

해양 자켓의 운송 및 설치 해석



조 철 희*



이 수 훈**

1. 서 론

대표적인 해양구조물은 jacket type 구조물이다. 이러한 형태의 해양구조물을 설계하기 위해서는 구조물의 용도에 적합한 크기와 설계 수명을 고려하여 설치될 지역에 대한 환경하중을 견디도록 설계해야 한다. 이러한 하중조건에 대한 구조 해석의 수행은 정확한 환경하중의 산정과 이 하중의 적합한 가정이 적용되어야 한다.

이와 더불어 해양구조물은 육상에서 건조되어 설치장소까지 운반해서 설치되기 때문에 이 과정에서 발생하는 여러 여건을 고려하여 각 단계에 적합한 해석도 같이 수행되어야 한다. 해양구조물의 건조가 완료된 후 설치장소까지 운반, 설치하기 위해서는 구조물을 barge에 선적하는 load out, 설치장소까지 운반하는 towing, barge로부터 구조물을 분리시키는 launch, 설치 장소에 구조물을 안전하게 위치시키기 위한 floating/upending 과정을 거치게 된다. 해양구조물은 이러한 운송 및 설치를 수행하는 시간은 구조물의 설계수명과 비교할 때 짧은 시간이지만, 운송 및 설치 단계에 대

한 해석은 상당히 중요하다. 운송 및 설치방법을 고려하지 않고 구조물을 설계한다면 구조물 건조 후 설치가 어려워지거나 불가능하게 된다. 즉, 건조된 구조물을 운송 및 설치하기 위한 barge, crane 등의 장비 용량과 설치기술 등을 고려해서 이에 적합한 구조물의 형태와 설치 방법에 적합한 구조물을 건조해야 한다. 그러므로 해양구조물의 설계 단계에서 구조물의 형태와 크기를 결정하게 되는 중요한 요소 중의 하나가 구조물의 설치장소까지의 운송과 설치하는 방법으로, 이를 반드시 고려한 후 설계를 수행해야 한다.

운송 및 설치 단계에서는 구조물이 설치된 상태와는 다른 하중이 작용되기 때문에 각 단계별 특성에 맞는 하중조건 및 특성을 고려해서 해석을 수행한다. 이러한 해석을 통해 구조물에 대한 구조해석과 적절한 보강 대책을 수립할 수 있다.

본 기사에서는 해양구조물의 구조해석과 운송/설치 해석을 수행해주는 프로그램인 SACS(Structural Analysis Computer System)를 이용한 운송 및 설치에 대한 개략적 순서 및 이를 적용한 예를 소개하고자 한다.

* 본학회 편집위원 · 인하대학교 선박해양공학과, 교수

** 인하대학교 선박해양공학과 대학원

2. 해석 모델

SACS를 통한 운송 및 설치 해석에 대한 예를 다음 구조물에 대해서 수행한다.

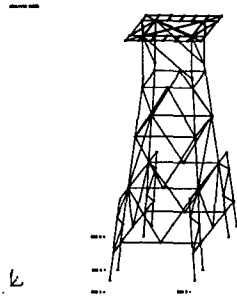


그림 1 구조 model 형상

water depth	: 37.50m
total height	: 58.59m
dead weight (weight in air)	: 327,396.938kg
buoyancy load (displacement)	: 172,884.453kg

위 model은 정적 해석에 사용하는 기본 model로 운송 해석 시에는 jacket과 deck를 분리시켜 운송 및 설치를 한다. 본 예에서는 구조물의 jacket 부에 대한 해석을 실시한다.

운송 및 설치 해석에 사용하는 model은 다음 그림과 같다.

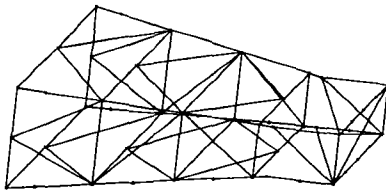


그림 2 운송 및 설치 model

3. 환경하중에 대한 정적 해석

해양구조물을 설계하기 위해서는 우선 구조물

이 설치될 지역에 대한 환경하중을 고려해서 구조물의 주요 치수를 결정해야 한다. 설치 영역의 수심 및 구조물의 용도, 크기에 따라서 구조물의 개략적 치수를 결정한다. 그 후 환경하중에 대한 정적해석을 수행한다.

정적해석에서 고려되는 하중조건은 바람, 조류, 파랑에 의한 환경하중과 전체 구조물의 dead load, live load, operating load 등을 고려하여 해석을 수행한다. 환경하중의 작용 방향은 구조물의 in-place 상태에 대한 여러 방향에 대해 모든 환경하중이 동일한 방향으로 작용한다고 가정하여 해석을 수행하는 경우도 있고, 그 지역조건상 가장 안 좋은 하중의 방향 조합을 설정하여 수행한다. 가장 큰 하중을 받게되는 방향은 환경하중이 작용하는 방향에 대한 투영면적이 가장 큰 방향에 대해 전체 하중이 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 하중이 작용할 가능성이 있는 여러 방향을 고려해서 각 방향에 대한 모든 부재의 안정성을 확보해야 한다.

일반적으로 초기 설계 단계인 정적 해석에서는 jacket 구조물이 해저면에 완전히 고정된(fixed) 상태로 가정하여 해석을 실시하게 되고, 최종 설계단계에서 실제의 토질 조건을 고려한 PSI(File-Soil Interaction) 해석을 실시한다. 또한 필요한 경우(보통 대용량의 jacket)에 대해서는 동적 해석 및 지진 해석을 수행한다.

해양구조물의 in-place 해석에서는 각 부재에 대한 응력, tubular joint에 대한 punching shear, joint deflection 등을 검토한다.

4. 운송해석

구조물에 대한 환경하중에 대한 정적 해석 이외에도 구조물에 대해서 운송해석(towing analysis) 및 설치에 대한 해석을 통해 구조물에 작용하는 하중을 산정 후 이에 대한 구조해석을 실시해야 한다.

구조물을 barge에 선적한 상태에서 설치장소까지 이동하는 것을 운송해석이라고 한다. Barge 위에 jacket을 위치시킬 때에는 load out, launching 등의 작업이 용이하며 barge에 가능하면 보강을 줄이면서 tie-down이 용이하게 이루어 질 수 있

는 위치로 선정되어야 한다. 운송 해석은 구조물이 운송과정 중에서 barge의 6자유도 운동에 의한 하중, 즉, 선형가속도 성분에 의한 surge, sway, heave motion과 각가속도 성분에 의한 roll, pitch, yaw motion에 의한 관성력이 구조물에 작용하게 되는데 이러한 하중상태에 대해 구조물의 안정성을 검토한다. 운송해석에서 관성력은 다음의 두가지 방법이 사용된다.

- ① 운송 경로상의 design sea-state를 기초로 하여 model test나 seakeeping analysis로부터 관성력을 구한다.
- ② 운동해석을 통하지 않고 경험과 여러 가지의 sea-state를 고려한 motion criteria를 이용하여 관성력을 구한다.

Barge의 운동에 의해 구조물에 작용하는 하중은 'D'Alemberts Principle'에 의해 가속도의 작용방향과 반대로 작용하게 된다.

보통 무게가 4000톤 이상인 대형 jacket인 경우에는 ②의 방법을 적용하게 되면 jacket이 너무 over design되므로 운동해석을 하는 것이 좋고, 소형 jacket인 경우에는 motion criteria를 사용하는 것이 간편하다. 일반적으로 사용하는 conservative motion criteria는 'Noble Denton & Associate, Inc'로 다음과 같다.

- ① Beam Seas (offshore) :
20° roll amplitude in 10 seconds period with 0.2g vertical acceleration
- ② Head Seas (offshore) :
12.5° pitch amplitude in 10seconds periods with 0.2g vertical acceleration

Conservative motion criteria를 사용하는 경우 하중 조건의 조합은 다음과 같은 4가지 condition을 사용한다.

- ① Gravity + Heave + Pitch
- ② Gravity + Heave + Roll
- ③ Gravity + Heave + Pitch
- ④ Gravity + Heave + Roll

④ Gravity + Heave - Roll

여기에서 condition ①과 ②는 head sea인 경우이며, ③과 ④는 beam sea인 경우이다. 주어진 roll과 pitch의 single amplitude로부터 각가속도는 다음 식으로부터 구한다.

$$a = \theta \times \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

where, a : 각가속도 (deg/sec²)
 θ : simple amplitude (deg)
 T : period (sec)

대부분의 운송과정에서는 구조물이 barge 상에 놓혀진 상태로 운송되기 때문에 jacket의 각 부재 상태는 in-place 상태와 다른 조건이 적용된다. 즉, in-place 상태에서는 주된 하중을 pile과 leg가 부담하게 되고 brace는 하중을 전달시켜주는 보조적 역할을 하게 되지만 운송상태에서는 brace에 주된 하중이 작용하게 된다.

그러므로 운송해석에서는 이에 대한 jacket의 충분한 보강과 구조해석을 수행해야 한다. 또한 운송해석에서는 barge 상에 jacket을 고정시키기 위한 tie down에 대한 설계 및 해석과 barge의 보강 문제도 검토해야 한다. 운송해석의 model은 in-place 해석에 사용되는 model을 기준으로 하지만 pile, conductor, riser 등 운송 시 설치되지 않은 부재는 제거해줘야 한다.

운송해석은 jacket의 크기에 따라 해석 방법이 달라진다. jacket이 100m 이내인 경우에는 barge의 강성이 jacket의 강성보다 훨씬 크다고 가정하여 jacket support가 변형되지 않는다는 가정 하에서 해석을 실시하는 rigid barge method를 사용한다. 그러나 jacket 규모가 큰 경우에는 barge의 강성이 jacket과 비교해서 충분히 크지 못하다고 가정하여 flexible barge에 의한 structure-barge interaction을 고려한다. 또한 운송기간이 장기간인 경우에는 이에 따른 피로해석도 요구되어진다.

주어진 구조물에 대한 운송해석의 예를 'Noble Denton & Associate, Inc' motion criteria를 적용하면 각 load case 별 가속도는 다음과 같다.

표 1 Load case 별 가속도

load case	gravity	heave	pitch	roll
1	1.0g	0.2g	4.93	0.00
2	1.0g	0.2g	-4.93	0.00
3	1.0g	0.2g	0.00	7.90
4	1.0g	0.2g	0.00	7.90

주) 가속도 단위는 m/s

6 자유도 운동에 의해 구조물에 작용하게 되는 total dynamic load는 다음과 같다.

표 2 Total dynamic load

load case	force (ton)			moment (ton-m)		
	sway	surge	heave	pitch	roll	yaw
1	-2.0	0.0	-88.7	0.0	-995.7	0.0
2	2.0	0.0	-90.4	0.0	-563.1	0.0
3	0.0	3.1	-89.5	-173.3	-779.4	-57.5
4	0.0	-3.1	-89.5	173.3	-779.4	57.5

위 하중은 운송상태에서 구조물의 각 부분에 작용하는 하중의 총합으로 이 하중 상태에서의 부재의 안정성을 확인하게 된다.

5. Launching 해석

설치 장소까지 운반된 jacket을 설치하기 위해 barge로부터 jacket을 분리시켜야 한다. 이 분리 작업은 derrick barge에 의해 수행하는 것이 가장 빠르고 안전한 방법이다. 그러나 derrick barge의 용량이 제한되는 경우 launching을 실시한다. launching은 barge의 skid rail 상에 위치한 jacket을 미끄러지게 바다 위에 진수시키는 것으로 launching 작업 시 barge와 jacket 모두가 구조적 손상을 입을 가능성과 전복의 위험성이 있기 때문에 신중하게 검토되어야 한다. Launching 시 barge 상의 jacket은 winch 등에 의한 이동에 따른 점진적인 무게 중심의 이동에 의해 바다위로 진수된다. 이 때 가장 주요한 해석의 시점은 jacket과 barge가 분리되게 되는 순간으로 jacket의 모든 하중이 한 점에 집중되는 상태가 되어 이 지점에

대한 응력 집중이 발생된다. 이 때 rocker arm에 작용하는 하중을 계산하여 rocker arm의 설계를 수행한다.

SACS에서는 launching analysis 수행 시 jacket의 이동에 따른 jacket과 barge의 속도, 가속도, 변위의 시간에 대한 변화와 단계별로 구조물에 작용하는 하중을 계산해 준다. Jacket motion은 다음 각 phase 중 하나로 표현되어 진다.

- phase1 : 구조물이 winch에 의해 barge 상에서 이동하고, rocker arm은 수평
- phase2 : 구조물이 자중에 의해 barge 상에서 이동하고, rocker arm은 수평
- phase3 : 구조물이 winch에 의해 barge 상에서 이동하고, rocker arm 기울어짐
- phase4 : 구조물이 자중에 의해 barge 상에서 이동하고, rocker arm 기울어짐
- phase5 : 구조물과 barge가 분리된 후의 상태

Launching을 수행하는 barge data는 다음과 같다.

표 3 Launch barge data

height	7.5m
width	19.0m
bottom length	50.0m
forward extension	5.0m
aftward extension	5.0m
fwd. initial draft	2.0m
aft. initial draft	4.5m/s
winch speed	0.1m/s
skid height	1.5m
skid static friction coeff.	0.1
skid dynamic friction coeff.	0.05

Jacket은 winch에 의해 skid rail 상을 이동해서 진수된다. 초기 static 상태에 대한 skid rail과 jacket 사이의 friction coefficients는 0.1로 가정하고 jacket이 움직이기 시작하는 시점부터는 속도

에 관계없이 friction coefficients를 0.05로 가정하는 것이 일반적이다.

Launching 과정의 phase는 다음과 같다.

phase1 (0.00sec - 249.42sec) : 무게중심은 skid rail 상에 위치, jacket은 winch에 의해 이동

phase3 (249.42sec - 254.22sec) : 무게중심은 rocker arm 상에 위치, winch에 의해 이동. 이 때, rocker arm에 reaction force 작용

phase4 (254.22sec - 268.88sec) : 자중에 의해 jacket이 rocker arm에서 미끄러짐

phase5 (268.88sec - 330.00sec) : jacket과 barge가 분리된 후 jacket의 floating 상태

각 phase에 대한 barge와 jacket의 변위는 다음과 같다.

그림 3, 4에서 보여지듯이 jacket의 수평 및 수직 변위는 jacket이 자중에 의해 rocker arm 상에서 미끄러지는 255sec 시점에서 급격히 변화하게 된다. 이 때 barge의 수평 변위는 jacket이 launching 되는 방향과 반대 방향으로 이동한다.

각 phase에 대한 barge와 jacket의 속도는 그림 5, 6과 같다.

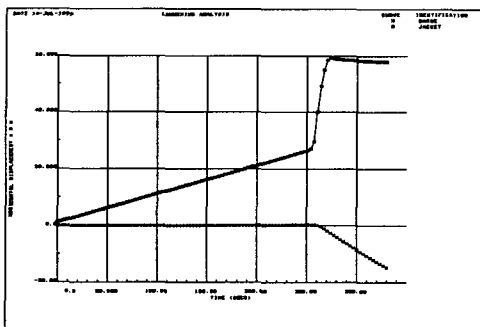


그림 3 Horizontal displacement

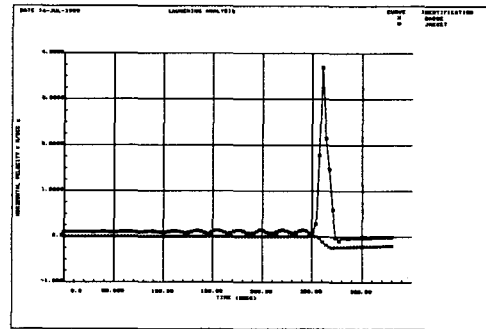


그림 5 Horizontal velocity

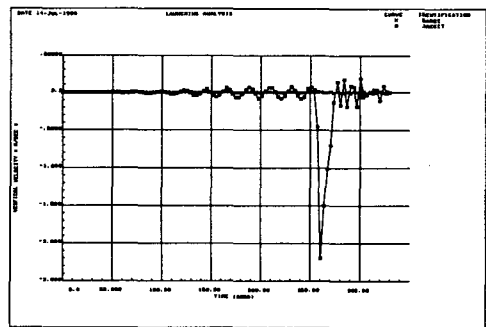


그림 6 Vertical velocity

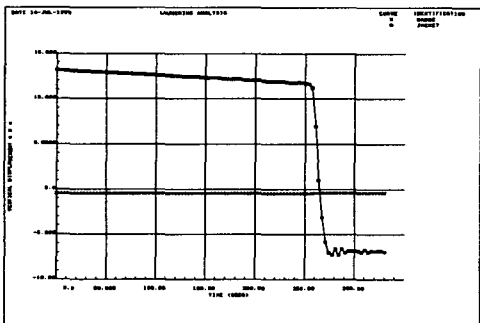


그림 4 Vertical displacement

변위 성분과 마찬가지로 jacket의 수평 및 수직 속도는 jacket이 자중에 의해 rocker arm 상에서 미끄러지는 시점에서 급격히 변화하게 된다.

이상의 각 시간대별 barge와 jacket의 거동은 그림 10에 나타내었다.

6. Floating/upending 해석

Launching 후 해수 중에 떠있는 jacket을 직립 상태로 변환시키기 위한 해석이 floating/upending

해석이다. jacket을 직립 시키기 위해서는 jacket leg와 ballasting tank에 서서히 물을 집어넣어 jacket을 가라앉히면서 구조물을 세우게 된다. 이 해석에서는 jacket이 안정한 상태를 유지하면서 직립상태로 설치 가능한 조건을 검토한다. 주된 고려 사항은 upending 완료 시까지 jacket과 해저면 사이의 최소 clearance 확보, upending 과정에서의 횡방향과 종방향의 metacener height 변화에 따른 안정성 검토, ballasting에 따른 crain hook load, sling에 작용하는 하중 및 이에 필요한 padeye 설계하중을 검토한다.

일반적으로 upending 작업은 조류나 파랑의 영향이 거의 작용하지 않는 상태에서 수행되기 때문에 이 해석에서는 환경하중에 의한 동적 효과를 무시하고 부력과 자중에 의한 영향만을 고려하게 된다. Upending에서 가장 중요한 요소는 해저면과 jacket 사이의 clearance 유지와 각 순간마다의 안정성 확보이다. 이 두 가지 조건은 서로 상반되는 것으로 clearance를 증가시키기 위해서는 ballast 양이 작아야 하고, 이 때 무게 중심이 부력 중심보다 높게 되어 안정성에 문제가 생긴다. 이와 반대인 경우에는 clearance가 문제가 된다. 그러므로 upending의 최적화된 결과를 얻기 위해서는 hook load와 ballasting을 변화시켜가며 반복작업을 수행해야 하며, 초기 설계 단계 시에 reserve buoyancy에 대한 검토가 수행되어야 한다. 만일 jacket의 reserved buoyancy가 만족되지 않는다면 구조물의 floating이 불가능하기 때문에 초기 설계부터 다시 수행해야 하기 때문에 이 과정은 매우 중요하다.

Upending의 해석 단계는 다음과 같다.

1단계 : free flotation

launching 이후에 jacket의 자중과 부력이 평형을 이루어 떠 있는 상태

2단계 : lifting

hook load를 천천히 작용시켜 jacket 밑면의 leg 상부가 수면위로 올라올 수 있는 정도까지 작용

3단계 : flooding

- ① hook load를 가한 상태에서 jacket 하단

부터 flooding 시켜 직립 상태를 만든다.

- ② hook load 고정시키고 jacket flooding : 자중 증가, clearance 감소
- ③ hook height 고정시키고 jacket flooding : hook load 증가, clearance 유지
- ④ hook load 고정시킨 후 flooding 상태에서 upending 가능 여부 해석
- ⑤ 위 결과가 upending에 불충분한 경우 clearance가 문제되지 않는 초기 상태에서 hook load를 고정시켜 upending 하고, hook height를 고정시킨 후 flooding 시켜 해석

4단계 : lowering

- ① 수직상태에 도달한 jacket의 나머지 leg, buoyancy tank 등을 침수시킨다.
- ② 위 과정과 동시에 hook load를 서서히 감소시키면서 positioning 시킨다.

해석 구조물의 자중에 대해서, contingency factor 1.05를 적용하는 경우,

total weight = 78.361ton
 total buoyancy = 105.76ton
 reserve buoyancy = 25.907%

본 예에서는 하나의 main hook를 사용해서 jacket 구조물의 상단 네 지점에 sling을 연결하여 upending을 수행했다.

각 단계별 hook load와 최대 sling load는 그림 7, 8에 나타내었다. 이 때, 최대 sling load는 upending에 사용할 padeye 설계의 하중 값으로 사용된다.

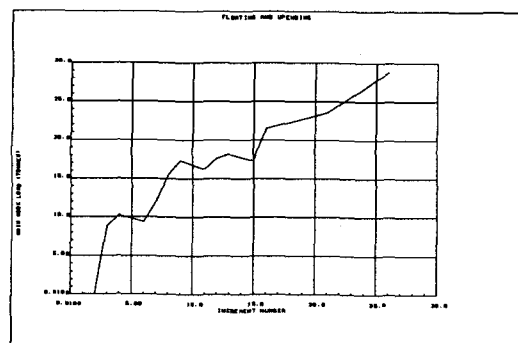


그림 7 Hook load

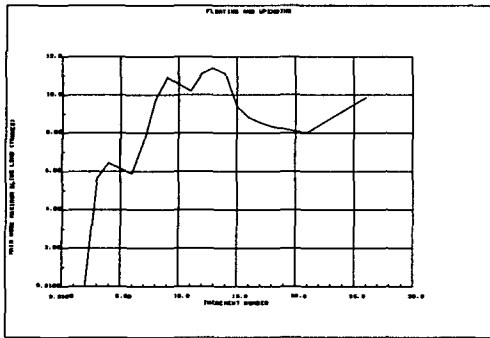


그림 8 최대 sling load

또한 upending 과정 중에 jacket과 해저면의 충돌이 일어나지 않도록 seabed clearance를 확보해 주어야 한다. 이에 대한 결과값은 그림 9와 같다.

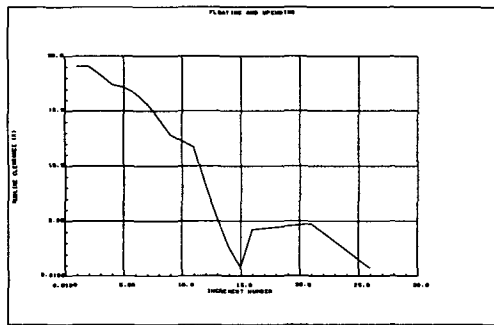


그림 9 Seabed clearance

Upending에 대한 개략적 순서는 그림 11-그림 16에 나타내었다.

이상의 절차에 따라 구조물의 운송 및 해저면 착지까지의 설치를 마친 후, pile을 박아 구조물을 고정시키고, 상부구조물인 deck 설치를 하게된다.

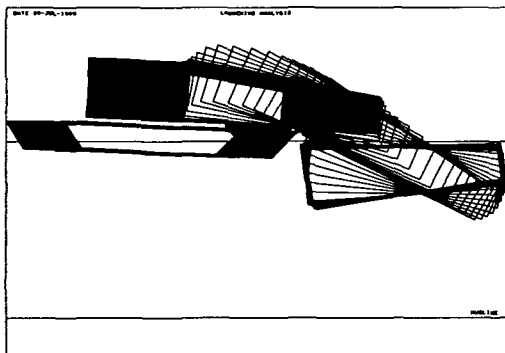


그림 10 Launch trajectory

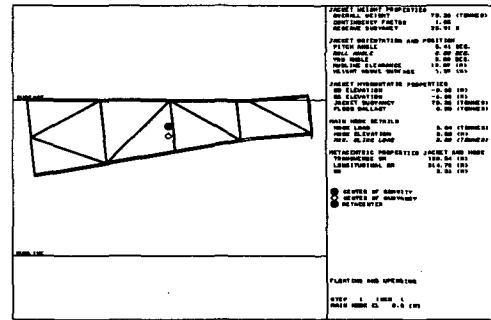


그림 11 초기 floating 상태

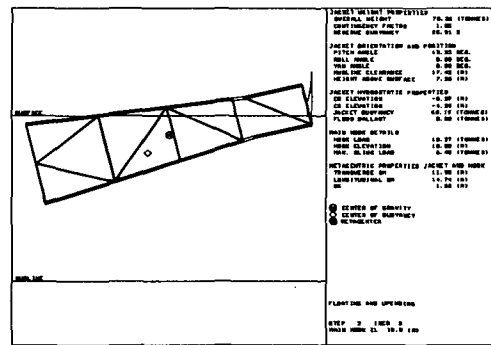


그림 12 Jacket lifting

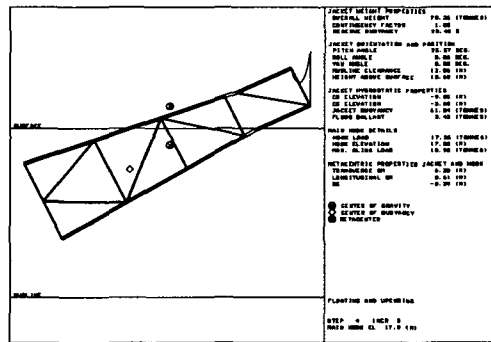


그림 13 Lower leg ballasting

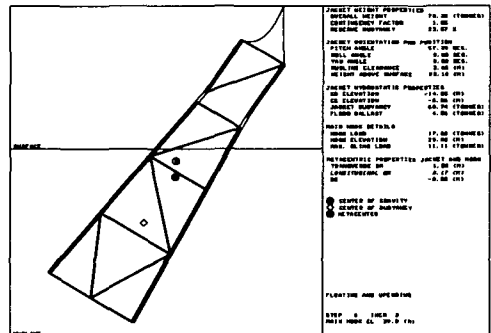


그림 14 Upper leg ballasting

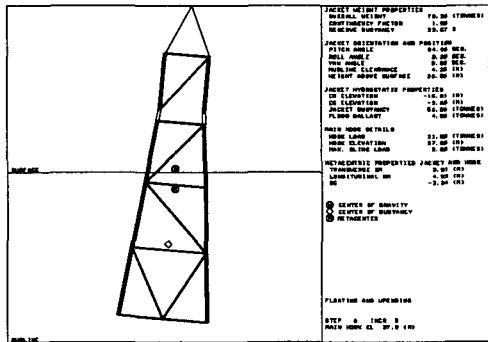


그림 15 Upper leg ballasting & lifting

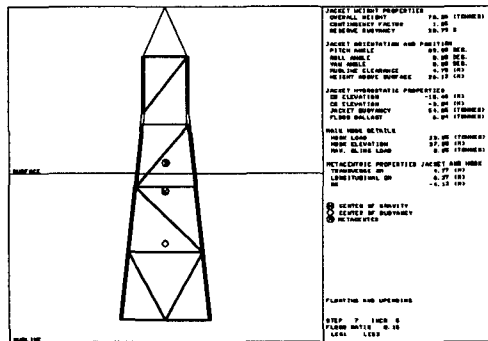


그림 16 직립 및 착지

7. 맺음말

본 기사에서는 SACS에 의한 해양구조물의 운송 및 설치에 대한 개략적 절차를 살펴보았다.

이상에서 소개한 방법은 단순한 형상의 구조물에 대해 이론적 기초에 근거한 해석 예를 제시한 것이다. 해양구조물의 운송 및 설치 해석을 수행하기 위해서는 이에 관련된 장비에 대한 정확한 기능 및 상태의 파악이 이루어진 상태에서 해석이 수행되어야 한다. 실제 해양구조물의 운송 및 설치 과정에서는 여러 가지 예상하기 어려운 돌발적 상황이 발생하기 쉽고, 이러한 요소는 구조물의 손상과 비용 문제뿐만 아니라 인명과도 직결될 수 있는 문제이다. 그러므로 이러한 해양구조물의 해석에 대해서는 단순히 프로그램만을 사용하는 것이 아니라, 많은 경험과 실험에 의한 자료를 고려한 해석 및 프로그램 분석이 수반되어야 한다.

참고 문헌

1. SACS manual VOL. II, VOL. IV, Engineering Dynamics, INC
2. 한국과학기술원, “해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계기술개발(제 3권 Jacket 구조설계)”
3. 한국과학기술원, “해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계기술개발(제 6권 운송 및 설치)”
4. Ben C. Gerwick, Jr. (1986), *Construction of Offshore Structures*, John Wiley & Sons, 1986 [2]