

수치해석 기반 해상풍력단지 공존어업설비 기본설계 적정성 평가

경두현* · 이호엽* · 강금석* · 박성민** · 강수원*** · 김찬주****

Basic design assessment of coexistent cage aquaculture an offshore wind farm based on numerical analysis

Doohyun Kyung*, Hoyeop Lee*, Keumseok Kang*, Sungmin Park**, Soowon Kang*** and Chanjoo Kim****

Key Words : Offshore wind farm (해상풍력단지), Cage Aquaculture (가두리양식장), Basin Experiment (수조 모형실험), Numerical analysis (수치해석), Feasibility assessment (타당성 평가)

ABSTRACT

This paper examines the design feasibility of cage aquaculture coexistent with an offshore wind farm in the southwestern sea of South Korea. Among the many types of fish farms, 2×3 cage aquaculture was selected for the investigation and the initial design including mooring lines, bridles, etc. was drawn with iterative numerical simulations using Orcaflex. Experimental campaigns were conducted to validate the numerical results, and they were found to be in good agreement with the experiments. Using a validated numerical model, the tension of mooring lines and the deformed volumes of the facility were examined under given operating and survival conditions. The validated model will be further used to investigate various aspects of the cage farm design for design optimization.

1. 서론

전 세계적으로 탄소 저감에 대한 수요가 증가함에 따라, 신재생 에너지를 활용한 발전이 확대되고 있다.

해상풍력은 유망한 신재생 에너지원 중 하나로, 육상풍력 대비 우수한 바람 자원의 품질 확보가 가능하고 소음으로 인한 지역주민 민원의 소지가 적은 장점을 가지고 있다. 반면에 해상공간을 점유하는 해상풍

력의 특성상 기존 어업활동이나 선박 통행 등에 영향을 주게 되어, 수산업계를 포함한 지역주민 수용성 관련 문제가 지속적으로 발생하고 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 해상풍력단지 내에서 고부가가치를 창출함과 동시에 이해관계자와의 상생도 도모할 수 있는 공간 활용 방안의 필요성이 대두되기 시작하였다 [1-7].

공간 활용의 한 방안으로 해상풍력단지에 적용이 가능한 공존 어업설비의 도입안이 제시되었으며, 국외에서는 관련 연구와 더불어 실증사업을 통해 공존 가능성을 평가하고 있다 [8-10].

국내의 경우, 서남해 해상풍력 실증 단지 내에서 수하식 양식장의 공존 가능성 평가를 위한 실증사업이 수행되고 있으나, 국내에서 주로 활용되는 가두리 양식의 적용성 검토는 전무한 실정이다.

일반적인 가두리 양식장에 관한 연구는 수조실험,

* 한국전력공사, 전력연구원
** ㈜포어시스, 기술개발1팀(교신저자)
*** ㈜포어시스, 기술개발1팀
**** 인하대학교, 조선해양공학과, 박사과정
E-mail : dhkyung@kepcoco.kr.
DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.1.004>
Received : November 03, 2023, Revised : February 28, 2024
Accepted : March 06, 2024

수치모델링, 그리고 현장계측 등을 통해 광범위하게 이루어지고 있으므로 [11, 12], 다양한 방법을 통해 설계의 타당성을 검토할 수 있다.

본 연구에서는 해상풍력단지 어업설비 공존 가능성 평가의 일환으로 Orcaflex를 활용하여 대형 가두리 양식장의 기본 설계를 수행하고, 수치 모형실험과 수치해석 결과의 비교검증을 통한 설계기법의 검증과 더불어 양식시설의 주요 설계 인자인 계류선 및 브리들 장력과 용적률을 기준으로 설계 적정성을 검토하고자 한다.

2. 공존어업설비 기본설계

2.1 설치 대상 해역

대상 해역은 해상풍력단지 조성이 예정되어 있는 전라남도 신안해역(35° 00' 00.0"N, 125° 45' 00.0"E)이다(Fig. 1). 평균 수심은 약 32m이며, 창·낙조류의 주요 흐름 방향은 남서방향에서 북동방향이다.



Fig. 1 Target location

2.2 가두리 양식장 구성요소

가두리 양식은 수산생물을 구조물 내에 가두어 생육시키는 방법으로, 대개 어류를 가두어 양식하는 시설을 통칭하여 사용되고 있다. 가두리 양식 설비는 일반적으로 그물코를 통해 설비 안팎의 해수가 자유롭게 순환되므로 다량의 어류를 수용하여도 비교적 안전하게 양식을 수행할 수 있는 방식이다.

상부 프레임은 전체 양식시설의 부력을 확보하고 양식 어종의 활동 반경을 제한하는 역할을 하며, 외해에서는 다방향 환경하중에 유리하도록 PE 재질 원형

으로 제작하는 것이 일반적이다.

가두리 그물망의 형태는 양식 어종을 특정 해양공간 안에 가두어 양식하기 위한 중요한 구성요소이며, 원통형, 원뿔형, 혼합형 등의 형상이 사용된다.

브리들 시스템은 가두리 우리(Cage)와 계류계의 중간 연결부 역할을 함과 동시에, 어업설비의 침하를 방지하고 설비 간의 적정 거리 유지를 위해 활용된다.

계류계는 시설의 표류를 방지하고 위치를 유지하는 목적으로 사용되며, 운영 안정성과 경제성을 동시에 고려한 최적 설계가 필요하다.

2.3 시설 규모

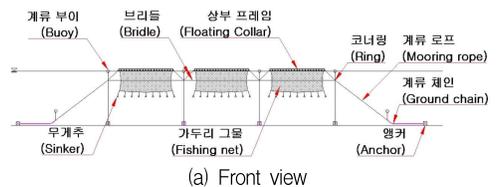
본 연구에서는 경제성 확보를 위해 해수 면적 1.0 ha (10,000m²) 규모의 시설 설계를 목표로 한다.

2.4 대상 어종

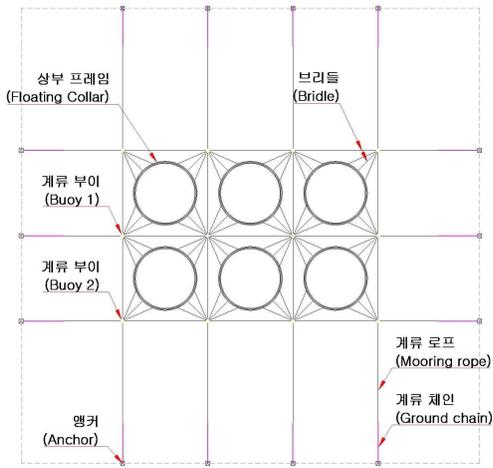
양식 어종은 국내 토종 어류자원 중에서 활동성이 적은 정착성 어종이자 현재 신안지역에서 가장 많이 양식되는 어종인 조피볼락(우럭)의 양식을 가정하였으며, 성체 양식을 기준으로 그물망 규격을 선정하였다.

2.5 가두리 양식장 배치안 선정

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)에서 제공하는 양식 어장 시설 구성 및 기준[13]을 바탕으로 가두리 양식장 형태 중 2 × 3을 채택하였다(Fig. 2). 1행 및 2행의 가두리 그물을 거치면서 유속의 감소가 발생하여 3행에서는 우리 내부의 해수 순환이 되지 않는 문제가 발생하므로, 일반적으로 가두리 그물망 배치는 3행 이상 설계하지 않는다. 동일한 이유로 양식시설을 창·낙조류 주요 방향에 수직으로 배치하여 효율적인 순환을 도모한다.



(a) Front view



(b) Plan view
Fig. 2 Selected basic 2x3 configuration

2.6 수치해석 모델링

수많은 그물코의 집합으로 이루어진 그물망을 실제와 동일하게 수치모형에 반영하는 것은 시간적·경제적 측면에서 매우 비효율적이다. 그물망을 단순화하여 수치모형으로 구축하기 위한 연구가 광범위하게 수행되었으며, 대표적인 기법으로 가) Morison type force 모델과 나) Screen type model이 있다. 전자의 경우, 다수의 그물코를 동등한 단일 그물코로 치환하는 방법이며, 후자는 그물을 다수의 스크린 요소로 구축하는 방법이다.[14, 15]

본 수치해석에서는 Fig. 3과 같이 Orcaflex를 활용하여 그물망의 세 가지 물리적 성질(질량, 유체하중 및 강성)을 집중 질량 모델(Lumped mass model)로 구현하여, Morison equation을 적용할 수 있도록 하였다.

실제 그물에 작용하는 질량과 강성을 총 33개의 노드와 64개의 세그먼트에 균등하게 나누어 부과하였으며, 수조 예인실험을 통해서 도출된 항력 계수를 적용하였다.

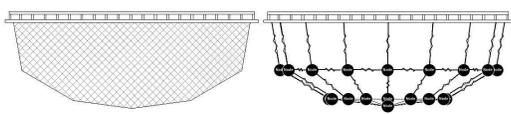


Fig. 3 Lumped mass model of fishing net

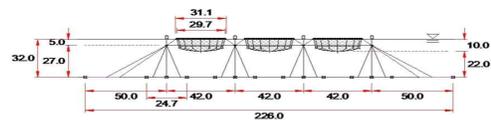
2.7 기본설계안

공존어업설비 표준규격을 참고하여 부이 용량, 계류선 길이 및 배치, 브리들 길이, 침자 무게의 조건에 대한 Batch processing을 통해 초기설계안(Fig. 4)을 도출하였다. 그물망을 포함한 계류선과 브리들의 수치모델은 Orcaflex의 Line model을 활용하여 구현하였으며, 계류 로프 제원은 수치해석 프로그램에서 제공하는 Pre-stretch 상태에서의 데이터를 사용하였다.

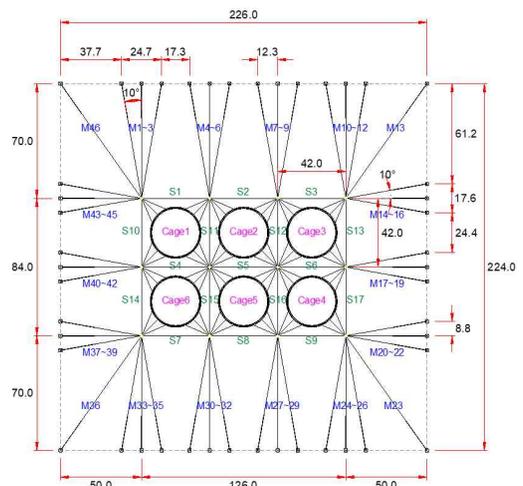
초기 설계안의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다.

섬유로프는 점탄성 물질로서 일반적인 강성값으로 표현되지 않는다. 이러한 비선형 강성을 표현하기 위해 다양한 섬유로프 강성 모델이 개발되었으며, 그 중 Static-dynamic 강성 모델은 섬유로프의 강성을 정적 강성(Static stiffness)과 동적 강성(Dynamic stiffness)로 나누어 섬유로프의 연신율에 따른 거동을 표현하였다[16].

정적 강성은 비교적 천천히 하중을 받을 때 하중에 따른 평균 부유체의 변위 및 로프 장력을 계산하기에 적합하며, 동적 강성은 주기성이 있는 하중을 받을 때



(a) Front view



(b) Plan view

Fig. 4 Initial design of 2x3 cage aquaculture

Table 1 Cage specification

Component	Description	Value
Floating collar	Material	HDPE
	Inner circumference [m]	30.00
	Outer circumference [m]	31.43
	Pipe Diameter [m]	0.315
	Pipe Thickness [m]	0.0187
Mooring rope	Material	Polyester
	Diameter [mm]	60.0
	Unit mass [kg/m]	2.73
	Min. breaking load [ton]	49.8
Ground chain	Material	Steel
	Diameter [mm]	27.0
	Unit mass [kg/m]	14.5
	Min. breaking load [ton]	61.0
Net	Material	Nylon
	Type	Knotless
	Twine diameter [mm]	4.0
	Unit mass [kg/m ²]	0.65
Bridle	Material	Polypropylene
	Diameter [mm]	72
	Unit mass [kg/m]	2.34
	Min. breaking load [ton]	61.4
Buoy1 / 2	Volume [Liter]	400 / 670
Sinkers	Material	Concrete
	Mass [kg]	90

의 변위 및 장력을 표현하기에 적합하다. 이러한 정적, 동적 강성은 로프의 실험 데이터를 기반으로 결정되어야 하지만, 본 연구에서는 풍력단지 내 공존어업설비의 적정성 평가 단계이므로 Table 2와 같이 ABS 가이드에서 제공하는 지침을 사용하였다[17].

Table 2 Static-dynamic stiffness

Static stiffness(EA)	Dynamic stiffness(EA)
13 × Minimum Breaking Load(MBL)	31 × Minimum Breaking Load(MBL)

3. 모형실험

3.1 실험 수조

수조 모형실험은 대전에 위치한 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조(길이 56m, 폭 30m, 깊이 4.5m)에서 수행하였다.

3.2 어업설비 모형

공존어업설비의 규모와 수조 내에서 구현할 수 있는 환경조건을 종합적으로 고려하여 1:10 상사비를 적용하였으며, 실험 모형은 프루드 상사 법칙을 적용하여 제작하였다.

계류선의 경우 Fig. 5의 3 line cluster를 1개의 계류선으로 대체하였다. 특히 계류선은 기하학적 상사 적용이 어려운 관계로 무게 상사와 더불어 강성상사를 수행하여 모형의 계류선 복원력 곡선(Offset curve)이 기본 설계와 근사하도록 제작하였다(Fig. 6).

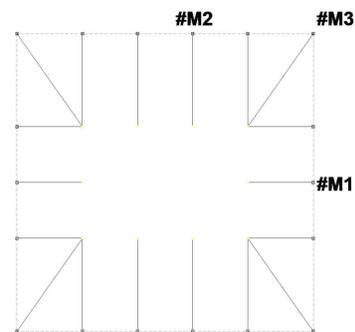
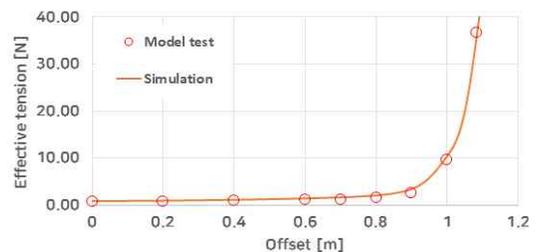
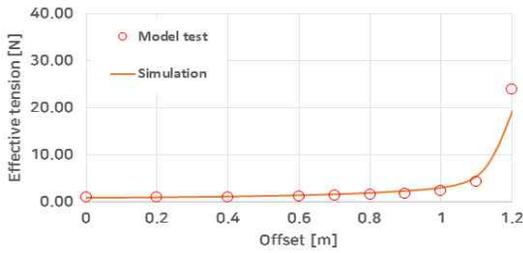


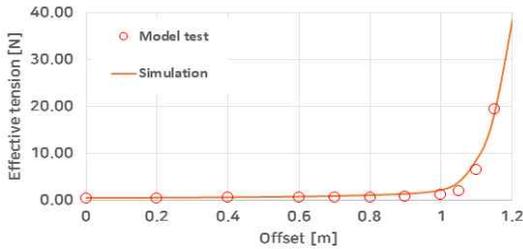
Fig. 5 Numerical modelling of mooring line



(a) M1 mooring offset curve



(b) M2 mooring offset curve



(c) M3 mooring offset curve

Fig. 6 Mooring offset curve results

3.3 실험구성

Fig. 7과 같이 2×3 모형을 제작하고 주요 실험값 측정을 위해 유속계 1기, 파고계 2기(Wave F&C), 장력계 10기(계류선 DF1~8, 브리들 DF9~10), 6자유도계

2기(Rodym 1&2) 및 수중카메라 3기를 사용하였다.

실험 조건은 1:10 상사비를 고려하여 모형 수조에서 구현 가능한 최대 실험 조건(Case B)과 유의미한 거동 차이를 구현할 수 있을 것으로 판단되는 일반 운영 조건(Case A)을 임의로 선정하였으며, 파 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였다. 본 실험에서 적용한 실험조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental cases

Description		Model	Prototype
Case A	Significant wave height [m]	0.115	1.15
	Wave peak period [s]	1.78	5.64
	Current speed [m/s]	0.16	0.52
Case B	Significant wave height [m]	0.28	2.80
	Wave peak period [s]	2.53	8.00
	Current speed [m/s]	0.28	0.89

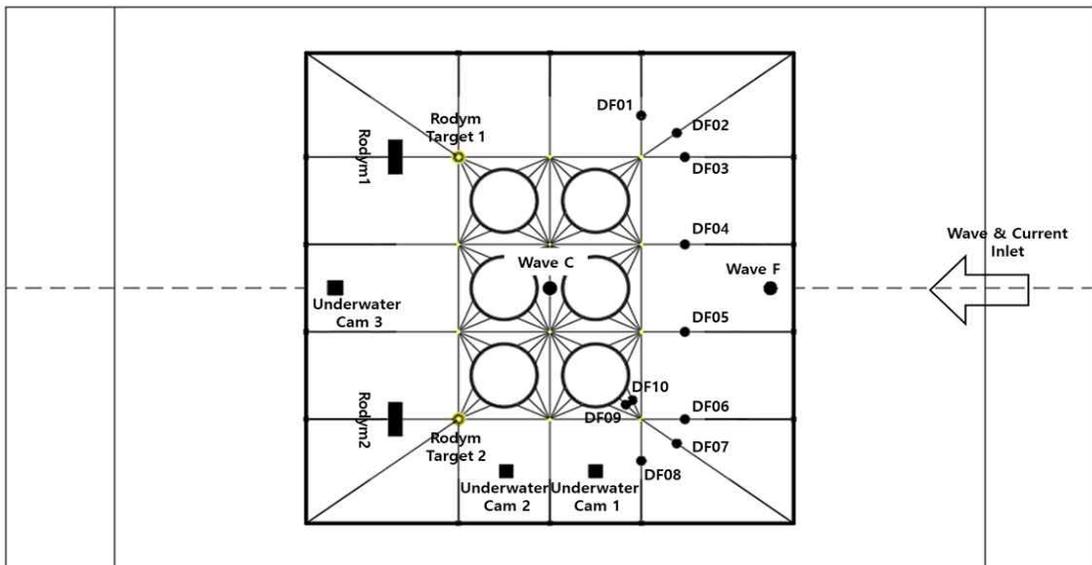


Fig. 7 Experimental layout (not to scale)

3.4 데이터분석

모든 실험 데이터는 100Hz로 샘플링 하였으며, 앨리어싱(Aliasing)을 방지하기 위한 저역통과필터(Low-pass filter)를 적용하여 계측하였다.

일반적으로 해양구조물 성능은 3시간 기준으로 평가하나, 본 실험에서는 실선 기준 1.5시간을 모사하여 취득한 데이터를 3-Parameter Weibull distribution 기법을 활용하여 3시간으로 확장한 결과를 도출하였다.

4. 수치해석-모형실험 비교검증

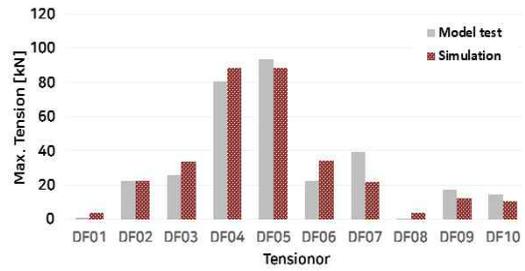
모형실험과 동일한 조건에서의 수치해석을 수행하여 최대 장력과 및 운동을 비교하였다. 수치해석은 불규칙과 조건에서 3시간(10,800s)동안 진행하였다. 수치해석과 모형실험의 결과는 Fig. 8~11과 같다.

Fig. 8과 9는 각각 Case A와 Case B를 적용하였을 때, 모형실험과 수치해석의 장력 및 운동의 최대값을 나타내고 있다. 주요 하중을 받는 계류선 DF01~DF04와 DF05~DF08의 경우, 이론적으로 대칭적 구조를 가지므로 장력도 대칭적으로 발생하는 것이 타당하다. 그러나 모형실험에서는 이와 같은 대칭성이 나타나지 않으므로 실험 중 다음과 같은 오차가 발생하였을 것으로 판단된다.

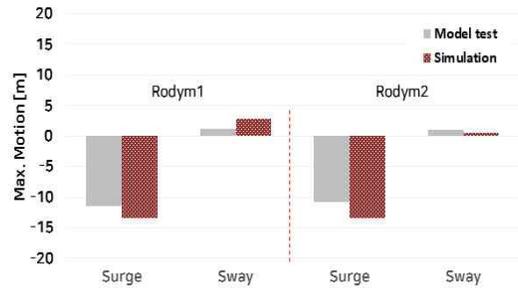
- 가) 실험 세팅의 오차(실험모형과 파랑 입사각의 정교한 직교세팅 불가)
- 나) 모형실험 시 제한수역(Closed basin)의 한계로 인한 교란

상기 오차의 누적으로 인해 대칭성에 교란이 발생하였지만, DF01~DF08에 발생한 장력의 총합에 대한 오차는 Case A에서 3%(수치해석: 297kN, 모형실험: 287kN) Case B에서 5%(수치해석: 657kN, 모형실험: 626kN) 이내로 발생하였다. 에너지의 관점에서 파랑 및 조류의 하중이 어업설비에 가한 에너지는 모형실험과 수치해석에서 동일하게 발생하므로 수치해석 모델의 적정성은 충분히 검증된 것으로 판단된다.

그물망 형상의 경우, 모형실험에서 그물망의 정확한 형상 및 부피 측정하는 데 어려움이 있으므로 최소 부피를 가지는 시점의 실험영상(Camera 1)과 수치해석 결과의 측면 형상을 비교(Fig. 10~11)하였다. 비교 결과 수치해석과 모형실험에서 우리 최소용적이 발생할 때 유사한 그물망의 형상을 가지는 것으로 나타났다.

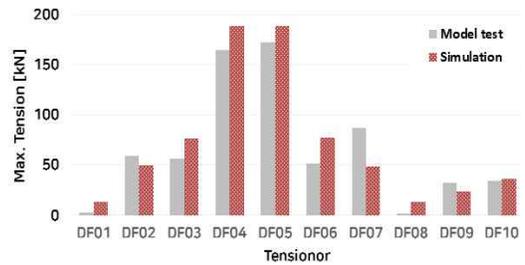


(a) Max tension

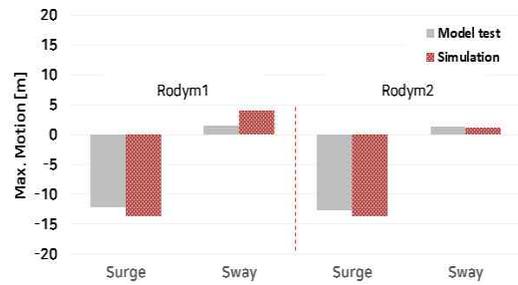


(b) Max motion

Fig. 8 Numerical-experimental comparison (Case A)

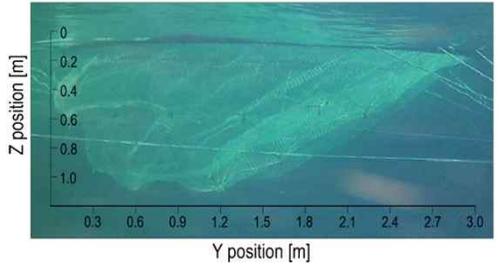


(a) Max tension

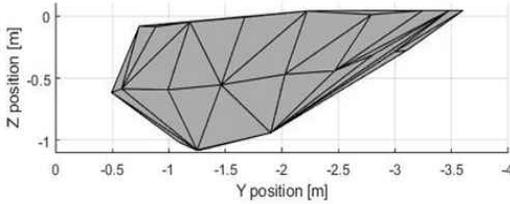


(b) Max motion

Fig. 9 Numerical-experimental comparison (Case B)

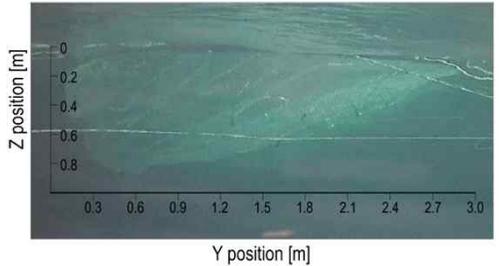


(a) Experiment

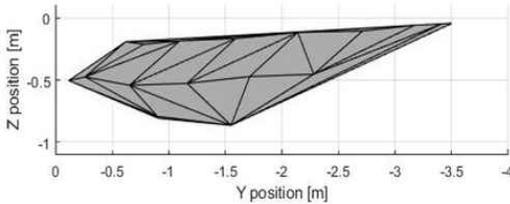


(b) Simulation

Fig. 10 Experiment-simulation result comparison when the minimum volume occurs (Case A)



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 11 Experiment-simulation result comparison when the minimum volume occurs (Case B)

5. 환경 조건에 따른 영향 평가

그물망의 거동과 장력에 환경 조건이 미치는 영향을 보다 상세하게 살펴보고자 규칙파에서의 유속, 파

고 및 파주기별 Cage2 용적률과 장력 변화를 검토하였다. 쇄파(Breaking wave)의 범위를 초과하는 3초이하의 단주기파는 검토 조건에서 제외하였으며, 4sec ~ 9sec의 파주기 조건과 1m~9m의 파고 조건, 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s의 유속 조건을 조합하여 246개의 수치 해석을 수행하였고 총 해석 시간은 300초, 시간 간격(time step)은 0.01s이다.

5.1 우리 용적률 변화

우리 용적률(Cage fraction)은 경계성과 직접적으로 연계되는 인자로서 사용할 수 있는 양식 개체 수를 결정하는 중요한 요소이며, 식 (1)과 같이 정적 상태에서의 부피(A)와 환경하중에 의해 변형된 상태에서의 부피(B)의 비로 정의한다.

$$Cage\ fraction = \frac{B}{A} \times 100 [\%] \quad (1)$$

우리의 부피는 수치모델의 각 노드점 좌표를 통해 내부의 부피를 산출하였고, 시계열 해석 결과 우리 용적이 가장 작은 상태의 값을 변형된 부피 값으로 사용하였으며, 환경하중에 따른 우리 용적률 변화를 통해 다양한 환경조건에서 어업설비의 적용성을 평가하였다.

우리 용적률 산출 결과는 Table 4~6과 같다.

Table 4 Minimum cage fraction [%] with current = 0.5m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	85.8	85.3	86.9	87.7	88.2	87.9
1.5m	83.9	82.2	84.7	86.4	87.0	86.8
2.0m	81.0	78.8	81.8	84.5	85.4	85.2
2.5m	77.0	75.0	78.2	82.0	83.4	83.3
3.0m	68.7	69.9	73.7	79.2	80.9	81.0
3.5m		62.7	68.3	75.8	78.0	78.4
4.0m		54.2	62.1	71.9	74.7	75.5
4.5m		45.4	56.4	67.4	71.1	72.4
5.0m		36.3	51.8	62.6	67.4	69.2
5.5m			48.3	58.5	63.7	66.0
6.0m			45.1	55.2	60.3	62.9
6.5m			39.7	52.3	57.1	59.9
7.0m			36.5	49.5	54.2	57.0
7.5m			33.6	45.5	51.7	54.3
8.0m			31.3	40.8	49.4	51.9
8.5m			30.7	37.3	46.7	49.8
9.0m			30.7	35.2	42.2	47.9

Table 5 Minimum cage fraction [%] with current = 1.0m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	60.4	60.7	60.9	61.1	61.2	61.1
1.5m	57.3	58.3	59.0	59.6	59.9	59.8
2.0m	51.4	55.3	56.7	57.9	58.5	58.4
2.5m	40.5	51.6	54.2	56.1	56.9	56.9
3.0m	30.0	46.3	51.5	54.3	55.2	55.4
3.5m		40.0	48.9	52.5	53.5	53.8
4.0m		34.3	45.8	50.8	51.8	52.2
4.5m		29.9	42.6	48.8	50.3	50.7
5.0m		32.6	39.2	46.7	48.8	49.3
5.5m			36.2	44.5	47.2	47.9
6.0m			33.9	41.7	45.4	46.5
6.5m			31.6	38.5	43.9	44.9
7.0m			29.2	35.3	41.5	43.0
7.5m			28.2	33.3	38.4	41.6
8.0m			29.9	32.1	35.5	40.0
8.5m			30.2	30.8	33.5	38.1
9.0m			30.8	29.8	32.3	36.3

Table 6 Minimum cage fraction [%] with current = 1.5m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	42.8	44.0	44.2	44.2	43.9	43.6
1.5m	39.2	42.4	43.7	43.5	43.1	42.7
2.0m	31.9	40.0	42.5	42.6	42.2	41.7
2.5m	28.0	36.9	41.0	41.5	41.2	40.8
3.0m	26.1	32.7	39.2	40.1	40.1	40.0
3.5m		28.1	36.8	38.6	38.9	39.1
4.0m		26.7	34.0	36.9	37.7	38.1
4.5m		25.8	31.6	35.2	36.6	37.2
5.0m		25.8	28.9	33.6	35.8	36.3
5.5m			27.2	31.4	34.5	35.4
6.0m			26.6	29.9	32.8	34.6
6.5m			26.2	29.0	31.2	33.3
7.0m			26.0	27.8	29.9	32.0
7.5m			25.7	26.8	28.7	30.7
8.0m			25.8	26.0	27.7	29.5
8.5m			28.8	25.4	26.7	28.1
9.0m			29.9	24.9	25.9	27.0

검토 결과, 모든 유속조건에서 파 주기가 증가함에 따른 용적률 감소 경향은 파고가 클수록 두드러지게 발생하였으며, 동일 파고 및 주기 조건에서는 유속이 증가할수록 용적률이 감소하는 경향을 보였다.

유속이 0.5 m/s에서 1.0m/s로 증가할 때 평균 27 %, 1.0 m/s에서 1.5 m/s로 증가할 때 평균 25 %의 용적감소율을 보였다. 유속이 0.5m/s 증가할 때마다 용적률은 평균 26 % 내외로 감소하는 경향을 보였으며, 파고가 클수록 감소율이 작은 것으로 나타났다.

5.2 계류선 장력 변화

계류선 장력은 환경하중 입사방향에 위치하여 가장 큰 장력이 작용하는 M28 계류선을 대상으로 평가하였다. 수치해석 결과 계류선 장력이 수렴하는 구간에서의 장력 평균값을 토대로 유속, 파고 및 파주기의 영

향을 분석하였다. 해석조건별 계류선 장력 결과는 Table 7~9와 같다.

Table 7 Mean tension [ton] with current = 0.5m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7
1.5m	2.9	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8
2.0m	3.7	2.9	2.5	2.3	2.1	2.0
2.5m	4.6	3.6	2.9	2.6	2.4	2.2
3.0m	5.7	4.3	3.4	3.0	2.7	2.5
3.5m		5.2	4.0	3.4	3.0	2.8
4.0m		6.3	4.7	3.8	3.4	3.1
4.5m		7.7	5.5	4.4	3.8	3.5
5.0m		9.5	6.5	5.0	4.2	3.9
5.5m			7.6	5.7	4.7	4.3
6.0m			9.0	6.6	5.3	4.7
6.5m			10.5	7.6	6.0	5.3
7.0m			12.0	8.7	6.7	5.8
7.5m			13.7	9.9	7.6	6.5
8.0m			15.5	11.2	8.5	7.2
8.5m			17.4	12.5	9.4	7.9
9.0m			19.5	14.1	10.5	8.8

Table 8 Mean tension [ton] with current = 1.0m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	4.3	4.1	3.9	3.9	3.8	3.8
1.5m	5.1	4.6	4.3	4.1	4.0	4.0
2.0m	6.3	5.3	4.8	4.5	4.3	4.2
2.5m	8.0	6.3	5.3	4.9	4.6	4.5
3.0m	10.0	7.5	6.1	5.4	5.0	4.8
3.5m		9.0	7.0	6.0	5.5	5.2
4.0m		10.6	8.0	6.7	6.0	5.7
4.5m		12.4	9.3	7.6	6.7	6.2
5.0m		14.1	10.6	8.5	7.4	6.8
5.5m			12.0	9.6	8.1	7.4
6.0m			13.5	10.8	9.0	8.1
6.5m			15.0	12.0	9.9	8.9
7.0m			16.6	13.3	11.0	9.7
7.5m			18.3	14.8	12.0	10.6
8.0m			20.3	16.3	13.2	11.5
8.5m			22.1	17.8	14.4	12.5
9.0m			24.1	19.5	15.7	13.6

Table 9 Mean tension [ton] with current = 1.5m/s

H \ T	4sec	5sec	6sec	7sec	8sec	9sec
1.0m	7.9	7.6	7.3	7.2	7.2	7.1
1.5m	9.1	8.3	7.8	7.6	7.4	7.3
2.0m	10.6	9.3	8.5	8.1	7.8	7.6
2.5m	12.2	10.5	9.3	8.7	8.2	8.0
3.0m	14.0	11.8	10.3	9.4	8.8	8.5
3.5m		13.3	11.4	10.3	9.5	9.0
4.0m		14.8	12.6	11.2	10.2	9.6
4.5m		16.4	13.8	12.3	11.1	10.3
5.0m		18.2	15.1	13.3	12.0	11.1
5.5m			16.5	14.5	12.9	11.9
6.0m			18.1	15.8	14.0	12.8
6.5m			19.7	17.1	15.0	13.7
7.0m			21.3	18.4	16.2	14.7
7.5m			23.1	19.9	17.4	15.7
8.0m			25.0	21.4	18.6	16.8
8.5m			27.0	23.0	19.8	17.8
9.0m			29.0	24.6	21.2	19.0

계류선 장력 평가 결과, 파주기 증가에 따라 장력이 감소하는 경향을 나타냈다. 유속이 증가하면서 계류선 장력이 함께 증가하였고, 파주기가 짧을수록 파고증가에 따른 계류선 장력 증가율이 높았으며, 파고가 클수록 단주기에서 장력이 크게 나타났다. 이는 파주기가 길어질수록 어업설비의 거동에 따른 관성력이 저하하면서 계류선 장력이 감소하는 것이라 판단된다. 또한, 파주기가 짧을수록, 파고가 클수록 쇄파에 근접하여 우리가 과 경사면을 따라 거동하지 않고 형상을 유지할 수 없게 되며(Fig. 12 참조) 계류선 장력에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

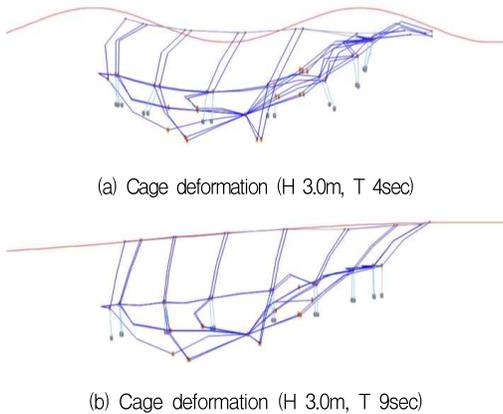


Fig 12. Comparison of cage deformation with different period

6. 불규칙파랑 중 기본설계안 검토

검증된 수치해석 모델링 기법을 활용하여 운영 및 극한 조건에서의 실규모 기본 설계안(Fig. 5 참조)에 대한 검토를 수행하였다.

Table 10 Operating and survival conditions

Condition	Description	Value
Operating	Significant wave height [m]	1.15
	Wave peak period [s]	5.64
	Current speed [m/s]	0.52
Survival	Significant wave height [m]	8.64
	Wave peak period [s]	16.37
	Current speed [m/s]	1.48

운영 및 극한 조건의 경우, 대상 해역 인근 해상 환경 관측 데이터와 전국 심해설계과 보고서[18]에서 제공하는 제원을 활용하여 극치분석과 파랑/해수유동 수치해석(MIKE 21/3)결과를 검토하여 Table 10과 같이 선정하였다. JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 불규칙 파랑을 적용하였으며, 조류의 경우 고정값을 적용하였다. 각 하중의 방향은 [19]의 연구결과를 참고하여 한 방향(Cage 4, 5 & 6에 직교하여 입사)으로 적용하였다.

6.1 계류선 및 브리들 장력

Table 1에서 나타낸 어업설비의 제원을 통해 실규모 환경조건에서의 수치해석 결과 계류선과 브리들은 안전율 1.67(API 기준)을 충족하지 못하는 것으로 나타났다(Table 11).

Table 11 Safety Factors of mooring & bridle line

	No.	Safety Factor	Note
Mooring	M28, 31	1.41	NG
Bridle	S15, 16	1.13	NG

해상풍력단지내 공존어업설비의 개념상 어업설비의 파단이 발생하면, 해상풍력단지에 심각한 피해가 유발할 수 있으므로 어업설비의 강건설계를 위해 설계안을 Table 12와 같이 변경하였다.

Table 12 Changed specifications of Mooring & Bridle line

Component	Description	Before	After
Mooring rope	Material	Polyester	
	Diameter [mm]	60	75
	Unit mass [kg/m]	2.73	4.26
	Min.breaking load [ton]	49.8	77.7
Bridle	Material	Polypropylene	
	Diameter [mm]	72	120
	Unit mass [kg/m]	2.34	6.5
	Min.breaking load [ton]	61.4	162.7

변경된 설계안에서 운영 및 극한 조건에서의 계류선과 브리들 장력은 각 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었으며, 이에 따른 안전율은 Table 13과 같다.

Table 13 Safety Factors of mooring & bridle line

	No.	Safety Factor	Note
Mooring	M28, 31	1.75	OK
Bridle	S15, 16	1.77	OK

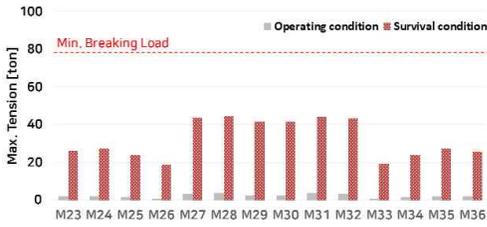


Fig. 13 Mooring tension results

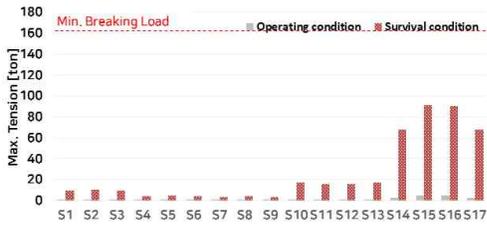


Fig. 14 Bridle tension results

6.2 용적률

기본설계안의 운영 및 극한 상태에서의 최소 용적률을 Fig. 15에 나타내었다.

운영 조건에서의 우리별 용적률은 81.9 %~82.8 % 범위(평균 82.4 %)에 분포하며, 극한 조건의 경우 19.9 %~24.7 % (평균 22.2 %)로 운영 조건 대비 상대적으로 낮은 용적률을 보인다. 운영 조건의 경우, 1행(Cage 1, 2 & 3)과 2행(Cage 4, 5 & 6)의 용적률 분포가 유사하게 나타나지만, 극한 조건에서는 1행의 용적률이 2행과 비교하여 상대적으로 낮은 경향을 보인다. 극한 조건에서 각 우리의 평균 및 최소 용적률은 정리하여 Fig. 16과 같다.

Fig. 17은 환경 조건별 최소 용적률이 발생하는 시점 30초 전후의 우리별 용적률 변화이다. 각 행에 해당하는 1, 2, 3번 우리와 4, 5, 6번의 우리는 운영 및 극한 조건 모두 시간에 따라 매우 유사한 용적률을 보

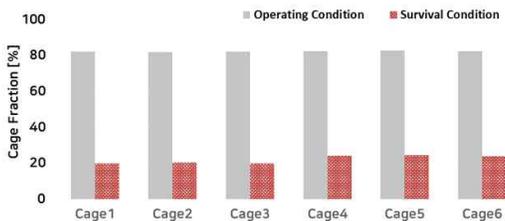


Fig. 15 Volume fraction of each cage

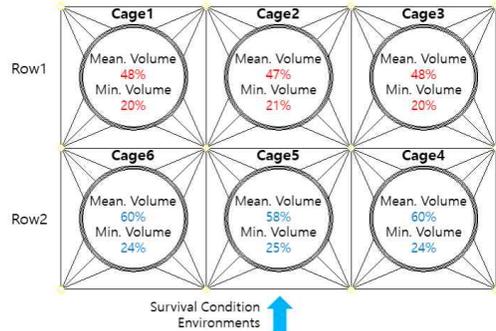
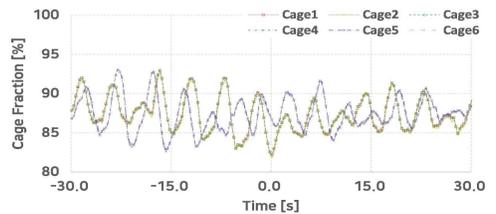


Fig. 16 Each cage volume fraction at survival condition

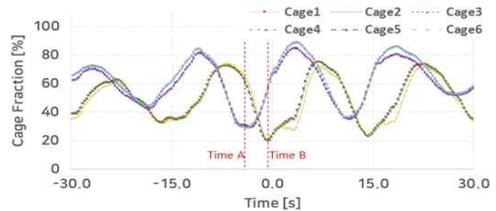
인다.

하지만, 각 행에 대해서는 파 주기에 따른 거동의 차이뿐만 아니라 용적률에서도 차이를 보인다. 특히 극한 조건에서 1행 우리의 평균 용적률은 48%인 반면, 2행 우리의 평균 용적률은 59%로 2행에서 10% 이상의 용적을 더 확보할 수 있다.

2행의 용적률이 큰 이유는 양식장의 구조에서 기인하며, 최대 하중이 발생하는 계류선 및 브리들이 우리의 변형을 방지해주기 때문이다. Fig. 17 (b)의 Time A, B의 시점에서 우리의 형상을 Fig. 18에 나타내었다. 우리의 용적률 변화와 동일 시간대의 브리들 장력 변화를 Fig. 19에 나타내었다.

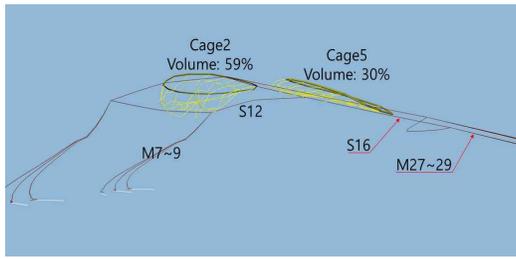


(a) Operating condition



(b) Survival condition

Fig. 17 Time series of remaining volume fraction between 30 seconds before/after the minimum volume occurs



(a) Time A



(b) Time B

Fig. 18 Comparison of cage deformation

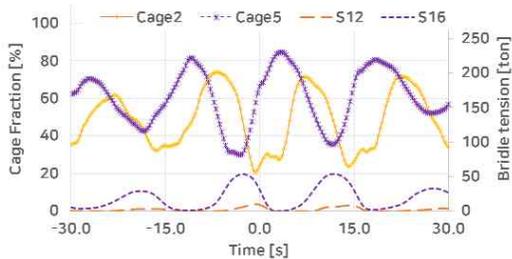


Fig. 19 Time series of remaining fraction and bridle tension

우리의 최소 용적률이 발생하는 시점에서 브리들 최대 장력이 발생하며, 우리와 평행하게 배치된 브리들의 장력이 크게 발생할수록 우리의 용적률 또한 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

6.3 해상풍력단지 공존성 평가

해상풍력단지 내에서 운영되는 공존어업설비는 풍력 터빈 및 해저 케이블 등 기존 발전설비에 영향을 미치지 않도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 기존 서남해 실증단지의 풍력 설비를 참고하여, 공존어업설비의 영향을 검토하였다.

Fig. 20은 참고된 실증단지의 설비 배치조건과 설계된 공존어업설비의 공존성을 나타낸 그림이다, 그림에

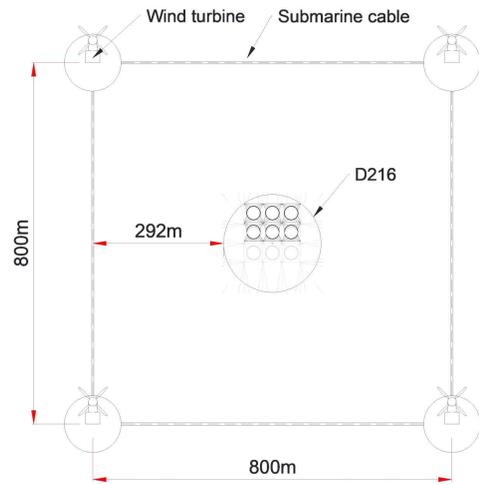


Fig. 20 Assessment of coexistence compatibility of aquaculture in the wind farm

서 나타난 바와 같이, 풍력 터빈은 약 800m 간격으로 배치되어 있으며, 각 해저 케이블은 최단 거리(직선)로 연결되어, 64ha의 해상공간이 활용 가능한 것을 알 수 있다. 본 연구의 공존 어업설비는 실증단지 내 1ha 규모로 배치되며, 수치해석에 따른 양식장의 운동범위를 고려할 때, 기존 풍력발전 설비와 공존어업설비 사이에는 약 290m 이상의 안전 거리를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 설계된 1ha 규모의 양식장은 풍력단지 내에서 독립적으로 공존가능하며, 양식설비 설치 후 선박 통행에도 문제가 없을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 해상풍력단지 내 적용을 위한 공존어업설비 기본설계안의 평가를 수행하였다. 수조 모형 실험과 수치해석 결과의 비교검증을 통해 수치해석 기반 설계기법의 타당성을 확보하였으며, 검증된 수치해석 모형을 활용하여 설비 운영을 위한 주요 인자인 계류선 및 브리들 장력과 용적률 그리고 풍력단지와의 공존성에 대해 검토하였다. 연구를 통한 주요 결과는 다음과 같다.

- 양식시설에 작용하는 환경조건의 영향 검토 결과, 파주기가 짧고 파고가 클수록 계류선 장력이 큰 경향을 보였으며, 유속이 증가함에 따라 계류선 장력

이 증가하는 경향을 나타냈다. 유속이 증가함에 따라 우리 용적률은 감소하는 경향을 나타냈으나, 용적률은 파주기보다 파고 변화의 영향이 큰 것으로 나타났다. 추후 본 시설의 확장 적용이 필요할 경우 유속, 파고 및 파주기의 영향을 고려하여 대상 해역의 환경조건에 적절한 규모와 형상을 선정하여야 할 것이다.

- 제안된 공존어업설비 기본설계안은 운영 및 극한 환경조건에서 계류선 및 브리들의 구조적 안전성을 확보할 수 있으며, 최소 80% 이상의 용적률 확보가 가능하다. 단, 브리들의 하중이 계류선 하중보다 크게 발생하므로 브리들 설계에 유의해야 한다.
- 행과 열로 배열된 양식장의 우리는 행과 열에 따라 보존할 수 있는 케이지의 용적률이 다르며, 일반적으로 환경하중이 먼저 입사하는 행의 용적률이 더 크게 나타난다. 이는 브리들의 장력과 관계가 있으며, 브리들 장력이 우리의 변형을 방지하는 효과가 있음을 알 수 있다.
- 양식장의 운동범위를 검토한 결과, 1ha 규모의 어업설비는 해상풍력단지와 간섭없이 공존할 수 있음을 확인하였다.

향후 검증된 수치 모형을 활용하여 다양한 설계 인자에 관한 추가 연구를 통해 공존어업설비의 최적화 및 경제성 평가를 수행할 예정이다. 단, 향후 연구에서는 계류 강도 평가시 불규칙 파랑에 따른 통계 불확실성을 보완하기 위해 wave seed 변화에 대한 추가적인 검토 수행이 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 신재생에너지 핵심기술 개발사업(과제번호 : 20203040020130) 및 한국전력공사의 재원으로 수행된 “해상풍력 지지구조 최적화 설계기술 개발(R22EA12)” 연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

[1] Berkenhagen, J., Döring, R., Fock, H.O., Kloppmann, M.H., Pedersen, S.A. and Schulze, T., 2010, Decision bias in marine spatial planning of offshore wind farms: problems of singular versus

cumulative assessments of economic impacts on fisheries, *Marine policy*, 34(3), pp.733-736.

- [2] Ashley, M.C., Mangi, S.C., and Rodwell, L.D., 2014, The potential of offshore windfarms to act as marine protected areas - A systematic review of current evidence, *Marine Policy*, 45, pp.301-309.
- [3] Hooper, T. and Austen, M., 2014, The co-location of offshore windfarms and decapod fisheries in the UK: Constraints and opportunities, *Marine Policy*, 43, pp.295-300.
- [4] Griffin, R., Buck, B. and Krause, G., 2015, Private incentives for the emergence of co-production of offshore wind energy and mussel aquaculture. *Aquaculture*, 436, pp.80-89.
- [5] Kang, K.S., Jeon, I.S., Kwak, J.Y., 2016, Possibilities and Orientation toward Co-existence of Offshore Wind Farms, *J. of Wind Energy, KWEA*, pp.5-13
- [6] Hooper, T., Ashley, M. and Austen, M., 2018, Capturing benefits: opportunities for the co-location of offshore energy and fisheries. In *Offshore Energy and Marine Spatial Planning*, pp.189-213.
- [7] Schupp, M.F., Kafas, A., Buck, B.H., Krause, G., Onyango, V., Stelzenmüller, V., Davies, I. and Scott, B.E., 2021, Fishing within offshore wind farms in the North Sea: Stakeholder perspectives for multi-use from Scotland and Germany. *Journal of Environmental Management*, 279, p.111762.
- [8] Stenberg, C., Christoffersen, M.O., Krog, C., Patrizio, M. and Dolmer, P., 2010, Offshore wind farms and their potential for shellfish aquaculture and restocking. *ICES CM*.
- [9] Stelzenmüller, V., Diekmann, R., Bastardie, F., Schulze, T., Berkenhagen, J., Kloppmann, M., Krause, G., Pogoda, B., Buck, B.H. and Kraus, G., 2016, Co-location of passive gear fisheries in offshore wind farms in the German EEZ of the North Sea: A first socio-economic scoping. *Journal of Environmental Management*, 183, pp.794-805.
- [10] Lengkeek, W., Dideren, K., Teunis, M., Driessen, F., Coolen, J.W.P., Bos, O.G., Vergouwen, S.A.,

- Raaijmakers, T., De Vries, M.B. and Van Koningsveld, M., 2017, Eco-friendly design of scour protection: potential enhancement of ecological functioning in offshore wind farms: Towards an implementation guide and experimental set-up (No. 17-001). Bureau Waardenburg.
- [11] Xu, Z. and Qin, H., 2020, Fluid-structure interactions of cage based aquaculture: From structures to organisms. *Ocean Engineering*, 217, p.107961.
- [12] Guo, Y.C., Mohapatra, S.C. and Soares, C.G., 2020, Review of developments in porous membranes and net-type structures for breakwaters and fish cages. *Ocean Engineering*, 200, p.107027.
- [13] Cardia, F., Ciattaglia, A. and Corner, R.A., 2017, Guidelines and Criteria on Technical and Environmental Aspects of Cage Aquaculture Site Selection in the Kingdom of Saudi Arabia.
- [14] Shuchuang Dong, Xingxing You and Fuxiang Hu., 2020, Effects of design factors on drag forces and deformations on marine aquaculture cages: A parametric study based on numerical simulations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(2), 125
- [15] Hao Chen and Erik Damgaard Christensen., 2017, Development of a numerical model for fluid-structure interaction analysis of flow through and around an aquaculture net cage, *Ocean Engineering*, pp.597-615.
- [16] Francois, M., Davies, P., 2000. Fiber rope deep water mooring: a practical model for the analysis of polyester mooring system. Rio Oil and Gas Conference, IBP24700, Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2000, pp.1-10
- [17] The application of fiber rope for offshore mooring, ABS Guidance notes, 2021
- [18] Ministry of Oceans and Fisheries, 2019, National Deep water design wave report (in Korean)
- [19] Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y., 2008, Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea. *Aquacultural Engineering*, 38(2), pp.105-116.