 그리고 점성력(Δt_{visc})에 의해서 결정되며 세 개의 값 중에서 제일 작은 값을 사용한다. CFL 조건은 유한차분법에 의해 수치적으로 어떤 편미분방정식을 풀 때 해의 수렴을 위해서 필요한 조건으로, SPH에서 적분 계산의 시간간격을 결정하기 위해서 사용된다. 본 연구에서 사용된 CFL 조건식을 Shao등[26, 27]이 사용한 방식을 적용하였으며 식 (2.51)와 같다.

$$\Delta t_{CFL} \leq 0.1 \frac{\delta r}{u_{\max}} \quad (2.51)$$

위 식에서 δr 은 초기 입자 간격을 의미한다. 관성력에 의한 시간간격은 식 (2.52)와 같으며 입자에 작용하는 관성력에 의한 가속도 크기가 가장

큰 값으로 하여 계산된다.

$$\Delta t_{\text{for } ces} \leq 0.25 \min_a \sqrt{\frac{\delta r}{|f_a|}} \quad (2.52)$$

위 식에서 $|f_a|$ 는 입자 가속도의 크기를 나타내며, 점성 확산에 의한 조건은 식(2.53)와 같다.

$$\Delta t_{\text{visc}} \leq 0.1 \frac{\delta r^2}{\nu} \quad (2.53)$$

식(2.53)에서 ν 는 유체의 동점성계수이다.



2.4. GPGPU 병렬 컴퓨팅

SPH 해석의 경우 입자 수가 증가할수록 계산시간이 급격하게 증가하기 때문에 많은 유체 입자와 긴 해석시간을 필요로 하는 파랑 재현 시뮬레이션에 있어서 계산시간 문제는 큰 단점으로 작용한다. 본 연구에서는 해석시간 단축을 위해서 GPGPU기반의 병렬 컴퓨팅을 적용하였다. GPGPU(general-purpose computing on graphics processing units)란 기존의 3D 컴퓨터 그래픽을 전문으로 처리하는 그래픽 처리 장치(GPU)를, 중앙 처리 장치(CPU)가 담당하던 응용 프로그램들의 계산에 사용하기 위한 기술이다. 현재까지 다양한 병렬 프로그래밍 방법들이 개발되었는데 그 중에서도 OpenMP, OpenCL, 엔비디아(NVIDIA)의 CUDA(compute unified device architecture)가 대표적이다[28, 29].

본 연구에서는 GPGPU기반의 병렬 해석 솔버 개발을 위해 2007년에 엔비디아(NVIDIA)가 발표한 CUDA를 사용하였다. CUDA는 GPU에서 처리하는 병렬 처리 알고리즘을 C 프로그래밍 언어를 비롯한 산업 표준 언어로 사용할 수 있도록 하는 GPGPU기술로, OpenMP와 달리 간단하고 적은 오버헤드(overhead)를 갖는 스레드(thread) 관리 기법을 사용하고 캐쉬(cache) 일관성이 필요가 없기 때문에 확장가능성이 훨씬 좋고, 비교적 저렴한 비용으로 고효율의 성능을 얻을 수 있다는 장점을 가진다. CUDA와 마찬가지로 GPGPU방식의 OpenCL은 Apple, Intel, AMD/ATI, NVIDIA를 포함한 주요 업체들이 연합해서 2009년에 개발한 표준 프로그래밍 모델로써 많은 부분에서 CUDA와 유사하지만 프로그래밍 구문들이 CUDA보다 더 낮은 단계에서 정의되어 있어 사용하기 불편하고, OpenCL과 CUDA를 모두 지원하는 플랫폼에서 OpenCL이 CUDA보다 느리다[30]. 현재 CUDA를 이용한 병렬 컴퓨팅은 다양한 분야에 적용되고 있으며, 상용 동역학 해석 프로그램에서도 이러한 병렬 컴퓨팅을 지원하고 있다.

Figure 2.11의 계산과정을 이용한 병렬 해석 솔버와 순차 해석 솔버간의 계산시간을 비교하기 위해 유체 입자수의 증가에 따른 해석 시간을 비교하였다. 비교에 사용된 호스트와 디바이스의 사양은 Table 2.1에서 확인할 수 있다. 비교를 위해 2차원 수조 안에 유체 입자의 수를 증가시켜가며 해석시간 0.1초를 해석하는데 소요되는 계산시간을 비교하였다. 계산시간 비교 결과는 Figure 2.12에 나타내었으며, x축은 입자의 개수를 나타내며 최소 10,205개의 유체입자에서 최대 97,988개까지 고려하였다. y축은 조정된 시간을 나타내며, 유체입자의 개수가 최대일 때 호스트 계산시간을 기준으로 상대적인 시간을 결과로 나타내었으며, 최대 개수일 때 호스트 계산시간 대비 디바이스의 계산시간은 약 0.022를 나타내었으며 약 50배 이상 빠른 결과를 보였다.

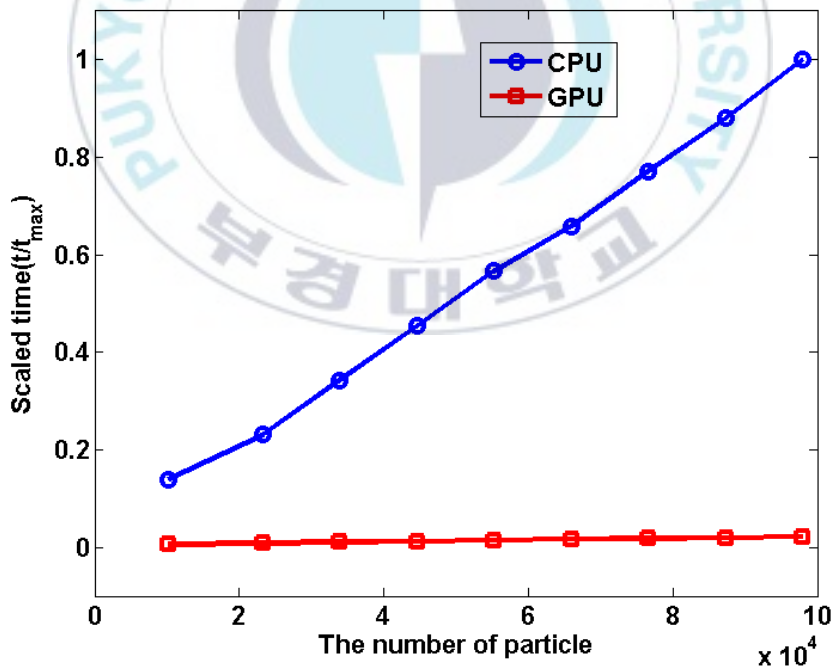


Figure 2.12 Computational time of CPU and GPU

2.5. 상용 해석프로그램을 이용한 검증

자체 개발한 ISPH 해석 솔버를 검증하기 위해서 댐 붕괴 시물레이션과 lid-driven cavity flow 시물레이션을 수행하였으며, 결과는 상용 해석 프로그램인 ABAQUS에서 지원하는 SPH 해석 솔버와 ANSYS Fluent를 통해 비교 검증 하였다.

2.5.1. 댐 붕괴 시물레이션

댐 붕괴는 토목공학에서 다루어지는 현실적 문제로 많은 수치해석 및 실험 연구가 수행되어왔다. 또한 자유수면 문제 및 경계와의 충격문제에 주로 시물레이션 되어 왔다. SPH기법을 이용한 댐 붕괴 시물레이션은 앞서 많은 연구자들에 의해서 시물레이션 되었으며 실험을 통한 검증연구 또한 수행되었다[15][31][32]. 본 연구에서는 개발 프로그램을 이용한 댐 붕괴 시물레이션 해를 검증하기 위해서 상용해석 프로그램 ABAQUS의 SPH 해석 솔버를 이용하였다. ABAQUS의 SPH는 WCSPH 방법을 사용하며, WCSPH 방법은 ISPH 방법과 압력 계산방법에서 큰 차이점을 가진다. WCSPH에서 압력은 식(2.54)에 나타낸 상태방정식에 의해 계산하기 때문에 기본적으로 수치적 음속과 연관되어 있어 작은 밀도 에러가 수치적 불안정성을 야기할 수 있는 비물리적 압력 변동을 초래할 수 있다.

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (2.54)$$

식(2.54)에서 c_0 는 수치 음속이며, 밀도 변동을 1% 이내로 감소시키기 위해서 최대 유체 속도보다 약 10배의 더 큰 값을 사용한다. γ 는 상수로써 7의 값을 일반적으로 사용한다. 식(2.54)에서 γ 로 인해 작은 밀도 변화에

큰 압력 변동을 야기하지만 압력장에서 이러한 노이즈는 유체의 유동에 악영향을 주지는 않는다. 이러한 WCSPH의 압력 변동 문제가 ISPH 방법이 제안된 이유 중에 하나이기 때문에 압력 계산 문제에 대해서 WCSPH와 ISPH간의 비교를 통해 ISPH 방법이 가지는 이점을 Lee[15]가 확인하였다. 최근에는 Dilts[33, 34]가 제안한 MLS density re-initialization 알고리즘을 이용한 IWCSPPH(improved WCSPH) 방법으로 많이 개선된 압력 표현이 가능하며, Chen[35]과 Hughes[36]은 IWCSPPH 방법을 이용한 다양한 예를 통해 ISPH와의 압력 분포를 비교하였다. 댐 붕괴는 2차원 및 3차원 공간에서 각각 시뮬레이션 하였으며, 2차원 댐 붕괴 시뮬레이션 모델은 Figure 2.13에서 확인할 수 있다. 2차원 모델의 입자 초기 간격은 2.5(mm)로 유체 입자는 총 3200개이며, ISPH의 경우 경계입자는 801개 그리고 더미입자가 1,614개로 구성되었다. ABAQUS에서 압력계산을 위해 상태방정식을 사용하였으며, 음속을 결정하기 위해서 최대 유체 속도를 식(2.55)의 특성 커브이론을 이용하여 2.8(m/s)를 계산하였고, 최대 유체 속도의 10배인 28(m/s)를 음속 값으로 사용하였다. 유체의 점성계수는 $1e-6(m^2s^{-1})$ 를 사용하였으며, 시간 0.18, 0.29, 0.65초일 때 유체입자의 속도와 압력을 상호 비교하였다. Figure 2.14과 Figure 2.15에 각각 속도와 압력 비교 결과를 나타내었다. 시간에 따른 유체의 위치와 속도 분포는 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 유체의 압력 분포에서 개발 프로그램의 ISPH 방법은 압력 노이즈가 거의 없는 것을 확인할 수 있으며 매우 좋은 압력 분포를 보여주고 있으며, ABAQUS의 WCSPH 방법은 앞서 설명한 바와 같이 압력 노이즈를 확인할 수 있다. ABAQUS의 압력 분포 결과는 전통적인 WCSPH의 상태방정식을 이용한 결과이며, SPH 해석을 통해 유체의 압력 분포를 정확하게 파악하기 어렵다는 단점이 있지만 앞서 설명하였듯이 이러한 압력 노이즈가 유체의 유동에 악영향을 미치지 않기 때문에 유체의 유동 및

충격 문제등에 충분히 적용 가능하다.

$$u_{max} = 2\sqrt{gH_f} \quad (2.55)$$

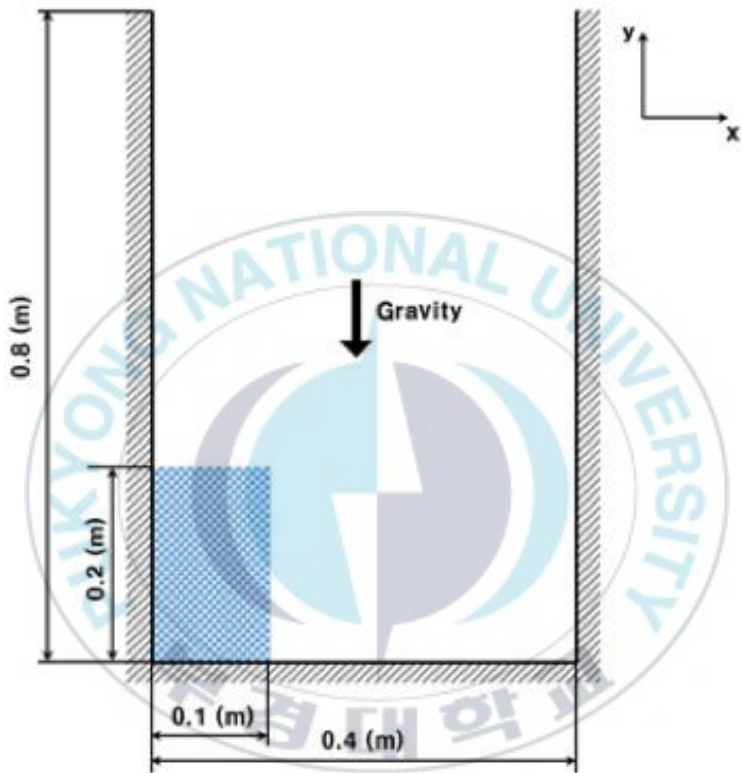
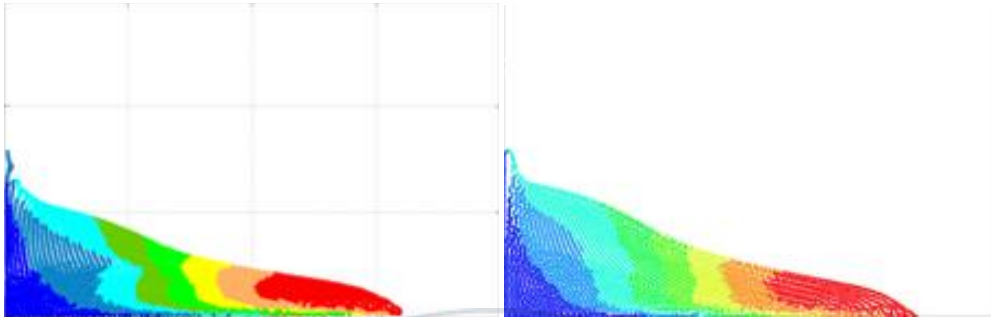


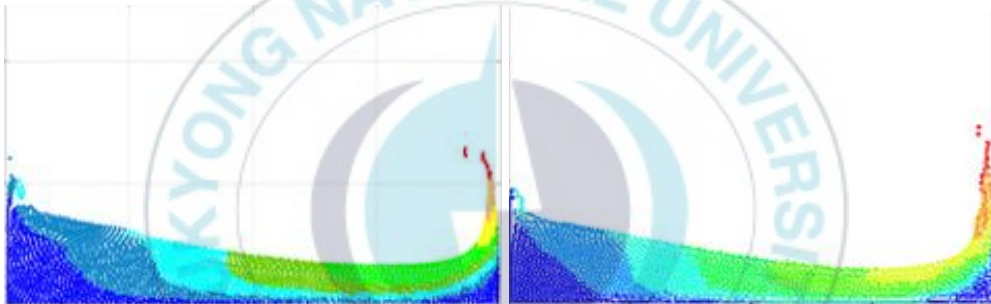
Figure 2.13 Schematic of 2D dam breaking model

Developed program(ISPH)

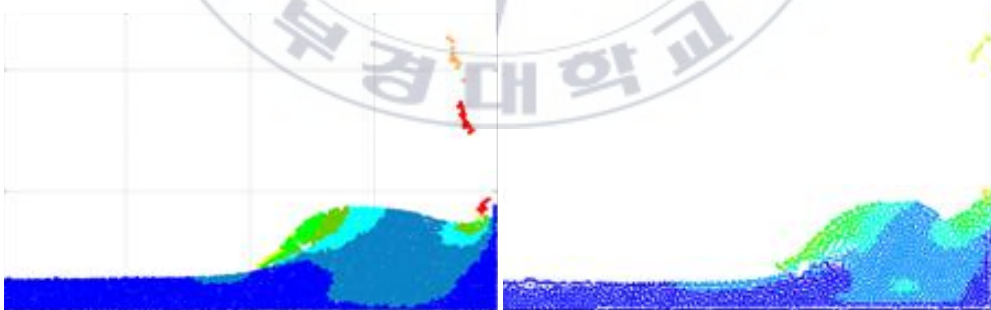
ABAQUS(WCSPH)



(a) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.19(s)



(b) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.28(s)

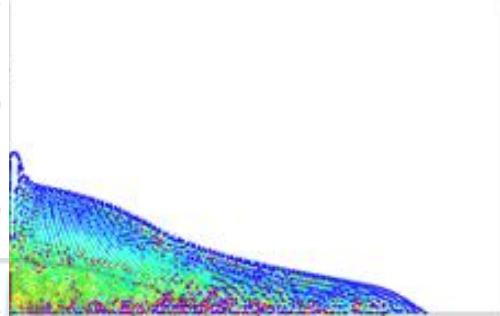
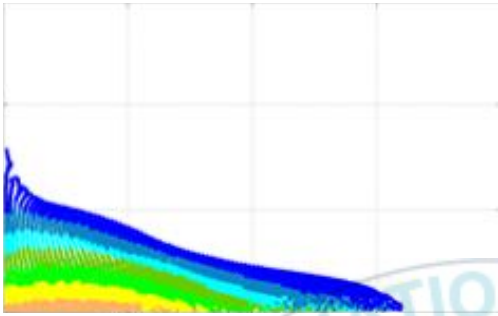


(c) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.65(s)

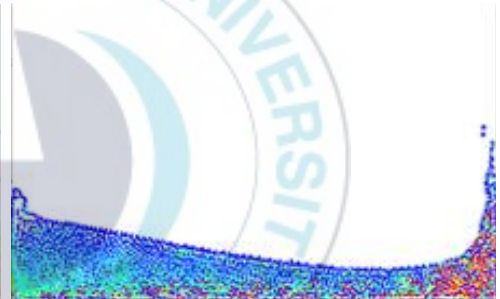
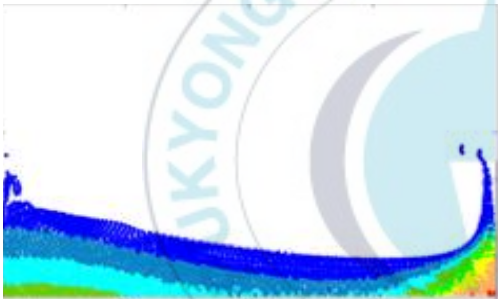
Figure 2.14 Velocity of 2D dam breaking

Developed program(ISPH)

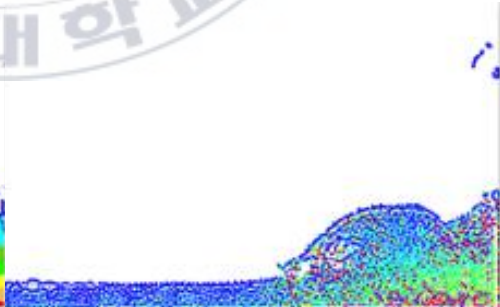
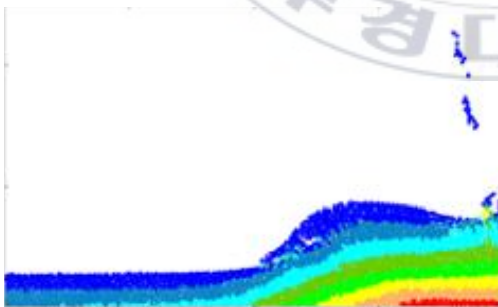
ABAQUS(WCSPH)



(a) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.19(s)



(b) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.28(s)



(c) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.65(s)

Figure 2.15 Pressure of 2D dam breaking

댐 붕괴 시뮬레이션의 3차원 모델은 Figure 2.16에서 확인할 수 있으며, 식(2.55)에 의해서 최대 유체 속도를 $2.4(\text{m/s})$ 로 계산하였고, 음속은 최대 유체 속도의 10배인 $24(\text{m/s})$ 를 사용하였다. 3차원 모델에서 초기 입자 간격은 $5(\text{mm})$ 로 하였으며, 총 유체 입자의 수는 24,000개이며, ISPH의 경우 경계입자는 13,469개 그리고 더미입자가 29,602개로 구성되었다. 점성계수는 2차원 모델과 동일한 $1\text{e-}6(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ 을 사용하였다. 3차원 댐 붕괴 시뮬레이션의 속도 및 압력 비교 결과를 Figure 2.17과 Figure 2.18에 나타내었으며, 3차원 댐 붕괴 시뮬레이션에서도 시간별 유체의 위치 및 속도 분포는 매우 유사한 결과를 보였으며, 압력 분포는 2차원 댐 붕괴 시뮬레이션과 마찬가지로 ABAQUS의 WCSPH에서 압력 노이즈가 발생한 것을 확인할 수 있다.

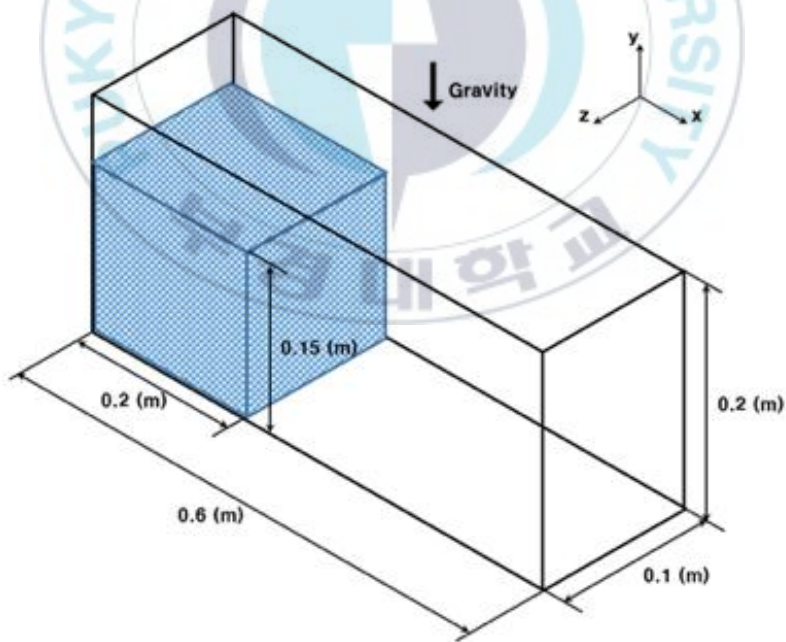
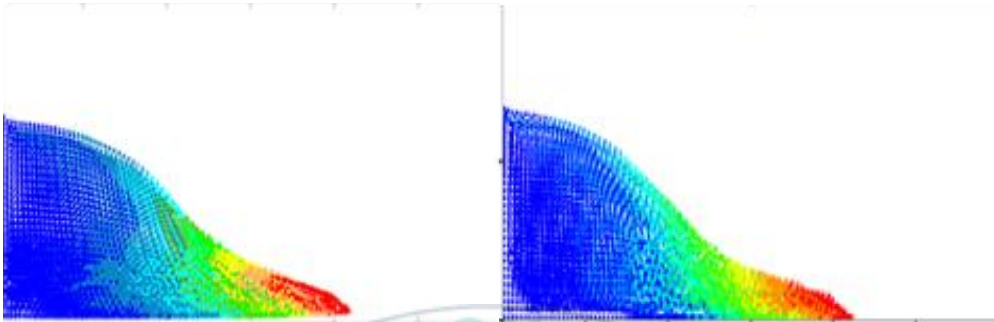


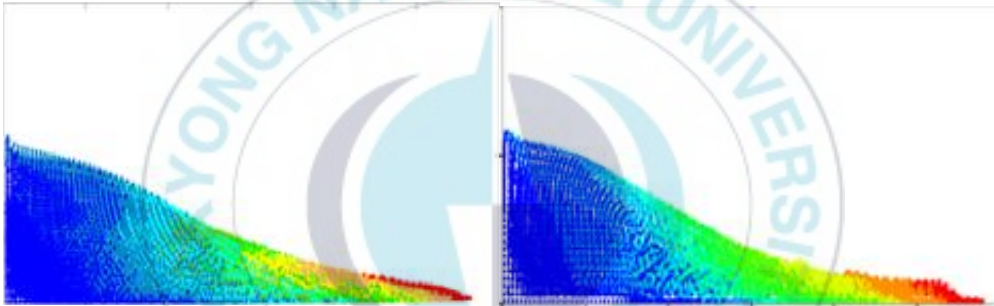
Figure 2.16 Schematic of 3D dam-breaking model

Developed program(ISPH)

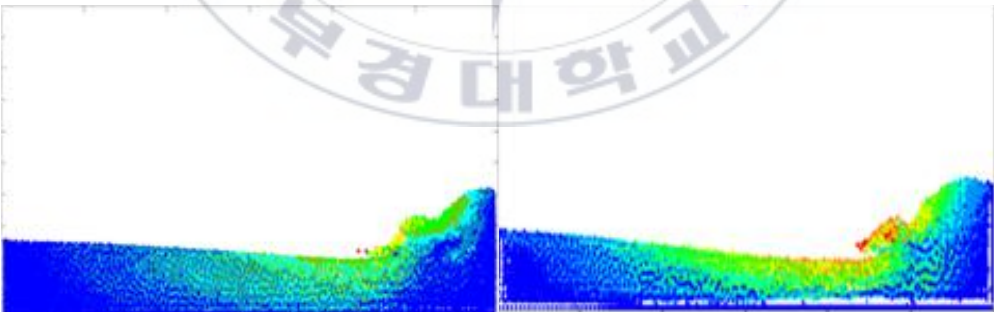
ABAQUS(WCSPH)



(a) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.19(s)



(b) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.28(s)

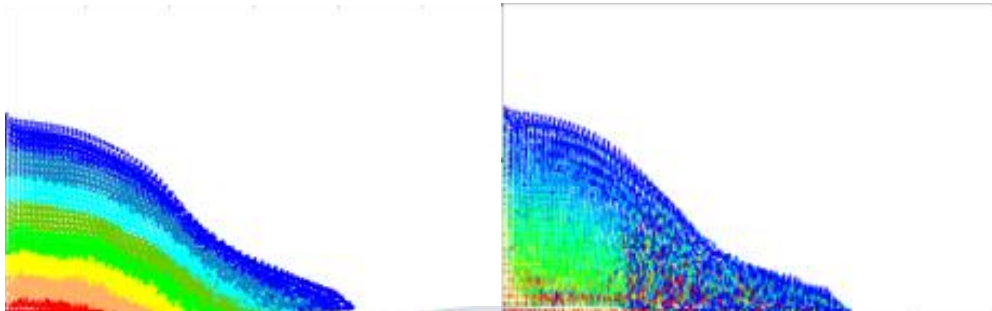


(c) Velocity contour of Developed program and ABAQUS at 0.65(s)

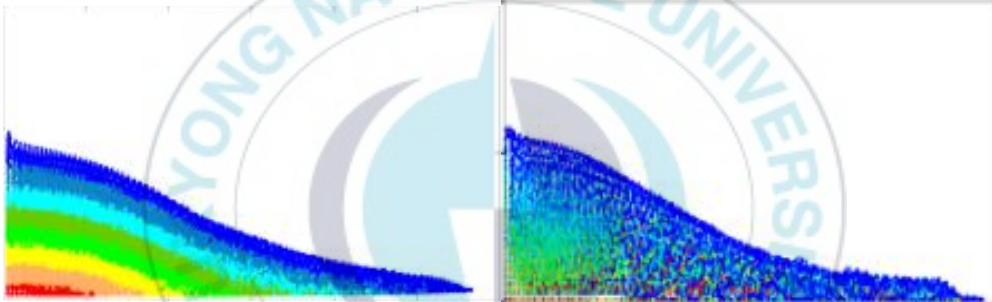
Figure 2.17 Velocity of 3D dam breaking

Developed program(ISPH)

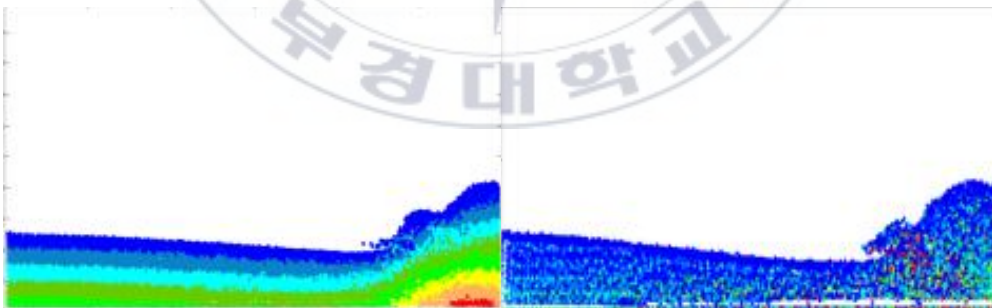
ABAQUS(WCSPH)



(a) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.19(s)



(b) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.28(s)



(c) Pressure contour of developed program and ABAQUS at 0.65(s)

Figure 2.18 Pressure of 3D dam breaking

2.5.2. Lid-driven cavity flow 시뮬레이션

두 번째 예제로 자유수면을 포함하지 않는 닫힌계에서의 개발 프로그램의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 lid-driven cavity flow를 시뮬레이션하였다. lid-driven cavity flow 예제는 상용 해석 프로그램 ANSYS Fluent를 이용하여 결과를 비교하였다. lid-driven cavity flow 시뮬레이션도 다양한 유체동역학 수치법의 검증 예제로 사용되어왔으며, Lee[15]는 ISPH 방법으로 lid-driven cavity flow 예제를 통해 상용 프로그램과의 비교뿐만 아니라 WCSPH와의 결과와의 비교를 통해 WCSPH 방법의 압력노이즈를 확인하였다. 또한 다른 초기입자간격과 레이놀즈수(Reynolds number)에 따른 시뮬레이션으로 다양한 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서는 다양한 조건에 대한 lid-driven cavity flow 예제의 결과 분석보다는 개발 프로그램의 시뮬레이션 결과 비교를 위해 레이놀즈수 400인 조건에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 2.19에서 lid-driven cavity flow 모델을 확인할 수 있으며, U는 상단 경계가 움직이는 일정한 속도로 1(m/s) 값을 가진다. L은 가로와 세로 모두 1(m)의 값을 가진다. 레이놀즈수는 식(2.56)과 같이 계산되며 L과 U는 위에 설명한 값과 같으며, 점성계수 ν 는 $0.0025(m^2s^{-1})$ 로 계산식에 의해서 레이놀즈수는 400의 값을 가진다.

$$Re = \frac{L \cdot U_{Lid}}{\nu} \quad (2.56)$$

초기 입자 간격은 0.01(m)로 유체입자의 개수는 9,081개, 경계입자와 더미 입자는 각각 408, 1,672개로 구성되었다. 완화길이 h는 초기 입자 간격의 1.3배인 0.013(m)를 사용하였으며, 밀도는 $1(kg/m^3)$ 이다. 동일한 모델에 대해서 ANSYS Fluent의 노드와 요소 수는 각각 28,033, 9,216개이며, 압력

기반의 솔버를 사용하였다. 개발 프로그램과 ANSYS Fluent간의 결과 비교는 lid-driven cavity의 중심을 지나는 수평 및 수직선상의 위치하는 유체의 속도와 마찬가지로 중심을 지나는 왼쪽하단에서 오른쪽 상단으로 이어지는 대각선상에 있는 유체의 압력을 비교하였다. Figure 2.20에 수직 및 수평선에 위치하는 유체의 x축 속도와, y축 속도를 각각 나타내었으며, 매우 유사한 결과를 나타내었다. Figure 2.21에서는 대각선상에 위치하는 유체입자의 압력 값을 비교한 결과를 보여주고 있으며, 이 또한 유사한 경향과 압력을 나타내었다. Figure 2.22에 속도 및 압력에 대한 수치값을 비교한 결과를 나타내었으며, 각 수치값 비교 결과에 대한 RMS오차를 Table 2.2에 나타내었다. Table 2.2에서 속도에 비해 압력이 비교적 큰 오차를 보이고 있지만 Lee[15]가 보여준 비교 결과와 유사한 오차 범위를 보여주고 있으며, 본 연구에서 사용하고 있는 더미입자기반의 경계조건과 다른 경계조건에서 더 좋은 결과를 Xu[31]와 Leroy[36]확인 할 수 있다.

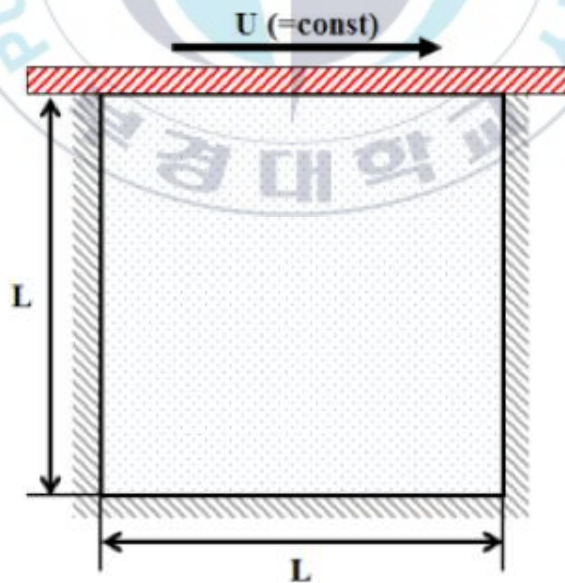


Figure 2.19 Schematic of lid-driven cavity flow model

Table 2.2 RMS errors of developed program for lid-driven cavity flow

	H. velocity	V. velocity	Pressure
RMS error(%)	1.6	2.9	4.7

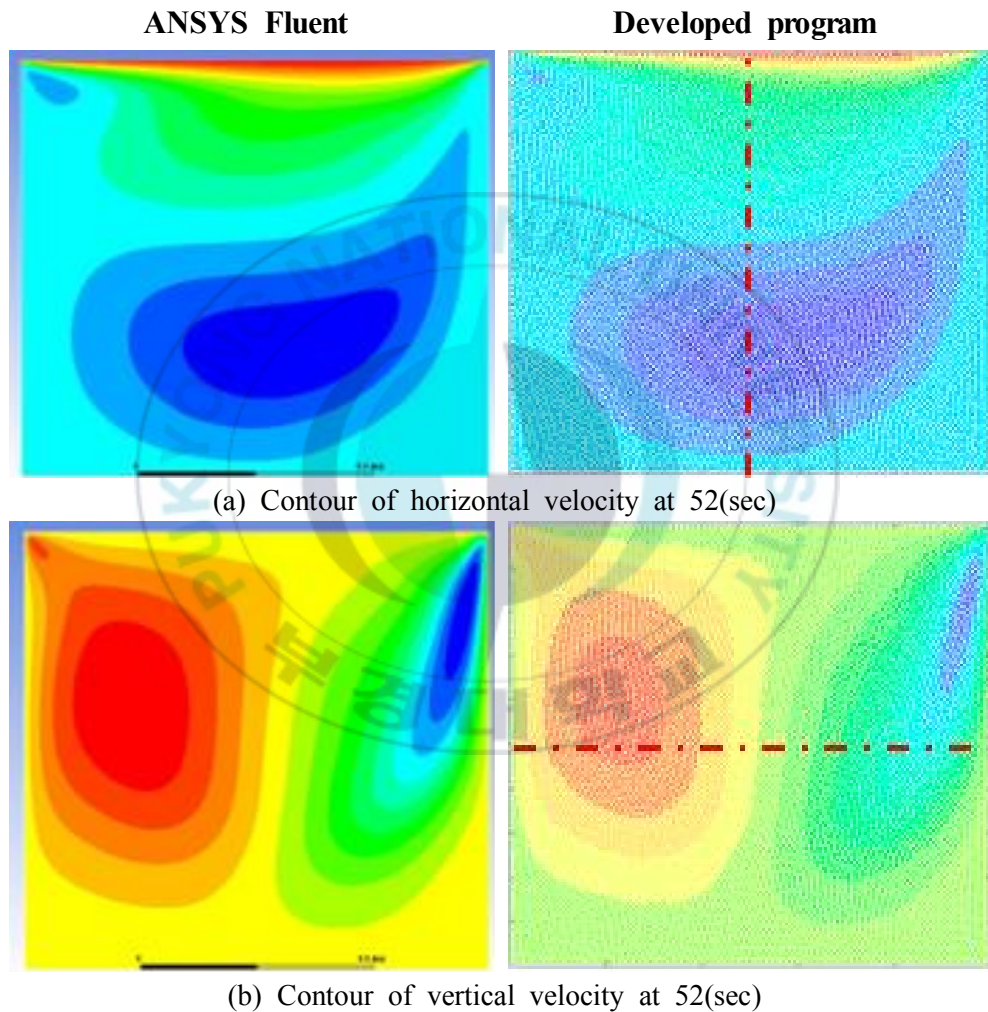


Figure 2.20 Velocity of lid-driven cavity flow simulation

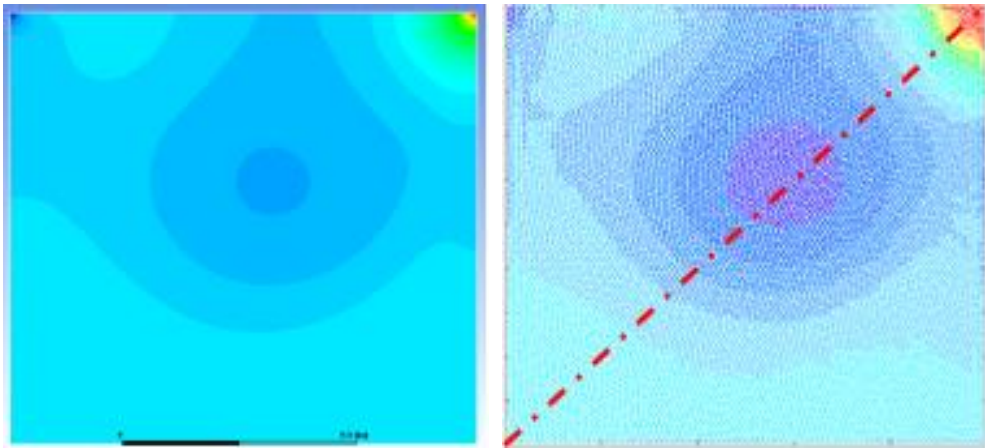
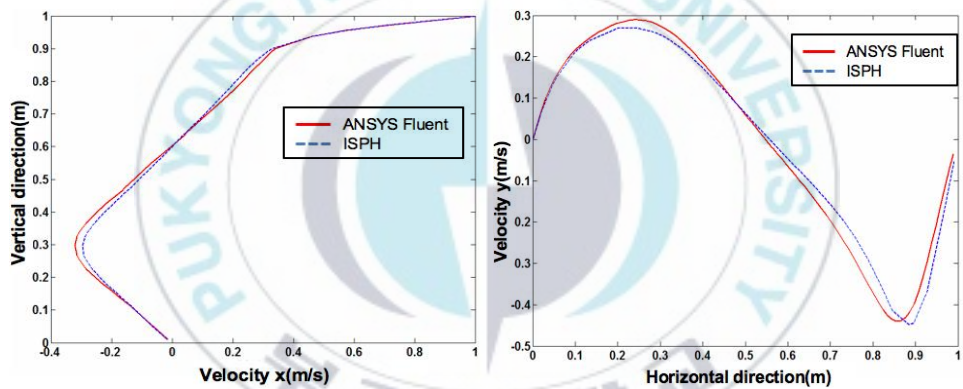
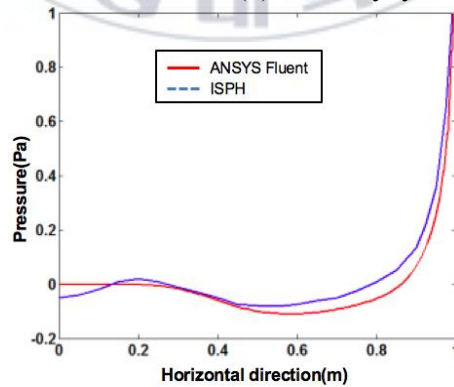


Figure 2.21 Pressure of lid-driven cavity flow simulation



(a) Velocity x for vertical direction (b) Velocity y for horizontal direction



(c) Pressure for diagonal direction

Figure 2.22 Numeric results of lid-driven cavity flow simulation

3. 다물체동역학 해석 프로그램

본 연구에서 파력발전시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 위해 다물체 동역학 해석 솔버를 개발하였다. 물체의 위치와 자세를 결정하기 위해서 직교좌표계와 오일러 파라미터(Euler parameter)를 사용하였으며, stiff한 시스템에 대한 안정적인 해석을 위해 암시적(implicit) 방식의 HHT- α 적분기법을 사용하였다. 개발된 다물체동역학 해석 솔버는 5장에서 부유식 파력발전시스템을 모델링하고 거동을 해석하기 위해 사용된다.

3.1. 3차원 시스템의 운동방정식

다물체동역학의 운동을 표현하기 위해 직각 좌표계(Cartesian coordinate)를 사용하였으며, 물체의 자세를 결정하기 위해 오일러 매개변수(Euler parameters)를 사용하였다. 운동방정식을 구성하는데 있어서 직각 좌표계는 다음과 같은 이점들을 지닌다[27].

- 운동 방정식의 계수 행렬의 형태를 간단하게 공식화할 수 있고, 구속식은 일관된 방법으로 생성할 수 있다.
- 각 물체의 위치, 속도, 가속도 정보는 직접적으로 얻어질 수 있다.
- 주어진 조인트에 대해서 구속 방정식을 수립하는데 있어 조인트에 의해 연결된 두 물체의 좌표들만 포함하기 때문에 구속방정식들은 시스템의 복잡성에 대해서 독립적이다.

하지만 물체의 위치, 회전의 모든 좌표를 고려하기 때문에 계수 행렬의 차원이 커지며, 자유도가 높아진다는 단점이 있다. 오일러 매개변수는 오일러 각(Euler angles)에서 나타나는 특이(singular) 문제를 해결할 수 있으

며, 내재적 적분의 시스템 자코비안을 구할 때, 편미분 되어지는 변수의 표현이 명확하기 때문에 비교적 쉽게 자코비안을 구성할 수 있다. 오일러 매개변수는 하나의 회전각과 회전 지향축의 방향코사인으로 표현되어 진다. 오일러 매개변수의 회전 좌표는 다음과 같이 정의된다.

$$e_0 \equiv \cos \frac{\Phi}{2} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{e} \equiv \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{Bmatrix} \equiv \mathbf{u} \sin \frac{\Phi}{2} \quad (3.2)$$

벡터 $\mathbf{e}$ 는 $\sin \frac{\Phi}{2}$ 의 크기를 가지는 회전축을 나타낸다. 그래서 오일러 매개변수는 총 4개의 회전 파라미터가 정의되며 위치 좌표와 함께 하나의 물체가 7개의 자유도를 가지게 된다. 3차원 공간에서 각 물체 i 의 위치와 오일러 매개변수에 의한 자세 좌표는 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T \quad (3.3)$$

$$\mathbf{p}_i = [e_0, e_1, e_2, e_3]^T \quad (3.4)$$

오일러 매개변수는 물체의 자세를 표현하는데 4개의 좌표를 사용하기 때문에 하나의 물체는 3차원 공간상에서 7 자유도를 가진다. 따라서 n_b 의 물체를 가지는 다물체시스템에 대해서 일반화 좌표는 다음과 같다.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T \mathbf{p}_1^T \cdots \mathbf{r}_{n_b}^T \mathbf{p}_{n_b}^T \end{bmatrix}^T \in R^p, p = 7n_b \quad (3.5)$$

n개의 일반화 좌표를 표현하는 $\mathbf{q}$ 와 m개의 구속식을 가지는 다물체시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T(\mathbf{q}, t)\lambda = \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}, t) \quad (3.6)$$

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = 0 \quad (3.7)$$

위 식에서 $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ 그리고 $\ddot{\mathbf{q}}$ 는 각각 $n \times 1$ 벡터로 표현되는 위치, 속도 그리고 가속도를 각각 나타낸다. $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 은 $n \times n$ 행렬로 표현되는 질량 및 관성 행렬이다. $\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 는 $n \times 1$ 의 힘 벡터이고, λ 는 라그랑지 곱수 이다. Φ_q 는 구속방정식을 일반화 좌표 $\mathbf{q}$ 로 편미분한 것으로 $m \times n$ 으로 표현되는 구속 자코비안 행렬이다. 오일러 매개변수를 사용하는 경우 식(3.6)과 식(3.7)의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 & 0 \\ 0 & 4\mathbf{G}^T \mathbf{J}' \mathbf{G} 2\mathbf{p} \\ 0 & 2\mathbf{p} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ 2\mathbf{G}^T \mathbf{n}' + 8\dot{\mathbf{G}}^T \mathbf{J}' \dot{\mathbf{G}} \mathbf{p} \\ -2\dot{\mathbf{p}}^T \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

위 식에서 $\mathbf{M}$ 은 물체의 질량을 포함하는 대각행렬이며, $\mathbf{J}'$ 는 물체의 관성을 포함하는 대각행렬이다. $\mathbf{r}$ 은 하나의 물체의 위치를 나타내며 $\mathbf{p}$ 는 오일러 매개변수이다. $\mathbf{F}$ 와 $\mathbf{n}'$ 은 물체에 작용하는 힘과 토크를 나타낸다. $\mathbf{G}$ 는 오일러 파라미터들로 구성된 3×4 행렬로 $\mathbf{G}(\mathbf{p}) = [-\mathbf{e}, -\tilde{\mathbf{e}} + \mathbf{e}_0 \mathbf{I}]$ 이다.

3.2. HHT-I3 내재적 수치적분

부싱과 조인트 그리고 다른 많은 힘 요소들의 사용은 시스템을 stiff하게 만든다. stiff한 시스템에 명시적 적분법을 사용하면 적분 간격을 좁혀 해석을 할 수 있지만 해석시간의 증가를 감수해야 한다. 그래서 더 안정적이고 강인한 특성을 가지고 있는 암시적 적분법을 고려할 수 있다. 본 연구에 사용된 암시적 적분법인 Hilbert-Hughes-Taylor(HHT) 방법은 α -method에 기반을 두고 있으며, H.M.Hilbert, T.J.R Hughes, 그리고 R.L. Taylor에 의해 제안되어졌다. α -method는 2차 상미분 방정식을 수치적으로 적분하기 위해 구조 동역학에서 널리 사용되어왔다. 만약 유한 요소 접근이 선형이라면, 그 식은 다음과 같은 형태로 가정된다[38][39].

$$\ddot{M}q + \dot{C}q + Kq - F(t) = 0 \quad (3.9)$$

여기서 파라미터 M, C, K는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬이며, 힘 F는 시간에 종속된다. α -method는 N. M. Newmark에 의해 제안된 Newmark 법을 기초로 두고 있으며, 적분공식은 두 파라미터 β 와 γ 에 의해 결정되며 다음 식과 같다.

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \dot{q}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1-2\beta)\ddot{q}_n + 2\beta\ddot{q}_{n+1}] \quad (3.10)$$

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \Delta t [(1-\gamma)\ddot{q}_n + \gamma\ddot{q}_{n+1}] \quad (3.11)$$

α -method에서 파라미터 β 와 γ 는 파라미터 α 에 의해서 식(3.12)에 의해서 결정된다.

$$\gamma = \frac{1-2\alpha}{2}, \quad \beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4} \quad (3.12)$$

Newmark 공식에서 식(3.13)와 (3.14)은 운동방정식을 이산하기 위해 사용되어진다.

$$M\mathbf{a}_{n+1} + C\mathbf{v}_{n+1} + K\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.13)$$

여기서 $\mathbf{a}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}, \mathbf{q}_{n+1}$ 은 $\ddot{\mathbf{q}}(t_{n+1}), \dot{\mathbf{q}}(t_{n+1}), \mathbf{q}(t_{n+1})$ 에 대한 수치적인 근사값이다. Newmark 법은 암시적 적분법이고 A-stability을 보장 한다. α -method는 Newmark 공식의 A-stability를 보존하고 2차 상미분 방정식에서 2차수 해의 정확성과 수치적인 감쇄 효과를 얻기 위해 보완하면서 제안되어졌다. 식(3.10)와 (3.11)의 적분 공식에 대한 새로운 식은 식(3.14)와 같이 대체되어진다.

$$M\mathbf{a}_{n+1} + (1+\alpha)C\mathbf{v}_{n+1} - \alpha C\mathbf{v}_n + (1+\alpha)K\mathbf{q}_{n+1} - \alpha K\mathbf{q}_n = \mathbf{F}(\tilde{t}_{n+1}) \quad (3.14)$$

여기서 $\tilde{t}_{n+1} = t_n + (1+\alpha)\Delta t$ 이다. 기계시스템의 다물체동역학과 관련된 운동 방정식은 식(3.9)와 같다. 그리고 해 $\mathbf{q}(t)$ 는 식(3.7)의 기구 구속 방정식을 만족해야 한다. 다물체동역학의 운동방정식에 대해서 힘은 $\Phi_q^T \lambda - \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}, t)$ 로 계산 되어진다. 그러므로 본래의 HHT 공식과 관련하여 다물체동역학 운동방정식은 다음과 같이 이산화 된다.

$$(M\ddot{\mathbf{q}})_{n+1} + (1+\alpha)(\Phi_q^T \lambda - \mathbf{F})_{n+1} - \alpha(\Phi_q^T \lambda - \mathbf{F})_n = 0 \quad (3.15)$$

식 (3.15)는 기구 구속 방정식과 함께 t_{n+1} 에서 만족해야 한다.

$$e_1(\ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \lambda) \equiv \frac{1}{1+\alpha}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}})_{n+1} + (\boldsymbol{\Phi}_q^T \lambda - \mathbf{F})_{n+1} - \frac{\alpha}{1+\alpha}(\boldsymbol{\Phi}_n^T \lambda - \mathbf{F})_n \quad (3.16)$$

$$e_2(\mathbf{q}, t) \equiv \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}_{n+1}, t_{n+1}) \quad (3.17)$$

HHT법은 암시적 적분법이기 때문에 비선형 자코비안 시스템 매트릭스를 구성하여야 한다. 식 (3.16)과 (3.17)에 대해서 각각 변수에 대해서 편미분을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial e_1}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} = \hat{\mathbf{M}} = \frac{1}{1+\alpha} \mathbf{M} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \Delta t \gamma + \left[\frac{1}{1+\alpha}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}})_q + (\boldsymbol{\Phi}_q^T \lambda)_q - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] \beta \Delta t^2 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial \lambda} = \boldsymbol{\Phi}_q^T \lambda, \quad \frac{\partial e_2}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} = \boldsymbol{\Phi}_q, \quad \beta \Delta t^2, \quad \frac{\partial e_2}{\partial \lambda} = 0 \quad (3.19)$$

위 식에서 $\partial \mathbf{F} / \partial \dot{\mathbf{q}}$, $\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{q}$, $(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}})_q$, $(\boldsymbol{\Phi}_q^T \lambda)_q$ 와 같은 힘과 구속식에 대한 미분항들을 의미하며, 앞에서 정의한 식들을 이용하여 최종적으로 식 (3.20)의 HHT법의 자코비안 시스템 방정식을 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{M}} & \boldsymbol{\Phi}_q^T \\ \boldsymbol{\Phi}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \partial \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_1 \\ -\frac{\mathbf{e}_2}{\beta \Delta t^2} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

식(3.20)에서 계산되어지는 $\ddot{\mathbf{q}}, \partial \lambda$ 로 이전 단계에서 계산된 가속도와 라

그랑지 곱수를 식(3.21)과 같이 수정한다.

$$\ddot{\mathbf{q}}^{(k+1)} = \ddot{\mathbf{q}}^{(k)} + \partial \ddot{\mathbf{q}}^{(k)}, \quad \lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \partial \lambda^{(k)} \quad (3.21)$$

계속적으로 값을 수정시켜가면서 값의 변화량이 사용자가 정한 허용오차 범위내에 포함되면 최종적으로 수정된 값을 정해로 결정한다.



3.3. 해석적 미분방정식

기구 구속을 포함하는 다물체시스템에서의 구속 방정식에 대한 자코비안의 구성과 암시적 적분법에서 시스템 자코비안 행렬 구성을 위해 일반화 좌표에 대한 구속 방정식과 운동방정식의 미분식이 필요하다. 본 연구에서는 Serban과 Haug[40]가 제안한 오일러 파라미터를 이용한 해석적 방법의 미분식을 사용하였다.

먼저 전역좌표계에서 물체의 고정된 좌표의 위치 정의가 필요하다. 오일러 매개변수로 표현되는 좌표변환 행렬은 식(3.22)와 같이 표현되며 개발 파라미터에 대해 정리하면 식(3.23)과 같다.

$$\mathbf{A}(\mathbf{p}) = (2e_0^2 - 1)\mathbf{I} + 2(\mathbf{e}\mathbf{e}^T + e_0\tilde{\mathbf{e}}) \quad (3.22)$$

$$\mathbf{A} = 2 \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - \frac{1}{2} & e_1e_2 - e_0e_2 & e_1e_3 + e_0e_2 \\ e_1e_2 + e_0e_3 & e_0^2 + e_2^2 - \frac{1}{2} & e_2e_3 - e_0e_1 \\ e_1e_3 + e_0e_2 & e_2e_3 + e_0e_1 & e_0^2 + e_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

전역 좌표계에서 물체에 고정된 좌표 $\mathbf{a}'$ 의 위치는 좌표변환 행렬과의 곱으로 식(3.24)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{a}' = (2e_0^2 - 1)\mathbf{a}' + 2(\mathbf{e}\mathbf{e}^T\mathbf{a}' + e_0\tilde{\mathbf{e}}\mathbf{a}') \quad (3.24)$$

오일러 파라미터에 대한 식(3.24)의 미분식은 식(3.25)와 같다.

$$\frac{\partial(\mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{a}')}{\partial \mathbf{p}} = \left[\frac{\partial(\mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{a}')}{\partial e_0}, \frac{\partial(\mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{a}')}{\partial \mathbf{e}} \right] = 2\{\mathbf{a}'\mathbf{p}^T + \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}, \mathbf{a}')\} \quad (3.25)$$

$$\hat{B}(\mathbf{p}, \mathbf{a}') = [(e_0 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{e}}) \tilde{\mathbf{a}}', \mathbf{e} \mathbf{a}'^T - (e_0 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{e}}) \tilde{\mathbf{a}}'] \quad (3.26)$$

여기서 식(3.25)를 식(3.27)과 같이 3×4 행렬로 구성되는 $B(\mathbf{p}, \mathbf{a}')$ 로 정의한다.

$$B(\mathbf{p}, \mathbf{a}') = 2\{\mathbf{a}' \mathbf{p}^T + \hat{B}(\mathbf{p}, \mathbf{a}')\} \quad (3.27)$$

식(3.18)에서 $(\Phi_q^T \lambda)_q$ 을 계산하기 위해서 오일러 파라미터 $\mathbf{p}$ 에 대한 식(3.27)의 미분식이 필요하다. 먼저 식(3.26)과 임의의 스칼라 γ 의 곱의 미분식 표현은 식(3.28)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} (\hat{B}^T(\mathbf{p}, \mathbf{a}') \gamma) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}'^T \gamma & \mathbf{a}'^T \tilde{\gamma} \\ \tilde{\mathbf{a}}' \gamma & \mathbf{a}'^T \gamma + \tilde{\mathbf{a}}' \tilde{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

식(3.28)을 이용하면 식(3.27)에 대한 미분식은 식(3.29)으로 정리된다.

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} (B^T(\mathbf{p}, \mathbf{a}') \gamma) = 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} (\mathbf{p} \mathbf{a}'^T \gamma) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} (\hat{B}^T(\mathbf{p}, \mathbf{a}') \gamma) \right\} \quad (3.29)$$

여기서 식(3.29)를 $D(\mathbf{a}', \gamma)$ 로 정의하고 4×4 행렬식으로 정리하면 식(3.30)이 된다.

$$D(\mathbf{a}', \gamma) = 2 \begin{bmatrix} 2\mathbf{a}'^T \gamma & \mathbf{a}'^T \tilde{\gamma} \\ \tilde{\mathbf{a}}' \gamma & \mathbf{a}'^T \mathbf{I} + \mathbf{a}'^T \gamma + \tilde{\mathbf{a}}' \tilde{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

식(3.18)에서 일반화 관성행렬은 행렬 $G(p)$ 를 포함하기 때문에 i 물체의 오일러 파라미터 p_i 에 대한 $G^T(p_i)J'_i G(p_i)\ddot{p}_i$ 의 미분식의 정의되어야 하며, 그 미분식은 식(3.31)과 같다.

$$\left(G^T(p_i)J'_i G(p_i)\ddot{p}_i\right)_{p_i} = -G^T(p_i)J'_i G(\ddot{p}_i) + (J'_i G(p_i)\ddot{p}_i)^- \quad (3.31)$$

위 식에서 위첨자 -는 식(3.32)와 같이 정의된다.

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} 0 & -x^T \\ x & -\tilde{x} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

마찬가지로 식(3.18)의 일반화 힘은 행렬 $G(p_i)$ 와 $G(\dot{p}_i)$ 을 포함하기 때문에 i 물체에 대한 오일러 파라미터 p_i 와 시간 미분 $\dot{p}_i$ 에 대한 미분식이 정의되어야 하며 그 미분식은 각각 식(3.33)와 식(3.34)과 같다.

$$\left(2G_i^T \dot{n}_i' + 8\dot{G}_i^T J'_i \dot{G}_i p_i\right)_{p_i} = 2\dot{n}'^- + 8G^T(\dot{p}_i)J'_i G(\dot{p}_i) \quad (3.33)$$

$$\left(2G_i^T \dot{n}_i' + 8\dot{G}_i^T J'_i \dot{G}_i p_i\right)_{\dot{p}_i} = G^T(\dot{p}_i)J'_i G(p_i) + (J'_i G(\dot{p}_i)p_i)^- \quad (3.34)$$

3.4. 기구 구속방정식

다물체로 이루어진 기구시스템에서 두 개 이상의 물체들은 하나 이상의 기구 조인트로 연결된다. 이러한 기구 조인트에는 두 물체 사이의 상대적인 운동을 제한하는 역할을 하는 것으로 회전(revolute), 병진(translational), 구면(spherical) 등등 다양한 기구 조인트를 예로 들 수 있다[25]. Figure 3.1에서 i 물체와 j 물체에 고정된 한점에 대한 벡터 관계를 보여준다. $\mathbf{s}_i'$ 와 $\mathbf{s}_j'$ 는 각 물체의 고정좌표계에서 물체에 고정된 한 점으로 향하는 벡터이며, 전역좌표계에서 각 벡터는 다음과 같이 변환행렬과의 곱으로 정의된다.

$$\mathbf{s}_{i,j} = \mathbf{A}_{i,j} \mathbf{s}_{i,j}' \quad (3.35)$$

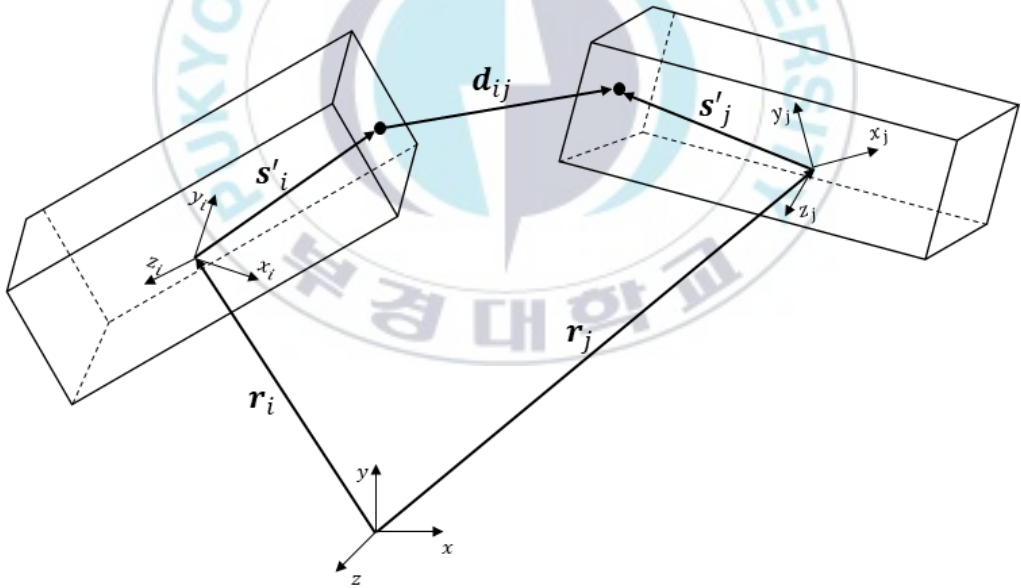


Figure 3.1 Definition of the body-fixed vectors

기구 구속을 표현하는데 있어 4개의 구속 공식들이 요구된다. 첫 번째

로 각각의 물체 i 와 j 의 고정 좌표 $\mathbf{s}_i$ 와 $\mathbf{s}_j$ 의 직교성을 만족시키기 위한 공식으로 식(3.36)와 같으며, 식(3.36)의 자코비안과 구속반력 계산식의 자코비안은 각각 식(3.37)과 식(3.38)과 같다.

$$\Phi^{d_1} = \mathbf{s}_i^T \mathbf{s}_j = \mathbf{s}_j^T \mathbf{s}_i = 0 \quad (3.36)$$

$$\Phi_q^{d_1} = [0, \mathbf{s}_j^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i'), 0, \mathbf{s}_i^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j')] \quad (3.37)$$

$$\left((\Phi_q^{d_1})^T \lambda \right)_q = \lambda \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D(\mathbf{s}_i', \mathbf{s}_j) & 0 & \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') & 0 & D(\mathbf{s}_j', \mathbf{s}_i) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

두 번째는 물체 i 와 j 의 상대거리 벡터 $\mathbf{d}_{ij}$ 와 물체 i 에 고정 좌표 $\mathbf{s}_i$ 의 직교성을 만족시키기 위한 공식으로 식(3.39)과 같으며, 식(3.39)의 자코비안과 구속반력 계산식의 자코비안은 각각 식(3.40)와 식(3.41)과 같다.

$$\Phi^{d_2} = \mathbf{s}_i^T \mathbf{d}_{ij} = \mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{s}_i = 0 \quad (3.39)$$

$$\Phi_q^{d_2} = [-\mathbf{a}_i^T, (\mathbf{d}_{ij} + \mathbf{s}_i)^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i'), \mathbf{a}_i^T, \mathbf{a}_i^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j')] \quad (3.40)$$

$$\left((\Phi_q^{d_2})^T \lambda \right)_q = \lambda \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i') & 0 & 0 \\ -\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i') D(\mathbf{a}_i', \mathbf{d}_{ij} + \mathbf{s}_i) & \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i') & \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i') \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \\ 0 & \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

세 번째는 물체 i 와 j 에 고정된 점 $\mathbf{c}_i$ 와 $\mathbf{c}_j$ 사이의 고정된 거리를 만족시키기 위한 공식으로 식(3.42)과 같으며, 식(3.42)의 자코비안과 반력 계산식의 자코비안은 각각 식(3.43)와 식(3.44) 그리고 식(3.45)와 같다.

$$\Phi^{ss} = \mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{d}_{ij} - C^2 = \mathbf{d}_{ji}^T \mathbf{d}_{ji} - C^2 = 0 \quad (3.42)$$

$$\Phi_q^{ss} = [2\mathbf{d}_{ji}^T, 2\mathbf{d}_{ji}^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i'), 2\mathbf{d}_{ij}^T, 2\mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j')] \quad (3.43)$$

$$\left[\left((\Phi_q^{ss})^T \lambda \right)_{q_{ij,i}} \right] = \lambda \begin{bmatrix} 2I & 2\mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') \\ 2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') & 2\mathbf{D}(\mathbf{s}_i', \mathbf{d}_{ji}) + 2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') \\ -2I & -2\mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_j') \\ -2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') & -2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$\left[\left((\Phi_q^{ss})^T \lambda \right)_{q_{ij,j}} \right] = \lambda \begin{bmatrix} -2I & -2\mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \\ -2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') - 2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i') \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') & 2\mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \\ 2I & 2\mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') \\ 2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j') & 2\mathbf{D}(\mathbf{s}_j', \mathbf{d}_{ij}) + 2\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j) \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

식(3.42)에서 변수 C 는 두 점 사이의 고정 거리를 나타내는 상수이며, 식(3.44)은 i 물체와 j 물체에 해당하는 행과 i 물체에 해당하는 열의 행렬 요소들이며, 식(3.45)는 i 물체와 j 물체에 해당하는 행과 j 물체에 해당하는 열의 행렬 요소들이다.

마지막으로 물체 i 와 j 에 고정된 점 $\mathbf{c}_i$ 와 $\mathbf{c}_j$ 가 서로 일치함을 만족시키기 위한 공식으로 식(3.46)과 같으며, 식(3.46)의 자코비안과 반력 계산식의 자코비안은 각각 식(3.47) 그리고 식(3.48)과 같다.

$$\Phi^s = \mathbf{r}_j + \mathbf{s}_j - \mathbf{r}_i - \mathbf{s}_i = 0 \quad (3.46)$$

$$\Phi_q^s = [-I, -B(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i'), I, B(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}_j')] \quad (3.47)$$

$$((\Phi_q^s)^T \lambda)_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 - D(\mathbf{s}_i', \lambda) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D(\mathbf{s}_j', \lambda) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

대부분의 기구 조인트들은 위에서 설명한 네 개의 공식 중에서 하나 혹은 두 개 이상으로 표현될 수 있다. 오일러 매개변수를 사용하는 경우에는 조인트에 의한 구속방정식외에도 하나의 물체에 대한 오일러 매개변수의 정규화 구속이 식(3.49)와 같이 사용된다.

$$\Phi_i^p = \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i - 1 = 0 \quad (3.49)$$

3.5. 다물체동역학 해석 프로그램

본 연구에서 개발된 다물체동역학 해석 프로그램은 다물체시스템의 거동을 계산하기 위해서 본 연구에서는 HHT- α 적분 기법의 암시적 적분법을 사용한다. HHT- α 적분 기법을 고려한 다물체동역학 프로그램의 계산 알

고리즘은 Figure 3.2과 같다. 예측단계에서는 t_n 에서의 힘과 물체의 위치, 속도를 계산한다. t_n 에서 계산된 위치와 속도는 예측된 t_{n+1} 의 값으로 수정단계에서 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 반복 계산 알고리즘에 의해 수정된다. 뉴턴-랩슨 반복 계산 과정에서 가속도와 라그랑지곱수의 변화량에 대한 잔차가 허용범위 이하가 되면 반복과정을 벗어난다.

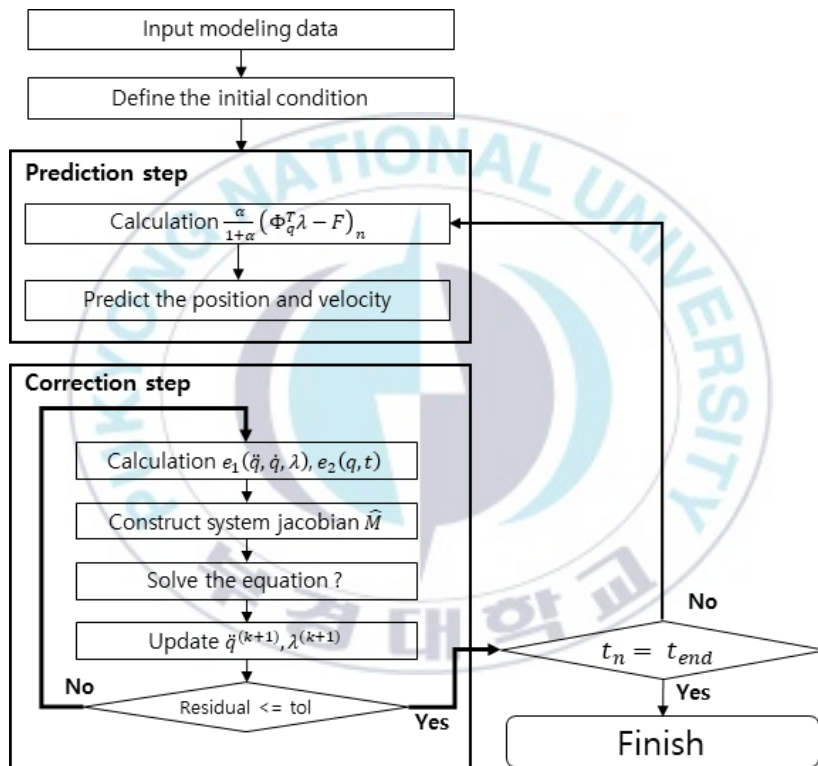


Figure 3.2 Flow chart of multibody dynamics solver with HHT

개발된 다물체동역학 프로그램의 구성을 Figure 3.3에서 확인할 수 있다. Figure 3.3에서 simulation은 시간간격 및 시물레이션 시간등의 정보를 가지는 클래스(class)이며, multibody model은 다물체동역학 모델의 정보를 가지는 클래스이다. 개발된 프로그램은 강체만 고려 가능하며 탄성체 해석은 지원하지 않는다. 구현된 힘 요소와 구속 요소는 Figure 3.3에서 확인

할 수 있다. 각각의 구속 요소들의 구속방정식은 3.4절에서 설명한 4개의 방정식의 조합으로 구성된다. 기본적인 구면(spherical)구속은 식(3.46)의 방정식에 의해서 정의된다. 회전(revolute)구속은 Figure 3.4과 같은 형태를 가지며 구면구속 방정식에 i 물체와 j 물체에 고정된 같은 축에 대해서 하나의 회전 자유도를 가지므로 식(3.50)과 같이 총 5개의 구속 방정식을 필요로 한다.

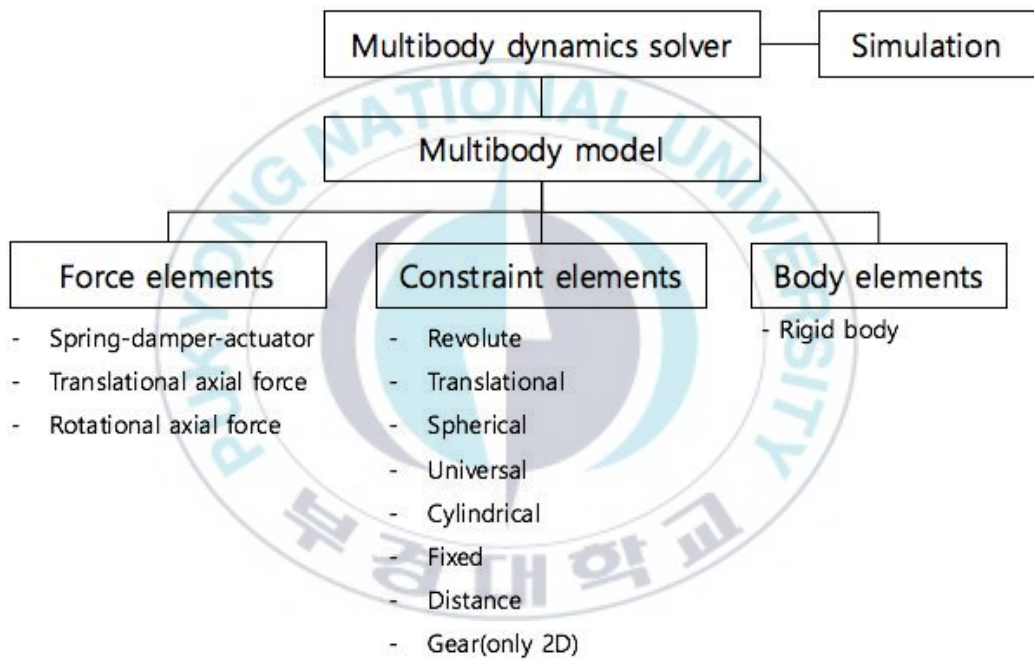


Figure 3.3 Diagram of multibody dynamics program

$$\begin{cases} \Phi^s(P_i, P_j) = 0 \\ \Phi^{d_1}(f_i, h_j) = 0 \\ \Phi^{d_1}(g_i, h_j) = 0 \end{cases} \quad (3.50)$$

유니버설 구속은 Figure 3.5와 같이 구성되며, 연결된 물체에 고정된 두

개의 직각축에 대한 상대적인 회전이 가능하기 때문에 i 물체와 j 물체에 고정된 점 P_i 와 P_j 가 일치하여야 하며, 벡터 h_i 와 h_j 가 직각을 유지해야 하기 때문에 식(3.51)같이 4개의 구속 방정식이 필요하다.

$$\begin{cases} \Phi^s(P_i, P_j) = 0 \\ \Phi^{d_1}(h_i, h_j) = 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

병진 구속은 Figure 3.6과 같이 구성되며, 연결된 물체에 고정된 같은 축을 향하는 하나의 상대적인 병진 자유도를 가지기 때문에 총 5개의 구속 방정식이 사용되며 식(3.52)과 같다.

$$\begin{cases} \Phi^{d_1}(f_i, h_j) = 0 \\ \Phi^{d_1}(g_i, h_j) = 0 \\ \Phi^{d_2}(f_i, d_{ij}) = 0 \\ \Phi^{d_2}(g_i, d_{ij}) = 0 \\ \Phi^{d_1}(f_i, f_j) = 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

식(3.52)에서 d_{ij} 는 두 물체에 각각 고정된 점 P_i 와 P_j 의 상대거리 벡터이다. 먼저 설명한 4개의 구속 요소 외에 원통형(cylindrical) 구속, 고정(fixed) 구속 또한 같은 방법으로 구성할 수 있다.

병진 스프링-댐퍼-액추에이터(Translational Spring-Damper-Actuator, TSDA)는 Figure 3.7에서 나타내었듯이 i 물체와 j 물체에 고정된 점 P_i 와 P_j 사이의 상대 거리 및 속도 변화에 의해서 계산된다. TSDA의 가상 일은 식(3.53)과 같으며, 힘 f 는 식(3.54)과 같다.

$$\delta W = -f \delta l \quad (3.53)$$

$$f = k(l - l_0) + c\dot{l} + F \quad (3.54)$$

식(3.53)에서 l_0 는 점 P_i 와 P_j 사이의 초기 거리이며, l 은 두 물체의 상대적인 운동에 의해서 계산되는 거리로 식(3.55)과 같이 계산된다.

$$l^2 = \mathbf{d}_{ij}^T \mathbf{d}_{ij} \quad (3.55)$$

위 식에서 $\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{r}_j + \mathbf{s}_j - \mathbf{r}_i - \mathbf{s}_i$ 이며, l 의 변화량은 식(3.56)과 같다.

$$\delta l = \frac{\mathbf{d}_{ij}^T}{l} (\delta \mathbf{r}_j + \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}'_j) \delta \mathbf{p}_j - \delta \mathbf{r}_i - \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) \delta \mathbf{p}_i) \quad (3.56)$$

식(3.56)을 식(3.53)에 대입하고 가상 변위와 오일러 파라미터의 변화량을 동일시 하면 식(3.57), 식(3.58)과 같이 된다.

$$\mathbf{Q}_i = \frac{f}{l} \left[\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) \mathbf{d}_{ij} \right] \quad (3.57)$$

$$\mathbf{Q}_j = -\frac{f}{l} \left[\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}'_j) \mathbf{d}_{ij} \right] \quad (3.58)$$

위 두식은 각각 i 물체와 j 물체에 작용하는 TSDA 힘이다. 암시적 적분법에 사용에 의해 TSDA에 대한 미분식의 정의가 필요하다. 식(3.56)을 일반

좌표 q 에 대해서 미분하면 식(3.59)과 식(3.60)과 같이 된다.

$$Q_q^F = d_{ij} \left(\frac{f}{l} \right)_q + \frac{f}{l} (d_{ij})_q \quad (3.59)$$

$$Q_q^N = B^T(p_i, s'_i) d_{ij} \left(\frac{f}{l} \right)_q + \frac{f}{l} (B^T(p_i, s'_i) d_{ij})_q \quad (3.60)$$

식(3.60)에서 두 번째 항은 식(3.61)로 계산된다.

$$(B^T(p_i, s'_i) d_{ij})_q = B^T(p_i, s'_i) (d_{ij})_q + [0, D(s'_i, d_{ij}), 0, 0] \quad (3.61)$$

식(3.60)에서 l 이 q 에 의해서 계산되는 값이기 때문에 일반화 좌표에 대한 l 의 미분식 또한 정의되어야 하며 식(3.62)와 같이 표현된다.

$$\left(\frac{f}{l} \right)_q = \frac{1}{l^2} \left(\left(k - \frac{f}{l} \right) ll_q + cl \dot{l}_q \right) \quad (3.62)$$

여기서 $ll_q = d_{ij}^T (d_{ij})_q$, $l \dot{l}_q = d_{ij}^T \kappa_q + \left(\kappa^T - \frac{\dot{l}}{l} d_{ij}^T \right) (d_{ij})_q$, $\kappa = \dot{d}_{ij}$, $(d_{ij})_q$ 는 식(3.47)과 같으며, κ_q 는 식(3.63)과 같다.

$$\kappa_q = [-0, -B(\dot{p}_i, s'_i), 0, B(\dot{q}_j, s'_j)] \quad (3.63)$$

그리고 $\dot{l}$ 는 식(3.64)와 같다.

$$\dot{l} = \frac{1}{l} d_{ij}^T \kappa = \frac{1}{l} d_{ij}^T (\dot{\mathbf{r}}_j + \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_j, \mathbf{s}'_j) \mathbf{p}_j - \dot{\mathbf{r}}_i - \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_i, \mathbf{s}'_i) \mathbf{p}_i) \quad (3.64)$$

식(3.61)를 식(3.60)에 대입하고 정리하여 결과적으로 식(3.65)와 식(3.66)으로 정리된다.

$$\mathbf{Q}_q^F = [-N_1, -N_1 \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) - N_2 \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_i, \mathbf{s}'_i), N_1, N_1 \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}'_j) + N_2 \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_j, \mathbf{s}'_j)] \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_q^N = & \left[-\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) N_1, -\mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) (N_1 \mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) + N_2 \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_i, \mathbf{s}'_i)) + \frac{f}{l} \mathbf{D}(\mathbf{s}'_i, \mathbf{d}_{ij}), \right. \\ & \left. \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) N_1, \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) (N_1 \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}'_j) + N_2 \mathbf{B}(\dot{\mathbf{p}}_j, \mathbf{s}'_j)) \right] \end{aligned} \quad (3.66)$$

일반화 속도 좌표 $\dot{\mathbf{q}}$ 에 대한 미분식은 식(3.67), 식(3.68)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{Q}_q^F = d_{ij} \left(\frac{f}{l} \right)_{\dot{\mathbf{q}}} = d_{ij} \frac{1}{l} f_{\dot{\mathbf{q}}} = \frac{c}{l} d_{ij} \dot{l}_{\dot{\mathbf{q}}} \quad (3.67)$$

$$\mathbf{Q}_q^N = \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) d_{ij} \left(\frac{f}{l} \right)_{\dot{\mathbf{q}}} = \mathbf{B}^T(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i) \mathbf{Q}_q^F \quad (3.68)$$

$\dot{l}_{\dot{\mathbf{q}}}$ 은 식(3.69)와 같다.

$$\dot{l}_{\dot{\mathbf{q}}} = \frac{d_{ij}^T}{l} [-I, -\mathbf{B}(\mathbf{p}_i, \mathbf{s}'_i), I, \mathbf{B}(\mathbf{p}_j, \mathbf{s}'_j)] \quad (3.69)$$

식(3.65)와 식(3.66)을 다시 정리하면 식(3.70), 식(3.71)과 같이 표현된다.

$$Q_q^F = c \frac{d_{ij} d_{ij}^T}{l^2} [-I, -B(p_i, s'_i, I, B(p_j, s'_j))] \quad (3.70)$$

$$Q_q^N = c B(p_i, s'_i) \frac{d_{ij} d_{ij}^T}{l^2} [-I, -B(p_i, s'_i, I, B(p_j, s'_j))] \quad (3.71)$$

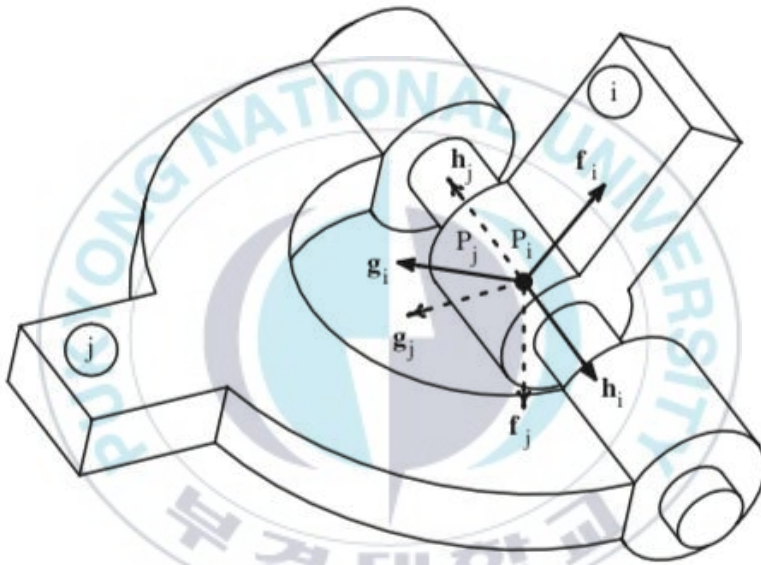


Figure 3.4 Schematic of revolute joint

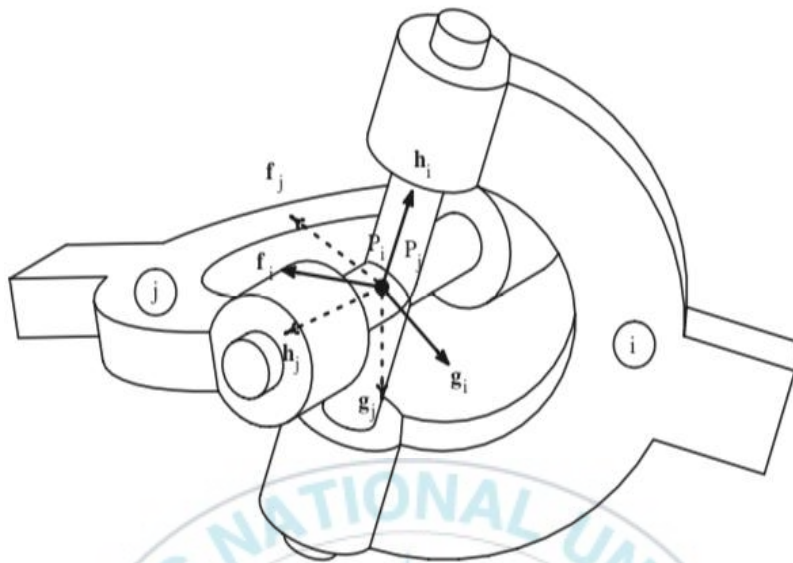


Figure 3.5 Schematic of universal joint

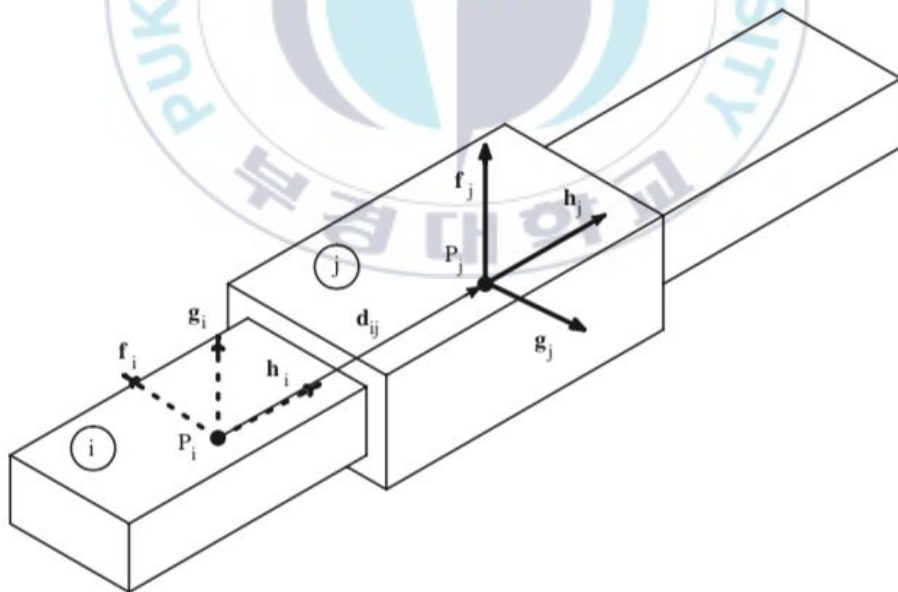


Figure 3.6 Schematic of translational joint

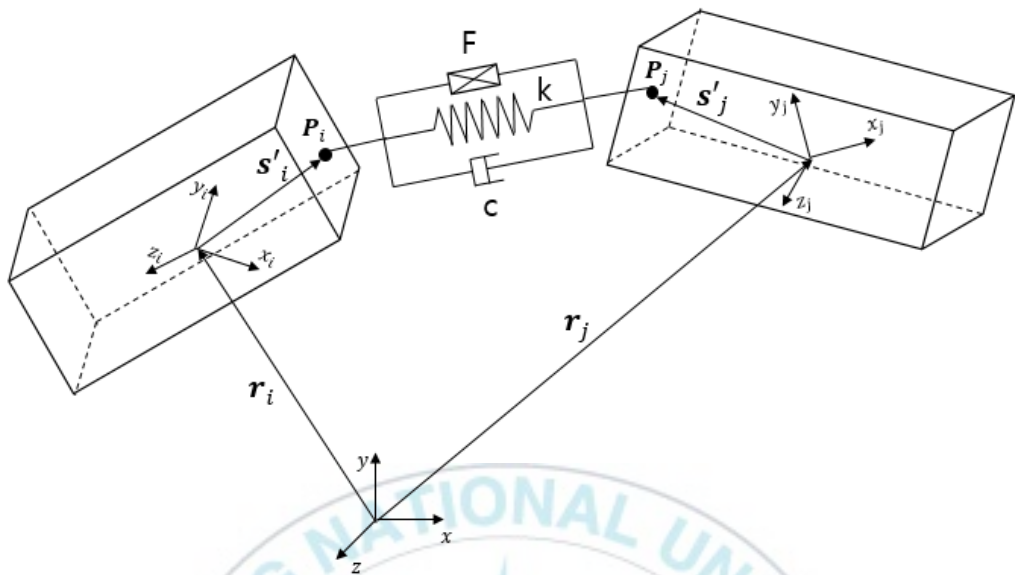


Figure 3.7 Schematic of translational spring-damper-actuator

3.6. 상용 해석프로그램을 이용한 검증

개발된 다물체동역학 해석 솔버를 검증하기 위해서 상용 다물체동역학 해석 프로그램인 평선베이(Function Bay)의 리커다인(RecurDyn)을 사용하였다. 검증을 위해 공간 슬라이더-크랭크(spatial slider-crank) 모델을 사용하였으며, Figure 3.8에 해석 모델을 도식적으로 나타내었으며, 각 물체의 질량, 관성모멘트 그리고 초기 위치를 Table 3.1에 나타내었고, 구속 요소에 대한 전역좌표계에서의 위치를 Table 3.2에 나타내었다. Table 3.1에서 P. inertia는 $[I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}]$, S. inertia는 $[I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}]$ 의 값을 의미한다. 스프링-댐퍼 힘 요소의 스프링 상수는 $10,000(N/m)$ 이며, 댐핑계수는 $10(N \cdot s/m)$ 로 임의의 값을 사용하였다. 크랭크의 회전 구속 위치에 x 축 방향으로 $-100(N \cdot m)$ 의 일정한 회전력을 주어 1초간 시뮬레이션을 수행하고 각 물체의 운동을 비교하였다.

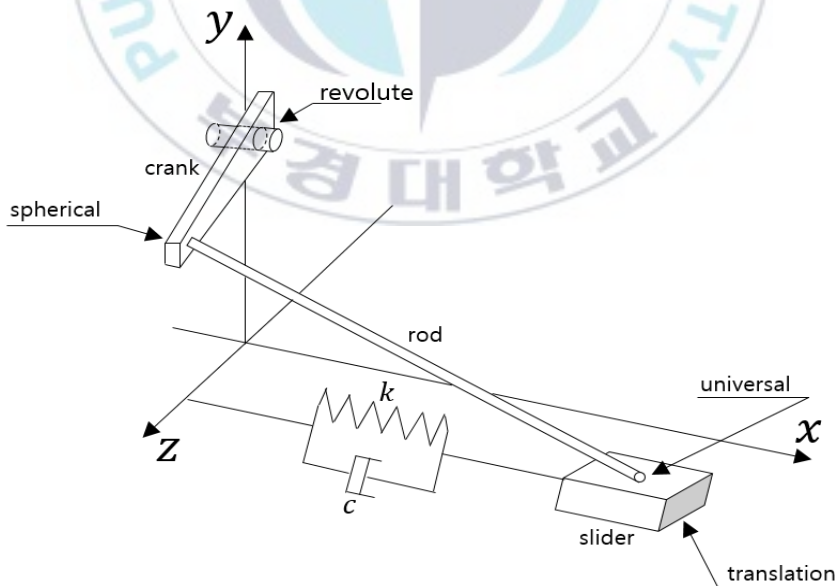


Figure 3.8 Schematic diagram of spatial slider-crank model

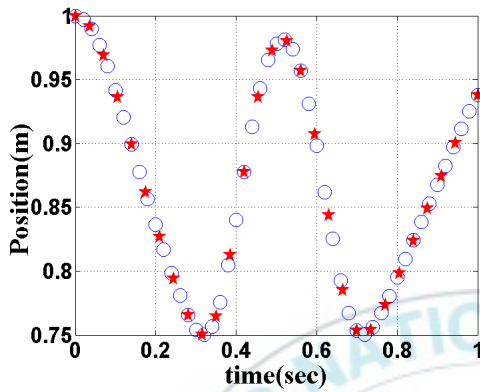
Figure 3.10에서 Figure 3.18까지 crank, rod, slider의 위치, 속도, 가속도를 비교한 결과를 나타내었으며, 모든 결과에 대해서 개발된 다물체동역학 해석 솔버가 상용 해석프로그램인 RecurDyn과 같은 결과를 보이는 것을 확인하였으며, 개발된 다물체동역학 해석 솔버가 다물체시스템의 동적 거동을 잘 계산하는 것을 확인하였다.

Table 3.1 Property of rigid bodies

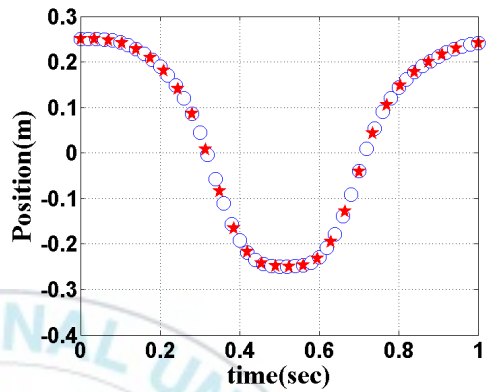
	Crank	Rod	Slider
Mass (kg)	7.7	22	4.11
P. inertia (N·m ²)	[0.162, 0.162, 2.4e-3]	[1.842, 7.355, 9.193]	[4.1e-3, 4.1e-3, 4.1e-3]
S. inertia (N·m ²)	[0.0, 0.0, 0.0]	[0.0, 0.0, 0.0]	[0.0, 0.0, 0.0]
Position (m)	[0.0, 1.0, 0.25]	[1.0, 0.5, 0.5]	[2.0, 0.0, 0.5]

Table 3.2 Location of kinematic joints

	Location(m)	Base body	Action body
Revolute	[0.0, 1.0, 0.0]	Ground	Crank
Spherical	[0.0, 1.0, 0.5]	Crank	Rod
Universal	[2.0, 0.0, 0.5]	Rod	Slider
Translation	[1.0, 0.0, 0.5]	Ground	Slider

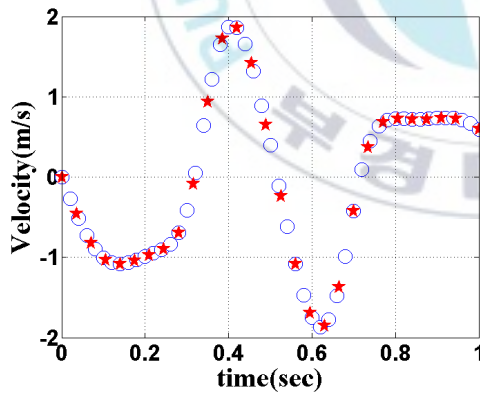


(a) Results of position y axis

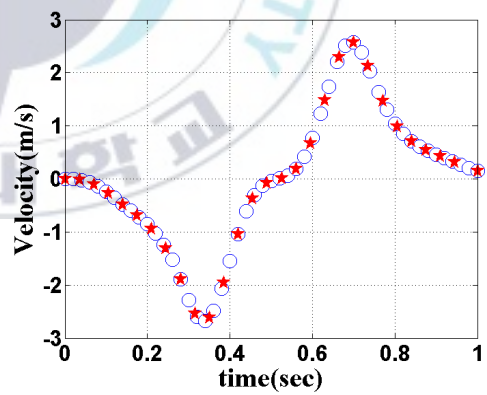


(b) Results of position z axis

Figure 3.9 Position of the crank (★ : RecurDyn, ○ : House code)

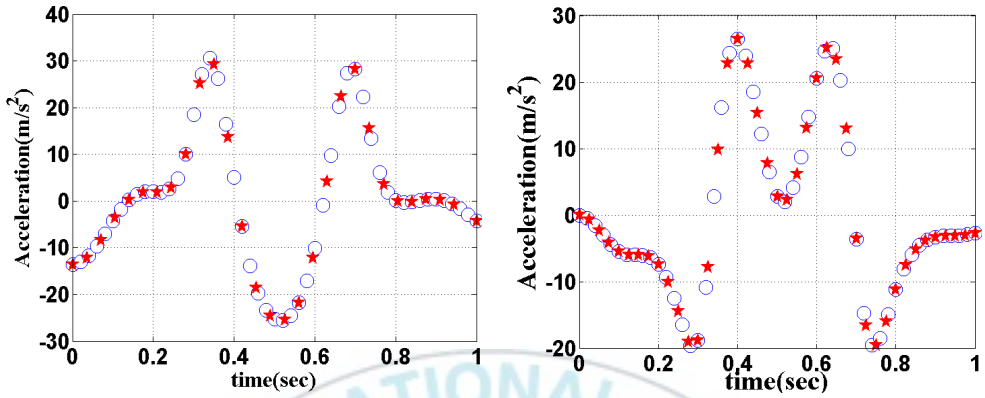


(a) Results of velocity y axis



(b) Results of velocity z axis

Figure 3.10 Velocity of the crank (★ : RecurDyn, ○ : House code)

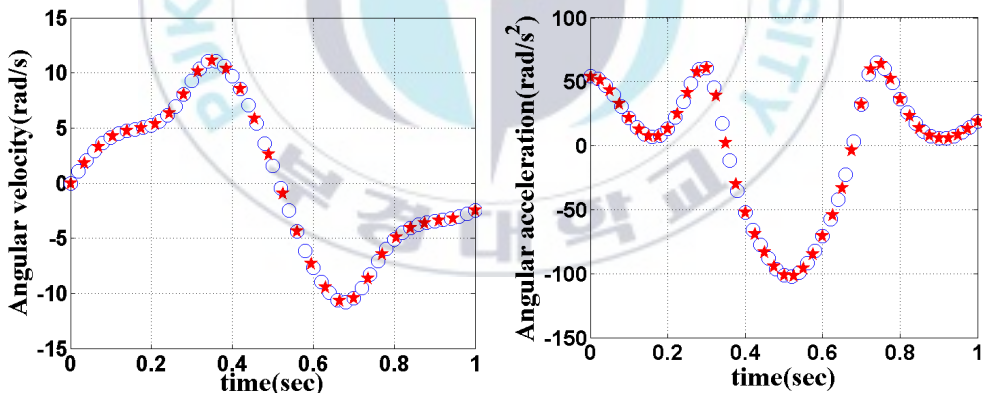


(a) Results of acceleration y axis

(b) Results of acceleration z axis

Figure 3.11 Acceleration of the crank

(★ : RecurDyn, ○ : House code)



(a) Results of Angular velocity

(b) Results of Angular acceleration

x axis

x axis

Figure 3.12 Angular velocity and acceleration of the crank

(★ : RecurDyn, ○ : House code)

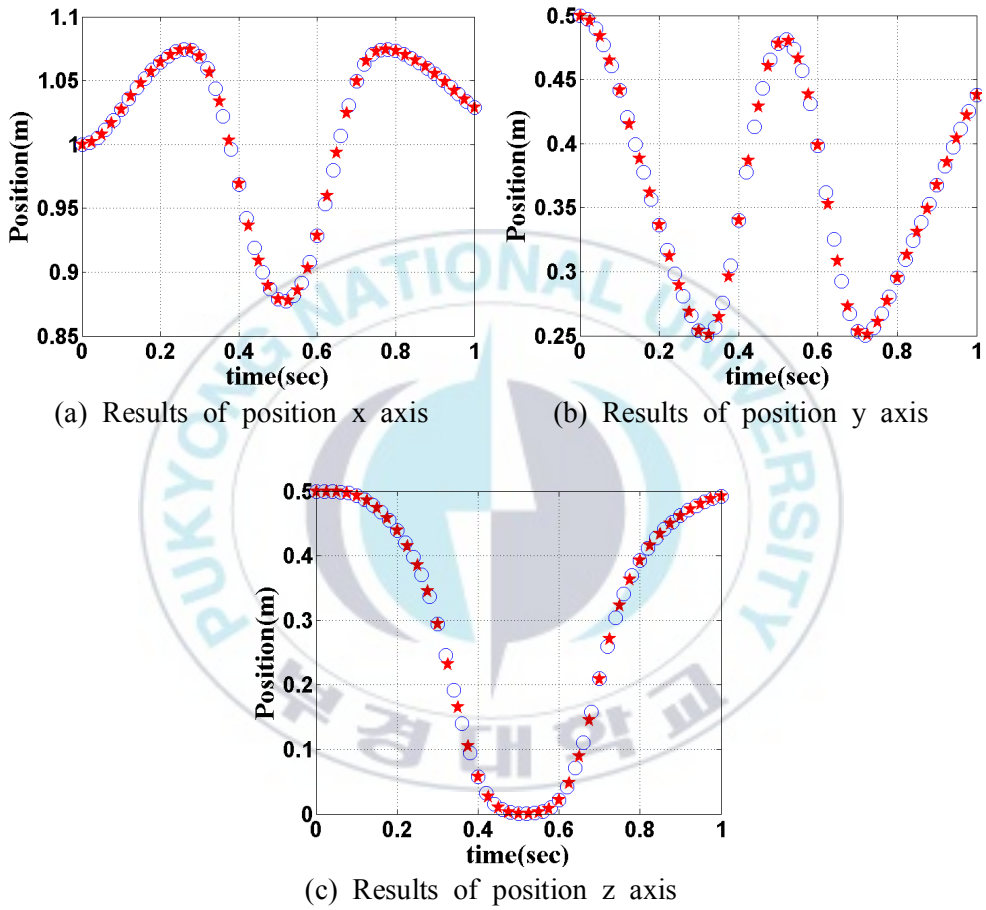


Figure 3.13 Position of the rod (★ : RecurDyn, ○ : House code)

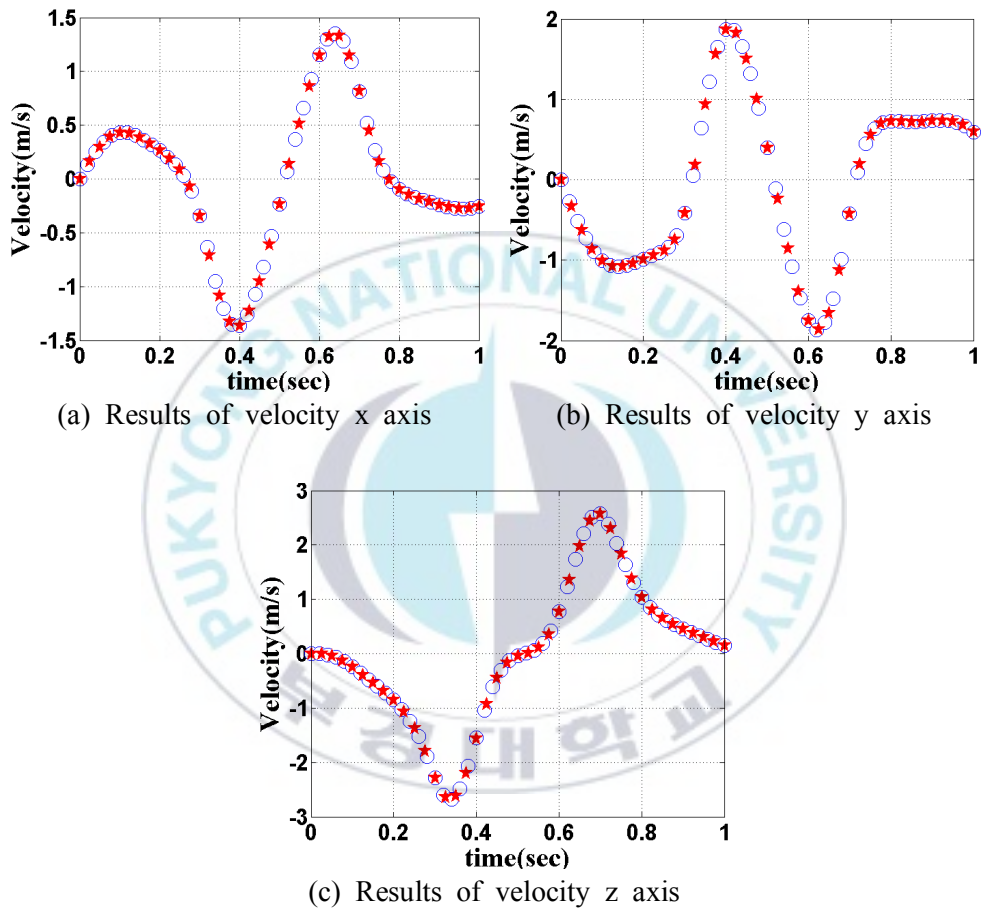
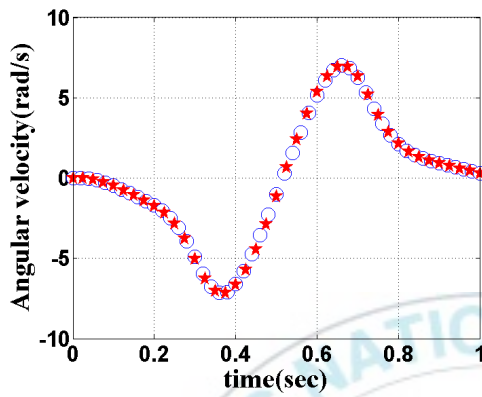
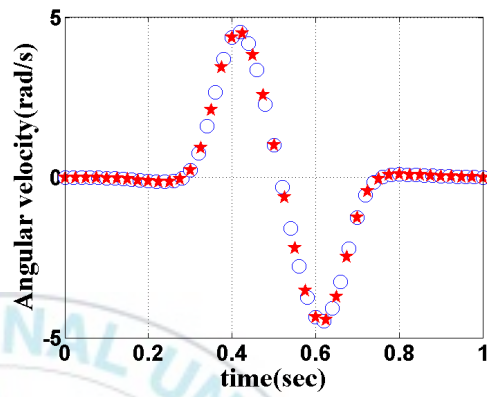


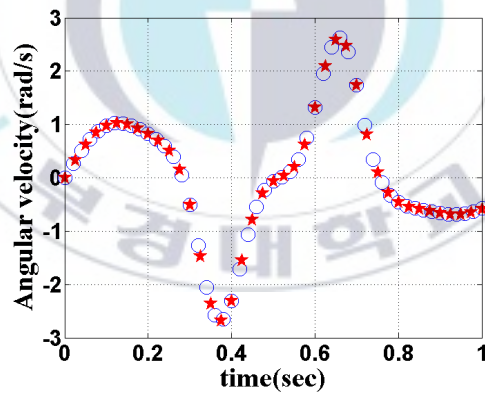
Figure 3.14 Velocity of the rod (★ : RecurDyn, ○ : House code)



(a) Results of angular velocity
x axis



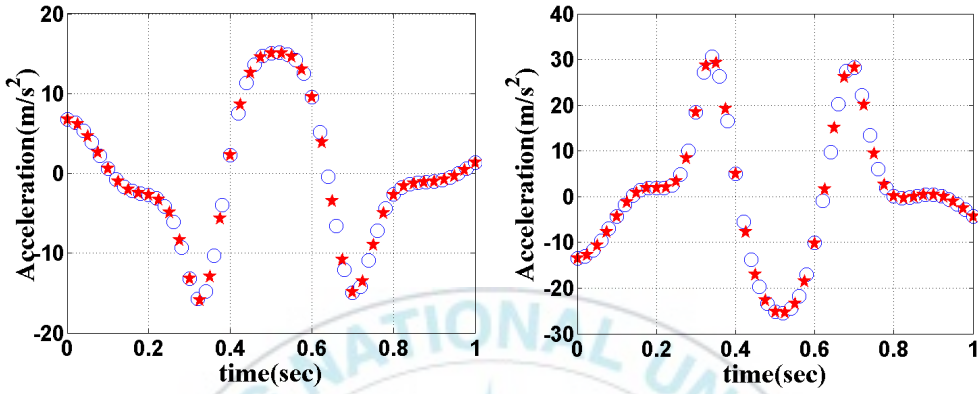
(b) Results of angular velocity
y axis



(c) Results of angular velocity z axis

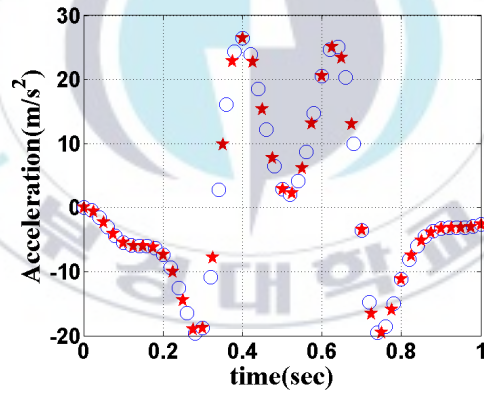
Figure 3.15 Angular velocity of the rod

(★ : RecurDyn, ○ : House code)



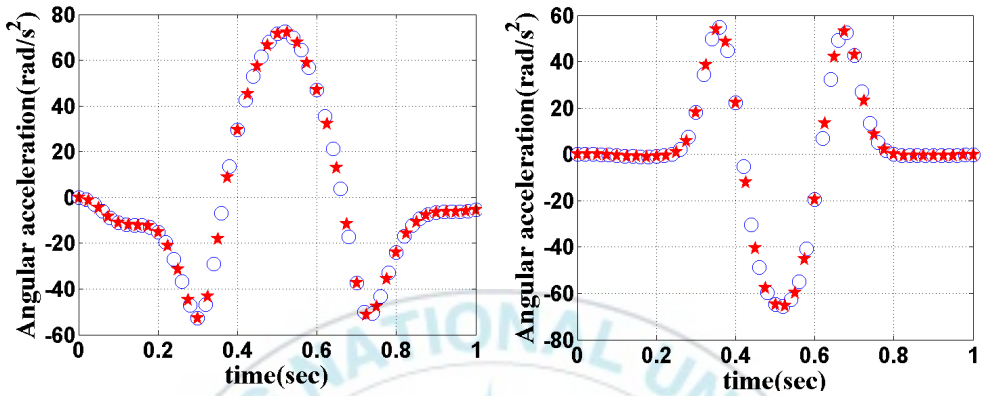
(a) Results of acceleration x axis

(b) Results of acceleration y axis



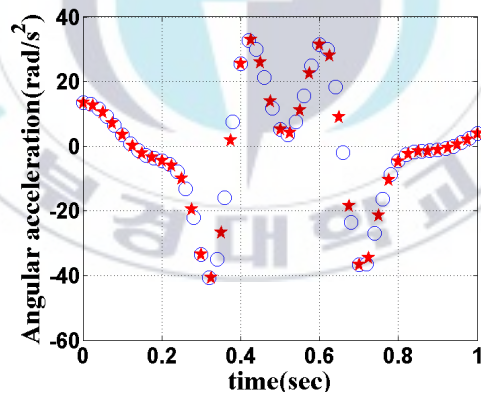
(c) Results of acceleration z axis

Figure 3.16 Acceleration of the rod (★ : RecurDyn, ○ : House code)



(a) Results of angular acceleration
x axis

(b) Results of angular acceleration
y axis



(c) Results of angular acceleration z axis

Figure 3.17 Angular acceleration of the rod

(★ : RecurDyn, ○ : House code)

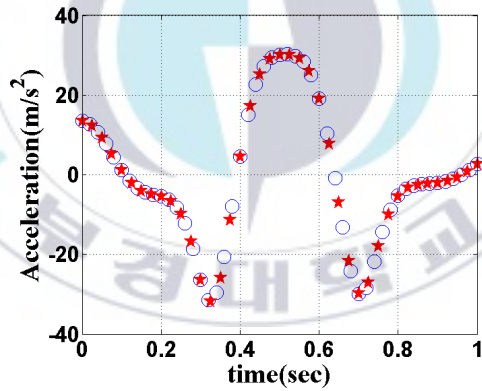
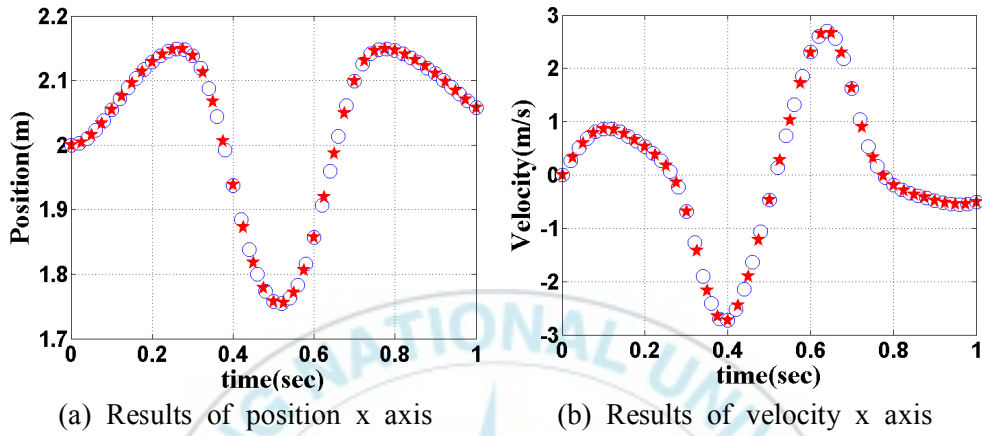


Figure 3.18 Motion of the slider in the x-direction

(★ : RecurDyn, ○ : House code)

4. ISPH와 MBD 연성해석 프로그램

본 연구에서는 다물체동역학과 입자완화유체동역학의 연성 해석 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램명은 FAMCAP(Fluid and Multibody Coupled Analysis Program)으로 2014년에 개발을 시작하여 비압축성 입자완화유체동역학 해석 솔버 개발을 시작으로 다물체동역학 해석솔버가 후에 추가되었다. 입자완화유체동역학을 이용한 대량 유체 입자의 거동 계산은 많은 시간을 필요로 하므로, FAMCAP에서는 해석시간 단축을 위해 GPGPU기반의 병렬 컴퓨팅 기법이 적용되었다. Figure 4.1에 FAMCAP의 연성해석 솔버의 전체 계산 순서도를 나타내었다. 연성해석 과정은 먼저 ISPH 방법을 이용한 유체의 거동을 계산하고 부유체의 작용하는 유체력을 계산한다. ISPH 계산이 완료된 후에 계산된 유체력은 부유체에 외력으로 작용하게 되어 다물체동역학 문제를 계산한다. 다물체동역학 해석이 끝나고 유체력과 구속관계식에 의해 결정된 부유체의 위치와 속도를 이용하여 부유체를 구성하는 개별 입자들의 위치와 속도를 계산하고 다시 ISPH 해석을 반복한다.

다음 4.1절부터 4.5절을 통해 연성해석을 위한 유체와 부유체의 상호작용을 위해 적용된 수치적인 방법과 파랑을 재현하기 위한 수치 조파기 모델을 설명하고, 유체의 거동 및 유체와 부유체의 상호작용을 검증하기 위한 실험 수행 내용과 해석 결과와의 비교를 통한 FAMCAP의 신뢰성을 평가한다.

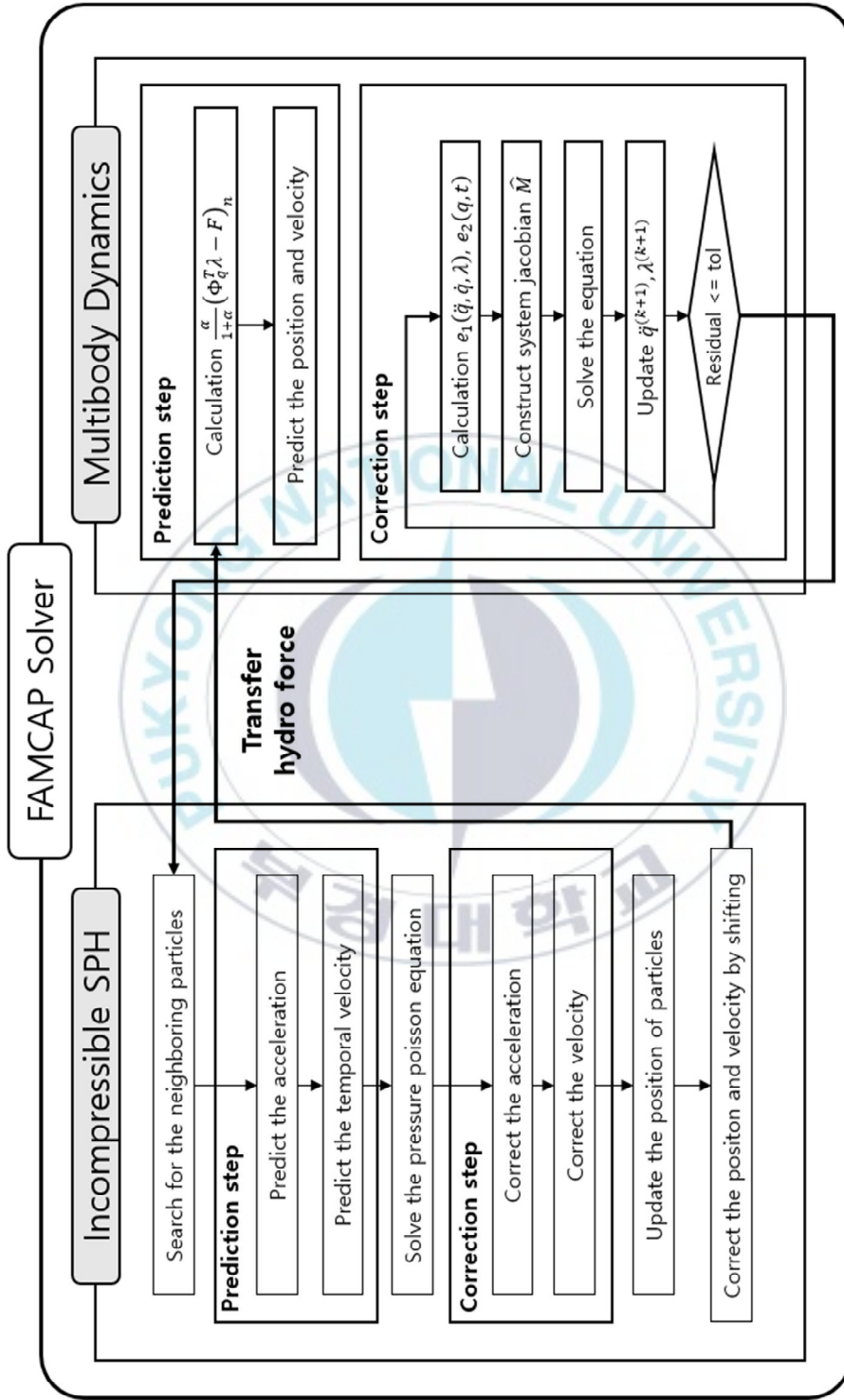


Figure 4.1 Flow chart of the coupled analysis program

4.1. 유체와 부유체의 상호작용

입자완화유체동역학과 다물체동역학간의 연성해석을 위해 유체와 부유체간의 상호작용 정의가 필요하다. 비압축성 입자완화유체동역학에서 부유체와의 상호작용을 위해 Koshizuka와 2명[41]이 제안한 방법을 가속도 레벨에서 계산하여 부유체에 외력으로 적용하였다. 부유체의 형상은 유체 입자 구성과 같은 입자간격을 가지고 입자들로 표현한다. 부유체를 구성하는 각 입자들은 부유체의 질량중심에 대해 식(4.1)와 같이 부유체 질량 중심에서의 상대거리로 형상을 유지한다. Figure 4.2에 SPH에서 물체의 형상 정의 방법을 도식적으로 나타내었다.

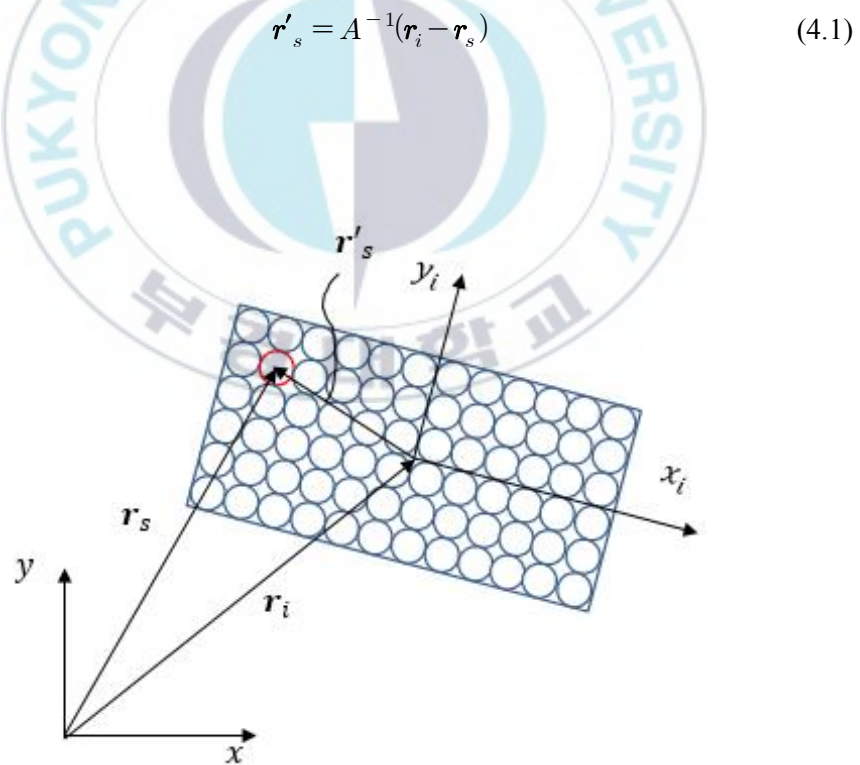


Figure 4.2 Definition of body in SPH

식(4.1)에서 $\mathbf{A}$ 는 부유체의 좌표 변환행렬이며 $\mathbf{r}_i$ 는 부유체의 질량중심 $\mathbf{r}_s$ 는 전역좌표계에서의 부유체를 구성하는 각 입자의 위치벡터이다. 부유체의 입자들은 비압축성 입자완화유체동역학 계산 알고리즘에서 예측단계와 수정단계까지의 계산과정에서 유체입자와 동일한 과정으로 계산된다. 부유체의 거동은 부유체 입자의 밀도와 유체입자의 밀도차이에 의해서 결정된다. 부유체는 수정단계 후에 유체입자와 다른 계산 과정으로 거동이 결정된다. Koshizuka가 제안한 방법에서는 부유체의 거동을 속도 레벨에서 결정하였는데 다물체시스템과의 연성해석을 위해서는 가속도 레벨에서 부유체에 외력으로 적용할 필요가 있기 때문에 적용하기에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 가속도레벨에서 부유체의 작용하는 외력을 정의하였으며, 유체가 부유체에 미치는 작용력과 회전력을 식(4.2)와 식(4.3)으로 계산된다.

$$\mathbf{F}_f = m_{buoy} \sum_{i=0}^n \mathbf{a}_i = (\rho V)_{buoy} \sum_{i=0}^n \mathbf{a}_i \quad (4.2)$$

$$\mathbf{n}' = I \sum_{i=0}^n (\mathbf{r}'_s \times \mathbf{a}_i) \quad (4.3)$$

위 식에서 $\mathbf{F}_f$ 는 유체에 의해 물체가 받는 병진방향의 힘이고, m_{buoy} 은 부유체 고유 물성치인 밀도와 부유체 형상의 부피로 계산되는 물체의 질량이다. $\mathbf{a}_i$ 는 부유체 입자 i 의 가속도이다. I 는 부유체의 관성모멘트를 의미한다. 식(4.2)에서 계산되는 유체력은 단위 시간마다 물체가 받을 수 있는 최대 힘을 의미한다. 따라서 같은 밀도를 가지는 물체의 부피차이에 의한 부력의 표현이 가능하며, 결과적으로 유체 위에 있는 물체가 받는

힘은 식(4.4)와 같이 물체가 받을 수 있는 최대 힘과 자중에 의한 힘의 합으로 결정된다.

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{F}_f + m_b \mathbf{g} = (\rho V)_{buoy} \sum_{i=0}^n \mathbf{a}_i + m_b \mathbf{g} \quad (4.4)$$

위 식에서 m_b 는 실제 적용되는 물체의 질량을 의미한다. 질량비에 따른 물체의 운동을 알아보기 위해서 부유물의 부피가 $0.01(m^3)$, 밀도는 $1000(kg/m^3)$, 질량은 $10(kg)$ 인 조건에서 질량 m_b 를 달리하며 시뮬레이션 하였다. 수조안에 유체의 수심은 $0.5(m)$ 이고 부유체는 초기에 수면에서 $0.25(m)$ 잠긴 상태에서 물체의 운동을 계산하였다. Figure 4.3과 Figure 4.4에서 질량비에 따른 물체의 수직 위치 및 속도를 확인할 수 있으며, 질량비가 작아질수록 물체가 받는 부력이 커져 더 빠르게 수면위로 상승하는 것을 볼 수 있으며, 질량비가 1일 때는 물체가 유체와 같은 밀도를 가지기 때문에 물체가 받는 유체력과 물체의 자중에 의한 힘의 합이 거의 0에 가까워 물체가 처음 잠긴 깊이를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다.

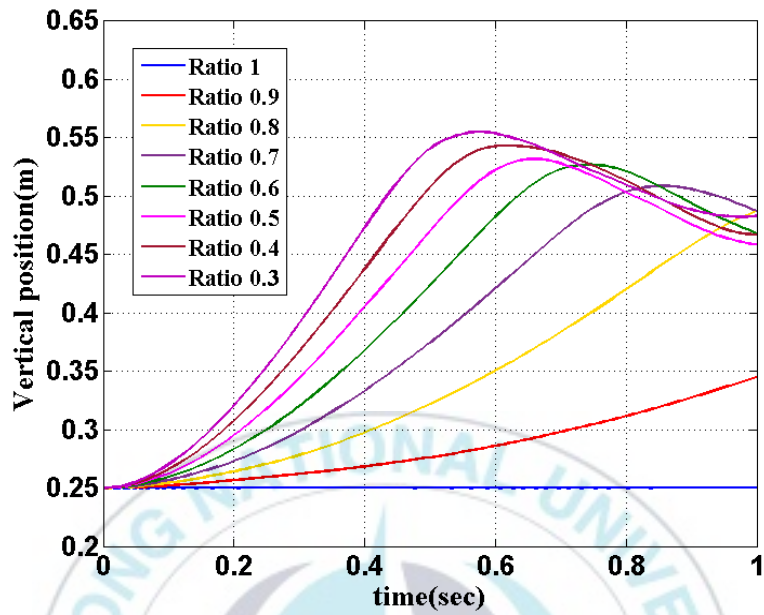


Figure 4.3 Vertical position of the body according to the ratio

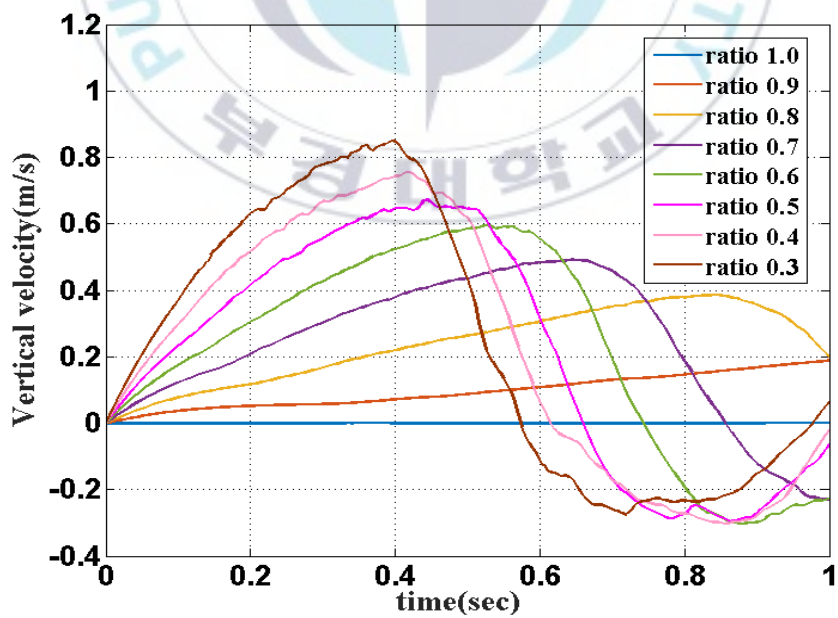


Figure 4.4 Vertical velocity of the body according to the ratio

4.2. 조파기 및 소파기 모델

파랑을 재현하기 위해서는 파를 생성하는 매개체인 조파기와 반대편 경계에서의 반사파를 없애기 위한 소파기가 필요하다. FAMCAP에 적용된 조파기는 피스톤 타입의 조파기로 선형 조파기 이론[42]을 바탕으로 하고 있다. Figure 4.5은 조파기에 의해서 생성되는 파랑을 보여주는데, 여기서 H 는 파고, d 는 수심, L 은 파장 그리고 c 는 파랑의 속도이다. 시간에 대한 조파기의 위치와 속도는 다음과 같이 결정된다.

$$r_{paddle} = \frac{S}{2}(\sin(w(t - t_0) + 1.5\pi) + 1) \quad (4.5)$$

$$v_{paddle} = \frac{S}{2}w\cos(w(t - t_0) + 1.5\pi) \quad (4.6)$$

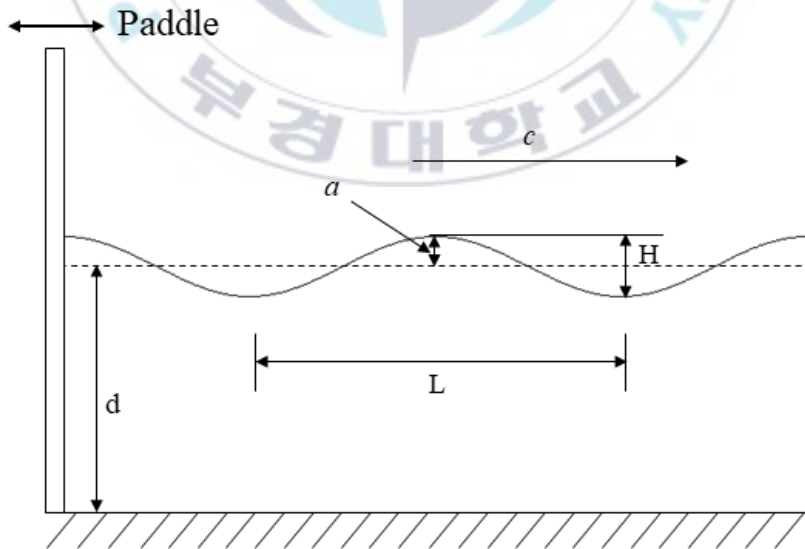


Figure 4.5 Wave shape generated by the paddle

위 식에서 S 는 조파기의 스트로크, w 는 주파수이다. 스트로크 S 는 구현하고자 하는 파고 H 와 다음과 같은 관계를 가진다. t_0 는 조파기가 움직이기 시작하는 시간이며, 조파기의 속도는 위치식에 대한 시간 미분 식으로 계산된다. Figure 4.6는 스트로크 1(m), 주파수 2π 로 조파기의 위치와 속도이다.

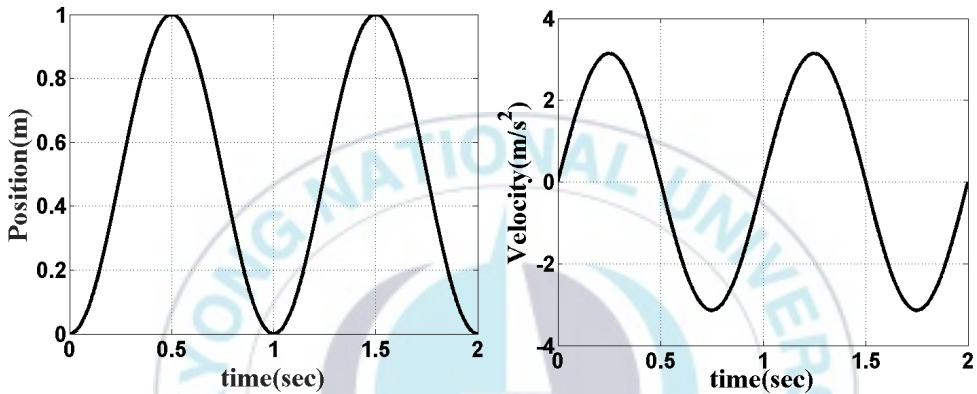


Figure 4.6 Motion of wave maker at 1(m) stroke and 2π frequency

$$\frac{H}{S} = \frac{2(\cosh 2kd - 1)}{\sinh 2kd + 2kd} \quad (4.7)$$

k 는 파수로 식(4.8)과 같이 계산된다.

$$k = 2\pi/L \quad (4.8)$$

조파기 주파수 w 는 아래와 같이 계산된다.

$$w = \sqrt{gk \cdot \tanh(kd)} \quad (4.8)$$

조파기 반대방향 경계에서 파랑의 반사파를 상쇄시키기 위해서 식(4.10)과 같이 특정 구간 x_0 에서 파랑의 속도가 지수적으로 감소하도록 하였다.

$$U = U_0 f(x) = U_0 (1 - e^{(-\alpha(\delta x_0 - (x - x_0)))}) \quad (4.10)$$

위 식에서 α 는 감쇠정도를 결정하는 계수로 일반적으로 2.0의 값을 사용한다. δx_0 는 감쇠영역의 길이를 x_0 는 감쇠가 발생하는 시작 위치를 의미한다. Figure 4.7은 α 값에 따른 속도 U 가 감소하는 정도를 보여주며 α 값이 커질수록 오른쪽 끝에서 급격하게 속도가 감소한다.

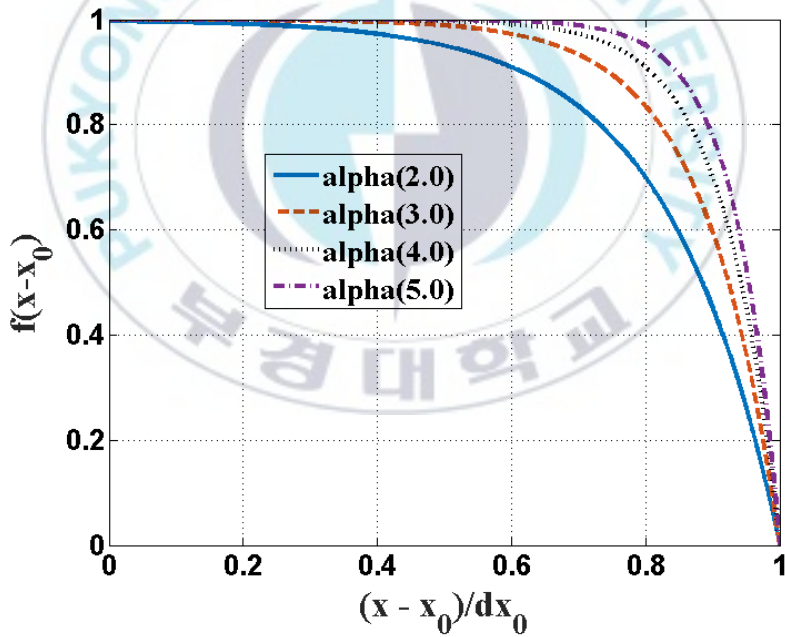


Figure 4.7 Profile of exponential damping function according to the α

4.3. 파랑 계측 실험

4.3.1. 실험 장치 구성

개발 프로그램을 이용한 조파 시뮬레이션으로 구현된 파랑의 거동 및 파랑에 의한 부유체의 거동을 비교 검증하기 위해서 실험을 수행하였다. 실험을 위한 조파장치는 부경대학교 해양수리실험소에 설치된 단면조파수조를 활용하였으며, 실험 수조의 규격은 Figure 4.8과 같다.

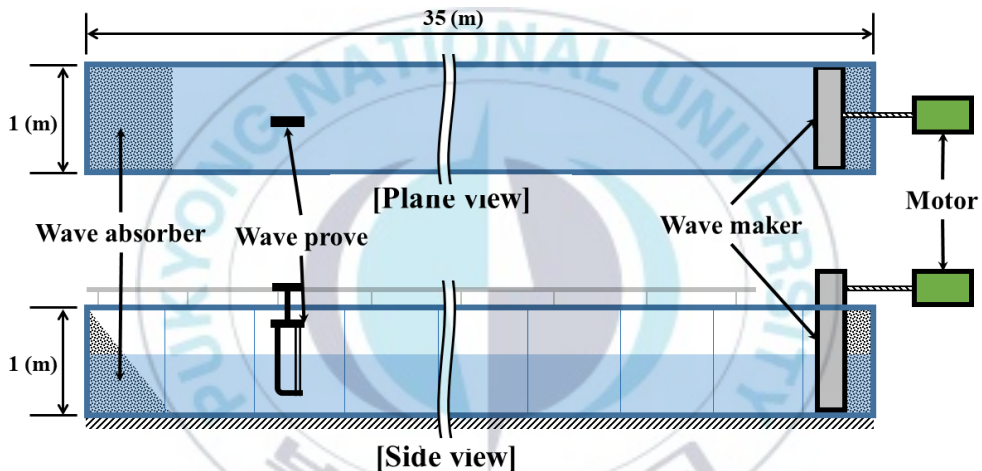


Figure 4.8 Schematic diagram of wave tank for experiment

해당 조파수조는 피스톤 형식(piston type)의 조파기에 의해서 파를 생성한다. 직접적으로 파랑을 발생시키는 조파판은 볼 스크류(ball screw)와 서보 모터(servo motor)로 연결되어 사용자가 입력한 진폭과 주파수로 움직인다. 해당 조파 실험 장치는 규칙파 뿐만 아니라 불규칙파도 생성이 가능하며, 최대 0.7m의 수심과 최대 0.3m의 파고 그리고 0.3 ~ 3.0초의 주기를 가지는 파랑 재현이 가능하다. 조파기의 반대편에는 소파장치가 설치되어 있는데 금속 재질의 용수철들을 배치한 경사형의 형태를 가지고 있다. 파랑의 파고측정을 위해서 KENEK사의 용량식 파고계 CH-401A를 사

용하였으며, 측정범위는 0.5m 이내로 전체 용량의 약 0.5%의 오차를 가진다.

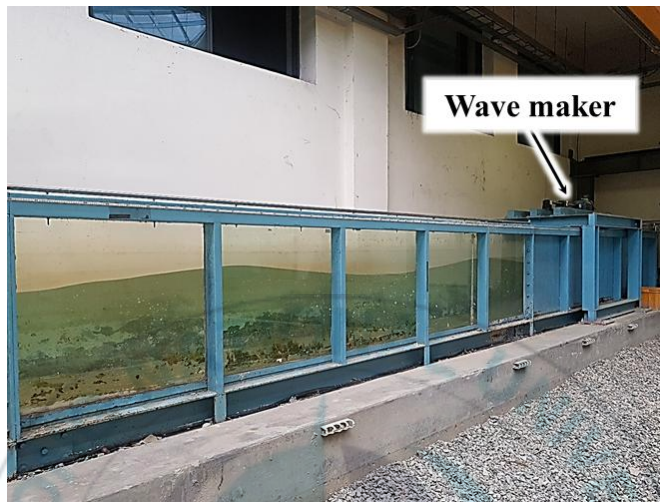


Figure 4.9 Wave generated by wave maker

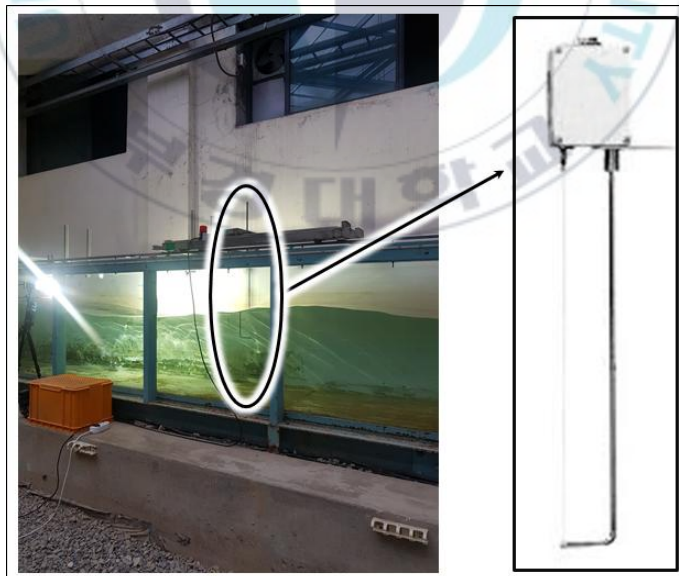


Figure 4.10 Capacitance type wave height amplifier

과랑에 의한 부유체의 운동을 측정하기 위해서 고속카메라를 사용하였다. 사용된 고속 카메라는 SYNCLOAN사의 VC-3MC-M280으로 최대 2000 fps(frame per second)까지 측정이 가능하다. 본 실험에서는 1600×800 의 해상도에서 100 fps로 촬영하였다. 고속카메라를 이용한 영상분석은 고정된 2개의 트래킹 포인트(tracking point)와 사이의 실제 거리를 이용하여 픽셀(pixel)을 mm 단위로 스케일링(scaling)하는 방식이다. 따라서 동영상의 매 프레임마다 움직이는 트래킹 포인트는 상대위치 데이터로 변환된다. 물체의 위치뿐만 아니라 뒷 자세 데이터를 획득하기 위해 Quadrant symmetry marker를 사용하였다. Figure 4.11는 TEMA 프로그램을 이용한 영상분석의 예를 보여준다.

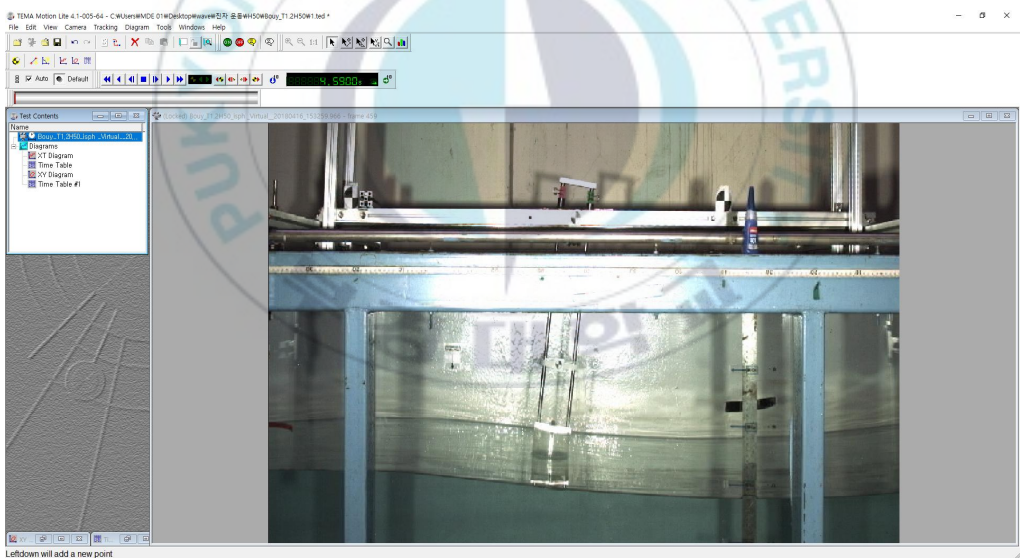


Figure 4.11 Example of scene analysis using TEMA program

4.3.2. 조파기 운동 계측 및 모델링

개발 프로그램의 조파 시뮬레이션으로 인한 파랑의 거동을 비교 검증하기 위해서 실험과 동일한 조파기 모델링이 필요하다. 수치 조파기를 모델링하기 위해서는 시간에 따른 조파기 운동 데이터가 필요하며, 본 연구에서는 단면조파수조에 사용되는 조파기의 좌우 운동을 고속카메라를 이용하여 측정하였다. Figure 4.12는 조파기의 운동을 측정하기 위해 사용된 추적점의 위치를 보여준다. 총 세 개의 추적점을 사용하였으며, 좌우측 두 개의 추적점은 참조점(reference point)로 사용되며 실제 조파기의 운동은 가운데 추적점에 의해서 계측된다. 측정된 조파기의 좌우 운동 데이터는 수치 조파기의 운동 데이터로 활용된다. 조파기의 운동 데이터 계측 시간 간격과 조파 시뮬레이션 해석 시간 간격은 서로 상이하기 때문에 시간에 따른 운동 데이터를 고려하기 어려운 문제점으로 인해 본 연구에서는 부유체의 운동을 식(4.11)과 같이 사인 곡선(sine curve) 형태로 변환하여 적용하였다. 파랑의 파고 조건은 실험에 사용된 단면조파수조의 사양과 파고가 사용된 부유체의 높이 100(mm)를 초과하지 않는 범위내에서 선정하였으며, 파랑의 주기는 부유체가 조파기로부터 6(m) 거리에 위치하고 있기 때문에 안정된 파랑이 부유체에 전달될 수 있도록 파장이 부유체가 조파기로부터 떨어진 길이의 절반이 넘지 않는 범위의 주기를 사용하였다. 조파기의 운동 계측은 파고 50(mm), 80(mm), 100(mm)의 총 세 개 파고와 각 파고에 대해 주기 1.0, 1.2, 1.4의 파랑을 생성하는 조건에 대해서 수행되었다.

$$A\sin(wt) \quad (4.11)$$

위 식에서 A 는 조파기의 진폭을 w 는 주파수를 나타낸다. Table 4.1에

3.9가지 조건에 대한 조파기의 진폭과 주파수 데이터를 나타내었다. Figure 4.13에서 Figure 4.21까지 9가지 조건에 대해서 고속카메라를 통한 계측 데이터와 식(4.11)의 사인 함수 데이터를 나타내었으며, 보간된 데이터가 계측 데이터의 진폭과 주기를 잘 표현하는 것을 확인할 수 있다. 단면수조 장치의 조파기는 진폭이 점점 증가하다가 일정시간 이후로 일정한 주기와 진폭으로 거동하는 반면에 수치 조파기는 처음부터 일정한 진폭과 주기로 거동하도록 적용하였다.

Table 4.1 Amplitude and frequency of a wave maker

Wave height (mm)	Period(s)					
	1.0		1.2		1.4	
	Amp.(m)	Freq.(s ⁻¹)	Amp.(m)	Freq.(s ⁻¹)	Amp.(m)	Freq.(s ⁻¹)
50	0.0162	6.282	0.0192	5.341	0.0239	4.565
80	0.0254	6.390	0.0310	5.353	0.0374	4.574
100	0.0311	6.472	0.0366	5.404	0.0374	4.571

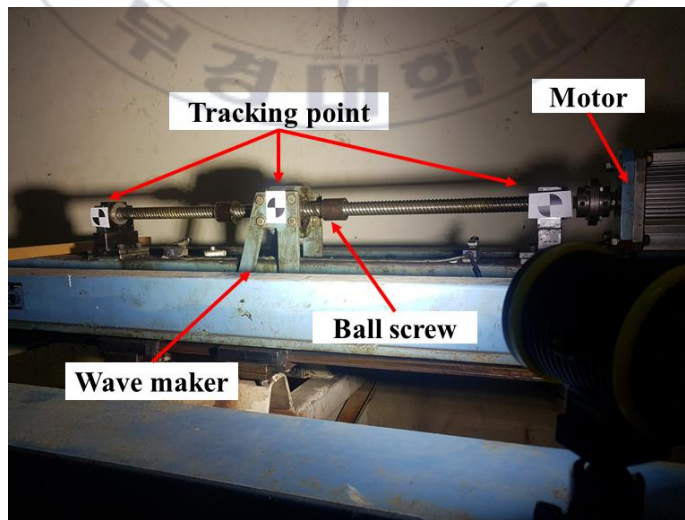


Figure 4.12 Tracking points for the wave maker behavior measurement

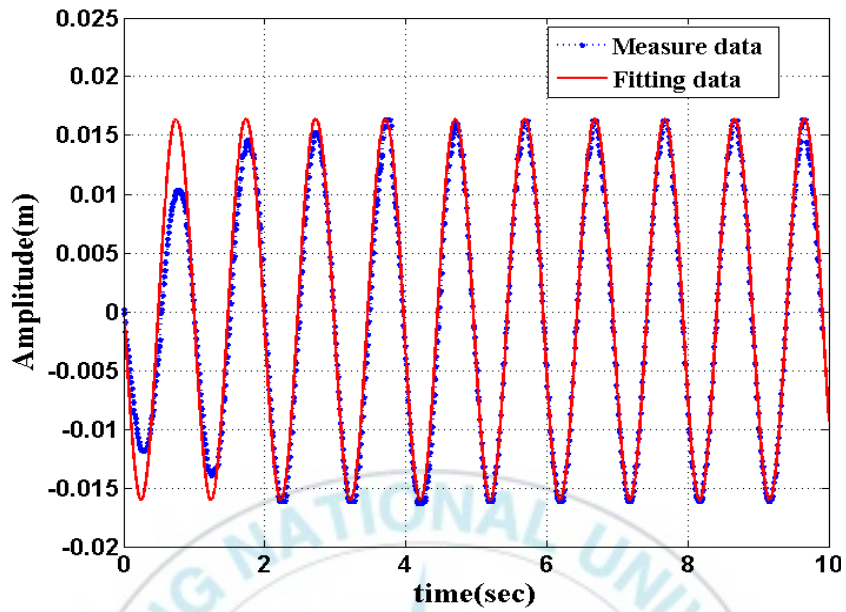


Figure 4.13 Motion of wave maker at 1.0(s) and 50(mm)

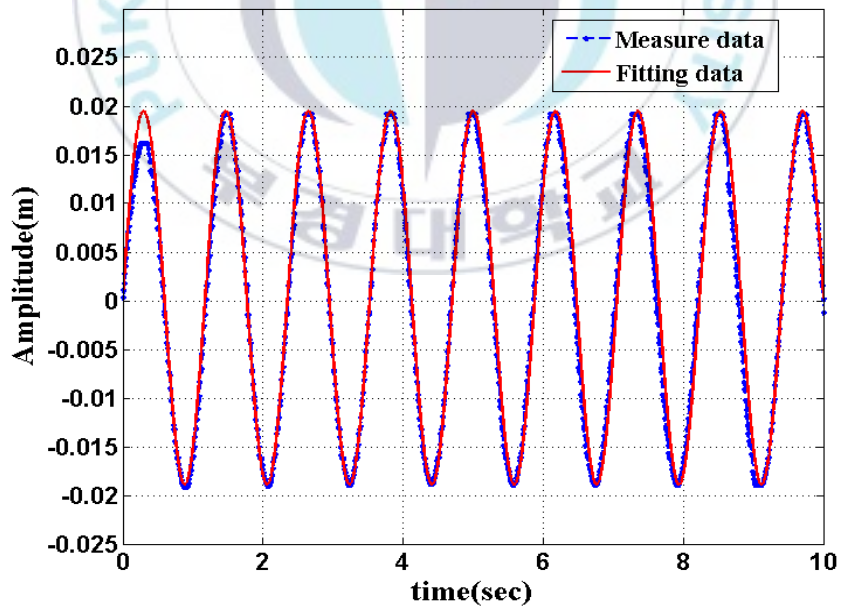


Figure 4.14 Motion of wave maker at 1.2(s) and 50(mm)

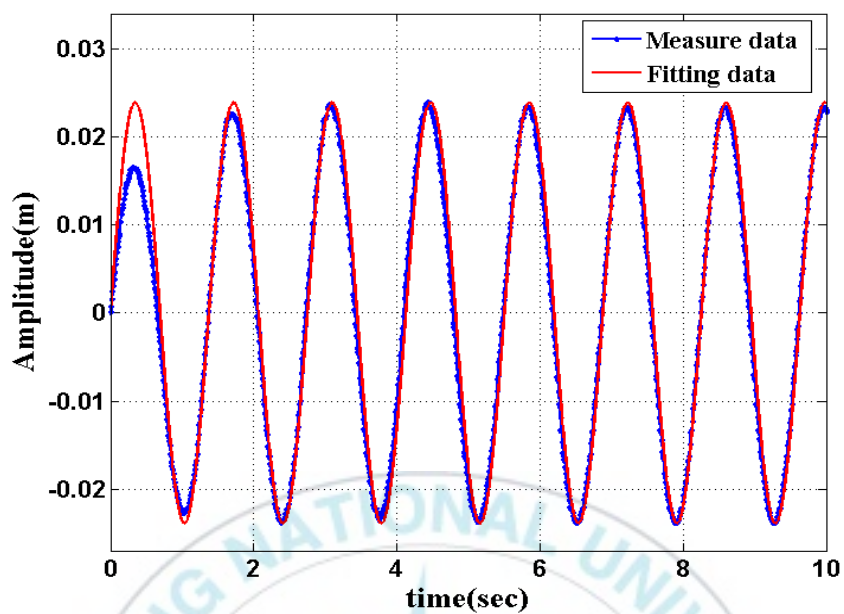


Figure 4.15 Motion of wave maker at 1.4(s) and 50(mm)

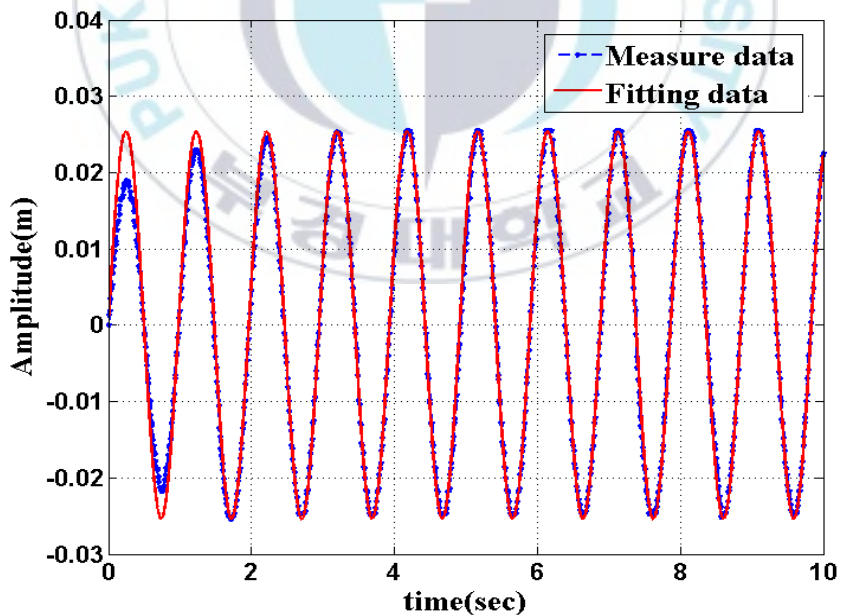


Figure 4.16 Motion of wave maker at 1.0(s) and 80(mm)

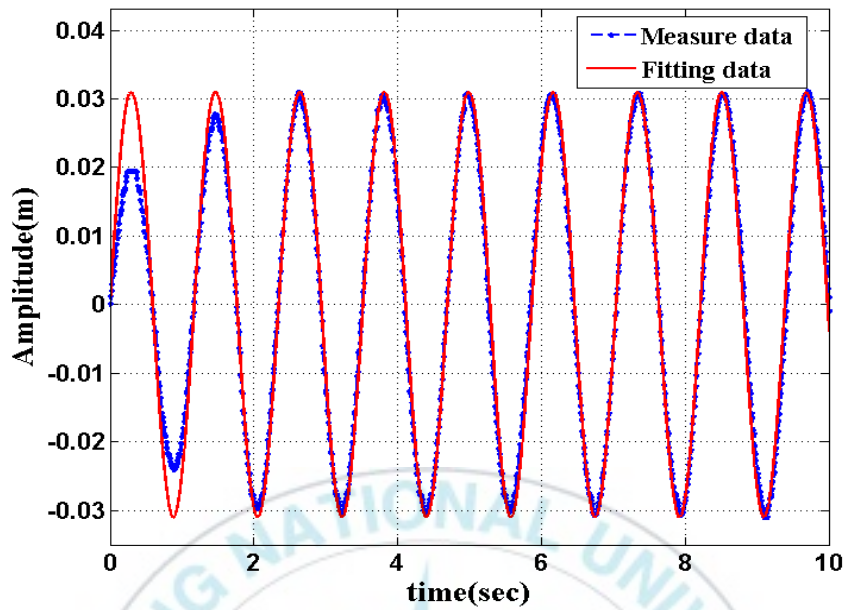


Figure 4.17 Motion of wave maker at 1.2(s) and 80(mm)

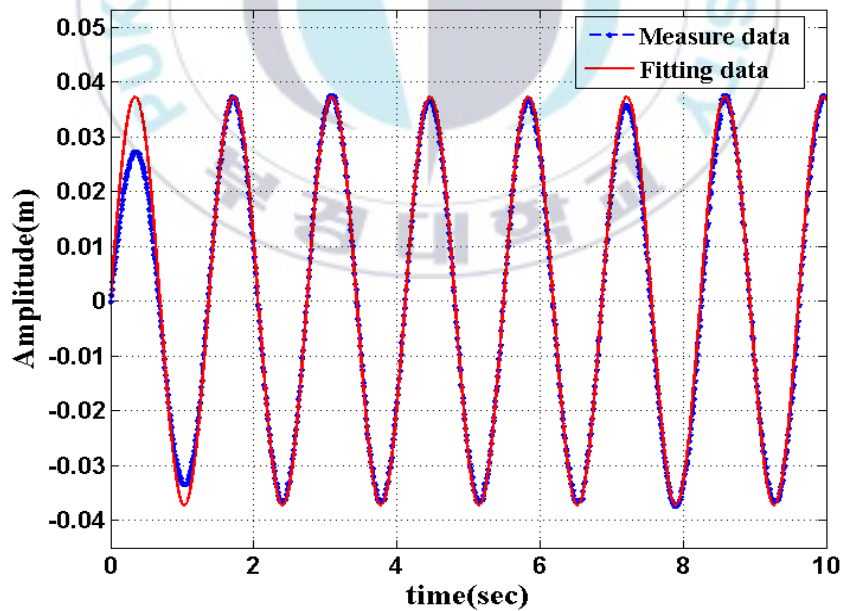


Figure 4.18 Motion of wave maker at 1.4(s) and 80(mm)

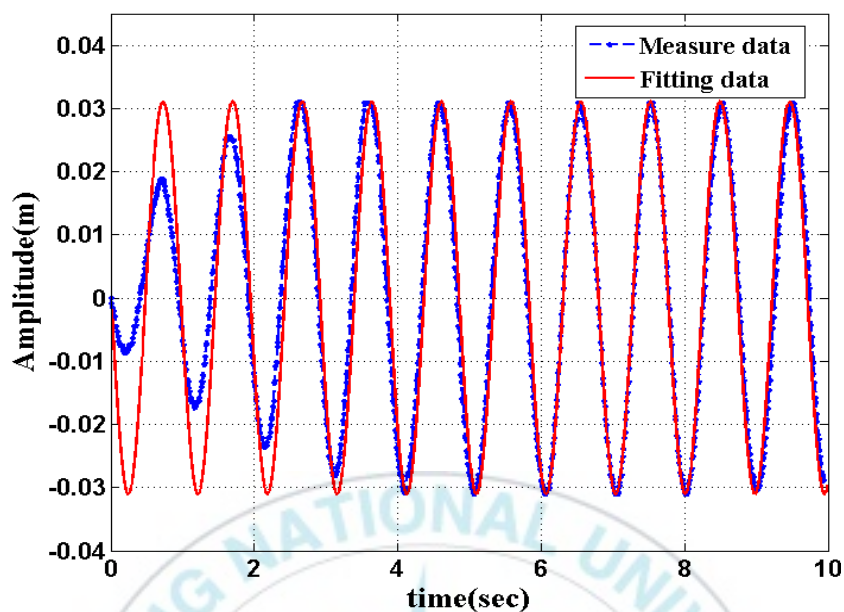


Figure 4.19 Motion of wave maker at 1.0(s) and 100(mm)

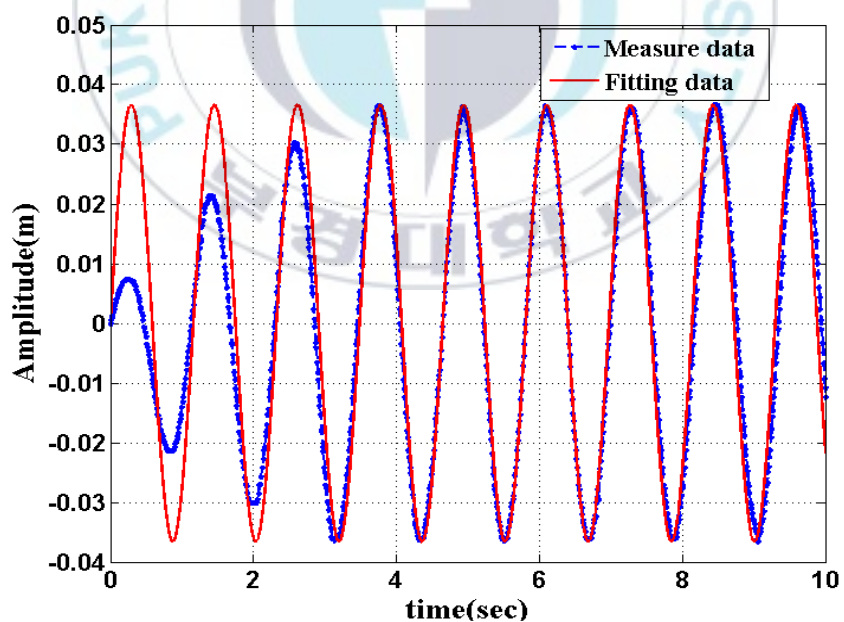


Figure 4.20 Motion of wave maker at 1.2(s) and 100(mm)

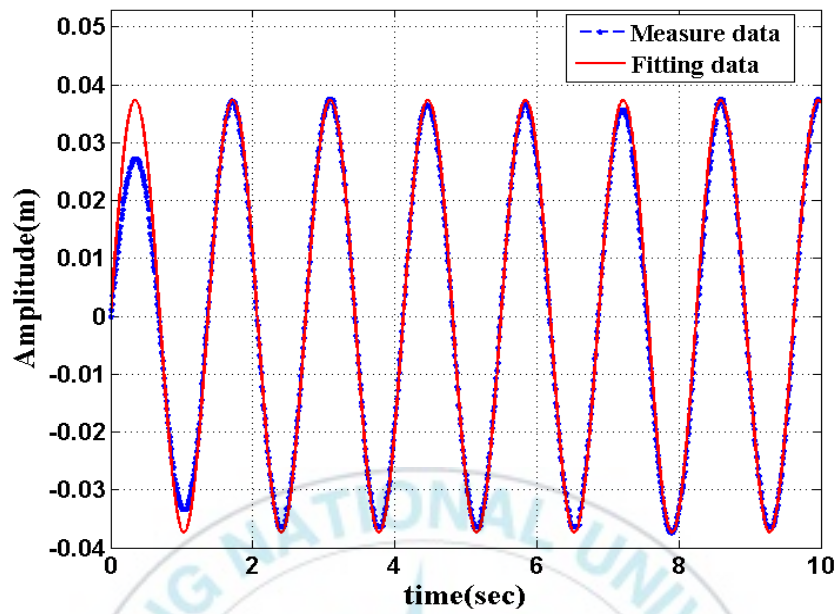


Figure 4.21 Motion of wave maker at 1.4(s) and 100(mm)

4.3.3. 파고 계측

총 9가지 조건으로 파랑의 파고를 측정하였다. 파랑의 파고는 조파기 위치에서 6(m) 위치에서 측정하였으며, 측정된 파고 데이터는 개발 프로그램을 이용한 조파 시뮬레이션으로 구현된 파랑을 검증하기 위해 활용하였다. Table 4.2에서 조파기가 움직이기 시작한 시간에서 10초가 경과한 시간부터 10초간 파고계로부터 측정된 데이터의 평균 파고를 나타내었다. 설정한 파랑 조건에 대해서 측정된 파고는 재현하고자 하는 조건에 대해서 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실험에 사용된 조파수조에 원하는 파고와 주기의 파랑을 재현하기 위해 조파기의 운동을 변경하면서 최대한 유사한 파고를 나타내는 조파기의 운동을 결정할 수 밖에 없기 때문에 발생하는 차이이다. 파랑의 주기는 거의 같은 결과를 보여주고 있으며, 주기에 따른 파고 50mm의 계측 데이터는 Figure 4.22, Figure 4.23 그리고 Figure 4.24에서 확인할 수 있으며, 파랑의 주기가 설정한 조건과 일치함을 확인하였다.

Table 4.2 Experimental results according to the wave conditions

Case	Wave condition		Avg. wave height (mm)
	Wave height (mm)	Period(s)	
1	50	1.0	51.97
2	50	1.2	52.58
3	50	1.4	51.08
4	80	1.0	83.03
5	80	1.2	84.78
6	80	1.4	80.61
7	100	1.0	100.51
8	100	1.2	101.41
9	100	1.4	99.88

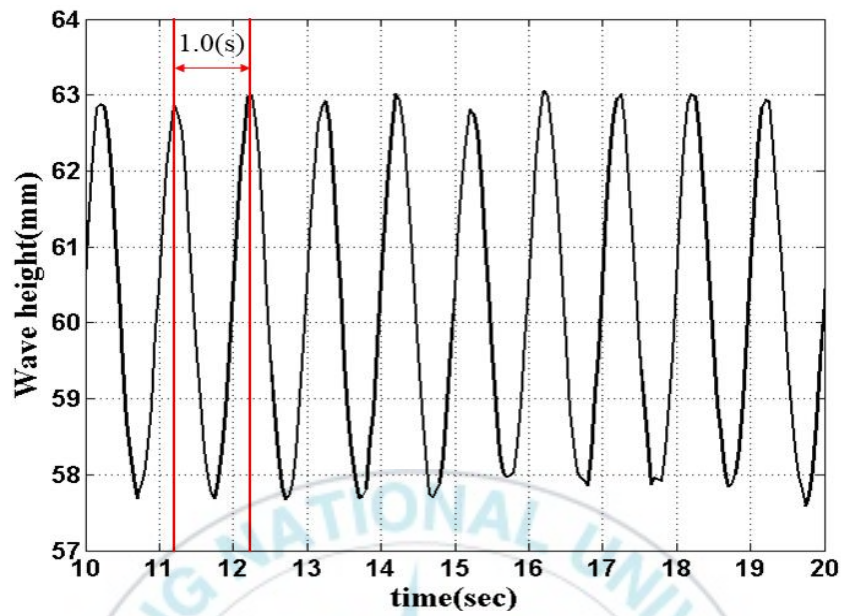


Figure 4.22 Wave height at 1.0(s) and 50(mm)

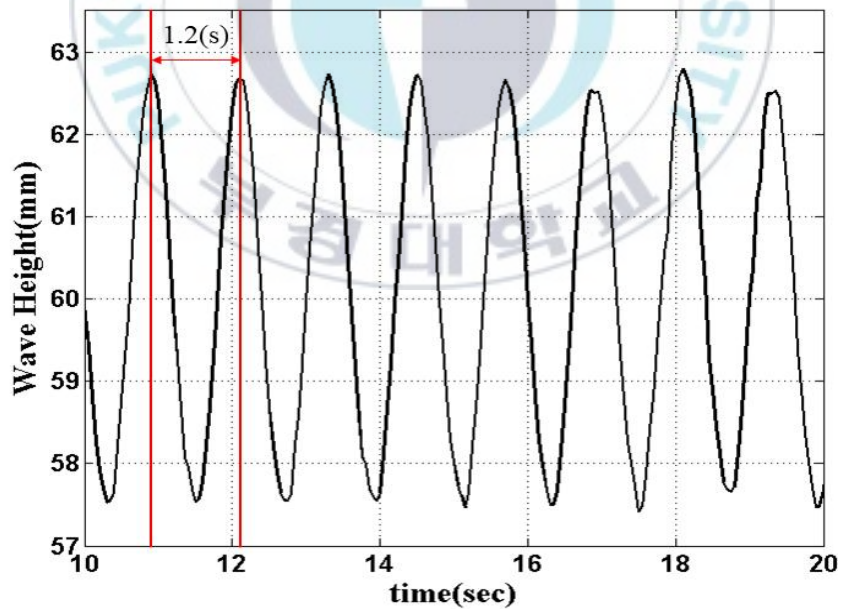


Figure 4.23 Wave height at 1.2(s) and 50(mm)

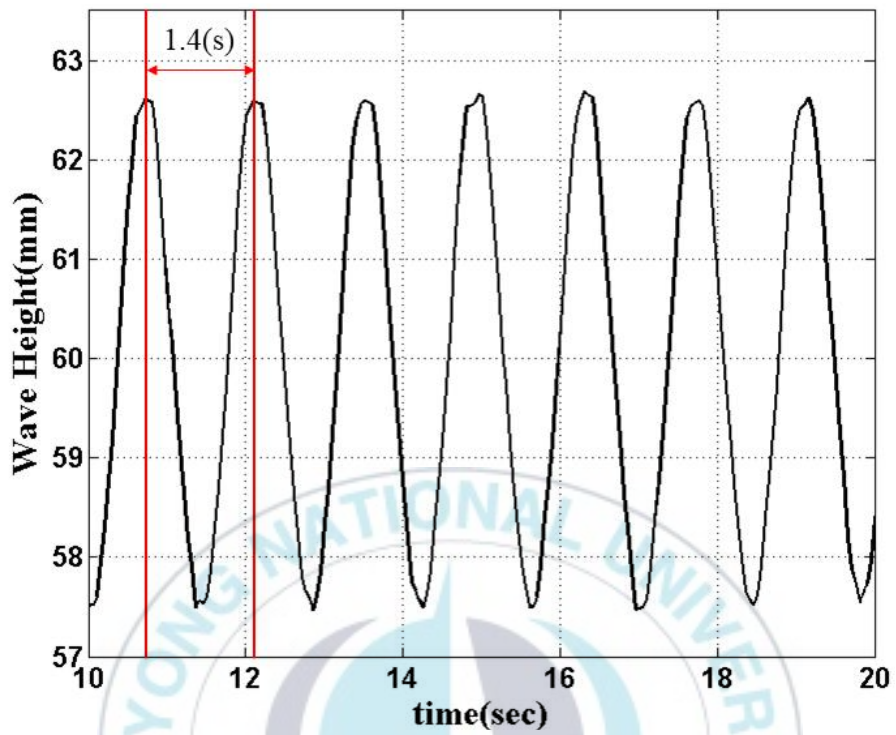


Figure 4.24 Wave height at 1.4(s) and 50(mm)

4.4. 부유체 운동 계측 실험

4.4.1. 부유체 및 구속 장치

파랑에 의한 부유체 거동 계측 실험을 위해 아크릴 재질의 두께 5mm의 원기둥 형상의 부유체를 사용하였다. 사용된 부유체의 형상과 크기를 Figure 4.25에 나타내었으며, 상단에 두 개의 나사구멍을 통해 부유체를 브라켓(braket)과 결속 가능하도록 하였다. 파랑의 진행방향에 대한 부유체의 운동을 평가하기 위해서 부유체가 파랑에 의해 진자운동을 하도록 기구 장치를 구성하였다. 기구장치의 3차원 모델 및 주요 부분 명칭을 Figure 4.26에 나타내었다. Figure 4.27은 평면상에서 부유체 실험에 사용된 시험 장치 설치 환경 및 구성을 보여준다. 부유체를 고려한 실험에서 부유체의 운동과 조파기의 좌우 운동을 고속 카메라를 이용하여 측정하였다. 측정된 조파기의 운동은 개발 프로그램을 이용한 조파 시뮬레이션의 조파기 모델링을 위한 데이터로 활용된다.

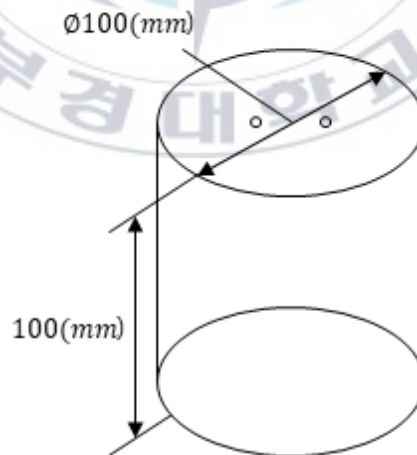


Figure 4.25 Dimension of a cylinder buoy

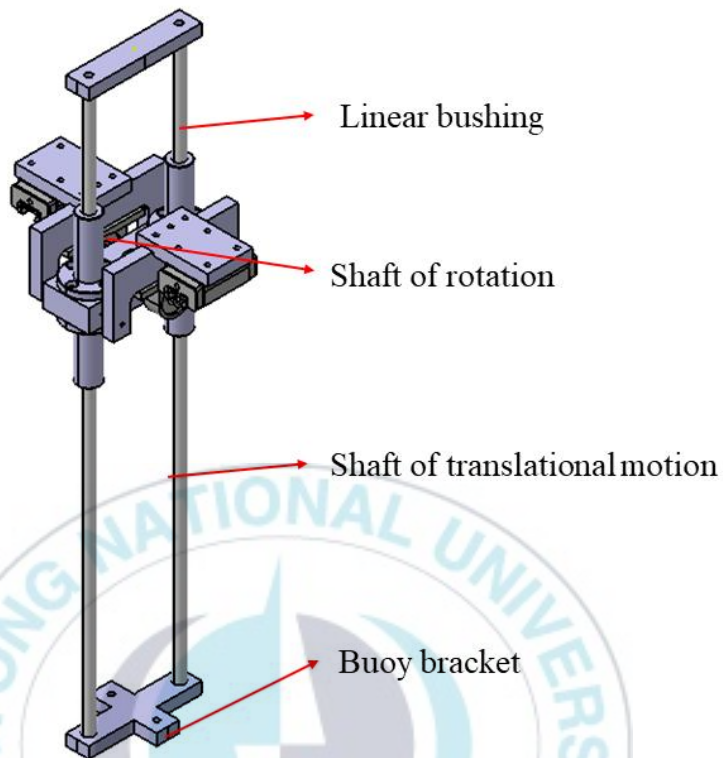


Figure 4.26 Equipment for pendulum motion

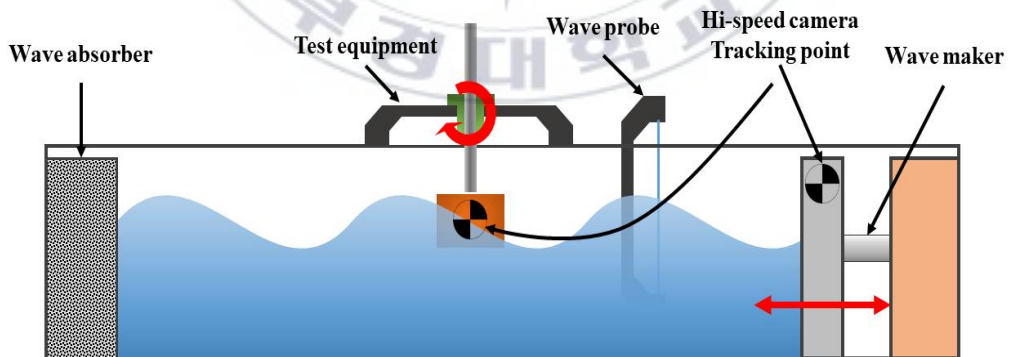


Figure 4.27 Schematic for the measurement of pendulum motion

4.4.2. 부유체 진자 운동 계측

Figure 4.27과 같이 조파기에 의해서 생성되는 파랑에 대해서 부유체의 진자운동을 고속카메라를 이용하여 계측하였다. 부유체는 유체에 잠겨 있기 때문에 부유체의 직접적인 거동을 계측하지 않고 샤프트에 추적점을 두어 계측하였다. 계측된 데이터는 TEMA 프로그램을 이용하여 회전 조인트 위치에서의 수직축에 대한 각도를 계산하였다. 파랑 조건에 따라 계산된 각도와 주기를 Table 4.3에 나타내었으며, 한 주기에 대해 부유체 운동의 진폭의 평균값을 degree 단위로 나타내었다. Table 4.3에서 파랑의 주기는 부유체의 거동에 큰 영향을 주지 않으며 운동 주기에만 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 그에 반해 파고의 크기는 부유체의 거동에 주는 영향이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 파랑 에너지가 파고의 제곱에 비례하기 때문에 파고에 의해 커진 에너지로 인해 파랑이 부유체를 강하게 밀어내면서 발생하는 차이로 확인된다.

Table 4.3 Measurement results of pendulum motion

Case	Wave condition		Measurement result	
	Wave height(mm)	Period(s)	Amplitude(degree)	Period(s)
1	50	1.0	4.5759	1.0
2	50	1.2	5.1603	1.2
3	50	1.4	5.2054	1.4
4	80	1.0	7.6152	1.0
5	80	1.2	7.6152	1.2

4.5. 해석 프로그램 검증

4.5.1. 파랑 재현 시뮬레이션 검증

5.2.1에서 설명한 조파기 수치 모델을 이용해서 파고 50, 80, 100(mm)에 대해서 각각 주기 1.0, 1.2, 1.4(s)의 파랑을 ISPH기법을 이용하여 재현하였다. 파랑 재현 시뮬레이션을 위해 18(m) 길이와 1(m) 높이의 조파 수조를 고려하였으며, 15(m)부근에서 파랑이 상쇄되도록 소파 모델을 적용하였다. 수심은 실험과 동일한 0.6(m)로 하였다. 앞서 설명한 시뮬레이션 모델을 Figure 4.28에 나타내었다.

유체와 경계입자들의 초기 입자 간격은 0.01(m)이며, 커널함수의 완화 길이 h 는 초기 입자 간격의 1.4배인 0.014(m)이며 5차 Wendland 커널 함수를 사용하였다. 파고는 실험과 동일하게 조파기로부터 6(m)에서 계산하였다. 시뮬레이션에서 파고는 6(m)부근에서의 자유수면 입자의 위치로 계산하였다. Figure 4.29 ~ Figure 4.37에는 각 조건에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과의 파고 데이터를 상호 비교한 결과를 나타내었다.

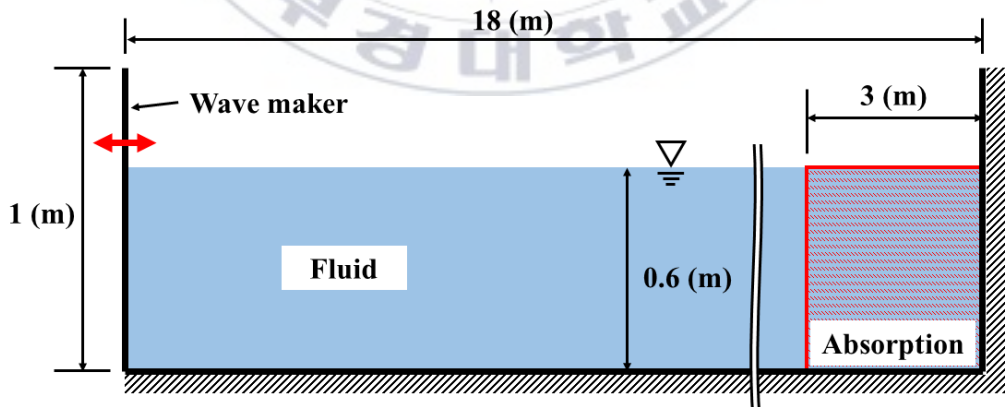


Figure 4.28 Wave simulation model

같은 조파기의 운동에 대해서 재현된 실험에 의한 파랑과 시뮬레이션에 의한 파랑이 파고와 주기에서 거의 일치하는 결과를 보였으며, 두 결과 모두 입력 파랑조건을 잘 표현하는 것을 알 수 있다. 각 조건에 대해서 시뮬레이션에 의한 파랑의 평균 파고와 Table 4.2에 나타낸 실험에 의한 평균 파고 결과와의 오차를 Table 4.4에 나타내었다. Case 6번에서 시뮬레이션으로 재현된 파랑이 실험 대비 약 5.7%의 오차로 다른 조건들에 비해 비교적 높은 오차를 보였으며, 16초 이후에 실험 결과에서 파랑의 최대 높이가 약간 상승하는 경향을 보이지만 시뮬레이션에서는 거의 일정한 최대 높이를 유지하면서 최소 높이가 작아져 발생하는 차이의 영향으로 판단된다. 이러한 차이를 감안하더라도 전체적으로 SPH 기법을 이용한 파랑 재현이 실험에 의한 파랑을 잘 표현하는 것을 확인할 수 있다.

Table 4.4 Comparison between experiment and simulation

Case	Wave condition		Wave height(mm)		Error(%)
	Wave height (mm)	Period (s)	Experiment	Simulation	
1	50	1.0	51.97	52.085	0.2
2	50	1.2	52.58	51.349	2.3
3	50	1.4	51.08	51.868	1.5
4	80	1.0	83.03	83.197	0.2
5	80	1.2	84.78	84.056	0.9
6	80	1.4	80.61	85.246	5.7
7	100	1.0	100.51	101.547	1.0
8	100	1.2	101.41	103.636	2.2
9	100	1.4	99.88	101.828	2.0

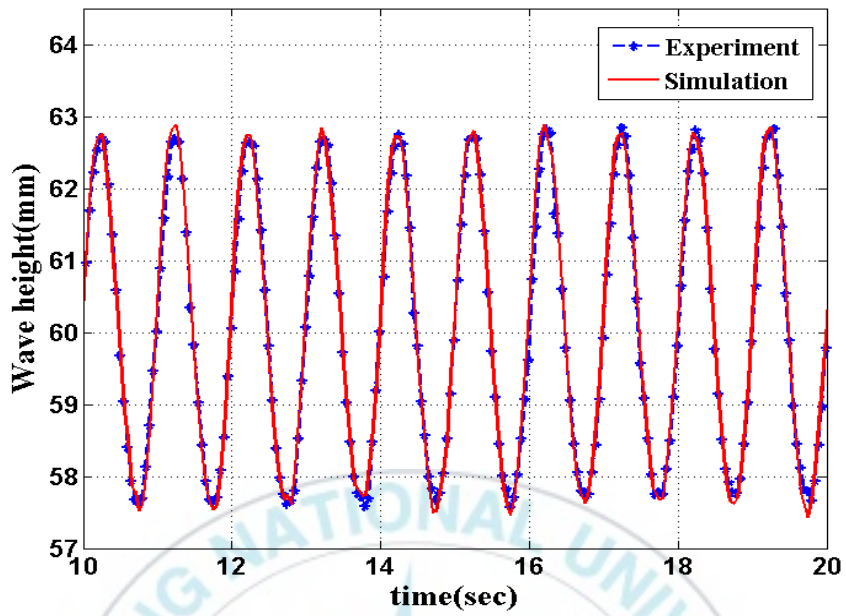


Figure 4.29 Comparison result of case 1

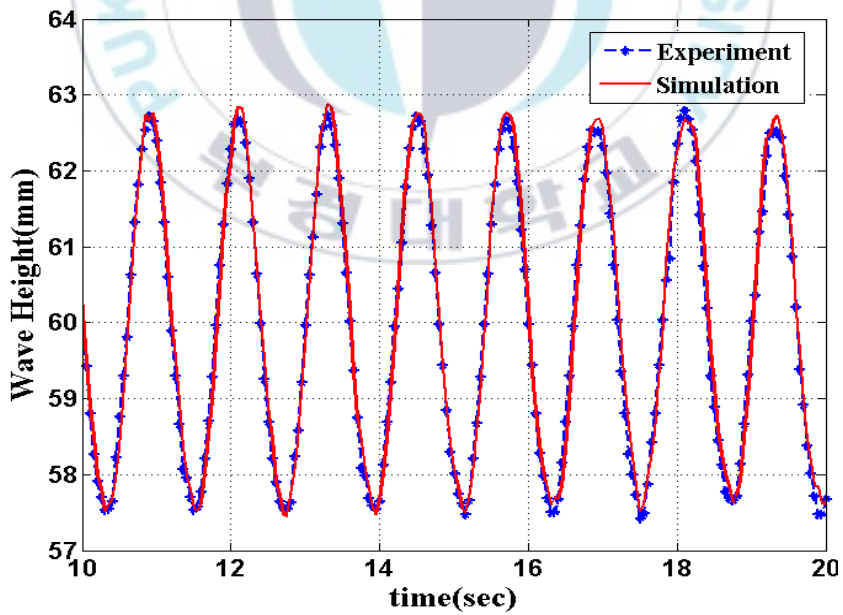


Figure 4.30 Comparison result of case 2

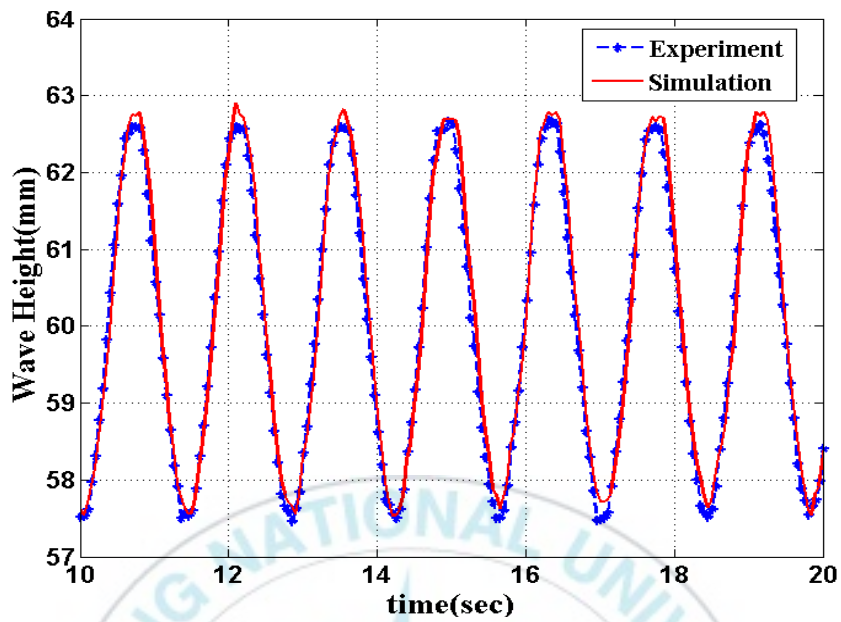


Figure 4.31 Comparison result of case 3

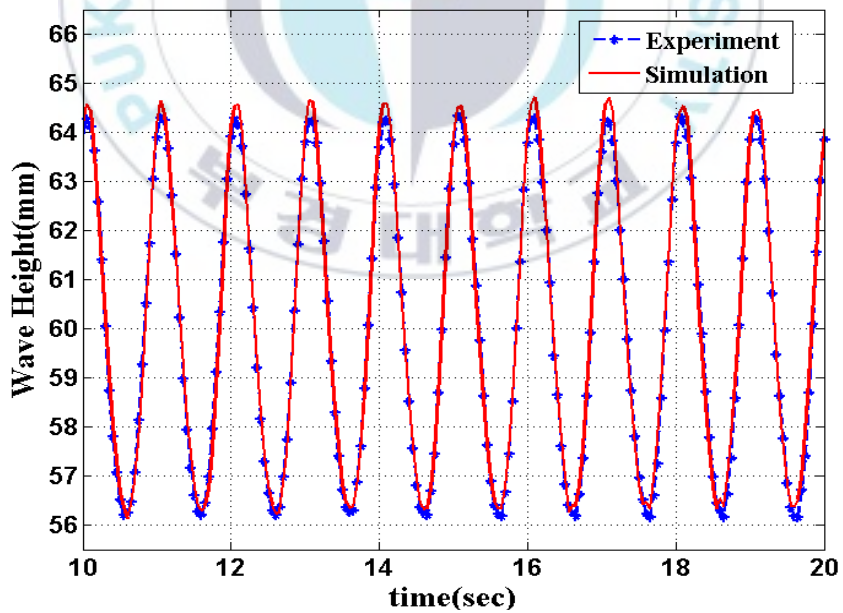


Figure 4.32 Comparison result of case 4

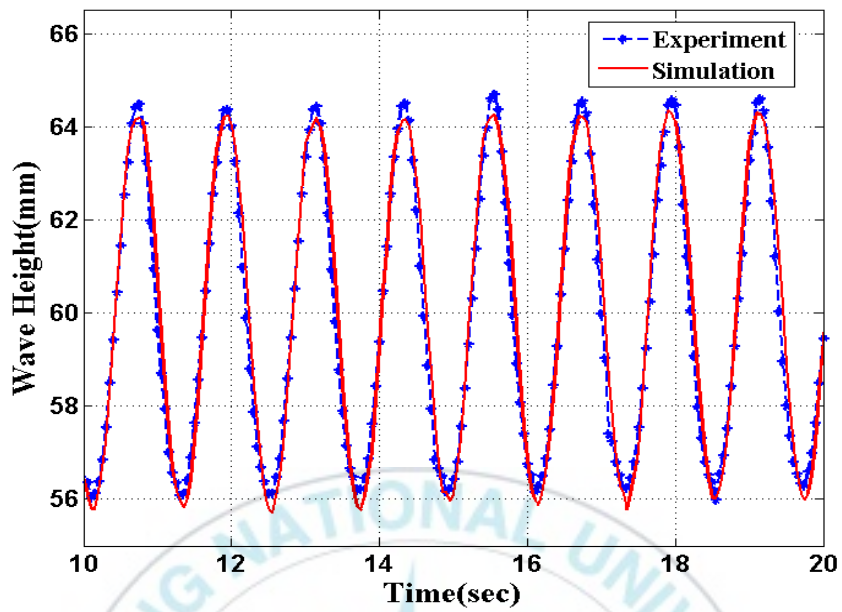


Figure 4.33 Comparison result of case 5

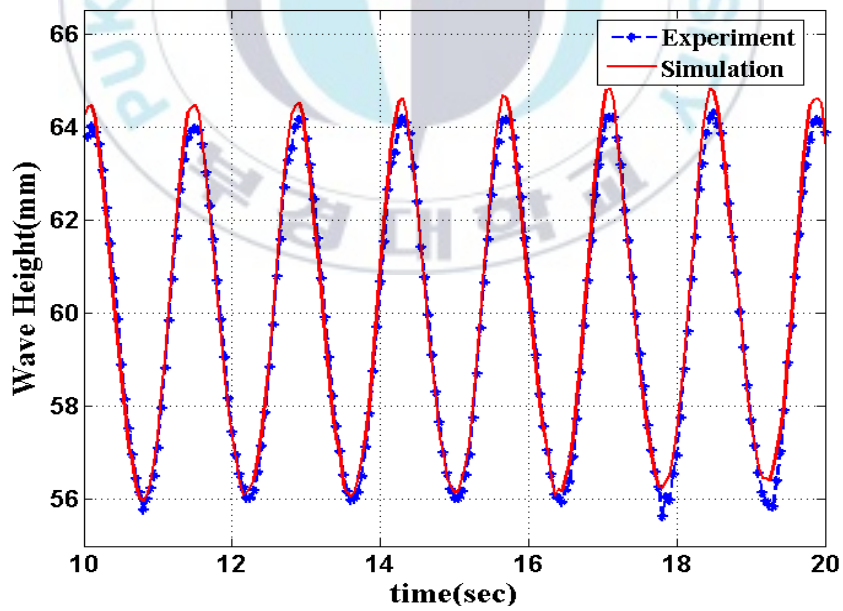


Figure 4.34 Comparison result of case 6

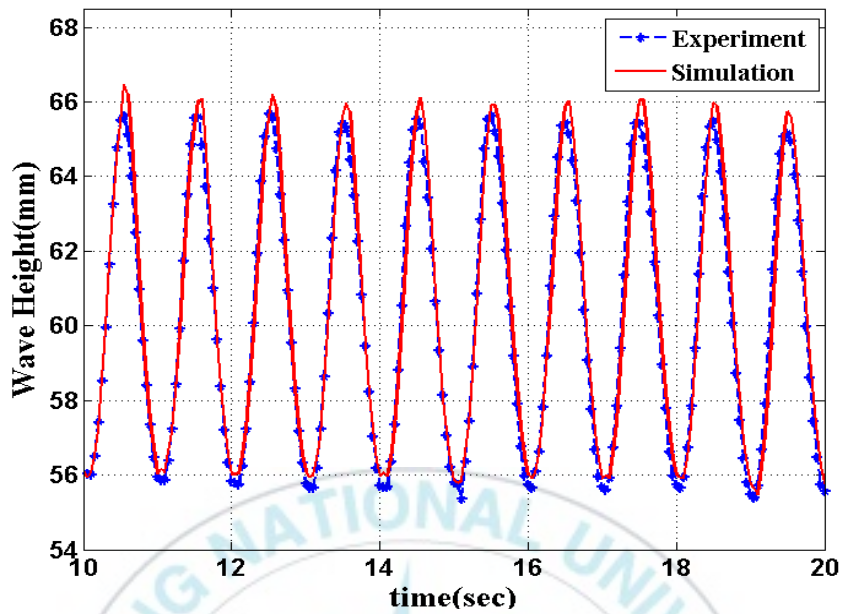


Figure 4.35 Comparison result of case 7

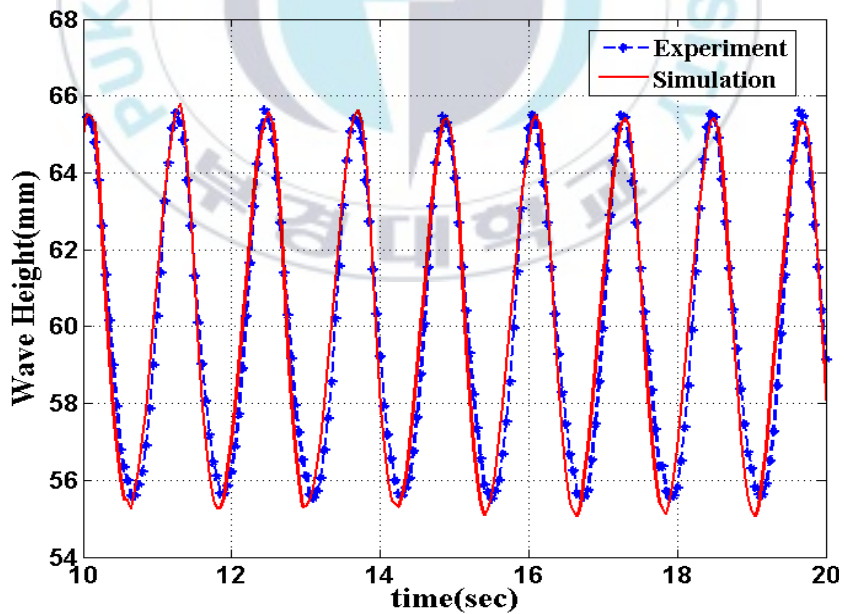


Figure 4.36 Comparison result of case 8

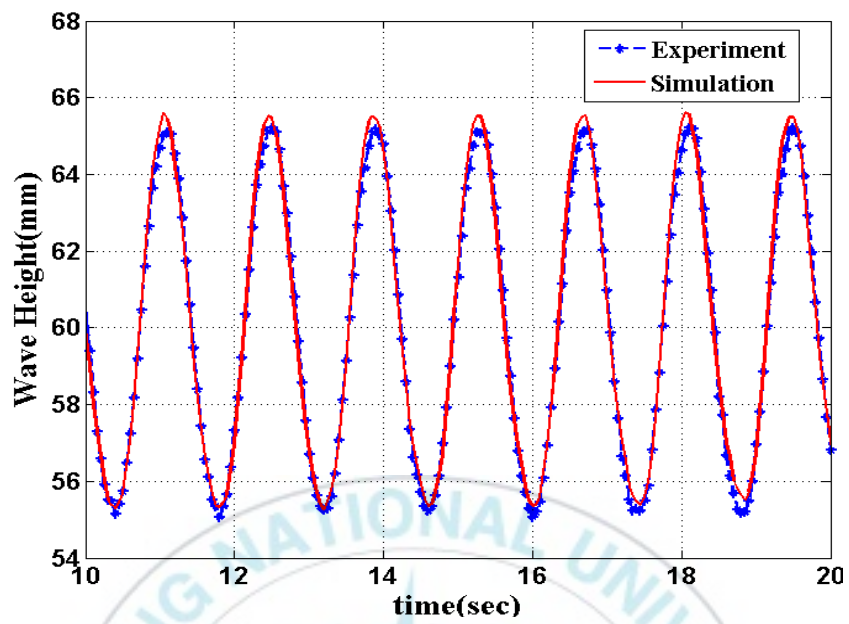


Figure 4.37 Comparison result of case 9

4.5.2. 부유체 진자 운동 검증

유체와 부유체의 상호작용을 검증하기 위해서 실험과 동일한 조건의 진자 기구를 모델링하고 파랑에 따른 부유체의 진자운동을 시뮬레이션 하였다. 부유체는 5(mm)의 두께를 가지고 내부가 비어있는 형태이기 때문에 이에 따른 부력을 표현해주기 위해 0.176의 질량비를 사용하였다. 이 질량비는 부유체 제작에 사용된 아크릴 재질의 밀도에 부유체의 부피를 곱해서 계산되는 질량대비 실제 사용된 부유체의 질량의 비로 계산하였다. 상단 힌지점과 부유체를 이어주는 링크의 질량은 0.55(kg)이다. 부유체와 링크의 관성모멘트는 각각 $0.005851(kg \cdot m^2)$, $0.05248(kg \cdot m^2)$ 이다. 해석을 통한 결과와 실험결과를 서로 비교하여 실험결과 대비 시뮬레이션의 오차를 계산하였다. Figure 4.39에서 Figure 4.43까지 각 파랑 조건에 대해서 Figure 4.38과 같이 수직축에 대한 부유체 운동 각을 시간에 대해서 나타내었다. Table 4.5에서 실험과 시뮬레이션의 1주기에 대한 각각의 진폭에 대한 평균과 그에 대한 오차를 확인할 수 있다. 각 비교 결과에 대해서 진자 운동의 주기는 거의 일치함을 보였으나 진폭에서 최소 4.45%, 최대 12.2%의 오차를 나타내었다. 시뮬레이션이 실험에 비해 다소 진폭이 큰 경향을 보여주는데 이는 시뮬레이션에서는 실험에서 나타날 수 있는 마찰을 무시하면서 생기는 오차와 시뮬레이션에서는 유체와 부유체의 연속성을 가지지 않고 이산화된 입자들로 표현되기 때문에 실제 실험에서 부유체가 진자 운동을 하면서 유체를 밀어내는 양과 시뮬레이션에서 부유체가 밀어내는 유체의 양의 차이에 따른 부력 계산의 부정확성으로 인해 발생하는 오차로 판단된다. 이러한 오차는 질량비에 따른 부력 계산법의 한계로 생각된다.

Table 4.5 Comparison of pendulum motion angle.

Wave condition		Avg. amplitude		error(%)
height(mm)	Period(s)	Experiment	Simulation	
50	1.0	4.5759	4.7796	4.45
50	1.2	5.1603	5.4596	5.8
50	1.4	5.2054	5.7229	9.9
80	1.0	7.4047	8.1741	12.2
80	1.2	7.6152	7.9425	6.97

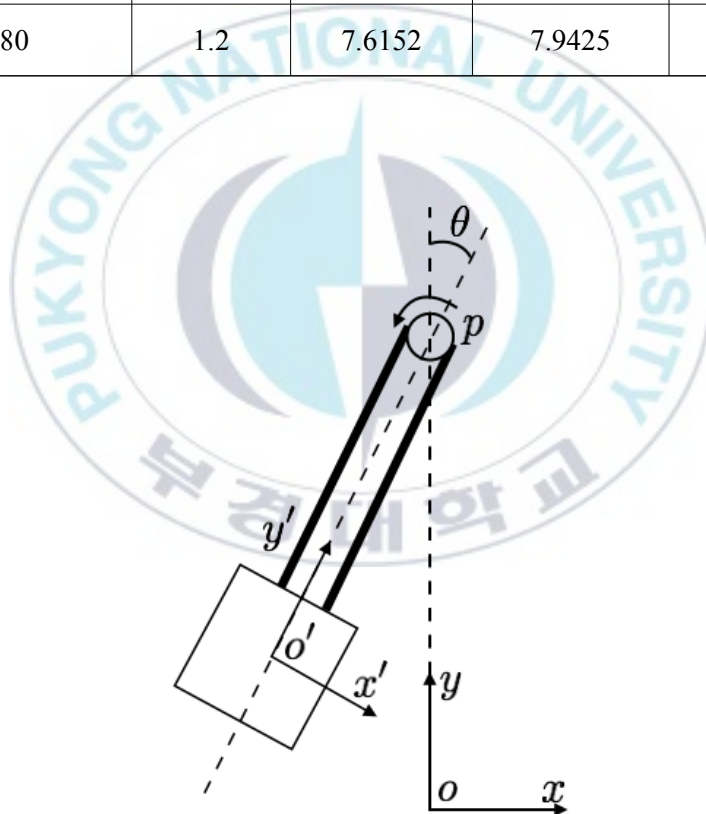


Figure 4.38 Definition of pendulum motion angle

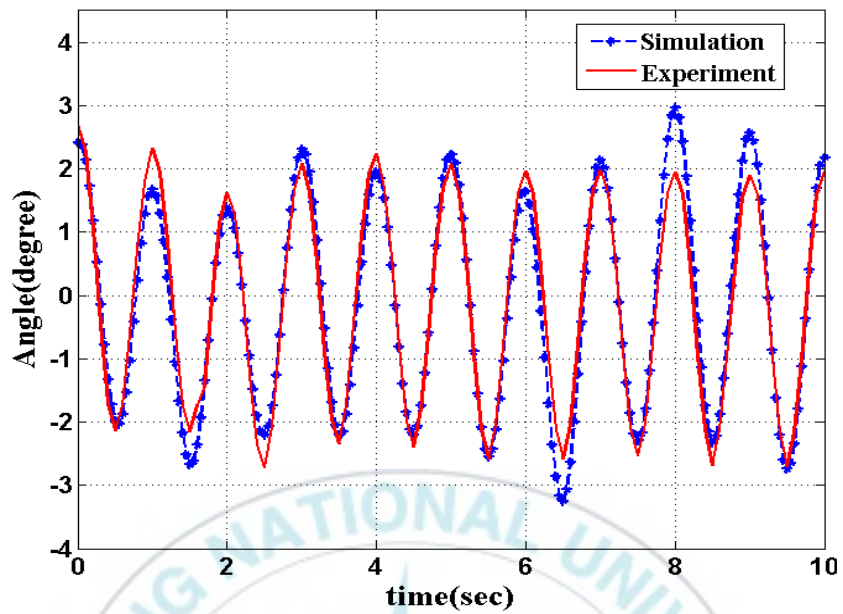


Figure 4.39 Comparison of pendulum motion at 1.0(s) and 50(mm)

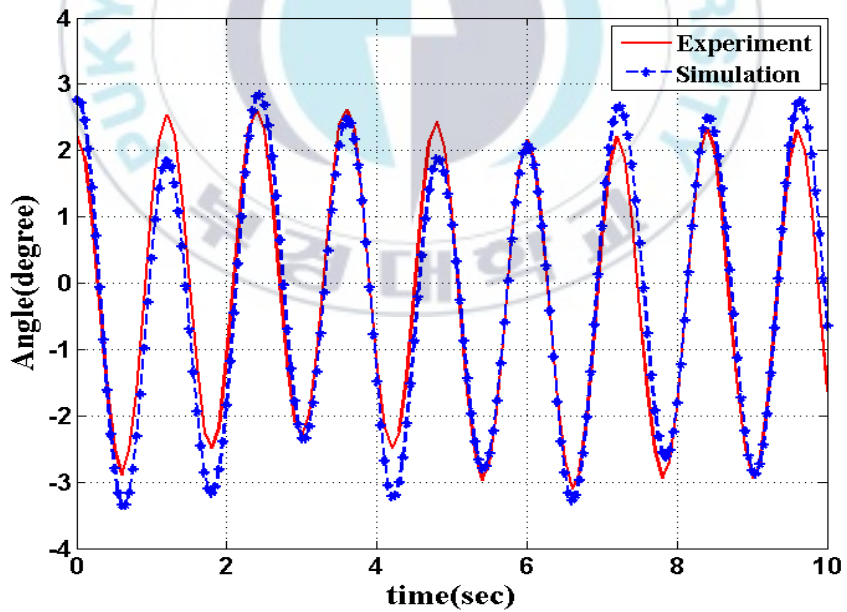


Figure 4.40 Comparison of pendulum angle at 1.2(s) and 50(mm)

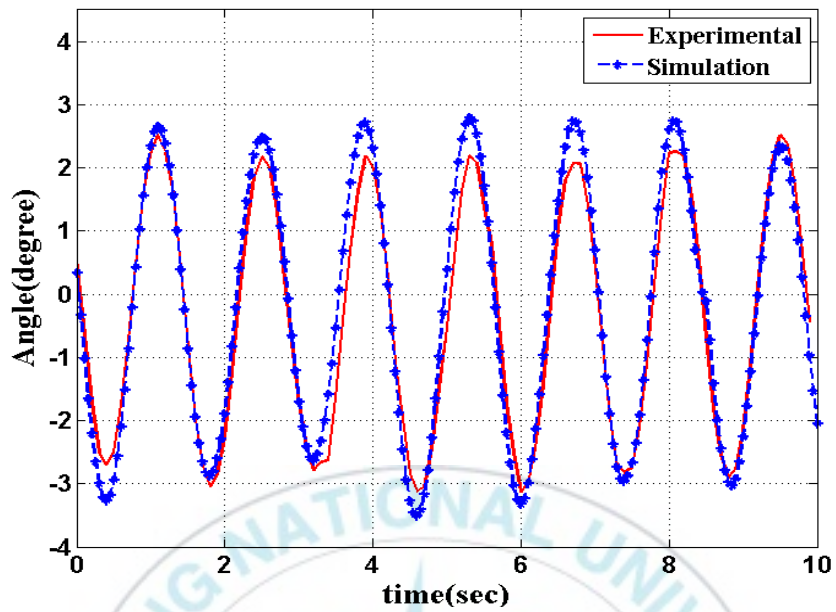


Figure 4.41 Comparison of pendulum motion at 1.4(s) and 50(mm)

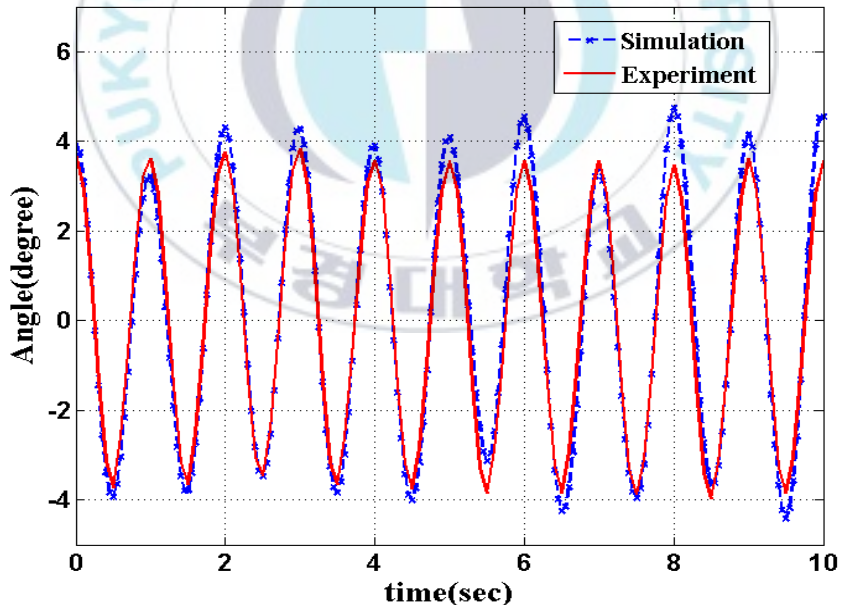


Figure 4.42 Comparison of pendulum motion at 1.0(s) and 80(mm)

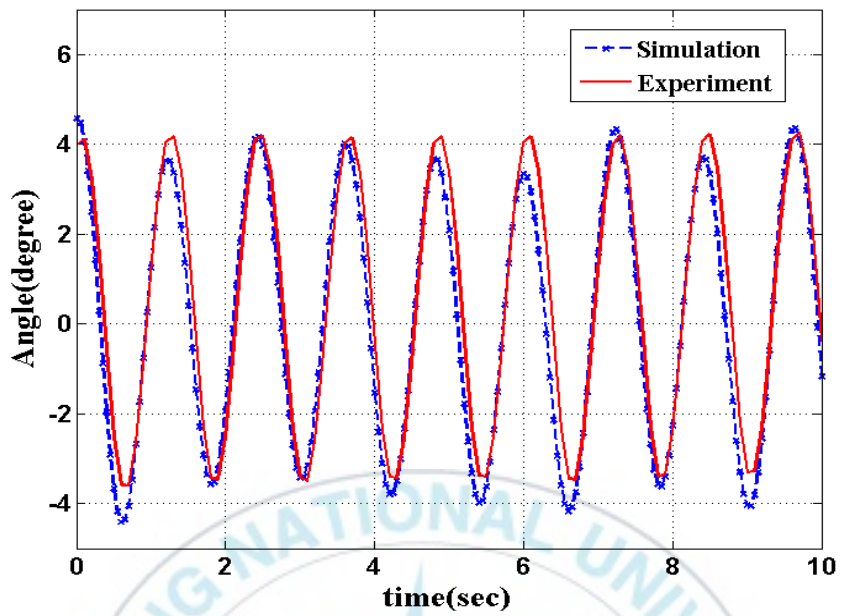


Figure 4.43 Comparison of pendulum motion at 1.2(s) and 80(mm)

5. 파력발전시스템 적용 및 분석

다물체동역학과 입자완화유체동역학의 연성해석 프로그램 FAMCAP을 이용하여 부유식 파력발전시스템을 모델링하고 다양한 파랑조건에 대해서 부유식 파력발전시스템의 성능을 평가한다. 현재까지 개발되었던 다양한 종류의 부유식 파력발전시스템이 있다. 본 논문에서는 국내기업에서 개발한 부유식 파력발전시스템을 모티브로 하였다.

5.1. 부유식 파력발전시스템 구성

파력발전시스템은 Figure 5.1과 같이 동수력 서브시스템(Hydrodynamics subsystem)과 동력인출장치(Power take-off subsystem) 그리고 반작용 서브시스템(Reaction subsystem)으로 구분된다. 동수력 서브시스템은 파랑 에너지를 흡수하는 시스템으로 동력인출장치랑 반작용 서브시스템에 연결되어 흡수된 에너지를 전달한다. 동력인출장치는 흡수된 파랑의 에너지를 전력으로 변환하는 역할을 수행하며, 반작용 서브시스템은 파력발전시스템과 해저의 상대적인 거리를 유지시켜준다.

본 논문에서는 앞서 설명한 시스템에서 동수력 서브시스템과 동력인출장치가 모델링 되며, 반작용 서브시스템은 포함되지 않으며, 시뮬레이션에 사용된 부유식 파력 발전시스템은 국내기업에서 개발하고 있는 시스템을 모티브로 하였다. 대상 부유식 파력발전시스템은 기존 부유식 파력발전시스템이 대부분 파도의 상하 운동 성분만을 이용하는 것과는 달리 다수의 로프를 이용하여 부유체의 6자유도 운동을 모두 고려하여 전력을 생산하는 시스템이다. 또한 onshore 형식으로 전력생산을 위한 발전시스템이 육지에 설치되어 주로 연안 지역에 설치된다.

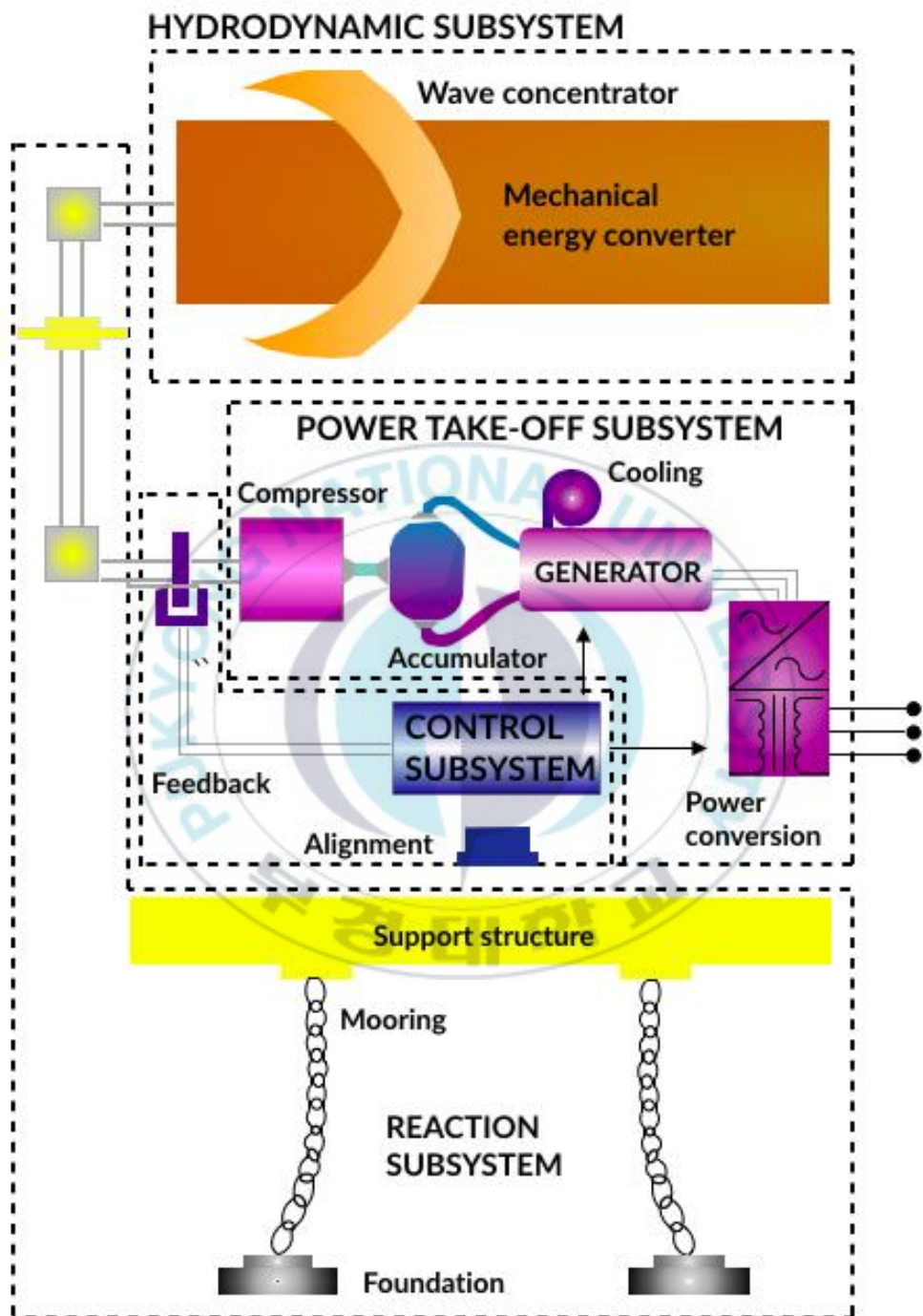


Figure 5.1 Wave energy converter system design breakdown[46]

5.1.1. 동수력 서브시스템

동수력 서브시스템은 파력을 활용한 파랑 흡수 시스템을 말한다. 이러한 동수력 서브시스템은 부유식, 진동수주형, 월파형 등이 있다. 본 논문에서는 부유식 방식을 대상으로 하고 있으며 부유체 하단에 동력인출장치와 연결되는 로프가 연결되어 있다. 부유식 파력발전시스템에 경우 부유체의 형상과 크기 그리고 부력에 따라서 발전량에 차이가 있을 수 있기에 다양한 파랑조건에 대해서 부유체의 형상, 크기 등이 미치는 영향 분석이 필요하다. 평면 공간에서 부유식 파력발전시스템을 해석하기 위해서 하나의 부유체에 대해 두 개의 로프를 각각 부유체 하단에 연결한다. Figure 5.2는 하나의 부유체에 두 개의 로프가 부유체와 해저에 연결된 것을 보여준다. 로프는 해저의 폴리를 통해서 동력인출장치와 연결되며 파랑에 의해 부유체가 움직이면 로프를 통해 힘을 전달한다.

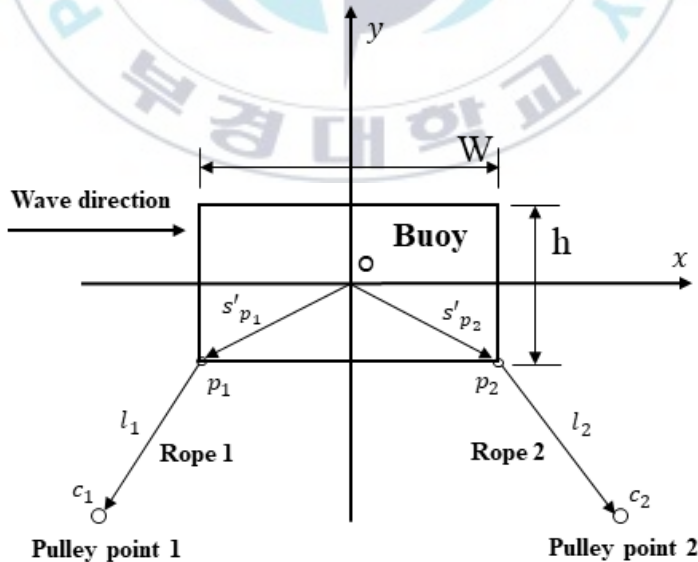


Figure 5.2 Schematic diagram of buoy-rope connection

5.1.2. 동력인출장치

5.1.1절에서 부유체에 연결된 로프는 해저 폴리를 통해서 동력인출장치에 연결되어 있어 Figure 5.3과 같이 부유체가 파랑에 의해 운동을 할 때 로프는 발전기 축에 연결된 드럼에 토크를 가하고 발전기의 샤프트 축을 돌려 전력을 생산하게 한다. 발전기 축에는 또 하나의 드럼이 연결되어 있으며 수직방향으로 운동하는 균형추가 연결되어 있다. 균형추는 부유체가 파력에 의해 로프를 당길 때는 수직방향으로 상승하였다가 반대로 로프를 당기지 않을 때는 하강하면서 부유체를 당겨 로프의 장력을 유지시켜주는 역할을 한다. 균형추가 하강할 때는 부유체에만 영향을 주고 발전기 축에는 영향을 주지 않는다. 부유체가 로프를 당길 때 로프는 드럼에 회전력을 가하게 되며, 균형추가 로프를 당길 때는 반대방향으로 드럼에 회전력을 가한다. 이러한 관계는 거리 구속 관계를 통해서 정의될 수 있으며, 구속식은 식(5.1)과 같이 구성된다. 로프는 동력인출장치의 드럼에 토크를 가하게 되는데 이때 토크는 식(5.1)과 식(5.2)로 계산되며, 드럼은 고정된 위치에서 고정된 회전축을 가지고 회전한다. 이때 하나의 회전 좌표만을 고려하였다.

$$\Phi_{bd}^r = (\mathbf{d}_{ic_1}^T \mathbf{d}_{ic_1} - l_1^2) + r_d (\theta_d - \theta_0) = 0 \quad (5.1)$$

$$\Phi_{ed}^r = (\mathbf{d}_{jc_2}^T \mathbf{d}_{jc_2} - l_2^2) - r_d (\theta_d - \theta_0) = 0 \quad (5.2)$$

위 식에서 Φ_{bd}^r 은 부유체와 드럼과의 구속식이며, Φ_{ed}^r 은 균형추와 드럼과의 구속식이다. $\mathbf{d}_{ic_1}$ 은 Figure 5.4에서 확인할 수 있듯이 해저에 고정된 폴리와 부유체에 연결된 로프의 상대거리 벡터이며, $\mathbf{d}_{jc_2}$ 는 드럼과 균형

추에 연결된 로프의 상대거리 벡터이다. l_1 과 l_2 는 각각 초기 길이이다. r_d 는 드럼의 반지름이며, θ_d 는 드럼의 회전각도 그리고 θ_0 는 드럼의 초기 각도이다. 식(5.1)과 식(5.2)의 두 번째 항의 부호는 드럼의 회전 방향에 따라 달라질 수 있으며, 해당 모델에서는 부유체에 의해 로프가 당겨질 때 드럼은 음의 방향으로 회전하고, 균형추에 의해 로프가 당겨질 때는 드럼이 양의 방향으로 회전하기 때문에 식(5.1)에는 양의 부호를 식(5.2)에는 음의 부호가 사용된다. $d_{ic_{1,2}}$ 는 식(5.3)과 같이 계산된다.

$$d_{ic} = s'_c - r_i - A_i s'_i \quad (5.3)$$

식(5.2)의 자코비안은 식(5.4)와 같다.

$$(\Phi_{bd}^r)_q = [-2d_{ic_1}^T, -d_{ic1}^T B(p_i, s'_i), 0, r_d] \quad (5.4)$$

$$(\Phi_{ed}^r)_q = [-2d_{ic_1}^T, -d_{ic1}^T B(p_i, s'_i), 0, -r_d] \quad (5.5)$$

발전기 축은 Figure 5.5와 같이 드럼의 회전축과 기어로 연결되어 있고, 드럼에 의한 발전기 축의 토크는 기어비에 의해서 결정되며 드럼축의 기어와 발전기 축의 기어는 기어 구속관계에 의해서 연결된다. 동력인출 장치의 운동 계산은 드럼과 발전기 축이 같은 축 방향으로 회전하고 고정된 위치에서 회전하기 때문에 드럼 축의 0어의 회전각 θ_{dg} 와 발전기축의 기어의 회전각 θ_{gg} 좌표를 고려하였다. 두 기어 사이의 구속 방정식은 식 (5.6)과 같다.

$$\Phi^{gr} = (\theta_{dg} - \theta_{dg0})R_{dg} + (\theta_{gg} - \theta_{gg0})R_{gg} = 0 \quad (5.6)$$

위 식에서 θ_{dg0} 과 θ_{gg0} 은 드럼축과 발전기축의 초기각도, R_{dg} 와 R_{gg} 는 각각 드럼축 기어와 발전기축 기어의 피치(pitch) 반경이다. Figure 5.5에서 확인할 수 있듯이 드럼축 기어는 드럼에 고정된 고리에 라켓이 접촉하였을 때 회전하게 된다. 드럼과 드럼축 기어의 관계를 정의하기 위해서 식(5.7)의 구속식이 고려되었다.

$$\Phi^e = (\theta_d - \theta_{d0}) - (\theta_{dg} - \theta_{dg0}) = 0 \text{ if } \dot{\theta}_d > \dot{\theta}_{dg} \quad (5.7)$$

식(5.7)은 드럼의 각속도가 드럼축 기어의 각속도보다 크다는 조건을 만족할 때만 적용되며, 반대 조건일 때는 적용되지 않는다. θ_{d0} 와 θ_{dg0} 는 조건을 만족할 때의 각도이다. 발전기에서 전력을 생산하기 위해서 발전기에 임의의 부하를 주어야 한다. 발전기의 부하는 발전기 회전에 대한 저항으로 작용하고 속도에 비례하는 성격을 가진다. 따라서 부하에 대한 역 토크를 함께 고려할 필요가 있으며, 발전기축의 토크는 식(5.8)로 계산된다.

$$T_g = -D_g \dot{\theta}_g \quad (5.8)$$

식(5.8)에서 D_g 는 발전기의 부하에 의한 저항을 표현하는 감쇠계수이다. 발전기로부터 얻는 순간 출력은 식(5.9)와 같이 감쇠계수와 발전기축의 회전각속도의 제곱으로 계산된다.

$$P_g = D_g \dot{\theta}_g^2 \quad (5.9)$$

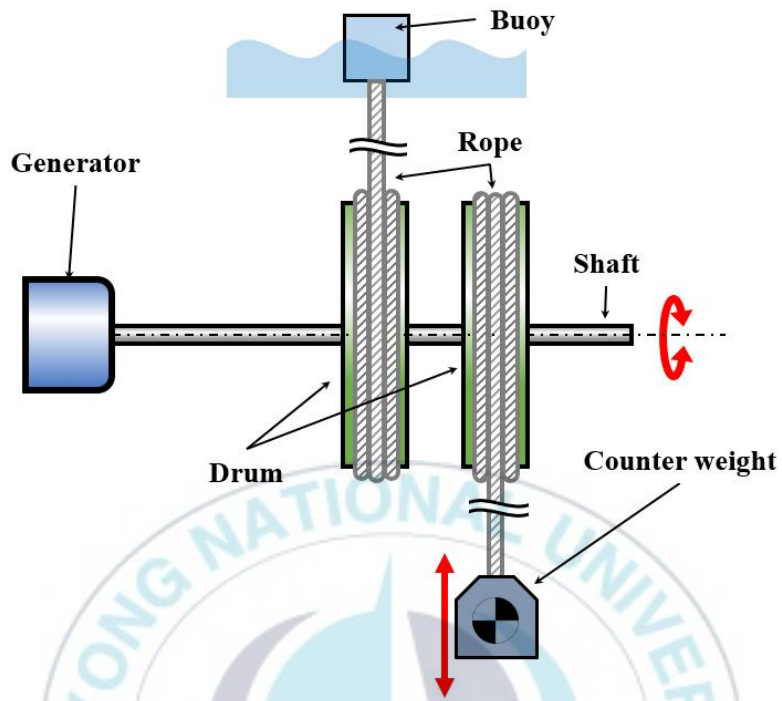


Figure 5.3 Schematic diagram of wave energy converter system

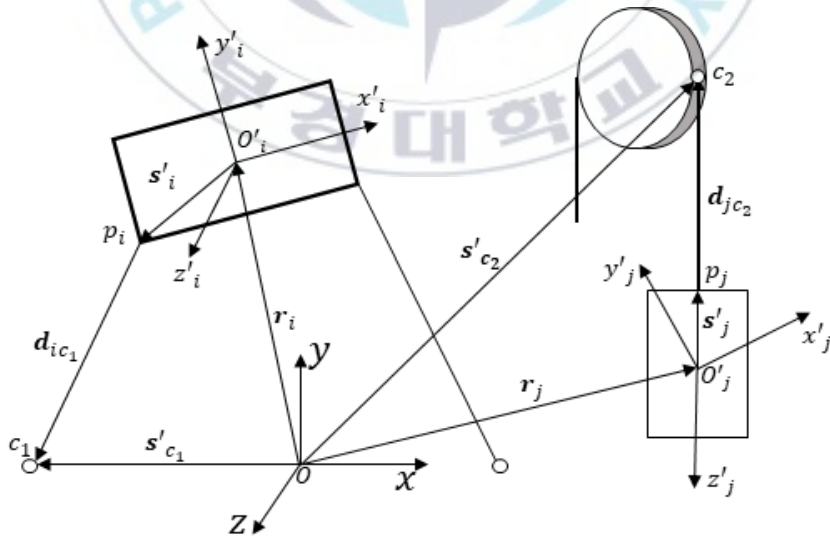


Figure 5.4 Definition of distance constraint equation

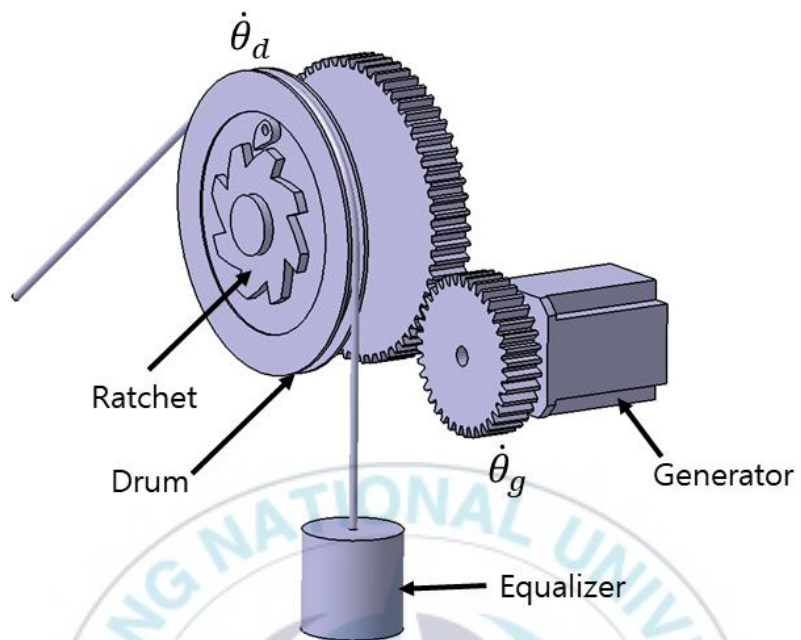


Figure 5.5 Schematic diagram of power-take-off(PTO) module

5.2. 부유식 파력발전시스템 모델링

부유체의 크기는 실험실에서 수행될 수 있는 실험 수준에서 결정하였으며, 실제 실험에서 사용될 수 있는 원통형 형상을 고려하여 직경(W) 1(m), 높이(h) 0.5(m)의 부유체를 고려하였다. 부유체의 물성은 아크릴 물성을 사용하였으며, 아크릴 밀도 $1190(kg/m^3)$ 을 고려하면 부유체의 최대 질량은 약 467(kg)이 된다. 부유체의 질량은 150(kg)를 고려하였으며 질량비는 0.321이다. Table 5.1에 해석에 사용된 동수력 서브시스템의 위치정보를 나타내었다. 동력인출장치의 드럼에 연결된 기어와 발전기 축에 연결된 기어간의 기어비는 20:1을 고려하였고, 발전기축의 부하를 주기위한 감쇠계수는 $0.1(N \cdot m \cdot s)$ 의 값을 사용하였다. 부유체의 질량은 150(kg)를 고려하였으며 질량비는 0.321이다. 0.321의 질량비에서는 부유체의 부력중심이 무게중심의 아래에 위치하기 때문에 무게중심과 부력중심을 어느정도 같은 수평선상에 위치시키기 위해서 적절한 균형 추의 질량의 결정이 필요하다. 부유체에 작용하는 부력은 식(5.10)으로 계산된다.

$$F_b = \rho g V \quad (5.10)$$

Table 5.1 Position data of analysis model

Buoy position(m)	[5.0, 1.0, 0.0]
Pulley point 1 c_1	[3.0, 0.0, 0.0]
Pulley point 2 c_2	[7.0, 0.0, 0.0]
Buoy fixed point p_1	[4.5, 0.75, 0.0]
Buoy fixed point p_2	[5.5, 0.75, 0.0]

식(5.10)에서 ρ 는 유체의 밀도를 나타내며, g 는 중력가속도, V 는 부유체가 밀어낸 유체의 부피로 유체에 잠겨있는 부유체의 부피와 같다. 식(5.10)을 통해서 고려된 부유체가 유체에 반이 잠겼을 때 작용하는 부력은 $1,925.5(N)$ 이 되며 부유체 자중에 의한 힘은 $-1,471(N)$ 이기 때문에 실제 부유체에 작용하는 힘은 합력인 $454.5(N)$ 이 된다. 이 힘은 양의 힘이기 때문에 구속이 없다면 위로 상승하게 된다. 부유체가 초기 위치를 유지할 수 있는 균형추의 질량을 결정하기 위해서 식(5.11)의 관계식을 사용한다.

$$\begin{cases} F_r = \frac{F_b}{2\sin\theta} \\ F_r = m_c g \end{cases} \quad (5.11)$$

위 식에서 F_r 는 부유체에 작용하는 로프 장력의 수직방향의 힘을 의미하며, θ 는 해저면과 로프가 이루는 각이다. m_c 는 균형추의 질량 그리고 F_b 는 부유체에 작용하는 힘이다. 결과적으로 균형추의 질량 m_c 는 식(5.12)에 의해서 결정된다.

$$m_c = \frac{F_b}{2g \cdot \sin\theta} \quad (5.12)$$

해석 모델에서 각 θ 는 26.56° 또는 $0.46356(\text{rad})$ 이고, 식(5.12)에 의해서 계산된 해석 모델의 균형추의 질량은 $51.8(kg)$ 이다.

5.3. 규칙파에서의 부유식 파력발전시스템 해석

5.2절에서 모델링된 부유식 파력발전시스템을 대상으로 규칙파에 대해 부유식 파력발전시스템의 운동을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 규칙파의 조건은 Ryu등[45]이 측정한 2004년 11월부터 2005년 10월까지 측정한 제주도 차귀도 주변해역에서 가장 빈번하게 발생하는 파랑 조건 범위인 파고 0.5-1.0, 주기 4.0-4.5에서 각각 최대값을 사용하였으며, 해석 모델이 실험실에서 수행 가능한 범위의 실험 수준을 고려하였기 때문에 파고는 실제 해역의 파고의 1:10 비율인 0.1을 사용하였으며, 주기는 Froude's 크기조정법[46]에 의해 $1:\sqrt{10}$ 비율인 1.423을 사용하였다. Figure 5.6에 파랑조건에서 부유식 파력발전시스템 시뮬레이션 모델을 나타내었으며, 전체 길이 20(m)의 수조에 3(m)의 소파 영역을 두었으며, 1.0(m)의 수심 위에 폭 1.0(m), 높이 0.5(m)의 부유체를 고려하였다. 커널함수는 5th order Wendland를 사용하였으며, 유체의 초기입자 간격은 0.01(m), 완화길이는 1.4배인 0.014(m)를 사용하였다. 모델링된 유체, 경계, 터미 그리고 부유체를 구성하는 입자의 개수는 각각 197,274, 2401, 7227, 5151개로 총 212,053개의 입자가 사용되었으며 20초 동안 시뮬레이션을 수행하였다.

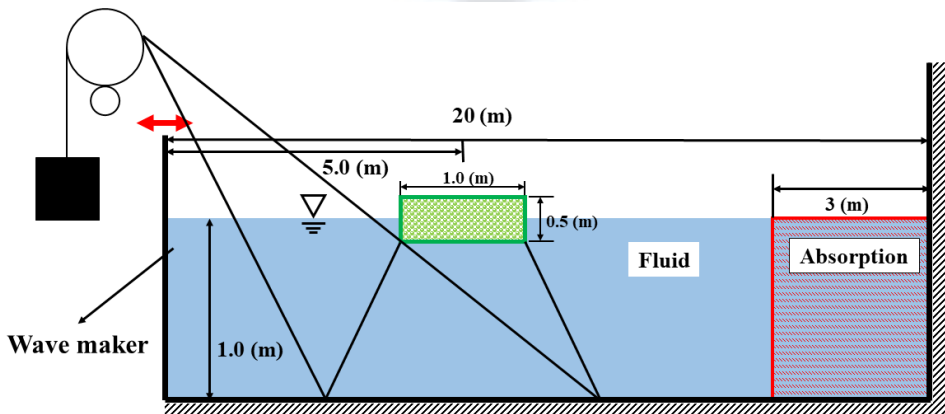


Figure 5.6 Schematic of the simulation model for coupled analysis

시간간격은 CFL조건을 사용하지 않고 0.0001의 고정 시간간격을 사용하였다. 20초 시뮬레이션에 약 5시간의 계산시간이 소요되었다.

Figure 5.7과 Figure 5.8는 시간에 대한 각각 부유체의 수직 및 수평방향의 위치 결과로 부유체가 로프로 연결된 균형추로 인해 파랑의 방향으로 나아가지 않고 초기 위치 주변에서 운동하는 것을 확인할 수 있으며, 수직방향으로는 규칙적인 파랑에 의해 상하운동의 진폭이 크게 차이나지 않고 주기적인 운동을 확인할 수 있다. Figure 5.9와 Figure 5.10에 드럼과 드럼축의 기어의 회전각도와 회전속도를 나타내었으며, 드럼은 부유체에 의한 회전운동과 균형추에 의한 회전운동에 따라 사인함수의 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 드럼축의 기어는 드럼과 라켓이 접촉하였을 때 회전하기 때문에 한 방향으로 회전하는 것을 확인할 수 있으며, 라켓이 접촉하지 않을 때 발전기 축의 부하로 인해 회전각이 줄면서 멈추는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Figure 5.10에서 또한 확인할 수 있다. 전반적으로 첫 번째 드럼(Drum0)에 비해 두 번째 드럼(Drum1)의 운동이 작게 나타나는데 이는 Figure 5.6에서 부유체가 파랑의 진행방향을 작용하는 힘에 의해 수직방향으로 상승하면서 오른쪽으로 이동하고 왼쪽에 연결된 로프에 큰 장력이 걸리지만, 오른쪽 로프는 부유체의 상승과 하강시에 부유체의 수평방향 운동의 차이로 인해 상대적으로 작은 장력으로 인해 발생하는 차이이다. 이러한 차이는 Figure 5.11의 부유체에서 드럼으로 연결되는 로프의 장력에서 확인할 수 있다. Figure 5.12는 발전기축 기어의 회전 속도이며, 드럼축 기어와의 기어비에 따른 값을 보여주고 있다. Figure 5.13는 식(5.9)로부터 계산되는 각 발전기의 순간출력 결과로, 발전기 축의 회전 속도의 제곱에 비례하기 때문에 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

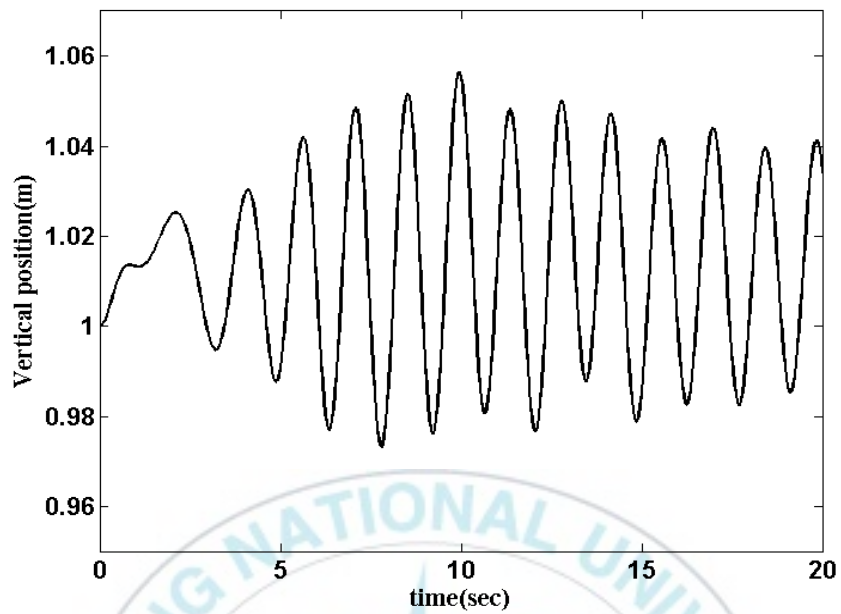


Figure 5.7 Vertical position of the buoy under regular wave

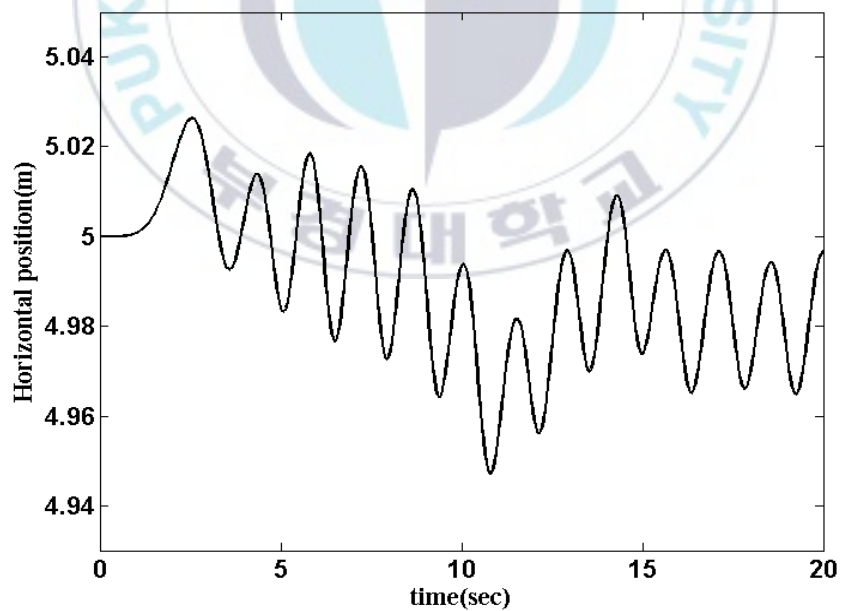


Figure 5.8 Horizontal position of the buoy under regular wave

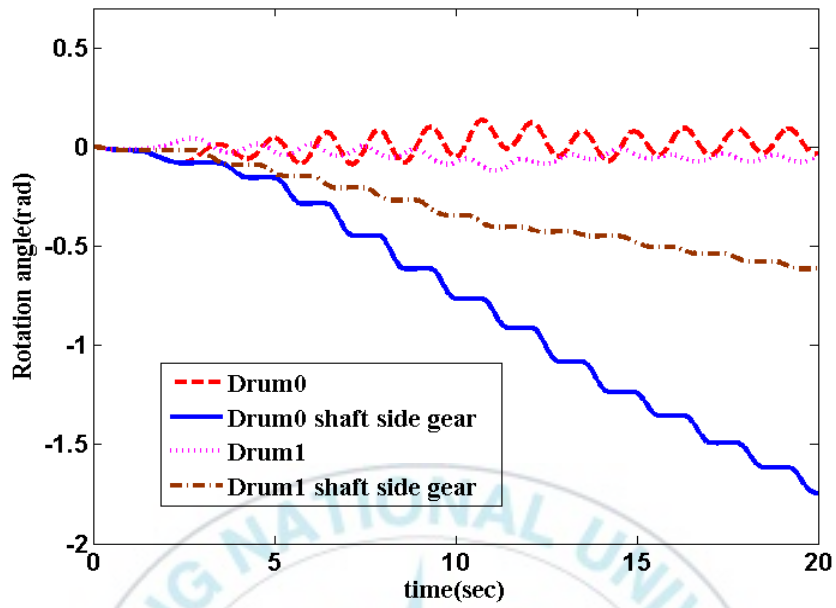


Figure 5.9 Rotation angle of the drums under regular wave

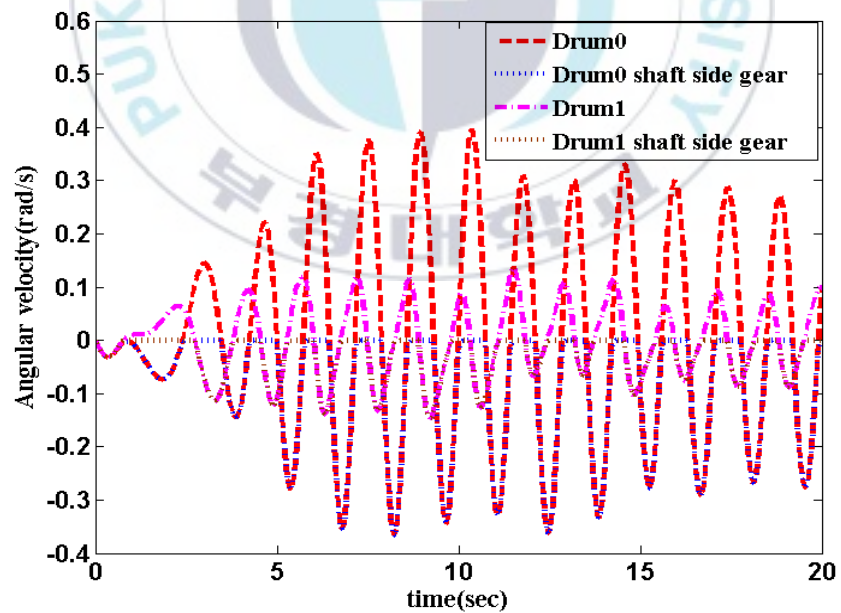


Figure 5.10 Angular velocity of the drums under regular wave

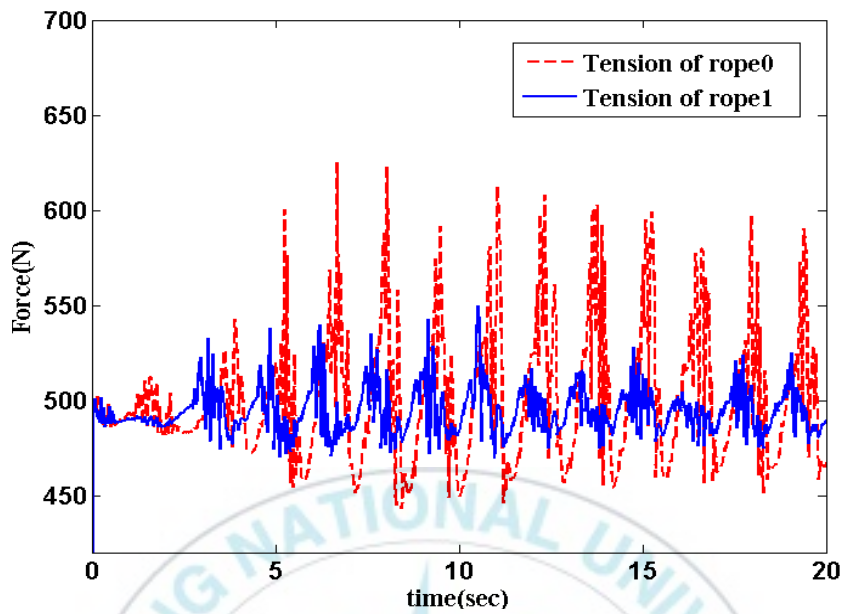


Figure 5.11 Tension of ropes under regular wave

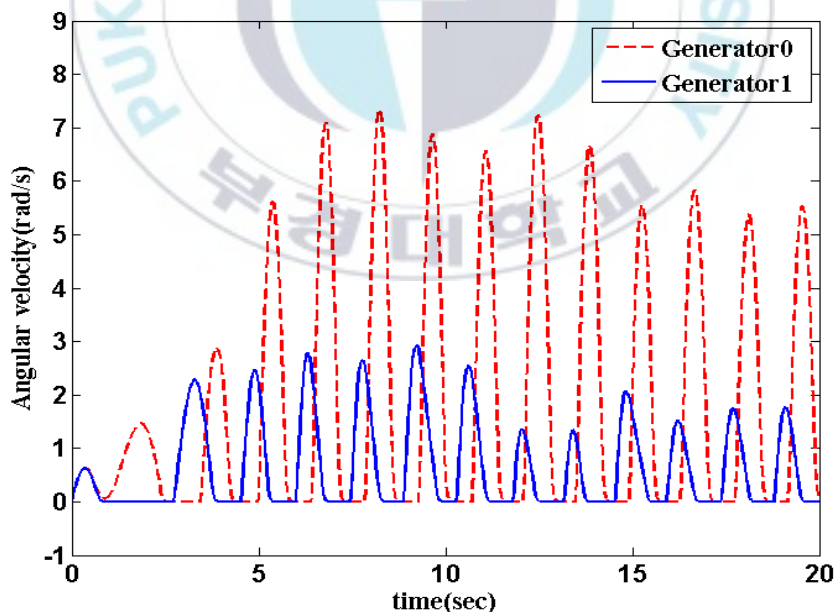


Figure 5.12 Angular velocity of the generators under regular wave

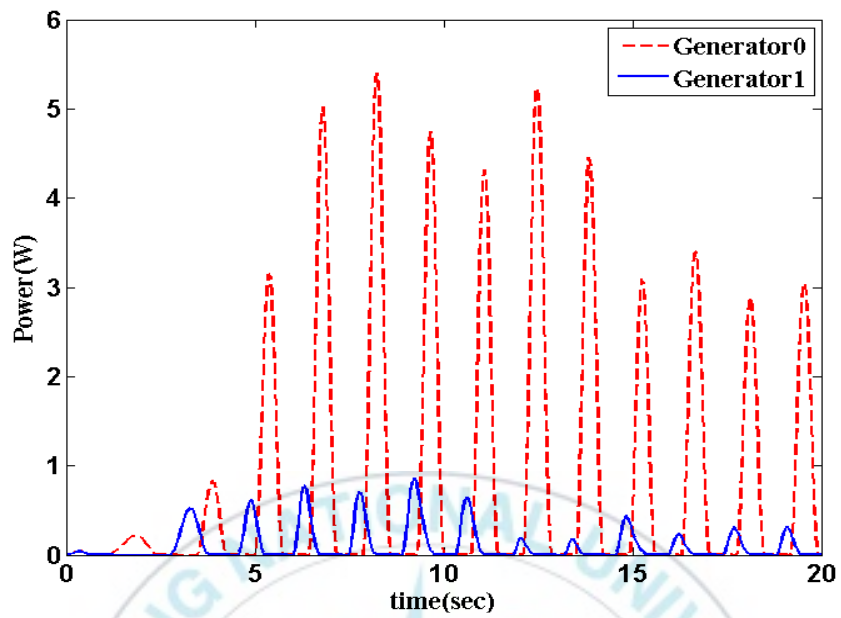


Figure 5.13 Power of the generators under regular wave

5.4. 불규칙파에서의 부유식 파력발전시스템 해석

불규칙파에서 부유식 파력발전시스템의 운동을 해석하기 위해서 불규칙파의 모델링이 필요하다. 불규칙파는 여러 가지 파랑 조건에 대해서 선형 조파기 이론에 기반한 조파기 운동의 합으로 재현 할 수 있다. 식(5.13)과 식(5.14)는 불규칙파 재현을 위한 조파기의 위치와 속도를 각각 나타낸다.

$$r_{paddle}^{irregular} = \sum_{i=0}^n \frac{S_i}{2} (\sin(w_i(t - t_0) + 1.5\pi) + 1) \quad (5.13)$$

$$v_{paddle}^{irregular} = \sum_{i=0}^n \frac{S_i}{2} w_i \cos(w_i(t - t_0) + 1.5\pi) \quad (5.14)$$

위 식에서 n 은 조합한 파랑 조건의 수를 의미하며, S_i 와 w_i 는 각 파랑조건에 대한 스트로크와 주파수이다. 불규칙파 재현을 위해 2개의 파랑 조건을 조합하였으며, 사용된 각각의 파랑 조건들은 Table 5.2와 같다. Figure 5.14에 불규칙 파랑 조건에 의한 조파기의 스트로크와 속도를 각각 나타내었다. Figure 5.15와 Figure 5.16에는 불규칙 파랑에 의한 부유체의 수직 및 수평 방향의 위치를 나타내었으며, 규칙파에 비해 불규칙적인 조파기의 운동에 의한 파랑의 운동을 확인할 수 있다. 부유체의 운동에서 조파기의 운동이 작아지다가 다시 증가하면서 큰 유체력을 받는 것을 확인할 수 있다. 발전기 축의 회전 각과 속도는 Figure 5.17과 Figure 5.18에 각각 나타내었으며, 규칙파 조건일 때와 마찬가지로 부유체가 연결된 로프를 당길 때 드럼이 회전하면서 라켓이 연결되어 드럼축 기어가 동일한 각속도로 회전하는 것을 볼 수 있으며, 균형추가 로프를 당길 때 드럼은 반대방향으로 회전하고 라켓이 떨어져 드럼축 기어가 발전기 축의 부하로

인해 회전 속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 규칙파와 동일하게 부유체 오른쪽 하단에 연결된 로프에 의한 PTO 운동이 왼쪽 하단에 연결된 로프에 의한 PTO 운동보다 작은 경향을 보였으며, 이는 규칙파와 동일한 원인으로 발생하는 차이로 보여진다. Figure 5.19는 불규칙 파랑 조건일 때 부유체와 드럼을 연결하는 로프의 장력을 나타내며, 부유체의 운동이 커질 때와 부유체의 운동이 작을 때의 로프 장력의 변화가 뚜렷하며, 부유체의 운동과 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. Figure 5.20은 발전기 축의 회전 속도를 나타내며, 부유체의 운동과 유사한 경향을 보이며, 드럼축 기어와의 기어비에 따른 회전 속도를 보여주고 있다. Figure 5.21에 불규칙 파랑 조건일 때 각 발전기의 순간출력을 나타내었으며, 발전기축의 회전속도의 제곱에 비례하는 값과 같은 경향을 보여주고 있다.

Table 5.2 Wave conditions for irregular wave generation.

Index	Period(s)	Wave height(m)	Stroke(m)	Frequency(1/s)
0	1.423	0.1	0.0587	4.4141
1	1.581	0.1	0.0652	3.9727

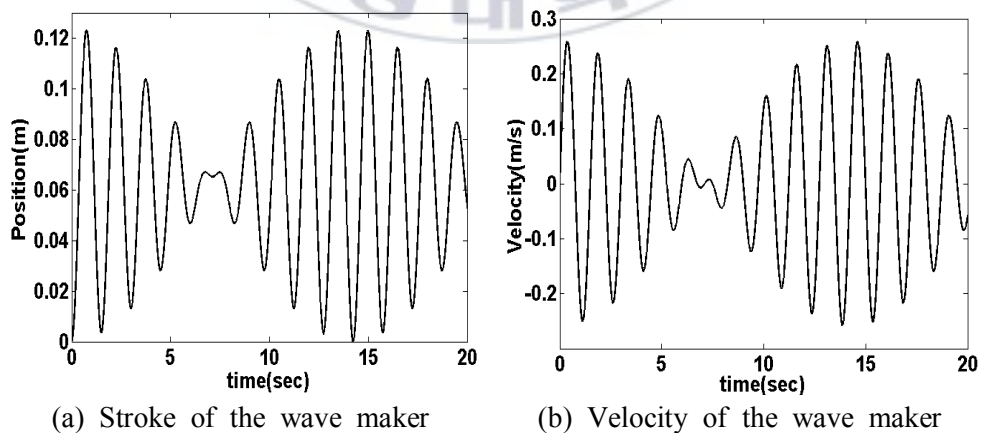


Figure 5.14 Motion of the wave maker for irregular wave

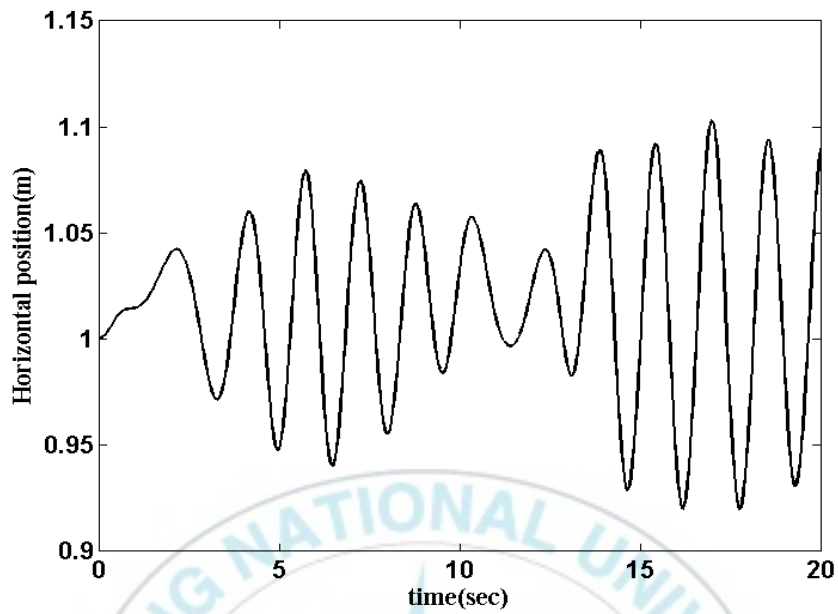


Figure 5.15 Vertical position of the buoy under irregular wave

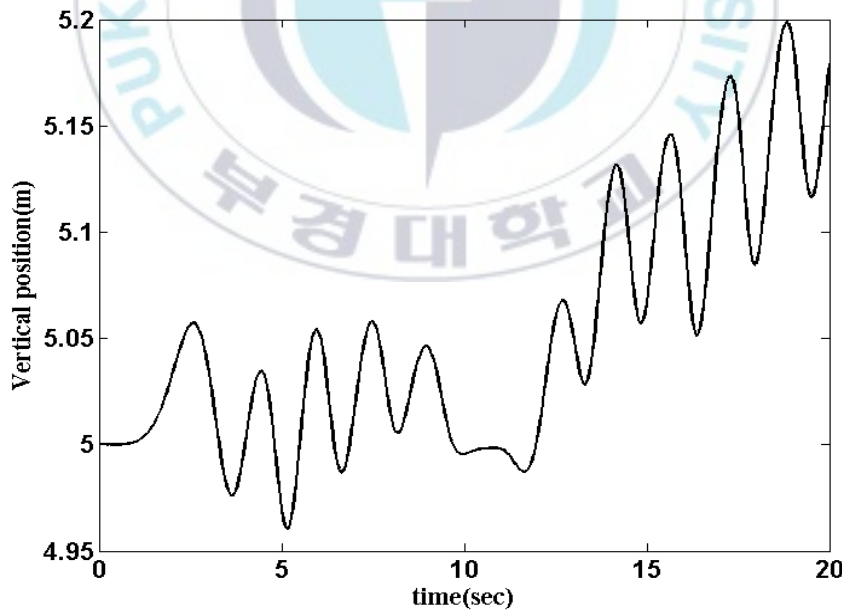


Figure 5.16 Horizontal position of the buoy under irregular wave

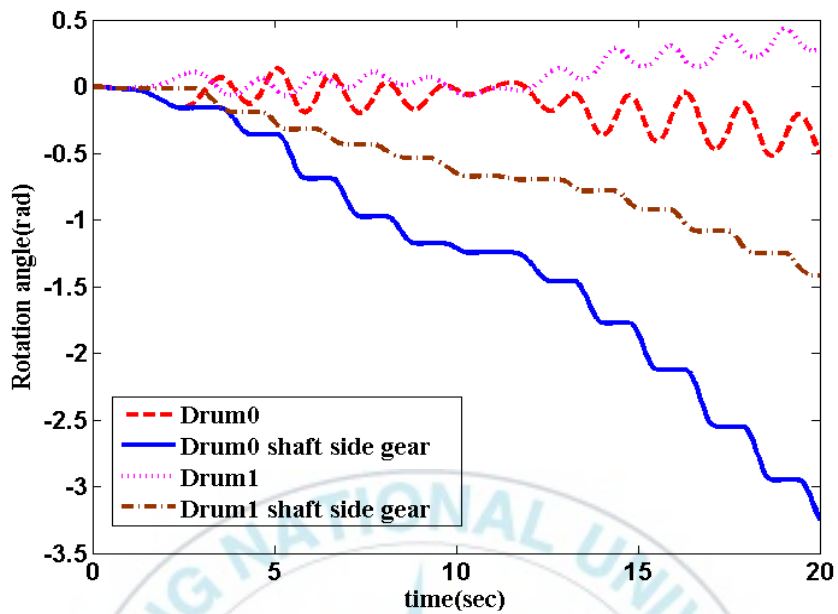


Figure 5.17 Rotation angle of the drums under irregular wave

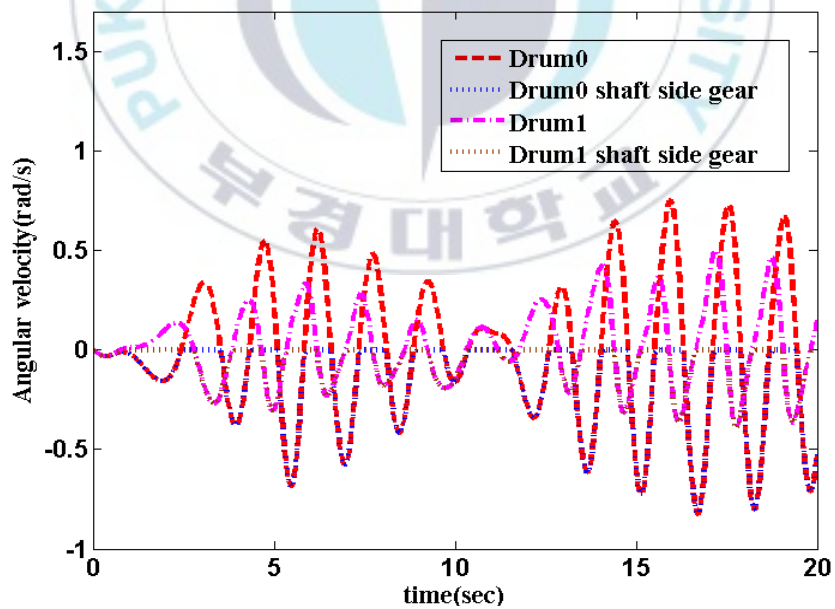


Figure 5.18 Angular velocity of the drums under irregular wave

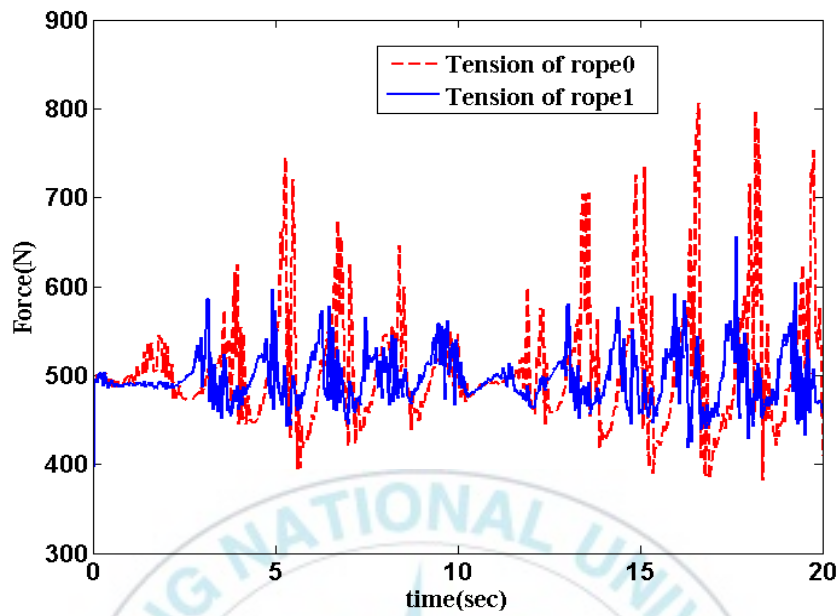


Figure 5.19 Tension of ropes under irregular wave

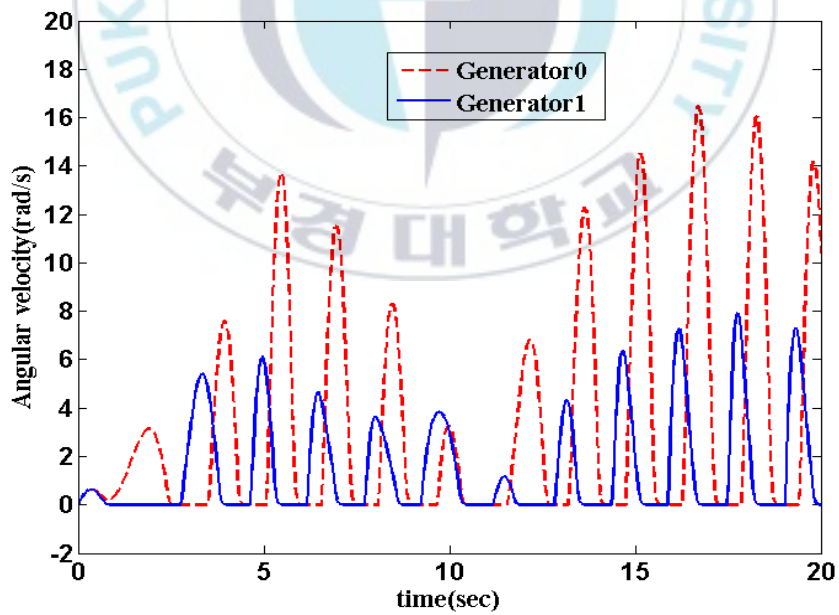


Figure 5.20 Angular velocity of generators under irregular wave

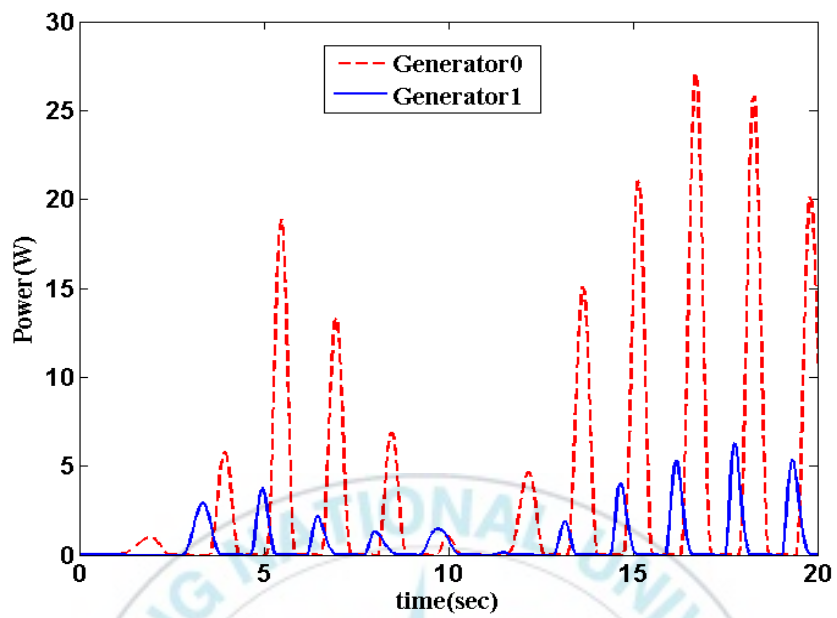


Figure 5.21 Power of the generators under irregular wave

6. 결론

본 연구의 목적은 유체와 다물체시스템이 연성된 문제를 계산하기 위해서, 입자기반의 유체와 부유체와의 상호작용 계산 기법을 정의하고, 비압축성 입자완화유체동역학과 다물체동역학의 연성해석 프로그램 FAMCAP을 개발하는 것이며, 응용 예제로 파랑 조건에서 부유식 파력발전시스템의 동역학 문제를 해석하였다.

자유수면 문제 해석을 위해서 비압축성 유체를 고려한 입자완화유체동역학 기법을 사용하였으며, 해석 솔버를 개발하였다. 유체 해석 솔버에는 파랑을 재현하기 위한 수조 모델과 선형조파이론에 기반한 조파기 그리고 반사파 제거를 위한 수치기법을 적용하였다. 단면조파수조 실험을 통해서 유체 해석 솔버의 파랑 재현을 검증하였으며, 총 9가지 파랑 조건에 대해서 실험과 시뮬레이션 간의 평균 파고를 비교 하였으며 최소 0.2에서 최대 5.7퍼센트의 오차를 보였다.

부유식 파력발전시스템을 고려하기 위해서 다물체동역학 해석 솔버를 개발하였다. 다물체동역학 해석 솔버는 오일러 파라미터를 이용하여 물체의 자세를 표현하였으며, HHT- α 암시적 적분기법을 사용하여 다물체시스템의 거동을 계산하였다.

개발된 두 해석 솔버를 이용하여 해상환경을 고려한 부유식 파력발전시스템 거동을 분석하기 위해서 연성해석 프로그램 FAMCAP을 개발하였다. 유체와 부유체와의 상호작용을 위해서 부유체의 형상을 입자로 모델링 하였으며, 기존 속도레벨에서 정의된 유체와 부유체의 상호작용 계산 기법을 가속도 레벨에서 정의 하였다. 유체와 부유체간의 상호작용 검증을 위해 진자운동 기구를 제작하고 파랑조건에 따른 부유체의 진자운동을 고속 카메라를 이용하여 계측하였다. 실험과 동일한 해석 모델을 구성 및 5가

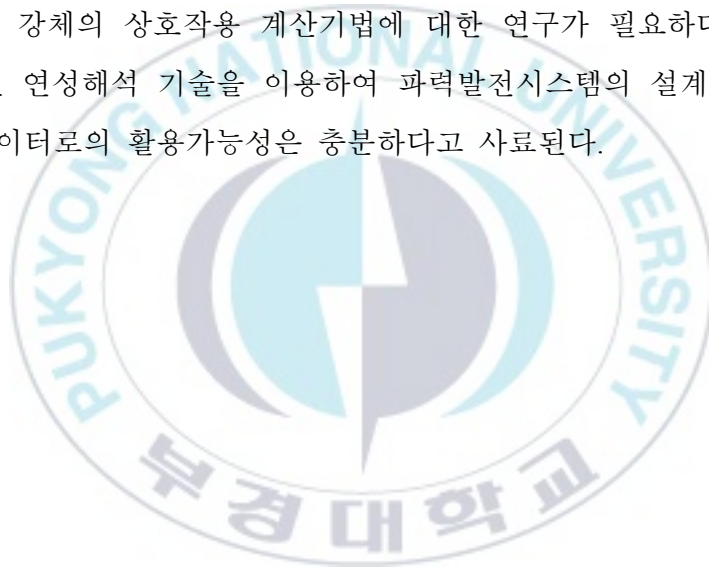
지 파랑조건에서 유체와 강체와의 접촉 시뮬레이션을 수행하였다. 비교 대상으로 주기적인 진자 운동에 대해 각 주기에서의 진폭의 RMS 오차를 실험 결과와 비교하였으며, 최대 각도를 실험 계측 결과와 비교하였으며, 최소 4.4%에서 최대 12.2%의 오차를 보였다.

본 논문에서는 부유식 파력발전시스템을 대상으로 하였으며, (주)인진에서 개발한 부유식 파력발전시스템을 대상으로 하였다. 부유식 파력발전시스템은 각각 동수력 서브시스템과 동력인출장치 두 부분으로 각각 구성하였다. 대상 파력발전시스템은 동수력 서브시스템과 동력인출장치가 서로 로프로 연결되어 부유체의 6자유도 운동이 로프를 통해 동력인출장치로 동력이 전달된다. 로프의 장력을 구하기 위해서 거리 구속식을 구성하였으며, 동수력 서브시스템의 동역학 해석을 통해 로프의 장력을 계산하였다. 규칙파 뿐만 아니라 불규칙파를 재현하기 위한 조파기 모델을 구성하였으며, 각각의 파랑 조건에 대해서 부유식 파력발전시스템의 운동을 계산하였다. 해석을 통해 규칙파와 불규칙파일 때의 동수력 서브시스템과 동력인출장치의 운동 결과를 제시하였으며, 개발된 연성해석 프로그램 FAMCAP이 입자기반의 유체와 다물체동역학시스템의 연성해석에 충분히 활용 가능함을 보였다.

위 연구 내용과 결과를 바탕으로 연구의 독창성을 정리하면 다음과 같다.

- ① ISPH 기법을 이용한 해석 솔버 개발
- ② 다물체동역학 해석 솔버 개발
- ③ ISPH 솔버와 다물체동역학 솔버의 연성해석 알고리즘 구성
- ④ 가속도레벨의 유체-강체 상호작용 계산식 정의
- ⑤ 단일 프로그램 개발 및 GPGPU 병렬 컴퓨팅을 통한 해석 시간 단축
- ⑥ 연성해석 기술을 이용한 부유식 파력발전시스템의 운동 해석

본 연구를 통해 개발된 연성해석 프로그램은 스프링-댐퍼 힘 요소와 회전, 구면, 병진, 유니버설, 실린더 구속 요소등을 이용하여 부유식 파력발전시스템을 모델링하고 파랑 조건에 따른 부유식 파력발전시스템의 해석이 가능하다. 하나의 프로그램에 입자완화유체동역학과 다물체동역학 해석 솔버를 가지고 있어 프로그램간의 데이터 인터페이스가 필요 없고, GPGPU기반의 병렬 컴퓨팅이 가능하여 NVIDIA 그래픽 카드를 이용하여 효율적인 해석이 가능하다. 하지만 유체와 강체의 상호작용 문제에서 실험 결과에 비해 좋은 일치성을 보여주지 않아 해의 정확성을 높이기 위해 유체와 강체의 상호작용 계산기법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 개발된 연성해석 기술을 이용하여 파력발전시스템의 설계를 위한 상대비교 데이터로의 활용가능성은 충분하다고 사료된다.



참고 문헌

- [1] Y. Yu, M. Lawson, K. Ruehl, and C. Michelen, "Development and Demonstration of the WEC-Sim Wave Energy Converter Simulation Tool," in Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium, METS 2014, Seattle, WA, 2014
- [2] A. Simmons, T. Brekken, P. Lomonaco, and C. Michelen, "Creating a Dynamometer for Experimental Validation of Power Take-Off Forces on a Wave Energy Converter," in Proceedings of the IEEE Sustainability Technology Conference, SusTech 2015, Ogden, UT, 2015.
- [3] M.S. Kim, "Study on the absorption efficiency of a floating wave energy converter by using multibody dynamics," Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, 2017.
- [4] J. R. Morison, M. P. O'Brien, J. W. Johnson, and S. A. Schaaf, "The Force Exerted by Surface Wave on Piles", Petroleum, Transactions, American Institute of Mining Engineers 189: 149-154, 1950.
- [5] H. S. Jeong, B. H. Kim, Y. H. Lee, "A Study on the Mooring System for Floating Wave Energy Converter using Numerical Analysis", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 3, pp. 05-10, 2017.
- [6] J. Davidson, J. Ringwood, "Mathematical modelling of mooring systems for wave energy converters-A review", Energies, 10(5), pp. 1-46, 2017.
- [7] H. G. Kang, B. H. Kim, Y. H. Lee, "A Performance Study of a Cross-flow Air Turbine Utilizing an Orifice for OWC WEC", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 3, pp. 54-62, 2017
- [8] L. B. Lucy, "A numerical approach to the testing of the fission

hypothesis”, *Astronomical Journal*, vol. 82, pp. 1013-1024, 1977

[9] J. J. Monaghan. “Simulating Free Surface Flow with SPH” *J. of Comp. Phys.*, 110: pp. 399-406, 1994

[10] C. Altomare, A.J.C. Crespo, B.D. Rogers, J.M. Dominguez, X. Gironella and M. Gomez-Gesteria, “Numerical modeling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics,” *Computers and Structures* 130: pp. 34-45, 2014

[11] R. J. Farahani, R. A. Dalrymple, A. Herault and G. Bilotta, “Three-Dimensional SPH Modeling of a Bar/Rip Channel System,” *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 140: pp. 82-99, 2014

[12] C. Ulrich, “Smoothed-Particle-Hydrodynamics Simulation of Port Hydrodynamic Problems,” *Technische Universitat Hamburg-Harburg*, 2013

[13] A. Skillen, S. Lind, P. K. Stansby and B. D. Rogers, “Incompressible smoothed particle hydrodynamics (SPH) with reduced temporal noise and generalised Fickian smoothing applied to body-water slam and efficient wave-body interaction” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 265: pp. 163-173, 2013

[14] S. J. Cummins and M. Rudman, “An SPH projection method,” *Journal of Computational Physics* 152, 2, pp. 584-607, 1999.

[15] E. S. Lee, “Truly incompressible approach for computing incompressible flow in SPH and comparisons with the traditional weakly compressible approach,” *Ph. D. thesis*, The University of Manchester, 2007

[16] E. S. Lee, C. Moulinec, R. Xu, D. Violeau, D. Laurence and P. K. Stansby, “Comparisons of weakly compressible and truly incompressible

algorithms for the SPH mesh free particle method,” *Journal of Computational Physics* 227, pp. 8417-8436, 2008.

[17] R. Xu, P.K. Stansby and D. Laurence, “Accuracy and stability in incompressible SPH(ISPH) based on the projection method and a new approach.” *Journal of Computational Physics*, 228, 18, pp. 6703-6725, 2009.

[18] S. Yeylaghi, B. Moa, B. Buckham, P. Oshkai, J. Vasquez, C. Crawford, “ISPH modelling of landslide generated waves for rigid and deformable slides in Newtonian and Non-Newtonian reservoir fluids”, *Advances in Water Resources*, Vol. 107, pp. 212-232, 2017.

[19] T. Verbrugghe, J. M. Dominguez, A. J. C. Crespo, C. Altomare, V. Stratigaki, P. Troch, A. Kortenhaus, “Coupling methodology for smoothed particle hydrodynamics modelling of non-linear wave-structure interactions.” *Coastal Engineering*, Vol. 138, pp. 184-198, 2018.

[20] S. Lind, R. Xu, P. K. Stansby and B. D. Rogers, “Incompressible smoothed particle hydrodynamics for free-surface flows: A generalized diffusion-based algorithm for stability and validations for impulsive flows and propagating waves.” *Journal of Computational Physics* 231, 4, pp. 1499-1523, 2012

[21] P. W. Cleary and J. J. Monaghan. “Conduction modeling using Smoothed Particle Hydrodynamics.” *J. of Comp. Phys.*, 148: pp. 227-264, 1999.

[22] S. J. Cummins and M. Rudman. “An SPH Projection Method” *J. of Comp. Phys*, 152, pp. 584-607, 1999

[23] S. Shao and E. Y. Lo. “Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface.” *Ad. in Water*

Resources, 26, 787-800, 2003.

[24] J. J. Monaghan. "Simulating Free Surface Flows with SPH." J. of Comp. Phys., 110, pp. 399-406, 1994.

[25] J. J. Monaghan. "Simulating gravity currents with SPH III Boundary forces." Technical report, 1995.

[26] S. Shao. "SPH simulation of solitary wave interaction with a curtain-type breakwater" Journal of Hydraulic Research, 43, pp. 366-375, 2005.

[27] P. E. Nikravesh. "Computer-Aided analysis of Mechanical System", Prentice-Hall International Inc., 1998.

[28] NVIDIA CUDA C Programming Guide v7.5, NVIDIA Corporation 2015.

[29] NVIDIA CUDA C Best Practices Guide v7.5, NVIDIA Corporation, 2015.

[30] J. Sanders, E. Kandrot, "CUDA by Example : An Instruction to General -Purpose GPU Programming", Addison-Wesley Professional, 2010.

[31] R. Xu, "An Improved Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method and Its Application in Free-Surface Simulations", Ph. D. thesis, The University of Manchester, 2009

[32] W. Jian, D. Liang, S. Shao, R. Chen and K. Yang, "SPH Simulations of Dam-break Flows around Movable Structures", Journal of Offshore and Polar Engineering, 26(1), pp. 33-40, 2016.

[33] GA. Dilts, "Moving-least-squares-particle hydrodynamics-i. consistency and stability." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 44,

pp.1115-1155, 1999.

[34] GA. Dilts, "Moving-least-squares-particle hydrodynamics-ii, conservation and boundaries." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 48, pp. 1503-1524, 2000.

[35] Z. Chen, Z. Zong, M. B. Liu and H. T. Li, "A comparative study of truly incompressible and weakly compressible SPH methods for free surface incompressible flows", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 73, pp. 813-829, 2013.

[36] A. Leroy, D. Violeau, M. Ferrand and C. Kassiotis, "Unified semi-analytical wall boundary conditions applied to 2-D incompressible SPH" Journal of Computational Physics, 261, pp. 106-129, 2014.

[37] J. P. Hughes, D. I. Graham, "Comparison of incompressible and weakly-compressible SPH models for free-surface water flows." Journal of Hydraulic Research, 48(Extra Issue), pp. 105-117, 2010.

[38] D. Negrut, R. Rampsli, G. Ottarsson and A. Sajdak. "On the Use of the HHT Method in the Context of Index 3 Differential Algebraic Equations of Multibody Dynamics" International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002

[39] MSC Software, "ADAMS User Manual" MacNeal-Schwendler, Inc., Oakdale, IA, USA, 2001.

[40] R. Serban, E. Haug, "Analytical Derivatives For Multibody System Analyses", Department of Mechanical Engineering, The University of Iowa, 1998.

[41] S. Koshizuka, A. Nobe and Y. Oka, "NUMERICAL ANALYSIS OF BREAKING WAVES USING THE MOVING PARTICLE SEMI-IMPLICIT METHOD", Int. J. Number. Meth. Fluids, 26, pp. 751-769, 1998

- [42] R. G. Dean and R. A. Dalrymple. "Water wave mechanics for engineers and scientists" Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 2: pp. 172-185, 1991
- [43] E. J. Haug, "Computer-Aided kinematics and Dynamics of Mechanical System, Volume I Basic Methods." Allyn and Bacon, Needham Heights, Massachusetts, 1989
- [44] P. Frigaard, M. Høgedal, M. Christensen, "Wave Generation Theory", Aalborg University, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, pp. 1-55, 1993
- [45] H. J. Ryu, K. Y. Hong, S. H. Shin, M. S. Song and D. Y. Kim, "Analysis of Long-Term Wave Distribution at Jeju Sea Based on SWAN Model Simulation", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 137-145, 2004.
- [46] A. Pecher, J. P. Kofoed, "Handbook of Ocean Wave Energy", Ocean Engineering & Oceanography, Springer Open, 2016.
- [47] 변정현, "파력 발전 국내외 시장 동향", Green Technology Information Portal, Green Technology Trend Report, pp. 147-156, 2014.
- [48] 연합뉴스, "제주에 국내 첫 파력발전소 준공, 120가구 전력공급", <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2016/07/01/0200000000AKR20160701151200056.HTML>, 2016.

Development of MBD-SPH Coupled Analysis Program and Dynamics Analysis of Wave Energy Converter

Chul-Woong Jun

School of Mechanical Design Engineering
The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Main objective of this study are as follows;

- ① To carry out the coupled analysis between ISPH and MBD.
- ② To define the computational method of interaction between particle based fluid and floating body.
- ③ To develop the coupled analysis program of ISPH and MBD.
- ④ To introduce the developed program by applying the behavior analysis of floating-type WEC in wave conditions.

In this study, ISPH method was employed to calculate the motion of the fluid. GPGPU based parallel ISPH solver was developed to decrease the computational time. When the number of particles is about 100,000, the parallel process is faster fifty times than sequence process. To verify the

ISPH analysis solver, the SPH tool of ABAQUS and ANSYS Fluent were used. The dam-breaking and lid-driven cavity flow simulation are carried out to verify the developed code. In the dam-breaking simulation, the shape of free surface, the velocity and the pressure of fluid are compared with ABAQUS. The shape of free surface and the velocity of fluid show good agreements. Regarding the pressure fields, the pressure noise is verified with ABAQUS result, on the other hand, ISPH significantly reduces the pressure noise in comparison with ABAQUS.

Multi-body dynamics program is developed to analyze the dynamic behavior of the multi-body system. Cartesian coordinates and Euler parameters are used to define the translational motion and the rotational motion. RecurDyn which is a commercial multi-body dynamics program developed by FunctionBay is used to verify the MBD solver. Result of MBD solver show a good agreement with RecurDyn. The computational algorithm for the coupled analysis is defined, and FAMCAP(Fluid and Multi-body dynamics Coupled Analysis Program) that is in-house program was developed. The fluid-body interaction technique is developed at the acceleration level to solve the coupled problem. The fluid force is calculated from the acceleration of rigid particles and it is applied to the rigid body as the external force. The coupled analysis between ISPH and MBD is carried out by using this technique.

For an application of the developed program, the dynamic behavior of floating-body type wave power generation system is considered. A numerical wave maker based on the linear wavemaker theory and the wave absorber using an exponential function to remove the reflected wave from the opposite boundary are used. The experiment is carried out to verify the wave motion reproduced by ISPH and the pendulum model is used to verify the simulation of fluid-body interaction. The wave height, wave period and the pendulum motion of a body were compared with experiments. The wave motion for nine wave conditions is compared, and the pendulum motion for five wave conditions of rigid was compared. In the case of wave motion, simulation results show a good agreement with experiments. In the case of pendulum

motion of body, R.M.S. error of the amplitude for each period is calculated and showed an error of maximum 12.2%.

The dynamic behavior of floating type wave energy converter(WEC) is analyzed. The WEC system used in this study consists of the hydrodynamic subsystem and the power take-off(PTO) subsystem. A rectangular shaped floating body is considered. The regular and irregular wave conditions are considered for the motion of floating type WEC system. The irregular wave is reproduced by the superposition of two or more wave conditions based on the linear wave maker theory. The motion of a floating body shows the tendency similar to the wave motion. When the floating body pulls and releases the rope, the rotational motion of generator shows a distinct difference.

As a mentioned, the rotational velocity of the generator is decreased when the rope pulls the floating body. Since the power of the generator is determined by the rotational velocity of the generator, the same tendency is verified. The FAMCAP can be utilized not only in the modeling of the particle-based fluid and the multi-body system but also the coupled analysis between ISPH and MBD. The efficient computing is possible by using the NVIDIA's CUDA. As a result, It is considered that the FAMCAP can be applied to the problem of the coupled analysis of fluid and multi-body system.

감사의 글

제일 먼저 박사과정 진학부터 박사학위 논문을 마무리하기까지 항상 믿어주고 기다려준 사랑하는 혜련이와 어머니, 아버지 그리고 장모님과 장인어른에게 고맙다는 말과 사랑한다는 말을 전해주고 싶습니다. 그리고 무엇보다 박사과정을 견디게 해준 내 삶의 전부가 되어버린 두 아들 승민이와 재욱이에게 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

다음으로 저의 박사학위 논문을 심사해주신 유완석 교수님, 김찬중 교수님, 유동인 교수님, 이재욱 박사님 그리고 석박사 과정 동안 많은 것을 알려주시고 지도해주신 손정현 교수님에게 감사의 말씀을 드립니다. 심사과정에서 저의 학위논문을 꼼꼼히 살펴봐 주시고 많은 부분에 대해서 조언해주셔서 감사합니다. 항상 석박사 과정에서의 경험을 밑거름 삼아 어디서든지 항상 정진해나가는 공학자가 되도록 노력하겠습니다.

학부 4학년에 실험실에 들어와 거의 9년에 가까운 시간 동안 생활하면서 많은 실험실 선배들 그리고 후배들과 함께 하였습니다. 긴 시간을 함께 하지는 못하였지만 실험실에 적응할 수 있도록 도와주신 성준 선배, 석천 선배 그리고 석사 과정을 함께 하면서 연구나 생활면에서 많이 도와준 혜영이와 진석이에게 고맙다는 말을 전합니다. 또한 석박사 과정중에 함께 고생하면서 졸업 후에 각자의 삶을 살고 있는 규석이, 대우, 성필이, 현경이, 상욱이, 민수, 지욱이, 민석이에게도 고맙다는 말을 전하며 특히 학위논문 준비에 많은 도움을 준 상욱이와 민수에게 한 번 더 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 현재 같이 생활하고 있는 성현이, 정훈이, 윤지에게 학위논문 준비에 많은 도움을 주어 고마우면서도 한편으로는 여러 가지로 잘 챙겨주지 못한 것 같아 미안하다는 말을 전하고 싶습니다.