

석션 가물막이 보강 상판의 구조 거동에 대한 수치해석 연구

김정수

한국건설기술연구원 인프라안전연구본부

Numerical Investigation on Structural Behavior of a Lid with Stiffeners for Suction-installed Cofferdams

Jeongsoo Kim

Dept. of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 대형 해상 구조물 시공이 증가됨에 따라 석션 가물막이 또한 대형화되고 있고, 이로 인해 가물막이 상판의 휨 변형을 효과적으로 억제하기 위한 상판 보강 설계가 가물막이 설계의 핵심적인 요소가 된다. 본 연구는 석션 가물막이 상판의 보강으로 인한 구조 거동 변화를 유한요소모델을 이용해 분석하고, 효과적인 상판 보강 배치 방안 도출을 위한 통찰을 제공하고자 한다. 기존 석션 앵커를 조사하여 각형 석션 가물막이 상판의 여러 보강 유형을 결정하였으며, 각 보강 상판을 분석하였다. 보강 상판의 응력과 변형을 비교하여 구조성능을 평가하였고, 추가로 상판 가장자리의 반력 분포를 분석함으로써 보강재 배치가 상판-케이슨 벽체 연결부에 미치는 영향을 함께 조사하였다. 유한요소해석 결과로부터, 방사방향 보강재가 상판의 처짐 및 응력 감소에 크게 기여한 반면, 상판-벽체 연결부의 수평 전단력을 집중 및 증가시켜 연결부 설계에 불리하게 작용함을 확인할 수 있었다. 또한, 내/외측 환형 보강재는 자체 보강 효과가 미미하나, 부분적으로 배치된 방사 보강재와 함께 연결해 배치되면 응력 및 처짐 개선에 기여함을 알 수 있었다.

Abstract With increasing demand for large offshore infrastructures, suction cofferdams have been large, and the lid stiffener arrangement for a suction cofferdam has become a key element in cofferdam design to constrain the flexural deformation effectively. This study analyzed the changes in the structural behavior of a lid for a suction cofferdam due to lid stiffeners to provide insights into effective stiffener arrangements. By investigating conventional suction anchors, several stiffener patterns of a lid for a polygonal suction cofferdam were determined and analyzed. The structural performance of the stiffened lids was estimated by comparing the stress and deformation, and the reaction distributions on the edge of lid were investigated to analyze the effects of the stiffener arrangement on the lid-wall interface. Finite element analysis showed that radial stiffeners contribute dominantly to decreasing the stress and vertical deflection of the lids, but the stiffeners cause an increase in shear forces between the lid and wall; the forces are concentrated on the lid near the areas reinforced with radial stiffeners, which is negative to lid-wall connection design. On the other hand, inner and outer circumferential stiffeners show little reinforcement effects in themselves, while they can help reduce the stress and deformation when arranged with partial radial stiffeners simultaneously.

Keywords : Offshore Cofferdam, Suction Pressure, Suction Lid, Stiffener, FEM, Optimal Design

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발 (과제번호: 16SCIP-B119960)” 과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jeongsoo Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: jeongsookim@kict.re.kr

Received August 13, 2019

Revised September 10, 2019

Accepted October 4, 2019

Published October 31, 2019

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

국토공간의 활용이 확장됨에 따라 연육교 및 연도교와 같은 해상 교량에 대한 수요가 증가되고 있다[1]. 해상공사는 본 구조물 설치를 위한 가물막이, 작업대 등의 가설 구조물의 사용이 필연적이다. 재래식 해상 공법은 일반적으로 여러 개의 슈트파일 조립하여 폐단면을 형성하고, 폐단면 내부를 배수함으로써 본 구조물 시공을 위한 육상화 작업 공간을 확보하게 된다. 그러나 슈트파일의 항타 및 조립과정에서 공기 및 시공 비용의 증가가 야기되며, 이는 결과적으로 육지에 비해 경제성을 크게 악화시킨다[2].

석션 기초는 석션에 의한 내외부의 압력차를 이용해 기초의 관입 및 지지력을 확보하며, 최근 해상풍력 및 방파제 등의 구조물에 널리 적용되고 있다[3]. 석션 관입 시 구조물의 상판 및 벽체에 최대 100kPa 전후의 큰 압력이 작용하게 되는데, 벽체는 원주방향 압축 응력이 지배적이나 상판은 휨 응력이 지배적이 된다. 특히, 석션 구조물이 대형화 될수록 상판의 휨 거동이 전체 설계를 지배하게 되므로, 상판의 보강이 구조설계에 대해 핵심적 요소가 된다. 특히, 보강으로 인해 국부적인 응력 증가와 제작 및 설치 중에 예상치 못한 추가적인 문제를 야기할 수 있으므로[4], 보강으로 인한 구조 거동 특성 변화에 대한 분석이 필요하다.

석션 구조물에 대한 기존 연구는 대부분 앵커 및 말뚝 구조물에 대한 것으로 지반공학적 측면에서 주로 수행되어 왔다. 석션에 의한 관입성 및 구조물의 지지력 평가에 대한 실험 및 수치해석 연구가 다수였으나[5-8], 근래에 관입 후 인발력을 평가한 연구[9-10], 석션에 의한 침투수압 및 파이핑 평가에 대한 연구도 이루어지고 있다[11-12]. 그러나 석션 구조체의 구조적 거동 특성 분석에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다. 일반 가물막이의 구조 해석 연구가 다수 존재하나[13-16], 석션앵커에 대한 좌굴 성능 평가[17], 해양하중 특성을 반영한 석션 이중 가물막이 벽체의 구조거동 평가[18]에 대한 연구로 국한된다. 특히 석션 상판의 거동 특성을 분석하거나 최적 설계를 다룬 연구는 전무하며, 상판과 벽체 연결부에서의 복잡한 거동 특성이 다뤄지지 않았다. 이는 그동안 석션 구조체가 앵커 및 말뚝으로 활용되어 상판과 벽체가 일체화 제작되었기 때문이다.

최근 제안된 석션 관입되는 일체형 가물막이[2, 18]는 재래식 가물막이와 달리 조립과정이 필요 없고, 석션에

의해 신속한 설치가 가능하다. 석션 가물막이는 상/하부 모듈로 구분되며, 각각은 육상화 작업 공간과 지지력을 확보 역할을 한다. 석션 가물막이의 시공은 Fig. 1과 같은데, 하부모듈의 상판은 석션압 재하 시에만 결합되므로, 결합과 분해가 가능해야 하며, 넓은 면적에 대해 큰 압력을 견뎌낼 수 있어야 한다. 일반적인 가물막이의 단면 형상은 원형 또는 각형이며, 원형 가물막이가 구조적으로 유리하다. 그러나 가물막이가 대형화됨에 따라 1) 두께 증가로 제작 시 곡률 확보가 어려우며 비용 증가를 야기한다. 또한 2) 운송 및 보관에도 어려움이 있다.

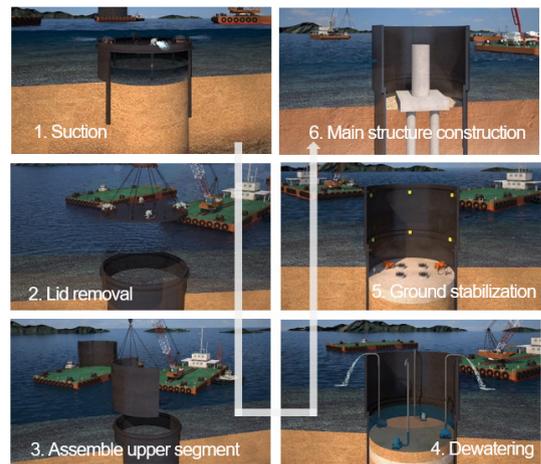


Fig. 1. Construction process of suction-installed cofferdam [18]

1.2 연구범위 및 방법

본 연구는 석션 관입되는 일체형 가물막이의 탈착형 상판의 구조거동 분석과 설계 개념을 제시하고자 한다.

원형 상판에 대한 몇 가지 보강 시나리오를 설정하고, 각 보강 상세에 따른 상판의 구조적 거동 변화를 수치해석적으로 분석하였다. 기존 석션 앵커 및 말뚝의 일반적인 상판 보강 형상을 참고하여, 석션 가물막이 상판의 보강안을 결정하고, 보강 상세 차이로 인한 구조거동 변화를 조사하였다. 또한 상판 가장자리의 수평 및 수직 반력 분포를 분석함으로써 상판-벽체 연결부에 작용되는 전단력을 평가하였다.

2. 석션 가물막이의 보강 상판

2.1 석션 앵커 상판의 보강 형상 고찰

석션 앵커 상판은 최대 석션압, 앵커 직경, 그리고 제작 및 설치 비용 등을 고려해 다양한 형태로 제작된다. 앵커는 상판과 벽체가 일체화 거동하므로 상판의 변형을 최소화하면서도 구조적 안전성을 확보할 수 있는 보강 설계되며, 방사 및 원주방향으로 보강이 이루어진다. 형상에 따라 평면 무보강, 곡면 무보강, 보강 상판으로 구분할 수 있으며 각각의 특징은 다음과 같다.

평면 무보강 상판은 직경이 작고, 판입 중 석션압이 작은 경우에 적합하다. 단순한 형상으로 설계 및 제작이 용이하나, 직경이 증가됨에 따라 상판의 두께가 기하급수적으로 늘어나야 한다. Eq. (1)은 단순 지지된 원형 판체에 대한 수직처짐에 대한 탄성해로[19], 설계 직경이 늘어남에 따라 과도한 처짐이 야기됨을 알 수 있다.

$$w = \frac{3q(R^2 - r^2)(1 - \nu^2)}{16Et^3} \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} R^2 - r^2 \right) \quad (1)$$

Where, q denotes uniformly distributed load on the plate, R denotes radius of a circular plate, r denotes distance from the center of a circular plate, E denotes elastic modulus, ν denotes elastic modulus, t denotes plate thickness.

상판의 내력 모멘트 및 응력은 처짐의 r 에 대한 2차 미분에 비례하므로, 상판과 연결된 벽체는 상판의 영향을 받는다. 결과적으로 상판의 과도한 변형은 상판 자체의 손상뿐만 아니라 벽체의 구조 안전성과 직접 관련이 있다.

곡면 무보강 상판은 비교적 직경이 크고 판입 중 석션압이 큰 경우에 적용된다. 곡면 형상으로 인해 휨 저항뿐만 아니라 압축력으로 석션압에 지지하므로, 구조적으로

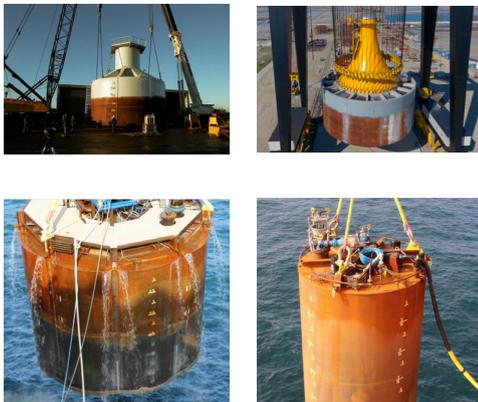


Fig. 2. Conventional lid with stiffeners for suction anchor [20-22]

유리하다. 그러나 상판 두께가 증가됨에 따라 제작 난이도 및 비용이 상승하게 되며, 적용 가능 곡률이 제약된다.

보강 상판은 평면 상판 상/하면에 방사 및 원주방향으로 보강재를 용접 제작하며, 설계 직경 및 석션압 증가에 대해 용이하게 대응할 수 있다. 보강재 배치는 정형화되지 않으나, 직경 및 석션압에 따라 두꺼운 방사형 보강재만 설치하거나 내부 또는 가장자리에 환형 보강재를 추가한다(Fig. 2).

2.2 석션 가물막이의 상판 보강 시나리오

기존 석션 앵커 상판의 여러 보강 형상을 바탕으로 (Fig. 2), 석션 가물막이 상판에 대한 8가지 보강 시나리오를 설정하였다. 앵커 상판과 달리 탈착형 상판이며 8각 단면을 가정하였고, 편의를 위해 상판 보강 시나리오는 Table 1과 같이 명명하였다.

상판 자체의 석션압 저항 능력을 평가하기 위해 Fig. 3의 A와 같은 무보강 상판 조건을 설정하였다. 또한, 방사 보강재와 환형 보강재에 의한 구조성능 개선을 분석하기 위해 B, C, D, 상판 보강 형상을 포함하였으며, 보강재의 복합적인 영향을 평가하기 위해 E, F, G, H에 대한 조건을 추가하였다.

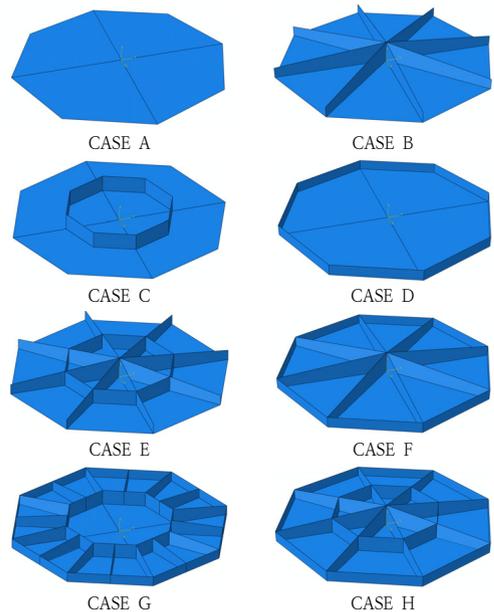


Fig. 3. Shape of lid with stiffeners

Table 1. Scenarios for Suction lid with stiffeners

CASE	Component
A	Lid
B	Lid + Radial stiffener (long)
C	Lid + Circumferential stiffener (inner)
D	Lid + Circumferential stiffener (outer)
E	Lid + Radial stiffener (long) + Circumferential stiffener (inner)
F	Lid + Radial stiffener (long) + Circumferential stiffener (outer)
G	Lid + Radial stiffener (short) + Circumferential stiffener (inner, outer)
H	Lid + Radial stiffener (long) + Circumferential stiffeners (inner, outer)

3. 석션 상판 구조해석

3.1 상판 해석 모델

석션 가물막이 상판에 대한 구조해석을 수행하기 위해 가물막이 벽체 강성이 충분히 크고, 벽체-상판 볼트 결합에 의해 수평 및 수직력만 전달된다 가정하였다. 이들 가정을 통해 상판에 대한 구조해석은 단순 지지된 평판에 대한 문제로 단순화시킬 수 있다.

상판은 외경 10.0m의 8각 단면(두께: 30mm)을 가정하였으며, 상판과 보강재에 대한 상세 제원은 Table 2와 같다. 상판의 강종은 SM490이며 재료적 비선형 거동을 재현할 수 있도록, von Mises 항복기준을 적용하였다. 강재의 탄소성 거동을 구현하기 위해 탄성계수 및 포아송 비는 각각 200 GPa, 0.3을 적용하였으며, 소성변형에 대한 물성은 Table 3에 나타내었다. 여기서 σ_{y0} 는 초기 항복강도, σ_u 는 극한강도, ϵ_{y0} 는 초기 항복 시 변형률, ϵ_u 는 극한 변형률이다. 또한 두께가 직경에 비해 얇으므로, 기하학적 비선형 거동을 반영하였다. SM490 강재 해석모델의 상판 가장자리에 수평, 수직 방향에 대한 변위를 완전 구속하였고, 상판에 중력가속도 9.81m/s^2 과 석션압 100kPa 을 순차적으로 적용하였다. 구조해석을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS ver.6.14를 사용하였다. 해석 격자망의 크기는 약 0.1m으로 모든 상판해석에 대해 적용되었다.

Table 2. Specification of lid and stiffeners

Component	Diameter or Width (m)	Avg. Height (cm)	Thickness (mm)	Weight (tonf)
Lid	10	-	30	16.65
Radial stiffener (long, 1EA)	5	75	20	0.59
Radial stiffener (short, 1EA)	2.3	62.5	20	0.22
Circumferential stiffener (inner)	5	75	20	1.85
Circumferential stiffener (outer)	10	50	20	2.47

Table 3. Material input parameters for von Mises plasticity

	σ_{y0} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_{y0}	ϵ_u
Value	340	490	0.0017	0.01

3.2 상판 보강재 보강 효과 분석

3.2.1 무보강 상판 거동 분석

무보강 상판 가장자리의 모서리에서 응력집중이 발생하였다 (CASE A). 응력집중으로 인한 소성변형이 점차 확대 되었으나, 모서리를 중심으로 15cm 이내로 국한되었다 (Fig. 4). 자중으로 인한 최대응력은 98.8MPa이고, 석션압 재하 후 최대응력은 350MPa이다. 한편, 상판의 수직 변위는 각각 3.5cm, 13.4cm로 직경의 1/100 수준까지 발생하였다. AISC 규정과 AASHTO 시방서가 교량의 활하중 및 충격하중에 대한 시간 대비 처짐량을 각각 1/360과 1/800 이내로 규정[23]하고 있다는 점을 고려할 때 과대 처짐으로 평가할 수 있으며, 보강을 통한 처짐 및 응력 감소가 필요하다.

참고로 기하학적 비선형성이 배제된 동일한 해석에서, 자중만 적용한 상판의 최대응력 및 처짐은 각각 273MPa, 10cm에 달하며 석션압까지 적용하면 상판 전체가 완전 항복에 이르게 된다. 이는 과다하고 비현실적인 해석 결과로 기하학적 비선형성을 해석에 고려하는 것이 필요함을 보여준다. 자중 및 석션압을 받는 무보강 상판은 기하학적 비선형성이 고려될 때, 인장 강화 (tension stiffening) 효과[24]에 의해 미소변형 해석결과 대비 수직변위 및 응력이 상당히 억제된다.

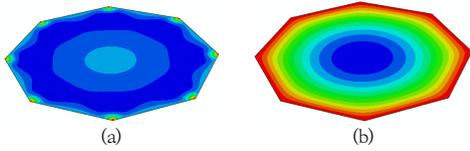


Fig. 4. Stress and displacement of octagonal plate (CASE A)
(a) Von Mises stress (b) Vertical displacement

3.2.2 기본 보강 상판 거동 분석

방사 방향 보강재를 추가한 상판(CASE B)의 거동을 조사하였다. 무보강 상판과 달리, 상판 가장자리 모서리에 인접한 방사 보강재에서 최대응력 (301MPa)이 발생하였다(Fig. 5a). 상판의 최대응력은 252MPa이었으며, 상판 외접경의 1/4, 3/4 지점에서도 218MPa의 응력 증가가 발생하였다(Fig. 5b). 한편 최대 수직처짐은 방사보강재의 지지효과로 상판 가장자리 부근(외접경 1/4, 3/4 지점, Fig. 6a)에서 25mm가 발생하였다.

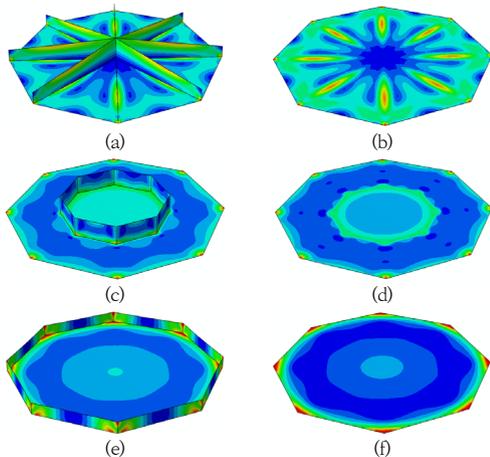


Fig. 5. Stress distribution of CASES B-D
(a) CASE B (all components) (b) CASE B (plate only)
(c) CASE C (all components) (d) CASE C (plate only)
(e) CASE D (all components) (f) CASE D (plate only)

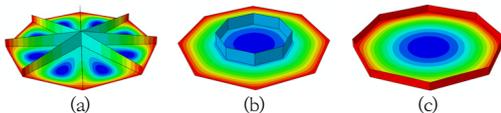


Fig. 6. Vertical displacement distribution of CASES B-D
(a) CASE B (b) CASE C (c) CASE D

원주방향 보강재의 보강효과 (CASES C and D) 또한 조사되었다. 해석결과는 환형 보강재 자체에 의한 상판의 보강 효과가 거의 발생하지 않음을 보여준다. 내/외측 원주방향 보강재를 추가하였으나 보강재 설치에 따른 변위 억제로 모서리와 같은 특이점에서 오히려 응력이 증가하였고, 최대응력은 모두 상판 모서리에서 발생되었다 (C: 351MPa, D: 344MPa, Figs. 5c and 5e). 추가적으로 내측 원주방향 보강재는 보강 지점에서 상판의 국부적인 응력증가를 야기하였고 (332MPa), 외측 원주방향 보강재는 보강재 자체가 항복되었다 (344MPa). 최대 수직처짐 또한 무보강 상판에 비해 미미하게 감소하거나 (D/100 이내) 거의 변화가 없었다 (Figs. 6b and 6c). 무보강 및 기본 보강 상판에 대한 주요 결과값을 정리하여 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Maximum stress and vertical displacement of plates with fundamental radial and circumferential stiffeners

CASE	Stress (MPa)		Vertical displacement (mm)
	Plate	Stiffener	
A	350.8	-	133.7
B	252.0	301.3	25.4
C	351.3	330.3	127.9
D	343.7	343.8	133.3

3.3 상판-벽체 수평 전단력 분석

상판의 변형이 증대됨에 따라 석션압 및 자중에 의한 수직력은 수평력으로 분산된다. 상판 내력이 볼트 연결 등에 의해 가물막이 벽체로 전달되므로, 상판의 변형은 가물막이 벽체에 작용하는 수평력을 증가시키며 이는 결과적으로 가물막이 벽체의 두께 증가를 요구하게 된다. 이러한 이유로 해석모델의 상판 가장자리에서의 수평 및 수직 반력 변화를 분석하였다. 해석모델이 축대칭이므로, 해석결과는 전 구간(360°) 대신 90°구간에 대해서만 나타내었다(Fig. 7).

참고로 반력분포는 상판의 완전 구속을 가정하였으므로, 실제 볼트 연결되는 상판-가물막이 벽체 연결부 작용하중을 과대평가하며, 이를 이용한 연결부 설계 결과는 안전측이 된다.

무보강 상판에 대해, 수평반력은 모서리에서 50kN으로 최소였고, 모서리 사이에서 472kN으로 최대가 되었다(Fig. 7). 반면, 수직반력은 모서리에서 최대가 되었다 (147kN). 이와 같은 반력 분포 특성은 상판 자체 형상,

변형, 그리고 경계조건에 기인한다. 석션압 및 자중에 의해 수직 방향으로 비교적 큰 처짐이 발생함에 따라 상판 가장자리의 모서리는 수직방향으로 벌어지려 한다. 반면, 모서리 사이 영역은 상판 중심을 향해 수평방향으로 움직이려 한다. 그러나 가장자리가 경계조건에 의해 완전히 구속되므로, Fig. 7와 같은 반력 분포 양상이 나타나게 된다. 추가적으로, 상판 형상으로 인해 모서리는 특이점(singularity)이 되고 모서리의 반력 집중을 강화시킨다.

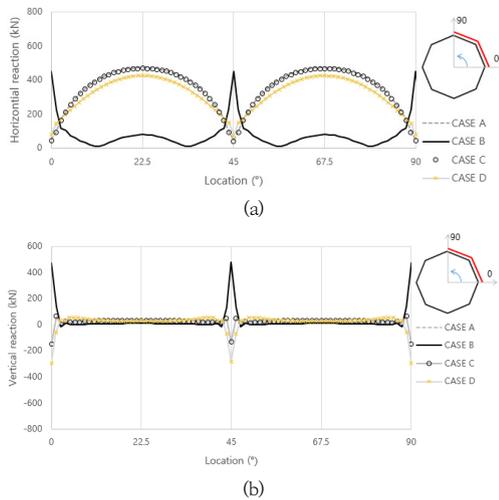


Fig. 7. Comparison of reaction distribution on the edge of fundamental stiffened plate
(a) Radial reaction (b) Vertical reaction

Table 5. Maximum reaction forces on the edge

CASE	Maximum reaction (kN)	
	Radial direction	Vertical direction
A	472.8	-147.2
B	449.8	477.6
C	467.7	-149.5
D	425.7	-295.1

방사 및 환형 보강재 추가로 인한 상판 가장자리에서의 반력 분포를 비교 분석하였다. 먼저 방사 보강재로 인해 수평 및 수직반력의 분포 경향이 반전되었으며, 모서리에서의 수직/수평 반력이 급격하게 증가되었다. 이는 방사 보강재에 인접한 상판 영역에서 강성이 증가됨에 따라 이 영역으로 반력이 재분배 되었기 때문으로 분석된다. 반력분포의 비교를 통해 CASE B의 응력 및 처짐 감소는 방사 보강재에 의해 수직외력(석션압, 중력)이 수

평력으로 전이된 것에 기인하였음을 알 수 있다. CASE C의 수직 및 수평반력 크기 변화는 무보강 상판과 거의 유사하며, 미미한 수평반력 변화만 관찰되었다. CASE D도 상판 및 보강재의 응력 저감 효과는 미미하였으나, 외측 환형 보강이 수평반력을 감소시키고, 수직반력을 분산시키는 효과가 있음을 보여주었다.

상판의 응력 및 처짐 개선 측면에서 환형 보강재의 역할은 미미하였다. 그러나 환형 보강재는 상판-벽체 연결부에 작용하는 수평 전달력을 감소 및 분배시킴으로써, 연결부 안전성을 제고하고 벽체 휨 변형을 감소시키는데 기여하였다. 따라서 상판 및 보강재의 응력 및 처짐을 억제하고, 연결부와 벽체의 구조적 안전성을 개선할 수 있는 효과적인 보강재 배치안이 마련될 필요가 있다.

4. 복합 보강 상판 거동 분석

기본 보강 상판의 거동 변화 분석을 통해 상판 자체의 성능 개선뿐만 아니라, 상판-벽체 연결부 간 전달력을 효과적으로 감소 및 분배시킬 수 있도록 방사 및 환형 보강재 배치가 최적화 될 필요가 있음을 확인하였다. 본 장에서는 기존 석션앵커 기초의 보강 형상을 토대로 CASE E~H 보강 시나리오에 대한 상판의 거동 변화와 반력 분포를 종합적으로 조사함으로써, 석션 가물막이 벽체를 위한 각형 상판의 최적 형상을 도출하고자 하였다.

4.1 방사 및 내측 환형보강 (CASE E)

8각형 상판 모서리를 관통하도록 방사 보강재를 배치하고 외접경 10m를 갖는 8각형의 환형 보강된 상판에 대한 구조해석을 수행하였다. 최대 응력은 환형 보강재만 사용한 CASE B와 같이 상판 가장자리 모서리에서 방사 보강재 하단에서 발생하였고 (319MPa) 응력 분포가 유사하였다(Fig. 8). 그러나 환형 보강재의 설치로 인해 상판 중앙의 수직처짐이 크게 감소하였고(15mm), 최대 처짐도 상판 외측으로 이동하였다(21mm). CASE B와 같은 연결 상태에서, 내측 환형 보강재의 구조적인 역할은 미미하였다.

환형 보강재 설치로 인해 상판 가장자리의 수직 및 수평반력 분포 경향은 CASE B와 동일하였으나, 최대값은 증가하였다 (Fig. 9). 이는 환형 보강재가 변위를 억제하며 발생된 추가적인 수직 및 수평 저항력이 상판으로 전달되었기 때문으로 분석된다. 최대 수평 및 수직반력은 각각 472kN, 509kN이다.

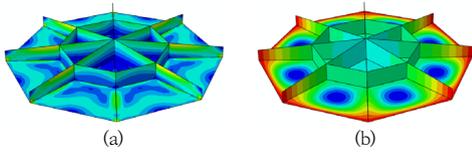


Fig. 8. Stress and displacement of stiffened plate (CASE E)
(a) Von Mises stress (b) Vertical displacement

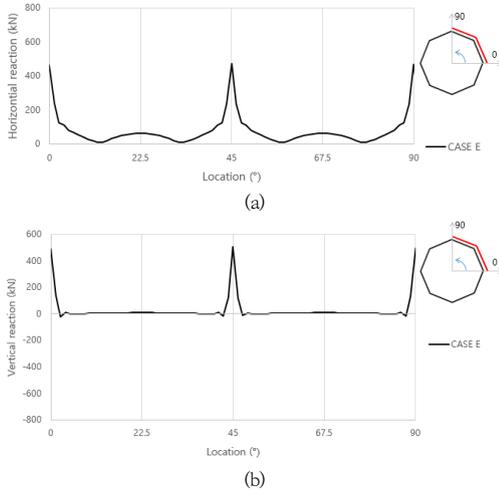


Fig. 9. Reaction distribution on the edge (CASE E)
(a) Radial reaction (b) Vertical reaction

4.2 방사 및 외측 환형보강 (CASE F)

해석결과는 외측 환형 보강재가 방사 보강재의 유기적으로 연결될 때 내측 보강보다 효과적으로 상판 성능을 개선할 수 있음을 보여준다. CASE E와 유사한 상판의 최대 변형 및 응력이 관찰되었으나, 수평 및 수직 반력이 크게 감소되었다.

방사 보강된 상판 외측에 환형 보강재를 추가한 경우 기존 기본 보강 때와 상이한 응력분포가 나타났다 (Fig. 10). 최대응력은 외측 환형 보강재의 모서리 상단에서 발생하였다(325MPa). 상판의 최대응력은 221MPa로 기존 보강 상판과 달리 가장자리의 모서리에서 발생되지 않고 상판의 1/4 및 3/4지점(방사보강재 인접)에서 발생하였다. 최대처짐 위치는 상판의 최대 응력 발생지점에서 21.6mm로 발생하였으나, 상판 중앙에서의 처짐은 12.9mm로 감소하였다.

상판 가장자리의 수평반력 분포 경향은 CASE B 및 E와 같았으나, 외측 환형 보강재 설치로 인해 수직반력 분포는 기존 보강 상판과 상이하였다 (Fig. 11). 만약 외측

보강재의 강성이 더 증가하게 되면, 수평반력 분포는 더 균등해질 것으로 판단된다. 수평반력의 최대값은 277kN로 감소하였으며, 수직반력 최대값 또한 434kN으로 감소하였다. 기존 해석결과(CASE B, D, E)와 비교해 볼 때 외측 환형 보강재는 모서리의 반력 방향을 전환시킨다. 즉, 방사 보강재만 설치되면 상판 가장자리의 모서리가 지지점이 되나, 환형 보강재가 추가되면 모서리 사이 영역이 지지점이 되면서 상판에 작용하는 수직력이 모서리에 집중되는 것을 방지하였다.

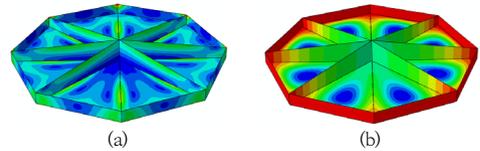


Fig. 10. Stress and displacement of stiffened plate (CASE F)
(a) Von Mises stress (b) Vertical displacement

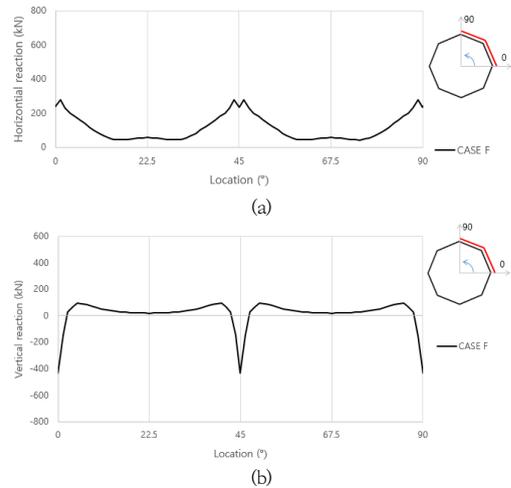


Fig. 11. Reaction distribution on the edge (CASE F)
(a) Radial reaction (b) Vertical reaction

4.3 외측 방사 및 내/외측 환형보강 (CASE G)

내/외측 환형 보강재와 방사 보강재의 유기적 연결에 따른 효과를 분석하기 위해 CASE G와 같은 보강 상판에 대한 해석을 수행하였다. CASE G 형상은 해상풍력의 석션 기초 형상과 유사하다. 환형 보강재와 방사보강재 연결에 의한 효과를 확인하기 위해 방사보강재는 상판 중심까지 이어지지 않고, 방사 보강재 개수만 총 16개로 추가되었다.

최대응력은 방사 보강재를 지지하는 외측 환형 보강재의 모서리 상단에서 발생되었고(324MPa), 최대 수직처짐은 상판 중앙에서 62.7mm로 발생하였다 (Fig. 12). 방사 보강재가 상판 중심을 관통하도록 연결되지 않았기 때문에, 내측 보강재 안쪽 5m 구간에 대해 상판 변형을 억제할 요소가 없다. 그 결과, 상판 중심에서 상대적으로 큰 처짐이 발생한 것으로 분석된다. 단, 상판 외직경 대비 처짐비는 0.006으로 AASHITON나 ASIC 사용성 기준에 비해 상당히 작다. 한편 내측 환형 보강재는 외측 보강재와 달리 모서리 사이에서 응력집중이 발생하였다 (234MPa). 이는 상판 처짐에 대해 1차적으로 외측 보강재가 저항하면서 상판 중심방향으로 수축하고, 이후 방사 보강재가 외측 보강재의 변형을 억제하면서 발생한 내력이 내측 보강재로 전달됨으로써 나타난 응력 분포로 분석된다.

한편 모서리와 모서리 사이에 추가된 방사 보강재는 구조적인 역할이 미미하였다. 상판 모서리를 관통하는 방사보강재는 내/외측 환형 보강재와 인접하는 영역에서 평균 100MPa 정도의 응력이 발생되었으나(최대 응력: 189MPa), 모서리 사이에 위치한 방사 보강재의 응력은 평균 30MPa 이내로 평가되었다. 이와 같은 결과는 상판 및 환형 보강재의 형상에 기인한 것으로 판단되며, 다음과 같이 저항 거동을 설명할 수 있다. 환형 보강재는 기본적으로 부재 축력을 통해 구조물의 변형을 억제하는데, 각형이므로 모서리에서 부재 간 방향 차이로 인해 전단력이 발생된다. 일반적으로 동일 단면에서 대개 전단 및 휨 강성이 축 강성에 비해 작으므로, 모서리에서의 불평형력은 환형 보강재 대신 방사보강재로 전달된다. 환형 보강재의 모서리와 모서리 사이는 전단력 발생이 미미하므로, 해당 위치의 방사보강재로 전달되는 하중이 작고 이로 인해 부재 발생 응력이 적은 것으로 판단된다.

한편 수평 및 수직 반력은 상판 모서리를 중심으로 집중되는 경향을 보였다(Fig. 13). 수평 반력은 모서리에 인접한 양 지점에서 최대값이 발생하였고, 모서리에서는 오히려 값이 감소하였다. 또한 수직 및 수평 반력의 최대값이 기대와 달리 다소 증가하였다. 수평 반력의 최대 크기는 기본 보강 상판(B, C, D)에 비해 감소하였으나, CASE F에 비해 증가하였다. 최대 수직 및 수평반력이 증가(각각 733kN, 374kN)하므로, 각형 상판에 대해서는 구조적 이점이 적다고 판단된다. 반력의 증가 원인은 방사 보강재가 환형 보강재에 의해 간접적으로만 연결되어 CASE B와 같은 외력 전이가 충분히 이루어지지 못해 방사 보강재의 저항 효과가 감소하였고, 모서리 사이에 배

치된 방사 보강재 또한 구조적 역할이 미미했기 때문에 사료된다.

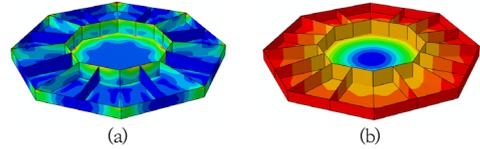


Fig. 12. Stress and displacement of stiffened plate (CASE G)
(a) Von Mises stress (b) Vertical displacement

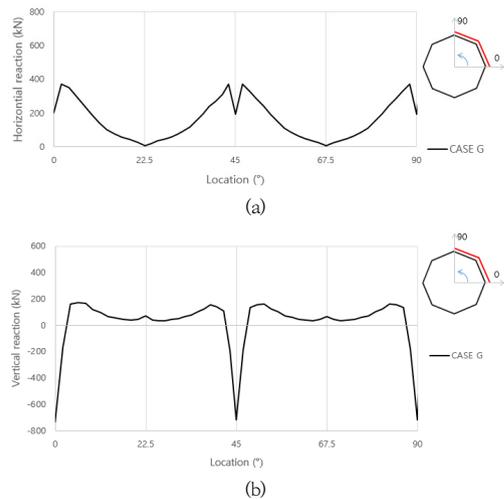


Fig. 13. Reaction distribution on the edge (CASE G)
(a) Radial reaction (b) Vertical reaction

4.4 방사 및 내/외측 환형보강 (CASE H)

CASE F와 G의 해석결과를 통해 방사보강재 간의 연결과 환형 및 방사 보강재의 연결이 상판의 구조성능 개선에 주요한 인자임을 확인하였다. 이를 바탕으로 CASE H와 같은 보강 상판을 고안해 거동을 분석하였다. 방사 보강재는 모두 모서리를 관통하며, 각각은 내/외측 보강재에 의해 연결된다.

최대응력은 CASE G와 같이 외측 환형 보강재의 모서리에서 발생되며 (285MPa), 최대처짐은 CASE F와 마찬가지로 상판 외측에서 18mm 크기로 발생하였다. 참고로 상판 중심에서 처짐은 11mm이다.

보강재 간 유기적인 연결을 통해 상판과 보강재 모두 다른 보강 상판에 비해 작은 최대 응력이 발생됨을 확인할 수 있다 (Fig. 14). 상판의 최대응력은 방사보강재 하단과 인접하여 192MPa로 외직경의 1/4, 3/4위치에서

발생하였다. 내측 환형 보강재의 최대 응력은 모서리, 모서리 사이에서 각각 최대로 발생하였으며 (113MPa), 방사보강재 또한 내측 보강재와 연결된 위치에서 177MPa가 발생하였다.

수직 및 수평반력 분포를 Fig. 15에 나타내었다. CASE F에 내측 보강재가 추가됨에 따라 방사보강재의 수직 외력의 수평력 전이 효과가 강화되었고, 그 결과 CASE F 대비 최대 수직반력이 감소하고, 최대 수평 반력은 증가하였다.

4.5 복합 보강상판 구조적 성능 평가

본 절은 복합 보강 상판(CASE E~H)의 응력, 처짐, 그리고 수직/수평 반력의 최대값을 Tables 6 and 7에 정리하고, 각 보강재 적용에 따른 상판 거동 변화 특성을 종합적으로 분석하였다.

방사 보강재는 수직 처짐 및 상판 자체 응력 감소에 탁월한 효과를 보이나 외력 저항을 방사 보강재를 통해 상판 특이점(모서리 등)으로 집중시키고 상판-벽체 연결부의 수평 전달력을 증가시킨다. 각형 상판은 모서리에 수직력이 집중되고 모서리 사이에서 수평력이 증가되는 경향이 있는데, 방사보강재는 이를 더 강화하여 상판 특이점의 구조적 취약성을 증가시킨다. 또한 CASE F, G, H의 해석결과를 통해, 상판 중앙의 처짐을 최대로 억제하는 방사 보강상판이 연결부 전달력을 가장 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편 외측 환형 보강재는 자체 보강 효과는 미미하나, 방사보강재와 연결 시 특이점의 응력집중을 완화 및 분산하고, 가장자리 연결부의 전달력 분포 경향을 전환시키는 효과를 가지고 있다. 내측 환형 보강재는 자체 보강효과가 미미하고 방사보강재와 연결 시에도 보강 효과가 작으나, 해상 풍력 기초와 같이 방사보강재가 상판 중심을 관통하지 않는 경우 (CASE G), 소요의 응력 및 처짐 제한을 극복하기 위해 보강재로써 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

단순히 두께를 증가시켜 무보강 상판의 소요 구조성능을 확보하는 방안은 매우 비경제적이다. 또한 상판-벽체 연결부의 수밀성 확보를 위해 상판 변형이 최소로 억제되는 것이 필요하다. 본 연구의 외접경 10m 팔각 상판에 대해 강재 사용량을 분석해보면, 방사보강재만 추가한 경우(CASE B, 처짐: 25mm) 25%의 강재가 추가되지만 단순 두께 증가 시 500%가 추가되어야 한다 (CASE A, 두께: 180mm, 처짐: 26mm). 따라서 석션 상판 설계 시 방사 보강재 사용은 불가피하며, 상판-벽체 전달력을 고

려해 환형 보강재의 추가적인 활용이 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Maximum stress and vertical displacement (CASE E~H)

CASE	Stress (MPa)		Vertical displacement (mm)
	Plate	Stiffener	
E	245.0	319.3	21.4
F	221.0	325.0	21.6
G	296.0	324.8	62.7
H	192.0	285.4	18.4

Table 7. Maximum reaction (CASE E~H)

CASE	Maximum reaction (kN)	
	Radial direction	Vertical direction
E	472.08	508.50
F	227.47	-434.17
G	373.87	-733.44
H	358.22	-385.33

5. 결론

본 연구는 자중 및 석션압을 받는 각형 상판의 여러 보강 상세에 대한 상판의 구조거동 변화를 분석하였다. 방사 및 환형 방향 보강재를 기본 보강 방안으로 설정하여 각 보강재 설치에 따른 응력 및 변위를 조사하였으며, 이들 기본 보강재를 조합해 상판의 구조성능을 개선하기 위한 여러 보강 상판의 거동을 분석하였다. 추가적으로 반력 분포 분석을 통해 상판-벽체 연결부의 전달력 변화 경향을 분석함으로써 가물막이 벽체의 경제적 설계를 위한 상판 설계의 중요성을 보였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

I. 방사방향 보강이 석션 가물막이 상판의 구조성능 개선에 가장 크게 기여하였으며, 상판에 작용하는 수직방향 외력을 수평방향으로 전이시키는 역할을 하였다. 방사 보강재의 구조적 역할이 최대가 되기 위해 상판 중심을 통과하도록 방사 보강재를 배치해야 한다.

II. 개별적으로 상판에 보강된 환형 부재는 상판의 구조 성능 개선에 미치는 영향이 미미하였고 (CASE C, D), 방사보강재와 함께 배치된 경우(CASE E, F)에도 구조적 역할을 확인할 수 없었다. 그러나 내/외측 환형 보강재가 부분적으로 설치된 방사 보강재(CASE G)와 함께 배치된

경우, 상판의 응력 및 처짐 감소에 크게 기여하였다. 특히, 외측 환형 보강은 상판의 응력 및 처짐 감소뿐만 아니라 방사 보강재에 의해 증가된 수평 반력을 상당히 감소시켰다.

Ⅲ. 방사보강 상판은 수직 및 수평 반력 모두 모서리에 집중되어 벽체에 전달된다. 반면, 무보강 상판 및 환형 보강 상판에 의해 벽체에 전달되는 수직 및 수평 반력은 각각 모서리와 변 중앙(모서리 사이)에서 최대가 된다. 특히, 외측 환형 보강재는 수평 반력을 감소시키는 효과를 갖는다.

Ⅳ. 상판의 응력, 처짐, 그리고 수평반력 저감을 위한 효과적인 보강 방안은 방사 및 외측 환형 보강재조합으로 판단된다. 방사 보강재는 상판 자체의 처짐 및 응력을 감소시키나 상판 가장자리에서의 수평력을 증가시켜 벽체 설계 관점에서는 불리하게 작용한다. 반면 외측 환형 보강재 상판 가장자리의 수평력 감소에 기여하나 수직력을 증가시키므로, 방사 보강재와 환형 보강재의 상대적인 두께 조절을 통해 상판 변형을 억제하면서도 벽체에 작용력을 최소화할 수 있다.

Ⅴ. 응력 및 변위 억제 측면에서 외측에 비해 내측 환형 보강재의 효과는 외측 보강재와 유사하지만, 벽체 전달력 관점에서는 불리하다. 그러나 상판 직경이 증가됨에 따라 방사 보강재를 통한 수직 외력의 하중 전이로 인해 방사 보강재에 과도한 압축력이 예상되므로, 좌굴 방지를 위해 내측 환형 보강이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] H. S. Jang, Y. I. Jang., Y. S. Choi, "Case Study on Foundation Design of Over-water Bridge", *Technical Magazine of Yooshin*, vol.12, no.22, pp.288-297, 2012. (In Korean)
- [2] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), "Final Report of Research Project on Large Circular Cofferdam Construction for Offshore Bridge Foundation", No.14RDPP-C090994-01, Planning Report, KAIA (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement), Korea, pp.3-7. (In Korean)
- [3] S. H. Han, W. S. Park, I. S. Jang, Y. K. Cho, "Application of Suction Pile for Marine and Harbor Structures", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, vol.16, no.6, pp.20-25, 2004. (In Korean)
- [4] T. I. Tjelta, "Suction Piles: Their Position and Application Today", *Proceedings of 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, The International Society of Offshore and Polar Engineers, Norway, pp.1-6, June 2001.
- [5] Y. S. Kim, I. S. Jang, "Analysis of Load Capacity and Deformation Behavior of Suction Pile Installed in Sand", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol.27, no.11, pp.27-37, 2011. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2011.27.11.027>
- [6] S. Kim, Y. W. Choo, D. S. Kim, H. G. Sung, "Capacity of Horizontally Loaded Suction Anchor Installed in Silty Sand", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol.27, no.1, pp.59-66, 2013. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2013.27.1.059>
- [7] K. Kim, O. Kwon, M. Oh, I. Jang, "Investigation on the Penetration Resistance of Suction Bucket Foundation in Sand Using Model Test", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol.15, no.6, pp.75-83, 2014. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.14481/jkges.2014.15.6.75>
- [8] D. J. Kim, J. U. Youn, K. Y. Lee, S. H. Jee, Y. W. Choo, "Jacking Penetration Resistance of Bucket Foundations in Silty Sand Using Centrifuge Modelling", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol.31, no.1, pp.25-35, 2015. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.1.25>
- [9] S. Kim, W. Y. Choo, O. Kwon, D. S. Kim, "Numerical Analysis of Group Suction Anchor of Parallel Arrangement Installed in Sand Subjected to Pullout Load", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol.30, no.11, pp.61-69, 2014. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2014.30.11.61>
- [10] S. H. Na, I. S. Jang, O. Kwon, S. H. Lee, "Study on Pullout Behavior of Embedded Suction Anchors in Sand Using ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Technique", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol.34, no.1, pp.167-173, 2014. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.1.0167>
- [11] V. Ssenyondo, T. V. An, S. R. Kim, "Numerical Investigation on Seepage Stability of Cut-off Walls", *Proceeding of the KSCE Conference, Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Korea, pp.1556-1557, 2017.
- [12] J. Kim, Y. J. Jeong, M. S. Park, "Estimation on External Forces Applied to Suction Caisson Using Seepage Analysis", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol.39, no.2, pp.317-325, 2018. (In Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.2.0317>
- [13] M. Rossow, E. Demsky, R. Mosher, *Theoretical Manual for Design of Cellular Sheet Pile Structures (Cofferdams and Retaining Structures)*, No. WES/TR/ITL-87-5, Army Engineer Waterways Experiment Station, Information Technology Lab, Vicksburg, USA, 1987.
- [14] B. S. Bakir, *Finite Element Analysis of Cellular Structures Subjected to Wave Loads*, Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames, 1993.
- [15] K. J. Wissmann, G. M. Filz, R. L. Mosher, J. R. Martin,

"Sheet pile tensions in cellular structures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.129, No.3, pp.224-233, 2003.

DOI:

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:3\(224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(224))

- [16] J. Kim, Y. J. Jeong, M. S. Park, "Structural Behaviors of Cylindrical Cofferdam with Plane and Corrugated Cross Section under Offshore Conditions", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol.7, pp.334-340, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.041>
- [17] S. Madsen, L. V. Andersen, L. B. Park, "Numerical Buckling Analysis of Large Suction Caissons for Wind Turbines on Deep Water", *Engineering Structures*, vol.57, pp.443-452, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.4236/ojce.2018.84040>
- [18] J. Kim, Y. J. Jeong, M. S. Park, S. Song, "Structural Analysis of Offshore Cofferdam Subjected to Wave Load and Suction Pressure", *Open Journal of Civil Engineering*, vol.8, no.4, pp.555-569, 2018.
- [19] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, 2nd Edition (Re-issue), pp.51-78, 1987.
- [20] L. B. Ibsen, A. Barari, K. A. Larsen, "Adaptive Plasticity Model for Bucket Foundations", *Journal of Engineering Mechanics*, vol.140, no.2, pp.361-373, 2014.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000633)
- [21] S. He, P. Zhang, H. Ding, "Study on the Bearing Mode and Force Transfer Path of Composite Bucket Foundations", *Energy (MDPI)*, Vol.10, No.7, 1041, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en10071041>
- [22] S. A. Nielsen, L. B. Ibsen, "The Offshore Bucket Trail Installation", *Proceeding of EWEA Offshore 2015*, Denmark, 2015.
- [23] C. H. Yang, *Structural Mechanics*, Chung Moon Kack, 4th Edition, p.227, 2005. (In Korean)
- [24] M. A. Crisfield, *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures (Volume 1: Essentials)*, John Wiley and Sons, pp.65-75, 1991.

김 정 수(Jeongsoo Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2018년 9월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2018년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

수치해석, 지중구조물, 해양구조물, 재생에너지