

경사형 방파제 연계 파력발전 구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구

임창혁¹ · 신승호² · 박세완³ · 김경환² · 오정환² · 김규용^{4,†} · 남정수⁵

¹선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부 연구원
²선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부 책임연구원
³선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부 선임기술원
⁴충남대학교 건축공학과 교수
⁵충남대학교 건축공학과 조교수

A study on the Estimation of the Wave Load on the Structure of wave Energy Converter connected to Rubble-Mound Breakwater

Chang-Hyuck Lim¹, Seungho Shin², Sewan Park³, Kyong-Hwan Kim², Jeong-Hwan Oh²,
Gyu-Yong Kim^{4,†}, and Jeong-soo Nam⁵

¹Researcher, Marine Renewable Energy Research Division,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Principal Researcher, Marine Renewable Energy Research Division,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

³Senior Engineer, Researcher, Marine Renewable Energy Research Division,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁵Assistant Professor, Department of Architectural Engineering,
Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

요 약

본 연구는 경사형 방파제 전면에 설치된 진동수주형 파력발전 구조물에 작용하는 파랑하중을 다루고 있다. 방파제에 작용하는 파랑하중은 일반적으로 항만 및 어항 설계기준·해설(설계코드 KDS 64 00 00)에 따라 산출이 가능하다. 그러나 방파제에 연계된 진동수주형 파력발전 구조물은 기존 방파제와는 다른 특이 구조 및 형상을 가지게 되어 종래 지침의 적용에 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 경사형 방파제 전면에 거치된 진동수주형 파력발전 구조물에 작용하는 파랑하중을 우선 항만 및 어항 설계기준에 따라 산정하고, 전산유체역학(CFD)에 기반한 해석결과와 비교하였다. 더불어 2차원 수리모형실험을 수행하여 방파제 연계형 진동수주 파력발전 구조물에 작용하는 파랑하중의 안정성을 검증하고, 실질적인 설계문제에서 CFD 해석을 통한 파랑하중 결과 적용을 위한 대안을 검토하였다.

Abstract – This study considers the wave loads acting on the structure of oscillating water column(OWC) typed wave energy converter(WEC) connected to breakwater. The wave load acting on the breakwater can be estimated according to Port and Fish Port Design Standards and Explanations(Design code KDS 64 00 00). However, the structure of OWC WEC connected to breakwater has a specific structure and shape different from that of a conventional breakwater. Therefore there is a difficulty in applying general standards. In this study, the wave load acting on the structure of OWC WEC mounted on the front of the sloped breakwater was first evaluated in accordance with the standards and compared with the analysis results based on Computational Fluid Dynamics (CFD). In addition, the two-dimensional model test was performed to verify the stability of the wave load acting on the structure of OWC WEC mounted on the front of the sloped breakwater, and the method of applying the wave load through CFD analysis in practical design problems was discussed.

Keywords: Oscillating water column(진동수주), Wave energy converter(파력발전장치), Breakwater integration(방파제 연계), Wave load(파랑 하중), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

[†]Corresponding author: gyuyongkim@cnu.ac.kr

1. 서 론

탄소중립사회로의 전환 요구가 본격화됨에 따라 세계적으로 재생에너지로의 에너지 전환 시도가 가속화되고 있으며, 더불어 미래 에너지원인 해양에너지에 대한 개발 수요 또한 높아지고 있다. 해양에너지원은 파력, 조류력, 온도차 등 다양한 형태가 존재하며, 특히 파력은 세계적으로 2~3TW 수준의 무한한 에너지가 존재하여 오래전부터 꾸준히 연구개발이 이루어져 왔다.

파력발전은 1차 변환방식의 관점에서 크게 가동물체형, 진동수주형, 월파형 파력발전으로 구분할 수 있는데, 진동수주형 파력발전장치는 파의 운동을 한정된 공간(진동수주실)의 상하 수위로 변환함으로써 수주실 상부의 공기를 압축/팽창하도록 하고, 이를 외부와 연결한 상부 덕트의 왕복형 공기 흐름으로 전환하여 터빈을 가동시키는 방식으로, 터빈을 비롯한 주요 기기류가 파와 직접 접촉하지 않음으로써 신뢰성과 유지보수 편의성이 대단히 높은 발전 방식이다.

진동수주형 파력발전은 1990년대부터 개발이 진행되어 Limpet OWC(The Queen's Univ. of Belfast[2002]), PICO OWC(Falcao *et al.*[2020]) 등 실증플랜트를 통한 다각적인 검토가 진행되었다(Falcao[2010]; Falcao and Henriques[2014]; Falnes[2007]). 2010년대부터는 스페인 Mutriku 지역의 방파제에 300kW 시설용량의 진동수주형 파력발전장치가 설치되어 현재까지 실증 운용되어 2020년 9월까지 총 2.1GWh 수준의 전력이 생산되었다(TETHYS[2021]). 유럽에서는 특히 최근에도 OPERA 프로젝트(OPERA[2021]) 등을 통해 진동수주형 파력발전장치의 성능을 고도화하고 상용화를 실현하기 위한 연구개발을 꾸준히 추진하고 있다.

국내에서는 2000년대 초반 진동수주형 파력발전에 관한 연구가 시작되어, 2010년 후반 국내 최초로 제주도 서쪽 해상에 용수시험 파력발전소(Hong *et al.*[2007]; Hong and Hong[2010])를 구축하고 파력발전으로 생산된 전력을 계통에 인입한 바 있으며, 2016년부터는 원격 도서지역의 에너지 자립에 활용하기 위한 방안으로 기존 방파제에 연계 가능한 소형 진동수주형 파력발전장치를 개발하고 있다(Park *et al.*[2018a]; Park *et al.*[2018b]; Kim *et al.*[2019]; Kim *et al.*[2020]; Roh *et al.*[2020]). Fig. 1은 해당 연구에서 개발된 방파제 연계형 파력발전 시스템 중 파력발전 구조물 형상(진동

수주실)을 보여준다.

방파제는 일반적으로 경사제, 직립제, 혼성제가 존재하며, 국내 주요 항만 등에서는 직립제 케이스 형상의 방파제가 대부분이나 도서지역 어항 등 소규모 항에서는 경사형 방파제가 주를 이루고 있다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 본 연구에서 검토하고 있는 진동수주형 파력발전 구조물은 경사형 방파제에 적용할 목적으로 개발된 것으로서 이는 신규 방파제 건설은 물론 기존 경사형 방파제의 전면 소파블록(테트라포드 등)만 제거하여 설치할 수 있도록 고안된 것이다.

파력발전 구조물은 파랑 에너지로 발전을 할 수 있는 구조물로서 체체의 전면에 가해지는 파 에너지를 흡수, 전환함으로써 기존 소파제 등이 갖는 체체에 대한 파력 경감효과를 가지게 되어 파력발전과 방파제로써의 기능을 모두 겸비하고 있다고 할 수 있다.

파력발전 구조물을 설계하기 위해서는 방파제 전면에 위치한 소파블록을 제거하고, 별도의 구조물(진동수주실)을 대체 설치하게 되므로 파의 작용을 직접 받게 되는 진동수주 구조물 전면에 대한 파압과 전체 구조물에 작용하는 양압력을 정확히 추산하여야 한다. 하지만 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 진동수주실용 구조물은 종래 방파제 등과 그 형상이 크게 달라 기존 방파제 등의 설계를 위해 제안된 이론식을 간단히 적용하기 어려우며, 특히 양압력의 산출 방식에 대해서는 구체적인 제안이 부재한 실정이다. 즉 국내 방파제의 설계는 항만 및 어항 설계기준-해설(Ministry of Oceans and Fisheries.[2017])을 따르도록 되어있고, 해당 기준은 경사제, 직립제, 혼성제 등 전통적인 방파제에 대해 파랑 유동이 직접 작용하는 가정 하에 파압, 양압력 등의 산정 방식을 제시하고 있어, 본 연구의 대상과 같이 공동 구조 내로 유입된 파랑이 상하 진동하며 공기를 압축/팽창하도록 특이 구조를 채택한 구조물은 상기의 설계 기준에 의해 제반 설계치를 산정하기 곤란하다.

본 연구에서는 진동수주형 파력발전 구조물을 설계함에 있어서 파압 및 양압력의 선정을 위해 전통적인 산정 방식(파압 산정식)에 따른 결과와 CFD 해석에 기반한 파랑 하중 그리고 2차원 수리모형실험으로부터의 산정 결과와 비교 검토하였다.

부가적으로 이를 통해 종래의 방식으로 제시될 수 없었던 복잡형상 구조물의 양압력을 추정하는 방안에 대해 고찰한다.

2. 파력발전 구조물 설계

경사제 방파제에 연계된 파력발전 구조물의 실험역 설치 위치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제주도 추자면 목리포구 방파제이며, Fig. 3은 방파제 전면에 설치하는 파력발전 구조물과 생성된 전기에너지를 저장하는 ESS(에너지저장장치) 설비를 나타낸 조감도이다.

파력발전 구조물은 기존 방파제에 설치되어 있는 테트라포드 일부를 제거하여 설치하고, 구조물 수면 하 끝단에는 슬라이딩 방지를 위해 근교블록을 설치하도록 하였다.

구조물 설계는 실험역 실증지로 선정된 목리포구 방파제의 경사형태 평면배치계획에 따라 설계를 하였으며, 기존 방파제의 경사형

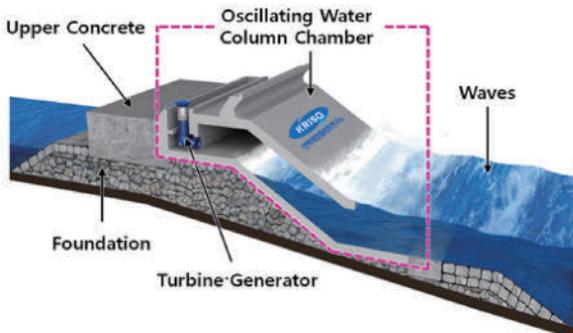


Fig. 1. Shape of oscillating water column chamber of Chuja Pilot plant.



Fig. 2. Location map.

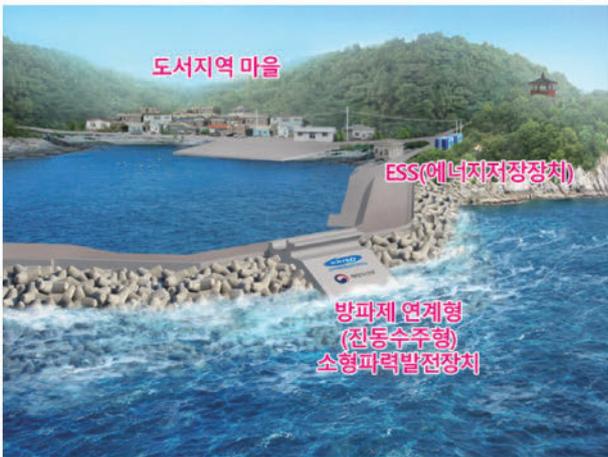


Fig. 3. Bird's-eye view.

태, 수심, 지반조건 등을 종합적으로 고려하여 이를 바탕으로 적용 가능한 단면을 구상한 후 안정성, 적용성, 시공성 등을 검토하여 최종단면을 선정하였다.

구조물 설계 조건은 기상, 해상, 지형조사 등의 자연조건과 입지 여건에 기초하여 현지 지반조사, 실내시험, 지형측량 등을 실시하여 산정하였다. 이후 구조물에 작용하는 파압에 대해 항만 및 어항 설계기준-해설(설계코드 KDS 64 10 10)에 근거하여 계산한 결과를 CFD를 활용한 수치모형실험 해석값과 비교하고 경향 및 양상을 확인한 후 이를 보정한 값을 활용하여 양압력을 산정하였으며, 이를 부재설계에 활용하여 설계안에 대해 2차원 수치모형실험을 통해 해상 구조물의 안정성을 검증하였다(Table 1).

2.1 설계조건 산정

추자도 목리포구의 조위는 인근 추자도 조위를 적용하였으며, 방파제 안정검토 및 마루높이 산정에는 약최고고조위(Approx. H.H.W) 3.29 m를 토대로 하였으며, 평균해수면(M.S.L)은 1.645 m를 적용하였다. 또한 설계파 제원은 50년 빈도 설계파고로서 파고 5.05 m, 주기 15.7 sec를 적용하였다(Table 2, 3).

2.2 파력발전 구조물 평면 및 단면

파력발전 구조물의 평면과 단면구성을 위해 파랑에너지를 흡수하는 진동수주실과 에너지변환설비, 바이패스설비, 기타 수배전설비들이 설치되는 발전기실을 고려하여 설계하였으며, 월파저감을 위한 전면부 반파공과 돌출부를 설계하였다.

마루높이는 항만 및 어항설계기준-해설에 의한 방법(설계조위 + $(0.6\sim 1.25)H_{1/3}$, 파의 초오름 높이에 의한 방법(설계조위 + R), 허용 월파량에 의한 방법을 비교·분석하여 가장 높게 산정된 허용월파

Table 1. Main contents of design

항목	주요설계내용
기초자료조사	· 자연조건조사(기상, 해상, 지형 등) · 입지여건조사(인문·사회, 산업 및 경계 등)
현지조사	· 지형측량 · 지반조사 및 실내시험 · 지장물 및 구조물 조사 · 공사 재료원 및 작업장 조사
CFD 수치모형실험	· 구조물에 작용하는 파압 및 양압력 계산 · 구조물에 작용하는 월파량 계산 · 공기실 내부압력 계산
2차원 수치모형실험	· 구조물에 작용하는 파압 계측 및 안정성 검증
기본 및 실시설계	· 구조물 평면 및 단면계획, 건설계획 등

Table 2. Design condition of astronomical tides

구분	조위(m)	비고
약최고고조위(App. H.H.W)	DL(+).3.29	구조물 안정검토
평균해면(M.S.L)	DL(+).1.645	설계 및 공사기준면

Table 3. Design wave condition for 50yrs return period

구분	파고($H_{1/3}$, m)	주기($T_{1/3}$, sec)	전면수심(m)	심해파장(L_{00} , m)	파장(L, m)
설계조건(50년 빈도)	5.05	15.70	10.00	384.52	172.76

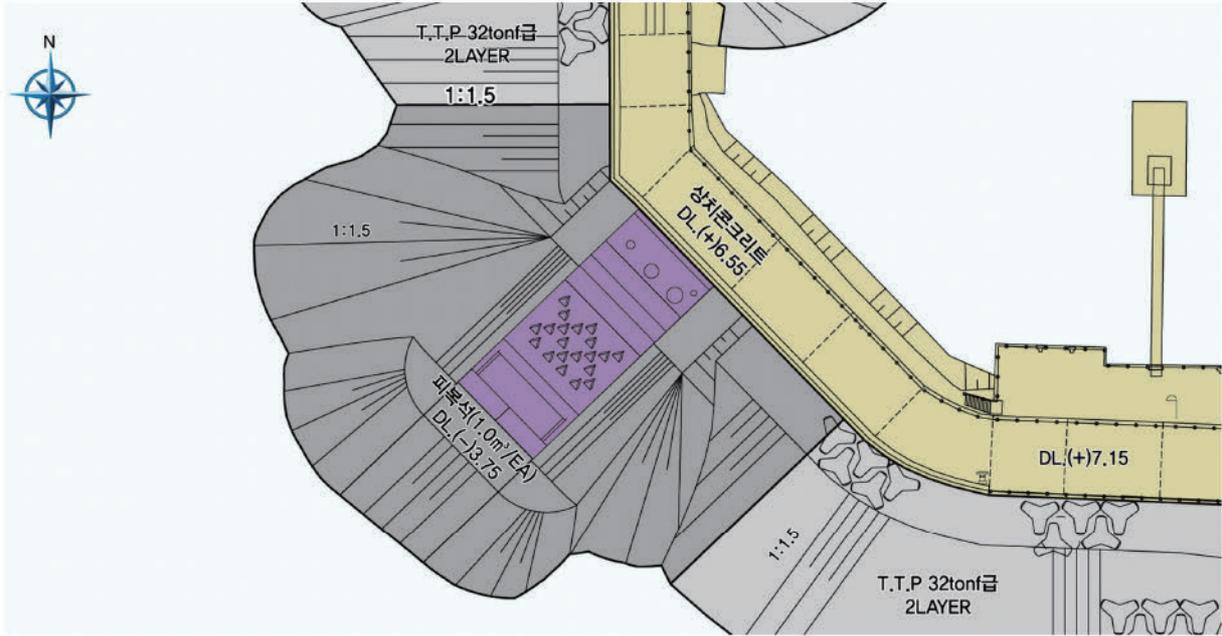


Fig. 4. Floor plan of WEC Structure.

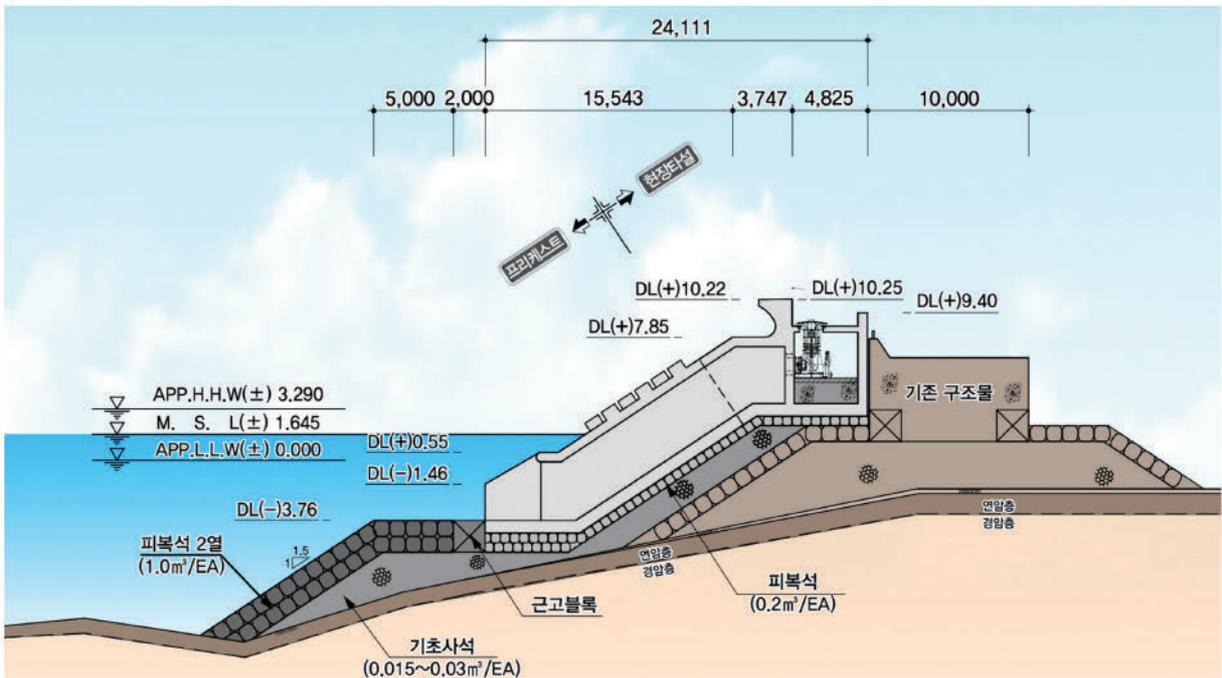


Fig. 5. Cross section of WEC Structure.

량에 의한 방법을 이용하여 DL(+10.25 m로 결정하였다.

파력발전 구조물의 연장은 총 11.2m이며, 구조물의 설치로 인해 제거된 기존 테트라포드는 구조물 양측면을 보강하는 용도로 사용되었다(Kim *et al.*[2009]; Kim and Suh[2009]). Fig. 4는 파력발전 구조물의 평면계획과 Fig. 5는 파력발전 구조물의 단면계획을 나타낸 것이다.

3. 경사형 파력발전 구조물의 파랑하중 산정

경사형 방파제에 설치되는 파력발전 목적의 진동수주형 구조물의 경우, 공동 구조와 내부의 수위 진동 및 구조물 내 상부의 공기실 등 종래의 경사형 방파제 구조와는 차별성이 존재하여 일반적인 경사식 방파제 구조물 설계에 적용하는 산정식 적용이 용이하지 않다.

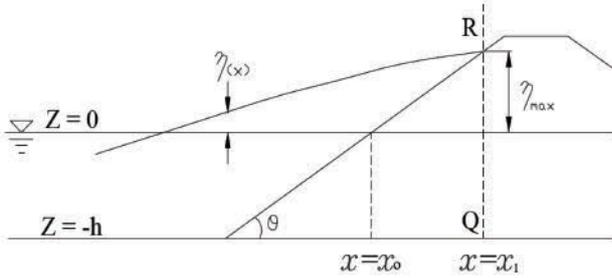


Fig. 6. The shape of partial standing wave on the slope structure.

본 연구에서는 우선 통상적인 설계기준을 따라 산정된 파랑하중과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 및 2차원 수리모형실험을 통해 산정된 파랑 하중을 상호 비교함으로써, 각 하중 산정의 특성 분석을 통해 경사형으로 설치된 진동수주형 파력발전 구조물에 적합한 파랑하중 산정 방식을 검토하였다.

3.1 사면 상의 부분중복 파형에 대한 파랑하중

파력발전 구조물에 작용하는 파압(Sakakiyama and Liu[2021])은 Fig. 6과 같이 내습 파랑 중 가장 큰 파랑에 대하여 경사제 사면의 단면 형상이 단순한 경우에 체체에 작용하는 파력이 최대가 되는 순간의 사면 파압분포간략이론으로서, 사면에서 처오름이 도달하는 최고 위치에 반사계수가 경사제의 반사계수와 동일한 연직평면이 존재한다고 가상하여 처오름이 최대가 되는 순간의 사면 상 수면파형을 식 (1), (2), (3)을 이용하여 지점별 파압분포를 계산하는 것이다(Table 4, 5).

$$P(x,z) = \rho \cdot g \eta(x-z); 0 \leq z \leq \eta_{max} \tag{1}$$

$$P(x,z) = \rho \cdot g \cdot \eta(x) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}; -h \leq z \leq 0 \tag{2}$$

$$\eta(x) = \frac{1}{2} H_{max} \sqrt{1 + 2K_R \cos 2k(X-X_1) + K_R^2} \tag{3}$$

여기서 $\eta(x)$: 정수면으로부터의 수위(m)

$$H_{max} = 1.8H_{1/3}, (H_{1/3} \leq h/2)$$

Table 4. Wave pressure distribution on the water surface ($0 \leq z \leq \eta_{max}$)

지점(X)	총파압($P_{(x,z)}$)	수평파압(P_H)	연직파압(P_V)
9.57 m	0.00	0.00	0.00
9 m	3.80	2.11	3.16
8 m	10.42	5.78	8.67
7 m	16.98	9.42	14.13
6 m	23.46	13.02	19.52
5 m	29.88	16.58	24.86
4 m	36.23	20.10	30.15
3 m	42.51	23.58	35.37
2 m	48.73	27.03	40.54
1 m	54.88	30.44	45.66
0 m	60.96	33.82	50.73

※X=0 m일 때, 정수면과 경사면의 접점(단위: kN/m²)

Table 5. Wave pressure distribution below the water surface ($-h \leq z \leq 0$)

지점(X)	총파압($P_{(x,z)}$)	수평파압(P_H)	연직파압(P_V)
0 m	60.96	33.82	50.73
-1 m	59.61	33.07	49.60
-2 m	58.25	32.31	48.47
-3 m	56.89	31.55	47.33
-4 m	55.51	30.79	46.19
-5 m	54.13	30.03	45.04
-6 m	52.75	29.26	43.89
-7 m	51.37	28.49	42.74
-8 m	49.99	27.73	41.59
-8.18 m	49.74	27.59	41.38

※X=0 m일 때, 정수면과 경사면의 접점(단위: kN/m²)

$$H_{max} = 0.9h (H_{1/3} \leq h/2)$$

H_{max} : 경사제 전면에서의 최대 입사파고(m) = 9.09 m

K_R : 체체의 반사계수

z : 연직좌표축(m)

X : 수평좌표축(m)

X_1 : 가상의 연직평면 RQ의 위치(m) = 10.10 m

k : 파수 = 0.036

Fig. 7은 파압산정식을 토대로 진동수주실 각 부위에 산정된 파압을 나타낸 것이다. 그림에서 P1은 진동수주실의 최상단으로 평균 수면 위 8 m에 해당하는 지점으로 10.42 kN/m²의 파압이 산정되었으며, P2는 36.23 kN/m²(수면 위 4 m), P3은 60.96 kN/m²(수면 위 0 m)의 파압이 산정되었다.

P4는 52.75 kN/m²(수면 아래 6 m), P5는 45.85 kN/m², P6은 52.75 kN/m²로 각각 산정되었다. 가장 높은 파압은 P3 지점으로 나타났다. 구역별로는 평균 수면 상부의 경사면 A1이 626.71 kN/m², 하부의 A2는 485.02 kN/m²으로 산정되었다.

3.2 CFD 해석에 의한 파랑하중 산정

3.2.1 지배방정식 및 파랑장 재현

CFD 해석을 위해 사용한 OlaFOAM은 비압축성 비정상 유동문제에 대해 식 (4) 및 (5)로 정의되는 연속방정식 및 운동량보존방정식을 지배방정식으로 한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot X \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} \tag{5}$$

여기서 \mathbf{U} : 속도벡터

\mathbf{g} : 중력가속도벡터

\mathbf{X} : 위치벡터

ρ : 해수의 밀도

μ_{eff} : $\mu + \rho \nu_{turb}$ (동점성 계수)

p^* : 유사 동압력

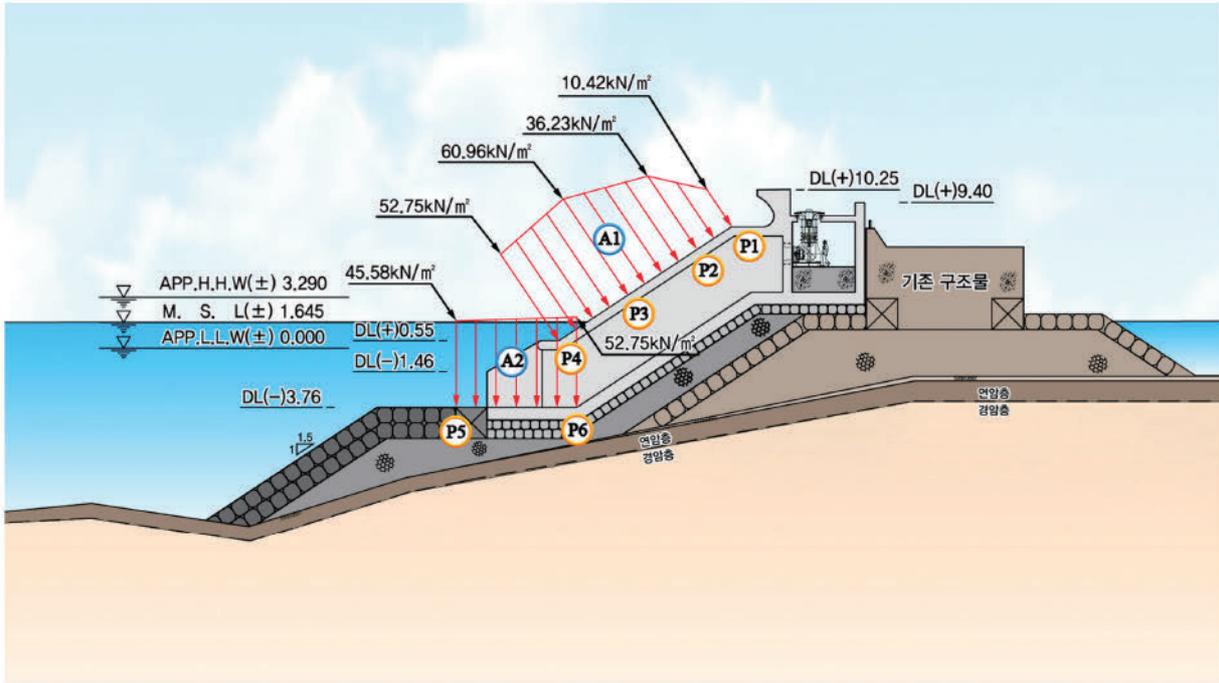


Fig. 7. Calculated results of wave pressures based on typical formulars.

이때, 파랑 문제를 해석하기 위해 유한체적법(Volume of Fluid, VOF) 도입하며, 단위체적에서 해수가 차지하고 있는 비율로 정의하는 Volume Fraction 값(α_1)은 식 (6)으로 표현된 방정식으로부터 얻게 되며, 이를 통해 자유표면을 정의한다.

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha_1 + \nabla \cdot U_c \alpha_1 (1 - \alpha_1) = 0 \quad (6)$$

난류모델로는 해안공학 분야에서 일반적으로 활용되는 k-ε 모델을 채택하였는데, 유속의 변동량 u' , w' 을 도입하여 난류에너지 k 와 난류에너지 소산함수 ϵ 을 식 (7) 및 (8)로 정의하고, 식 (9), (10), (11)로 표현된 난류 이송 방정식의 해석을 통해 해를 획득한다.

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + w'^2) \quad (7)$$

$$\epsilon = \nu \left[2 \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\gamma_v \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u k}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\gamma_x \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\gamma_z \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial z} \right) \right] + \gamma_v G_S - \gamma_v \epsilon \quad (9)$$

$$\gamma_v \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\gamma_x \nu_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\gamma_z \nu_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \right] + \gamma_v C_1 \frac{\epsilon}{k} G_S - \gamma_v C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$G_S = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (11)$$

이때, 외동점성계수 및 확산계수는 식 (12)로 정의되며, 그 외 계수들은 일반적으로 사용하는 값인 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 로 적용하였다.

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}, \nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}, \nu_\epsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (12)$$

CFD 해석에 있어 Control Volume으로 표현되는 파랑장을 재현하기 위해 입사 경계면에서는 Active Wave Absorbtion 법을 적용하여 원활한 조파 및 반사파 제어가 수행되도록 하였으며, 선형파 이론으로부터 얻는 주파수 별 성분파의 합으로 불규칙파를 재현, 적용하였다. 불규칙파는 Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Mitsuyasu [1970])을 사용하여 식 (13)로 표현된 성분파 진폭으로부터 식 (14)에 의한 불규칙파 자유수면 변위를 적용하였다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (13)$$

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \epsilon_m) \quad (14)$$

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (15)$$

여기서 Δf : 주파수폭
 $S(f)$: 파랑에너지밀도
 $H_{1/3}$: 유의파고
 $T_{1/3}$: 유의파주기

3.2.2 CFD 해석조건 및 결과

CFD 수치모형 실험에 적용한 설계파는 경사형 방파제 연계 파력발전 적용 후보지인 추자도 묵리포구 전면해역에 대한 50년 재현빈도 천해설계파랑의 추정결과를 불규칙파로 재현하여 적용하였으며, 조위조건은 추자도의 약최고조위를 적용하였다.

CFD 해석 도메인은 Fig. 8과 같이 해석 영역 양단에 재현 파랑의 재반사를 제어하기 위한 Energy Absorption 경계 및 조파를 위한 조파 소스, 파랑 전달영역, 그리고 구조물 위치 영역으로 구성되었다. 해석 영역의 기본 격자크기는 $\Delta x = \Delta z = 1.5$ m로 설정하였으나 보다 엄밀한 파랑-구조물 상호작용 구현을 위해 단면 형상이 복잡한 구조물이 자리하는 영역에서는 $\Delta x = \Delta z = 0.25$ m로 조밀 격자를 사용하여 총 57,250개의 격자가 적용되었다.

시간 영역에서의 CFD 해석을 위해 4,000초의 시간(약 250회의 조파 횟수에 해당)을 파랑을 작용하는 것으로 하였다. Fig. 9(a)는 CFD 해석을 위한 설계파의 B-M 스펙트럼 형상(적색 실선)과 이를 재현한 수면파 스펙트럼(청색 실선)을 상호 비교한 것이다. 총 4,000초의 시간 동안 파의 시계열은 Fig. 9(b)과 같으며, 재현 하고자 하는 파랑 스펙트럼이 합리적인 수준에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

수치조파수조를 통해 약 1시간의 불규칙파 조파를 통해 시계열로 해석한 파랑 하중의 산정 결과 중 Fig. 7에 제시한 동일한 지점인 구조물 전면 경사면 4개 지점(P1~P4), 구조물 저면 2개 지점(P5~P6)에서의 결과치를 제시하였다(Table 6).

경사형 진동수주 구조물의 상부에 해당하는 P3에서 가장 높은 파압인 39.19 kN/m²를 나타내고 있고, P1은 가장 낮은 파압을 보

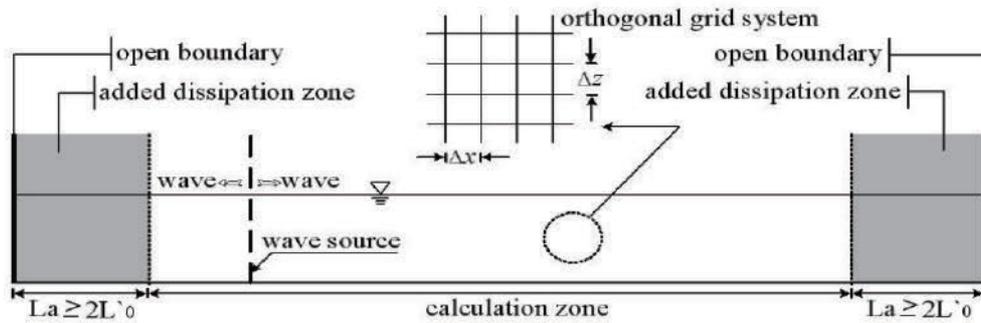


Fig. 8. Domains and Boundary Conditions of CFD.

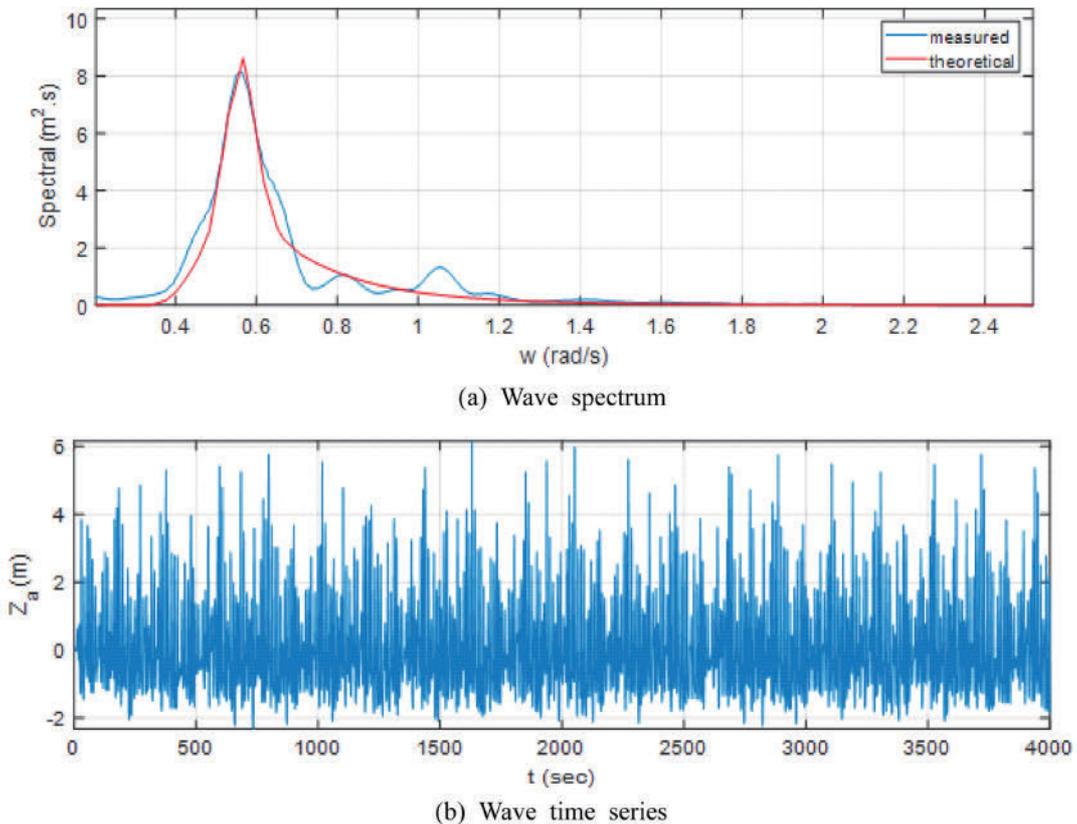


Fig. 9. Irregular wave reproduction of CFD simulation.

Table 6. Calculated wave pressure based on CFD simulation (units: kN/m²)

구분	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A1	A2
산출결과	28.44	27.15	39.19	34.15	28.74	36.29	410.59	318.60

이는 곳이며, 진동수주실의 최상단으로 평균 수면 위 8m에 해당하는 지점으로 28.44 kN/m²으로 산정되었다. P1~P5에 이르는 파압 산정 경향은 파압 산정식과 같은 P3 > P4 > P5 > P2 > P1의 크기 순서로 나타나고 있지만, P1의 결과를 제외하고는 CFD의 산정 결과가 모두 낮은 값을 제시하고 있음을 알 수 있는데, 불규칙파에 대한 시계열 해석 수행으로 인해 진동수주 구조물 상부를 월파하는 수위 영향이 반영된 것에 원인이 있는 것으로 사료된다. 또한 평균 수면의 상부에 해당하는 A1 구역이 하부에 위치한 A2 구역에 비해 높은 파압을 형성하는 것은 파압산정식의 경향과 같지만, 마찬가지로 낮은 파압의 산정치를 나타내고 있다.

3.3 2차원 수리모형실험에 의한 파랑하중 산정

경사진 진동수주실 구조물에 대한 2차원 수리모형실험은 한국건설기술연구원의 2차원 조파수조에서 수행하였다. Fig. 10에 제시된 2차원 수조는 폭 1.2 m, 높이 1.5 m, 길이 50 m이다. 조파기 조파판으로부터 약 22 m까지의 구간은 수평면이며, 이후 12 m 구간에

1:40의 경사면을 배치하고, 서보 피스톤식 조파기를 통해 설계파를 작용시켰다. 파압의 계측에 부가하여 3시간을 연속조파를 통해 체체의 안정성을 검토하였으며, 모형구조물의 활동여부 또한 관찰 및 영상자료 등을 활용해 분석하였다.

3.3.1 실험모형제작 및 실험과제원

1:40 축척의 경사형 진동수주실 구조물의 상치콘크리트, 콘크리트 피복블록 등은 Fig. 11과 같이 시멘트 모르타르를 이용하여 제작하였으며, 진동수주실 상부의 발전기실은 제작의 용이성으로 아크릴로 제작하고 납 등의 중량을 부가하여 소요중량을 확보하였다. 또한 진동수주 구조물의 경사면에는 실제 설계에 반영된 다수의 돌출 구조물(경사면 조도를 활용한 월파량 저감 목적)을 재현하고 있다.

실험에서의 파랑 재현은 50년 빈도파의 설계조건상 설계파로서 B-M 스펙트럼을 토대로 유의파고 5.05 m, 설계주기는 15.7 sec를 대상으로 하여, 수리실험에서는 파 12.6 cm, 주기는 2.48 sec에 해당한다.

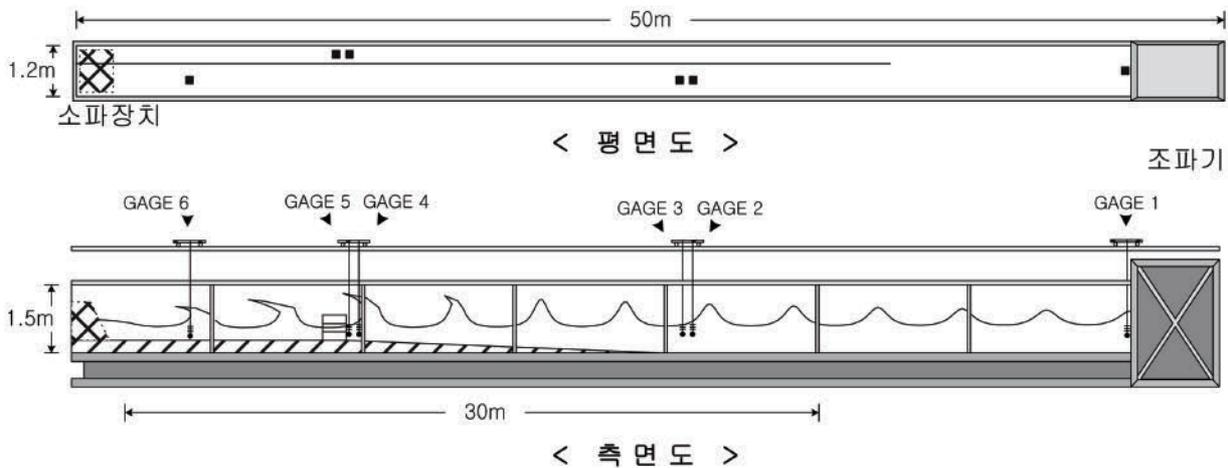


Fig. 10. Schematic drawing of the two dimensional wave tank.

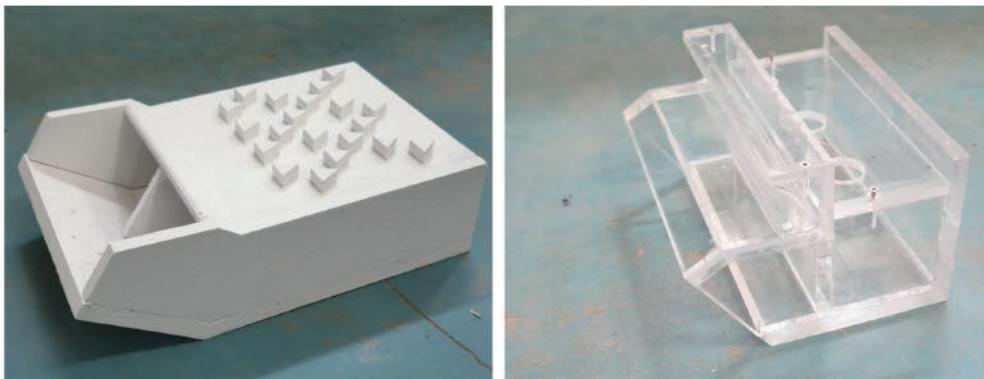
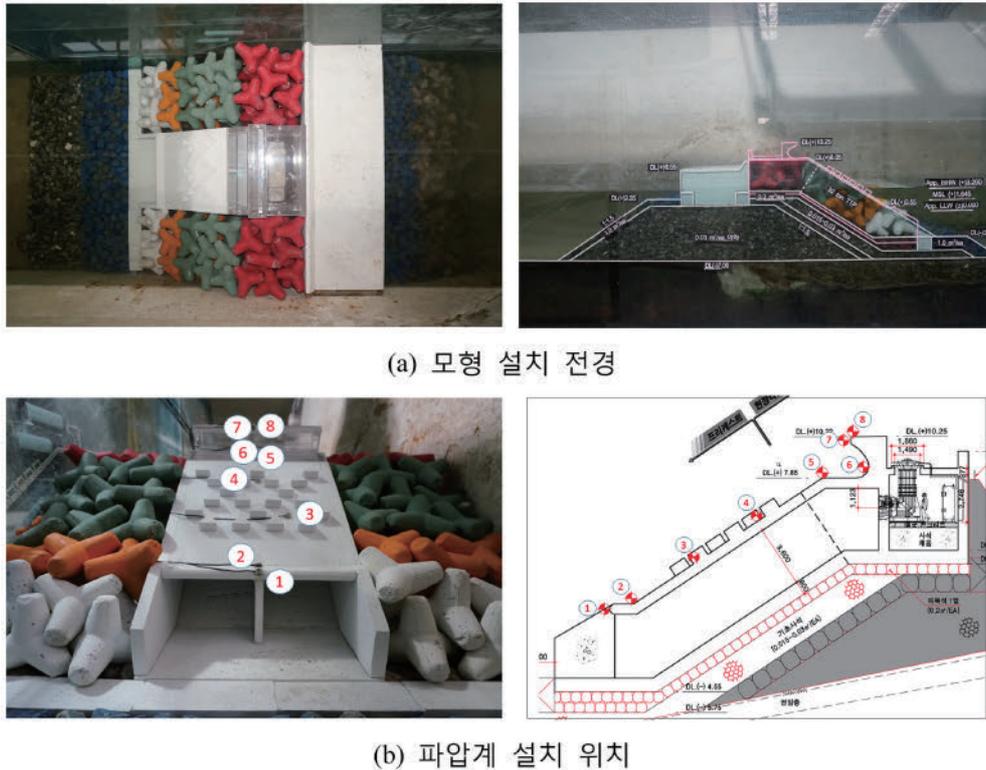


Fig. 11. Model sturcure.



(a) 모형 설치 전경

(b) 파압계 설치 위치

Fig. 12. Two dimensional wave experiment of inclined OWC structure.

3.3.2 2차원 수리모형실험에 의한 파랑하중 산정 결과

Fig. 12는 2차원 수리모형실험 전경을 나타낸 것으로 (a)는 모형 설치 전경, (b)는 파압계의 설치 위치를 나타낸다. 파압계는 구조물 전면부에 설치하였으며, App.HHW 조건에서 약 1시간 조파한 후 파압을 분석하였다(Table 7).

모형에 있어 파압계의 설치 위치 중 파압계 ②, ⑤, ⑧번은 연직 방향(상향)으로, ①, ⑥, ⑦번은 입사파에 직각방향, ③과 ④번은 경사면에 수직하도록 설치하였다.

2차원 수리모형실험을 통한 파압계측 결과 반파공 설치 위치인 ⑥과 ⑦에서 가장 높은 값이 계측되었고, 수면 아래인 ①, ②, ③ 위치에서는 유사한 수준의 파압이 계측되었다.

3.4 파랑하중 산정 결과 고찰과 양압력의 추정

경사진 진동수주 구조물은 기존 경사제의 소파블록을 제거하고,

저면의 고르기 작업 이후 프리캐스트로 제작하여 거치하는 방법을 통해 설치하게 된다. 이때 구조물 전면에 작용하는 파압은 물론 경사진 사면에 위치한 구조물의 특성 상 양압력은 구조물의 안정성 확보에 결정적으로 작용할 수 있다.

진동수주실은 밀폐되어 상부에 공기층을 두게 되는 특이 구조로 인해 종래의 경사면에 적용하는 파압산정법에 대한 검토가 필요하며, 또한 종래의 산정법을 통해 추정할 수 없는 양압력은 전산유체역학(CFD)을 통해 그 값을 추정할 수 있었다.

본 연구의 3.2절~3.4절에 이르기까지 각각 파압산정식, CFD 해석 및 수리모형실험을 통해 동일 구조물에 대한 파압을 추정하였으며, 진동수주 구조물의 주요 부위에 대한 파압을 상호 비교한 결과를 제시하였다(Table 8).

진동수주실 구조물의 평균 수면 아래에 위치한 P4의 경우, 파압산정식은 52.75 kN/m^2 , 수리모형실험은 55.5 kN/m^2 으로 유사한 값

Table 7. Experimental results of wave pressures based on 2-D experiments (units: kN/m^2)

위치	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
계측결과	53.4	55.5	56.3	92.7	113.5	296.2	182.1	28.3

Table 8. Results of wave pressures on inclined OWC structure based on Formula/2-D experiments/CFD (units: kN/m^2)

위치	수면아래(P4, ②)	정수면(P3, ③)	정수면 위(P2, ④)
파압산정식	52.75	60.96	36.23
수리모형실험	55.5	56.3	92.7
CFD	34.15	39.19	27.15

을 산출하고 있고, 정수면에 위치한 P3의 또한 파압 산정식은 60.96 kN/m^2 , 수리모형실험(Table 7의 ③)은 56.3 kN/m^2 으로 유사한 값이 나타나고 있다. 그러나 정수면 위에 해당하는 P2는 파압 산정식 36.23 kN/m^2 , 수리모형실험(Table 7의 ④) 92.7 kN/m^2 로서 수리모형실험의 결과가 높게 확인되었다. 이는 파압산정식에 의한 방법에 있어서는 경사면에 설치된 돌출부를 반영하지 못해 실제 수리모형실험에 관찰된 경사면에서의 충격 쇠파압 반영 여부에 따른 영향으로 추정할 수 있다.

한편, CFD 해석은 계산 영역의 이산화를 통해 복잡한 구조물의 각 부분에 작용하는 파압을 추정할 수 있을 뿐만 아니라 진동수주 구조물의 저면에 작용하는 양압력도 추정할 수 있다. 그러나 Table 8의 비교를 통해 확인할 수 있는 바와 같이 CFD 해석 결과는 Fig. 13, 14와 같이 수면 하부의 파랑 하중 산정에서 있어 파압 산정식 및 수리모형실험 결과에 비해 낮은 값을 산정하고 있는 것을 알 수 있

다. 즉 구조물 전면의 파압은 파압 산정식 결과 대비 약 1.5배 낮은 하중치를 나타내고 있으며, 국부 파압의 경우에도 P3~P6 지점에 대해 약 1.5배 낮은 결과가 확인되었다.

일반적으로 방파제 설계 하중 산정에 대해 보수적 관점으로 결과를 도출하고 있는 파압 산정식의 경향을 고려하면, CFD 해석으로 산정된 결과에는 이를 고려한 하중안전율 개편의 조정계수를 도입하여 적용할 필요가 있으며, 이는 CFD로 산정된 양압력에 있어서도 마찬가지로 조정계수를 적용이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 15는 CFD 해석을 통한 파랑 하중에 1.55의 조정계수(하중안전율)을 적용한 결과이다. 구조물 전면에 작용하는 파압은 전체적으로 파압산정식으로부터 도출된 파압과 유사한 분포가 나타남을 확인할 수 있다.

더불어 Fig. 15에 나타낸 바와 같이 파력발전 구조물 경사면 및 저면에 작용하는 파압과 양압력을 상호 비교하면 A1 파압 대비 A4

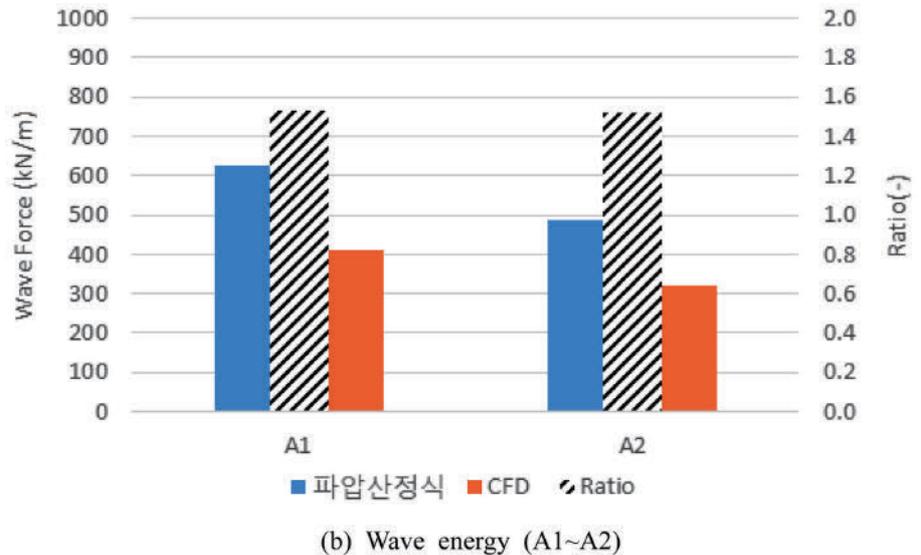
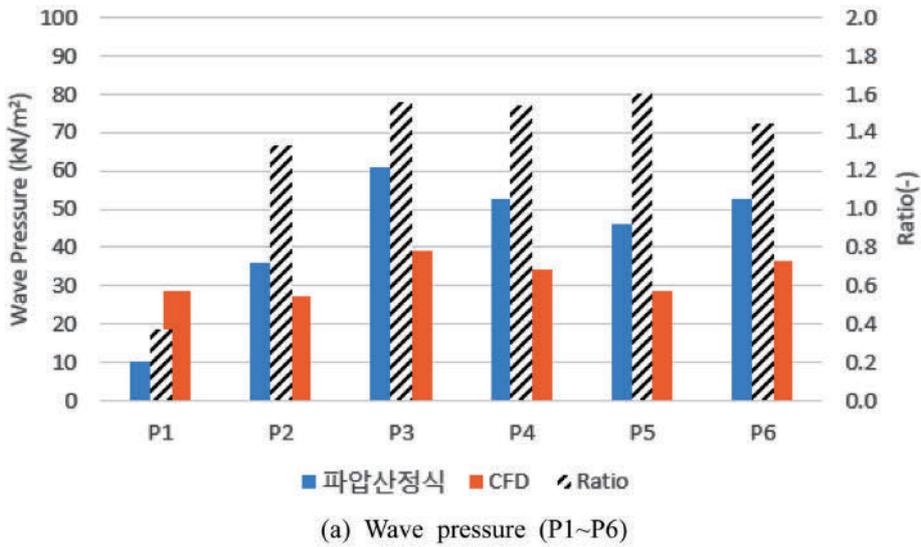


Fig. 13. Comparison of wave pressure equation and CFD analysis results.

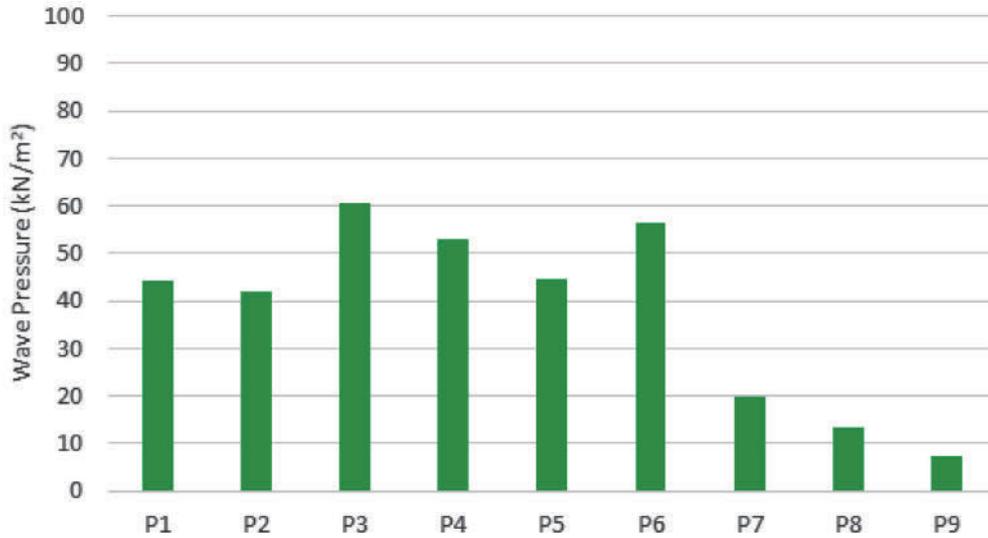


Fig. 14. CFD calculation results of wave pressures and lift pressure (reflecting adjustment factor).

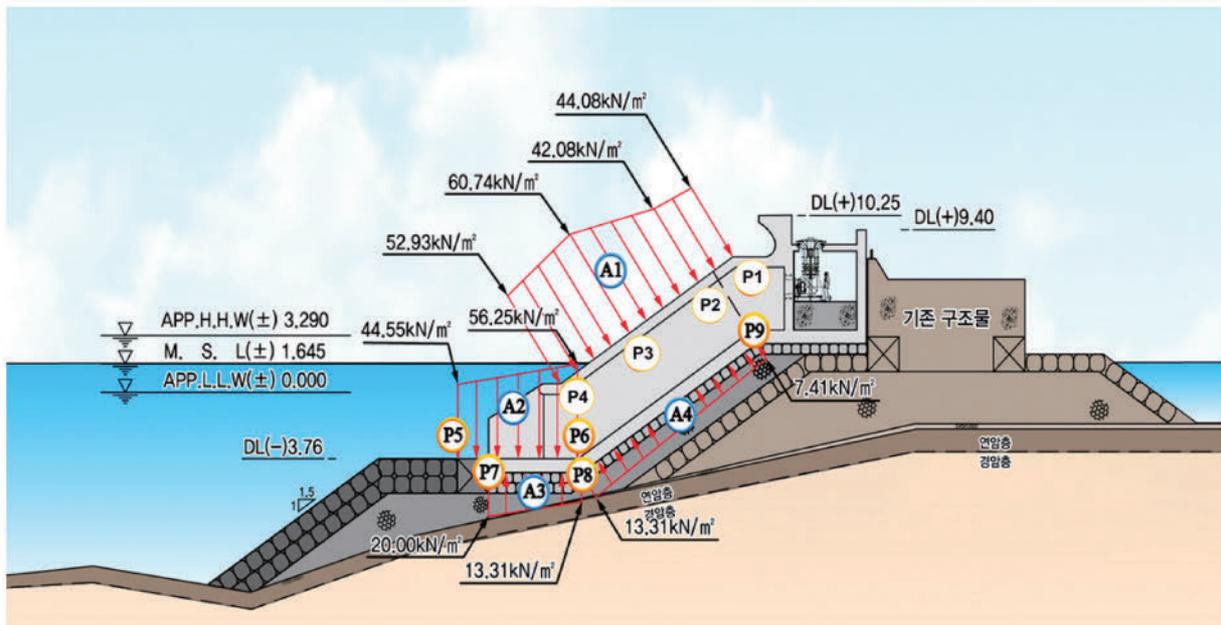


Fig. 15. CFD calculation results reflecting adjustment factor for wave pressures.

의 양압력은 약 24% 수준, A2 파압 대비 A3의 양압력은 약 21% 수준을 보이고 있으나, 이는 구조물의 형상이 변경되는 경우는 충분히 달라질 수 있는 비율이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경사형 방파제에 연계된 진동수주형 파력발전 구조물에 작용하는 파랑하중에 관해 검토하였다. 경사형 방파제에 적용 가능한 진동수주형 파력발전 구조물에 대한 파랑하중을 항만 및 어항 설계기준에 따라 산정하고, CFD 기반의 해석 결과와 비교하였다. 추가적으로 2차원 수리모형실험을 수행하여 설계기준 및 수치해석에 의한 파랑하중 결과들을 비교하였다. 이로부터 다음의 결

론을 도출 할 수 있다.

1. 경사형 방파제에 연계된 파력발전 구조물 체체에 작용하는 파압을 산정하기 위해 항만 및 어항 설계기준의 파압 산정식을 활용하여 산정하였으며, 파압 산정식으로 산정된 결과값이 CFD 결과에 비해 약 1.55배로 비교적 일관성 있는 양상이 나타났다.
2. CFD 해석 결과를 보정하여 양압력을 산정하였으며, 이러한 양압력은 파력발전 구조물 경사면 및 저면에 작용하는 파압 대비 약 21~24% 수준으로 작용함을 확인할 수 있었다.
3. 본 연구에서 검토한 파압 산정식과 CFD 결과 비교를 통한 양압력 추정 방법은 추후 설계되는 진동수주형 구조물의 파랑 하중 검토 방법 중 하나로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구와(방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발, PMS4590) 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “파력발전 통합성능 및 구조안전성 해석기반 구축을 위한 WECAN 개발(PES3980)”에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Falcao, A.F.O., 2010, Wave energy utilization: a review of the technologies, *Renew. Sustain. Erg. Rev.*, 14(3), 899-918.
- [2] Falcao, A.F.O., Henriques, J.C.C., 2014, Model-prototype similarity of oscillating water-column wave energy converters, *Int. J. Mar. Erg.*, 6, 18-34.
- [3] Falcao, A.F.O., Sarmento, A.J.N.A., Gato, L.M.C., Brito-Melo, A., 2020, The Pico OWC wave power plant. Its lifetime from conception to closure 1986-2018, *Appl. Ocean Res.*, 98, 102104.
- [4] Falnes, J., 2007, A review of wave-energy extraction, *Mar. Struct.*, 20(4), 185-201.
- [5] Hong, D.C., Hong, K., 2010, Prediction of Wave Energy Absorption Efficiency and Wave Loads of a Three-Dimensional Bottom-Mounted OWC Wave Power Device, *J. Korean Soc. Mar. Env. Eng.*, 13(1), 47-52.
- [6] Hong, K., Shin, S.H. and Hong, D.C., 2007, Wave Energy Absorption Efficiency of Pneumatic Chamber of OWC Wave Energy Converter, *J. Korean Soc. Mar. Env. Eng.*, 10(3), 173-180.
- [7] Kim, G., Hong, K., Kim, K.H. and Hyun, B.S., 2019, Design and Performance Analysis of Impulse Turbine for 30 kW-class OWC-type Wave Energy Converter Installed at Breakwater, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(3), 182-189.
- [8] Kim, J.S., Nam, B.W., Kim, K.H., Park, S., Shin, S.H. and Hong, K., 2020, A Numerical Study on Hydrodynamic Performance of an Inclined OWC Wave Energy Converter with Non-linear Turbine-Chamber Interaction based on 3D Potential Flow, *J. Mar. Sci. and Eng.*, 8(3), 176.
- [9] Kim, S.W., Suh, K.D., 2009, Evaluation of partial safety factors of Hudson formula for Tetrapod armor units constructed in Korea, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 21(5), 345-356.
- [10] Kim, S.W., Suh, K.D., Lee, C.E. and Park, D.H., 2010, Reliability Analyses of Breakwater Armor Blocks of Harbors in Korea, *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 21(1), 15-29.
- [11] Mitsuyasu, H., 1970, On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch. in *proc. of Japanese Conf. Coastal Eng.*, JSCE, 1-7.
- [12] OPERA, <http://opera-h2020.eu/>, 2021 (accessed 2021.08.22.).
- [13] Park, S., Kim, K.H., Nam, B.W., Kim, J.S. and Hong, K., 2018b, A Study on the Performance Evaluation of the OWC WEC Applicable to Breakwaters using CFD, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(4), 317-327.
- [14] Park, S., Nam, B.W., Kim, K.H. and Hong, K., 2018a, Parametric Study on Oscillating Water Column Wave Energy Converter Applicable to Breakwater, *J. Adv. Res. in Ocean Eng.*, 4(2), 66-77.
- [15] Roh, C., Kim, K.W., Park, J.Y., Park, S.W., Kim, K.H. and Kwak, S.S., 2020, Power performance analysis according to the configuration and load control algorithm of power take-off system for oscillating water column type wave energy converters. *Energies*, 13(23), 6415.
- [16] Sakakiyama, T., Liu, P., 2021, Laboratory experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater, *Coastal Engineering*, 44, 117-139.
- [17] TETHYS, <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plant>, 2021 (accessed 2021.08.22.)
- [18] The Queen's University of Belfast, 2002, ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT.
- [19] Ministry of Oceans and Fisheries, 2017, Harbour and Fishery Design Criteria (Design Code KDS 64 00 00).

Received 3 September 2021

Revised 17 September 2021

Accepted 5 October 2021