A Study of the Development of a Concrete Floating Breakwater for an Open Sea Fish Farm

Gun-Hwan Choi^{ID*}, Mi-Jeong Kim^{ID*}, Ki-Ho Jang^{ID*}, Je-Cheon Jun^{ID**} and Jung-Jun Park^{ID**}

^{*}Department of Mechanical Engineering/Floating offshore wind power farm field, POSTECH, Pohang, Korea

^{**}Aquaculture Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea

외해 양식장 콘크리트 부유식 방파제 개발에 관한 연구

최군환^{ID*} · 김미정^{ID*} · 장기호^{ID*} · 전제천^{ID**} · 박정준^{ID**}

^{*}포항공과대학교 기계공학과/부유식해상풍력발전연구소

^{**}국립수산물과학원 양식관리과

KEY WORDS: Ocean condition 해양조건, Structure analysis 구조물 해석, Towing tank test 수조시험, Concrete floating breakwater 콘크리트 부유식 방파제, CAPEX 설비투자비, Fish farm 양식장

ABSTRACT: The ecological changes in the ocean due to the drastic global warming require that action be taken to sustain the productivity of fisheries. Proper ocean facilities could help prevent the loss of the expenditures made on marine aquaculture and reduce the related compensation for various ocean conditions. The aim of this study was to develop a floating ocean wave-breaker using an eco-friendly concrete and conducting a site survey, a structural analysis, and a test of towing the tank. As a result, the wave at the fish farm would be reduced. The results of the holding power of anchors and the capability of moving the floating structures were considered in the design of the wave-breaker. The analyses of the material properties of concrete and the steel structures, as well as the CAPEX and OPEX analyses of the manufacturing and operation processes confirmed the superiority of the floating concrete wave-breaker. In particular, this study demonstrated that the concrete floating breakwater can protect the fish farm against typhoons and reverse-waves, thereby reducing losses of the fish.

1. 서 론

지구 온난화로 인한 태풍 및 기상 이변은 수산 자원 지속 생산을 통한 식량화의 시급성을 요구하고 있다. 이러한 환경 속에서 수산물 거대 소비 시장을 겨냥한 외해 양식장의 대형화는 양식장 피해 보상 규모를 증대시키고 있다. 이러한 상황에서 부유식 방파제는 외해 양식장을 보호할 수 있는 중요한 구조물로 각광받고 있다. 부유식 방파제는 입사하는 파도를 차단하면서 태풍과 같이 큰 파도를 견뎌내야 하는 구조물이다. 국내에도 부유식 방파제는 2007년 통영시 바다 목장 전면 해역을 시작으로 여러 해역에 설치되어 오고 있다.

부유식 방파제는 바다 낚시터와 같은 친수 공간으로도 활용되고 있다(Kim et al., 2007a). 양식장 보호 뿐만 아니라 어항 및 항만 보호, 그리고 해양 공사 기간 동안 소파의 용도로도 많이 이용된다(Jung et al., 2006). 부유식 방파제는 해당 해역의 환경 특성을 감안하여 해양 시설물이 위치한 해역에서 원하는 정온

도(Tranquility)를 확보하도록 설계되어야 한다. 그래서 해양 지역에 따른 부유식 방파제의 소파 성능을 정확하게 예측하는 연구가 동시에 요구되고 있다(Cho, 2002).

소파제는 해역 보호를 위하여 파랑 에너지를 소산시키는 구조물을 의미하며 일반적으로 방파제로 알려져 있으며, 고정식 소파제 (중력식 소파제)와 부유식 소파제로 구분된다. 부유식 소파제는 중력식에 비해 대수심 및 연약지반에 적합하고 시공이 간단하여 건설비가 절감되며 수심이 10m가 깊어지면 설치비용의 급격한 차이를 보인다. 또한, 지진 피해가 적고 필요시 이동이 가능하며 방파제 역할 이외에 낚시터 등 관광 목적으로도 활용할 수 있다(Jung et al., 2006).

국내에서는 2007년 상반기 최초로 통영시 바다 목장 전면 해역을 대상으로 부유식 방파제를 설치하였으며, 하반기에는 마산시 원전항에 신형식 복합 판형 부유식 방파제를 건설하였다. 마산시 원전항의 경우 해역 수심은 20m로 국내외에서 최초로 닻 블록 대신 석션 닻을 현장에 적용했다는 데 의의가 있으나

Received 14 November 2019, revised 7 December 2019, accepted 19 December 2019

Corresponding author Gun Hwan Choi: +82-52-279-9023, kingsunchoi@postech.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2845-180X>

© 2019, 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(a) Composite plate breakwater model

(b) Yeonmyeongport

(c) Wonjeongport

Fig. 1 Domestic floating breakwater case

파고 1~1.5m 방지기능이 한계가 있다. Fig. 1은 통영시 및 마산시에 설치된 부유식 방파제의 제작 모형과 전경을 나타낸 것이다(Kim et al., 2007a; Kim et al., 2007b).

부유식 방파제는 설치 해역에서 발생하는 파랑 하중에 의한 굽힘 모멘트와 전단력을 충분히 지탱할 수 있는 우수한 구조 성능을 가져야 한다. 이러한 이유로 과거 부유식 방파제의 소재는 주로 강재였으나, 강재의 경우 대형화를 위해서 경제성이 낮은 문제점을 가지는 것으로 알려져 있다. 연명항 및 원전항 부유식 방파제는 강재 재질이며, 당항포 방파제는 콘크리트 부유식 방파제이다.

부유식 방파제는 시공 과정에서의 작업성 및 경제성 확보를 위한 구조 형식을 가져야 하며 콘크리트 부유체의 경우 인장 하중에 취약하므로 이에 견딜 수 있는 능력을 지녀야 한다(Jeong et al., 2013; Park and Youn 2016; Link and Elwi, 1995). 부유식 방파제를 콘크리트로 제작할 경우 강재에 비해 제작비용은 약 46%, 유지관리비용은 90% 이상 절감이 가능하며, 적절한 중량으로 가장 경제적·친환경적·안전적 재질로 주목받고 있다. Fig. 2는 강재 부유체, 콘크리트 부유체 등의 시공 비용을 도식화한 것으로 콘크리트 부유체의 경우 상대적으로 수심이 깊어지더라도 시공 비용은 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 하지만 해상 콘크리트 구조물은 육상보다 상대적으로 해수, 저온, 염해 등 해양 환경에 민감하다(Jeong et al., 2013; Koh et al., 2004). Fig. 2에 표현된 기준으로 콘크리트는 수심이 없는 상태에서부터 180원/㎡로 공사비가 유리하고, 최대 수심 50m일 때 비교 분석 결과는 강재 580원/㎡, 콘크리트는 320원/㎡로 확인되어 강재와 비교하여 약 56% 수준이다. 특히 수심이 깊어질수록 원가 격차가 현저하게 발생한다.

최근 콘크리트의 단점을 극복하기 위한 기술 개발로 인하여

Fig. 2 Construction cost by types of marine spaces

콘크리트 소재도 많이 활용되고 있다. 본 연구는 국내 해상 조건에 맞는 콘크리트 소재의 부유식 방파제를 개발하고 실제 해역 설치를 목적으로 한다. 부유체 기본 설계를 위하여 수계산을 통한 동수력을 산정하였고 기초적인 보 계산을 통하여 기본 설계를 확정하였다. 두 가지 크기의 부유체(유닛 I 과 유닛 II)를 기본 설계하였으며 소재에 따른 응력 계산을 통하여 콘크리트 소재의 부유식 방파제의 구조 성능을 검증하였다. 또한, 부유식 방파제 계류를 위하여 요구되는 닻의 모형에 대한 육상 압흔 실험을 통하여 닻의 표면 요철 문양에 따른 성능을 검증하였으며, 닻 모형의 수조 예인 실험을 통하여 예인 능력의 차이를 검증하였다. 이를 통하여 최적의 닻 유형을 제시하였다. 마지막으로 강재 및 콘크리트 부유식 방파제의 경제성 비교를 통하여 콘크리트 부유식 방파제의 우수성을 확인하였다.

2. 부유식 방파제 기본 설계

2.1 설치 해역 해상 조건

본 연구의 설치 대상지는 경남 통영시 옥지면의 본 섬에 해당하는 옥지도이며 면적 12.62km²로 옥지면 관할 도서 중 가장 크다. 부유식 방파제를 설치할 대상 해역인 옥지도 서산은 외해 양식장 2개소(350,000m²)를 포함하여 참다랑어, 참돔 등의 고급 어종 양식장이 밀집된 구역이다.

대상 해역의 수심은 현장 조사를 통하여 실측되었으며, 최저 20m 및 최대 52m였다. 또한, 최고 조위와 최저 조위는 각각 325cm 및 -46cm로 조사되었다. 부유식 방파제 설치 대상 해역에 인접한 옥지 관측소 계측 자료를 2019년부터 활용하여, 정상 조건(Normal condition)에 대한 파고 및 파주기를 결정하였다. 태풍 불라벤에 관한 기록을 검토하여 극한 조건(Extreme condition)에 상응하는 파고 및 파주기를 결정하였다. 이에 상응하는 규칙 파 속성을 Table 1에 제시하였다. 또한, 0도부터 90도까지 22.5도 간격으로 파향(Wave incident angle)을 고려하였다(Fig. 3).

Table 1 Design Criteria for floating breakwater inspection data

Water depth	Wave characteristic		
	Item	Normal	Extreme
40-50 m	Wave height	7 m	12 m
	Period	9 s	9 s
	Wave length	122.33 m	
	Wave speed	13.593 m/s

Fig. 3 Floating breakwater and wave direction

2.2 부유식 방파제 기본 설계

본 연구에서는 부유식 방파제 기본 설계를 위하여 Table 2에 기본적인 수리학적 이론을 정리하였다. 유체에 잠긴 면에 작용하는 합력(F_R), 잠긴 평면이 받는 힘의 작용점(y'), 잠긴 물체에 대한 유체의 부력은 배제된 유체의 무게와 같고 물체 위치의 안정성을 고려한 부력($F_{buoyancy}$) 이론 그리고 부유체의 배수량, 수선 면적 등을 계산하기 위해 Simpson 법칙을 응용하였다.

물을 이상 유체로 가정하여 선형 수면파 이론을 적용하였으며, 수면파 파형(η), 속도포텐셜(ϕ)과 무한 수심에서의 각속도(ω), 파수(k)의 관계를 분산 관계식(Dispersion relation)으로 정리하였다. 물 위에 떠 있는 부유체는 서로 다른 매질(공기, 물)속에 있어 고정된 횡동요(Rolling) 축이 없지만, 횡동요 축이 중심점 부유체 무게 중심(Center of gravity, COG)을 관통한다고 가정하여 배의 운동방정식과 횡동요 주기 T_ϕ 의 기초식을 정의하였다. 메타센터 거리(Metacentric height, GM)는 횡동요 주기를 결정하며 복원력을 결정하는 중요한 인자이다(Fox et al., 2017;

Lee, 2012; Lee, 2014; SNAME, 1991).

이와 같은 환경 조건과 동수력 이론 계산 결과를 바탕으로 부유식 방파제의 주요 치수를 결정하였다. 부유식 방파제를 크기에 따라 유닛 I 과 유닛 II로 구분하여, 주요 치수, 중량, 체적, 표면적 등의 주요 정보를 Table 3에 나타내었다. 유닛 I 은 정사각형 플로어(Floor) 및 유닛 II는 직사각형 플로어 형태이며, 유닛 I 은 보강보(Reinforced beam)와 보강벽(Reinforced wall)이 설치되며, 유닛 II는 보강벽만 길이의 중앙에 존재하여 구획을 형성한다. 두 구조물 사이의 중량 차이는 757t이다. 부유식 방파제 1세트는 10개 유닛으로 구성된다.

유닛 1개당 4개의 계류선에 의하여 계류되며, 각 계류선의 해저면에 닻(Anchor)이 설치된다. 본 연구에서 적용한 닻은 액티브 닻(Asterina anchor)과 투묘식 콘크리트 닻(Centipede anchor)이다. 각각의 중량은 대략 40t 및 65t이다. 1개 유닛에는 개구부(Opening hole), 계류선과 연결되는 파이프, 파랑 에너지 소산을 위한 소파벽(Wave absorbing wall), 유닛 사이의 파형 접합부

Table 2 Fundamental formulas for hydrostatic and hydrodynamic calculations

Classification	Main formula	
Hydrostatic force	Buoyancy : $F_B = \rho g V$	ρ : density of seawater
	Resultant force : $F_R = \int_A p dA$	g : 9.81m/s ² , V : volume,
	Acting point of force : $y' = y_c + \frac{\rho g \sin \theta I_{xx}}{F_R}$	p : hydraulic pressure A : area, y' : center distance of hydrostatic pressure, y_c : y coordinate of centroid θ : angle, I_{xx} : geometrical moment of inertia
Simpson's rule	Waterplane area : $A = \frac{8h}{3}(y_1 + 3y_2 + 3y_3 + 2y_4 \dots 3y_{n-1} + y_n)$	$h = x_n - x_{n-1}$
Airy wave theory (Linear water surface waves)	Surface wave shape : $\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) = A \cos \Theta$	η : surface wave shape, t : time, g : 9.81m/s ²
	Velocity potential : $\phi(x, y, t) = \frac{gA}{\omega} e^{ky} \sin(kx - \omega t)$	k : wave number, Θ : phase function
	Dispersion relation : $\omega^2 = gk$	ω : circular frequency A : amplitude of surface wave
Ship motion	Equations of motion : $I \frac{d^2 \phi}{dt^2} + M = 0$	M : restoring moment, ϕ : velocity potential
	Rolling period : $T_\phi = \frac{1.108k}{\sqrt{GM}}$	I : mass moment of inertia, t : time G : center of gravity, k : mass inertia radius

Table 3 Specifications of floating breakwater unit I and unit II

Floating body	Principal dimensions [m]				Weight [t]		Geometric properties			
	L	B	D	T	Total	Concrete	Rebar	S_t [m ²]	S_f [m ²]	V_t [m ³]
Unit I	15.0	15.0	10.3	2/8	1,551	1,354	199	2,550	225	572
Unit II	15.0	10.0	5.0	1.5/3.5	757	690.3	66.7	1,406	165	251

L : Length of unit, B : Breadth of unit, D : Depth of unit, T : Freeboard/Draft of unit, S_t : Total surface area of unit, S_f : Total floor area of unit, V_t : Total volume of unit

Fig. 4 Unit details and assembly of units

(Corrugate connection) 등을 포함한다. 이를 도식화하여 Fig. 4에 나타내었다.

3. 부유식 방파제 해석 및 검증

3.1 동유체력 산정

본 연구에서는 범용 해양 구조물 해석 소프트웨어 SACS 5.6 V8I SELECT series 3 Version 5.6.0.8을 사용하여 Table 1에 제시

된 파랑 조건 및 파향의 일부에 대하여 동수력을 구현하였다 (Fig. 5). 이때 부유식 방파제가 계류선에 의하여 스프링 지지되었다고 가정하고 SACS를 이용하여 구조물을 모델링 하였다. 파 입사각 0도 및 22.5도에 대하여 수계산 파력과 SACS를 이용한 파력을 비교하여 Table 4에 제시하였다. 수계산 결과와 SACS를 통한 하중 계산 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 수계산의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

Table 5 및 Table 6은 두가지 해상 상태와 모든 파향을 고려한

Fig. 5 Samples of incident wave profiles on assembly of unit I

Table 4 Comparison of wave load by manual calculation and SACS

	Item		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
0 degree	Manual Cal.	F_x	20.8	295.7	328.7	99.6	-74.3	-254.3	-316.7	-81.4	90.5	328.2
	SACS	F_x	23.28	285.75	370.06	209.09	-91.61	-323.56	-355.68	-146.16	155.96	351.16
22.5 degree	Manual Cal.	F_x	15.96	255.46	339.20	185.93	11.08	-167.01	-330.55	-284.48	-30.11	183.01
		F_y	6.61	105.82	140.50	77.01	4.59	-69.18	-136.92	-117.83	-12.47	75.81
	SACS	F_x	21.51	249.91	343.90	245.50	1.63	-235.16	-342.09	-261.79	-24.77	217.79
		F_y	8.91	103.52	142.45	101.69	0.68	-97.41	-141.70	-108.44	-10.26	90.21

Table 5 Hydrodynamic forces acting on the Unit I

Item		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Normal [kN]	F_x	204.0	2900.8	3327.6	1940.4	973.2	568.0	488.5	340.4	887.8	3219.6
	Degree	0	0	22.5	45.0	0	67.5	67.5	67.5	0	0
	F_y	127.5	1037.9	2310.3	1940.4	1543.1	1371.4	1180.1	823.1	493.4	743.6
	Degree	67.5	22.5	45.0	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	22.5
	F_z	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5	7408.5
	Degree	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
Extreme [kN]	F_x	275.7	3277.5	5681.0	2211.2	1100.7	964.3	739.7	440.5	1390.1	3446.3
	Degree	0	22.5	22.5	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	0	0
	F_y	217.8	719.1	2314.2	2211.2	2657.5	2876.3	1785.4	1063.4	529.7	258.0
	Degree	67.5	45.0	45.0	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5
	F_z	13065	13065	13065	13065	13065	13065	13065	13065	13065	13065
	Degree	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0

Table 6 Hydrodynamic forces acting on the Unit II

Item		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Normal [kN]	F_x	65.7	797.6	1127.2	649.4	286.5	224.6	157.0	79.5	225.6	853.5
	Degree	0	0	22.5	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	0	0
	F_y	55.9	324.7	779.9	649.4	691.6	542.5	378.7	193.3	74.6	192.3
	Degree	67.5	45.0	45.0	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5
	F_z	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5	4672.5
	Degree	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
Extreme [kN]	F_x	102.0	1103.6	1739.3	545.4	369.8	381.6	186.4	20.6	347.3	1191.9
	Degree	22.5	22.5	22.5	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	0	0
	F_y	95.2	314.9	615.1	572.9	893.7	922.1	449.3	50.0	0	334.5
	Degree	67.5	45.0	45.0	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	22.5
	F_z	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5	8442.5
	Degree	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0

계산된 최대 파력의 최대치를 나타낸다. 또한, 파력의 최대치가 발생한 입사각을 동시에 제시하였다.

3.2 소재에 따른 응력 분석

부유식 방파제 소재(강재 및 콘크리트) 및 부유체 크기(유닛 I 및 유닛 II)에 따른 구조 안전도 평가를 위하여 SACS를 사용한 구조 해석을 실시하였다. 즉, 부유식 방파제의 재질이 강재일 경우와 콘크리트일 경우로 나누어 구조 해석을 수행하였다. 이때 적용한 산업 규격은 AISC 9판(AISC, 1989) 및 API WSD 21판(API, 2000)이었다.

1세트(10개 유닛)의 거동을 동시에 분석하기 위하여 Fig. 6에 보인 바와 같이 한 개의 유닛을 보 요소로 모델링 하였다. 또한, 유닛 간의 연결을 위하여 별도의 연결 보 요소를 이용하였으며, 유닛간의 상대적인 운동이 가능하도록 연결 보 요소의 y 방향 및 z 방향 회전(R_y 및 R_z) 자유도를 제거하였다. 유닛 I과 유닛 II의 중량은 밀도를 조정함으로써 설계 중량을 유지할 수 있었다. 특히 유닛 I은 유닛 내부에 평형수를 포함하므로 이를 포함하도록 중량을 보정하였다.

부유체 유닛 한 개당 4개의 계류선이 연결되며, 이 연결점에 스프링 요소를 배치하여 경계 조건을 형성하였다. 스프링 요소의 강성은 준정적 계산을 통해서 1kN/m의 강성을 부여하였다. 콘크리트 및 강재의 항복 강도는 각각 48MPa 및 235MPa이었으며, 재질별 부분 안전 계수를 5.0으로 가정하였다.

최대 파력이 발생한 파향 0°와 67.5°에 구조 해석을 수행하였다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 소재가 강재 및 콘크리트일 경우 유닛 사이의 수직 운동이 가장 잘 묘사되는 0°입사각에 대한 결과를 나타낸다. 일차원 부재에 대한 강도 평가를 위하여 통상 유니티(Unity)를 많이 사용한다. 유니티는 발생한 응력(하중)을 강도(임계 하중)으로 나눈 값이다. 여기서 강도는 통상 항복 강도에 안전 계수를 고려한 허용 응력 등을 의미한다. 강재 모델의 유니티는 최대 0.32(유닛 I) 및 0.12(유닛 II)였으며, 반면 콘크리트 모델에서 유니티는 최대 0.7(유닛 I) 및 0.31(유닛 I)이었다. 부유체의 크기가 감소하면서 동유체력이 감소하여 작은 유니티를 나타낸 것으로 추정된다. 또한, 강재 및 콘크리트 모두 유니티가 1.0을 초과하지 않았기 때문에 적절한 소재로 판단된다.

(a) Unit I

(b) Unit II

Fig. 6 Steel model with unity results for 0° incident wave angle

(a) Unit I

(b) Unit II

Fig. 7 Concrete model with unity results for 0° incident wave angle

4. 모형 실험 (Model Tests)

4.1 닻 모형 육상 압흔 실험

본 연구에서 설계 개발하고자 하는 부유체의 위치 유지를 위한 닻의 파지력을 확인하기 위하여 모형을 제작하여 육상 실험을 수행하였다. 닻은 실험물 크기의 1/30로 축소 제작되었다. 즉 모형 투표 닻의 크기는 200mm×200mm×150mm였다(Fig. 8(b)). 또한, 마찰 계수(Friction coefficient)와 압흔(Dropped depth)이 극대화되는 형상을 결정하기 위하여 Fig. 8(a)에 보는 바와 같이 요철 문양(원형, 사각형, 격자형 등)에 따라 6개의 형상을 선정하였다. 모형 투표 닻의 중량은 약 12~14kg이었다.

육상 압흔 실험은 마찰 계수를 측정하기 어려운 수조 실험을 보완하기 위하여 육상에서 실시되었다. 실제 해저면 토질 조건에 따른 투표 닻의 파지력 특성을 분석하고자, 토사의 깊이와 폭을 각각 30cm 및 100cm로 평탄화시킨 후 50cm 높이에서 닻을 자유 낙하하여 압흔 깊이를 측정하였다. 이때 국내에서 일반적으로 얻을 수 있는 토사를 사용하였으며, 토사에 대한 별도의 물성 실험은 수행되지 않았다. 토사의 배수도(Drainage)에 따른 편차를 없애기 위하여 압흔 실험은 3시간 이내에 모두 수행되었다.

Table 7은 닻의 6가지 유형에 대한 육상 자유 낙하 결과를 나타낸다. 이 값은 3회 자유 낙하 실험에 대한 평균값이다. 유형 F가 가장 큰 압흔 깊이를, 유형 A가 두 번째로 큰 압흔 깊이를 나타내었다. Fig. 9는 이 두 유형에 대한 압흔 계측 사진을 나타낸다.

4.2 닻 모형 수조 예인 실험

국립수산과학원의 3차원 조파 수조에서 닻의 예인 실험이 실시되었다. 국립수산과학원 수조는 총 길이 85m, 폭 10m, 깊이는 3.5m이며 최고 파고는 0.5m(주기: 0.5~3초)이다. 수조 예인 실험은 유형별 닻을 예인 전차에 한 개씩 연결한 후 예인하여 1m/s의 속도로 30초 동안 예인 실험하였다. 한 개의 유형에 대하여 3회의 예인 실험이 수행되었다. 예인 시작 후 5~24초 동안 마찰력에 의한 인장력을 측정하였다. 측정된 인장력 이력의 분포를 살펴본 결과 정규 분포를 잘 따르고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 10).

Fig. 10의 데이터를 활용하여 파지력의 평균과 표준 편차를 구하여 Table 8에 제시하였다. 유형 A, F, D 순으로 파지력 평균값의 순서를 나타내었다. 표준 편차의 수준은 평균 대비 비교적 작다는 점을 Fig. 10 및 Table 8에서 동시에 확인 가능하다.

(a) Six types of anchor

(b) Anchor dimensions

Fig. 8 Types and dimensions of model anchors (unit: mm)

Table 7 Result of dropped depth by 6 anchor type by land tests

Items	A	B	C	D	E	F
Dropped depth [cm]	3.6	3.0	1.6	3.4	2.6	3.8

(a) Type A anchor

(b) Type F anchor

Fig. 9 Photos of dropped depths for model anchor type A and F

(a) Type A and F anchors

(b) Type C and E anchors

Fig. 10 Normal distribution curve of anchor by towing tank tests**Table 8** Results of towing force tests of 6 types of anchors

Items	A	B	C	D	E	F
Anchor weight [kgf]	13.2	14.0	12.0	13.5	12.7	12.5
Average of towing force [N]	32.35	28.99	25.72	29.86	23.12	31.66
Standard deviation of towing forces [N]	2.82	5.62	2.15	3.92	2.46	2.68

Fig. 11 Comparison of towing tank tests & land free drop tests

파지력 평균의 관점에서 유형 A가 가장 우수하며, 표준 편차도 상당히 적어서 데이터의 신뢰성도 높다고 볼 수 있다. 반면, 육상 압흔 실험에서는 유형 F가 가장 우수한 성능을 보여주었다. 육상 압흔 실험과 수조 예인 실험 결과를 비교하기 위하여 유형에 따른 압흔 깊이와 파지력 평균을 Fig. 11에 제시하였다. 이로부터 파지력 평균과 압흔 깊이는 상관관계가 있다는 점을 확인할 수 있었다. 유형 A, D, F가 압흔 깊이 및 파지력 관점에서 우수한 것으로 결론 내릴 수 있었다.

5. 부유식 방파제의 경제성 평가

육지도 해역에 필요한 부유식 방파제 총 길이 400m로 산정할 때 유닛 I 과 유닛 II의 CAPEX(Capital expenditure)를 Table 9에 제

시하였다. 강제로 제작할 경우 부유식 방파제 길이 15m 제작시 약 300t 중량이 소요되었던 사례로부터 비용을 산정하였다. 콘크리트로 제작할 경우 비용은 2019년 하반기 건설 분야별 평균 임금 현황 등을 반영하였으며 일부 공사 사례를 참고하여 산정하였다. 즉, 유닛 I 에 강제를 적용할 경우 1m당 1억 원이 소요되어 1개 유닛 제작시 15억 원, 400m 제작시 375억이 필요하였다. 반면 콘크리트 재질은 1유닛 기준 7.7억 원이며, 25개 유닛은 192억이 소요될 것으로 조사되었다. 유닛 II를 콘크리트로 제작할 경우 유닛당 3.8억원, 400m 비용은 95억이 소요되는 것으로 조사되었다. 결론적으로 부유식 방파제를 강제로 제작할 경우 콘크리트 재질에 비하여 강제가 약 1.9~4배 더 높을 것으로 예상된다.

Table 10은 부유식 방파제의 수명 25년을 기준으로 했을 경우의 OPEX(Operating expenditure)를 나타낸 것이다. 강제는 해상 부식 환경에 대응하기 위해 5년마다 완전 방식이 필요하여 20만 원/m이 소요되며, 콘크리트 또한 해수로부터 보호를 위한 코팅작업이 필요한데 1만 원/m 정도로서 20배 저렴하다. 유닛 I의 경우 부유식 방파제 전체 400m를 유지하기 위해서는 강제는 3.8억 원이 필요하였으며, 콘크리트는 0.19억 원으로 재질상 유닛 I 은 약 3.6억원 유닛 II는 3.7억원 유지비용이 차이가 있는 것으로 나타났다. 재질별 제작·설치·운영비를 볼 때, 부유식 방파제의 규모가 커질수록 콘크리트가 더 경제적인 것으로 나타났다. 구조적·재질적으로 콘크리트의 단점을 보완할 수 있는 정도의 조인트 재질을 조합함으로써 경제성과 효율성을 가진 부유식 방파제를 제작할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

Table 9 CAPEX analysis result of installation in terms of material types

Items	Unit I (unit: 1,000 KRW)		Unit II (unit: 1,000 KRW)	
Steel ①	1,500,000/Unit×25Unit/Total	= 37,500,000/Total	1,500,000/Unit×25Unit/Total	= 37,500,000/Total
Concrete ②	766,600/Unit×25Unit/Total	= 19,165,000/Total	377,464/Unit×25Unit/Total	= 9,436,600/Total
Profit on concrete (①-②)	733,400/Unit	18,335,000/Total	Profit on concrete (①-②)	1,122,536/Unit
				28,063,400/Total

Table 10 OPEX analysis result of maintenance in terms of material types

Items	Unit I (unit: 1,000 KRW, per 25 year)		Unit II (unit: 1,000 KRW, per 25 year)	
Steel	$200 \text{ KRW/m} \cdot \text{time} \times 15 \text{ m/Unit} \times 5 \text{ times} = 15,000 / \text{Unit}$		$200 \text{ KRW/m} \cdot \text{time} \times 15 \text{ m/Unit} \times 5 \text{ times} = 15,000 / \text{Unit}$	
①	$15,000 \text{ KRW/Unit} \times 25 \text{ Unit/Total} = 375,000 / \text{Total}$		$15,000 \text{ KRW/Unit} \times 25 \text{ Unit/Total} = 375,000 / \text{Total}$	
Concrete	$10 \text{ KRW/m} \cdot \text{time} \times 15 \text{ m/Unit} \times 5 \text{ times} = 750 / \text{Unit}$		$5 \text{ KRW/m} \cdot \text{time} \times 15 \text{ m/Unit} \times 5 \text{ times} = 375 / \text{Unit}$	
②	$750 \text{ KRW/Unit} \times 25 \text{ Unit/Total} = 18,750 / \text{Total}$		$375 \text{ KRW/Set} \times 25 \text{ Unit/Total} = 9,375 / \text{Total}$	
	Profit on concrete (①-②)		Profit on concrete (①-②)	
	$14,250 / \text{Unit}$		$14,625 / \text{Unit}$	
	$356,250 / \text{Total}$		$365,625 / \text{Total}$	

6. 결 론

본 연구에서는 국내 연근해에 적용할 수 있는 콘크리트 부유식 방파제를 개발하기 위해 현장 조사, 부유식 방파제 기본 설계 및 해석, 모형 실험, 경제성 분석을 실시하였다. 대형 제원(유닛 1)의 경우 대파고 및 대수심(40~50m)에서 대응할 수 있도록 소파벽, 파형 접합 등 상세 구조 설계를 실시하였다.

개발하고자 하는 부유식 방파제의 설계 검증을 위해 현장 실험 자료와 극한 해상 조건을 기준으로 5개 파향에 대한 동수력을 수계산으로 산정하였으며, 이를 SACS 해석을 통하여 검증하였다. 또한, SACS 해석을 통하여 소재와 유닛의 크기에 따른 강도 평가를 실시하였다. 콘크리트를 소재로 하는 부유식 방파제에서 높은 유닛티가 발생하였지만, 허용치를 초과하지 않아서 콘크리트 부유식 방파제는 구조적으로 안전할 것으로 판단하였다.

투표식 콘크리트 닻을 1/3로 축소하여 표면 요철에 따른 육상 압흔 실험을 실시하였다. 이로부터 요철 문양에 따른 특성을 실험적으로 검증하였다. 또한 동일한 모형 닻에 대하여 수조 예인 실험을 실시하여 최종적으로 우수한 성능의 닻을 제시하였다.

부유식 방파제의 재질에 따른 경제성 분석(CAPEX 및 OPEX)을 실시하였다. CAPEX 차원에서는 강재의 원가가 최대 2배 정도 상승하였으며, OPEX 차원에서도 강재보다는 콘크리트 재질이 경제적인 것으로 추정되었다. 부유식 방파제의 총연장이 길어질수록 비용의 차이는 더욱 현저할 것으로 추정되었다.

향후 부유식 방파제에 대한 정밀한 운동성능 시뮬레이션을 통하여 하중 RAO의 도출이 요구된다. 이 결과를 바탕으로 용력 RAO를 도출하는 통계적 계산을 통하여 콘크리트 재료의 부유식 방파제에 대한 구조 안전도 검증이 요구된다. 또한, 월파시에 경험하는 부유식 방파제의 운동 및 구조 성능에 대한 엄밀한 검증이 요구된다.

후 기

본 연구는 국립수산물과학원 지원으로 수행된 연구결과 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

American Institute of Steel Construction, inc. (AISC), 1989. Specification for Structural Steel Buildings. AISC 9th Edition.

American Petroleum Institute (API), 2000. Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API WSD 21st Edition.

Cho, I.H., 2002. Wave Control Performance of Moored Pontoon-Type Floating Breakwater. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 5(3), 35-44.

Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., Mitchell, J.W., 2017. Fluid Mechanics. 9th Edition, Textbooks.

Jeong, Y.J., Hwang, Y.K., Park, M.S., Lee, B.C., Kim, B.C., 2013. Development of Structural System of Hybrid Floating Structure. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

Jung, D.H., Kim, H.J., Kim, J.H., Moon, D.S., 2006. A Preliminary Experiment Study for Development of Floater of Floating Breakwater. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 9(3). 141-147.

Kim, D.S., Park, K.S., Jeong, M.Y., Park, D.C., 2007a. Characteristics of Floating Breakwaters Constructed on the Front of Sea Pasture of Tongyeong City. Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Regular Conference, 646-649.

Kim, D.S., Nakamura, T., Park, W.M., Kim, T.G., 2007b. Characteristics of Floating Breakwaters Being Constructed at the Weonjeon Fishing Port of Masan City. Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Regular Conference, 654-657.

Koh, K.T., Jnag, I.Y., Kim, S.W., Lee, K.M., 2004. Kwang Myong, Materials and Construction of Off-Shore Concrete Structures. Magazine of the Korea Concrete Institute, 16(6), 26-30. <https://doi.org/10.22636/MKCI.2004.16.6.26>

Lee, S.G., 2012. Ship Calculation and Stability. GSinterview.

Lee, S.J., 2014. Introduction to Marine Hydrodynamics. GSinterview.

Link, R.A., Elwi, A.E., 1995. Composite Concrete-Steel Plate Walls: Analysis and Behavior. Journal of Structural Engineering ASCE, 121(2), 260-271. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:2\(260\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(260))

Park, Y.H., Youn, D.O., 2016. Development of a New Armor Unit against High Waves. Korea Academy Industrial Cooperation Society, 17(6), 737-743. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.6.737>

Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1991. Principles of Naval Architecture.