편심하중을 받는 탈착식 스퍼드캔의 링플레이트 보강 효과 Reinforcing Effects of Ring Plates on a Detachable Spudcan Subjected to Eccentric Load

이승연* · 유일환** · 박종섭*** · 지광습****

Lee, Seungyeon*, You, Ilhwan**, Park, Jongsup***, and Zi, Goangseup****

Abstract

A detachable spudcan enables the operation of a jackup barge on any seabed. A general detachable spudcan uses a pin to connect the separate footing and leg. However, this type of structure can cause excessive stress on the pin. In this study, a new type of detachable spudcan reinforced with ring plates (upper and lower) is proposed to improve the structural performance of the conventional detachable spudcan. Finite element analysis revealed that the stress concentration in the connection part was relieved by reinforcing the lower and upper rings. In particular, reinforcing both lower and upper rings resulted in superior structural performance under eccentric supported conditions than when reinforcing only the lower ring. The structural strength of the spudcan when both the upper and lower rings were reinforced was found to be 120% of the spudcan as compared to when only the lower ring was reinforced. It is thought that the safety of the connection part can be secured when designing a detachable spudcan using the reinforcement plan verified in this study.

Key words : Offshore Structure, Jack-up Barge, Spudcan, Finite Element Analysis, Scale Modeling

요 지

탈착식 스퍼드캔은 지반의 조건과 관계없이 잭업바지의 운용을 가능하게 한다. 일반적으로 탈착식 스퍼드캔은 핀을 활용하여 분리된 푸팅과 레그를 연결한다. 하지만 이러한 구조에서는 핀에 과도한 응력이 유발될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 탈착식 스퍼드캔의 구조를 개선하기 위해 스퍼드 캔 상부 및 하부에 링플레이트(상·하부링)를 보강하는 안을 제시하였다. 유한요소해석 검증 결과, 하부링 및 상부링 보강안에 의해 연결부분의 응력집중이 완화되었으며, 특히 상·하부링은 편심 지지조건에서 더욱 큰 효과가 나타났다. 보강 효과를 검증하기 위해 진행된 모형실험 결과, 상·하부링 지지구조의 최대 지지 하중은 하부링 지지구조 대비 120%로 나타났다. 본 연구에서 검증한 보강안을 통해 탈착식 스퍼드캔 설계시 연결부의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해상구조물, 잭업바지선, 스퍼드캔, 유한요소해석, 모형실험

1. 서 론

초기 해상풍력발전기는 부유식 바지선에 선적하는 방식

으로 설치되었다. Jang (2013)에 따르면 부유식 바지선은 해저면에 고정되어있지 않아, 파랑하중 등 해양환경에 의해 안정성에 큰 영향을 받는다.

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정(E-mail: syeon6297@korea.ac.kr)

Member, Intergrated Ph.D. Candidate, School of Civil, Architectural&Environmental Engineering, Korea University

**고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수(E-mail: lh-you@korea.ac.kr)

Research Professor, Future and Fusion Lab of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

***정회원, 상명대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: jonpark@smu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Sangmyung University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3324, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: g-zi@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Architectural&Environmental Engineering, Korea University

Fig. 1. Operation of Jack-up Barge

잭업바지선은 크게 선체, 레그 그리고 스퍼드캔으로 구성된 해상구조물이다. 잭업바지선은 기존 부유식 바지선과 달리, 해저면에 레그와 스퍼드캔을 해저면에 고정 한 후(Fig. 1(a)), 선체를 수면 위로 인상함으로써(Fig. 1(b)), 해상작업의 안정성을 확보한다. 이 과정에서 스퍼드캔은 선체 및 레그에서 전달되는 모든 수직력과 모멘트를 지반에 전달한다.

스퍼드캔의 형상과 폭은 해저지반 특성에 따라 달라진다. 연약지반의 경우, 스퍼드캔이 관입 되고 프리로딩에 대한 하부 접지면적을 100% 확보할 수 있다. 따라서, 연약지반에서의 스퍼드캔은 접지면적 확보 및 관입에 대한 저항을 위해, 면적이 넓은 확대기초가 유리하게 작용한다.

암반지반은 단단한 암석으로 이루어져 스퍼드캔의 관입이 어렵다. 이 경우, 관입이 용이한 연약지반과 달리 프리로딩에 대한 하부 접지면적을 100% 확보하기 어렵다. 접지면적의 손실은 스퍼드캔에 편심모멘트를 유발한다. 스퍼드캔의 면적이 커질수록 편심모멘트가 크게 작용하기 때문에 스퍼드캔의 폭을 줄이는 것이 유리하다. 또한 암반지반에서 지지를 용이하게 하기 위해, 일반적으로 하부 중앙이 원뿔 형상인 췌기기초가 적용된다.

SNAME (2008) 지침에서는 스퍼드캔 직경크기(D)와 관입깊이(H)의 비율에 대한 가이드라인을 제공하고 있으며, 이는 각각 스퍼드캔의 편심모멘트와 수평하중에 직접적인 영향을 끼친다. 이러한 직경의 크기 및 형상을 반영한 지지력 변화는 Kong and Mark (2013), Yoo and Park (2016), Hossain and Stainforth (2017)에서 실험을 통해 검증된 바 있다. Martin and Houlby (2000)는 모멘트와 하중을 동시에 고려한 수치해석을 진행하여 안정성을 평가하였다. Yu and Zhang (2019)에서는 스퍼드캔 관입 시, 확대기초와 췌기기초 등 형상별로 수치해석을 통해 수직하중과 편심모멘트의 변화를 비교하였다. 결과에 따르면, 확대기초형 스퍼드캔의 편심이 췌기기초 스퍼드캔보다 더 크게 나타났다.

Park (2021), KOWP (2021)에 따르면 전 세계적으로 해상 풍력발전기 설치가 지속적으로 늘어나는 추세이며 국내 해상풍력 설치사업도 활발히 진행 중이다. 국내 해상풍력발

Fig. 2. Detachable Spudcan Proposed Structure Using Pin Connection

전기 설치 예정지에는 암반지역 중심의 제주도뿐 아니라 연약지반 중심의 서남해가 존재한다. 앞서 언급한 바와 같이, 각 지반 특성에 따라 스퍼드캔의 형상은 달라지기 때문에, 다양한 해저지반에서 잭업바지선의 운용이 가능한 스퍼드캔 설계가 필요하다. 종래 스퍼드캔의 교체는 잭업바지선을 부두로 재이동(re-docking)시켜 일체형으로 결속된 형태를 해체하고, 적합한 형상의 스퍼드캔으로 교체해야 한다. 이는 풍력발전기의 작업중단 및 작업기간 증가를 초래한다.

Lee (2013)은 연결핀으로 탈부착 가능한 스퍼드캔을 갖는 잭업 플랫폼 구조를 제시하였다(Fig. 2). 본 탈부착 구조에서는 핀이 레그와 푸팅을 관통하여 연결 및 지지역할을 한다. 핀 탈착 방식을 이용하면 지반 특성별 스퍼드캔을 해상 또는 육상에서 편리하게 탈부착할 수 있다. 하지만 이러한 연결구조에는 주로 핀에 과도한 응력을 집중시킬 수 있어 신중한 설계검증이 필요하다.

본 연구에서는 탈착식 스퍼드캔 연결부의 응력집중을 개선하기 위한 두 가지 보강안을 제시하였다. 첫 번째 보강안에서는 레그에 전달되는 잭업바지선의 하중을 스퍼드캔으로 분산시키기 위해, 레그 하단에 링플레이트(하부링)가 추가되었다. 두 번째 보강안에서는 지지면 손실에 의해 작용하는 편심모멘트를 제어하고 레그로 하중을 분산시킬 수 있도록 레그상단에 링플레이트(상부링)가 추가되었다. 두 보강안의 효과를 검증하기 위한 유한요소 해석검증과 모형 실험을 진행하였다.

2. 탈착식 스퍼드캔 보강안의 연구 방법

2.1 탈착식 스퍼드캔의 링플레이트 보강구조

탈착식 스퍼드캔의 연결부인 핀에는 많은 응력이 집중된다. 핀에 유발되는 응력을 저감시키기 위해 레그 하단에 링플레이트(하부링)를 추가하였으며, 이에 대한 형상을 Fig. 3(a)에 도시하였다. 하부링은 레그에서 전달되는 수직하중

Fig. 3. Detachable Mechanism of LRSS and ULRSS

을 지지하고 스퍼드캔 전체로 분산시킬 수 있다. 또한 하부링의 응력을 분산시키기 위해, 스퍼드캔 상부 레그 외부에 링플레이트(상부링)를 추가로 보강한 스퍼드캔을 제시하였으며, 그 개념도는 Fig. 3(b)에 도시하였다. 본 연구에서는 상기와 같은 두 가지 보강안의 구조 특성을 검토하였으며, 다음과 같이 명명한다.

- 1안: Lower Ring Supported Spudcan (LRSS, 하부링 지지구조)
- 2안: Upper & Lower Ring Supported Spudcan (ULRSS, 상·하부링 지지구조)

LRSS는 크게 레그와 보강재와 푸팅과 캔 및 핀 그리고 하부링으로 구성된다. 하부링 보강재는 캔과 푸팅에 부착하여 일체거동 하도록 설계하였으며, Fig. 3(c)처럼 핀에 의해 푸팅-캔-하부링과 레그가 분리된다.

ULRSS는 LRSS의 구성요소에 상부링이 추가된 구조이다. 상부링은 편심모멘트에 의한 응력을 효과적으로 레그에 분산시키기 위해 레그에 부착되었다. ULRSS는 Fig. 3(d)처럼

푸팅-캔-하부링과 레그-상부링이 분리된다.

스퍼드캔은 $8,600 \times 6,600 \text{ mm}^2$ 면적의 직사각형 형태로 설계되었다. 지반조건에 따른 탈부착 구현을 위해 레그와 푸팅-캔-하부링 두 구조는 90° 의 등간격으로 설치되는 핀으로 연결된다. 레그와 푸팅의 내부에는 각각 20° 의 등간격으로 방사형 보강재와 격자형 격벽이 설치된다.

스퍼드캔은 Korean Register (2018a) 이동식 해양구조물 규칙에 따라 1차 구조 부재로 분류된다. 여기서 1차 구조부재에 사용되는 강재는 설계온도에 따른 충격에너지 기준을 만족해야 한다. 본 연구에서의 스퍼드캔은 설계기준온도 0°C 를 기준으로 설계되었다. 이에 따라 각 부재별로 선정된 강종은 다음 Table 1과 같다. Korean Register (2018b)의 강선 규칙에서는 강종의 허용응력이 등가응력(Von Mises Stress)을 기반으로, 정하중은 항복응력의 70% 그리고 조합하중은 90%로 제시되었다. Korean Register (2018a)의 이동식해양구조물 규칙에서 제시된 해상구조물의 부식여유 두께를 반영하여, 외기와 접하는 푸팅과 레그 및 상·하부링은 2.5 mm 감소된 두께로 검증하였다.

Table 1. Specifications of the Structural Members

Item	Thickness [mm]	Material	Yield Strength [MPa]	Allowable stress [MPa]	
				Static Load**	Combined Load***
Footing	70	SM570	390	273	351
Can	70		430	301	387
Leg	50				
Lower Ring	100				
Upper Ring	100				
Pin	400*	34CrNiMo6	600	420	540

* Diameter, ** Yield Strength 70%, *** Yield Strength 90% (Korean Register, 2018b)

Table 2. Classification of Loads

Load No.	Load 1	Load 2	Load 3	Load 4	Load 5
Load Area					

2.2 스퍼드캔의 설계검토

2.2.1 설계하중 및 하중조합

본 연구의 주요 목적은 보강안의 효과를 비교하는 것이기 때문에 해저 지반은 모두 동일하게 서남해 연약지반으로 가정하였다. 서남해 지역의 해저 지반 조사에 따라 해수면 깊이는 60 m 그리고 스퍼드캔이 8 m까지 관입된 상태를 극한상태로 선정하였다. 해수면 아래의 68 m에서 스퍼드캔에 작용하는 수압 및 토압은 다음 Eqs. (1) and (2)를 통해 각각 0.67 MPa와 0.09 MPa로 산출되었으며, 두 압력의 합을 Load 1으로 명명하였다. 여기서 σ_w 는 수압, σ_p 는 토압, h_p 는 관입깊이, h_w 는 수심, W_{sea} 는 해수단위중량이다.

$$\sigma_w = (h_w + h_p) \times W_{sea} \quad (1)$$

$$\sigma_p = h_p \times W_{sea} \quad (2)$$

대상 책임바지선의 하중 지지 용량(bearing capacity)은 최근 해상풍력터빈의 중량을 고려하여 13,000 tonf으로 결정되었다. 여기에, 레그 및 책하우스 그리고 선체에 적재되는 구조물을 고려하여, 스퍼드캔의 설계 수직력은 5,000 tonf로 결정되었다.

설계 수직력은 스퍼드캔 지지면에 따라 압력으로 환산하여 작용하도록 하였다. Load 2는 설계 수직력을 스퍼드캔이 전면으로 지지하는 조건을 의미하며, 이는 0.86 MPa로 산출되었다. Load 3, 4 그리고 5는 불균일 지반으로 인해 지지면이 손실되어 설계 수직력이 편심 지지 되는 조건을 고려하였으며, 이에 대한 하중방향은 Table 2에 도시하였다. Korean

Register (2018a)에서는 편심하중에 의한 설계법이 부재한 상황이지만, DNVGL-OS-C201 (2015) 지침에서는 편심하중을 다음 Eq. (3)과 같이 고려하도록 권장하고 있다.

$$q = \frac{F_v}{0.5\pi R^2} \quad (3)$$

여기서 q 는 설계압력, R 은 스퍼드캔 하면의 등가 반지름, 그리고 F_v 는 설계 수직력을 의미한다.

즉, 이 식은 편심하중을 고려하기 위해 설계 수직력을 스퍼드캔 하판의 절반 면적이 지지하는 것을 의미한다.

모든 하중조합은 관입 상태로 가정하여 수압 및 토압 (Load 1)은 모든 하중조합에 동일하게 적용되었다. 여기에, 설계 수직력의 지지면에 따른 하중조합을 Table 3과 같이 구성하였다.

2.2.2 유한요소해석 모델링

보강안의 효과를 검토하기 위해 LRSS와 ULRSS 2가지 구조에 대하여 ABAQUS 소프트웨어를 활용한 유한요소해석을 수행하였다. 모델링된 스퍼드캔은 Figs. 4(a), 4(b)와 같으며, 경계조건을 함께 도시하였다. 본 해석의 경계조건은 레그 상단부에서 고정으로 설정하여, 레그에서 전달되는 하중은 스퍼드캔 지지력과 평형을 이루는 것으로 가정하였다. 스퍼드캔의 상세구조는 Fig. 5와 같으며, 핀과 상·하부 링과 캔 및 레그는 8절점 C3D8 Solid 요소로 구성하였고, 푸팅은 4절점 S4R5 Shell 요소로 구성하였다. 개별요소의

Table 3. Load Combinations

Load Case (LC)	Load Combinations
LC 1	Load 1 + Load 2, stationary load
LC 2	Load 1 + Load 3, combined load
LC 3	Load 1 + Load 4, combined load
LC 4	Load 1 + Load 5, combined load

(a) Geometry and Boundary Condition of LRSS

(b) Geometry and Boundary Condition of ULRSS

Fig. 4. FE Models of the Detachable Spudcans

(a) Members of LRSS

(b) Members of ULRSS

Fig. 5. Details of FE Models

기본 크기는 판의 최소 두께인 50 mm로 설정하였다. 모든 사용 강종의 밀도와 탄성계수 및 푸아송비는 각각 7,850 kg/m³, 210,000 MPa, 0.3으로 설정하였다.

종래의 일체형 스퍼드캔과는 달리, 탈착식 스퍼드캔은 푸팅-캔-하부링과 레그가 분리되기 때문에 해석에서 접촉조건을 반영하여야 한다. 따라서 본 모델은 ABAQUS ‘Surface-to-surface’ 기능을 이용하여 레그 외부를 ‘Master Surface’로 설정하고 캔 내부를 ‘Slave Surface’로 설정하여 접촉조건을 설정하였다. Shell 요소로 모델링된 푸팅과 Solid 요소인 캔은 ‘Shell to Solid Coupling’을 이용해 연결하였다.

2.3 축소 모형 실험 방법

상·하부링의 보강 효과를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 실제 구조제원은 제작과 실내실험 대형장비 확보에 어려움이 있어, 1/10의 스케일의 축소 모형(860 × 660 mm²) 실험을 수행하였다. 본 실험은 Byun (2021)에서 수행되었으며, Byun and Zi (2020), Lee and Zi (2021)에서 선행연구를 진행하였다. 상부링의 유무에 따라 LRSS 모델과 ULRSS 모델로 구분하였다. 앞서 언급된 바와 같이, 본 실험의 목적은 상부링 보강 여부에 따른 응력 감소 효과를 확인하는 것이다. 따라서 두 구조에서 동일하게 작용하는 핀 연결부는 축소모

형 실험체에서 생략되었다. 실험체의 푸팅과 레그는 용접되지 않고, 분리가 가능한 구조로 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 강종은 용접구조용 압연강재 SM490A 강종을 사용하였다. SM490A의 항복강도, 탄성계수는 각각 325 MPa, 210,000 MPa이다.

편심하중 재하를 위해 스퍼드캔을 뒤집어 상부에서 액추에이터와 가력장치를 사용해 좌측 하판에 0.1 mm/sec의 속도로 구조물의 파괴가 발생할 때까지 가력하였다. 두 모델의 레그에서 응력완화 효과를 비교하기 위하여 스트레인 게이지는 하중이 가력되는 좌측 레그에 부착하였다. 경계조건을 구현하기 위해 Fig. 6(a)와 같이, 레그 상단을 베이스 플레이트에 용접하였고, 이 베이스 플레이트는 고정판에 볼트 체결하였다. 이때 실제 실험 전경 사진은 Fig. 6(b)와 같다.

본 실험모델의 응력집중 위치와 하중 전달 메커니즘을 확인하기 위해 유한요소 해석을 진행하였다. LRSS와 ULRSS

해석모델은 축소모형과 동일한 상·하부링과 푸팅과 레그 및 레그 하판으로 구성하였으며 각각 Figs. 7(a), 7(b)에 나타내었다. 볼트와 베이스 플레이트의 모델링은 생략하고 레그 상부를 완전고정의 경계조건을 설정하였다. 분리가 가능한 푸팅-캔 하부링과 레그의 접촉면은 ABAQUS 내에 ‘Surface-to-surface’ 기능으로 접촉조건을 반영하였다.

3. 연구 결과

3.1 탈착식 스퍼드캔 유한요소해석 결과

3.1.1 탈착식 스퍼드캔 보강안의 설계 검토

탈착식 스퍼드캔의 보강안으로 제시된 LRSS와 ULRSS는 허용응력설계를 등가응력 기준으로 검토하였다. Table 4에서 LC별로 발생응력과 허용응력대비 발생응력을 백분율로 표기하였다. LRSS의 정하중 상태인 LC 1에서는 푸팅과 레그 및 하부링의 응력이 허용응력 대비 각각 39%, 55%,

(a) Schematic Layout of Test Set-up

(b) Actual Photo of Test Set-up

Fig. 6. Experimental Set-up

(a) Side View of LRSS

(b) Side View of ULRSS

Fig. 7. FE Models of The Detachable Spudcan Models Used for Experiments

Table 4. Design Reviews for LRSS and ULRSS

Division			LC 1 Load 1 + 2		LC 2 Load 1 + 3		LC 3 Load 1 + 4		LC 4 Load 1 + 5	
			Stress [MPa]	Stress/ Allowable stress [%]	Stress [MPa]	Stress/ Allowable stress [%]	Stress [MPa]	Stress/ Allowable stress [%]	Stress [MPa]	Stress/ Allowable stress [%]
Lower Ring Supported Spudcan (LRSS)	Footing	Top	106	39	341	97	145	41	261	74
		Side	68	25	98	28	100	28	98	28
		Bottom	77	28	196	56	164	47	179	51
	Leg		165	55	495	128	399	103	433	112
	Pin		154	51	498	129	366	95	417	108
	Lower Ring		109	36	352	91	299	77	348	90
Upper & Lower Ring Supported Spudcan (ULRSS)	Footing	Top	85	31	169	48	121	34	246	70
		Side	68	25	98	28	100	28	98	28
		Bottom	76	28	125	36	119	34	120	34
	Leg		128	43	386	98	331	86	372	96
	Pin		112	37	386	99	266	69	269	70
	Lower Ring		107	36	339	88	273	71	303	78
	Upper Ring		62	21	195	65	159	53	175	59

(a) Deformed Shape and Stress Contour

(b) Stress Contour of Leg

Fig. 8. Stress Distribution and Deformed Shape of of LRSS Model

36% 발생하여 허용응력 내로 만족하였다. 하지만 조합하중 상태인 LC 2, LC 3, LC 4에서는 레그 및 핀 연결부에서 허용응력을 초과하였다. 이때, 가장 큰 응력을 발생시키는 하중조합은 LC 2이며, 이때 레그 및 핀 연결부의 응력은 각각 허용응력 대비 128 그리고 129%이었다.

반면, ULRSS는 모든 하중조건에서 허용응력 기준을 만족하였다. LC 2의 레그 및 핀 연결부에서 허용응력 대비 발생 응력이 각각 98 그리고 99%로 계산되었다. 이는 동일한 조건에서 LRSS의 응력 대비 약 20%가 감소된 수치이다.

3.1.2 상 · 하부 링플레이트의 응력완화 메커니즘

LRSS와 ULRSS의 보강 메커니즘 차이를 분석하였다.

LRSS에서 LC 2의 하중조합은 푸팅에 편심모멘트를 초래하여 Fig. 8(a)와 같은 변형 거동이 나타난다. 탈착식 스퍼드캔의 레그와 푸팅-캔-하부링은 서로 분리되기 때문에, 응력 전달이 온전히 이루어지기 어렵다. 따라서 LRSS는 푸팅-캔-하부링과 레그를 체결하는 핀에 응력집중이 발생하게 되며, 이와 같은 편심모멘트에 대하여 저항하기 어렵다. Fig. 8(b)에서 LRSS의 레그 응력분포를 도시하였으며, 핀 부근에서 응력집중이 크게 발생한 것을 확인하였다.

ULRSS는 상부링의 보강으로 푸팅의 상면에 하중 전달이 LRSS보다 원활하게 이루어진다. Fig. 9(a)는 ULRSS의 변형 형상이다. Fig. 8(a)의 LRSS에 비해 푸팅의 끝단의 z축 변위가 24 mm에서 20 mm로 20% 감소하였다. 이는 상부링의

(a) Deformed Shape and Stress Contour

(b) Leg Stress Contour

Fig. 9. Stress Distribution and Deformed Shape of of ULRSS Model

도입이 스퍼드캔의 편심모멘트를 소폭 제어할 수 있음을 의미한다. Fig. 8(b)의 LRSS 레그와 비교하면, Fig. 9(b)의 ULRSS의 핀 부근에서 응력집중이 완화되었음을 확인하였다. 이때 레그는 상부링에 의해 지지되면서 응력집중은 상부링 근처에서 발생했다. 또한 분리된 레그에 응력이 효과적으로 분산되어, 레그 상부에서 응력분포 범위가 더욱 크게 발생하였다.

3.2 축소모형실험 결과

3.2.1 실험 결과의 분석

본 실험에서 측정된 하중-변위 곡선을 Fig. 10에 도시하였다. 하중-변위 곡선의 결과는 Fig. 11의 시험체의 변형 형상과 Fig. 12의 국부 부재의 파괴 위치와 함께 분석하였다. 실험체의 크기가 1/10로 축소됨에 따른 실험 결과의 영향을 확인하기 위해, LC 2의 실제크기 유한요소모델의 변위와 비교하였다. 축소모형 실험에서는 2 mm 이후 범위에서 항복이 발생하였다. LRSS는 편심하중이 재하됨에 따라 Fig. 11(a)처럼 푸팅에 변형이 발생하였다. 스퍼드캔 푸팅상부가 레그면과 수직으로 접촉하여 Fig. 11(b)와 같이 레그표면에 국부변형을 유발하였다. LRSS는 86 kN (A점)의 최대 하중에 도달하였을 때, Fig. 12(a)처럼 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하였다. 이후, B점까지의 거동에서 레그와 레그에 부착된 레그 하판이 점진적으로 파괴되었다(Fig. 12(b)). B점 이후에는 하중이 소폭 증가하는 경향이 나타났다. 이는 Figs. 12(a), 12(b)처럼 하중을 더 이상 지지할 수 없는 상기의 국부부재들이 파괴되고, LRSS의 푸팅 부재가 레그를 직접 지압했기 때문이다.

이 결과는 LRSS는 편심 지지조건에서 가장 먼저 푸팅의 파괴(1차 파괴모드)를 야기함을 보여준다.

ULRSS는 Fig. 11(c)의 푸팅에서 변형이 육안으로 확인되지 않았으며, Fig. 11(d)에 보이는 바와 같이 레그에 국부변형이 발생하지 않았다. ULRSS의 최대 하중은 104 kN (C점)이었으며, 이는 LRSS의 최대 하중 대비 120% 수준이다. ULRSS는 LRSS와 다른 파괴 거동을 보여준다. ULRSS는 LRSS와는

Fig. 10. Load-Displacement Curve for Experiment and Experimental FEA Results

다르게 최대 하중에 도달하였을 때, Fig. 11(c)처럼 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하지 않았다. 대신에 C점에서 Fig. 11(d)의 레그와 레그 하판에서 파괴가 발생하여 하중이 D점까지 감소하였다. 이후, 상·하부링의 지속되는 구조 지지 효과로 인하여 다시 하중이 재하되었다. Table 4에서 확인되었듯이, 상부링의 도입(ULRSS)은 편심 지지조건에서 하판의 응력을 완화하고, 푸팅에 작용하는 하중을 레그에 분산시킬 수 있다. 이에 따라, 본 실험의 ULRSS에서도 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하지 않은 것으로 판단된다. 결과적으로, ULRSS는 편심 지지조건에서 1차 파괴모드를 푸팅이 아닌 레그로 유도할 수 있다. Fig. 12(c)처럼 하부링-푸팅 부재가 파괴되지 않았다. 푸팅 내부 레그의 응력은 상부링에 전달되어 푸팅과 레그의 응력이 완화된 것을 확인할 수 있다. ULRSS 실험의 파괴는 레그와 연결된 Fig. 12(d)의 레그 하판에서 발생하였다. 이는 결과적으로 상부링에 의해 레그에 더욱 많은 응력이 전달되었기 때문으로 판단된다.

LRSS는 편심하중이 재하됨에 따라 Fig. 11(a)처럼 푸팅에

L
R
S
S

M
O
D
E
L

(a) Footing Deformation of LRSS Model

(b) Leg Deformation of LRSS Model

U
L
R
S
S

M
O
D
E
L

(c) Footing Deformation of ULRSS Model

(d) Leg Deformation of ULRSS Model

Fig. 11. Deformed shape of The Specimens

L
R
S
S

M
O
D
E
L

(a) Footing-Lower Ring

(b) Leg-Leg Plate

U
L
R
S
S

M
O
D
E
L

(c) Footing-Lower Ring (Non Failure)

(d) Leg-Leg Plate

Fig. 12. Failure Parts of The Specimens

변형이 발생하였다. 스퍼드캔 푸팅상부가 레그면과 수직으로 접촉하여 Fig. 11(b)와 같이 레그표면에 국부변형을 유발하였다. LRSS는 86 kN (A점)의 최대 하중에 도달하였을 때, Fig. 12(a)처럼 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하였다. 이후, B점까지의 거동에서 레그와 레그에 부착된 레그 하판이 점진적으로 파괴되었다(Fig. 12(b)). B점 이후에는 하중이 소폭 증가하는 경향이 나타났다. 이는 Figs. 12(a) 12(b)처럼 하중을 더 이상 지지할 수 없는 상기의 국부부재들이 파괴되고, LRSS의 푸팅 부재가 레그를 직접 지압했기 때문이다. 이 결과는 LRSS는 편심 지지조건에서 가장 먼저 푸팅의 파괴(1차 파괴모드)를 야기함을 보여준다.

ULRSS는 Fig. 11(c)의 푸팅에서 변형이 육안으로 확인되지 않았으며, Fig. 11(d)에 보이는 바와 같이 레그에 국부변형이 발생하지 않았다. ULRSS의 최대 하중은 104 kN (C점)이었으며, 이는 LRSS의 최대 하중 대비 120% 수준이다. ULRSS는 LRSS와 다른 파괴 거동을 보여준다. ULRSS는 LRSS와는 다르게 최대 하중에 도달하였을 때, Fig. 11(c)처럼 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하지 않았다. 대신에 C점에서 Fig. 11(d)의 레그와 레그 하판에서 파괴가 발생하여 하중이 D점까지 감소하였다. 이후, 상·하부링의 지속되는 구조 지지 효과로 인하여 다시 하중이 재하되었다. Table 4에서 확인되었듯이, 상부링의 도입(ULRSS)은 편심 지지조건에서 하판의 응력을 완화하고, 푸팅에 작용하는 하중을 레그에 분산시킬 수 있다. 이에 따라, 본 실험의 ULRSS에서도 푸팅과 하부링에서 파괴가 발생하지 않은 것으로 판단된다. 결과적으로, ULRSS는 편심 지지조건에서 1차 파괴모드를 푸팅이 아닌 레그로 유도할 수 있다. Fig. 12(c)처럼 하부링-푸팅 부재가 파괴되지 않았다. 푸팅 내부 레그의 응력은 상부링에 전달되어 푸팅과 레그의 응력이 완화된 것을 확인할 수 있다. ULRSS 실험의 파괴는 레그와 연결된 Fig. 12(d)의 레그 하판에서 발생하였다. 이는 결과적으로 상부링에 의해 레그에 더욱 많은 응력이 전달되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 13. Load-Strain Curve for Experiment and Experimental FEA Results

하중이 가해지는 좌측의 레그에 대한 하중-변형을 곡선을 Fig. 13에 도시하였다. LRSS의 경우 레그 좌측에서 60 kN까지 압축거동을 보였다. 60 kN 하중을 초과하였을 때는 인장거동으로 변환되었다. LRSS는 앞서 설명된 바와 같이, 하중을 더 이상 견디지 못한 스퍼드캔 푸팅상부가 레그면과 수직으로 접촉하여 국부변형이 발생하였다(Fig. 11(b)). 이러한 국부변형은 레그 좌측의 게이지 부근에서 발생하였으며 인장거동을 초래한다.

이와 같은 변형부의 압축-인장 변화는 유한요소해석을 통해 확인되었다. ULRSS의 경우 100 kN까지 압축거동을 보였다. 이는 LRSS와 달리 Fig. 11(d)의 레그에 손상이 일어나지 않고 상부링에 의해 편심하중이 안정적으로 지지되었기 때문이다. 편심 지지조건에서 ULRSS는 레그에 응력이 더욱 효과적으로 전달된 것을 알 수 있다.

3.2.2 축소모형실험 유한요소해석 분석

LRSS와 ULRSS 시험체의 유한요소해석 결과는 Fig. 10의 하중-변위곡선과 Fig. 13의 하중-변형을 곡선에 각각 점선으로 표시하였다. 실험결과와 유한요소해석 결과는 탄성구간에서 유사한 기울기를 보였다. 축소모형 실험에서의 국부 파괴 위치를 분석하기 위해, 축소모형 유한요소해석 결과의 응력집중 위치를 확인하였다. Figs. 14(a) 14(b)는 변위하중 3 mm에서 LRSS 유한요소모델의 응력분포 결과이다. 레그와 하부링이 맞닿는 위치에서 국부적인 항복이 일어났다. 이는 실험에서 파괴가 발생한 Fig. 12(a)의 하부링-푸팅 위치와 일치한다. LRSS는 최종적으로 레그하부에 항복이 집중

Fig. 14. Stress Distributions of The LRSS Experimental Model (Displacement Load: 3 mm)

Fig. 15. Stress Distributions of The ULRSS Experimental Model (Displacement Load: 3 mm)

되며, Fig. 12(b)와 같이 레그 하판 파괴가 유도되었다. ULRSS의 유한요소해석 결과는 하중변위 3 mm 지점에서 Figs. 15(a), 15(b)에 도시하였다. LRSS와 달리, ULRSS는 하부링과 레그 하판에 응력집중이 일어나지 않았으며, Fig. 12(c)처럼 하부링-푸팅 부재가 파괴되지 않았다. 푸팅 내부 레그의 응력은 상부링에 전달되어 푸팅과 레그의 응력이 완화된 것을 확인할 수 있다. ULRSS 실험의 파괴는 레그와 연결된 Fig. 12(d)의 레그 하판에서 발생하였다. 이는 결과적으로 상부링에 의해 레그에 더욱 많은 응력이 전달되었기 때문으로 판단된다.

이처럼 편심 지지조건에서 축소모형실험과 유한요소해석을 통해 보강안의 효과를 확인하였다. 단, 최대 하중 이후의 급격한 하중 감소, 즉, 취성적 파괴를 개선하기 위한 후속 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 탈착식 스퍼드캔 연결부의 응력집중을 개선하기 위해 스퍼드캔에 상·하부에 링플레이트(상·하부링)를 보강한 새로운 탈착식 스퍼드캔을 제시하였다. 보강안의 효과를 확인하기 위해 유한요소해석을 이용한 구조검토를 진행하고 실험을 진행하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 하부링 지지구조(LRSS) 검토 결과, 하중지지면적 50% 편심 지지조건에서 허용응력이 최대 129%로 초과되

었다. 반면에 상·하부링 지지구조(ULRSS)에서는 허용응력을 100% 이내로 만족시켜 보강안의 적절성을 확인하였다.

- (2) 유한요소해석을 통해 상·하부링 도입에 따른 응력완화 메커니즘을 확인하였다. 상부링은 편심 지지로 발생하는 레그의 응력집중을 분산시켰다. 레그의 발생 응력은 LRSS의 허용응력대비 128%에서 98%로 감소하였다.
- (3) 편심 지지조건을 구현한 실험에서 ULRSS의 최대 항복 하중은 LRSS 대비 120%로 구조 강도가 향상되었다. 상부링이 보강됨에 따라 푸팅의 변형이 감소하였으며, 편심모멘트를 제어하는 것을 검증하였다.
- (4) 축소모형실험에서 LRSS는 푸팅-하부링 그리고 레그-레그 하판 순으로 파괴가 발생하였다. ULRSS는 푸팅-하부링에서 파괴가 발생하지 않았으며, 상부링 보강에 의해 최초 파괴 부재 위치가 레그-레그 하판으로 변환되었다.
- (5) 상부링의 도입은 상대적으로 강도가 낮은 부재들의 응력을 가장 항복강도가 높은 레그로 전달하여 허용응력 저감에 유리하다. 이를 통해, 상부링이 도입된 ULRSS의 구조보강 및 하중 전달 메커니즘은 LRSS보다 효과적임을 실험을 통해 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20183010025580)입니다.

본 연구의 실험은 고려대학교 석사졸업 변정안 학생이 학위과정 중에 수행하였습니다.

References

- Byun, J. (2021). *FEA and experimental evaluation of detachable spudcan considering contact conditions: Reinforcement proposal*. Master's thesis, Korea University, Seoul, Korea.
- Byun, J., and Zi, G. (2020). A study on reinforcement of the detachable spudcan connection. *Domestic Conference on Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Busan, Korea, Vol. 24, No. 2, p. 49.
- DNVGL-OS-C201. (2015). *Structural design of offshore units-WSD method*. Det Norske Veritas.
- Hossain, M., and Stainforth, R. (2017). Experimental investigation on the effect of spudcan shape on spudcan-footprint interaction. *Applied Ocean Research*, Vol. 69, pp. 65-75.

- Jang, B. (2013). Introduction of wind turbine installation vessel (WTIV). *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 26, No. 2, pp. 25-30.
- Kong, V., and Mark, J. (2013). Experimental study of effect of geometry on reinstallation of jack-up next to footprint. *J. Canadian Geotechnical*, Vol. 50, No. 5, pp. 557-573.
- Korea offshore wind power (KOWP). (2021). *Offshore Wind Power Development Project in the Southwest Sea*. Retrieved July 23, 2021, from <http://www.kowp.co.kr/company/establish02.asp>
- Korean Register. (2018a). *Rules And Guidance For The Classification of Mobile Offshore Units*. Busan, Korea.
- Korean Register. (2018b). *Rules And Guidance For The Classification of Steel Ships*. Busan, Korea.
- Lee, C. (2013). *Jack-up Platform with Attaching And Detaching Spud Can and Attaching And Detaching Method of The Spud Can*. Patent of Korea, 10-2013-0005787.
- Lee, S., and Zi, G. (2021). Structure behavior of a ring supported detachable type jack-up barge footing. *Domestic Conference on Korea Wind Energy Association*, Jeju, Korea, pp. 259-260.
- Martin, C., and Houlsby, G. (2000). Combined loading of spudcan foundations on clay: Laboratory tests. *Géotechnique*, Vol. 50, No. 4, pp. 325-338.
- Park, M. (2021). Current status and prospective of offshore wind power to achieve Korean renewable energy 3020 plan. *J. Korean Soc Environ Eng*, Vol. 43, No. 3, pp. 196-205.
- Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). (2008). *Guideline for site specific assessment of mobile jack-up units*. The society of naval architects & marine engineers, New Jersey, City, NJ, USA.
- Yoo, J., and Park, D. (2016). Spudcan design under combined load in southwestern sea of Korea. *Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 17, No. 10, pp. 13-22.
- Yu, L., and Zhang, H. (2019). Finite element analysis and parametric study of spudcan footing geometries penetrating clay near existing footprints. *J. Marine Science and Engineering*, Vol. 7, No. 6, p. 175.

Received	August 12, 2021

Revised	August 17, 2021

Accepted	September 7, 2021