

OpenFOAM을 이용한 부유식 구조물의 운동해석

고 행식, 배운혁,^{*} 조일형

제주대학교 해양시스템공학과

DYNAMIC ANALYSIS OF A FLOATING STRUCTURE USING OPENFOAM

H.S. Ko, Y.H. Bae^{*} and I.H. Cho

Dept. of Ocean System Engineering, Jeju National University

In this study, the numerical simulation with OpenFOAM, an open source library in Computational Fluid Dynamics(CFD), to analyze a dynamic behavior of a floating structure in wave field is carried out. The two-dimensional numerical wave tank with a simple rectangular floating body constrained in two degree of freedom(heave and pitch) is modelled. "interDyMFoam" which solves the Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) for two incompressible phase using Volume Of Fluid(VOF) technique and dynamic mesh method for the floating body is used. Comparisons of free decay tests and heave and pitch Response Amplitude Operators (RAOs) have been made using existing experimental data performed with two dimensional wave flume in Jeju National University. Moreover, velocity field and vorticity near the floating body show how viscous damping is affected on the dynamic behavior. The results shows that the numerical wave tank with OpenFOAM can be used for the behavior analysis of the floating structure.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 오픈포함(OpenFOAM), 부유식 구조물(Floating structure), 레이놀즈 평균 나비어-스톡스 방정식(RANS), 진폭응답함수(RAO)

1. 서 론

해양에 설치된 해양 구조물은 전통적으로 석유 시추를 목적으로 하는 구조물이 대부분이었으며 부유식 해양 구조물의 경우 부유체나 계류 시스템 설계 등의 기술도 이러한 석유 시추 산업을 중심으로 발전해 왔다. 최근 화석연료에 의한 환경오염 문제가 대두되면서 신재생 에너지원에 대한 관심이 급격히 늘어나게 되었고, 특히 해양의 신재생 에너지 이용에 대한 연구 또한 해를 거듭할수록 증가함에 따라 전통적인 석유 시추를 위한 해양 구조물의 연구가 최근에는 다양한 해양 신재생 에너지를 위한 새로운 구조물의 연구로 확장되고 있다.

부유식 해양 구조물의 설계 단계에는 기본적으로 구조물 운동의 고유주기가 설치가 될 해역의 피크 파랑 주파수 대역

Received: January 4, 2018, Revised: March 27, 2018,

Accepted: March 27, 2018.

* Corresponding author, E-mail: yh.bae@jejunu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2018.23.1.101>

© KSCFE 2018

을 회피하게 설계하여 공진으로 인한 문제를 해결한다. 그러나 해양 신재생 에너지 이용을 위한 가동물체형 파력발전장치의 경우 오히려 구조물의 고유주기를 파랑 주파수 대역에 적절하게 위치시키고 공진을 이용하여 에너지 추출 효율을 높이기도 한다. 따라서 부유식 해양 구조물은 운용 목적에 맞는 설계가 필요하며, 설계초기 단계에서 주파수 영역 해석법 등을 이용하여 구조물의 거동 특성 및 고유주기를 계산한다. 주파수 영역 해석법은 선형 포텐셜 이론을 기반으로 한 동수역학 모델이 사용되고 있으나 최근에는 비선형적인 영향을 해석하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있다. Retes 등 [1]은 선형모델에 비선형 Froude-Krylov 힘을 해석하기 위해 수정된 항을 더하였고, Bhinder 등[2]과 Nematbakhsh 등[3]은 기존의 선형식에 계수화된 점성력항을 고려하였다.

발전된 하드웨어 기술과 병렬계산이 가능해지면서, 높은 비선형성을 고려한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. CFD를 이용한 파력발전장치에 대한 연구는 상용화된 소프트웨어(FLUENT, STAR-CCM+, CFX 등)에 많이 의존하고 있다. 그러나 이런 상용화된 소프트웨어는 고비용이 든다는 점과 소스코드 변경

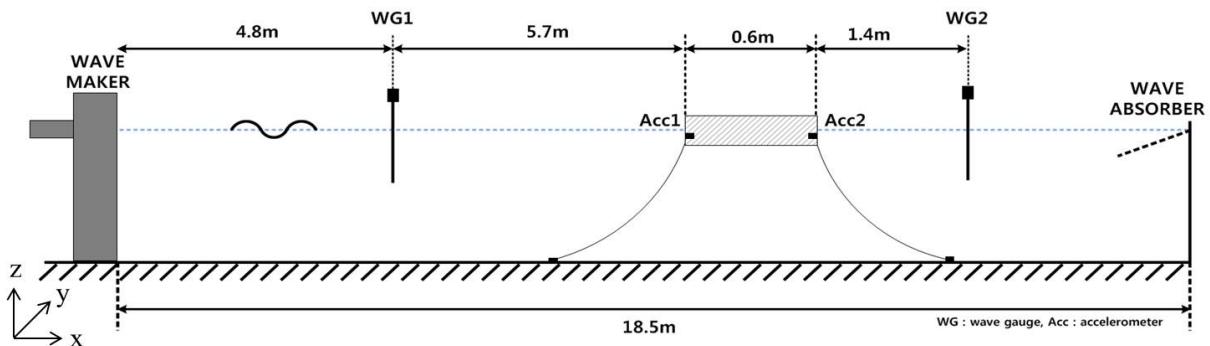


Fig. 1 Sketch of experimental wave tank

이 제한적이라는 이유로 인해서 최근에는 오픈소스기반으로 한 OpenFOAM®(Open source Field Operation And Manipulation)을 이용한 부유식 해양 구조물 거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Eskilsson 등[4]은 Wave Dragon이라는 부유식 파력장치모델에 대한 월파를 통해 방류량을 계산하였다. Schmitt and Elsaesser[5]는 바닥에 고정되어 회전운동을 하는 파력장치인 Oyster model에 AMI(Arbitrary Mesh Interface)를 적용하여 큰 회전운동에 대해서 수치모의를 수행하였다. Palm 등[6]은 고차원 유한 요소 모델을 이용한 계류선 해석 방법을 도입하여 계류된 파력발전장치에 대한 연구를 진행하였다.

OpenFOAM의 경우 높은 확장성과 범용성을 지니고 있음에도 불구하고, 최근 버전인 OpenFOAM-5.0을 제외하고는 경계처리에 있어서 조파 및 소파기능이 불충분한 실정이다. Jacobsen 등[7]은 경계면 근처에 완화구간을 도입하여 Waves2FOAM라는 조파 및 소파에 관한 부가적인 모듈을 개발하였다. Higuera 등[8]은 능동적 소파장치(active wave absorption)를 통한 계산영역을 줄일 수 있는 IHFOAM을 개발하였고, 더 나아가 Higuera 등[9]은 파동장에서 투과성 구조물에 대한 해석모듈을 도입하였다. 그리고 최근에는 다수의 조파판을 이용하여 3차원 조파가 가능한 더 향상된 IHFOAM격인 OLAFOAM을 개발하였다[10].

본 연구에서는 부유식 구조물로부터 생성되는 양방향 반사파를 효과적으로 제어하기 위해 Waves2FOAM을 이용하여 조파와 소파를 시행하였다. 직사각형 형태의 부유식 구조물에 대한 2자유도 운동(수직운동(heave), 종운동(pitch))에 대하여 자유감쇠실험과 규칙파 내습시 동적거동에 대해서도 수치해석을 수행하였다. 점성에 의한 감쇠비(damping ratio)와 고유주기와 수직·종운동 RAO(Response Amplitude Operator)를 제주대학교에서 수행된 모형실험결과와 비교·검증하였다. 그리고 사각형 부유체의 종운동에 있어서 점성에 의한 감쇠영

향이 크다는 기존의 연구[11,12]를 근거로 직사각형 형태의 부유식 구조물에서의 영향을 유속벡터와 와도를 통하여 살펴보았다.

2. 실험조건

본 연구의 모형실험을 수행하기 위하여 제주대학교 2차원 파동수조를 사용하였으며, 수조의 제원은 길이 20 m, 폭 0.8 m, 높이 1.0 m이다(Fig. 1). 수조 전면에는 피스톤 타입(Piston-type) 조파장치를 통해 파가 생성되고, 후면에는 공극율 0.1을 가지는 스테인레스 스틸 재질의 타공판 소파장치가 설치되어 있다. 직사각형 부유식 구조물 모델의 제원은 길이 0.6 m, 폭 0.75 m, 높이 0.1446 m이며, 조파기로부터 10.5 m 떨어진 곳에 위치한다. Table 1은 직사각형 부유식 구조물의 세부제원을 보여준다.

일정한 과정경사(H/L)를 갖는 선형 규칙파가 일정수심 0.6m에서 생성되었고, 직사각형 부유식 구조물이 수평방향으로 밀려나가는 것을 방지하기 위해 계류계를 설치하였으며, 계류계가 직사각형 부유식 구조물의 운동에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 강성계수가 아주 작은 스프링을 수면 아래의 부유체 모서리 4점에 연결하였다. 직사각형 부유식 구조물의 앞·뒤 무게중심위치에 각각 1개의 일축 가속도계(AS-1GB)를 설치하여 수직운동(heave)과 종운동(pitch)을 200 Hz의 샘플링 주파수로 계측하였다.

Table 1 Specification of a rectangular floating structure

Material	Acrylic
Mass (m)	45.0 kg
Center of gravity(CG)	-0.0277 m from Still Water Level
Metacentric height(GM)	0.277 m
Moment of inertia(Iyy)	2.3886 kg·m ²

3. 수치해석 방법

직사각형 모양의 부유식 구조물과 유체의 상호작용을 해석하기 위해 OpenFOAM 내에 있는 'interDyMFoam' solver를 사용하여 2차원 수치파동수조를 모델링하였다. 'interDyMFoam'은 비압축성 이상류 해석을 위한 'interFoam' solver에 동적인 격자(Dynamic Mesh) 처리 방법이 더해진 solver이다.

3.1 지배방정식

비압축성 유체에 관한 해석을 위해 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 식이 이용되었고, 연속방정식(식 (1))과 운동방정식(식 (2))은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} \rho k \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \bar{u}_j 는 평균속도, ρ 는 밀도, \bar{p} 는 평균 압력, ν_{eff} 는 유효 동점성계수이고, 동점성계수(ν)와 난류와동점성계수(ν_t)의 합으로 계산된다. 본 연구에서는 난류해석을 위해 k (turbulent kinetic energy)- ϵ (turbulent dissipation) 모델이 이용되었다.

유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 이용하여 기본적인 수치해석이 이루어졌다. 운동방정식에서 대류항은 NVD limited linear 방법을 적용하였고, 체적분율은 Gauss vanLeer[13] 차분법에 의해 계산되었다. 압력과 속도의 연성에 의한 계산은 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operator)와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)을 결합한 PIMPLE 알고리즘에 의해 수행되었다. PISO와 SIMPLE 알고리즘에 관해서는 Issa[14], Ferziger와 Peric[15]에 의해 자세히 설명되어있다. "interFoam" solver에서 2상류(공기, 물)에서의 자유수면을 추적하기 위한 VOF(Volume of Fluid) 방법이 사용된다. VOF 방법에서 체적분율(α_p)은 대류상의 체적분율(phase fraction)을 계산하지만, 공기와 물 사이의 급격한 경계면의 변하는 수치적 확산으로 인해 정확하지 않게 표현 될 수 있다[16]. OpenFOAM에서는 식 (3)에서와 같이 인위적으로 경계면에 압축속도(U_r)를 체적분율 식에 도입하였다.

$$\frac{\partial \alpha_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p U) + \nabla \cdot (\alpha_p (1 - \alpha_p) U_r) = 0 \quad (3)$$

여기서, U 는 u , v , w 속도벡터로 이루어진 속도장을 나타낸다. 물과 공기가 셀에 가득 찼을 경우는 각각 α_p 는 1과 0으로 표현된다. $U_r (= \min [C_\alpha |U|, \max(|U|)])$ 는 인위적인 압축을 위한 경계면에 수직인 속도장이고, OpenFOAM에서 C_α 를 통해 인위적으로 압축속도를 조절할 수 있다[17]. 압축속도가 없는 경우는 0으로 설정되고, 더 높은 값은 경계면에서 압축속도가 적용됨을 의미한다. 체적분율(α_p)은 식 (4)에 의해 운동방정식(식 (2))에서 혼상유체의 밀도를 결정한다.

$$\rho = \alpha_p \rho_w + (1 - \alpha_p) \rho_a \quad (4)$$

여기서, ρ_w 와 ρ_a 는 각각 물과 공기의 밀도를 나타낸다.

3.2 운동방정식

유체의 흐름을 위해 연속방정식과 운동방정식을 풀면서 그 속도와 압력에 대한 결과 값을 이용하여 부유식 구조물에 가해지는 힘과 모멘트에 대한 값 식 (5)와 (6)과 같이 구해진다.

$$F_T = \int_S (F_{ext} + F_{flow}) \quad (5)$$

$$M_T = \int_S (M_{ext} + M_{flow}) \quad (6)$$

여기서, F 와 M 는 총 힘과 총 모멘트이며, F_{ext} 와 M_{ext} 는 중력에 의한 힘과 모멘트, F_{flow} 와 M_{flow} 부력 혹은 압력 혹은 점성에 의한 힘과 모멘트이다. 이 힘과 모멘트에 의해 부유식 구조물의 운동방정식은 다음의 식 (7), (8)에 표현된다.

$$F_T = m \ddot{x} \quad (7)$$

$$M_T = I \ddot{\theta} \quad (8)$$

여기서, m 과 I 는 부유식 구조물의 무게와 관성모멘트, x 와 θ 는 직선으로 움직인 변위와 각변위를 나타낸다. 부유식 구조물의 운동방정식을 계산하기 위해 Newmark 시간적분방법이 선택되었다[18].

3.3 계산영역 및 조파 조건

수치해석을 위한 계산영역의 크기와 조파를 위한 수치파

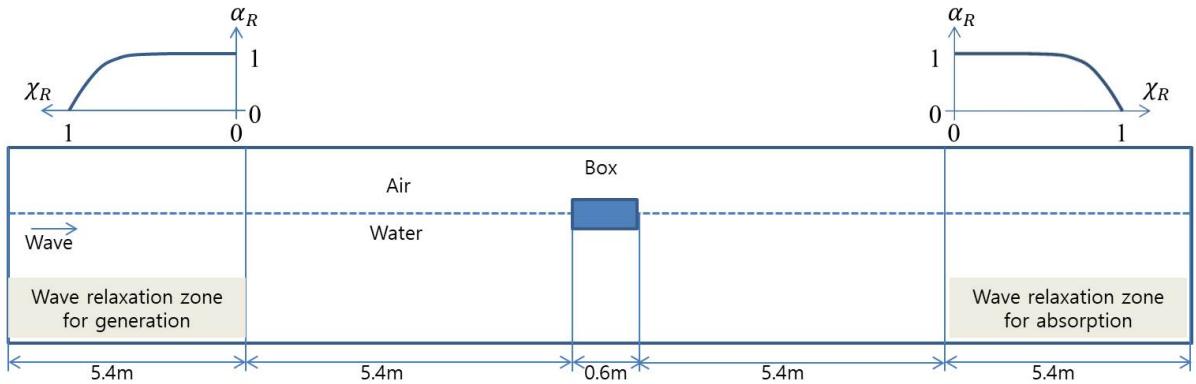


Fig. 2 Sketch of numerical wave tank with wave relaxation zones

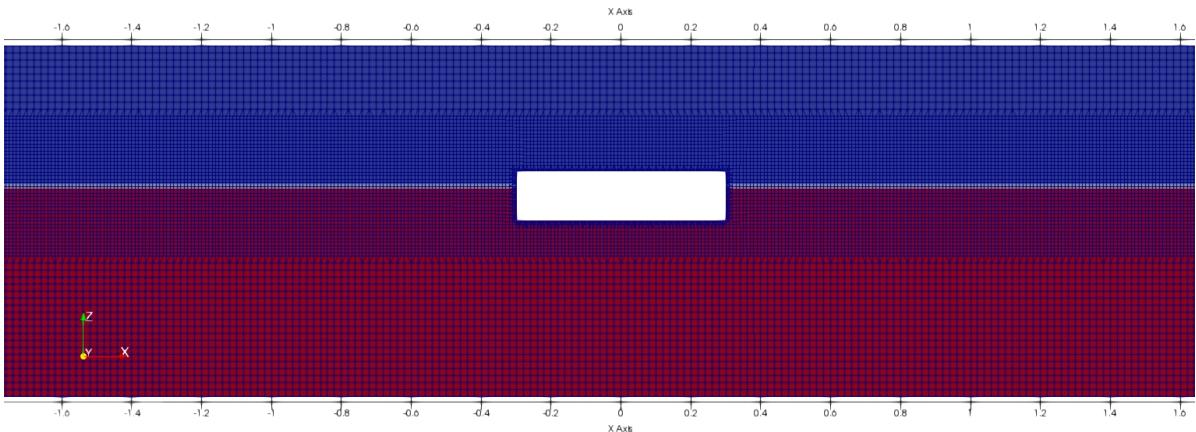


Fig. 3 Grid system and grid refinement

동수조의 개략도를 Fig. 2에서 보여준다. 계산시간의 효율을 높이기 위해 격자는 부유구조물 주변과 자유수면 근처에 더 세밀하게 설정되었다(Fig. 3). 수조 중앙에는 실험모델과 동일한 직사각형 모양의 부유식 구조물이 위치하고, 실험과는 다르게 수평방향으로의 밀려나가는 움직임을 제어하는 계류선은 고려되지 않고, 오직 움직임을 2자유도 운동(heave, pitch)으로 제약시켰다. 앞에서 언급한 바와 같이 조파와 소파를 위해 Waves2FOAM을 사용하였다. Waves2FOAM에서 반사파 제어를 위해 수치파동수조 양끝경계면에 완화구간(relaxation zone)이 이용된다. 이는 수조벽면과 부유구조물로 인해 반사된 파들의 재반사로 인해 부유구조물의 거동에 영향을 주는 요인을 최소화하기 위함이다. 완화구간에서는 반사파가 식(9)에 의해 제어가 된다.

$$\phi = \alpha_R \phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \phi_{target} \quad (9)$$

여기서, ϕ 는 u (속도) 혹은 α_p (체적분율)을 나타내고, $\phi_{computed}$ 와 ϕ_{target} 은 각각 계산된 해와 이론에 의한 해석해를 의미한다. 그리고, α_R 은 가중계수(weight factor)로써, 식 (10)에 의해 구해진다.

$$\alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \chi_R \in [0; 1] \quad (10)$$

여기서 χ_R 는 완화구간의 길이를 0과 1사이의 값으로 나타낸 국부좌표계이며, α_R 은 목표로 하는 파의 생성을 위해 완화구간과 계산되는 영역 사이의 경계면에서 항상 1의 값을 가지고, 생성된 파나 반사파를 제어하기 위해 수조 양 끝 경계면에서는 항상 0의 값을 가진다. 조파 및 소파되는 구간의 길이는 조파되는 입사파와 조건 중에 최장파를 기준으로 2배 이상 되게 거리를 설정하였고, 완화구간에서 부유식 구조물

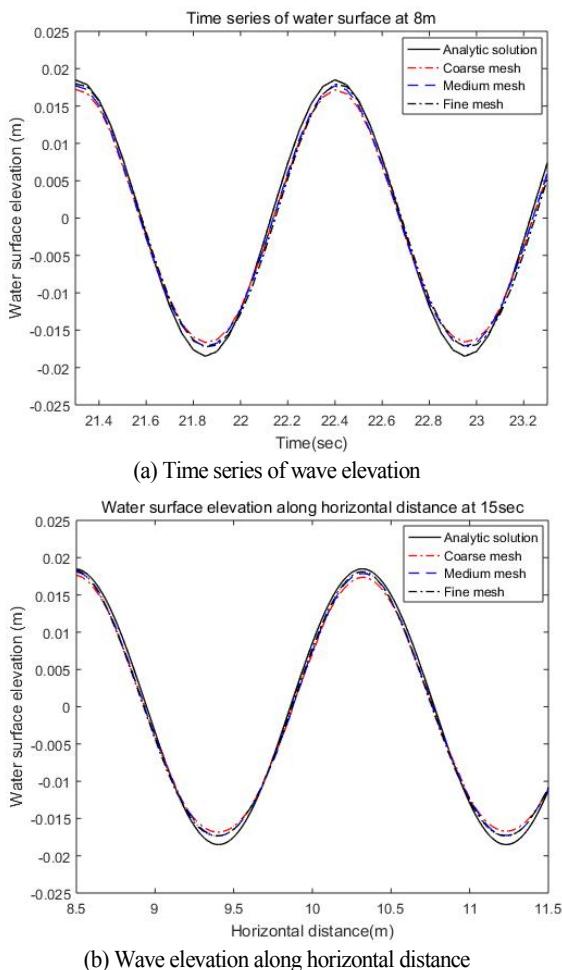


Fig. 4 Comparison of wave elevation for grid resolutions

까지의 거리도 입사파 조건 중에 최장파가 2파장이 이상 생성될 수 있도록 설정하였다.

입사파 조건은 제주대학교에서 시행한 모형실험의 경우와 동일한 조건의 파고와 파주기를 사용하였다(Table 2). 실험에서는 선형적인 파형에 대해서 부유식 구조물의 동적인 거동을 조사하기 위해 모두 동일한 파형구배(파고(H)/파장(L) = 0.02)의 입사파 조건을 가진다.

정확한 과생성과 수치계산의 효율성을 위해서는 격자의 수렴도 확인이 중요하다. 수치 파동수조내에 부유식 구조물

Table 2 Incident wave conditions

Case	1	2	3	4	5	6
H(m)	0.025	0.031	0.037	0.040	0.042	0.048
T(sec)	0.90	1.00	1.10	1.15	1.20	1.30

을 설치하지 않고, 입사파를 생성했을 때 조파 경계면에서 4L정도 떨어진 지점에서의 시계열 파고 데이터와 일정시간일 때(15sec)의 파고의 공간분포 데이터를 격자의 크기 다른 3 단계(coarse, medium, fine의 해상도)로 설정하여 해석해와 비교하였다(Fig. 4). 모든 격자크기의 경우에서 파고의 크기가 이론해와 거의 일치함을 볼 수 있으나, 보다 정량적인 비교를 위해 4파장 정도의 파고들을 이론적인 파고와 RMSD (Root-Mean Square Difference)법을 이용해서 비교하였다(Table 3). 격자의 수가 많아질수록 RMSD가 낮아지는 것을 볼 수 있으나, 이는 계산시간이 증가함을 뜻한다. 격자의 해상도가 제일 낮은 경우가 시계열 파고 데이터의 RMSD가 다른 경우에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 계산의 효율성과 정확성을 고려하여 medium 해상도의 격자로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

$$H_{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{H}_i - H_i)^2}{N}} \quad (11)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 자유감쇠실험

수직운동과 종운동에 대한 자유감쇠수치실험을 수행하였고, 그 시계열 수치결과와 스펙트럼 해석결과를 Fig. 5에서 보여준다. 감쇠비(damping ratio)를 산정하기 위해 시계열 운동변위의 파봉과 파곡점의 변위값을 식 (12)에 대입하여 구하고, 그 결과값을 실험에서 구해진 결과값과 비교하였다.

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \ln \left\{ \frac{z_{a_1} + z_{a_2}}{z_{a_3} + z_{a_4}} \right\} \quad (12)$$

여기서 κ 는 감쇠비를 나타내고, $z_{a_1 \sim 4}$ 는 4개의 최고점 값을 차례대로 나타낸다.

자유감쇠실험을 통해 얻어진 시계열 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하여 직사각형 부유식 구조물의 고유 주기(T_N)를 추정할 수 있었다.

Table 3 Comparison of RMSD for grid convergence

Grid resolution	dx/dz(m)	Number of grid /L	Number of grid /H	HRMSD (H in time)	HRMSD (H in space)
Coarse	0.02/0.01	91	2	0.0062	0.0055
Medium	0.01/0.005	183	4	0.0052	0.0046
Fine	0.005/0.0025	366	7	0.0049	0.0043

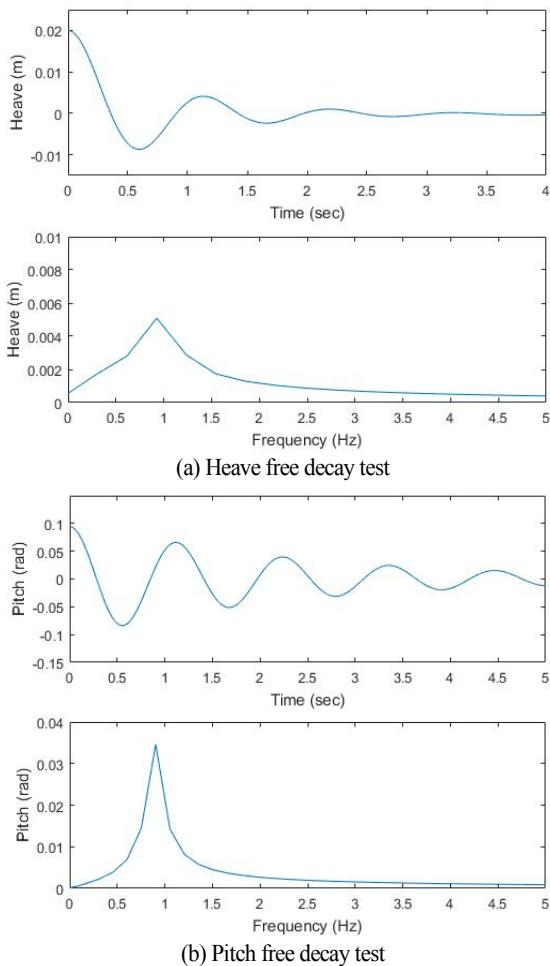


Fig. 5 Free decay test and spectrum analysis

Table 4는 수치해석으로부터 계산된 감쇠비와 고유주기를 실험데이터와 좀 더 정량적으로 비교한 결과를 보여준다. 수직운동과 종운동의 고유주기는 실험값과 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다. 감쇠비는 종운동에 대해서는 실험결과와 같은 값을 나타내고 있으나, 수직운동에 대해서는 19.7% 정도의 차이를 나타내고 있다. 이 차이에 대해서는 실험·수치해석 결과로부터 얻어진 점성감쇠계수를 적용하여 수직운동 RAO를 비교분석한 다음장에서 논의하겠다.

Table 4 Comparison of dynamic characteristics of heave and pitch motion

	Motion	Experiment	Present	Difference
Damping ratio(ζ)	Heave	0.165	0.201	19.7%
	Pitch	0.076	0.076	0.0%
Natural period(sec)	Heave	1.09	1.10	0.9%
	Pitch	1.09	1.11	1.8%

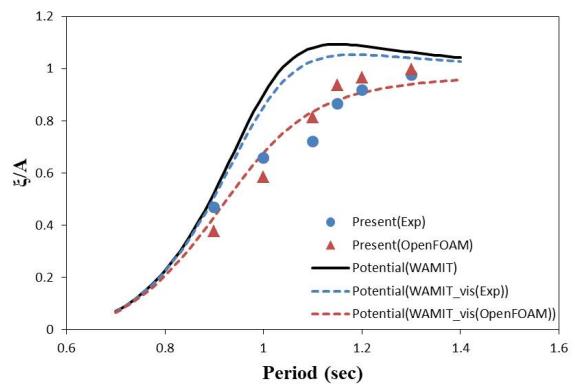


Fig. 6 Comparison of RAO for heave motion

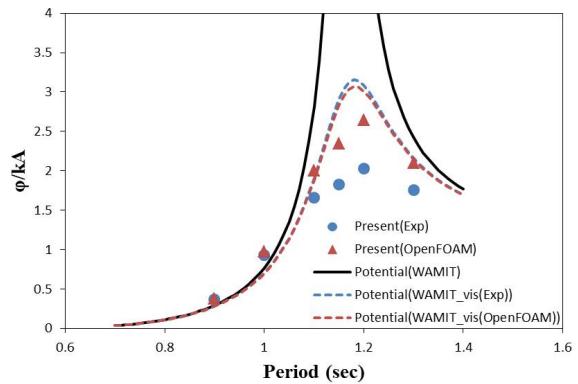


Fig. 7 Comparison of RAO for pitch motion

4.2 수직운동과 종운동 RAO

수직운동 RAO는 부유식 구조물의 수직운동진폭(ξ)을 입사파의 진폭(A)으로 나눈 값으로 운동 증폭율을 보여준다. 일반적으로 입사파의 주기(T)와 구조물의 고유주기(T_N)가 일치하면 공진현상에 의해 운동이 급격하게 커지게 되고, 이 때 구조물의 RAO는 고유주기에서 최대값을 갖는다. 그러나 Fig. 6에서 수직운동 RAO에 대한 공진점이 비점성 선형모델(WAMIT)에서는 1.1초 근방에 미약하게 나타나는 반면에 실험결과와 현재 점성을 고려한 수치모델에서는 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 이는 수직운동에 의한 큰 방사 감쇠력에 점성 감쇠력이 더해져 더 큰 감쇠력의 작용했기 때문이라고 사료된다. 그리고 입사파가 공진주기보다 상대적으로 짧은 경우는 입사파 진폭보다 작은 운동값을 나타내는 반면에, 입사파가 공진주기보다 상대적으로 긴 경우는 입사파 진폭에 근접한 운동값을 나타내고 있다. 그리고 실험과 수치해석의 자유감쇠실험을 통해서 점성감쇠계수를 적용했을 때의 움직임은 수치해석의 점성감쇠계수를 적용했을 때가 실험의 점성감쇠계수를 적용했을 때보다 더 실험결과에 근접하는 결과를

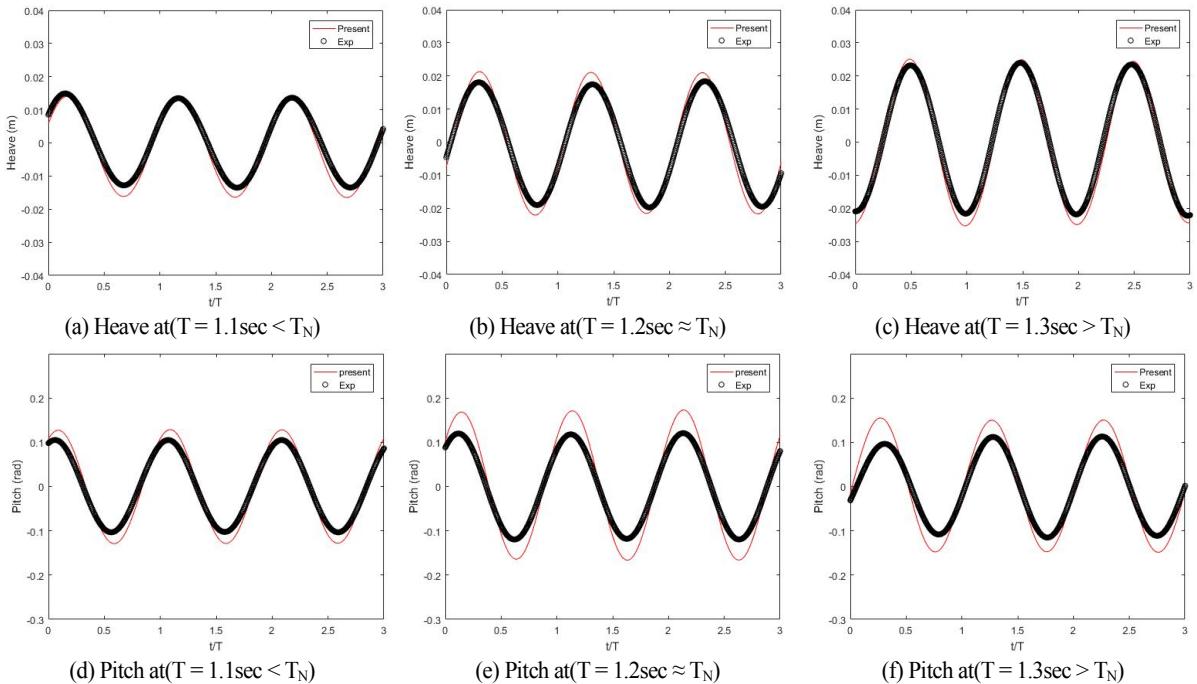


Fig. 8 Comparisons of time histories of heave and pitch motion

보여준다. 이는 실험에서 점성의 영향력을 많이 받는 물체의 자유감쇠실험을 할 때 어려움 때문에 정확한 실험데이터를 얻지 못했을 것이라 추측이 된다.

종운동 RAO는 부유식 구조물의 종운동진폭(ϕ)을 입사파의 구배(kA)으로 나눈 값으로 운동 진폭을 보여준다. Fig. 7에서 입사파의 주기(T)와 구조물의 고유주기(T_N)가 일치할 때 운동이 급격하게 커지게 공진현상을 잘 보여주고 있다. 선형모델의 경우 점성계수를 고려하지 않아서 공진점에서의 크게 과대 예측되는 운동현상을 보여주고 있는 반면에, 실험 결과와 OpenFOAM결과와 점성감쇠계수를 고려한 선형모델은 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그러나 수치결과들이 공진점 근처와 입사파가 공진주기보다 상대적으로 긴 장주기 일 때(운동변위가 클 때) 실험결과보다 다소 과대 예측되는 것을 보여주고 있다. 이는 실험에서 연약한 계류선이 운동변위가 큰 경우 외부적인 감쇠기능으로 작용했을 것이라고 사료된다.

4.3 동적거동 해석

Fig. 8은 입사파의 주기가 고유주기와 거의 일치할 때를 기준으로 상대적으로 단주기와 장주기인 경우로 나누어서 3가지 경우에 대해서 시계열의 수직운동과 종운동 수치해석 결과를 실험결과와 비교한 것이다. 부유식 구조물이 변이구간

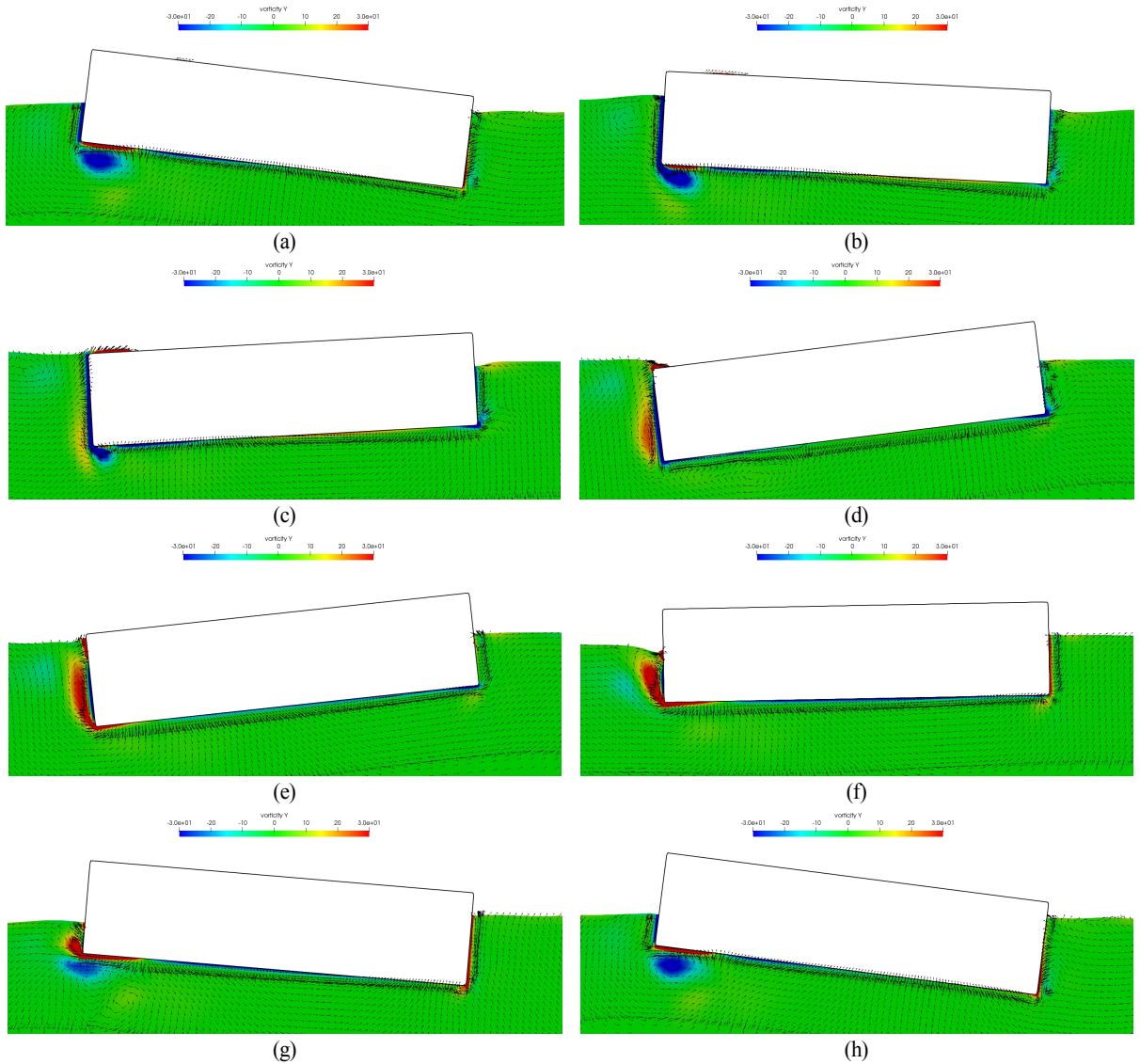
을 지난 규칙적인 움직임을 나타낼 때의 데이터 범위에서 입사파 주기의 3배가 되는 길이의 데이터만을 취득하였다. 수직운동은 큰 점성력의 영향으로 움직임이 작은 경우 차이가 크지 않는(Fig. 8(a)-(c)) 반면, 종운동은 공진점 근처에서 큰 움직임을 나타낼 때 차이가 상대적으로 크게 나타났다(Fig. 8(d)-(f)). Table 5는 좀 더 정량적인 비교를 보여준다. 이전에 말한바와 같이 부유식 구조물의 수평방향 움직임을 제어하기 위해 실험에서 사용된 계류선이 움직임에 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한, 이러한 원인은 수치해석과 실험결과에서 나타나는 위상차에도 작용했을 것으로 생각된다.

4.4 흐름과 외류영향 해석

교동장에서 부유식 구조물의 종운동은 외류(vortex)를 생성 혹은 소멸하게 하고, 이러한 현상은 부유식 구조물의 움직임에 점성 감쇠효과로써 영향을 준다[11]. 수치해석을 이용하여 외류가 부유식 구조물의 움직임에 어떠한 영향을 주는지에

Table 5 Comparisons of RMSD of heave and pitch motion

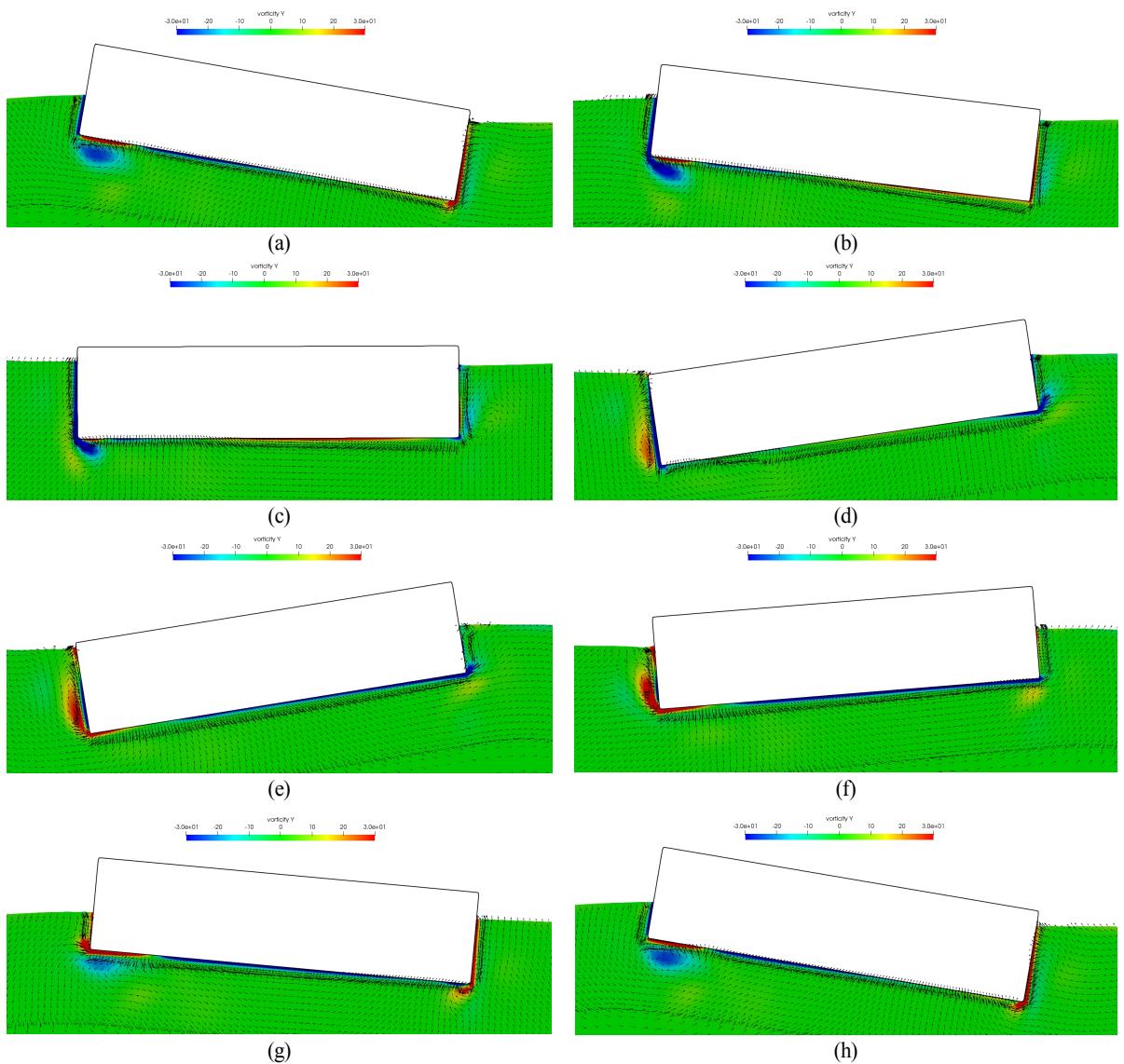
Wave Period(sec)	Heave RMSD	Pitch RMSD
1.1	0.0035	0.0489
1.2($\approx T_N$)	0.0056	0.0958
1.3	0.0048	0.0732

Fig. 9 Velocity and vorticity field of $T = 1.1 \text{ sec} < T_N$, $H = 0.037 \text{ m}$

대해서 부유식 구조물의 공진주기와 일치하는 입사파주기, 상대적으로 단주기와 장주기의 3가지 경우를 가지고 속도벡터와 와도를 표현하여 조사하였다. 부유식 구조물 주변의 속도벡터와 와도를 8개의 위상으로 구분하여 나타내었다. 와류는 $\nabla \times u_i$ 로 계산되어지고, 양의 와류(와도: 빨간색)는 시계방향이고, 음의 와류(와도: 파란색)는 반시계방향이다. 부유식 구조물이 pitch-in할 때는 시계방향으로의 회전운동을 뜻하고, pitch-away할 때는 반시계방향으로의 회전운동을 뜻한다. 편의상 구조물의 전면은 파가 생성되는 곳과 가까운 곳을 뜻하고, 후면은 파가 생성되는 곳과 먼 곳을 뜻한다.

4.4.1 단주기의 입사파

고유주기보다 상대적으로 단주기의 입사파에서 부유식 구조물 주변의 속도벡터와 와도를 Fig. 9에서 보여준다. Fig. 9(a)는 부유식 구조물이 최대의 pitch-in을 할 때이고, Fig. 9(b)는 부유식 구조물이 pitch-away를 시작하는 위상이다. Fig. 9(d)는 부유식 구조물이 최대의 pitch-away할 때이고, Fig. 9(e)는 부유식 구조물이 pitch-in을 시작하는 위상을 보여준다. Pitch-in을 하면서 생성된 반시계방향의 와류는 빠르게 사라지면서, 새롭게 생성된 시계방향와류가 pitch-away 움직임에 크게 작용한다(Fig. 9(d)). 다시 부유식 구조물이 pitch-in을 하는

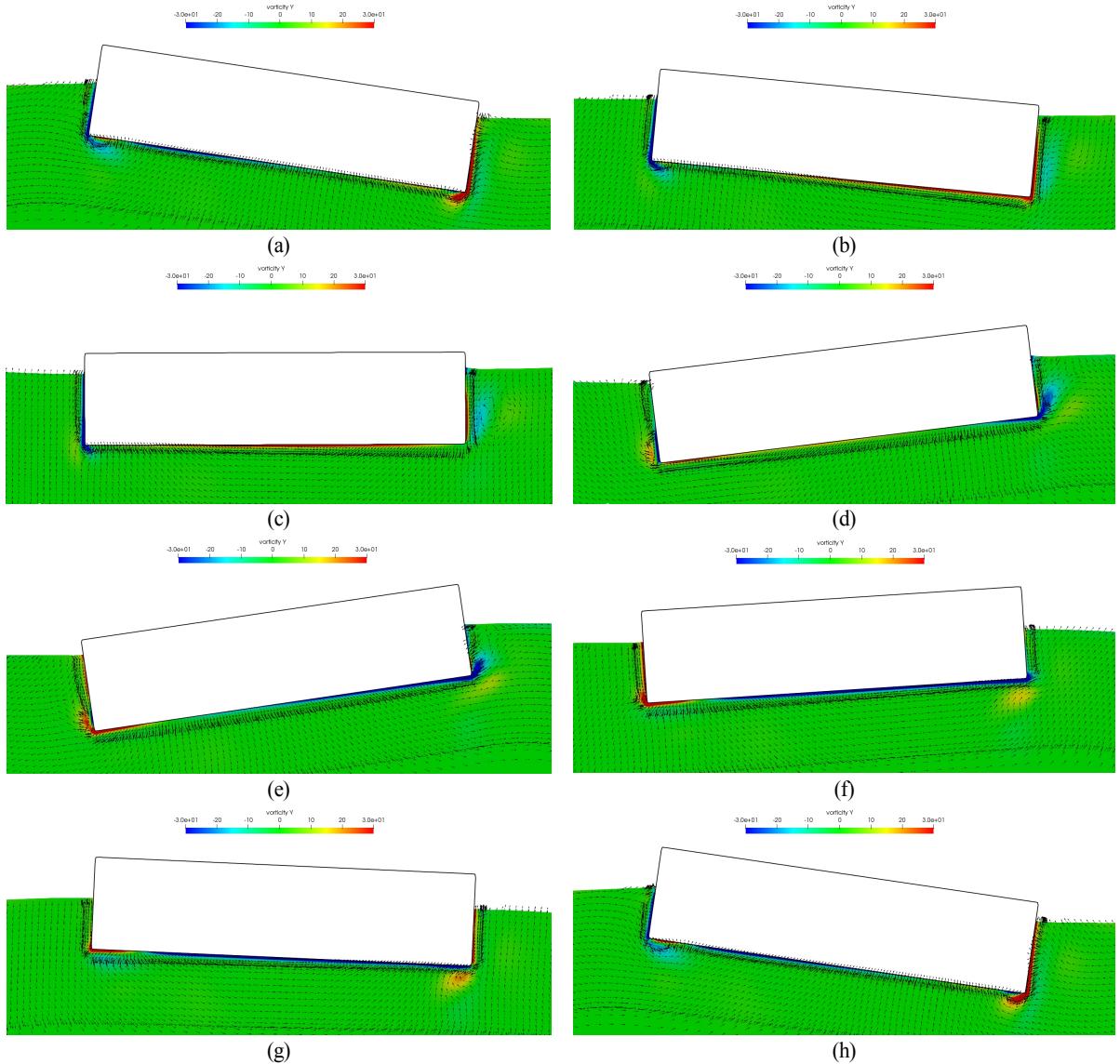
Fig. 10 Velocity and vorticity field of $T = 1.2 \text{ sec} \approx T_N$, $H = 0.040 \text{ m}$

위상에서는 시계방향의 와류가 빠르게 소멸되면서, 반시계방향의 와류가 지배적으로 변하게 되는 것을 보여준다(Fig. 9(g)-(h)). 이러한 직사각형 부유식 구조물 전면과 후면에서의 와류의 생성과 소멸의 순환은 점성효과가 부유식 구조물의 pitch-in과 -away 위상내에서 움직임을 감소시키는 감쇠역할을 한다는 것을 의미한다.

4.4.2 고유주기의 입사파

고유주기의 입사파인 경우 모든 경향이 단주기의 입사파

의 경우와 거의 일치한다(Fig. 10(a)-(h)). 그러나 직사각형 부유식 구조물 후면에 생성되고 소멸되는 와류의 크기에 있어서는 단주기의 경우와 차이가 있다. 이는 입사파의 주기가 부유식 구조물의 고유주기와 일치하면서 부유식 구조물의 움직임이 커지면서 전면과 후면에 서로 반대방향의 와류가 생성되어 실제적으로는 점성효과에 의한 더 큰 감쇠효과가 나타나는 것으로 보여 진다. 이는 Fig. 7에서 공진점 근처에서 비점성 선형모델과 종운동 RAO를 비교했을 때 점성을 고려한 모델의 운동 증폭율이 크게 낮아짐을 통해 알 수 있다.

Fig. 11 Velocity and vorticity field of $T = 1.3 \text{ sec} > T_N$, $H = 0.048 \text{ m}$

4.4.3 장주기의 입사파

장주기의 입사파와 경우 고유주기의 입사파의 경우보다 직사각형 부유식 구조물의 전-후면에서 생성되는 와류의 크기가 상대적으로 작다는 것을 Fig. 11(a)-(h)를 통해 알 수 있다. 이는 상대적으로 장주기일 때가 점성영향에 의한 감쇠효과가 공진점에서 보다 더 작게 작용하는 것으로 생각된다. 이는 Fig. 7에서 공진점 근처에서 비점성 선형모델과 점성을 고려한 모델의 종운동 RAO의 차이가 장주기일 때의 차이보다 훨씬 크다는 것을 보면 알 수 있다. 그리고 단주기의 입사파

경우와 비교해보면, 직사각형 부유식 구조물 전면에서의 와류의 크기는 상대적으로 작으나, 후면에서는 와류가 생성되고 있음을 나타낸다. 이로 인해 전체적인 점성효과에 의한 감쇠효과는 거의 비슷하다는 것을 Fig. 7을 통해 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 직사각형 부유식 구조물의 파랑 중 거동을

해석하기 위하여 오픈소스 라이브리인 OpenFOAM을 이용한 수치해석을 수행하였다. 직사각형 형태의 부유식 구조물의 2자유도 운동(수직·종운동)에 대하여 자유감쇠실험과 규칙파 내습시 동적거동에 대해서도 수치해석을 수행하여, 그 결과를 실험데이터와 비교하여 검증하였다. 자유감쇠실험에서는 수직운동에 대한 감쇠비를 제외하고는 실험데이터와 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 수직운동의 감쇠비 비교결과에서는 수치해석과 실험결과에서의 감쇠비가 다소 차이를 보였으나, 수치해석의 감쇠비로부터 점성 효과가 고려된 수직운동 RAO를 산출하면 실험결과와 더 근접함을 확인하였다. 그리고 수직운동과 종운동 RAO를 비점성 선형모델과 모형실험결과와 비교·검증하였다. 공진점 근처의 종운동 RAO의 수치해석 결과가 실험결과보다 다소 과대 예측되는 결과를 보여줬는데, 이는 실험에서 사용되어진 계류시스템이 부가적인 감쇠기능을 수행한 것으로 판단되었다. 직사각형 부유식 구조물 주변의 속도벡터와 와도해석을 통해서 입사파의 주기에 따라 크기에는 차이가 있으나 점성효과가 부유체의 pitch-in과 -away 위상내에서 움직임을 감소시키는 감쇠 역할을 한다는 것을 알 수 있었다[11]. 특히 공진점에서의 유속벡터와 와도로부터는 부유체 구조물의 양 끝단에 서로 반대방향의 와류가 생성됨을 알 수 있었고, 이는 공진점에는 점성에 의한 감쇠효과가 크게 나타남을 의미했다. 앞으로는 비선형적인 파에 대한 비선형적인 동적거동 연구도 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20163010071690) 그리고 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2017R1D1A1B03032694).

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the 2017 Joint conference of KAOSTS, BEXCO, Busan, April 19-20, 2017.

References

- [1] 2015, Retes, M., Merigaud, A., Gilloteaux, J. and Ringwood, J., "Nonlinear Froude-Krylov force modelling for two heaving wave energy point absorbers," *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference, European Wave and Tidal Energy Conference.*
- [2] 2015, Bhinder, M., Babarit, A., Gentaz, L. and Ferrant, P., "Potential time domain model with viscous correction and CFD analysis of a generic surging floating wave energy converter," *International Journal of Marine Energy*, pp.70-96.
- [3] 2015, Nematabkhsh, A., Michailides, C., Gao, Z. and Moan, T., "Comparison of Experimental Data of a Moored Multibody Wave Energy Device With a Hybrid CFD and BIEM Numerical Analysis Framework," *Proc. of the ASME 34rd Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- [4] 2015, Eskilsson, C., Palm, J., Kofoed, J.P. and Friis-Madsen, E., "CFD study of the overtopping discharge of the Wave Dragon wave energy converter," *Renewable Energies Offshore*, pp.287-294.
- [5] 2015, Schmitt, P. and Elsaesser, B., "On the use of OpenFOAM to model oscillating wave surge converters," *Ocean Engineering*, 108: pp.98-104.
- [6] 2016, Palm, J., Eskilsson, C., Paredes, G.M. and Bergdahl, L., "Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation," *International Journal of Marine Energy*, 16: pp.83-99.
- [7] 2012, Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsoe, J., "A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70 (9): pp.1073-1088.
- [8] 2013, Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., "Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®," *Coastal Engineering*, 71: pp.102-118.
- [9] 2014, Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., "Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using Open-FOAM®, Part I: formulation and validation," *Coastal Engineering*, 83: pp.243-258.
- [10] 2015, Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L., "Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries," *Coastal Engineering*, 101: pp.35-47.
- [11] 2006, Jung, K.H., Chang, K.A. and Jo, H.J., "Viscous effect on the roll motion of a rectangular structure," *Journal of engineering mechanics*, 132(2), pp.190-200.
- [12] 2013, Jung, J.H., Yoon, H.S., Chun, H.H., Lee, I. and Park, H., "Numerical simulation of wave interacting with a free

- rolling body," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), pp.333-347.
- [13] 1974, van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. II. Monotonicity and Conservation Combined in a Second-order Scheme," *Journal of computational physics*, 14(4), pp.361-370.
- [14] 1986, Issa, R.I., "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting," *J. Comput. Phys.*, 62(1): pp.40-65.
- [15] 1999, Ferziger, J.H. and Peric, M., "Computational methods for fluid dynamics," *Springer*, Berlin ; New York.
- [16] 2007, Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method, Pearson Education Ltd., Harlow, England; New York.
- [17] 2002, Weller, H.G., "Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations," Technical Report TR/HGW/02, OpenCFD Ltd.
- [18] 1959, Newmark, N.M., "A method of computation for structural dynamics," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(3), pp.67-94.