

Analysis of Relative Wave Elevation Around Semi-submersible Platform Through Model Test: Focusing on Comparison of Wave Probe Characteristics

Hyun-Seung Nam¹, Dong-Min Park², Seok Kyu Cho³ and Sa Young Hong³

¹Technical Research Personnel, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

²Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

³Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

모형시험을 통한 반잠수식 해양구조물 주변 상대파고 해석 : 파고계 특성에 따른 비교 중심으로

남현승¹, 박동민², 조석규³, 홍사영³

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 전문연구요원,

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원

³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

KEY WORDS: Wave probe 파고계, Relative wave elevation 상대파고, Semi-submersible platform 반잠수식 해양구조물, Model test 모형시험, Experimental study 실험적 연구

ABSTRACT: Recently, as the offshore structures are operated in the deep-sea oil fields, interest in the analysis of relative wave elevation around platforms is increased. In this study, it is examined how the analysis results differ depending on the characteristics of the wave probe when interpreting the relative wave elevation in the model test. First, by conducting the wave probe comparison experiment in the two-dimensional wave tank, it is confirmed how the measured values differ according to the type of wave probe for the same physical phenomenon. Two types of wave probe are selected, the resistance type and the capacitance type, and the causes of the difference in measured values is studied. After that, the model test of the semi-submersible platform is conducted to investigate the relative wave elevation. Relative wave elevation is measured with the wave probes used in the wave probe comparison experiment and analyzed to estimate the asymmetric factor and the extreme upwell. The results between the two types of wave probes are compared, and qualitative study for the cause of the difference is conducted by photographing the physical phenomenon using a high-speed camera. Through the above study, it is confirmed that the capacitance type wave probe shows a larger measured value than the resistance type under the breaking-wave condition, and the same results are obtained for the asymmetric factor and the extreme upwell. These results is thought to be due to the difference in the measurement principle between wave probes, which is whether or not they measured water bubbles. This implies that the model test should be conducted using appropriate wave probes by considering the physical phenomenon to be analyzed.

1. 서론

최근 유전개발이 천해에서 심해로 옮겨가며 해양구조물이 보다 가혹한 환경에 설치됨에 따라, 해양구조물 주변의 상대파고에 대한 관심이 커지고 있다. 1995년 북해에 설치된 Draupner 해양구조물 근처에서 발생한 ‘New-year Wave’라는 파랑은 주변 해역의 유의파고가 12m의 파랑임에도 불구하고 구조물 근처에서 25.6m까지 상승하여 구조물에 큰 손상을 입혔으며, 2015년 반잠수식 해양구조물인 COSL Innovator에서는 좌현 기둥에서 큰 파도로 인해 구조물에 큰 손상이 야기되었고 1명의 사망자와 4명의 부상자가 발생하였다. 이 외에도 2000년부터 2017년까지 공식적으로 29건의 해양구조물 근처의 높은 파고로 인한 사고가 보고되었다(Kvitrud and Loland, 2018). 이 같은

Received 1 December 2021, revised 16 December 2021, accepted 30 December 2021

Corresponding author Dong-Min, Park: +82-42-866-3949, dmpark@kriso.re.kr

© 2022, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이유로 각 선급에서는 해양구조물 주변의 상대파고 예측에 대한 가이드라인(Guideline)과 선급 규칙을 제공하고 있으며(ABS, 2018; DNVGL, 2019), 해양구조물 설계 시 이를 반영하여 갑판 높이를 산정하고 있다.

해양구조물 기둥 주변의 파고의 경우 일부 파랑 조건에서 비선형 성분이 전체 성분에 30% 이상을 차지하는 것이 수치적, 실험적으로 알려져 있으며(Kriebel, 1992), 기존의 선형 이론을 기반으로 한 예측에는 한계가 존재한다. 따라서 해양구조물 주변의 파고를 산정 및 예측하기 위해서는 비선형 성분을 포함할 수 있는 전산유체역학(Computational fluid dynamic, CFD) 시뮬레이션이나 수조모형시험이 수반되어야 하며, 특히 구조물의 기둥 주변에서는 비선형성이 강하게 나타나기 때문에 이러한 해석이 필수적이다. 전산유체역학 시뮬레이션을 이용한 해양구조물 근처 상대파고의 연구로서 Iwanowski et al.(2009)나 Matsumoto et al.(2010) 등은 상용 코드인 ComFLOW를 이용하여 반잠수식 해양구조물 기둥 주변의 규칙파 중 상대파고를 분석하고 실험 결과와 비교하였으며, Lee et al.(2014)은 100년 주기 불규칙 파에 대하여 상대파고를 해석한 바 있다. 그러나 앞선 연구와 같은 CFD 시뮬레이션들은 신뢰성 및 정확성에 대한 검증이 필요하며, 이를 위해서는 모형시험이 수반되어야만 한다. 시뮬레이션의 시간적 비용을 줄이기 위하여, 일부 연구에서는 선형 이론 기반의 상대파고 운동 응답에 비대칭 계수(Asymmetric factor)를 곱함으로써 비선형성을 포함시켜 간단하게 상대파고를 예측하는 방법을 제시하고 있으나(Stansberg, 2014; Pessoa et al., 2018), 선급에서는 새로운 형태의 해양구조물들에 대한 비대칭 계수는 모형시험을 통해 검증되어야 함을 요구하고 있다(DNVGL, 2019). 이러한 이유로 인해 모형시험은 상대파고 계측 및 분석에 있어서 검증의 기준을 제공하며, 그렇기에 상대파고의 특성을 파악하기 위한 정확한 계측이 필요하다.

모형시험에서 상대파고의 계측은 선체 근처에 지지물로 고정된 파고계를 사용하여 수행된다. 주로 모형시험에 사용되는 파고계는 계측 원리의 분류로 저항식, 용량식으로 구분되며, 이에 따라 각 파고계의 특성이 다르게 나타난다. 본 연구기관에서는 이러한 파고계의 특성 차이로 인해 동일한 물리적 조건에서 계측된 파도라도 계측값에 차이를 보이는 것을 확인하였으나 이와 관련한 선행 연구를 확인할 수 없었으며, ITTC(2017)에서 제공하는 해양구조물의 모형시험 가이드라인에도 이와 관련한 추천 사항은 따로 존재하지 않았다. 선급 문건에서 또한 모형 시험의 계측 장비의 특성에 대해서는 기준을 제공하고 있지 않았다(ABS, 2018; DNVGL, 2019). 그러나 이와 같은 계측 원리에 따른 측정값의 차이는 물리적인 현상의 해석에 있어 중요한 문제이기 때문에, 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 모형시험을 통한 반잠수식 해양구조물 근처 상대파고를 해석함에 있어 파고계의 특성에 따라 해석 결과가 어떠한 차이를 보이는지 검토하였다. 먼저 2차원 수조에서의 파고계 특성에 따른 비교 실험을 진행함으로써, 동일한 물리 현상이 파고계의 계측 원리에 따라 계측값에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 이후 반잠수식 해양구조물의 모형시험에 두 종류의 파고계를 설치하여 상대파고를 계측하고, 선급에서 제시하는 상대파고 해석방법을 이용하여 그 차이를 비교하였다. 상대파고 해석은 DNVGL 문건을 바탕으로 비대칭 계수 및 Upwell의 극값을 계산하였으며, 추가적으로 고속카메라 촬영을 통해 상대파고의 현상을 확인하여 계측값 차이의 원인을 검토하였다.

2. 파고계 특성 비교 실험

반잠수식 해양구조물 모형시험에 앞서 파고계 특성 비교 실험을 수행하였으며, 실험은 선박해양플랜트연구소(KRISO, Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering)의 2차원 수조에서 진행되었다. 실험의 목적은 파고계 계측 원리에 따라 파도 계측값의 차이를 확인하는 것으로서, 저항식과 용량식 파고계를 사용하여 진행되었다. Fig. 1와 Table 1은 파고계 특성 비교실험에 사용된 파고계 및 사양을 보여주고 있다. 파고계는 검출선과 앰프(Amp)로 구성되어있으며, 저항식 파고계는 MARIN사에서 제작된 Type 874 앰프를 사용하고 철선을 이용하여 제작하였고 용량식 파고계는 KENEK사에서 제작된 기성품을 사용하였다. RW(Relative wave elevation)의 경우 주로 모형시험에 상대파고를 계측하기 위해 사용하는 용량식 파고계로써, 검출선은 Teflon선을 이용하였고, 앰프는 시제품을 이용해 제작하였다. 계측값과 물리적인 현상의 비교를 위하여 2차원 수조 벽면에 격자를 설치하여 고속카메라 촬영을 진행하였다. 파고계는 서로 상호 간섭이 없도록 설치되었으며, 측면에서 파고계가 일직선을 이루도록 설치하였다. Fig. 2는 실험 세팅 모습을 보여주고 있다.

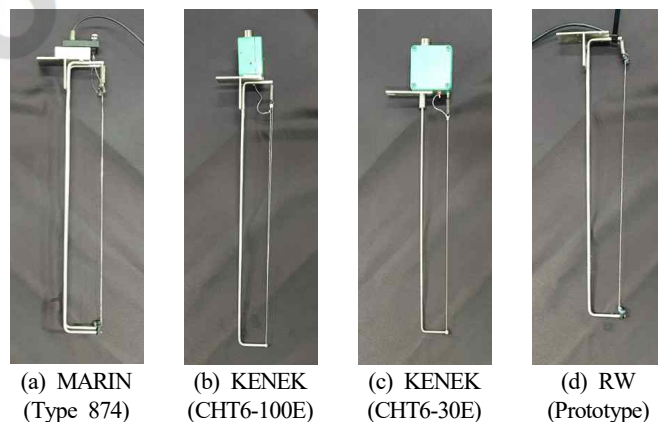


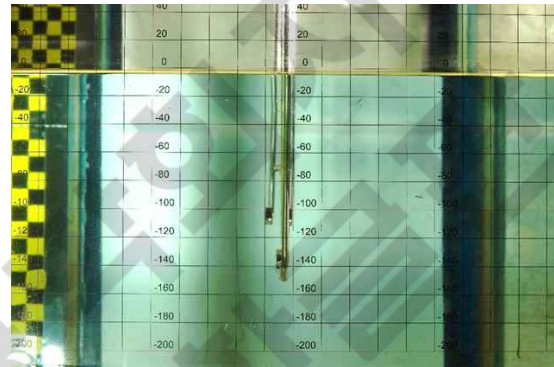
Fig. 1 Wave probes used in the comparative experiment

Table 1 Specifications of the wave probes

Item	MARIN (Type 874)	KENEK (CHT6-100E, 30E)	RW (Prototype)
Type	Resistance	Capacitance	Capacitance
Power supply	90-260 VAC, 50-60 Hz	210-220 VAC, 50-60 Hz	15V DC
Output voltage	10 V, 50 mA max	Dynamic Range ± 7 V	Dynamic Range ± 6.4 V
Linearity	0.1% of full scale	0.3% of full scale	0.5% of full scale
Temperature range	0-60 °C	0-40 °C	0-40 °C

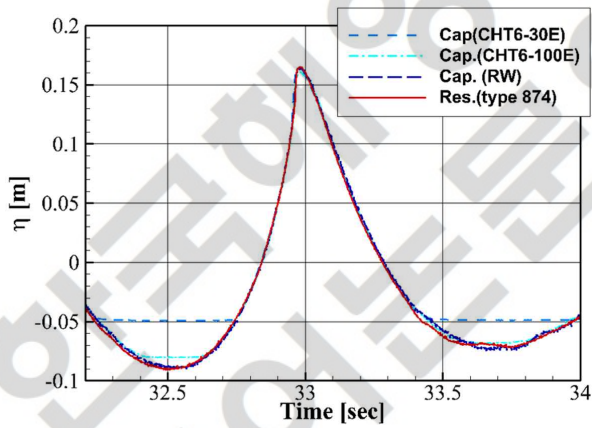


(a) Position of wave probe

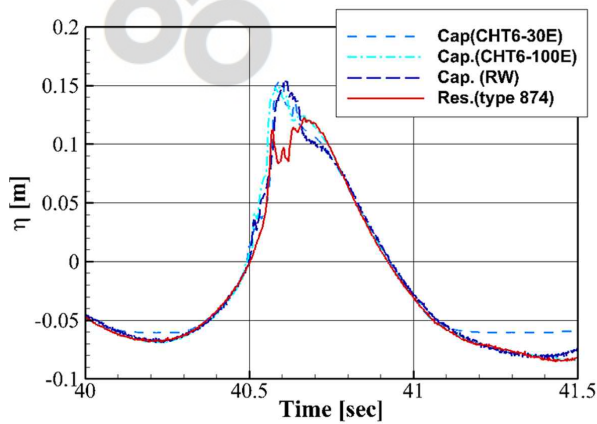
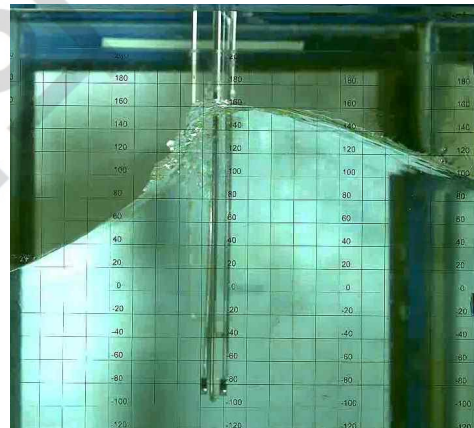


(b) High-speed camera setting

Fig. 2 Experiment setup for comparison of the wave probes



(a) Steep wave condition



(b) Breaking-wave condition



Fig. 3 Comparison of measurements depending on the wave condition

Fig. 3은 파 조건에 따른 파고계 계측값과 과정에서의 고속카메라 촬영 장면을 보여주고 있다. 먼저 기울기가 큰 Steep wave의 경우에는 용량식 파고계와 저항식 파고계의 계측값에 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기울기가 커져 쇄파가 되는 경우에는 과정에서 용량식 파고계의 값이 저항식 파고계의 값보다 크게 계측되는 것을 확인할 수 있다. 과정을 고속카메라로 확인해 보면 기포가 포함되어 있는 수면의 경우 약 0.15m 정도이며 이는 용량식 파고계와 유사한 값을 나타내는 것을 알 수 있으나, 기포가 포함되지 않은 수면의 경우 약 0.09m 정도로 저항식 파고계에 가까운 값을 나타낸다. 위 계측값의 차이는 계측 원리의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 저항식 파고계의 경우 수선면 아래의 두 도체선 사이에 회로가 형성되며, 저항의 차이로부터 파고를 측정하는 원리이다. 이에 반해 용량식 파고계의 경우에는 축선이 도체로 되어있는 선을 수중에 넣어, 수선면 아래의 도체와 물 사이의 정전용량의 변화로 파고를 계측하게 된다. 따라서 쇄파가 생성될 시 저항식 파고계는 수선면 하부의 회로가 제대로 형성되지 못하여 기포가 계측값에 영향을 적게 미치지만, 용량식 파고계의 경우 기포에 해당하는 물의 양만큼 주변 정전 용량의 변화가 있기에 이를 모두 파고로 계측하게 된다. 이러한 계측 원리의 차이로 인해 동일한 물리 현상이라도 계측값에 차이를 보이게 된다.

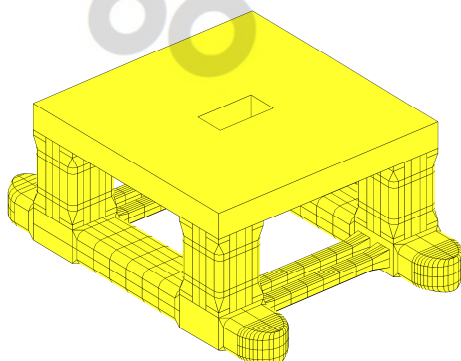
3. 모형시험 조건

다음으로 반잠수식 해양구조물의 모형시험이 진행되었다. 시험의 전체적인 목적은 해양구조물 주변 상대파고 및 충격 압력 계측이나, 본 연구에서는 구조물 기둥 앞의 상대파고를 중점적으로 분석하였다. 모형시험은 선박해양플랜트연구소 해양공학수조에서 진행되었으며, 모델은 KRISO 표준 반잠수식 해양구조물인 K-SEMI를 사용하였다. 모형 축적비는 해양공학수조에서 파도 생성이 가능한 범위를 고려하여 1/50으로 결정하였다. 모형시험은 해양구조물의 생존 조건에서 수행되었으며, 주요제원은 Table 2와 같다. 계측 항목은 6자유도 운동, 상대파고, 계류선의 장력 등이며 계류 시스템은 4점 소프트 스프링 시스템으로 구성하였다. Fig. 4는 K-SEMI 모형의 형상 및 모형시험 수행 장면을 보여주고 있다.

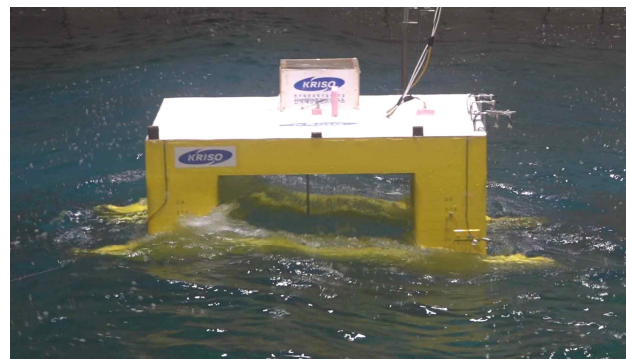
Fig. 5는 상대파고의 계측이 이루어지는 지점을 보여주고 있다. 상대파고의 위치는 크게 기둥 전면(RW01-RW02), 폰툰(Pontoon) 후면(RW03-RW04), 갑판 전면 및 하부(RW05-RW12)에 설치되었다. 기둥 전면에서의 상대파고 계측위치는 DNVGL에서 제시하는 기둥으로부터 3m(RW02) 위치에 설치되었으며, 이는 기둥을 타고 흐르는 국소적인 파의 런업(Run-up)의 계측 영향을 피하기 위함이다. 추가적으로 이보다 조금 더 떨어진 6m(RW01) 앞에도 계측의 경향성 비교를 위한 상대파고계를 설치하였다. 이 두 위치에서는 파고계 특성의 차

Table 2 Main dimensions of the K-SEMI

Main dimension	Unit	Survival draught	
		Prototype	Model (1/50)
Pontoon length	m	117.60	2.352
Breadth	m	82.60	1.652
Draft	m	19.00	0.380
Column width	m	16.8	0.336
Disp.	MT	56034	0.4483
GM (metacentric height)	m	3.63	0.726
Roll period	s	40.37	7.123
Pitch period	s	48.62	6.876



(a) Geometry



(b) Model test

Fig. 4 Model of K-SEMI

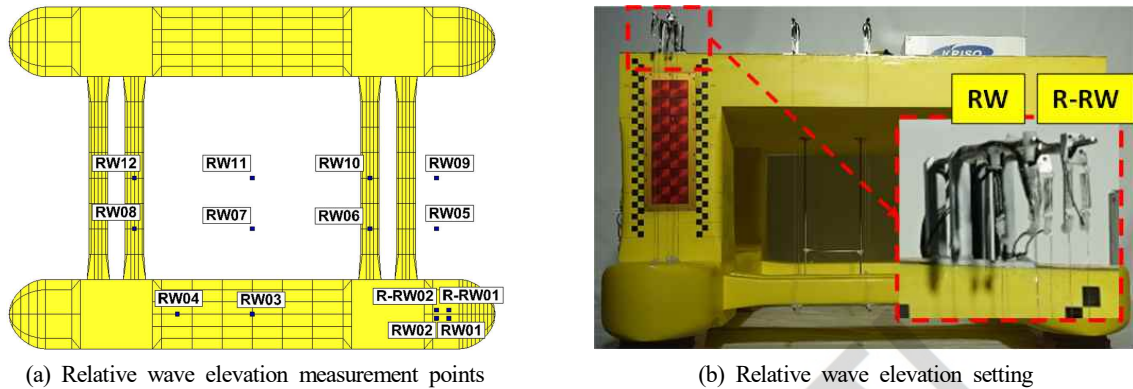


Fig. 5 Measurement of the relative wave elevation

Table 3 Environmental conditions

Wave ID	H_s (m)	T_p (s)	γ	Remarks
WHT	5.00	10-25	-	Motion & RW RAO
IRW01	17.30	16.65	3.15	Slamming & upwell
IRW02	10.00	10.65	5.00	(16 seeds)

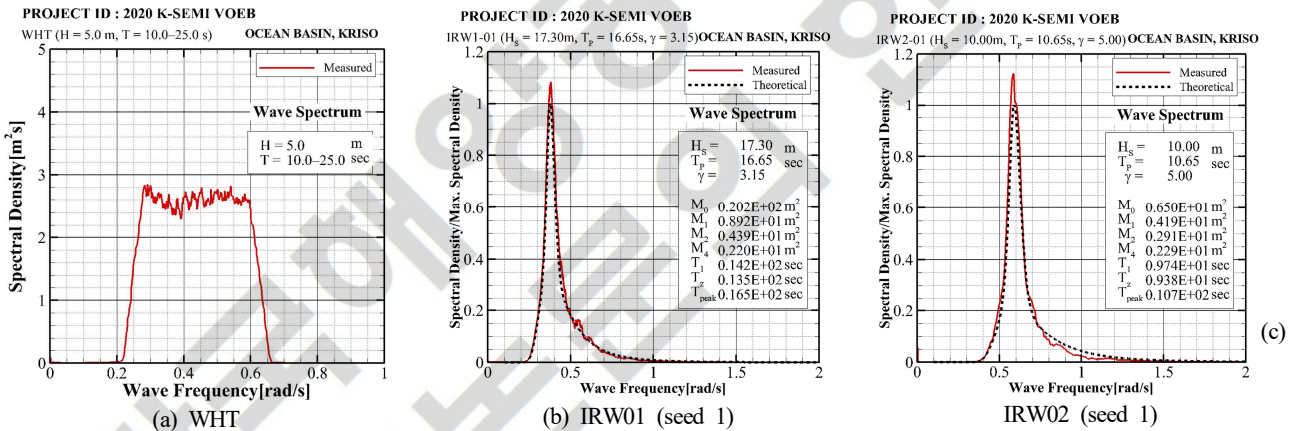


Fig. 6 Wave spectra for different environmental conditions

이를 비교하기 위하여 기둥 전면부에 폭 방향으로 2m 간격을 둔 용량식 파고계(RW)와 저항식 파고계(R-RW)를 설치하여 상대파고의 결과를 비교, 확인하였다. 용량식 파고계와 저항식 파고계는 각각 2절의 파고계 특성 비교 실험에서 사용된 RW, MARIN사의 Type 874와 동일한 방식으로 제작해 사용하였다.

파도 조건의 경우 백색 잡음파 및 불규칙파로 구성되어있으며, Table 3에 나타나 있다. 백색 잡음파는 해양구조물의 운동 RAO (response amplitude operator) 및 상대파고 RAO 분석을 위한 목적이며, 주기 10-25초의 파도를 생성하였다. Fig. 6(a)는 생성된 백색 잡음파의 스펙트럼을 보여주고 있다. 불규칙파의 경우 DNVGL(2019) 및 DNV(2014)에서 제시한 상대파고 및 충격압력이 크게 나올 수 있는 범위에서 선정하였으며 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼으로 실 스케일(Scale) 3시간 파도를 생성하였다. 또한 각 불규칙파는 해상상태는 동일하지만 파 시계열이 다른 16개의 시드(Seed)에 대하여 시험을 수행하였다. 이는 충격압력 산정 및 상대파고의 극값 추정을 위하여 DNVGL에서 제시한 재현조건을 만족시키기 위함이다. Fig. 6(b)와 6(c)는 16개 시드 중 대표적으로 1개 시드에 대한 IRW01과 IRW02의 스펙트럼을 보여주고 있다. 본 실험에서는 선수파(파향 180도) 조건에서 실험을 진행하였다.

4. 모형시험 결과

상대파고의 분석에 앞서 구조물 운동 및 상대파고의 응답을 검토하였다. 백색잡음파로 구한 각 운동 응답을 수치해석과 비교하였으며, 이 수치해석 결과는 상대파고 분석에서 비대칭 계수를 추정하는데 사용된다. 수치해석은 DNVGL에서 개발된 상용 프로그램인 WADAM을 이용하였다. WADAM은 포텐셜 유동 기반의 주파수영역 해석 프로그램이며, 구조물 및 자유수면 패널에 파랑그린함수(Wave green function)를 분포시켜 회절/산란 문제를 푼다. 자세한 관련 이론은 Lec(1995)를 참고할 수 있다. 추가적으로 반잠수식 해양구

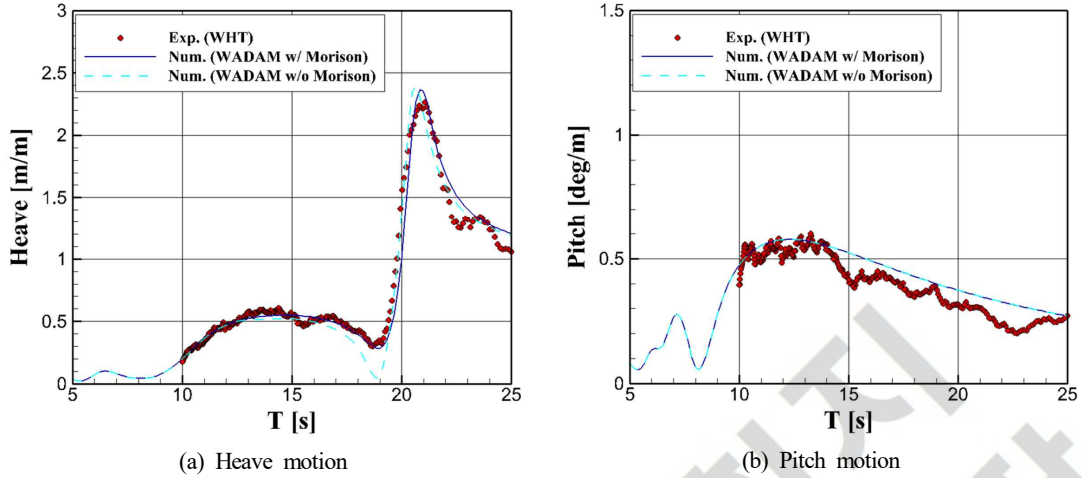


Fig. 7 RAO of the semi-submersible platform vertical motion

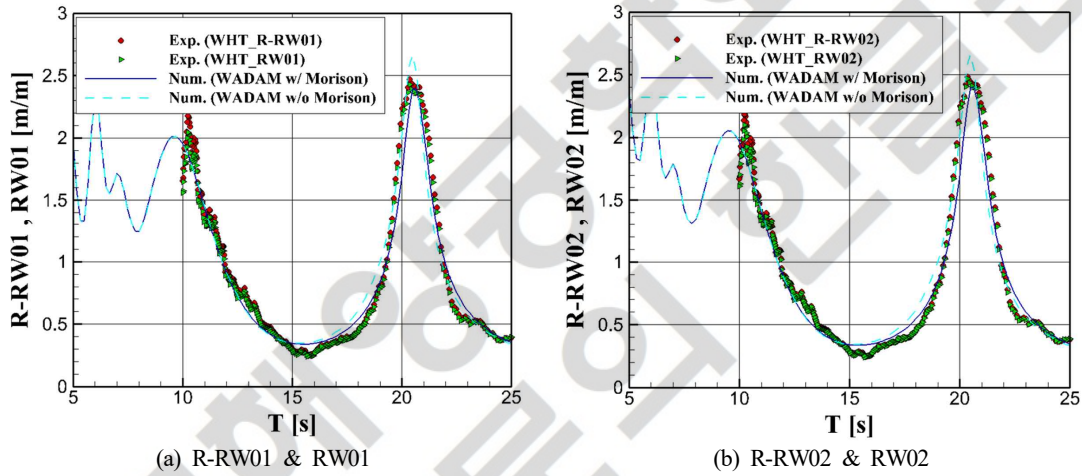


Fig. 8 RAO of the relative wave elevation at the front of the column

조물의 경우 상하운동에서 항력이 포함되어야, 상하운동 파랑기진력이 없어지는 Cancellation 주기 근처에서 운동 응답을 추정할 수 있기 때문에, 모리슨 모델(Morison model)을 추가 사용하여 해석하였다.

Fig. 7은 선수파 조건에서의 수직방향 운동인 구조물의 상하운동 및 종동요 운동을 나타내고 있다. 실선은 WADAM을 이용한 수치해석 결과이며, 심볼(Symbol)은 백색 잡음파로부터 추출한 결과이다. 전체적으로 수직방향 운동에 대해 현재 수치모델이 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 상하운동의 경우 19초 근처의 Cancellation 주기에 해당하는 운동 응답이 모리슨 모델을 적용함으로써 모형시험과 유사하게 계산되는 것을 볼 수 있다. 종동요 운동의 경우 15초 이후의 수치해석 응답 결과가 계산결과가 살짝 크게 계산되는 것을 확인할 수 있는데, 그 차이가 크지 않기 때문에 현재 수치해석 모델을 이용하여 상대파고 분석을 진행하였다.

Fig. 8은 구조물의 기둥 앞부분의 상대파고의 RAO(Response amplitude operator)를 보여주고 있다. 상대파고 응답은 회절/산란된 파고와 구조물의 운동의 크기 및 위상을 고려하여 계산되었다. 전체적으로 상대파고의 응답 또한 수치해석 결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특징적으로는 구조물의 상하운동이 크게 일어나는 21초 부근에서 상대파고가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 수직방향 운동이 회절/산란된 파와 반대 위상차를 가지는 부분인 15초에서는 구조물의 운동이 오히려 상대파고의 크기를 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 주기가 긴 장파 영역에서는 반잡수식 해양구조물이 파를 타고 같이 운동하는 특성으로 인해 상대파고 운동 응답의 값이 0으로 수렴하는 경향을 보이며, 단파 영역에서는 해양구조물의 운동 응답은 작으나 회절 및 산란된 파로 인해 2 근처의 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 용량식 파고계와 저항식 파고계의 값을 비교하면 수치해석과 실험 결과 모두 거의 유사한 것을 확인할 수 있으며, 두 파고계 사이의 응답 RAO의 차이는 거의 보이지 않음을 알 수 있다.

5. 상대파고 해석 방법

상대파고의 해석은 DNVGL(2019)의 가이드 라인을 따라 수행되었으며, 본 연구에서는 비대칭 계수와 Upwell의 극값을 분석했다. 먼저 상대파고 χ 는 구조물의 운동과 회절/산란된 파로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 \chi(x, y, t) &\equiv \eta(x, y, t) - z_p(x, y, t) \\
 &= \eta_L(x, y, t) + \eta_{NL}(x, y, t) - z_{p,WF}(x, y, t) - z_{p,LF}(x, y, t) - z_{p,mean} \\
 &= \chi_{WF}(x, y, t) - z_{p,LF}(x, y, t) - z_{p,mean}
 \end{aligned} \tag{1}$$

위 식에서 $\eta(x, y, t)$ 와 $z_p(x, y, t)$ 는 각각 위치 (x, y) , 시간 t 에서의 회전 및 산란된 파고 및 구조물의 수직방향 변위를 의미한다. 파고는 선형 성분과 비선형 성분으로 나눌 수 있으며, 구조물의 수직방향 변위는 파 주파수에 의한 변위, 저주파운동에 의한 변위, 평균 변위로 나눌 수 있다. 위 식의 아래첨자 L 과 NL 는 각각 선형, 비선형 성분을 의미하며, $WF, LF, mean$ 은 파 주파수, 저주파수, 평균을 의미한다. 파 주파수의 수직방향 변위는 각 위치에서의 i 번째 구조물의 운동 ξ 을 이용하여 Eq. (2)와 같이 표현이 가능하며, 구조물 운동이 작을 경우 Eq. (2)의 오른쪽 식과 같이 근사할 수 있다.

$$z_{p,WF} = \xi_{3,WF} + x \sin(\xi_{5,WF}) + y \sin(\xi_{4,WF}) \simeq \xi_{3,WF} + x \xi_{5,WF} + y \xi_{4,WF} \tag{2}$$

비대칭 계수의 경우 상대파고의 비선형성을 표현하기 위한 것으로, 파고의 선형 성분과 비선형 성분의 비율을 나타낸 것이다. 비대칭 계수 α 를 사용하여 상대파고의 파주파수 성분을 표현하면 다음과 같다.

$$\chi_{WF} = \eta_L + \eta_{NL} - z_{p,WF} = \alpha \eta_L - z_{p,WF} \tag{3}$$

$$\chi_{WF,90}^{(num)}(\alpha) = (\alpha \eta_L^{(num)} - z_{p,WF}^{(num)}) = \chi_{WF,90}^{(exp.)} \tag{4}$$

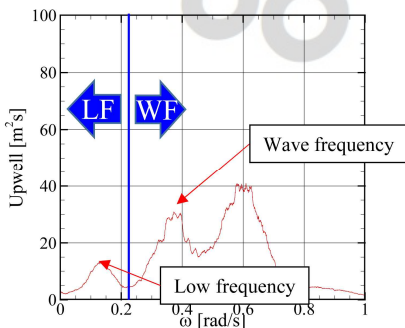
비대칭 계수는 Eq. (4)와 같이 모형시험과 수치해석 결과의 90분위수 극값을 매칭(Matching)하여 구하게 된다. 실험에서의 90분위수의 경우에는 각 해상상태의 여러 시드의 반복실험을 통해 구하게 되며, 각 케이스의 파주파수 상대파고의 최댓값을 와이불 분포(Weibull distribution)로 피팅(Fitting)하여 구한다. 수치해석에서의 90분위수는 4절에서 계산한 Fig. 8의 상대파고의 응답을 이용하여 각 해상 상태에서 파정의 최댓값의 분포를 통해 구하며, 자세한 내용은 DNVGL(2019)를 참고할 수 있다.

다음으로 Upwell의 극값을 추정하는 방법이다. Upwell은 폰툰으로부터 3m 떨어진 위치(RW02)에서의 상대파고를 의미한다. Upwell의 극값을 구하기 위해서는 파 주파수 성분뿐만 아니라 구조물 운동에 의한 저주파수 및 평균 변위도 고려되어야 한다. 구조물의 운동에 의한 저주파수 변위의 극값은 지수 분포를 가정하여 Eq. (5)와 같이 계산할 수 있으며, 식에서 σ 는 표준 편차를 의미한다. 저주파수 변위의 표준 편차 값은 포텐셜유동 기반 해석 프로그램을 이용하여 2차 문제를 풀어 사용할 수도 있으나, 본 연구에서는 모형시험 기반의 해석을 위해 모형시험으로부터 계산된 값을 사용하였으며 평균 변위 또한 모형시험에서 계산된 값으로 사용하였다. 최종적으로 Upwell의 극값은 Eq. (7)과 같이 구할 수 있다.

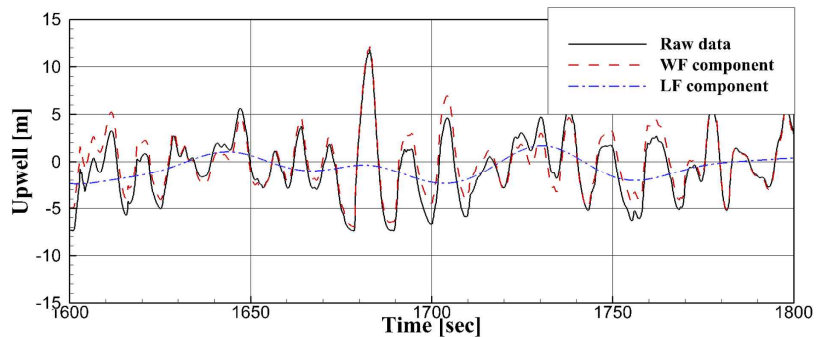
$$\xi_{i,LF} = \sigma_{\xi_{i,LF}} \ln \frac{T}{T_n} \tag{5}$$

$$Z_{LF} = -x \sin|\xi_{5,LF}| + y \sin|\xi_{4,LF}| \tag{6}$$

$$\chi_{extreme} = \chi_{mean} + \sqrt{\chi_{WF}^2 + \chi_{LF}^2} \tag{7}$$



(a) Upwell power spectrum density



(b) Time series of each component

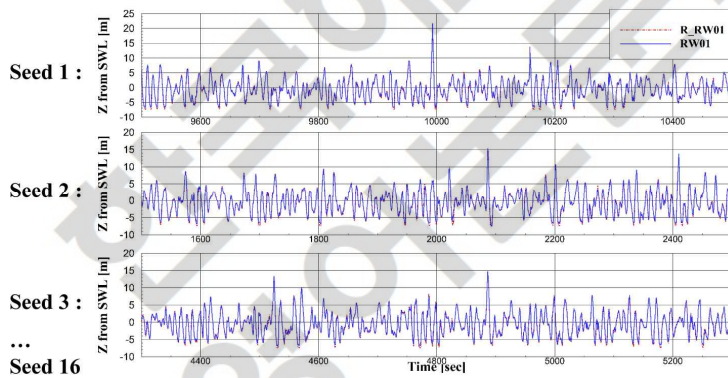
Fig. 9 Separation of each component from model test data example

위의 해석 방법에서 사용되는 모형시험 데이터의 상대파고의 파주파수 및 저주파수 성분은 Fig. 9(a) 와 같이 상대파고의 스펙트럼 밀도를 확인하여 저주파 및 고주파 통과 필터를 통해 각 성분을 추출하여 사용한다. 본 연구에서는 모형시험에서 계측된 데이터를 0.23rad/s를 기준으로 저주파수와 파주파수를 나누어 해석하였으며 Fig. 9(b)에 원본 데이터 및 저주파수, 파주파수의 성분의 시계열을 확인할 수 있다. 그림과 같이 정제된 데이터를 이용하여 Eq. (4)와 Eq. (5)을 통해 비대칭 계수 및 Upwell의 극값 계산에 사용하였다.

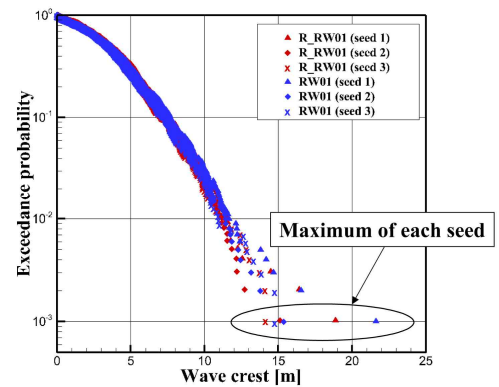
6. 상대파고 해석 결과

먼저 모형시험으로부터 계측된 상대파고의 통계치를 비교하였다. Table 4는 각 해상 상태별로 16개 시드에서 최대값을 추출하여 통계값을 계산한 것이며, Fig. 10은 Table 4의 보다 쉬운 이해를 위해 일부 시드에 대하여 상대파고의 계측 시계열과 상대파고 파정 분포를 보여주고 있다. 두 지점에서의 대표적인 통계값을 비교하기 위해 16개 시드에 대한 최대값들을 와이불 분포로 피팅하여 90분위수에 해당하는 상대파고의 값을 계산하였으며, 추가적으로 최대값들의 평균 및 표준 편차 값을 확인하였다. Table 4에서 구조물 기둥으로부터 6m 떨어진 지점의 R-RW01과 RW01를 비교해 보게 되면 용량식 파고계를 사용한 결과가 저항식 파고계의 결과보다 크게 계측된 것을 확인할 수 있다. 표준 편차는 두 파고계가 유사함에 반해, 두 해상상태 모두 용량식 파고계가 90 분위수 상대파고의 값과 평균이 크게 계산되었다. 이러한 결과는 통계치의 값이 각각의 편차를 고려하더라도 유의미한 차이를 보여주고 있음을 뜻한다. 각 시드에서의 상대파고의 최대값을 비교하면 16개 시드의 재현조건 모두에 대해 용량식 파고계가 저항식 파고계보다 큰 최대값을 보여주었으며, 이러한 결과는 구조물 기둥으로부터 3m 떨어진 지점의 R-RW02와 RW02에서도 동일하게 나타났다. 이는 Fig. 10(b)의 결과에서도 일부 확인할 수 있다. 두 파고계에서 계측값의 차이는 기둥으로부터 3m 떨어진 지점에서 6m 떨어진 값 지점보다 크게 나타났다. 현재 DNVGL의 상대파고 해석 방법은 최대값의 분포를 이용하여 상대파고를 산정하기 때문에, 이러한 파고계 특성에 따른 계측값 차이는 Eq. 4로 계산되는 비대칭계수의 차이 및 Eq. (7)로 계산되는 Upwell의 극값에 영향을 미치게 된다.

Table 5과 Fig. 11은 각각 5절의 해석 방법으로부터 구한 비대칭 계수와 Upwell의 극값을 보여주고 있다. 비대칭 계수를 확인하면 용량식 파고계와 저항식 파고계의 차이를 확연히 볼 수 있다. Fig. 8에서 확인하였듯이 백색 잡음과 조건에서 두 가지 파고계의 계측 결과가 수치해석 결과와 거의 유사함에도 불구하고, 용량식 파고계가 저항식 파고계에 비해 비대칭 계수가 약 0.03-0.08정도까지 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. DNVGL에서는 비대칭 계수를 해양구조물 주변에 대하여 1.2, 구조물의 기둥 주변에서 1.3을 제시하고 있으며, 이 값은 비선형 성분이 선형 성분에 약 20-30% 정도임을 의미하므로, 따라서 파고계 차이에 의해 나타난 비대칭 계수의 3-8% 차이는 무시할 수 없는 수치이다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 해양구조물의 충격압력과 연관되어있는 RW02 위치에서도 Upwell의 극값이 약 0.6-1m정도 차이를 보이며, 이는 해양구조물 갑판의 높이 선정과 직결되기 때문에 설계에서의 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 원인을 확인



(a) Times series of relative wave elevation around maximum value



(b) Exceedance probability of wave crest

Fig. 10 Analysis of the maximum value of the relative wave elevation

Table 4 Statistics of the maximum value of the relative wave elevation for 16 seeds

Item	Unit	6 m from column		3 m from column	
		R-RW01	RW01	R-RW02	RW02
90% percentile (Weibull)	m	18.55	19.79	21.22	22.58
IRW01	Average	15.65	16.43	18.28	19.37
	Standard deviation	1.95	2.18	2.22	2.31
	90% percentile (Weibull)	14.31	14.75	18.78	20.15
IRW02	Average	12.90	13.43	14.75	17.96
	Standard deviation	0.95	0.93	1.49	1.62

하기 위하여 고속카메라 촬영을 통해 계측값이 차이를 보이는 순간의 상대파고를 촬영하여 분석하였다.

Fig. 12는 용량식 파고계와 저항식 파고계가 계측값의 차이를 보이는 파도의 시계열 및 촬영 결과이다. 촬영 장면을 보면 구조물 주변에서 많은 쇠파들이 생성되어 있으며, 벽을 타고 런업 현상을 일으킨 파가 다시 튕겨져 나와 파고계에 영향을 주는 모습을 확인할 수 있다. 2차원 수조 시험 결과로부터 쇠파에 대해 용량식 파고계가 저항식 파고계에 비해 계측값이 큰 것을 확인했으며, 다시 튕겨져 나온 파

Table 5 Asymmetric factor at the front of the column

	6 m from column		3 m from column	
	R-RW01	RW01	R-RW02	RW02
IRW01	1.104	1.176	1.232	1.309
IRW02	0.843	0.875	1.073	1.158

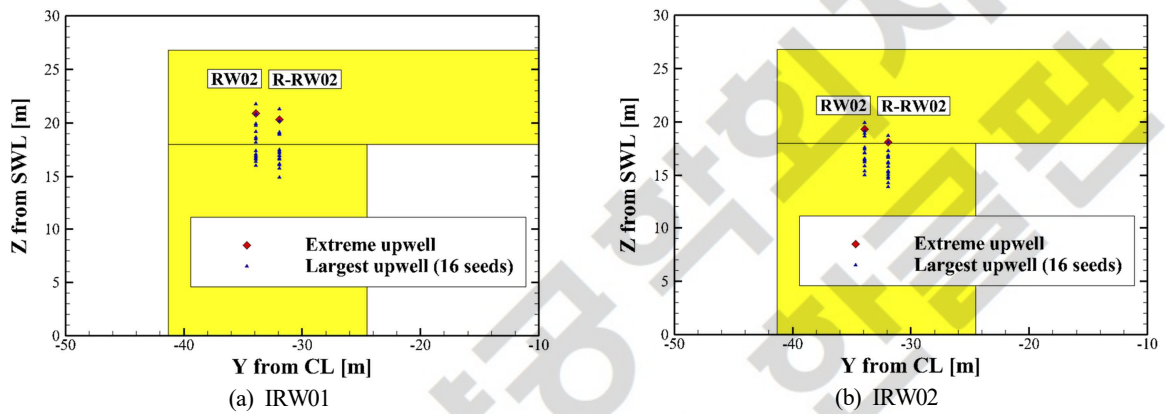


Fig. 11 Extreme upwell and Largest upwell for RW02 and R-RW02

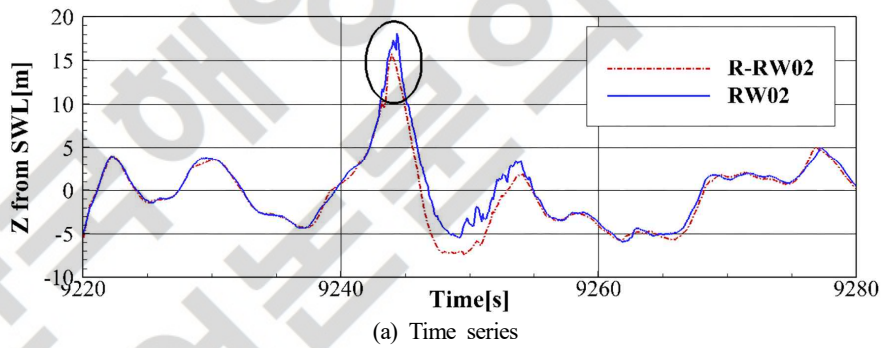


Fig. 12 Extreme upwell and largest upwell for RW02 and R-RW02

는 저항식 파고계에 회로를 형성하여 계측될 만 큼 영향을 주진 않지만 용량식 파고계의 경우 이러한 물 또한 계측값으로 잡아낼 수 있기 때문에 용량식 파고계가 저항식 파고계에 비해 큰 계측값을 나타냈음을 확인하였다.

이러한 파고계의 계측 원리에 따른 모형시험에서의 측정값 차이는 상대파고 해석에 영향을 미칠 수 있기 때문에 심도 깊게 논의되어야 한다. 해양구조물 근처 상대파고에 기포를 포함한 해석을 진행해야 할 경우 용량식 파고계가 모형시험에 적합하나, 그렇지 않은 경우에는 저항식 파고계를 사용하여 모형시험을 수행해야 한다. 본 연구의 결과는 해석하고자 하는 물리현상의 검토를 통해 적합한 파고계를 선택하여 모형시험을 진행해야 함을 암시한다.

7. 결론

본 연구에서는 모형시험을 통한 반잠수식 해양구조물 주변 상대파고를 계측함에 있어 파고계 특성에 따라 해석 결과가 어떠한 차이를 보이는지 검토하였다. 대상 파고계는 저항식 파고계와 용량식 파고계이며, 2차원 수조에서의 파고계 특성에 따른 계측값 비교 실험을 진행하여 파고계의 계측 원리에 따른 계측값 변화를 확인하였다. 또한 이러한 특성 차이가 반잠수식 해양구조물의 상대파고 해석에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 상대파고의 해석은 반잠수식 해양구조물의 모형시험을 통해 DNVGL에서 제시된 방법을 따라 진행되었으며, 두 가지 종류의 상대파고계에서 계측된 값의 비교를 진행하였다. 본 연구로부터 얻어낸 결론은 다음과 같다.

(1) 2차원 수조에서의 쇄파 실험에서 용량식 파고계가 저항식 파고계보다 큰 계측값을 나타냈다. 이는 파고계의 계측 원리 차이에 따른 결과로써, 저항식 파고계의 경우 수선면 아래 도체 사이의 저항변화를 통해 파고를 계측하기 때문에 쇄파의 기포 등이 저항 변화에 큰 영향을 주지 못하지만, 용량식 파고계의 경우 검출선 근처의 용량변화를 통해 파고를 계측하기 때문에 쇄파의 기포 등의 영향이 계측값에 포함되어 크게 측정되었다.

(2) 반잠수식 해양구조물 기둥 전면부에서 용량식 파고계가 저항식 파고계보다 크게 상대파고를 계측하였다. 이로 인해 두 파고계가 설치된 부분의 운동 응답 및 수치해석 결과는 유사하였음에도 불구하고, 통계값 및 비대칭계수, Upwell의 극값 모두에 대하여 용량식 파고계가 크게 계산됨을 확인할 수 있었다. 비대칭계수에서는 비선형 성분이 용량식 파고계의 결과가 저항식 파고계의 결과에 비해 3~8% 정도 크게 나타났으며, Upwell의 극값에서는 0.6~1.0m 정도 더 크게 계산되었다. 고속카메라를 통해 분석한 결과 기둥 주변의 파가 부서지거나, 또는 기둥을 타고 다시 튀겨져 나온 파로 인해 상대파고의 계측값에 영향을 준 것으로 확인되며, 용량식 파고계는 이러한 영향이 저항식 파고계에 비해 크게 나타났다. 본 연구의 결과는 해석하고자 하는 물리현상의 검토를 통해 적합한 파고계를 선택하여 모형시험을 진행해야 함을 암시한다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Funding

This study is funded by the “SHI-KRISO cooperative research program for enhancement of offshore structure design technology (PSI8680)” and the “Development of core technology for computational fluid dynamics analysis of global performance of offshore structures (PES3940)” supported by the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. We greatly appreciated all the received support.

References

- ABS. (2018). *Air Gap and Wave Impact Analysis for Semi- Submersible*. Houston, USA: American Bureau of Shipping.
- DNVGL. (2019). *Prediction of Air Gap for Column Stabilised Units*. Oslo, Norway: Det Norske Veritas.
- DNV. (2014). *Environmental Condition and Environmental Load*. Oslo, Norway: Det Norske Veritas.
- ITTC. (2017). *Testing and Extrapolation Methods Loads and Responses, Ocean Engineering Floating Offshore Platform Experiments*. Zurich, Switzerland: International Towing Tank Conference.
- Kriebel, D.L. (1992). Nonlinear Wave Interaction with a Vertical Circular Cylinder. Part II: Wave Run-up. *Journal of Ocean Engineering*, 19(1), 75-99. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90048-9)
- Kvitrud, A., & Loland, A.H. (2018). Observed Wave Actions on Norwegian Semi-Submersible and TLP Decks. *Proceeding of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Madrid, Spain. <https://doi.org/10.1115/OMAE.2018-77008>
- Lee, C.H. (1995). *WAMIT Theory Manual*. Cambridge Mass., USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Lee, S.K., Yu, K., & Huang, S.C. (2014). CFD Study of Air-Gap and Wave Impact Load on Semisubmersible Under Hurricane Conditions. *Proceedings of the 33rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, California, USA. <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24318>

Iwanowski, B., Lefranc, M., & Wemmenhove, R. (2009). CFD Simulation of Wave Run-Up on a Semi-Submersible and Comparison with Experiment. Proceedings of the 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hawaii, USA. <https://doi.org/10.1115/OMAE.2009-79052>

Matsumoto, F.T., Watai, R.A. & Simos, A.N. (2010). Wave Run-Up and Air Gap Prediction for a Large-Volume Semi-Submersible Platform. Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Shanghai, China. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20165>

Pessoa, J., Fonseca, N., & Stansberg, C.T. (2018). Experimental and Numerical Study of the Free Surface Elevation over the Pontoons of a Semisubmersible Platform in Waves. Proceedings of the 37th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Madrid, Spain. <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-78009>

Stansberg, C.T. (2014). Nonlinear Wave Amplification Around Column-Based Platforms in Steep Waves. Proceedings of the 33rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, California, USA. <https://doi.org/10.1115/OMAE.2014-24569>

Author ORCIDs

Author name	ORCID
Nam, Hyun-Seung	0000-0003-0334-6587
Park, Dong-Min	0000-0002-9074-2299
Cho, Seok Kyu	0000-0002-7821-4848
Hong, Sa Young	0000-0003-3564-5776