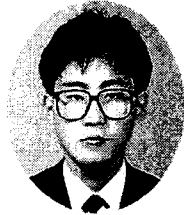


고정식 해양구조물의 제작 방법에 대한 유연도 구조해석기법 개발



최 병 렬*



김 정 우**



김 봉 민**

대형 고정식해양구조물의 제작에 있어 여러 가지 공법이 있으나 최근에 주로 사용하는 공법은 F-type의 공법으로써 jacket panel에 대하여 육상작업을 극대화함으로 고소작업을 극소화하는 공법이다. 이러한 공법을 수행함에 있어 구조적 문제가 발생하고 있다. 특히, 대형구조물인 경우 기존 보유장비의 크기에 좌우되는 경우가 많이 발생하며 이때, 사용하는 장비는 300ton, 450ton, 550ton, 800ton, 1000ton crane을 주로 이용한다. 그리고 일반적인 conventional analysis method를 사용할 경우 구조물의 크기에 따라 다를 수 있으나 경우에 따라 panel을 부분 조립하여 roll-up 하는 것과 대형 crane을 사용하거나 또는 고소작업을 하는 경우가 많이 발생한다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 유연도 구조해석법(Flexibility Structure Analysis Method)을 적용 구조물의 flexibility를 최대한 이용하여 구조물을 해석하므로 장비 및 고소작업의 극소화와 더불어 제작공기 절감의 효과를 얻을 수 있다. 그리고 본 연구를 위하여 중국 CNOOC

사로부터 수주한 PINGHU jacket에 본 해석법을 적용하므로 성공적인 결과를 얻었다.

1. 서 론

산업화의 발달로 원유와 천연가스의 소비량은 계속 증가 추세를 보이고 있으며, 해저에 보존된 유전개발의 필요성도 증대되고 있다. 이와 같이 해저석유자원개발 활동이 증가함에 따라 점차 해저 깊은 곳으로 이동되고 있으며, 사용되는 해양구조물의 크기가 다양해 졌으며 규모도 대형화 추세로 가고 있다. 따라서 이러한 대형 고정식해양구조물 제작에 있어 여러 가지 어려움에 봉착될 수 있다. 특히 공기절감 및 제작비 절감을 위하여 제작공법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 또한 이러한 대형구조물의 제작공법은 건설장비의 대형화로 이어진다.

이와 같은 문제점을 해결하면서 제작 공기 및 제작비 절감을 위한 공법개발을 시도하였으며, 이를 위해 본 연구에서는 중국 CNOOC사로부터 수

* 정회원 · 현대중공업 해양기본설계부 과장

** 현대중공업 해양기본설계부 대리

주한 6-LEG, 길이 100m, jacket 총 중량 5,000ton, F-panel 무게 2,5000 ton인 PINGHU jacket을 적용하여 성공적으로 수행하였다. 본 연구에서는 여러 가지 제작 공법 중 구조물의 flexibility를 최대한 이용 crane 하중을 역으로 구조물에 적용한 유연도 구조해석법(Flexibility Structure Analysis Method)을 이용한 것으로 구조물의 전체적인 응력이 허용 응력에 접근된 해석방법으로 하중계수를 고려하지 않고 해석을 수행한 것으로 최적 설계기법에 한 단계 접근한 방법이라 할 수 있다. 따라서 이러한 해석기법을 도입하므로 제작 공기 절감 및 원가절감을 할 수 있으므로 보다 경쟁력 있는 것으로 생각된다. 그리고 이러한 유연도 구조해석 기법에 대하여 기술 감독사인 DNV (Det Norske Veritas)사로부터 기승인을 득하였다.

2. 구조물의 해석과 crane 장비

본 연구에서 적용한 PINGHU jacket은 강 관을 이용한 구조물이며, yield strength가 50ksi 임으로 고 강도 강을 사용한 구조물이라 할 수 있다.

PINGHU jacket을 제작하기 위하여 구조물의 응력 해석은 본사가 보유한 crane의 최대 lifting 하중을 구조물에 적용한 유연도 구조해석법(Flexibility Structural Analysis Method)으로써 구조물의 flexibility를 최대한 이용한 방법으로 전체구조물의 crane 지점의 반력과 jacket roll-up시 적용한 crane

표 1 Panel에 대한 지점 반력과 crane 하중

CRANE	반력 (ton)	DISTANCE (m)	C/R역 하중 (ton)	CAPACITY (ton)	C/R NAME
1	251.23	0	256	275	C/R-550
2	-7.733	10.0345	45	50.7	AM9270
3	158.3	20.069	51	55.9	AM9310
4	19.28	31.107	70	76.47	S-1
5	203.02	42.145	255	275	C/R-500
6	221.86	65.225	60	68.67	P&H5300R
7	242.7	76.765	349	425	C/R-800
8	161.243	95.305	164	227.3	SH-11320
TOTAL	1249.9		1250	1454.04	
CRANE RATIO	85.97%				

하중과의 equilibrium을 기초로 해석을 수행하였다. 또한 jacket roll-up시 panel에 대한 crane 각각의 지점 반력과 실제 적용 crane 하중의 비교는 다음 표 1과 같다.

표 3 (a), (b) 그리고 (c) 에서 알 수 있듯이 구조물의 crane 지점 반력의 합이 적용 crane 하중의 합과 같아야 되고 양쪽 모멘트 합은 영(zero)이 되어야 한다. 그러나 각 지점에 상대되는 crane의 최대 허용하중은 작거나 클 수 있는데 작을 경우 주위 다른 crane의 최대 허용하중이 여분이 있을 때 추가로 작은 쪽의 crane 하중을 분담할 수가 있다. 이때 경계조건으로는 최대 응력 및 구조물의 처짐이 허용한계 이내여야 한다. 이렇게 해서 구조물의 roll-up시 안정성을 확보할 수 있다.

또한 이러한 해석법을 적용하기 위하여 먼저 제작 업체가 보유하고 있는 crane 장비에 대하여 상세히 조사하여야 한다. 따라서 본 PINGHU jacket에 대하여 사용한 crane 장비는 다음 표 2와 같이 나타 낼 수 있다.

표 2 PINGHU jacket에 이용한 crane 장비

순서	위치(m)	CRANE 종류	허용 하중 (ton)	비고
1	0.0	LR1550-550TON	275	
2	10.0	AM-9270	51	
3	20.0	AM-9310	56	
4	31.1	MANITOWOC 4100S S-1	76	
5	42.1	LR1550 550TON	275	
6	65.2	P&H 5300R	69	
7	76.7	LIEBHERR 800TON	425	
8	95.3	SH11320	227	
합계			1454	

3. 구조물 roll-up을 위한 crane 배치

구조물을 제작하기 위하여 필요장비를 수급하여야 하며, 어떠한 요인으로 인하여 장비 수급에 문제가 발생하면 긴급 구조물 재해석 및 crane 장비 재배치를 수행하여 현장에서 loose time이 발생하지 않도록 한다.

구조물 부분제작 완료 후 panel 전체를 한 구조물로 형성시킨다. 이후 panel과 panel을 조립하여 완성된 jacket 구조물을 형성한다. 이때 완전한 jacket 구조물을 형성하기 위하여 panel에 대하여 roll-up을 실시하여 제작을 완료한다. 그리고 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 roll-up에 필요한 crane 장비를 유연도 구조해석기법 (Flexibility Structural Analysis Method)을 통하여 적절한 위치에 배치하여야 하며, 이는 여러 가지 해석과 실제 장비와 구조물의 간섭 (fouling) 문제를 검토 후 최종적으로 배치한다. 본 연구에 사용한 PINGHU jacket의 roll-up시 사용 crane 장비 배치도는 다음 그림 1과 같다.

4. 이론적 해석

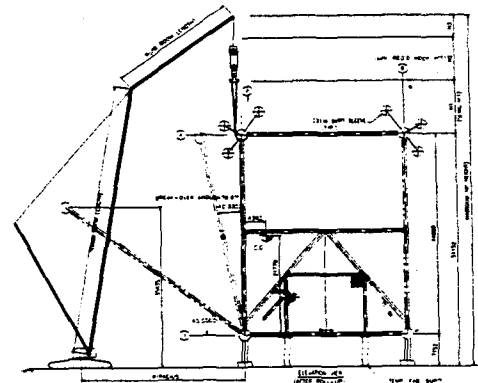
본 장에서는 jacket panel을 roll-up하기 위한 crane의 배치와 구조물의 응력 해석 기법에 대하여 논의하고자 한다.

4.1 구조물의 crane인 지점에 대한 반력 산출

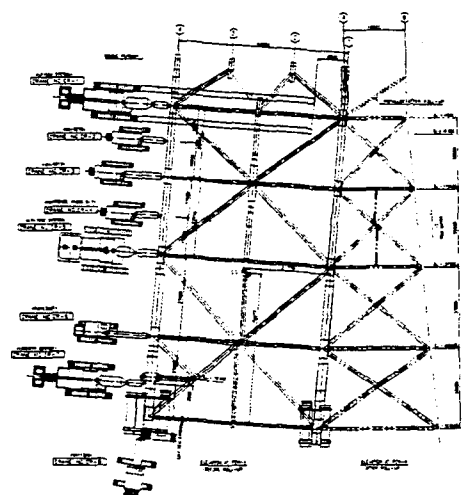
실제 roll-up을 위하여, crane 장비를 배치하여야 한다. 따라서 jacket panel에 crane을 배치하고자 가정한 지점에 고정 boundary를 선정하고 구조물에 대하여 static 해석을 수행한 뒤, boundary에 대하여 반력을 구한다. 이와 같이 반력을 구한 기본 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{array}{c|c|c}
 \begin{array}{ccc} K_{11} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{nn} \end{array} & \times & \begin{array}{c} X_1 \neq 0 \\ X_2 \neq 0 \\ X_3 = 0 \\ X_4 = 0 \\ \vdots \\ X_n \neq 0 \end{array} \\
 \hline & & = F
 \end{array} \quad (1)$$

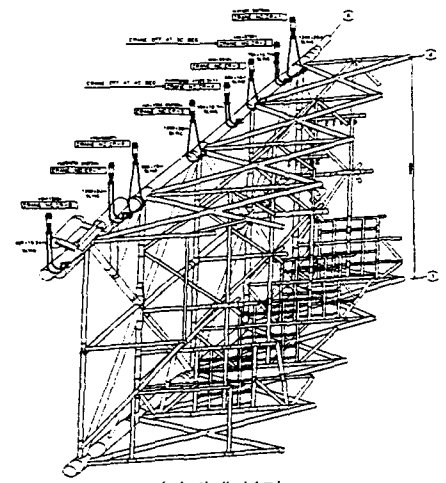
여기서 K_{nn} 은 구조물의 강성 행렬,
 $X_n \neq 0$ 은 구조물 절점의 변위
 $X_n = 0$ 은 고정 boundary의 변위
 F 는 구조물의 반력 또는 내력



(a) 평면 보기



(b) 측면 보기



(c) 전체 보기

그림 1 Crane 장비 배치도

표 3 Panel 'A'의 회전각에 대한 지점의 crane 하중

(a) Panel 'A'의 회전각 10°에 대한 지점의 crane 하중

CRANE	REACTION	DISTANCE	MOMENTS	C/R 역 하중	MOMENTS	CAPACITY	C/R NAME
1	245.7	0	0	250	0	275	C/R-550
2	-7.1	10.0345	-71.245	40	401.38	50.7	AM9270
3	146.43	20.069	2938.704	45	903.105	55.9	AM9310
4	19.22	31.107	597.8765	68	2115.276	76.47	S-1
5	202.47	42.145	8533.098	250	10536.25	275	C/R-500
6	198.81	65.225	12967.38	57	3717.825	68.67	P&H5300R
7	239.87	76.765	18413.62	340	26100.1	425	C/R-800
8	160.35	95.305	15282.16	156	14867.58	227.3	SH-11320
TOTAL	1205.75		58661.59	1206	58641.52	1454.04	
CRANE RATIO		82.94%					

(b) Panel 'A'의 회전각 30°에 대한 지점의 crane 하중

CRANE	REACTION	DISTANCE	MOMENTS	C/R 역 하중	MOMENTS	CAPACITY	C/R NAME
1	232	0	0	228	0	275	C/R-550
2	-2.8	10.0345	-28.0966	40	401.38	50.7	AM9270
3	117.6	20.069	2360.114	40	802.76	55.9	AM9310
4	18.89	31.107	587.6112	60	1866.42	76.47	S-1
5	196.46	42.145	8279.807	230	9693.35	275	C/R-500
6	153.72	65.225	10026.39	52	3391.7	68.67	P&H5300R
7	235.84	76.765	18104.26	299	22952.74	425	C/R-800
8	153.62	95.305	14640.75	156	14867.58	227.3	SH-11320
TOTAL	1105.33		53970.83	1105	53975.93	1454.04	
CRANE RATIO		76.00%					

(c) Panel 'A'의 회전각 40°에 대한 지점의 crane 하중

CRANE	REACTION	DISTANCE	MOMENTS	C/R 역 하중	MOMENTS	CAPACITY	C/R NAME
1	220.3	0	0	252	0	275	C/R-550
2	0	10.0345	0	0	0	0	AM9270
3	112.16	20.069	2250.939	50	1003.45	55.9	AM9310
4	0	31.107	0	0	0	0	S-1
5	197.74	42.145	8333.752	250	10536.25	275	C/R-500
6	128.83	65.225	8402.937	60	3913.5	68.67	P&H5300R
7	235.334	76.765	18065.41	288	22108.32	425	C/R-800
8	145.41	95.305	13858.3	140	13342.7	227.3	SH-11320
TOTAL	1039.774		50911.34	1040	50904.22	1326.87	
CRANE RATIO		78.38%					

이와 같이 구조물의 반력을 구하기 위하여 사용한 프로그램은 구조물 해석전용인 SACS(Structural Analysis Computer System)를 사용하였다.

4.2 적용 crane 역하중 결정

상기 반력을 산출 후 spread sheet을 이용하여 crane 역하중을 결정한다. 기본 방정식은 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)으로 나타낼 수 있으며 crane 사용 하중 결정은 다음 표 3 (a), (b) 및 (c)와 같이 표현되며, 여기서 사용한 역하중은 crane 사용 하중이라 할 수 있다.

$$R_1X_1 + R_2X_2 + R_3X_3 + \dots + R_nX_n = M_R \quad (2)$$

$$C_1X_{11} + C_2X_{22} + C_3X_{33} + \dots + C_iX_i = M_C \quad (3)$$

$$\sum R_n \leq \sum C_i \quad (4)$$

상기 식에 대한 조건 식은 다음과 같다.

$$M_C = M_R$$

$$C_i \leq \text{crane 허용하중이다.}$$

여기서 R_n = 구조물의 반력
 X_n = 구조물 반력 지점
 C_i = crane 하중
 X_i = crane 위치

4.3 Panel roll-up시 응력 해석

이러한 해석 절차를 거쳐 최종적으로 구조물의 응력을 해석 후 이것이 허용 응력 이내로 되어야 하며 문제시 보강방법을 제시하여야 한다. 또한 crane 배치를 약간씩 변경하여 구조물의 flexibility를 최대한 이용하여 응력이 허용 범위 내로 들어올 수 있게 한다. 다음은 구조물 해석을 위한 유연도 구조 해석(Flexibility Structural Analysis Method) 기법의 기본 식은 식 (5)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{xi} \\ C_{x1} \\ C_{xi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 K = 구조물의 stiffness matrix
 X = 구조물의 절점의 변위 matrix
 F_{Xi} = 구조물의 반역(unknown factor)
 C_{Xi} = 구조물에 대한 crane의 적용 하중

상기 해석을 통하여 구조물의 부재가 허용 응력을 초과할 경우 구조물을 보강하든가 구조물의 flexibility 허용 한계에서 crane 위치를 변경 재해석 수행하여 구조물의 응력이 허용 응력 이내로 들어올 수 있게 한다.

5. 해석 방법에 대한 고찰

대형 구조물일 경우 conventional 해석 방법시 구조물을 제작 roll-up 하기 위하여 crane 배치거의 불가능하며 추가 crane 구매 등이 요구되며, 이 방법은 사실상 거의 불가능하므로 구조물을 부분 제작 후 각각 roll-up 하여 고소작업을 수행하여야 한다. 이는 시공성, 안정성 및 경제성에 많은 문제점을 내포한다.

그러므로 새로운 해석기법인 유연도 구조해석 기법(Flexibility Structural Analysis Method)으로 구조물의 flexibility를 최대한 이용한 것으로 부분 조립을 하지 않고 육상 제작 후 전체 구조물을 roll-up 하므로 시공성, 안정성, 경제성에 막대한 효과를 얻을 수 있다.

6. 결과분석

본 연구대상인 중국 CNOOC사로부터 수주한 PINGHU jacket roll-up시 처음에는 conventional method로 해석 수행하여 보았으며, 이때는 대형 crane인 800ton 1,000ton이 각각 추가로 필요하게 되었다.

다른 방법으로는 panel을 두 부분으로 분리 roll-up 하여야 했다. 그러나 이러한 문제를 해결하기 위해 유연도 구조해석 기법(Flexibility Structural Analysis Method)을 도입 수행하였으며, 이때 panel을 두 부분으로 분리하지 않고 또한, 추가로 800ton 및 1,000ton crane이 필요치 않았다.

따라서 800ton 및 1,000ton crane의 사용료에 대한 원가절감과 제작에 대하여 고소작업 및 용접작업을 최소화하였다. 그리고 차후 대형 고정식해양구조물 제작시 유연도 구조해석 기법(Flexibility Structural Analysis Method)를 적용하므로 보다 경제성, 제작 공기 단축 및 안정성을 확보할 수 있다.

참 고 문 헌

1. EDI, "SACS Release 5 User Manual", 1998
2. Hyundai Heavy Industries co., Ltd., "PingHu Jacket Roll-up Procedure"
3. 현대중공업, "crane 장비표" 