

## 방향 및 주파수 중첩파랑 하 부유체의 CFD 기반 충격하중 및 운동 응답 해석

박슬기<sup>1</sup> · 박중천<sup>2,†</sup> · 박선호<sup>3</sup><sup>1</sup>부산대학교 조선해양공학과 대학원생<sup>2</sup>부산대학교 조선해양공학과 교수<sup>3</sup>한국해양대학교 해양공학과 교수

## CFD Simulation of Floating Body Response to Focused Waves Generated by Directional and Frequency Superposition

Seul-Ki Park<sup>1</sup>, Jong-Chun Park<sup>2,†</sup>, and Sunho Park<sup>3</sup><sup>1</sup>Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Pusan National University, Busan 46241, Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Pusan National University, Busan 46241, Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Ocean Engineering,  
Korea Maritime and Ocean University, Busan 49287, Korea

### 요 약

본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하여 극한파를 재현하고, 해당 파랑 환경 하에서 부유체에 작용하는 충격하중과 동적 거동을 분석하였다. 파랑의 중첩 방식으로는 주파수 중첩과 방향 중첩의 두 가지 기법을 사용하였다. 방향 중첩파는 다방향 규칙파에 위상차를 부여하여 특정 지점에 파랑 에너지를 집중시키는 방식이며, 이를 통해 파고가 약 5배까지 증폭되었다. 해당 조건에서 부유체의 상하동요 및 종동요 진폭은 규칙파 조건 대비 각각 약 7배 및 4배 증가하였고, 밀면에 작용하는 충격하중도 최대 5배 증가하였다. 주파수 중첩을 통해 생성된 쇄파는 steep, spilling, plunging 세 가지 유형으로 구분하여 해석하였으며, 실험 데이터와의 비교를 통해 수치 결과의 신뢰성을 확보하였다. 특히 plunging wave 환경에서는 steep wave 대비 최대 국부 충격하중이 약 70배 이상 증폭되었으며, 이는 동압의 영향이 주를 이루는 것으로 분석되었다. 본 연구는 극한 파랑 하 구조물의 응답 특성을 이해하고 설계에 반영하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract** – In this study, extreme waves were numerically reproduced using Computational Fluid Dynamics (CFD), and the impact loads and dynamic responses of a floating body were analyzed. Two types of wave focusing methods—frequency superposition and directional superposition—were employed. The directional focusing method amplified wave energy by assigning phase differences to regular waves from multiple directions, resulting in wave heights approximately five times greater than those of incident waves. Under this condition, the floating body exhibited vertical and pitch motion amplitudes about seven and four times larger, respectively, and experienced impact loads up to five times greater than in regular wave conditions. Frequency-focused waves were classified into three types—steep, spilling, and plunging—and validated against experimental data. Among them, plunging waves caused the most severe local impact loads, with peak forces approximately 70 times higher than those induced by steep waves. This was mainly due to dynamic pressure generated by the overturning wave front. The findings from this study provide valuable insights for evaluating the structural safety of floating bodies in extreme sea states and can serve as a reference for design optimization in offshore applications.

**Keywords:** Focused waves(집중파), Multidirectional waves(방향파), Extreme waves(극한파), Impact loads(충격하중), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

---

<sup>†</sup>Corresponding author: jcpark@pnu.edu

## 1. 서 론

해양 산업의 확장과 함께 다양한 기능을 수행하는 선박 및 해양 구조물의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이에 따라 해양환경 하중에 대한 구조물의 저항 성능 확보가 더욱 중요해지고 있다. 특히 파랑 하중은 구조물의 안정성과 직결되며, 이를 정량적으로 예측하는 기술은 설계의 핵심 요소로 간주된다(Lee *et al.*[2010]; Sato *et al.*[1999]; Nam *et al.*[2012]; Park *et al.*[2013]; Go *et al.*[2017]; Chung *et al.*[2013]).

이러한 선행 연구에도 불구하고, 실제 해상에서는 유의파고를 크게 초과하는 예기치 못한 파고에 의해 구조물이 손상되는 사례가 여전히 보고되고 있다. 이러한 파랑은 일반적으로 극한파(extreme wave) 또는 집중파(focused wave)로 분류되며, 유의파고의 두 배를 초과하는 경우 극한파로 정의된다.

$$H \geq 2H_s \quad (1)$$

여기서  $H_s = 4\sigma$ ,  $\sigma$ 는 수면 고도의 표준편차(standard deviation of surface elevation)를 의미한다.

대표적인 사례로는 1995년 북해 Draupner 플랫폼에서 관측된 26 m 높이의 파고가 있으며, 이는 유의파고(11.9 m)의 두 배를 넘는 수치로 구조물 손상을 유발하였다(Dysthe *et al.*[2008]). Nikolkina and Didenkulova[2011]에 따르면, 2006년부터 2010년까지 5년간 극한파로 인한 사고는 100건 이상 발생하였고, 약 300명의 인명 피해가 보고되었다. 따라서 보다 안전한 해양구조물 설계를 위해 이러한 극한파의 영향을 정확하게 예측할 필요가 있다.

실제 해양에서 극한파가 발생하는 원인으로는 크게 주파수의 영향, 방향파의 중첩, 지형적인 요인과 환경적인 요인(바람, 해류) 등이 있으며, 현재까지의 연구는 주로 파랑의 주파수가 서로 다른 파랑의 변조를 중심으로 수행되어왔다(Chabchoub *et al.*[2012]; Hino *et al.*[1984]; Ghosh *et al.*[2007]; Hong and Shin[2007]; Park *et al.*[1999, 2002]).

본 연구에서는 방향파의 중첩을 통해 재현한 집중 파랑(focused waves)의 영향도 비교·분석하고자한다. 즉, 극한파의 발생원인 중 가장 대표적인 두 방법인 주파수 중첩과 방향파의 집중에 의한 중첩파랑 환경 모두를 CFD 시뮬레이션으로 재현하고, 이러한 극한 파랑 환경에 의해 부유체에 작용하는 파랑 충격하중과 2자유도 동적거동을 분석한다. 수치 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 실험 결과와 비교·검증을 수행하였다.

## 2. 수치계산 조건 및 기법

### 2.1 지배방정식 및 계산 알고리즘

비압축성 및 점성유동에 관한 유체의 지배방정식으로는 다음과 같은 연속방정식과 URaNS(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + f_i \quad (3)$$

여기서  $U_i$  = 속도 벡터,

$\rho$  = 밀도,

$t$  = 시간,

$x_i$  = 좌표,

$p$  = 압력,

$\nu$  = 동점성계수,

$-\overline{u_i u_j}$  = 난류 응력,

$f_i$  = 중력가속도

본 연구에서는 CFD 상용 소프트웨어인 Star-CCM+ v11.06을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 시간적분 및 공간에 대해 2차 정도의 수치 이산화 기법을, 비압축성 유동 해석 시 요구되는 유체의 속도와 압력을 연성하는 방법으로는 이류항과 점성항을 음적으로 취급하는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다. 계산의 안정성을 고려하여 자유표면은 음해법의 HRIC(High Resolution Interface Capturing)을 적용한 Volume-of-Fluid(VOF, Muzaferija and Peric[1999]) 기법을 사용하였다. 여기서 VOF 기법이란 수치 격자 내 밀도가 다른 두 유체의 체적 비율을 통해 두 유체의 경계면인 자유수면의 위치를 추적하는 기법을 말한다. 즉, 자유표면을 0.5로 정의하고, 그 이상은 유체영역, 그 이하는 유체 외부 영역이 되는 스텝라 함수로 정의한다.

### 2.2 중첩격자법

파랑에너지를 집중시켜 중첩파를 재현하고, 이 극한 파랑 환경 하에서 부유체의 동적거동을 해석하기 위해 중첩격자법을 사용했다. 중첩격자법은 운동하는 물체를 수치적으로 해석하는 방법 중의 하나이다. Fig. 1에 보이는 바와 같이, 물체를 포함하는 내부격자계와 수치파랑수조의 역할을 하는 외부격자계를 도입하여 각각의 격자계에서 계산을 수행한다. 즉, 외부수조격자계에서 파랑환경의 재현을 계산하며, 내부격자계를 전체적으로 이동시키며 물체의 동적거동을 모사한다. 단, 두 격자계가 접하는 격자 간 경계면에는 적당한 경계조건을 부여하여 격자계 간의 물리적 연속성을 만족시켜야하는데, 본 연구에서는 격자 간 경계면에서의 물리량을 2차 정확도의 최소자승법으로 교환하여 내부와 외부의 유동장이 연결된다. 보간 물리량에는 유체의 속도, 압력 및 VOF로 정의되는 밀도함수 등이 있다.

### 2.3 수치 파랑수조의 벽면 경계조건

수치파랑수조의 각 벽면은 실험목적에 따라 크기와 형태, 성격 등을 변화시킬 수 있다. 기본적으로, 수치수조 내 벽면은 점착 조건을 적용하는 마찰벽면이나, 미끄럼 조건을 적용하는 미끄럼벽면으로 가정된다. 본 연구에서는 수치조파기가 위치하는 입구경계부와

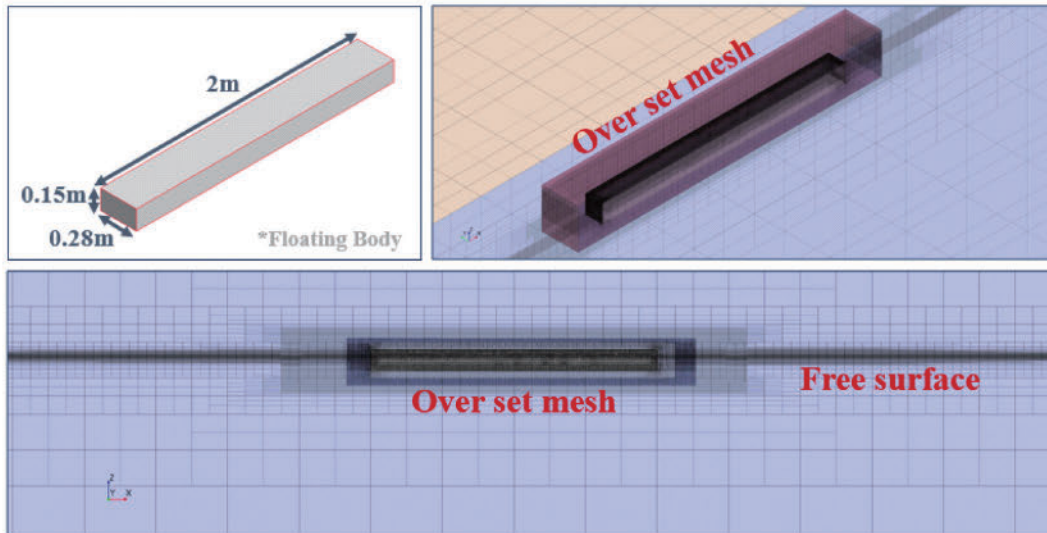


Fig. 1. Schematic view of box barge and overset grid.

수치소파기가 위치하는 출구경계부를 제외한 모든 벽면은 마찰벽면을 적용하였다.

수치조파기의 경우, 격자 morphing이나 deforming 방법을 이용하여 실제 실험에서의 조파기 운동을 직접적으로 모사하는 방법이 있으나, 이는 방대한 계산량과 시간을 요한다. 따라서 본 연구에서는 침수중력파이론이나 천수파 이론을 이용하여 수치 조파기에 적절한 속도분포를 주어 파랑을 생성하였다.

### 2.4 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건

CFL 조건(Courant-Friedrichs-Lewy condition)은 Courant 수를 일정하게 고정하여 시간 간격을 가변적으로 사용하는 방법으로, 수치 안정성을 확보할 수 있는 기법 중 하나이다. 계산 시간을 절약하기 위해서는 가능한 큰 시간간격으로 계산을 수행하는 것이 바람직하지만, 시간간격의 폭이 길수록 수치 안정성이 나빠지고 짧을수록 좋다. 따라서 수치 안정성을 확보하기 위해서는 시간간격 폭을 어떤 제한 값 이하로 설정해야 한다. 이때, 기준이 될 수 있는 무차원의 수가 Courant 수이다. Courant 수는 식 (4)와 같으며, 물리적으로 한 시간 간격동안 유체가 몇 개의 격자를 진행하는지를 나타낸다.

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \tag{4}$$

여기서  $u$ 는 유동의 속도,  $\Delta t$ 는 시간 간격 그리고  $\Delta x$ 는 격자 크기를 의미한다.

일반적으로, 양해법의 수치안정성 조건은  $C < 1$ 이며, 음해법은 양해법보다 수치 안정성이 뛰어나므로 보다 높은 Courant 수를 허용한다. 본 연구에서는 파랑에너지를 집중시켜 중첩파랑을 재현하고, 이 극한 환경에 의해 부유체에 작용하는 충격하중을 예측하는 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 2와 같이 파랑이 중첩되는 순간 유체의 속도는 급격히 증가하며, 이는 충격 하중에 상당히 민감한 영향을 미친다. 유체의 속도가 증가하면 Courant number도 커져 계산 불안정해지기 때문에, 신뢰도가 높은 시뮬레이션을 위해 Courant number를 0.5로 설정하여 CFL 조건에 따라 시간 간격을 가변적으로 설정하였다.

## 3. 다방향 집중파 시뮬레이션

### 3.1 격자 수렴성 테스트

다방향 집중파 시뮬레이션의 격자 크기를 결정하기 위해 수렴성

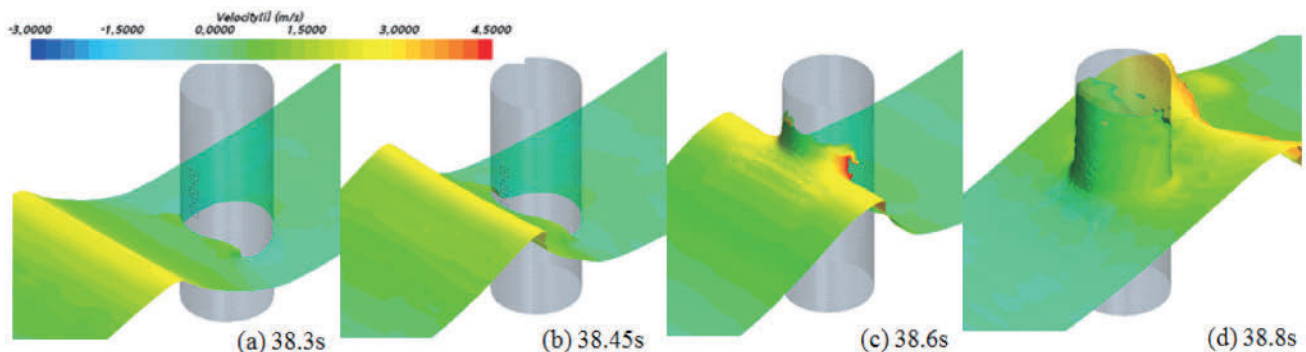
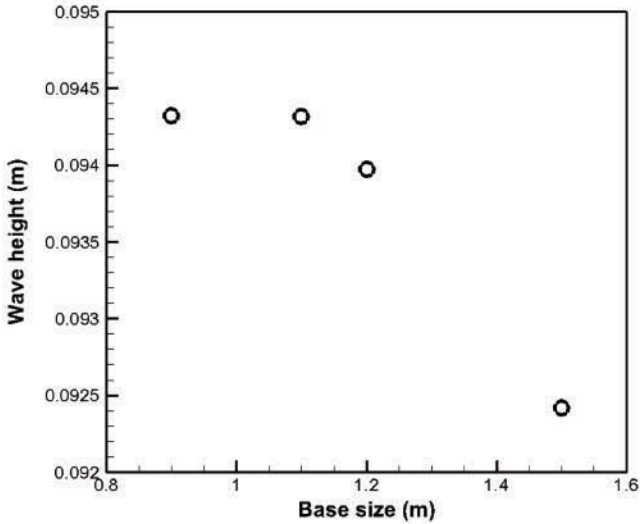


Fig. 2. Simulation of impact loads in focused waves.

**Table 1.** Cases of mesh status for convergence test

Base size [m]	$dx$ [m]	$dy$ [m]	$dz$ [m]	Grid number
1.5	0.12	0.12	0.06	0.7 M
1.2	0.096	0.096	0.048	1.3 M
1.1	0.088	0.088	0.044	1.5 M
0.9	0.072	0.072	0.036	2.4 M

**Fig. 3.** Results of convergence test.

테스트를 수행하였다. Table 1은 격자의 base size에 따라 각 방향에 배치되는 격자 크기와 전체 격자수를 나타낸다. 이때, 종횡비(aspect ratio,  $dx/dz$ )는 2로 고정했다. 단,  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ 는 각각 (파랑 진행) 방향, (수조 폭) 방향, (연직) 방향의 격자 크기를 의미한다.

Fig. 3은 재현한 집중파의 파고 시계열을 base size에 따라 비교한 그래프이다. 자유수면( $z=0$ )을 중심으로 파정과 파저의 크기가 대칭이 아닌 것을 확인할 수 있다. 이처럼 비선형성이 강한 파랑은 일반적으로 가파른 파정과 완만한 파저를 가지는 특성을 보인다. 격자의 base size가 작아질수록 파저와 파정의 진폭이 커지며 비교적 안정적인 파랑이 생성되는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 방향파 생성 방법

다방향 집중파를 재현하기 위해서는 Snake-type 조파기 이론을 이용하였다(Kim *et al.*[2000]). 각 조파판에서 일정한 파고( $H=2$  cm)와 주기( $T=1.44$  sec)를 갖는 규칙파랑에 특정한 위상차를 부여하여 방향파를 생성하고 한 지점에 집중시킨다. 수치조파기에 위치한 각 격자점에서 부여한 위상차는 식 (5)과 같다.

$$\varepsilon = k_n \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

여기서,  $x_j$ 와  $y_j$ 는 조파영역 내 격자의 좌표이며,  $x_i$ 와  $y_i$ 는 목적한 파랑 집중 위치의 좌표를 나타낸다.

파랑 생성에는 모형시험의 조파기를 직접적으로 모델링하는 방

법이 아닌 선형중첩이론(Dean & Dalrymple[1991])에서 얻어진 파랑 속도를 수치수조의 유입경계면에 입력하는 방법을 사용하였다. 입구경계에서의 파랑 유입속도 분포는 선형파 방정식의 해를 이용하여 식 (6)~(8)과 같이 표현된다.

$$\eta = \sum_{n=1}^N A_n \cos(k_{nx}x + k_{ny}y - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (6)$$

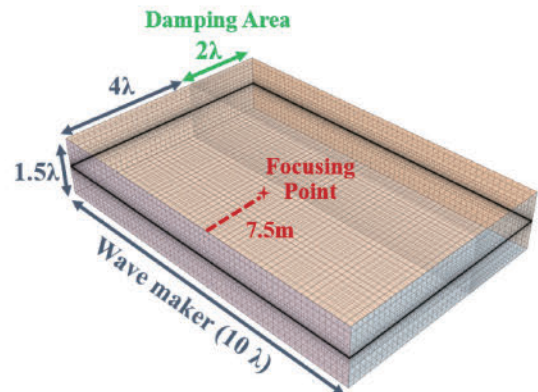
$$\left( \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right) = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \cos(k_{nx}x + k_{ny}y - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (7)$$

$$w = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\sinh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \sin(k_{nx}x + k_{ny}y - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (8)$$

여기서,  $k_x$ 와  $k_y$ 는  $x$ ,  $y$ 방향에 대한 파수이며, 본 연구에서는 일정한 파고와 주기의 규칙파랑을 생성하므로  $k_x$ 와  $k_y$ 는 간단히  $k_x = k \cos \theta$ 와  $k_y = k \sin \theta$ 로 표현할 수 있다. 또한  $A$ ,  $k$ ,  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\varepsilon_n$ 는 각각 파랑의 진폭, 파수, 각주파수, 방향, 위상차를, 그리고  $N$ 은 파랑의 성분수를 나타낸다.

### 3.3 다방향 집중파 재현

Fig. 4는 방향파 재현에 사용한 계산 영역의 치수를 나타내며, 이는 실험을 수행한 OTRC(Offshore Technology Research Center, USA)의 3차원 파랑수조의 크기에서 착안하였다(Kim *et al.*[2000]). 파고와 파장이 동일하지만 위상차가 다른 규칙파를 생성하여 위상차에 따라 한 지점에서 집중되도록 설계했으며, 집중되는 위치는 수치조파기 중앙에서부터 파랑 진행방향으로 7.5 m 떨어진 지점이다. 실험과 같이 유한한 개수(48개)의 위상차가 아닌 연속적인 위상차(식 (5))를 각 격자에 적용하였다. 반사파의 영향을 배제하기 위해서 유동장 출구에서부터 상류 방향으로 파장의 2배까지 소파 영역을 설정하

**Fig. 4.** Schematic view of 3-D numerical wave tank.

**Table 2.** Mesh condition (Multidirectional focused wave)

Mesh Cond.	Principle
Grid Number	4.0 M
Mesh Model	Trimmer Extruder

**Table 3.** Physical condition (Multidirectional focused wave)

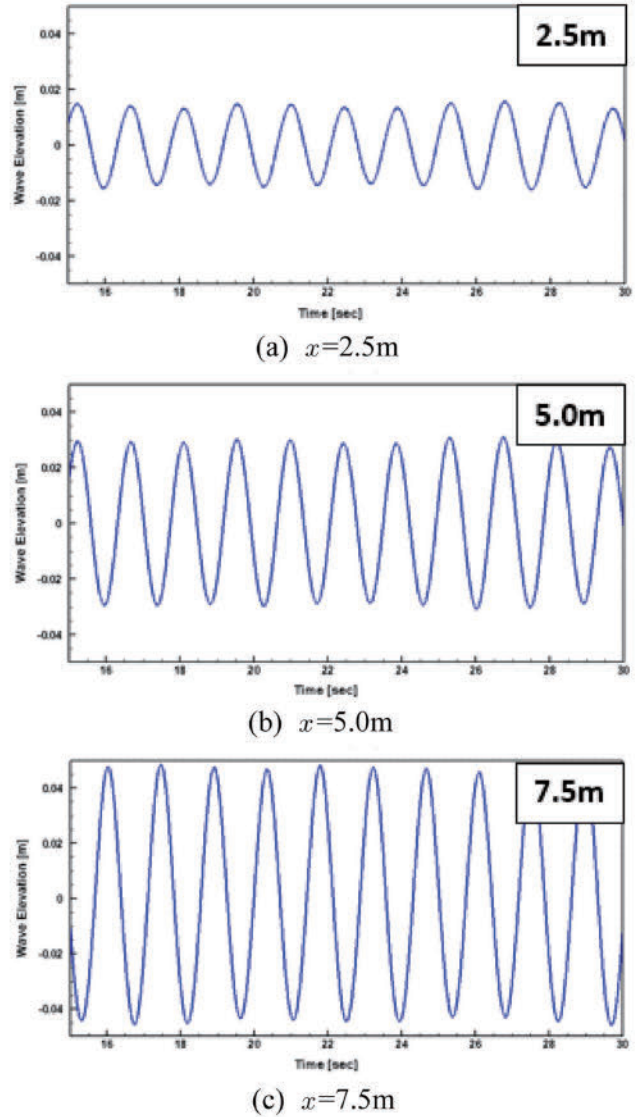
Calculation Cond.	Principle	
	Turbulence model	Laminar model
Physics Model	Free Surface	VOF VOF Waves VOF Wave Damping
	Numerical Scheme	Convection Temporal
	Solver type	Time step Sub-iteration
		2nd order 2nd order 0.001s 5

였다. Table 2와 3은 다방향 집중파를 재현하기 위한 시뮬레이션의 격자 상태와 물리 모델 조건을 나타낸다.

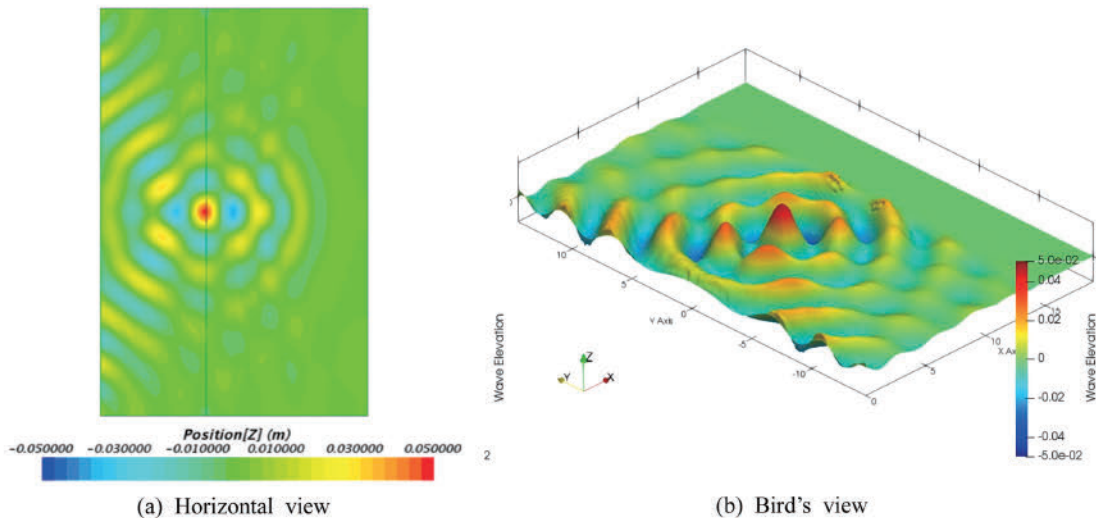
파향을 고려한 집중파의 유동장은 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 수치 조파기로부터 파랑 진행 방향으로 각각 2.5 m, 5.0 m, 7.5 m 떨어진 지점에서 측정한 파고의 시계열을 나타낸다. 목적인 집중 위치(파랑 유입 위치에서 7.5 m 떨어진 지점에 가까워질수록 보다 높은 파고를 가지는 것을 확인할 수 있다. 목적인 집중 위치에서는 수치조파기로 생성한 규칙파랑의 파고보다 약 5배 높은 파고가 발생하며, 중첩파랑이 해당 지점에서 반복적으로 생성되는 것을 볼 수 있다.

**3.4 시뮬레이션 결과의 비교 검증**

수치적으로 재현된 다방향 중첩파의 정확도를 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 7과 같이 공개된 실험 결과(Liagre[1999])와 비교해



**Fig. 6.** Time history of wave elevation.



**Fig. 5.** Wave configuration.

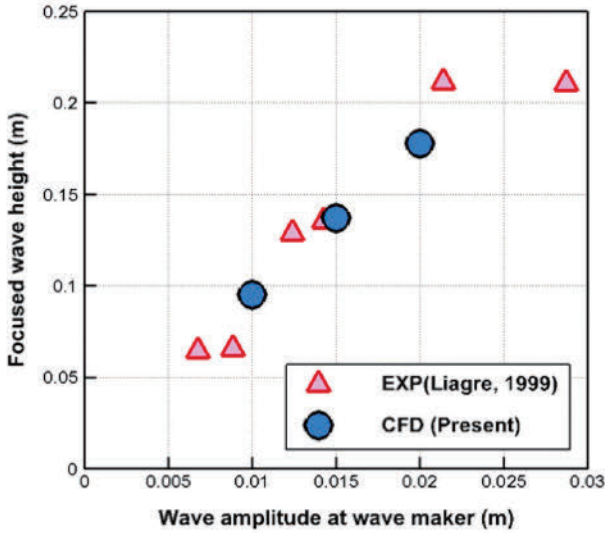


Fig. 7. Comparison of wave elevation.

보았다. 실험은 TAMU(Texas A&M Univ)에 위치한 Offshore Technology Research Center's (OTRC)의 3차원 파랑수조에서 수행되었다. Fig. 7의 가로축은 조파기 근처에서 생성된 파랑의 진폭을 의미하며, 횡축은 생성된 집중 파랑의 파고를 의미한다. 분홍색의 세모 표시는 실험의 결과를, 파란색의 원형 표시는 CFD의 결과를 나타낸다. CFD의 결과가 실험의 경향성을 매우 유사하게 따라가는 것을 확인할 수 있다.

3.5 부유체의 동적 거동 해석

앞서 재현한 다방향 중첩파랑 환경 하에서 2 m × 0.28 m × 0.15 m 크기의 barge선에 대한 동적 거동을 해석하고 물체에 작용하는 파랑 하중을 측정하였다. 이때, 다방향 집중파가 발생하는 지점(조파기 중심에서부터 파랑 진행방향으로 7.5 m 지점)에 물체의 중심을 위치시켰다. 다방향 집중파의 영향력을 단순 규칙파랑과 비교하기 위해 Table 4와 같이 3가지 조건의 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 조건에서 수치조파기로 생성한 규칙파의 파고는 동일(H = 2 cm)하며, 이는 수조에 동일한 에너지의 파랑이 존재할 때 방향파의 효과만으로 생기는 현상 차이를 비교하기 위함이다.

물체의 운동이 허용된 Case 2, Case 3의 경우에서 Heave, Pitch 운동 시계열을 Fig. 8에 나타내었다. 집중파랑에서 물체의 운동 진폭이 규칙파랑의 결과와 대비하여 상하동요 진폭은 7배, 그리고 종동요 진폭은 4배 크다.

다방향 집중파랑 환경 하에서의 동적거동에 대한 비교가능한 선행 연구가 마땅치 않아, 현재의 결과를 오픈 CFD 소프트웨어인

Table 4. Simulation cases

Case #	1	2	3
Waves	Focused	Focused	Regular
Body Motion	Stationary	2-DOF	2-DOF

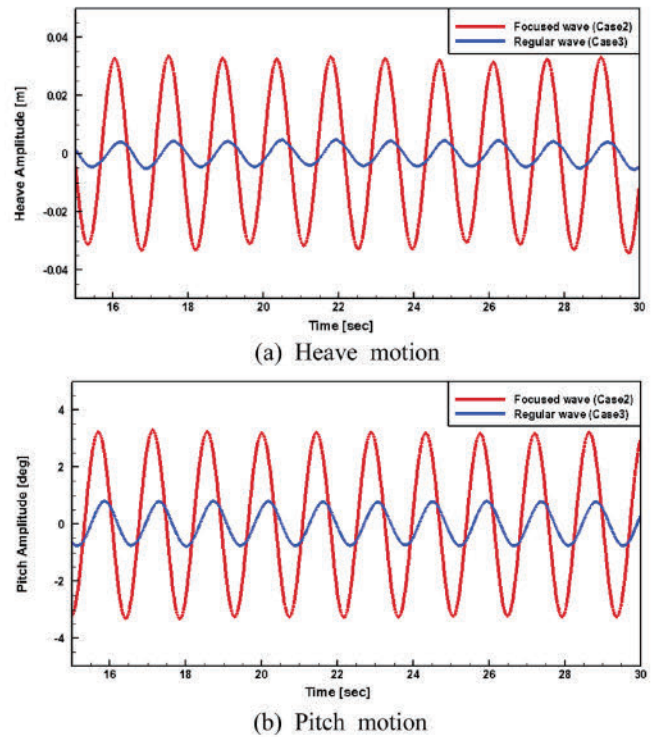


Fig. 8. Time history of 2-DOF (Heave & Pitch) motion.

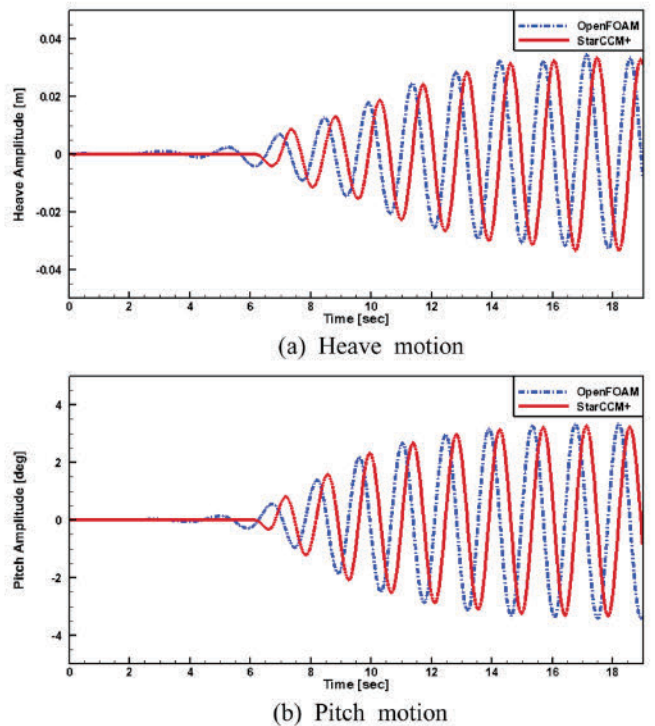


Fig. 9. Comparison of 2-DOF (Heave & Pitch) motion results.

OpenFOAM으로 동일 조건에서 수행한 결과(Jeon et al.[2022])와 비교하였다. STAR-CCM+을 이용하여 계측한 집중파랑 환경 하 2 자유도 운동 시계열을 OpenFOAM의 결과와 비교한 그래프는 Fig. 9와 같다. 빨간색 실선은 Star-CCM+의 결과이며 파란색 점선은

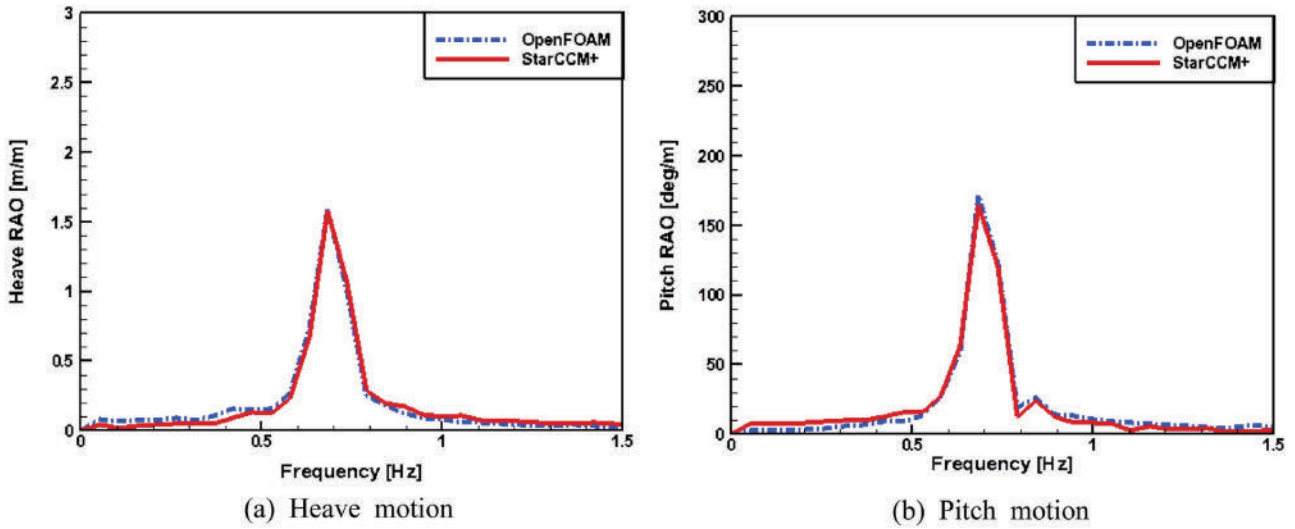


Fig. 10. Comparison of 2-DOF (Heave & Pitch) ROA results.

OpenFOAM의 결과이다. 두 시계열에서 나타나는 위상 차이는 수치 안정화를 위해 계산 초기에 구속했던 운동을 허용한 시각의 차이이며, 거동의 경향성은 매우 비슷한 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 계측한 운동의 시계열로부터 구한 운동 Response Amplitude Operator(RAO)의 결과이다. 운동 결과는 수치조파기 위치에서 생성한 규칙파의 진폭( $A = 1 \text{ cm}$ )으로 무차원화를 하였다. OpenFOAM 과 상용소프트웨어의 운동 크기 및 경향성 모두 일치하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 주파수 중첩파 시뮬레이션

##### 4.1 주파수 중첩파 재현 종류

서로 다른 주파수의 파랑을 순간적으로 중첩시켜 집중파를 재현하였다. 본 연구에서는 집중파를 쇄파 동반 여부와 쇄파되는 형상에 따라 3가지(*steep*, *spilling*, *plunging*)로 구분한다(Fig. 11). 쇄파하지 않는 *steep wave*, 쇄파하며 하얀 거품을 동반하는 *spilling wave*, 파랑이 크게 *over turning*하며 쇄파가 일어나는 *plunging wave*가 있다. 특히 쇄파를 동반하는 집중파는 해양구조물에 국부적 손상을 야기하고 심각하게는 전체 구조물을 붕괴시켜 매우 위험하다(Hong and Shin[2007]). 해상에 존재하는 일반적인 파도들은 대부분 쇄파를 동반하며, 이중 쇄파가 가장 심하게 일어나는 *plunging type*의 파도는 다른 극한파보다 강한 충격력을 발생시킨다고 알려져 있다. 최근 *plunging type*의 파도 생성에 관한 연구들이 활발히

진행되고 있으나, 대부분 규칙파 생성하고 경사진 면에서의 천수효과로 발생하는 *plunging type* 파도에 대한 연구들이 주를 이루고 있다(Hino *et al.*[1984]; Chen *et al.*[1999]; Ghosh *et al.*[2007]). 앞서 언급한 것과 같이, 현재 대부분의 연구가 경사진 지형에 의해 생성되는 *plunging type*의 파도에 대해 진행되고 있지만, 이는 심해에서 운영하는 해양구조물에는 적용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 경사진 면이 아닌 일정 수심을 가지는 수치 수조에서 주파수의 중첩 방법을 이용하여 3가지 종류(*steep*, *spilling*, *plunging*)의 2차원 집중 파랑을 생성하고, 이러한 주파수 중첩파랑이 부유체에 가하는 충격하중에 대한 영향을 확인해 보았다.

##### 4.2 2차원 주파수 중첩파 재현

Fig. 12은 주파수 중첩파 재현에 사용한 수치 계산 영역의 치수를 나타내며, 이는 모형실험을 수행한 KRISO(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) 2D Flume의 크기를 착안했다. 단, 재현하고자 하는 집중파랑이 2차원 파랑이므로 경제적인 계산을 위해 폭은 무시하였다. Table 5와 Table 6은 파랑재현을 위해 사용한 격자 상태와 수치계산 기법 나타낸다.

파랑 재현을 위한 자유 수면에서의 조밀한 격자 및 시간 이산화에는  $\Delta x = 0.02 \text{ m}$ ,  $\Delta z = 0.01 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.002 \text{ s}$ 로 설정하였다. 여기서,  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ 는 각각  $x$ 방향(파랑 진행방향),  $z$ 방향(연직방향)의 격자 크기를 의미하며,  $\Delta t$ 는 시간 이산화 간격을 의미한다. 파랑 재현에 사용한 격자의 개수는 약 10만개이다.

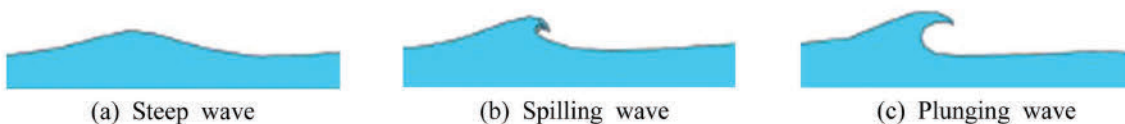


Fig. 11. Types of frequency focusing waves.

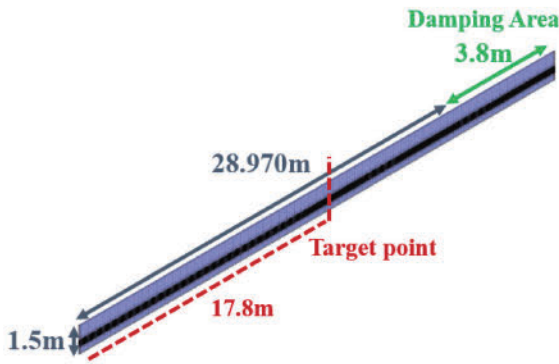


Fig. 12. Schematic view of 2-D numerical wave tank.

Table 5. Mesh condition (2-D Frequency focusing wave)

Mesh Cond.	Principle
Grid Number	0.1 M
Mesh Model	Trimmer

수치 수조의 경우, 입구경계는 수치조파기, 출구경계는 압력유출조건, 측면과 바닥면은 미끄럼 벽면 조건으로 설정했다. 파랑 생성은 모형시험에서의 조파기의 움직임을 계측하여 시간 미분한 뒤 그 속도를 유입경계조건에 대입하는 방법을 이용하였다. 이는 실제 조파기의 움직임을 모사하기 위해서 *morphing* 또는 *deforming* 기법을 사용하

Table 6. Physical condition (2-D Frequency focusing wave)

Calculation Cond.	Principle	
Physics Model	Turbulence model	k-omega turbulence model
	Free-Surface	Volume of Fluid
		VOF Waves
Numerical Scheme	Convection	2nd order
	Temporal	2nd order
	Solver type	0.002s (Courant number = 0.5)
	Sub-iteration	10

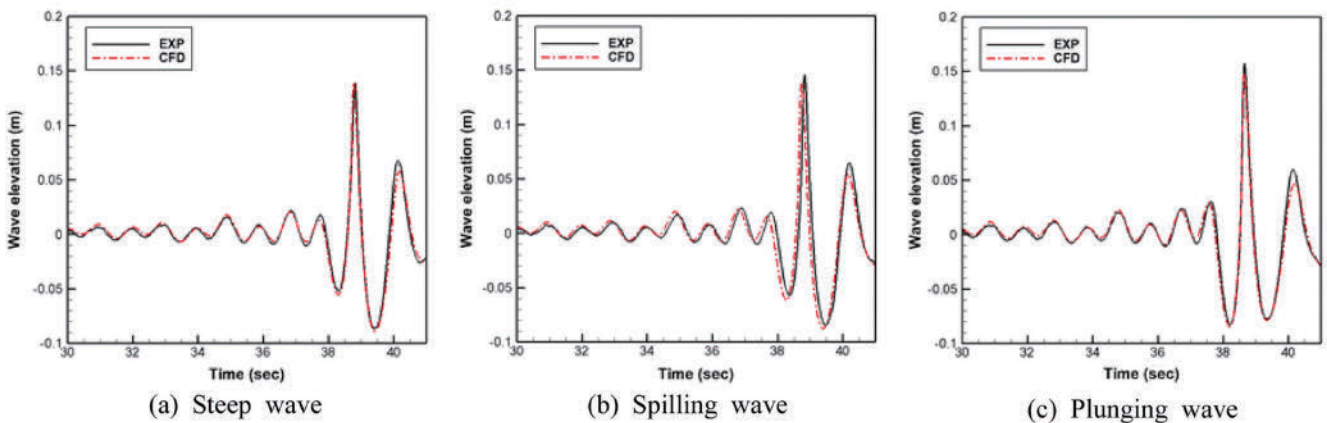


Fig. 13. Time history of wave elevation.

는 것보다 상대적으로 수치계산 시간을 줄일 수 있는 장점을 가진다.

해당 시뮬레이션 조건으로 재현한 주파수 중첩파의 파고 시계열과 모형시험에서의 결과를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 3가지 주파수 중첩파의 최대 파고의 높이는 모두 약 16cm이며, 모형시험의 최대 파고와 수치해석 결과의 차이는 다음과 같다: 0.2%(steep), -5.2%(spilling), -5.6%(plunging).

쇄파를 동반하지 않는 steep wave와 쇄파가 가장 심하게 일어나는 plunging wave의 결과는 최대 집중파가 발생하는 시간 이력이 매우 유사한 것을 확인 할 수 있다. 하지만 일명 white cap이라고 불리는 거품을 동반하며 쇄파되는 spilling wave의 경우, 수치해석에서의 집중파랑이 모형시험보다 약간 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있다. 이는 현재 사용하고 있는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)은 이러한 거품을 동반하는 쇄파를 표현하는 것에 한계를 가지기 때문이다.

### 4.3 3차원 시뮬레이션 조건

쇄파 유형에 따라 고정된 구조물에 작용하는 파랑 충격하중을 계측하고 계측한 파력을 KRISO에서 수행된 실험 결과와 비교함으로써 결과의 타당성을 검증하였다.

Fig. 14는 사용한 수치 계산 영역과 치수를 나타내며, 이는 모형 실험을 수행한 KRISO(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) 2D Flume의 크기를 따른다. 단, 현재의 시뮬레이션의 경우, 파랑 재현만 수행했던 앞선 시뮬레이션과 달리 3차

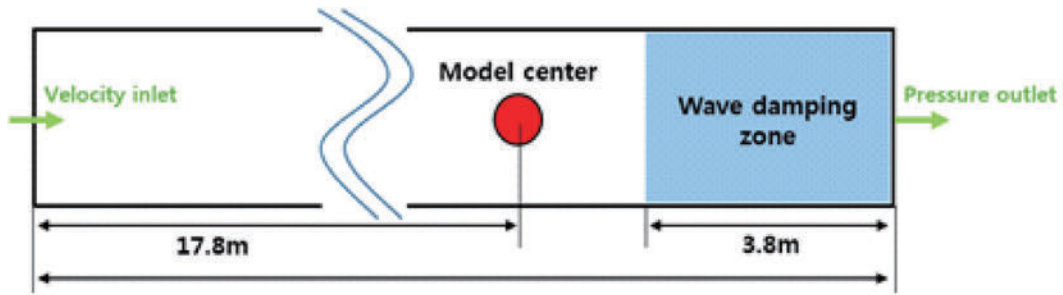


Fig. 14. A sketch of computational domain.

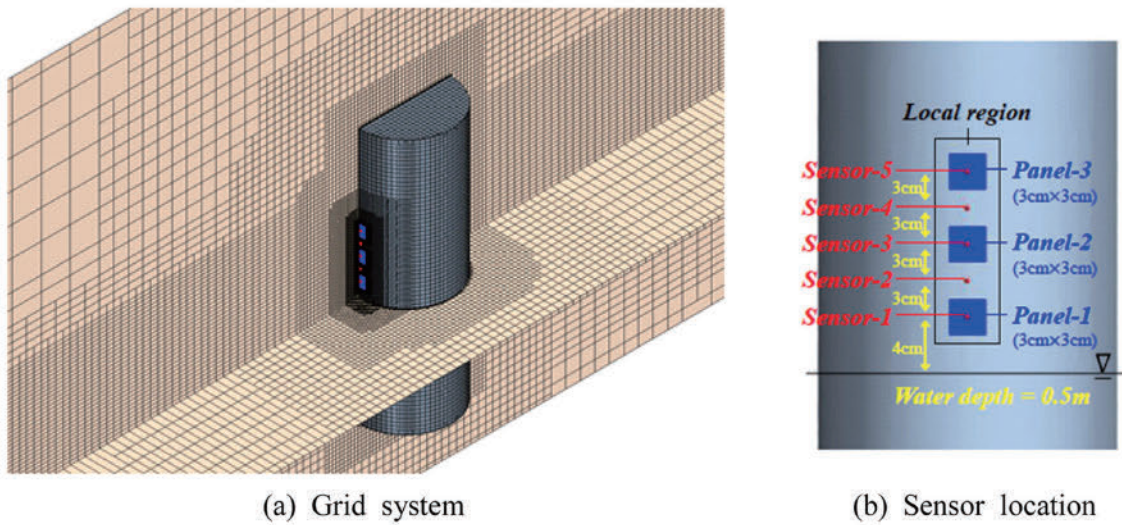


Fig. 15. Numerical model.

원 효과를 포함해야하므로 모형실험을 수행한 수조 폭과 동일하게 수치수조 폭의 크기를 0.6 m로 설정하였다.

구조물에 작용하는 국부 충격력을 측정하기 위해 3개의 Force sensor와 5개의 Pressure sensor가 부착되어 있는 고정된 절단 연직 원형 실린더를 모델링하였다. 원형 실린더 구조물은 쇄파생성 위치에 설치되었으며, 그 위치는 조파기로부터 17.8 m에 위치한다. 실린더의 외경은 25 cm, 높이는 81.5 cm, 수심은 50 cm이다. 압력센서의 기준 위치는 최대파고 높이로 결정되었으며, 이는 Fig. 15(b)와 같이 수조 바닥면에서 16 cm에 위치한다.

자유 수면에서의 격자 크기는 2-D 파랑 재현 시뮬레이션과 동일하게 설정하였다. 단, 격자 크기는 파랑 재현과 더불어 충격력 추정에도 매우 중요한 요소이기 때문에 Fig. 15(a)와 같이 원형 실린더 주위에 조밀한 격자를 사용하였다. 3차원 시뮬레이션에서 적용한 격자

Table 7. Mesh condition (3-D Frequency focusing wave)

Mesh Cond.	Principle
Grid Number	1.0 M
	Trimmer
Mesh Model	Surface remesher
	Prism layer

모형은 Table 7과 같고 물리 모델은 2차원의 경우와 동일하다.

#### 4.4 부유체에 작용하는 충격하중 해석

앞서 기술한 것처럼 5개의 입력 센서와 3개의 힘 센서에서 파랑 충격하중을 계측하였다. 그 중 집중파의 파정이 위치하는 최상단부 센서(즉, 수조 바닥면에서 16 cm 떨어진 지점)에서 가장 큰 파랑 하중이 계측되었다. 최상단부에 위치한 힘 센서에서 측정된 충격력 시계열을 모형실험 결과와 비교하여 Fig. 16 우측에 표현하였다. 모형실험결과는 검정색 실선으로, 수치해석 결과는 붉은색 실선이다. 모형실험과 수치계산 결과의 경향성이 좋은 일치율을 보이며, 모형실험의 최대 하중과 수치해석 결과의 차이는 다음과 같다: 9.2%(steep), 14.8%(spilling), -2.4%(plunging).

Fig 16 좌측은 모형실험과 시뮬레이션 상에서 집중파가 충돌하는 순간의 파형을 나타낸다. 파형이 모형 실험과 시뮬레이션 간에 상당히 유사한 것을 볼 수 있다. 모형실험에서 관찰되는 plunging wave의 curling 현상이 수치계산에서도 적절히 구현된다. curling 현상이란 비선형성이 매우 강한 파랑의 파형이 뒤집히며 쇄파가 되는 현상을 의미한다. 이 현상은 구조물에 매우 강력한 충격력을 가하며, 따라서 매우 중요한 설계 요인이다.

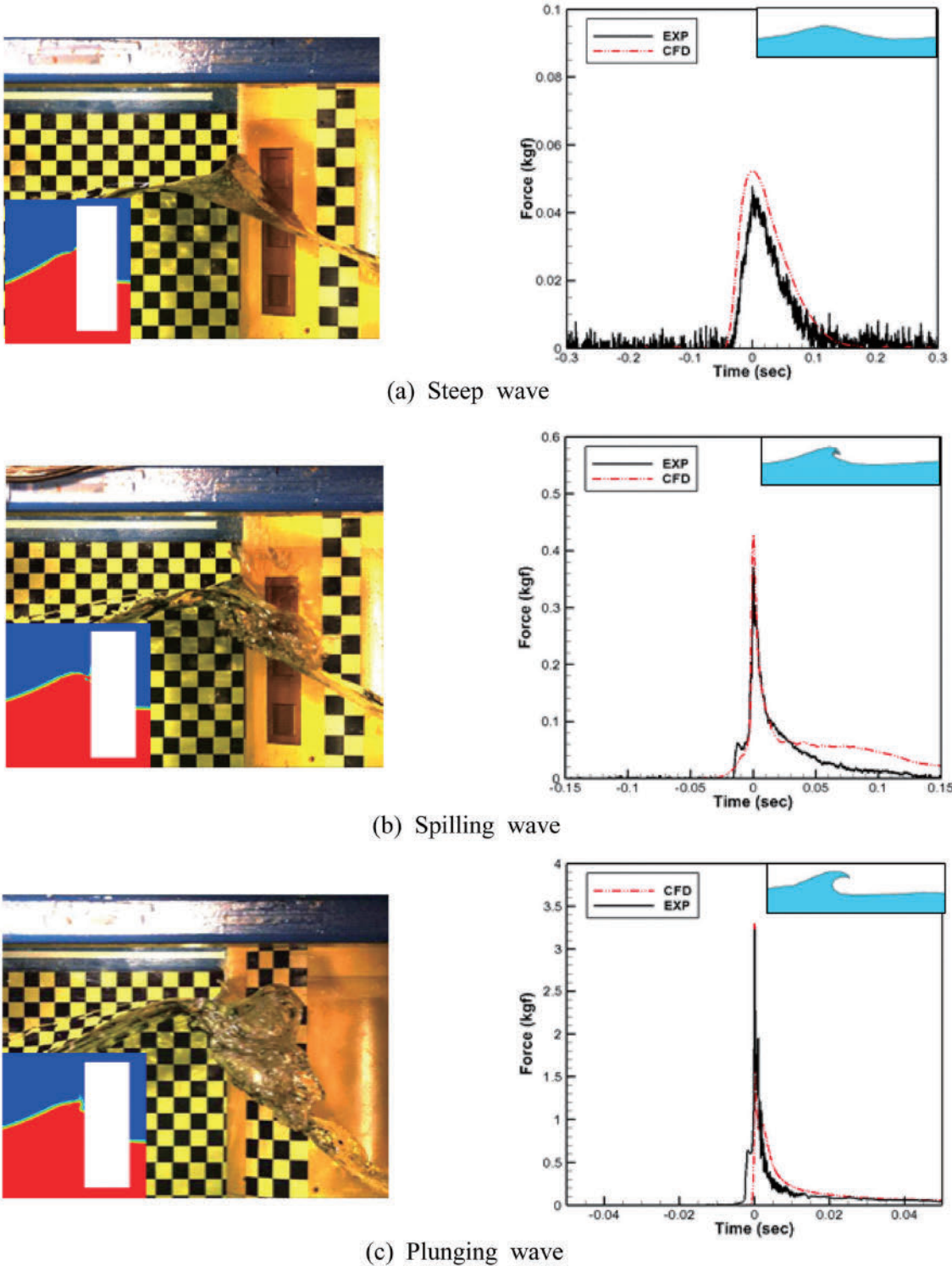


Fig. 16. Snapshots of the impact moment between the cylinder and waves (left) and local impact load (right).

### 5. 수치해석 결과

#### 5.1 다방향 집중파 환경 하 동적거동 분석

Fig. 17은 집중파 발생 지점에서 파랑 조건 및 운동 구속 조건에 따른 최대 파고, 2-DOF 운동 진폭과 부유체의 밑면에 작용하는 힘의

크기를 그래프로 나타낸다. 집중파 환경 하 결과를 규칙파랑 환경 하의 결과와 비교했을 때, 집중파의 파고는 약 5배, 상하동요 진폭은 7배, 종동요 진폭은 4배 크게 나타난다(Fig. 17(a)). 2-DOF 운동을 하는 부유체의 밑면에 가해지는 힘의 크기를 비교해보면, 규칙파의 경우에 비해 집중파 환경 하에서 약 5배 더 큰 하중이 예측된다(Fig.

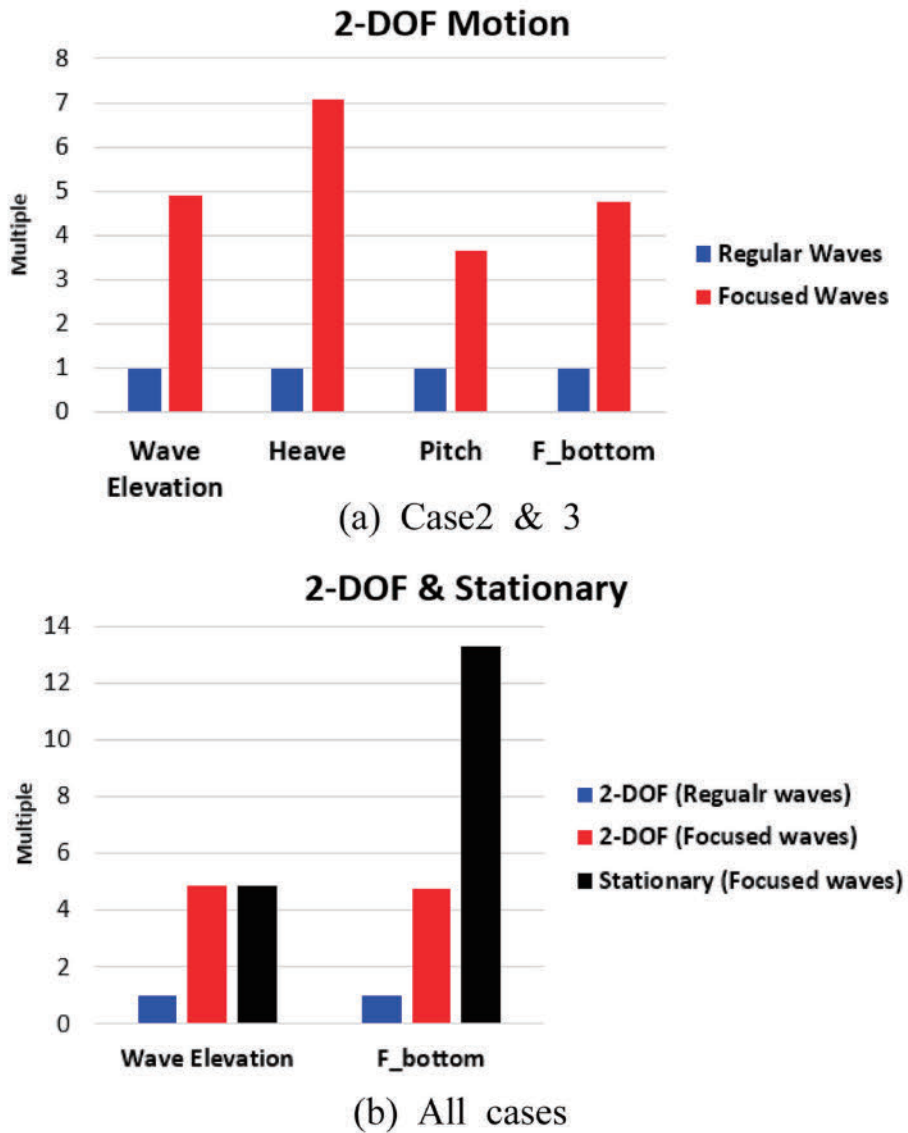


Fig. 17. Simulation results for directionally-focused waves.

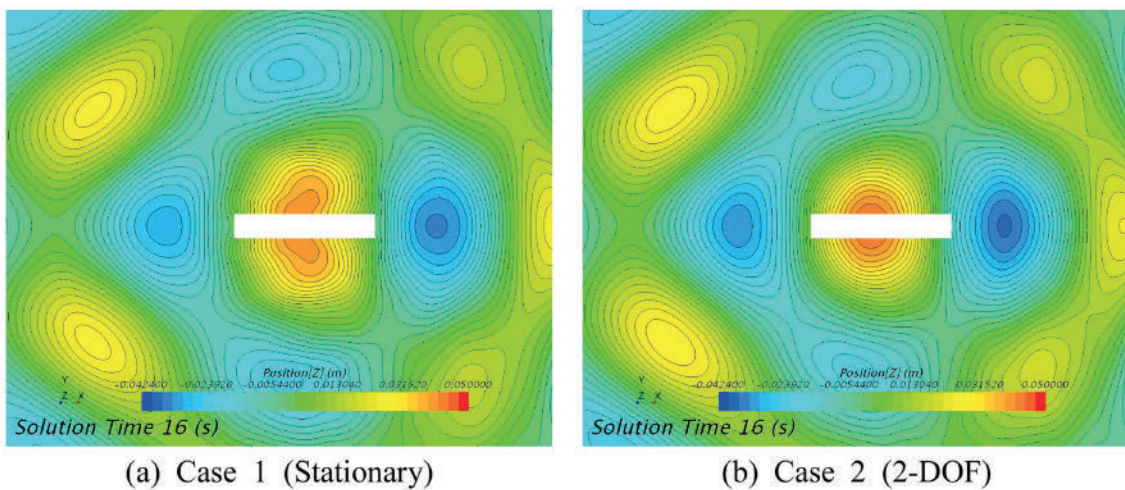


Fig. 18. Flow field around floating body.

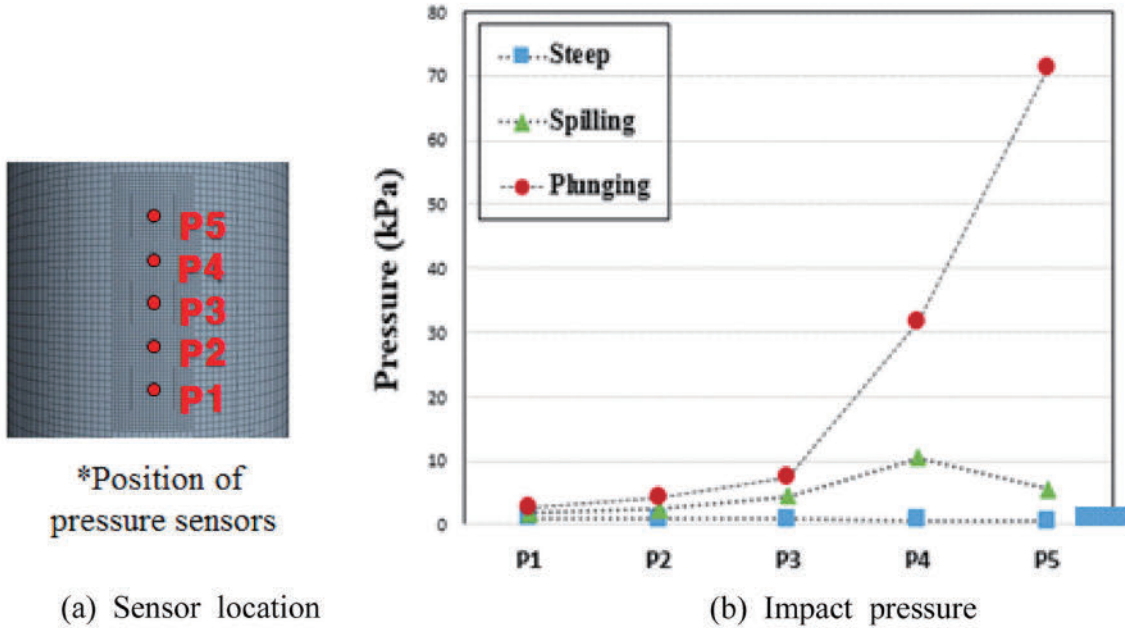


Fig. 19. Impact pressure acting on each sensor.

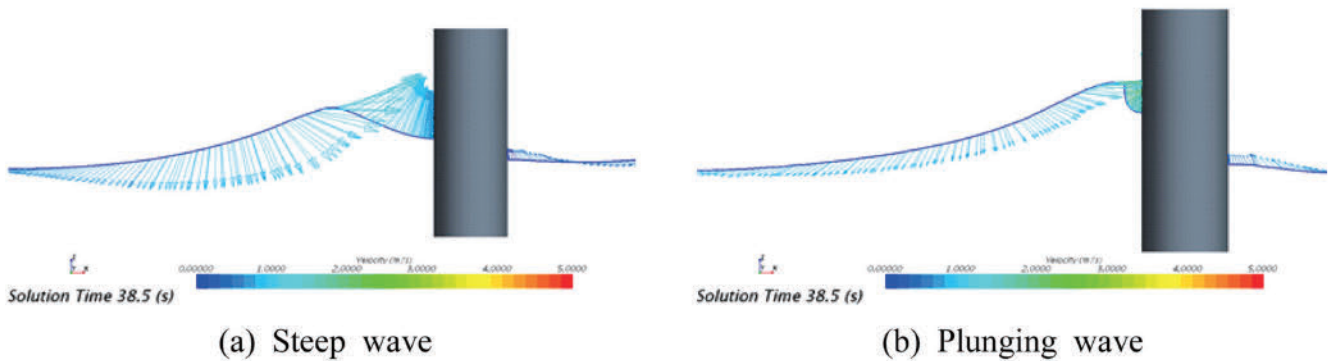


Fig. 20. Velocity vector of focused waves on free surface.

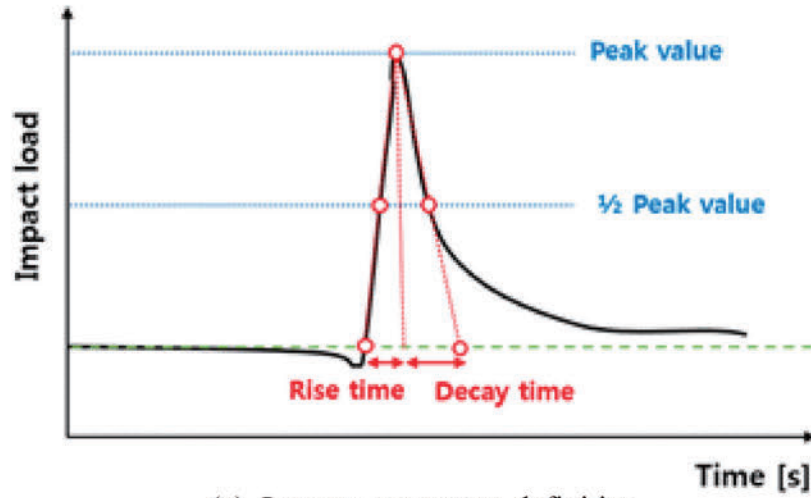
17(b)). 또한 집중파 환경 하에서 운동이 구속된 물체의 밀면에 작용한 힘은 규칙파 상에서 2자유도 운동이 허용된 경우보다 약 13배 크게 나타난다.

집중파랑 환경 하에서 물체 운동 구속 여부에 따른 부유체 주변의 유동장의 모습은 Fig. 18과 같다. 운동이 구속된 Case1의 경우, 고정된 물체에 의해 집중파의 파장의 모양이 변형되는 것을 확인할 수 있다. 물체가 구속되지 않아 자유운동(2-DOF)을 하는 Case2의 경우, 물체가 파랑을 따라 운동하기 때문에 파장의 형태는 물체가 없었을 경우와 비슷하게 유지된다. 부유체가 고정되지 않고 파랑의 의해 자유 운동을 할 경우는 파랑의 에너지가 물체의 운동에 사용되지만 부유체가 구속된 경우는 파랑의 에너지가 온전히 밀면에 하중으로 작용한다.

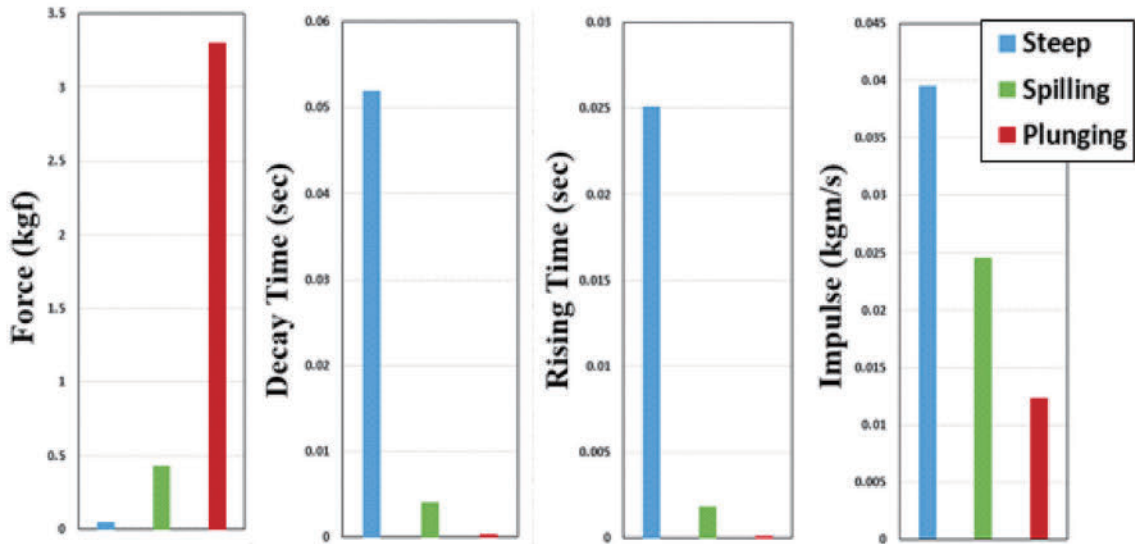
5.2 주파수 중첩파 환경 하 충격하중 분석

원형 실린더에는 5개의 압력센서가 부착되어있으며, 각 센서의

위치는 Fig. 19(a)와 같다. 쇄파의 유형에 따라 각각의 압력 센서에 작용하는 최대 압력의 경향성을 비교하여 Fig. 19(b)에 나타내었다. x축은 센서 번호를, y축은 최대 압력의 크기를 의미한다. 하늘색 표식은 steep wave의, 연두색 표식은 spilling wave의, 빨간색 표식은 plunging wave의 결과이다. 쇄파 정도가 가장 큰 plunging wave 조건에서 계측한 최대압력의 크기는 쇄파를 동반하지 않는 집중파인 steep wave 조건에서보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. 경향성 비교를 위해 steep wave의 결과는 오른쪽에 확대하여 표시하였다. 비선형성이 매우 강하고 curling 현상을 동반하며 쇄파되는 plunging wave의 경우, 최상단부에 위치한 압력 센서에서 최대압력이 발생하였다. 집중파랑이지만 쇄파를 동반하지 않는 steep wave의 경우, plunging wave와 정반대로 최하단부에 위치한 압력 센서에서 가장 큰 압력이 발생한다. 이는 Fig. 20에서 확인할 수 있는 것처럼, plunging wave의 경우 파형이 overturning되며 실린더와 충돌하는 순간 집중파의 파장에 매우 큰 수평방향 속도가 발생한다. 이때 구조물에 작



(a) Impact parameter definition



(b) Impact parameter results

Fig. 21. Impact parameter according to wave type.

용한 충격하중의 대부분은 동압의 영향이 지대하다. 반면, 쇄파를 동반하지 않는 steep wave의 경우 파정에서의 수평방향 속도의 크기가 plunging wave에 비해 미미하며 측정된 압력은 wave run-up에 대한 효과(정압)가 대부분이다. 따라서 수심이 상대적으로 깊은 최하단부에 위치한 센서에서 가장 큰 압력이 측정된다.

Fig. 21는 실린더의 최상단에 위치한 힘 센서에서 측정한 충격하중의 impact parameter를 계산한 결과이다. 계산한 파라미터로는 힘의 크기, decay time, rising time, impulse가 있다.

파란색 막대기는 steep wave의, 연두색 막대기는 spilling wave의, 빨간색 막대기는 plunging wave의 결과를 나타낸다. 3가지 파랑 유형 모두에서 비슷한 크기의 충격력이 작용했다. 다만, 힘이 작용하는 기간을 나타내는 decay time, rising time의 결과를 보면, plunging

wave에서 다른 유형의 파랑에서보다 매우 짧은 것을 볼 수 있다. 따라서 3가지 중첩파의 파고는 모두 약 16 cm로 비슷한 정도였지만, 쇄파 정도가 가장 큰 plunging wave 환경 하에서 측정된 힘의 크기는 쇄파를 동반하지 않는 steep wave에서보다 약 70배 컸다. 파고가 동일함에도 불구하고 쇄파의 영향력이 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 현재에도 많은 해양 사고를 발생시키고 있는 중첩파를 두 가지 방법(주파수 중첩, 다방향 집중)으로 재현하고, CFD 기반 해석을 통하여 중첩파가 구조물에 미치는 영향성을 충격하중

과 동적거동 관점으로 분석해 보았다. CFD 결과의 타당성을 입증하기 위해, 실험과의 결과와 비교·검증을 수행하였다.

먼저, 동일한 주기와 파고를 가지는 규칙파랑의 위상차를 변조하여 방향파를 한 지점에 집중시키고, 해당 집중파랑 환경 하에서 구조물의 동적거동을 해석하였다. 다방향 집중파의 경우, 규칙파랑보다 5배 높은 파고를 가지며 일정한 지점에 반복적으로 발생하는 것을 확인하였다. 다방향 집중파 환경 하에서 규칙파랑 환경 하에서보다 상하요 진폭, 종동요 진폭, 부유체의 밑면에 작용하는 하중이 각각 7배, 4배, 5배 컸다. 재현한 파랑 결과와 그 환경 하에서 부유체의 동적거동 결과를 다른 CFD 소프트웨어와 모형실험의 결과를 비교해 보았을 때, 결과의 경향성이 매우 유사한 것을 확인하였다.

서로 다른 주파수를 가지는 파랑을 중첩시켜 집중파랑을 생성하고, 쇄파의 유무 및 정도에 따라 구조물에 작용하는 충격하중을 분석하였다. 비슷한 파고를 가지지만, 쇄파를 동반하지 않는 steep wave, white cap을 동반하며 쇄파하는 spilling wave와 쇄파의 정도가 가장 큰 plunging wave를 재현하였다. CFD 해석을 통해 얻어진 파랑충격력 데이터가 2차원 조파수조 모형실험 결과와 비교하여 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. Plunging wave에 의해 구조물에 작용하는 최대 충격하중의 크기는 steep wave에서보다 약 70배 컸다. 또한 plunging wave에서는 동압의 영향이, steep wave에서는 정압의 영향이 지대적인 것을 확인하였다.

현재에도 비선형성이 매우 강한 극한 파랑에 의해 많은 해양 사고가 발생하고 있다. 본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 다양한 비선형 파랑을 재현하였고, 극한 환경 하에서 부유체가 어떠한 영향을 받는지 연구하였다. 현재의 연구 결과를 바탕으로, 실제 해상에서 발생할 수 있는 보다 현실적인 중첩 파랑 현상을 고려하여 구조물 설계에 반영되는 것이 바람직하다. 컴퓨터 성능의 향상 및 상용 프로그램의 발달에 힘입어, 전산유체역학을 이용하여 파랑하중을 정확히 예측하여 그 결과를 보다 안전한 선박 및 해양구조물 설계에 유용하게 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] Chabchoub, A., Hoffmann, N., Onorato, M., Akhmediev, N., 2012, Super Rogue Waves: Observation of a Higher-Order Breather in Water Waves., *Phys. Rev. X*, 2, 011015.
- [2] Chen, G., Kharif, C., Zaleski, S., Li, J., 1999, Two-dimensional Navier-Stokes Simulation of Breaking Waves, *Physics of Fluids*, 11(1), 121-133.
- [3] Chung, J., Moon, I., Yoo, C., 2013, A Study on Behaviour Characteristics Analysis and Materials Design Strength Decision of the Coastal Structures under Sea Wave Loads, *J. Korean Geoenviron. Soc.*, 14(7), 57-66.
- [4] Dean, R.G and Dalrymple, R.A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publ.
- [5] Dysthe, K. Krogstad, H.E. and Müller, P., 2008, Oceanic rogue waves. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, 287-310.
- [6] Ghosh, S., Reins, G. Koo, B., Wang, Z., Yang, J., Stern, F., 2007, Plunging Wave Breaking : EFD and CFD, Proc. International Conference on Violent Flows, Fukuoka, Japan.
- [7] Go, G.S., Ahn, H.T., Ahn, J.H., 2017, Simulation-Based Determination of Hydrodynamic Derivatives and 6DOF Motion Analysis for Underwater Vehicle, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(5), 371-377.
- [8] Hino, T., Miyata, H., Kajitani, H., Kanai, M., 1984, A Numerical Solution Method for Nonlinear Shallow Water Waves (second report), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 154, 29-39.
- [9] Hong, K., Shin, S.H., 2007, Instability of Plunging Breaking Wave Impact on Inclined Cylinder, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 10(4), 187-192.
- [10] Jeon, W., Park, S., Jeon, G.M., Park, J.C., 2022, Computational Study on Rogue Wave and Its Application to a Floating Body, *J. of Applied Sciences*, 12(6), 2853.
- [11] Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C., Tavassoli, A. and Hong, S.Y., 2000, Fully Nonlinear Multi-Directional Wave Simulations By 3D Numerical Wave Tanks, *J. of OMAE, ASME*, 123, 124-133.
- [12] Lee, S.C., Doh, D.H., Goo, J.S., 2010, Analysis of Wave Loads of Ships with Advancing Speed in Regular Waves. *J. Korean Soc. Power Syst. Eng.*, 14(1), 23-58.
- [13] Liagre, P.-Y.F.B., 1999, Generation and analysis of multi-directional waves. Master's thesis, Texas A&M University. Available electronically from <https://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-1999-THESIS-L555>.
- [14] Muzafferija, S., Perić, M., 1999, Computation of Free Surface Flows Using Interface-tracking and Interface-capturing Methods, *Nonlinear Water Wave Interaction*, Mahrenholtz, O., Markiewicz, M., (Eds.), WIT Press, Southampton, UK, Chapter 2, 59-100.
- [15] Nam, B.W., Kim, Y.H., Yang, K.K., Hong, S.Y., Sung, H.G., 2012, Numerical Study on Wave-induced Motion of Offshore Structures Using Cartesian-grid based Flow Simulation Method, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(6), 7-13.
- [16] Nikolkina and Didenkulova, 2011, Rogue waves in 2006-2010, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2913-2924.
- [17] Park, I.R., Kim, J., Kim, Y.C., Kim, K.S., Van, S.H., Suh, S.B., 2013, Numerical Prediction of Ship Motions in Wave using RANS Method, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(4), 232-239.

- [18] Park, J.C., Kim, M.H. and Miyata, H., 1999, Fully Nonlinear Free-Surface Simulations By a 3D Viscous Numerical Wave Tank, *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 29, 685-703.
- [19] Park, J.C. and Miyata, H., 2002, Ship Motion Simulation in Directional Waves Using a 3D Numerical Wave Tank Simulation Technique, *J. of Ocean Engineering and Technology*, 4(2), 1-5.
- [20] Pierre-Yves Francois Bernard Liagre, 1999, Generation and analysis of multi-directional waves, Offshore Technology Research center.
- [21] Sato, Y., Miyata, H., Sato, T., 1999, CFD Simulation of 3-Dimensional Motion of a Ship in Waves: Application to an Advancing Ship in Regular Heading Waves, *Journal of Marine Science and technology*, 4(3), 108-116.

---

Received 4 August 2025

Revised 23 October 2025

Accepted 13 November 2025