

고정식 해양 구조물의 해상작업 해석 기법

조 규 남 <홍익대학교 교수>

1. 선적 해석

육상(Fabrication Yard)에서의 제작 비용이 해상(Offshore)에서 보다 매우 싸기 때문에 일반적으로 해양 구조물(Offshore Structure) 및 장비(Equipment)는 육상에서 제작된다. 제작된 구조물들은 해상 설치 장소로 운송할 배(Vessel)에 실어야 되는데, 여기에 관련한 제반 모든 작업을 선적 작업(Load Out Operation)이라 한다. 선적과 관련한 해양 구조물 및 장비로는 자켓(Jacket), 셀러데크(Chiller Deck), 말뚝 부재(Pile Section), 생산 및 시추 모듈(Production and Drilling Module), 크레인 붐(Crane Boom) 및 기타 장비 등이 있다. 이러한 구조물들은 그 형태와 크기가 각각 다르기 때문에 선적 방법을 다르게 할 수 밖에 없다.

선적 방법은 Lifting 방법과 수평 이동(Horizontal Movement) 방법으로 크게 나뉜다. 수평이동 방법은 미끄럼(Skidding)방법과 회전체(Rolling System)를 이용한 방법으로 좀더 자세히 나뉜다. Lifting 방법은 크레인(Crane)을 이용하여 구조물을 육상에서 들어서 배로 옮겨놓는 방법으로 크기와 무게가 작은 구조물에 자주 이용되는 방법이다. 미끄럼 방법은 스키드 웨이(Skid Way)를 이용하여 선적하기 때문에 크고 무거운 구조물에도 사용될 수 있다. 회전체를 이용한 방법은 접지압(Ground Pressure)을 줄일 수 있는 잇점이 있다.

위와 같은 방법들의 목적은 구조물을 안전하게 가장 경제적으로 배에 싣는 것이다. 이러한 안전성과 경제성은 배의 접안 형태에 의해 많은 영향을 받는다. 배의 접안 형태로는 부유선 방법(Floating Barge Method), 접지선 방법(Grounded Barge Method), 코퍼댐을 이용하는 방법(Coffer Dam Method) 등이 있다. 부유선 방법은 구조물의 무게와 조수의 변화에 의한 배의 거동을 밸러스트(Bal-

last)에 의해 최소화 하는 방법이다. 이 방법은 경제적인 면에서 잇점이 있으나 밸러스트의 조절에 어려움이 많고, 구조물에 많은 위험 요소를 발생시킨다. 접지선 방법은 배를 미리 정지된 부두 해저지반(Port Sea Bottom) 위에 가라 앉혀 놓는 방법이다. 부두해저지반은 접지압의 집중 현상을 피하기 위해 절토후 모래(Sand)로 다시 성토하여 선적 전에 미리 하중을 줌으로써 성토층을 선압밀(Preconsolidation)시켜야 한다.

이 방법은 부유선 방법보다 밸러스트가 간단하고 구조적 안전성이 크나 해저 지반의 정지 작업에 많은 비용과 시간이 필요하며 해저 지반의 물리적 특성을 얻기가 쉽지 않다. 코퍼댐을 이용하는 방법은 배 주위에 해저 지반의 물리적 특성을 얻기가 쉽지 않다. 코퍼댐을 이용하는 방법은 배 주위에 코퍼댐을 설치하여 조수의 변화에 의한 영향을 극소화 하는 방법이다. 따라서 구조물의 무게에 대해서만 밸러스트를 하면 된다. 이 방법도 접지선 방법과 같은 장단점을 갖고 있으나 조수의 변화가 심한 부두에서 좋은 방법이다.

2. 운송해석

해양 구조물의 설치에는 다양한 형태의 운송(Transportation) 작업을 수반하게 되는데, 이때 운송이란 보통 육상에서 제작된 구조물을 바다를 경유하여 해상의 설치 지점 혹은 다른 육상으로 이동시키는데 필요한 제반 활동을 의미한다. 운송과 관련한 제반 해석은 바아지의 사용 여부 및 사용되어지는 바아지의 수효등에 따라 분류될 수 있으며, 그때마다 각기 특별한 방법이 결정된다.

운송과 관련하여 필요한 설계, 해석 작업은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

- (1) 대상 구조물의 특성, 크기와 사용 가능한 바
아지등에 따른 운송형태의 결정
- (2) 전복(Capsizing)등에 대비한 복원성 평가
- (3) 설계자등 및 해상운동에 따른 관성력을 고려
한 대상 구조물의 설계 및 해석
- (4) Seafastening등 부속 부재의 설계 및 해석

(1)항에서는 대상 구조물이 스스로 수면상에 부양
될 수 있는 가능성 및 사용 가능한 바아지의 크기 및
갯수등을 고려하여 통상 설치 기술자의 판단이나 그
에 기초한 발주자의 규정에 따르게 된다. (2)항에서
는 보통 구조물을 바아지 위에 싣고 갈때 각 구조 부
재의 파손 여부와는 상관없이 구조물/바아지 전체 시
스템이 설계 풍력에 대해 충분히 안정한가를 검토하
게 되며, (3)항에서는 운송시에 조우가능한 설계 해
상 상태에서 그 시스템의 운동에 의해 발생하는 관성
력등을 고려하여 구조물의 응력평가 및 그에 따른 재
설계를 하게 된다. (1),(2),(3)항을 통하여 운송에
대한 일반적인 타당성과 구조물의 설계, 해석이 끝난
후 실제 운송을 수행할 때 필요로 하는 Seafastening
등 부속 부재의 결정 및 설계((4)항)를 하게 된
다. 이러한 운송 관련 해석 작업을 할때, 설계 기준을
이루고 있는 주요 요소들은 다음과 같다.

- (1) 운송 경로, 운송 시기등을 고려한 설계 해상
상태의 결정
- (2) 손상 및 비손상 상태에서의 복원 모멘트의
크기
- (3) 구조물/바아지의 해상 운동에 의한 편심 자
중 및 관성력의 평가 방법
- (4) 구조물, 바아지의 상대적인 강성차이에 따른
상호 간섭 효과의 크기
- (5) 설계 응력 안전 기준

이들중 (1), (5)는 각 권위있는 기관에서 필요 수
준을 요구하고 있으므로 설계자의 해석 및 그에 따른
판단의 여지는 비교적 제한되어 있다. 이에 반해 특
히 (4)항은 대상 구조물이 점차 대형화 되면서 연구
가 계속되고 있다.

3. 리프팅 해석

해양 구조물의 설치에는 보통 다양한 형태의 리프
팅(Lifting)작업을 수반하게 되는데, 이때 리프팅이
란 기중기(Crane)를 사용하여 구조물을 들어올리거

나 지지하는데 필요한 제반 활동을 의미한다. 리프팅
은 대상구조물의 종류와 방법등에 따라 분류될 수 있
으며 그 방법은 사용되어지는 기중기의 용량과 밀접
한 관계를 갖게 된다.

리프팅과 관련하여 필요한 설계, 해석 작업은 크게
다음과 같이 분류할 수 있다.

- (1) 리프팅 모의 수치해석, 실험(Lifting Simu-
lation)등을 통한 리프팅 방법의 결정
- (2) 설계 자중의의 각종 추가 하중 효과를 고려
한 대상 구조물의 설계 및 해석
- (3) Padeye, Shackle, Sling등 부속 Rigging
부재의 결정 및 설계

(1)항에서는 각 기중기선 및 대상 구조물의 해상
에서의 운동등을 해석하여 각 방법의 타당성, 작업
성, 위험 수준등을 검토하게 되며 대상 구조물의 설
계시 반영하는 동적 하중 효과를 결정하기도 한다.
기중기의 용량 등 사용가능한 장비의 특성에 크게 좌
우되어 각 작업별로 독특하게 결정되며 통상 설치 기
술자의 판단이나 발주자의 규정에 따르게 된다. 들어
올려지는 모든 구조물은 들린 상태에서 구조적 손상을
입지 않도록 설계 되어져야 하는데 이에 대한 고
찰을 하게되는 단계가 (2)항에 해당된다. (1),(2)항
을 통하여 리프팅에 대한 일반적인 타당성과 구조물
설계,해석이 끝난 후 실제 리프팅을 수행하기 위한
부속 Rigging 부재의 결정 및 설계((3)항)를 하게
된다.

이러한 리프팅 관련 설계, 해석 작업을 할 때, 설
계 기준을 이루고 있는 주요 요소들은 다음과 같다.

- (1) 대상 구조물의 무게 증가에 대한 고려(Al-
lowance for weight escalation)
- (2) 동적 증폭 효과(Dynamic amplification
effects)
- (3) Sling에 걸리는 인장력에 대한 추가 효과
(Sling tension redundancy)
- (4) 설계 안전 기준(Design acceptance crite-
ria)

이들 중 (1),(3),(4)는 많은 경험에 의존하여 이
미 각 권위있는 기관에서 필요수준을 요구하고 있으
므로 설계자의 해석 및 그에 따른 판단의 여지는 비
교적 제한되어 있다. 이에 반해 (2)항은 특히 대상
구조물이 점차 대형화되면서 리프팅작업의 타당성,

작업성, 위험 수준의 평가와 더불어 연구가 계속되고 있다.

4. 진수 해석

설치 해역에 도착한 자켓은 리프팅(Lifting)이나 진수작업에 의하여 바지로부터 분리되어 해상으로 투입된다. 자켓이 작거나, 기중기의 용량이 충분하면 리프팅 작업이 선호되나 그렇지 못할 경우에는 진수 작업에 의존할 수 밖에 없다.

진수작업은 대체로 단일 바지에 의하여 종방향으로 진행되며 그 과정은 다음과 같은 단계로 구성되어 있다.

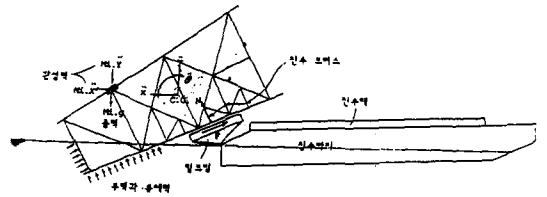
- 1단계 : 바지를 정해진 트럼까지 발라스트시키면서 Shear Plate들을 제외한 모든 Seafastening부재들을 제거한다.
- 2단계 : Shear Plate들을 동시에 절단하고 잭 또는 윈치를 사용하여 밀거나 당겨 자켓과 바지 사이의 마찰력을 극복하여 자중에 의하여 저절로 미끄러져 내려가게 한다(Sliding).
- 3단계 : 자켓이 텔트빔의 핀을 중심으로 회전한 (Tipping)후 텔트빔위에서 회전하면서 미끄러져 내려간다.
- 4단계 : 자켓이 바지로부터 완전히 분리된후 어느정도 시간이 흐른후 해상에서 정적 평형 상태에 이른다.

위의 각 단계에서 자켓은 진수대위, 텔트빔위, 공기중 또는 물속에 있게 되며 이 작업중 자켓과 바지가 아무런 손상도 입지 않고, 후속 작업을 원만하게 수행할 수 있도록 자켓 설계시 몇가지 검토가 수행되어야 하는데, 이를 진수해석이라 한다.

진수해석은 자켓의 이동에 따른 연속적인 과정중, 자켓과 바지의 동역학적 거동을 구하는 궤적해석과 구조적 안전성을 검토하는 구조해석으로 나눌 수 있다. 정확한 진수해석을 위해서는 자켓과 바지의 동역학적 거동 파악이 선행되어야 하며, 이 과정중 얻어지는 외력등 정보를 이용하여 구조해석을 수행한다.

5. 부유 및 상하 조정 해석

진수가 끝나 바지로부터 분리된 자켓은 Upending 작업에 들어가기가 용이하고 자켓의 안정성 판



진수중 자켓에 작용하는 힘

점에서 유리하도록 해상에 떠 있어야 한다. 이 상태를 Flootation이라고 하는데 이는 Upending 작업의 초기 단계라고도 분류할 수 있다. 해상에 띄운 자켓은 수직상태로 회전을 시켜 세워서 설치 작업을 하게된다. 해상에서 자켓을 수직상태로 회전시키는 작업을 Upending이라고 한다. Upending 작업은 대상 구조물의 크기에 따라 다음 3가지의 방법으로 분류할 수 있다.

- (1) 크레인 바지에 의한 Upending
- (2) 침수에 의한 Upending
- (3) 크레인 바지의 보조로 침수에 의한 Upending

(1)항의 방법은 자켓이 작을 경우 크레인 바지의 크레인으로 자켓을 들어올려 줌으로 해서 수직상태로 오게 한다. 이 방법은 자켓과 해저면과의 간격이 증가하게 되고 침수 장치가 간단해 지는등 장점이 있으나 소형 자켓에서만 사용할 수 있고 확보 가능한 크레인 바지의 용량 문제등의 제약 조건이 있다.

(2)항의 방법은 크레인 바지를 사용하지 않고 자켓 Leg나 Skirt Pile Sleeve 그리고 부력 탱크들을 침수시켜 수직상태로 오게 하는 것이다. 이때 침수는 밸브의 조작으로 자동적으로 시킬 수 있어야 한다. 이 방법은 자켓이 상당히 클 경우 크레인 바지의 보조없이 완전히 자켓 자체의 침수 장치의 조작만으로 Upending을 하므로 침수 장치가 복잡해지고 자켓의 운동을 직접적으로 조종을 할 수 없으므로 매 순간이 매우 안정해야 된다.

(3)항의 방법은 크레인 바지 단독으로는 Upending작업이 불가능 할 때 크레인의 보조를 받으면서 침수 장치로 자켓을 수직상태로 회전시킨다. 크레인 바지의 Upending 작업의 보조 필요성 여부는 Computer Simulation을 수행해 본후의 결과를 토대로 결정을 내려야 하지만 크레인의 Hook 하중이 자켓 총중량의 10% 이상 값까지 얻어진다면 크레인

바지를 사용하는 것이 유용하다.

이러한 Upending 작업을 위한 해석을 할때 다음과 같은 인자들이 고려요소가 된다.

- (1) 자켓의 부력
- (2) 자켓과 해저면과의 간격(Seabed Clearance)
- (3) 안정성 문제

즉 Upending 해석은 충분한 부력이 확보되어 자

켓이 해저면과 충돌하지 않고 안정을 유지하면서 회전을 할 수 있는가를 검토하는 해석이며 해석 결과 Upending이 위험을 내포하고 있던가 또는 전혀 불가능한 경우도 발생할 것이다. 이러한 경우에는 자켓의 제작 비용이 증가하더라도 부력 탱크를 추가로 부착시켜 Upending 작업이 가능하도록 설계를 수정하던가 또는 새로운 설계 방법을 채택하여야 할 것이다.

