

아치형 석션 가물막이 상판의 구조거동 분석

김정수^{1†} · 정연주² · 박민수³ · 송성훈⁴

¹한국건설기술연구원 국가BIM연구센터 전임연구원, ²한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 선임연구원,
³한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원, ⁴한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 신진연구원

Structural Behavior Analysis of Cap Shaped as an Arch for Suction-Installed Cofferdam

Jeongsoo Kim^{1†}, Youn-Ju Jeong², Min-Su Park³ and Sunghoon Song⁴

¹Research Specialist, Korea BIM Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

²Senior Research Fellow, Division of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

³Senior Researcher, Division of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

⁴Researcher, Division of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract

In this study, the behaviors of a suction cap shaped as an arch were analyzed using finite element models. The fundamental structural behaviors of both flat- and arch-type caps were compared, and the advantages of the arch-shaped cap were explained. Moreover, the effects of geometric parameters and stiffener arrangements on the stress and deformation of the arch-shaped caps were investigated by comparisons of the changes in the behaviors of the caps. Additionally, the effects of boundary condition at the edge of the cap were analyzed to study the interactions between the cap and cofferdam walls; these results were used to derive the fundamental structural design of stiffened arch caps. Unlike flat caps, the results showed that ring stiffeners could improve the structural behaviors of arch caps remarkably, while the contributions of the radial stiffeners to the structural behaviors of the caps are dependent on constraints at the edges of the caps.

Keywords : suction penetration, cofferdam, arch, dome, finite element analysis

1. 서론

최근 해양 구조물의 적용은 연근해에서 점차 먼 바다로 확대되어 대형화되고 있다. 이에 따라 해상 구조물을 지지하기 위한 기초 또한 규모가 커지고 있으며, 이를 시공하기 위한 해상 가물막이 역시 넓은 작업 공간을 확보하는 것이 요구된다. 가물막이는 시공 중 해수 및 토사 유입을 차단하기 위한 가설 구조물로, 일반적으로 현장 상황 변화에 대응하기 유연한 강재 시트파일(sheet pile)을 해상에서 조립 및 설치하는 방식이 널리 활용된다. 그러나 기존 방식은 해상 조립으로 인해 작업성 및 안전성이 낮으며, 가물막이 규모가 증대됨에 따라 경제성이 크게 저하되는 어려움이 있다(Lee *et al.*, 2017). 이를 개선하기 위해 사전 제작된 일체형 가물막이에 대한 여러 연구가

진행되고 있다(Oh, 2007; Lee *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2018; Alfatlawi *et al.*, 2020). 일체형 가물막이는 사전 제작을 통해 가물막이 구조체의 구조성능 향상과 해상작업에 대한 부담을 경감시킬 수 있으나, 가물막이가 대형화됨에 따라 항타 및 진동 장비들을 활용한 기존의 설치공법을 적용하는데 한계가 있다.

최근 석션압을 이용한 해상 구조물 설치가 늘어나는 추세이다. 이 설치 공법은 펌프를 이용해 구조물 내외부의 수압차(석션압)를 발생시키고 구조물이 설치되는 지반을 약화시켜 자중에 의해 해상 구조물을 지반으로 관입시킨다(Fig. 1). 이러한 방법은 타 공법에 비해 해상 구조물 크기에 비교적 자유롭게 설치가 가능하며 대형 시공장비 사용으로 인한 비용 부담이 적어 활용이 늘어나고 있는 추세이다(Park and Cho, 2014). 석션 가물막이

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31-910-0093; E-mail: jeongsookim@kict.re.kr

Received September 29 2020; Revised October 11 2020;

Accepted October 12 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

는 설치 후 내부의 작업공간을 확보해야 하기 때문에, 설치 시에 상판과 가물막이가 석션압이 유지될 수 있도록 견고히 결합되고 이후 서로 분리될 수 있어야 하는 특징을 가진다(Kim, 2019).

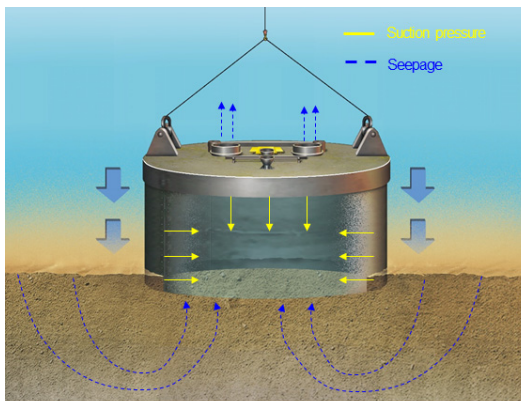
최근 석션 관입 원리를 가물막이 구조물에 적용하려는 여러 연구들이 이뤄지고 있다. Vicent 등(2017; 2018)은 침투해석을 이용해 대형 석션 가물막이의 침투유량 및 안정성을 분석하였으며, Park 등(2019)은 실내모형실험을 통해 선박충돌로 인한 가물막이의 동적응답을 평가하였고, Kim 등(2019)은 직경 5m 규모의 일체형 원형 가물막이의 석션 관입 실험을 수행하여 대형 기초 구조물의 석션 설치 가능성을 확인하고, 계측을 통해 석션 관입 중의 가물막이의 구조적 변화 및 석션압 추이를 분석하였다. 한편 석션압을 적용한 가물막이에 대한 구조적 거동 또한 수치해석적으로 조사되었으나(Jeong et al., 2018; Kim et al., 2018a, 2018b; 2020), 거동에 지배적 영향을 미치는 상판의 영향을 배제하거나 간소화하였다. Kim(2019)은 석션압에 의한 상판 거동이 벽체에 미치는 영향의 중요성을 지적하고 10m

규모의 다각 평판 형태의 석션 상판에 대한 다양한 보강 상태에 따른 거동 변화를 분석하였다. 그러나 해상 가물막이가 대형화될수록 평판형 석션 상판은 지간 거리가 길어짐에 따라 과도한 보강을 요구하게 되므로, 대형 해상 구조물용 가물막이의 석션 상판으로 활용하는데 한계가 있다.

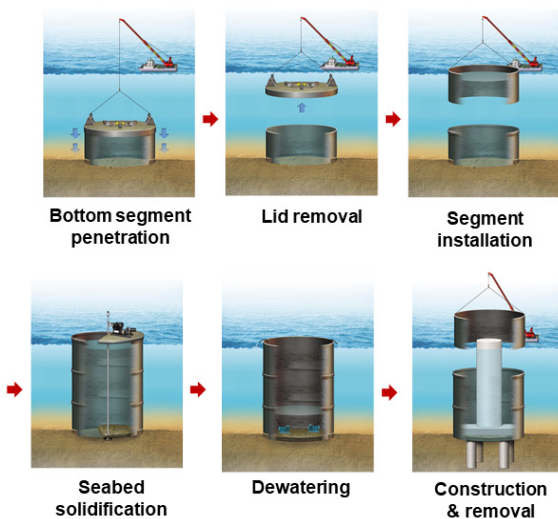
본 연구는 아치 형상을 갖는 석션 상판의 거동을 분석하고, 보강재 배치에 따른 거동 변화를 수치해석적으로 분석하였다. 먼저 평판형 및 아치형 상판의 기본적인 구조성능에 대해 비교 설명하였으며, 아치형 상판의 기하 및 경계조건 변화에 따른 거동 변화를 비교하여 각 인자가 상판의 응력 및 변형에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 아치형 상판이 가물막이 벽체와 결합되므로 아치형 상판 가장자리의 경계조건 영향을 수치적으로 분석하고, 아치형 상판의 구조설계 개념을 도출하였다. 여러 형태로 보강된 아치형 상판에 대한 구조해석을 수행함으로써 기본 거동을 조사하고 보강 상태에 따른 구조 성능 변화를 분석하였다.

2. 석션 가물막이 상판의 기본거동

석션 가물막이는 수중에 설치 후 내부공간이 시공 가능하도록 건조한 상태를 유지해야 하며, 본 구조물 시공을 위한 충분한 작업공간을 확보하는 것이 중요하다. 석션 가물막이 설치를 위해 가물막이 상단을 밀폐할 수 있는 상판이 필요하게 되는데, 해상교량 기초 규모 및 장비 활용 등을 고려했을 때 폭 20m 내외의 작업공간이 필요하다(Fig. 2). 이로 인해 상판은 가물막이 벽체를 제외하고는 별다른 지지점 없이 큰 석션압을 견뎌낼 수 있도록 구조설계 되어야 한다. 이 장에서는 대변형이 예상되는 판형 및 아치형 석션 가물막이 상판에 대한 수치해석 결과를 통해 각 상판의 기본 거동을 조사한다. 수치해석 모델이 재료 및 기하학적 비선형성을 모두 고려할 수 있도록 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.14를 활용해 상판에 대한 쉘 요소 모델을 구축하였다.



(a) Suction installation mechanism



(b) Installation procedure

Fig. 1 Large suction-installed cofferdam Scheme

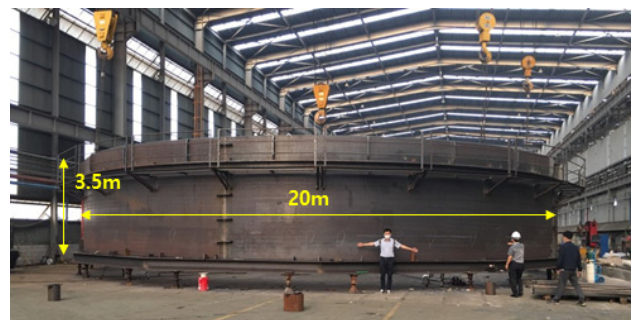


Fig. 2 Cofferdam module under manufacture

2.1 원형 평판

등분포 압력 100kPa를 받는 단순지지된 원형 평판에 대한 재료 및 기하학적 비선형 구조해석을 수행하였다. 평판은 SM355 강재(항복강도: 355MPa, 극한강도: 490MPa, 극한강도 시 변형률: 0.01)로 제작되었다고 가정하였다. 쉘 요소 모델(S4R)을 이용하여 등분포 압력을 받는 직경 10m와 20m 무보강 원형 평판의 두께와 수직 처짐(평판 중심) 변화를 Fig. 3에 나타내었으며(직경으로 정규화 및 대수화), 비교를 위해 선형 탄성을 가정해 얻은 식 (1)의 결과도 함께 제시하였다(Timoshenko and Woinowsky-Kreiger, 1987).

$$\delta(r) = \frac{3qR^4}{16Et^3} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 δ : 상판의 수직처짐(m), q : 등분포 압력(Pa), R : 상판 반경, E : 상판 탄성계수, t : 상판 두께, r : 상판 중심으로부터 이격된 거리, ν : 상판 포아송비이다. 결과로부터 직경 크기와 무관하게 두께와 처짐 관계가 나타남을 확인할 수 있다. 또한 두께-직경 비(t/D)가 0.1 이하인 조건에서 두께가 감소됨에 따라 비선형 모델은 처짐과의 비선형적 관계가 급격히 증가되었다. 평판의 응력을 검토했을 때, 이 결과는 기하학적 비선형성에 기인한 것이며 재료적 항복은 발생되지 않았다. 참고로 $t/D=0.025$ 일 때, 비선형 모델의 최대 수직처짐은 각각 14.15cm

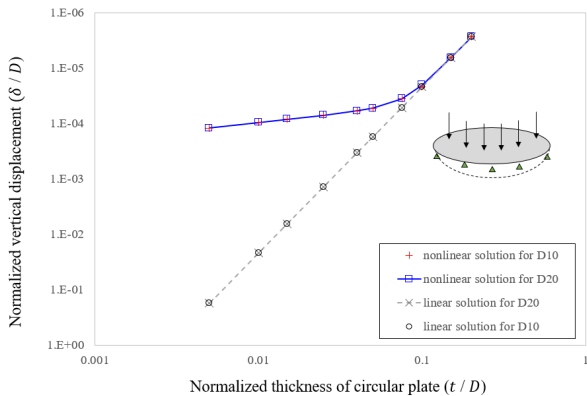


Fig. 3 Large suction-installed cofferdam scheme

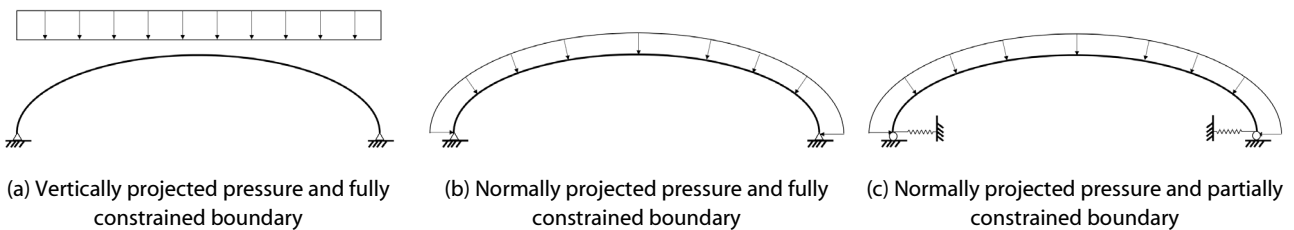


Fig. 4 Scheme of load and boundary conditions for arch-shaped models

(D20)와 7.07cm(D10)였다. 반면 선형모델은 두께가 감소됨에 따라 기하학적 비선형을 반영하지 못하여 비현실적인 수직 처짐을 예측하였다($t/D=0.025$ 일 때, D20: 2.78m, D10: 1.39m).

과도한 처짐을 방지하기 위해 강재 사용량은 크게 증가하게 된다. 앞서 분석한 원형상판에 대해 AISC(2005)의 지간 대비 처짐량 기준(1/360; Yang, 1987)을 사용성 한계로 고려하고 이를 달성하기 위해 최소로 필요한 강재 물량을 식 (1)을 이용해 추정할 수 있다. 원형 평판 중심에서의 수직처짐($r=0$)에 대한 이론해를 두께에 대해 정리하면, 사용성 한계를 만족시키는 두께는 직경과 선형적으로 비례하나, 체적 및 중량과는 지수적으로 비례하게 됨을 알 수 있다. 상판 중량 증가는 제작 및 인양 시 제어에 어려움을 야기하고 고용량 중장비 활용에 따른 경제성 악화로 이어질 수 있다. 또한 과도한 변형은 석션 상판과 가물막이와의 결합에 장애물이 된다. 따라서 상판 무게를 최소화 할 수 있도록 형상 및 보강을 고려할 필요가 있다.

2.2 아치형 상판

아치 및 돔 형태의 구조물은 교량 및 경기장과 같이 구조물이 충분히 지지점을 두기 어려운 조건에서 주로 활용되며, 그 형상과 구조물 양단의 수평 이동 구속을 통해 부재의 휨 변형을 최대한 억제하고 부재 전체가 압축력을 받도록 유도함으로써 큰 고정하중을 변형없이 효과적으로 지지할 수 있다. 원형상판($R=10m, t=6cm$)와 동일한 지간장 및 체적($18.85m^3$)을 갖는 아치에 대한 쉘 요소(S4R) 모델을 사용하여 응력 및 최대 수직변위 변화를 비교하였다. 여기서 아치 중심 단면은 타원형이며, 중심 단면을 중심축에 대해 회전시켜 얻어진 아치이다. 아치 해석 모델에 원형상판과 동일한 재료모델을 적용하였다.

아치 곡면에 수직 압력(normal pressure)이 재하되면 아치 높이에 따라 구조물에 작용하는 외력 합이 달라지며, 형고가 높을수록 구조물의 변형을 억제하는 방향으로 하중이 재하되므로 응력과 변형을 감소시킨다. 결과적으로 원형 평판과 체적은 같아도 상이한 하중조건이 되므로 부적절한 비교가 된다. 따라서 해석모델은 아치 양단이 수직 및 수평변위에 대해 고정 되도록 하였고, 압력이 연직하게 아치에 작용하도록 재하하였다(vertically projected pressure, Fig. 4a).

Table 1은 원형 평판과 동일한 체적을 갖는 아치형 상판이 100kPa 압력을 받을 때의 최대 응력 및 수직변위를 정리한 것이다. 여기서 D : 직경, H : 아치 높이이다. 해석결과로부터 아치 상판이 사용성 측면에서 평판에 비해 유리한 구조 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 반면 응력은 평판에 비해 높게 나타났다. 이는 아치 양단 변형이 억제되면서 아치 양단에서 응력이 집중되었기 때문이다. 작용 압력이 연직방향에 비례하도록 정의되었으므로, 표면적 증가로 인한 응력증가 요인은 없으나 아치 높이가 감소할수록 응력이 증가되는 경향을 보였다. 평판에 비해 아치 상판의 최대 수직변위는 크게 억제되었으나 아치 높이가 낮아짐에 따라 이 효과는 감소하였다.

3. 보강재 배치에 따른 아치형 석션 상판의 거동분석

석션압에 저항하기 위해 상판 두께가 증가되면 목표한 곡률로 제작이 어려워 작업 난이도가 상승하며 제작비 증가를 야기한다. 또한 거대한 상판 크기로 인해 구조적 안전성만 확보되고 큰 변형을 동반할 수 있다. 이 경우, 타 부재와의 결합 및 조립에 문제를 발생시킬 수 있어 보강을 통해 변형을 억제하는 것이 요구된다. 본 장은 효과적인 보강재 배치안을 제시하기 위해 여러 가지 보강재 배치를 적용한 아치형 상판의 거동 변화를 분석하였다.

3.1 해석모델

아치형 상판의 보강은 크게 방사형(Radial type)과 환형(Circumferential type)으로 구분되며, Fig. 5와 같이 상판 보강 케이

스를 고려하였다. 각 모델은 셸 요소(S4R)로 구성되며, 상판 모델은 SM355 강종으로 제작된 직경 20m, 높이 3m, 두께 3cm의 아치형 상판을 기본으로 방사형, 환형, 혼합형 보강재가 추가된다. 여기서 아치는 2장의 해석모델과 같이 중심단면이 타원형이다. 자중과 아치 곡면에 수직하게 작용하는 석션압 100kPa를 외력으로 해석모델에 재하하였고(Fig. 4b), 상판 가장자리에서 수직 및 수평 변위가 발생하지 못하도록 경계조건을 부여하였다. 해석모델의 평균 격자 크기는 0.1m로 약 55,000~70,000개 요소가 모델에 사용되었다.

Fig. 5의 Case A는 8개의 방사 보강재가 추가된 아치형 상판으로 보강재 길이 및 부재 간 연결 효과를 분석하기 위해 상판 전구간이 보강된 경우와 외측 또는 내측 일부 구간(아치중심으로부터 반경 5m 이내)만 보강된 배치를 고안하였다. 환형 보강재의 보강 효과 및 위치에 따른 영향을 분석하기 위해 Case B를 포함하였다. B1의 환형 보강재는 직경이 등간격으로 확대되는($D_1=10m, D_2=15m, D_3=20m$) 반면 B2는 환형 보강재의 수직 위치가 등간격이 되도록 배치하였다($H_1=0m, H_2=1m, H_3=2m$). B3은 타원의 기울기가 급변하는 구간에 집중적으로 배치하였다($H_1=0m, H_2=0.5m, H_3=1m$). 끝으로, 방사 및 환형 보강재의 유기적 영향을 분석하기 위해 Case C와 같이 보강재를 배치하였다. C1은 A1과 C3 조합이며, C2는 A3과 C3 조합, 그리고 C3는 A2에서 제시한 방사보강재와 직접 연결되도록 환형 보강재를 위치시키고, 높이 0.5m에 환형 보강재를 추가하였다. 여기서 모든 보강재의 연직 높이는 30cm, 두께는 3cm로 동일하다. 보강재에 의한 효과를 확인하기 위해 무보강 상판(R0)에 대한 해석도 함께 수행하였다.

3.2 보강재 배치별 상판 거동 비교

각 해석모델을 통해 도출된 응력 및 수직 처짐의 크기와 분포를 비교 분석하였다. Table 2는 상판 모델별 응력과 수직 처짐에 대한 최대값을 정리한 것이며, Fig. 6는 무보강 아치 상판에서 발생된 값을 기준으로 Table 2의 값을 정규화한 것이다. Fig. 6에서 응력비, 처짐비, 무게비는 작을수록 아치형 상판이 효과적인 보강재 배치를 가지고 있음을 의미한다.

Table 1 Comparison with stress and vertical displacement between circular plate and arch(constant volume)

Model	Max. stress (MPa)	Max. vertical displacement (cm)
Circular plate($D=20m, t=6cm$)	55.78	13.29
Arch($D=20m, H=10m, t=3cm$)	62.98	0.31
Arch($D=20m, H=5m, t=4.5cm$)	34.18	0.53
Arch($D=20m, H=2.5m, t=5.3cm$)	112.22	1.74

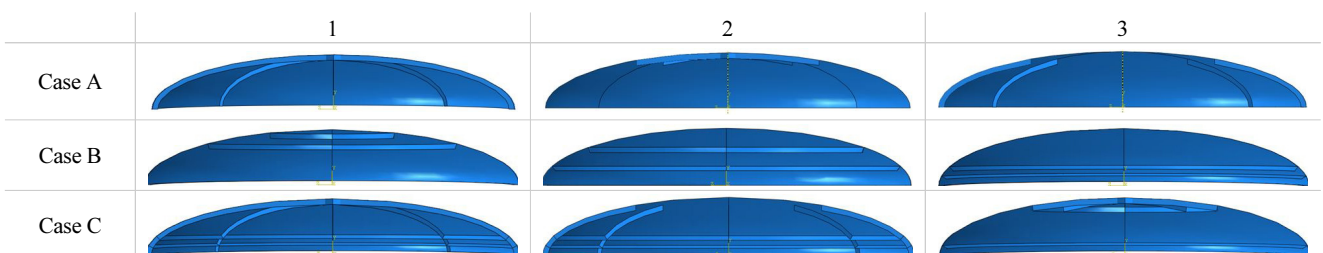


Fig. 5 Models of arch-shaped cap for suction-installed cofferdam

Fig. 7을 통해 보강재 배치에 따른 거동 변화를 비교 분석하였다. 방사보강재가 아치 측부에 배치된 경우 상판 전체의 변형을 억제하였으나(A1: 12%, A3: 8%) 방사보강재 하단 모서리에 응력집중을 야기하였다. 반면 상판 중앙에만 일부 배치된 방사보강재(A2)는 무보강 상판과 비교했을 때 응력과 변형 모두 거의 변화가 발생하지 않아 구조부재로서의 기능하지 못함을 알 수 있다. A2와 A3의 결과 비교는 적절한 위치(아치 측부)에 보강이 이뤄지면 방사보강재가 서로 연결되지 않아도 보강효과를 발휘할 수 있음을 보여준다.

환형보강재에 의한 보강은 보강재가 설치되는 위치에 따라 상이한 구조성능 개선을 보여준다. B1은 아치 상단의 기울기가 완만한 구간에 보강이 집중되었으나 응력과 변형에 영향을 미치지 못했다. 반면 환형 보강재가 아치 측면에 배치되고 보강 간격이 조밀할수록 두드러진 구조성능 개선이 확인되었다. 아치 측면에 환형 보강이 집중된 B3의 응력 및 수직 처짐의 감소는 각각 29%, 11%로 단일 유형으로 보강된 아치 상판 가운데 가장 우수한 보강효과를 나타내었다. B3의 무보강 상판 대비 추가된 강재 사용 증가는 15% 수준이다.

Table 2 Maximum stress and vertical displacement of parametric models for stiffened arch-type suction cap

Model	Weight (tonf)	Max. stress (MPa)	Max. vertical displacement (cm)
R0	87.1	169.9	2.01
A	1	92.70	361.6
	2	89.83	170.3
	3	89.92	360.3
B	1	95.8	170.3
	2	98.9	166.8
	3	99.9	120.5
C	1	105.5	1.63
	2	12.8	274.9
	3	100.7	132.4

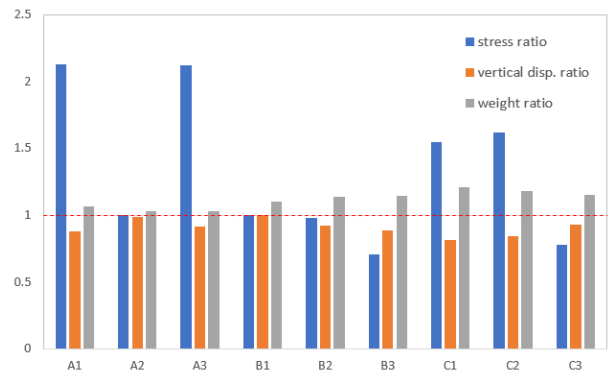


Fig. 6 Ratio of stress, vertical displacement, and weight with respect to un-stiffened arch type suction cap

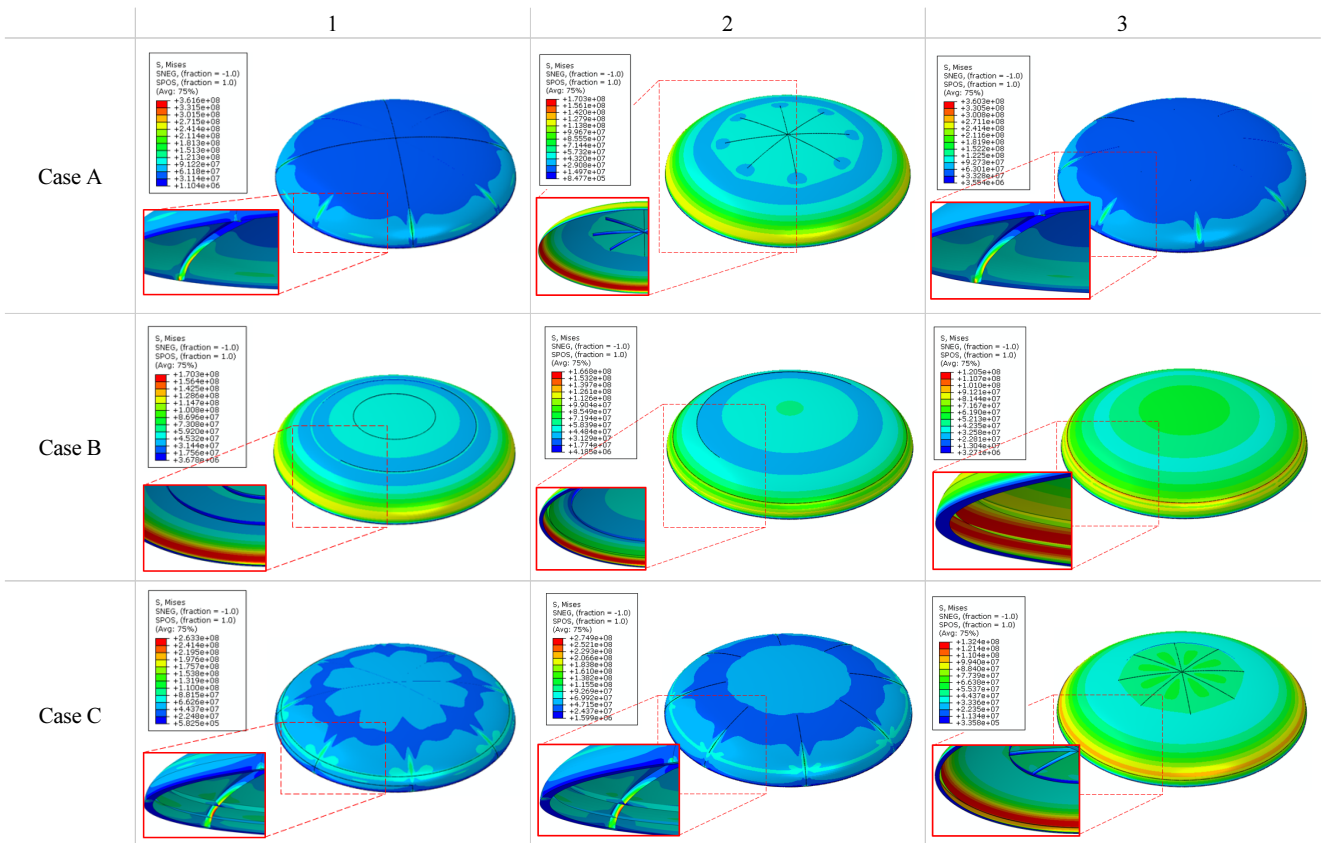


Fig. 7 Stress distribution of stiffened arch-type suction cap

방사 및 환형 보강재를 혼합한 결과를 통해 환형 보강재를 아치 측부에 배치하고 방사 보강재를 전 구간에 연결되도록 배치하면(C1), 안전성과 사용성 측면에서 가장 우수한 성능을 발휘한다는 것을 알 수 있다. 또한 C3의 결과를 통해 상판 상단에만 배치된 방사 보강재(A2)를 환형 보강재에 의해 결합시켜도 방사 보강재의 구조적 역할은 미미함을 확인할 수 있다. 참고로 C3의 응력 및 처짐 저감 효과는 아치 측부에 보강된 환형 보강재에 기인한다.

A2 및 C3와 같이 처짐이 가장 크게 발생하는 곳에 보강재를 추가하여도 구조성능이 개선되지 못하는 원인은 상판 형상 및 작용 하중의 대칭성과 대변형 특성 때문으로 판단된다. 상판 형상이 아치이고 석션압이 대칭적으로 작용하므로 상판은 막응력(membrane stress)이 지배적이다. 보강으로 인해 상단 일부분의 단면이 증가되거나 아치 전체에 걸쳐 연속적으로 배치되지 않으므로, 보강재를 통해 축 방향 내력이 지속될 수 없고 그 결과 상판 내부의 축 방향 응력은 방사 보강재로 완전히 전달되지 못하여 구조적 역할이 미미하게 된다. 두 번째 원인은 기하학적 비선형성이다. 재료적 선형 및 미소변형을 가정한 직경 20m의 무보강 평판(두께 30mm)에 대한 최대 수직 변위를 살펴보면 상판 중심에서 최대 응력과 수직변위는 각각 494.4MPa, 2.78m가 발생하나, 기하학적 비선형을 고려한 모델은 123.2MPa, 0.24m의 응력과 수직변위만 발생한다. 이는 상판의 지지점 간격이 멀어 큰 변형이 발생하기 이전에 부재의 강체 이동부터 발생함으로써 실제 재료적 변형은 작다는 것을 보여준다. 강체 이동을 동반한 기하학적 상태가 힘의 평형조건을 충족하게 되므로 선형 해석에 비해 작은 최대 수직변위가 발생하였고, 변위 발생이 대부분 강체 이동에 기인하기 때문에 발생응력은 작았던 것으로 분석된다. 반면 본 연구의 아치 상판 해석모델은 기하학적 비선형성을 고려함에 따라 최대 수직 변위가 2.56% 증가하였고(선형: 1.95cm), 이로 인해 최대응력은 모두 아치 측부에서 나타났으며 기하학적 비선형 및 선형 모델에 대해 각각 170MPa, 164MPa의 최대응력이 발생하였다. 이러한 결과는 평판의 경우와 달리 대형 아치 평판에서 발생된 변위가 모두 부재 변형에 기인한다는 것을 보여준다. 또한 아치의 변위가 작기 때문에 기하학적 비선형 영향은 평판에 비해 미소함을 알 수 있다.

3.3 아치형 및 평판형 상판의 거동 비교

3.2절에 나타난 해석결과를 동일한 직경을 갖는 보강된 평판형 상판의 거동과 비교하였다. 상판의 중량 및 해석조건이 차이가 존재하나 기존 연구결과와 추가 해석을 통해 얻은 결과를 정규화하여 보강재 배치에 따른 각 상판의 거동 특성 차이

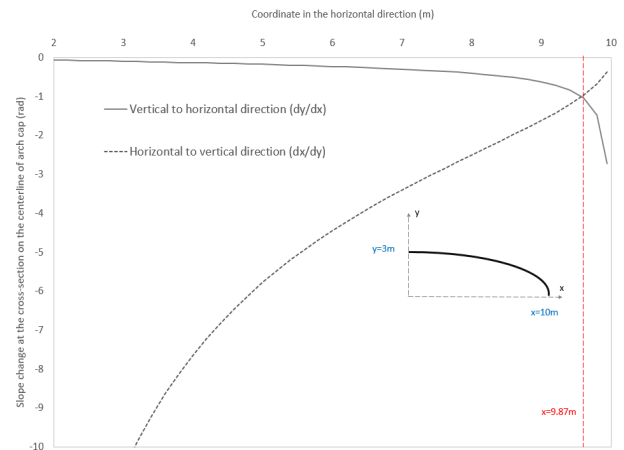


Fig. 8 Surface slope change in arch-type of cap

를 분석함으로써 대형 석션 상판의 개념설계를 위한 아이디어를 제공하고자 한다.

아치형 상판에서 방사 보강재의 효과는 환형 보강재에 비해 미미하였다. 아치형 상판 전구간에 걸쳐 방사 방향으로 보강된 경우(A1) 무보강에 비해 최대 수직변위가 12% 억제되는데 그쳤으며 보강재에 응력집중으로 오히려 최대응력은 2배로 증가하였다. 반면, 평판형(Case B; Kim, 2019)의 경우 무보강 대비 80%까지 수직변위를 억제하였다. 평판 및 아치형 상판 모두 방사 보강으로 인해 방사 보강재 단부 근처에서 응력집중이 야기되었으나, 이는 방사방향 변위가 완전히 구속되어 발생된 것이므로 실제로는 이보다 완화된 응력이 나타날 것으로 예상된다.

평판형 상판에 환형 보강재가 단독으로 적용되면 응력집중만 야기하고 처짐에 대한 개선 효과를 보여주지 못하였다(Kim, 2019). 반면 아치형 상판에서는 환형 보강재가 주요 보강재로 역할 하였다(B3). 다만 아치형 상판의 높이 및 곡률을 고려해 환형 보강재의 적절한 위치 선정이 중요하였다. Fig. 8은 무보강 타원형상 아치 상판의 횡단면에서의 수평 및 수직 방향에 대한 기울기 변화를 나타낸다. 타원형 아치 상판인 R0의 최대 응력 발생 위치는 Fig. 8에 나타난 타원의 기울기의 절대 크기가 교차되는 위치와 동일하였다. 장반경과 단반경 비율에 따른 차이는 발생할 수 있으나, 석션압을 받는 타원형 아치 상판의 경우, 상판 표면의 기울기가 급격히 달라지는 지점에서 보강에 의한 구조성능 개선이 효과적으로 이뤄질 수 있음을 알 수 있다.

4. 보강 아치 상판의 경계조건 영향 분석

앞의 평판 및 아치형 상판에 대한 해석이 유효한 경우는 아치 양단의 수평이동이 충분히 구속된 상태이다. 양단에 작용

하는 수평력을 통해 상판 전체가 압축력이 지배적이 되면 별다른 중간 지지점 없이 효과적으로 하중을 지지할 수 있다. 그러나 아치 상판은 가물막이 벽체 위에 거치된 후 석션 관입을 위해 볼트를 체결된 상태로 가물막이 벽체와 상호 거동하므로 완전히 구속된 상태로 보기 어렵다. 이러한 이유로 상판 경계조건 변화에 따른 구조적 거동을 조사하였다.

4.1 아치 가장자리 경계조건에 따른 거동 비교

본 절은 석션압이 재하된 해석모델 가장자리의 수평 방향 변위를 전면 또는 일부 허용하는 조건으로 무보강 및 보강 아치형 상판의 기본형인 R0, A1, B3의 응력 및 수직변위 변화를 관찰하였다. 각 해석모델의 하중 및 구속조건을 제외한 다른 조건은 3장과 모두 동일하다. 아치형 상판 가장자리에 방사방향으로 각 절점마다 선형 스프링 요소(SPRING1)를 배치하였으며 스프링 강성 증감에 따른 각 상판의 응력 및 변위 변화를 조사하였다(Fig. 4c).

방사방향 스프링 강성 변화에 따른 각 상판의 최대 응력, 최

대 방사 및 수직 변위를 Table 3에 정리하였다. 여기서 k는 상판 가장자리에 배치된 스프링의 강성이며 Inf.는 방사방향으로 완전 구속되도록 경계조건을 부여한 것을 의미한다. 강성이 0인 경우는 강체이동으로 인해 해석 자체가 불가하므로, 미소한 강성을 부가하였다(k=0.1 N/m). Table 2와의 결과 차이는 자중 고려 유무에 기인한 것이다.

해석결과를 통해 스프링 강성이 증가됨에 따라 대체로 구조물에서 발생하는 응력이 증가하고 변위는 억제됨을 확인할 수 있다. 모든 상판은 방사방향으로 구속되지 않은 경우 최대 방사방향 변위가 상판 가장자리에서 발생되었으나, 스프링 강성이 증가됨에 따라 Fig. 8과 같이 상판 기울기가 교차되는 위치로 점차 최대 방사변위의 발생 위치가 변화되었다. 수직변위는 일관되게 변화하였으나 방사 변위 경향이 달라짐에 따라 최대 응력 발생은 일관되지 않게 되었다. 무보강 상판을 제외하고 방사 및 환형 보강 상판의 경우 최대응력이 일관성을 가지고 증가하게 되는데, 이는 상판 가장자리 구속이 강화됨에 따라 최대 응력이 보강재 부근으로 집중되기 때문이다. 최대 응력은 상판 가장자리 내/외측 표면에서 동시에 발생하였으나,

Table 3 Change in maximum structural design quantities of suction caps due to radial stiffness at the cap edge

k (kN/m)	R0			A1			B3		
	Max. stress (MPa)	Max. vertical displacement (cm)	Max. radial displacement (cm)	Max. stress (MPa)	Max. vertical displacement (cm)	Max. radial displacement (cm)	Max. stress (MPa)	Max. vertical displacement (cm)	Max. radial displacement (cm)
1E-04	172.9	2.15	0.86	198.0	2.04	0.91	101.1	1.86	0.4
1E+00	172.1	2.15	0.86	198.1	2.04	0.91	101.1	1.86	0.4
1E+03	144.6	2.09	0.64	229.3	1.94	0.70	103.8	1.79	0.4
1E+06	165.1	1.95	0.60	309.5	1.72	0.45	117.1	1.74	0.4
1E+09	165.2	1.95	0.60	356.2	1.71	0.45	117.1	1.74	0.4
Inf.	165.2	1.95	0.60	356.2	1.71	0.45	117.1	1.74	0.4

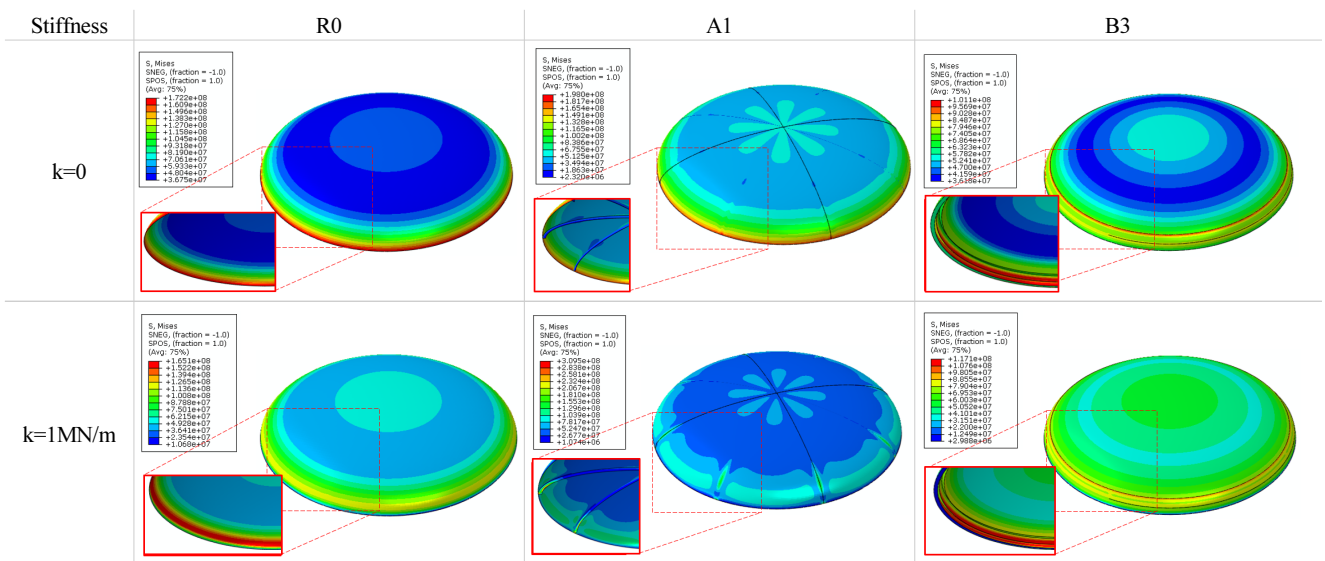


Fig. 9 Change in stress distribution due to radial stiffness at the cap edge

스프링 강성이 증가됨에 따라 가장자리 내측에서만 최대 응력이 발생하였다(Fig. 9). 이는 스프링의 방사방향 저항력으로 인해 발생된 상판의 휨 변형에 기인한 것으로 판단된다.

환형 보강 상판(B3)는 다른 유형의 상판에 비해 스프링 구속에 따른 영향이 미미하였다. 상판 가장자리의 구속이 없는 경우와 비교하여도 최대 방사 및 수직방향 변위가 거의 변화하지 않았다. 또한 Fig.9에 나타난 바와 같이 B3만 스프링 구속이 없을 때부터 보강재가 부착된 위치에서 최대 응력이 발생하고 있다. 이러한 결과는 일정 수준 이상의 스프링 강성이 확보된 이후부터 보강재로써 역할하는 방사 보강재(A1)와는 차이가 있으며, 환형 보강재에 의해 방사방향 변형이 대부분 억제됨에 따라 상판 가장자리의 스프링 강성이 영향을 미치지 못함을 보여준다.

방사 보강된 상판(A1)은 가장자리 구속이 일정 수준 이하인 경우 구조적으로 거의 기능하지 못하였고, 수직변위를 방사변위로 전이시켜주는 역할만 수행하였다. 그러나 상판 가장자리 구속이 증가됨에 따라 방사보강재의 하단의 방사방향 변위 및 상판 중심의 수직방향 변위가 억제되고, 그 결과로 방사보강재 하단을 중심으로 급격한 응력집중이 발생하였다(Fig. 9, A1).

4.2 경계조건이 석션 상판에 미치는 영향

아치형 상판의 방사방향 구속 수준에 따라 동일한 상판에 대해 상이한 거동이 관찰되었다. 방사 방향으로 보강된 부재 및 상판 자체는 일반적인 아치 구조물과 같이 아치 양단의 수평이동이 충분히 구속되어야만 구조적 성능이 발휘되었으나, 환형 보강이 이뤄진 상판에 대해서는 경계조건과 무관하게 구조적 성능이 확인되었다. 다만 B1, B2, B3의 해석결과 비교에서 알 수 있듯이, 환형 보강재는 설치 위치가 상판 가장자리의 경계조건보다 더 중요한 설계인자이므로 상판의 형상을 고려해 적절한 보강재 배치가 필요하다.

아치형 구조물의 경계조건에 따른 구조물의 거동 변화를 다룬 연구는 드물어 직접적인 연구결과 비교는 제한적이다. 3차원 아치형 구조물을 다룬 Lee 등(2019)은 터널 구조물의 지반 경계조건을 달리하여 구조물의 응답을 분석하고, 경계조건이 구조물 거동에 미치는 영향이 미미하다고 평가하였다. 그러나 이는 터널 구조물과 지반의 경계면에서 발생할 수 있는 탈착 등을 해석모델에 반영하지 않았기 때문으로 판단된다. Giresini 등(2014)은 교회 건물 상단 아치에 대해 여러 경계조건을 적용해 거동 변화를 관찰하였으나, 경계조건 중요성을 정성적으로만 기술하고, 경계조건에 따른 구조물의 거동 변화를 정량적이고 명확하게 드러내지 않았다. 이외 아치형 구조물의 경계조건 영향을 다룬 일부 연구가 존재하나 2차원에 국한

되어 환형 보강재와 같은 3차원적 영향을 확인할 수 없다.

석션 상판에 작용된 하중은 볼트연결을 통해 가물막이 상단에 집중적으로 전달되므로, 가물막이 상단이 전체 가물막이 구조물에서 가장 취약한 부분일 가능성이 높고 그 결과 구조적 안전성 및 사용성 확보를 위해 가물막이 상단에 많은 부가적인 보강이 필요할 수 있다. 상판 가장자리의 구속과 무관하게 B3는 자체적으로 상판의 변형을 효과적으로 억제하므로, 가물막이 상단의 보강을 최소화시키는 장점을 가진다. 방사 보강으로 인한 응력집중은 가물막이 상단의 보강상태에 따라 상이해질 수 있으므로, 가물막이 보강 상세를 고려해 상판의 보강 설계를 수행함이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 모델을 이용해 아치형 석션 가물막이 상판의 구조거동을 분석하고, 보강재 배치 및 상판 경계조건에 따른 거동 변화를 조사하였다. 평판형 상판의 결과를 아치형 상판과 함께 비교함으로써, 중간 지지점이 없는 석션 상판에서 과도한 처짐이 문제가 될 수 있음을 보이고 아치형 상판 활용의 필요성을 제시하였다. 아치형 상판에 대한 여러 매개변수 연구를 통해 다음 결과를 도출하였다.

- 1) 2장의 해석결과는 동일한 직경 및 체적을 갖는 아치 상판에 연직 방향으로만 압력이 작용할 때 상판이 구형에 가까울수록 구조적으로 유리하다는 것을 보여준다. 높이가 낮을수록 동일체적을 유지하기 위해 아치 상판의 두께가 증가함에도 응력 및 처짐 개선 효과는 감소하였다.
- 2) 3장의 해석결과는 환형 보강재가 아치형 상판의 전체 거동을 지배하며 방사 보강재의 보강 효과는 상대적으로 미미함을 보여준다. 이는 평판형 상판의 보강재 역할과 상반된다. 평판형 상판은 방사 보강재가 변형 및 응력을 저감시키는데 주요하게 기여하였다.
- 3) 4장의 해석결과는 아치형 상판 하단의 움직임이 충분히 구속된 이후부터 방사 보강재가 구조적 역할을 수행함을 보여준다. 따라서 상부 가물막이가 충분히 보강되지 못하면 응력집중만 유발하고 구조적 역할은 미미할 수 있다.
- 4) 3장과 4장의 결과를 종합하면 환형 보강재의 구조적 효과는 보강재가 설치된 위치에 밀접하게 관련성이 있으며 아치형 석션 상판 지지점의 구속 상태와는 무관하였다. 환형 보강재가 구조적 역할을 수행하기 위해서는 상판의 표면 기울기를 고려해 환형 보강재의 배치가 필요하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발 (16SCIP-B119960)” 과제의 지원을 받았습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- AISC Specification** (2005) *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-05, Chicago.
- Alfatiawi, T., Mansori, N., Alsultani, A.** (2020) Stability Assessment of Diaphragm Cellular Cofferdams Subjected to Severe Hydro-Structural Conditions, *Open Civil Eng. J.*, 14(1), pp.44~55.
- Giresini, L., Butenweg, C., Andreini, A., Falco, A.D., Sassu, M.** (2014) Numerical Calibration of a Macro-element for Vaulted Systems in Historic Churches, *Proc. 9th Int. Conf. Structural Analysis of Historical Constructions*, Mexico, pp.1~12.
- Jeong, Y.J., Kim, J., Park, M.S., Song, S.** (2018) Hydrodynamic Behaviors of Large Steel-Cylindrical Cofferdam System For Marine Structures Construction, *Coastal Eng. Proc.*, 1(36), p.26.
- Kim, H., Choi, J., Gwon, Y.** (2020) The Structural Characteristics of the Temporary Cofferdam in Accordance with the Shape and Size Obtained from Numerical Analysis, *J. Korean Geotech. Soc.*, 36(1), pp.29~38.
- Kim, J.** (2019) Numerical Investigation on Structural Behavior of a Lid with Stiffeners for Suction-installed Cofferdams, *J. Korea Acad.-Ind. Cooper. Soc.*, 20(10), pp.7~17.
- Kim, J., Jeong, Y.J., Park, M.S.** (2017) Structural Behaviors of Cylindrical Cofferdam with Plane and Corrugated Cross Section under Offshore Conditions, *Int. J. Emerg. Technol. & Adv. Eng.*, 7(9), pp.334~340.
- Kim, J., Jeong, Y.J., Park, M.S., Song, S.** (2018a) Numerical Investigation on Buckling Behavior of Suction-installed Cofferdam, *Int. J. Eng. Res. & Technol.*, 7(11), pp.199~202.
- Kim, J., Jeong, Y.J., Park, M.S., Song, S.** (2018b) Structural Analysis of Cofferdam Subjected to Wave and Suction Pressure, *Open J. Civil Eng.*, 18(4), pp.555~569.
- Kim, J.H., Kim, H.M., Lee, J.H.** (2019) Evaluation of Suction Bucket Installation at Low Water Depth Using Model Test, *Proc. KSCE 2019 Convention*, Pyoungchang, pp.1135~1136.
- Lee, J., Choi, K., Kim, D.** (2019) Effect of Ground Boundary Condition on Evaluation of Blast Resistance Performance of Precast Arch Structures, *J. Comp. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(5), pp.287~296.
- Lee, J.H., Cho, J.W., Kim, H.M.** (2017) Installation Method of Large Circular Steel Pipe Using Suction Pressure, *Proc. of KSCE 2017 Convention*, Busan, pp.1554~1555.
- Oh, D.** (2007) *Development of Dry Process Caisson Method for Maintenance of Submerged Harbor Structure*, Master Thesis, National Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea.
- Park, K.W., Cho, J.H.** (2014) The Suction Bucket Foundation Design of Offshore Wind Turbine by Eurocode, *Yooshin Technical Report*, 21, pp.131~142.
- Park, M.C., Lee, J.S., Kim, D., Yu, J.D.** (2019) Small-scaled Laboratory Experiments for Dynamic Stability Monitoring of Large Circular Steel Pipe Cofferdam of Marine Bridge Foundation, *J. Korean Geotech. Soc.*, 35(12), pp.123~134.
- Song, J.U., Lee, J.S., Park, M.C., Byun, Y.H., Yu, J.D.** (2018) Laboratory Experiments for Evaluating Dynamic Response of Small-scaled Circular Steel Pipe, *J. Korean Geotech. Soc.*, 34(11), pp.81~92.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.** (1987) *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, 2nd Edition (re-issued), pp.51~78.
- Vicent, S., Tran, V.A., Kim, S.Y.** (2017) Numerical Investigation on Seepage Stability in Offshore Bucket Cut-off Walls, *J. Korean Geotech. Soc.*, 33(11), pp.73~82.
- Vicent, S., Tran, V.A., Kim, S.Y.** (2018) Numerical Investigation on Seepage Discharge inside a Cylindrical Cut-off Wall, *J. Korean Geotech. Soc.*, 34(10), pp.51~60.
- Yang, C.H.** (1987) *Structural Mechanics*, Chung Moon Kack, 4th Edition, p.227.

요 지

본 연구는 유한요소 해석모델을 이용해 아치 형상을 갖는 석션 상판의 거동을 분석하였다. 평판형 및 아치형 상판의 기본적인 구조 성능에 대해 비교함으로써 아치형 상판의 이점을 설명하였다. 또한 아치형 상판의 기하 및 보강재 배치 변화에 따른 거동 변화를 비교하여 각 인자가 상판의 응력 및 변형에 미치는 영향을 조사하였다. 추가로 아치형 상판 가장자리의 경계조건 영향을 수치적으로 분석함으로써, 아치형 상판의 보강재 배치와 가물막이 벽체와의 상호거동 영향을 규명하고 이를 통해 보강형 아치형 상판의 구조설계의 기본 개념을 도출하였다. 평판형 상판과 달리 환형 보강재가 아치형 상판의 구조 거동을 확연히 개선시킬 수 있음을 확인하였으며, 방사 보강재의 역할은 상판 가장자리의 구속상태에 의존적이었다.

핵심용어 : 석션 관입, 가물막이, 상판, 아치, 돔, 유한요소해석