

대형 해양 자켓의 직립 안정성 고찰

조철희* · 김병환** · 정현***
*인하대학교, **현대중공업(주), 오션스페이스(주)

An Upending Stability for Offshore Jacket

C.H. Jo*, B.H. Kim**, H. Jeong***
*Inha University, Korea, **Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., Korea, ***Ocean Space Inc.

KEY WORDS: Offshore jacket 해양 자켓, upending 직립, launching 진수, hook load 훅하중

ABSTRACT: As the upending is one of the critical steps in the installation of offshore structure, detail procedure of upending operation is studied in the paper. For larger offshore structure installation, launching method is often applied. However after launching, the upending process is to be followed. To ensure successful upending operation, detail process is analysed considering various factors affecting on the operation including reserved buoyancy, free flotation position, seabed clearance, ballast and hook load. To investigate the influence of each factor on the procedure, twelve numerical jacket models with various dimensions are simulated and studied. From the study, it is revealed that the increase of buoyancy and decrease of self weight generate a large seabed clearance. The low seabed clearance during flooding creates higher hook load and height. The paper also introduces a guideline for the related structure design and construction with the effects of contribution factors in the upending operation.

1. 서 론

해양구조물을 설계하는데 중요한 요소 중의 하나는 구조물의 설치방법이다. 대형 자켓 구조물 설치 방법으로 해양 진수법을 사용하는데, 진수 후 자켓을 수직으로 일으켜 세워 정확한 위치에 놓아야 한다. 본 논문은 자켓 직립에 영향을 미치는 각종 요소를 분석하여 직립 과정을 해석하며 각 요소가 직립 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구는 그 특성상 많은 데이터와 분석이 요구되고 대형구조물의 안전한 설치에 매우 중요한 부분이지만 관련 논문이나 자료가 부족하여 다양한 크기 및 조건을 선정하여 해석을 수행되었다. 특히 직립 해석 시 그 중요도가 큰 예비 부력, 초기 부양 위치, 해저면과의 거리 그리고 안정성을 고려하여 연구가 수행되었다. 주요 요소에 의한 안정성이 확보되면 이를 근거로 회전각에 대한 훅 로드, 밸러스트 양, 해저면과의 거리를 조사하여 구조물의 안정성을 확보하였다. 본 연구를 통해 대형 해양구조물의 직립 시 고려되어야 할 특성과 시뮬레이션을 통한 안정성을 고찰함으로써 안정적인 직립의 일반적인 기준을 제시한다

2. 해양 자켓의 직립 해석

2.1 크레인 바지를 사용한 침수 직립

제1저자 조철희 연락처: 인천시 남구 용현동 253
032-860-7342 chjo@inha.ac.kr

해양 구조물이 대형일 경우 크레인 바지 단독으로는 직립 작업이 불가능하여 구조물내부를 침수시키고 제어함으로써 수직 상태로 회전을 시킨다. 크레인바지는 보조작업을 수행한다. 제어 침수만으로 직립 작업을 할 경우에는 적당한 해저면 거리를 확보하기 위해서 일반적으로 과도부력이 자켓 총 중량의 20%이고, 크레인 바지가 직립 작업을 보조하여 훅 로드를 가해질 경우에는 과도 부력이 10 - 15% 정도를 사용한다. 진수시의 과도 부력이 약 10% 정도이므로 보조 부력 탱크를 부착하지 않고 직립 작업이 가능하다. (한국과학기술원a, 1985, 한국과학기술원b, 1985)

2.2 고려 사항

2.2.1. 예비 부력과 초기 부양 위치

예비 부력은 보통 자켓 자중의 10% - 20% 정도의 예비 부력이 요구되어진다. 예비 부력을 %로 나타낼 때 식 (1)과 같다.

$$\text{예비부력}(\%) = \frac{(\text{Buoyancy} - \text{Jacket Weight})}{\text{Buoyancy}} \times 100 \quad (1)$$

이 예비 부력은 부양 상태에서 자켓의 일부분이 손상되어 침수된다 하더라도 가라앉지 않으며 직립 작업을 수월하게 할 수 있는 이상적인 부양 위치를 가지도록 하기 위해서고 그림 1에서 나타낸 바와 같이 자켓의 한 수직 프레임이 수면위로

평행하게 올라와 있는 상태로 유지시켜야 한다.



그림 1. Free Flotation Position

2.2.2. 해저면과 거리

자켓의 안전을 위하여 직립이 완료될 때까지의 전과정에서 일정한 해저면과의 거리를 유지하여야 하며 해석시 정확한 거리를 산출한다. 보통 3 - 5m 정도를 유지하나, 해저면에 유정 장치나 기타의 해저 장치가 있을 경우에는 이 이상의 값을 가져야 한다. (Hudson, 1984)

2.2.3. 안정성

GM값이 음이면 구조물이 불안정한 상태이며 낮은 GM값의 자켓은 작은 힐링 또는 트리밍 모멘트에 의해 힐이나 트림이 발생하므로 자켓은 양의 큰 GM값을 가질수록 안정하다. 자켓을 θ 만큼 회전시키는데 필요한 모멘트는 식 (2)로서 나타낼 수 있다.

$$\text{Moment} = \text{Jacket Weight} \times \text{GM} \times \sin \theta \quad (2)$$

부양 상태에서 GM값이 10m 이상이면 안정한 상태이며 직립시에 최소한 1m 이상의 GM값을 가지도록 하여야 한다. 양의 큰 GM 값을 가지려면 부력중심이 무게 중심 보다 높게 있어야 하므로 원하는 GM 값이 얻어지지 않는 경우에는 수선면에 많은 부유 멤버(buoyant member)를 설치하여 부력중심을 올려주고 자켓 아래쪽에 침수 양을 늘려 무게중심을 낮추어 준다. 그러나 침수 양을 늘려줄 경우에는 해저면과의 거리가 문제 될 수 있으므로 안정성과 해저면과의 거리가 동시에 만족될 수 있는 최적의 상태를 선택하여야 한다. 자켓은 트림과 힐 방향이 대칭이 아니므로 두 개의 GM이 존재한다. 횡 방향 GM은 roll 안정성을 나타내며 종 방향 GM은 pitch 안정성을 나타내게 된다. (API, 1984, DnV, 1984)

2.2.4. 혹 로드 및 벨레스트

자켓에 가해주는 혹 로드는 크레인의 반경에 따른 허용력을 넘지 않아야 하며 혹 로드로 인해 슬링에 걸리는 최대 슬링 로드는 직립 패드아이의 설계하중이 된다. 각 단계별로 벨레스트 탱크에 침수시키는 양을 보통 부피 대신에 중량으로 나타낸다.

2.2.5. 날씨영역

직립도 진수와 마찬가지로 만족할 만한 가능한 날씨영역 내에서 작업하므로 일반적으로 환경에 의한 영향은 고려하지 않

는다.

2.3 운동 방정식

자켓의 해저면과의 거리와 매 순간 자켓의 안정성이 문제가 된다. 자켓의 순간 안정성은 hydrostatic stability analysis를 통하여 알 수 있으며 이는 종 메타센터릭 높이(GM_L)와 횡 메타센터릭 높이(GM_T)를 구하여 검토한다. 해저면과의 거리는 자켓이 직립되는 운동궤도를 추적함으로써 구해진다.

2.3.1. Slow motion

평형을 깨는 외부의 힘이 가해졌을 때 발생하는 자켓의 운동과 최종위치는 정적평형상태를 기본으로 해석한다. 직립 시 자켓의 운동은 매우 느리게 나타나고 실제 직립 작업은 약 30여 분이 소요되므로 이의 평균적인 각속도를 구해보면 매우 느리므로 정적인 힘(hydrostatic force)들의 함수만을 고려해도 무방하다.

2.3.2. Applied equation

일반적인 선형화된 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$\sum_{j=1}^6 [(m_{ij} + a_{ij})\ddot{x}_j + b_{ij}\dot{x}_j + c_{ij}x_j] = F_i(x, t) \quad (3)$$

여기서,

- m = 구조물 질량 (ton)
- a = 부가질량 (ton)
- b = 동유체감쇄력과 점성항력 계수
- c = 정유체적 복원력계수
- F = 외력(N)

대형자켓과 같이 큰 중량을 가질 경우 직립시의 외력은 상대적으로 작기 때문에 그에 따른 가속도 \ddot{x}_j 는 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 식 (3)은 식 (4)로 생략이 된다.

$$\sum_{j=0}^6 C_{ij}X_j = F_i(x, t) \quad (4)$$

자켓은 강체이고 직립시의 혹 로드나 침수는 전후 대칭적으로 가해지므로 2차원 운동을 가정하면 그림 2에서와 같이 자켓의 위치를 표시하는 X_j 는 평면운동을 나타내는 x와 z 그리고 이 평면 내에서의 회전운동을 나타내는 θ 로서 표시 가능하다.

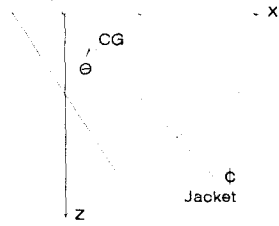


그림 2. Coordinate System

$$\begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xz} & C_{x\theta} \\ C_{zx} & C_{zz} & C_{z\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta z} & C_{\theta\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

위에서 [C] = Hydrostatic restoring force coefficient matrix

{x} = 위치 vector

{F} = Net force vector

자켓의 geometry에 따라 각 순간에서의 자켓의 위치가 주어지면 [C] matrix는 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어 $C_{z\theta}$ 는 θ 방향으로 단위각 만큼 자켓을 회전시켰을 경우 z방향으로 나타나는 복원력이 된다.

2.3.3. Solution

식 (5)로 주어진 평형상태 방정식은 위치 벡터 {x}를 변화시켜 가면서 오른쪽의 힘 벡터가 없어지는 상태까지 시행착오(trial & error)로서 풀게 된다. 이 상태는 자켓의 무게 중심과 부력 중심이 수직선상에 놓이게 되고 상향력(부력과 혹 로드)과 하향력(자켓 중량과 벨러스트)이 일치하는 점을 찾게 된다. 어느 정도의 허용오차 범위 내에 들어오면 계산은 완료된다. 이때의 허용오차는 보통 식 (6)의 값(res)이 정해진 어떤 범위(보통 1.0×10^{-4})내에 들어오도록 한다.

$$Res = \left[\frac{(F_x)_{res}}{W_J} \right]^2 + \left[\frac{(F_z)_{res}}{W_J} \right]^2 + \left[\frac{(M_\theta)_{res}}{W_J \cdot L_J} \right]^2 \quad (6)$$

3. 프로그램 해석

직립 프로그램인 FLOAT는 부양 구조물의 정적인 침수와 직립 해석을 수행 할 수 있으며, 정수 상태에서 구조물에 영향을 미치는 중력과 부력에 의한 힘과 모멘트를 처리한다. 자켓 레그의 직경은 토질 상태에 따른 파일 직경에 따라 결정된다. 해양구조물은 부식이 심하므로 레그 및 부재의 최소 두께는 부재의 강도에 관계없이 0.375inch(9.53mm) 이상을 만족해야 한다. 원형 부재에서는 직경과 두께의 비(D/t ratio)가 90보다 작아야 한다. 세장비(slenderness ratio)는 부재의 직경을 결정하는데 매우 중요하며 자켓 부재의 세장비가 일반적으로 70에서

100 사이의 범위를 가지도록 한다. 자켓은 50m, 75m, 100m, 125m의 4가지 높이를 가지며 각 Model case 별 주요 요목 및 치수는 표 1 - 표 4와 같고 대표적으로 모델 1의 케이스별 치수를 그림 3에 나타내었다.

표 1. Model 1 Jacket Condition

	case 1	case 2	case 3
Jacket Length(M)	50	50	50
Water depth(M)	45	45	45
Orientation	101, 103,	101, 103,	101, 103,
position Leg num.	301	301	301
Sling length(M)	15.0	15.0	15.0
Sling diameter(CM)	10.0	10.0	10.0
Sling attach points	501, 503, 505, 507	501, 503, 505, 507	501, 503, 505, 507
Weight(Ton)	153.513	165.302	174.003
Buoyancy(Ton)	188.339	193.715	196.478
Reserved Buoyancy(%)	18.491	14.667	11.439
C.G for Floating(M) : Z_{CG}	-21.883	-21.618	-21.665
C.B for Floating(M) : Z_{CB}	-21.761	-21.475	-21.469
Initial Pitch Angle(Deg)	7.125	7.125	7.125
Initial C.G : Y_{CG}	-6.443	-6.407	-6.413

표 2. Model 2 Jacket Condition

	case 1	case 2	case 3
Jacket Length(M)	75	75	75
Water depth(M)	67.5	67.5	67.5
Orientation	101, 103,	101, 103,	101, 103,
position Leg num.	301	301	301
Sling length(M)	15.0	15.0	15.0
Sling diameter(CM)	10.0	10.0	10.0
Sling attach points	501, 503, 505, 507	501, 503, 505, 507	501, 503, 505, 507
Weight(Ton)	237.973	253.596	269.374
Buoyancy(Ton)	291.464	299.159	303.916
Reserved Buoyancy(%)	18.353	15.230	11.366
C.G for Floating(M) : Z_{CG}	-32.978	-32.521	-32.604
C.B for Floating(M) : Z_{CB}	-32.760	-32.271	-32.259
Initial Pitch Angle(Deg)	7.126	7.126	7.126
Initial C.G : Y_{CG}	-9.685	-9.608	-9.618

표 3. Model 3 Jacket Condition

	case 1	case 2	case 3
Jacket Length(M)	100	100	100
Water depth(M)	90	90	90
Orientation	101, 103,	101, 103,	101, 103,
position Leg num.	401	401	401
Sling length(M)	15.0	15.0	15.0
Sling diameter(CM)	10.0	10.0	10.0
Sling attach points	601, 603, 605, 607	601, 603, 605, 607	601, 603, 605, 607
Weight(Ton)	502.582	532.855	569.019
Buoyancy(Ton)	617.865	630.985	644.351
Reserved Buoyancy(%)	18.658	15.552	11.691
C.G for Floating(M) : Z_{CG}	-44.986	-44.508	-44.923
C.B for Floating(M) : Z_{CB}	-44.858	-44.265	-44.493
Initial Pitch Angle(Deg)	7.125	7.125	7.125
Initial C.G : Y_{CG}	-13.049	-12.972	-13.024

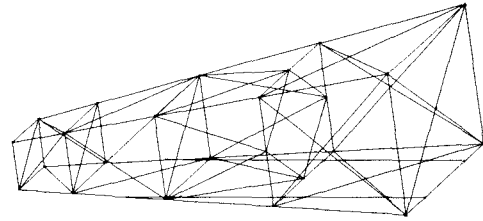


그림 3. 수치 Model 1 - case 1

4. 결과 분석

4.1. 직립 궤적

안정성 해석 시 해저면과의 거리가 크기 위해서는 밸러스트 양이 작아야 하는데, 이렇게 되면 무게 중심(CG)이 부력중심(CB) 보다 높게되어 힐링 모멘트로써 작용하여 안정성이 문제가 될 수 있으며, 반대의 경우에는 clearance가 문제가 된다. 따라서 밸러스팅 순서는 2가지 경우를 생각해서 가능한 최소한의 해저면과의 거리와 최소한의 안정성과의 사이에서 결정 되는데 그림 4은 안정성을 확보한 직립 궤적을 나타내고 있다.(22)

4.2. Stability

그림 4은 모델 1의 직립 시의 안정성을 보여주며, 회전각에 대한 폭 로드, 폭 높이, 밸러스트 양, 해저면과의 거리를 나타낸다. 그림에서 폭 높이를 고정시키고 밸러스트 양을 증가시키는 시점으로부터 폭 로드의 감소가 나타나며, 밸러스트로 인한 자켓의 피치 앵글이 어느 이상 증가하고 나면 다시 폭 로드가 증가하는 경향을 보인다. 이때 자중의 증가로 인해 해저면과의 거리가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 피치 앵글이 크고 해저면과의 거리가 부족해지는 시점에서는 밸러스트 양을 고정시키고 다시 폭 로드와 폭 높이를 증가시켜 해저면과의 거리를 충분히 확보한 후 서서히 밸러스트 양을 증가 시켜 자연적인 직립을 유도하고 전체적인 안정성을 확보한다.

표 4. Model 4 Jacket Condition

	case 1	case 2	case 3
Jacket Length(M)	125	125	125
Water depth(M)	112.5	112.5	112.5
Orientation	101, 103,	101, 103,	101, 103,
position Leg num.	401	401	401
Sling length(M)	20.0	20.0	20.0
Sling diameter(CM)	10.0	10.0	10.0
Sling attach points	601, 603, 605, 607	601, 603, 605, 607	601, 603, 605, 607
Weight(Ton)	783.334	831.276	885.785
Buoyancy(Ton)	968.010	986.624	1005.269
Reserved Buoyancy(%)	19.078	15.745	11.886
C.G for Floating(M) : Z_{CG}	-55.959	-55.447	-55.987
C.B for Floating(M) : Z_{CB}	-55.651	-54.989	-55.249
Initial Pitch Angle(Deg)	7.125	7.125	7.125
Initial C.G : Y_{CG}	-16.276	-16.129	-16.259

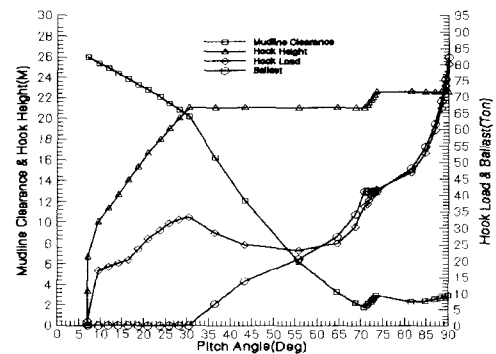


그림 4. Model 1 - Case 1 Upending Curve

4.3. 초기 폭 높이

초기 훅 높이의 적절한 결정에 따라 직립 해석의 시행착오는 줄어든다. 표 6에와 같이 자켓의 무게에 따른 초기 훅 높이는 다른데 초기 훅 높이의 결정 후, 리프팅 시간격을 3 - 5 m 사이에서 설정하여 직립 해석을 하면 많은 시행착오를 줄일 수 있기 때문이다. 일반적으로 슬링 길이는 보통 크레인 훅과 자켓 리프팅 포인트의 연결선과 수평 라인과의 최소 각도를 60도로 사용하는데 모델 4의 경우 결정된 슬링 길이가 다른 모델과 다르게 20m 결정되어 초기 훅 높이의 차이가 크게 났다.

표 6. Initial Hook Height(m)

	case 1	case 2	case 3
Model 1	10	10	10
Model 2	11	11	11
Model 3	11	11	12
Model 4	16.5	16.5	16.5

4.4. 예비 부력

자켓의 예비 부력은 그림 5과 같이 10% 이상으로 고려사항을 충분히 만족한다. 그러나 예비 부력의 부족은 직립을 어렵게 하는 가장 큰 요인으로 작용하며 직립 순서를 바꿈으로써 해결되는 사항이 아니다. 일반적으로 사용하는 레그나 파일 슬리브(sleeve)를 밀수시켜 부력 멤버로 하는 이외에 방법들을 이용하여 부력을 증가시켜야 한다.

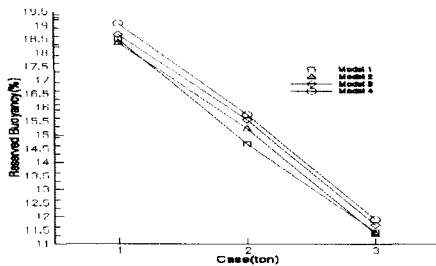


그림 5. Reserve Buoyancy

4.5. 최대 슬링 로드

훅 로드는 크레인의 반경에 따른 허용력을 넘지 않아야 하며 훅 로드로 인해 슬링에 걸리는 최대 슬링 로드는 직립 시 패드아이의 설계하중이 된다. 그림 6은 자켓의 무게 증가에 따른 최대 슬링 로드의 증가를 나타낸다. 일정하게 침수가 되고 나면 다시 슬링의 로드가 증가하기 시작한다. 같은 이유로 스텝 넘버 25에서도 다소 슬링 로드가 감소하긴 하나 직립이 거의 끝난 상태로 상향력이 많이 작용하므로 슬링 로드가 증가한다. 사용 가능한 최대 슬링 로드를 얻지 못할 시는 자켓 자체의 부력을 증가시켜 만족할 만한 최대 슬링 로드를 확보한다.

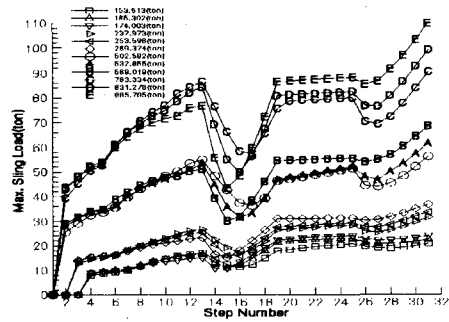


그림 6. Max. Sling Load

5. 결론

직립 시 자켓의 안정성에 영향을 주는 인자는 다음과 같다. 중량의 변화, 중량분포의 변화에 따른 무게중심의 변화, 부력의 변화, 그리고 부력분포의 변화에 따른 부력중심의 변화는 자켓의 GM을 변화시켜 안정성에 영향을 주며 부력의 증가와 중량의 감소는 해저면과의 거리를 증가시킨다. 또한 침수 시 자중의 증가로 인한 해저면과의 거리의 급격한 감소는 훅 높이와 훅 로드의 증가가 요구되며 반대의 경우로 안정성이 미확보 되면 적절히 침수량을 증가시킨다. 초기 훅 로드의 적절한 결정이 직립 해석 시 시행착오를 줄여줄 수 있으며, 예비 부력의 부족은 직립을 어렵게 하므로 10% - 20%의 초기 예비 부력을 필요로 한다. 해석 결과 크레인의 허용력을 초과하지 않는 최대 슬링 로드의 확보가 어려우면 침수량을 감소시켜 자켓 부력을 증가시킨다. 위 요소를 고려하여 자켓 등의 해양 구조물 직립 시, 구조물의 안정성을 확보해야 한다.

참고문헌

- 한국과학기술원, "해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계 기술개발 - 제 3권 Jacket 구조 설계", 1985.
- 한국과학기술원, "해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계 기술개발 - 제6권 운송 및 설치", 1985.
- API RP 2A, "Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms", Section 5, 1984
- Det Norske Veritas, "Marine Operations", Section 5, 1984
- Hudson Engineering Cooperation, "Dynamic Launch, Flotation/Upend Analysis", Project No. 11451, Houston, 1984