

초대형 부유식 해상구조물 상부 구조체의 구조해석

Structural Analysis of Superstructures for Very Large Floating Structures

송화철*, 광명하**

Song, Hwa Cheol, Kwak, Myung Ha

Abstract

The importance of utilization of ocean space increases due to high population and narrow land space. The development of a new technology for future use of ocean space, such as a design technology of Very Large Floating Structures(VLFS) is needed.

The purpose of this study is to analyze the structural behaviors of superstructures for very large floating structures. In this paper, the estimation of artificial wave loads, the response characteristics of non-typical structures, the optimal truss location for long span structures due to support displacements, and the stress changes according to different conditions of beam end constraints are introduced by using example structures.

Key words : superstructure, very large floating structure, artificial wave loads, support displacements, beam end constraints

1. 서론

해양공간 활용을 통한 국내의 경제활동은 국가 경제발전에서 상당한 기여를 해왔으며, 특히 인구증가와 산업화로 인한 육지면적의 부족, 육상자원의 고갈로 말미암아 해양공간의 중요성은 더욱 증대할 것이다. 현재 매립방식에 의한 국내의 연안역 이용은 포화상태에 있으며 이와 같은 매립방식에 대한 대안으로 환경친화적이고 쾌적한 해양공간을 확보하기 위한 초대형 부유식 해상구조물에 대한 기술개발이 요구되고 있다.

일본은 메가플로터 조합을 중심으로 1995년부터 초대형 부유식 해상구조물에 대한 연구를 수행하고 있으며 간사이공항에 대한 메가플로터 터미널 시설과 같은 상부구조물에 대한 연구도 진행하였다.

국내에서도 이에 대한 연구를 90년 중반부터 수행하고 있으며 주로 유탄성응답해석과 같은 하부부체의 거동에 대한 연구가 이루어졌다. 최근 1999년부터 한국해양연구원에서는 초대형 부유식 해상구조물 안전성에 대한 연구를 수행하고 있으며, 상부구조물의 구조거동에 관한 연구가 국내에서 처음으로 한국해양대학교에서 수행되고 있다.

본 논문에서는 초대형 부유식 해상구조물 상부시설 시설계획의 상부구조체에 대한 구조해석결과를 소개하고, 가상파랑하중 산정법, 비정형구조물의 응답특성, 장스팬구조물 트러스 보강위치, 보 단부 구속조건에 의한 응력변화 등을 예제 구조물을 통하여 분석하고 검토한다.

2. 파랑하중 산정

본 연구에서는 부체구조물과 상부구조물을 분리하여 해석하는 경우를 전제로 하며, 부체의 탄성응답해석의 결과인 변형모드를 이용하여 상부구조물의 주각부에 강제수직변위를 입력하여 파랑하중을 고려한다.

파랑중 부체의 탄성응답은 파랑에 의한 진동이며 부체의 변형모드는 부체의 휨강성과 기진력이 되는 파의 주기에 의해서 결정된다. 구조배치가 일정할 경우에는 부체의 치수가 어느 정도(500m정도)보다 커지면 부체단부주변을 제외하고는 같은 진동모델이 반복된다.

탄성응답해석에 의한 변형모드를 구하기 전이나 입지장소가 정해지기 전에는 가상 파랑하중을 산정하여 초기설계에 사용하는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 탄성변형값 대신에 주기와 진폭을 가정하여 사인함수를 이용한 가상파랑하중의 구현 가능성을 검토하였다. Fig. 1은 일본 메가플로터 시설에 적용한 200년 재현주기, 주기 10초, 파의 입사방향 0°에 대한 변형모드를 진폭 25cm, 반파장 140m 및 150m에 대한 변형모드와 비교한 결과이다. 이 경우 반파장 140m일때 탄성응답해석의 결과값과 거의 일치하고 있다. 한편 Fig. 2는 파의 입사방향 90°에 대한 변형모드를 진폭 30cm, 반파장 130m 및 150m에 대한 변형모드와 비교한 결과이다. 이 경우 반파장 130m일때 탄성응답해석의 결과값과 거의 일치하고 있다. 따라서 파장과 진폭을 가정한 가상변형모드를 이용한 파랑하중의 산정이 가능함을 알 수 있다.

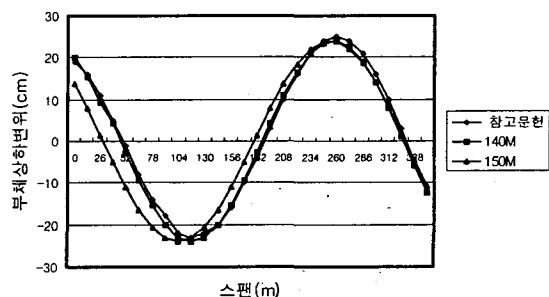


Fig. 1 Deformation mode(Wave direction 0°)

* 한국해양대학교 건축학부 조교수, 공학박사

** 한국해양대학교 건축학부 대학원생

Assistant Professor, Dr. - Ing, Division of Architecture, Korea Maritime Univ.

Graduate Student of Master Course, Division of Architecture, Korea Maritime Univ.

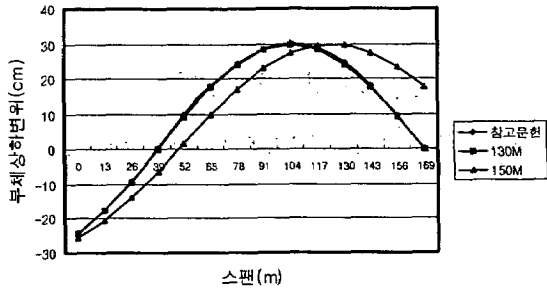


Fig. 2 Deformation mode(Wave direction 90°)

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 적용한 X방향(0°) 및 Y방향(90°)의 가상변형모드와 상하변위치를 나타낸다.

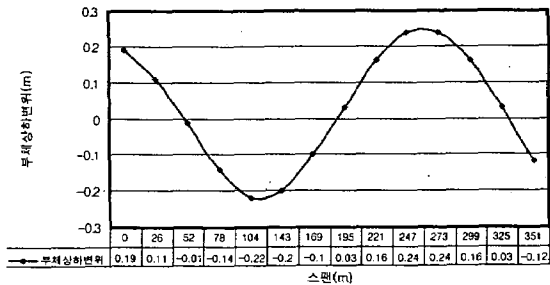


Fig. 3 Deformation mode and vertical displacements(wave direction 0°)

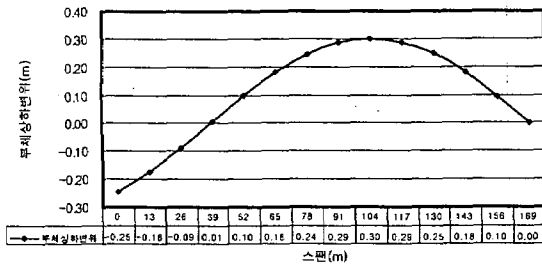


Fig. 4 Deformation mode and vertical displacement(wave direction 90°)

변형모드의 상하최대진폭이 클 경우 강제상하변위에 의한 상부구조물의 응력증가가 크며, 특히 변형모드 곡선의 구배가 클 경우 상부구조물에 미치는 영향이 크다. 이것은 구배가 큰 경우 상대처짐이 크며 이로 인한 상부구조물의 모멘트 증가가 크게 나타나기 때문이다. 하부부체의 초기 탄성응답해석 결과값이 상부구조물 배치 및 구조시스템에 영향을 주게 되므로 하부부체의 변형모드를 고려하여 상부구조 설계에 반영하여야 한다.

3. 구조시스템 선정시 고려사항

3.1 비정형구조물에 대한 검토

비정형 상부구조물의 응답특성을 분석하기 위하여 정형구조물의 스패길과 구속조건에 대한 동하중의 영향을 먼저 검토하며, 4스팬(13m, 15m) 3층(층고 4m) 3차원 골조(Fig. 5)에 대한 해석을 수행한다. 보단면은 H형강인 H800x300x14x26, 기둥단면

은 튜브인 □ 700× 700× 19으로 한다. 고정하중 및 적재하중은 각각 473kg/m²과 270kg/m²으로 하며, 동하중으로는 지점처짐을 28.8cm, 24.8cm, 18.1cm, 9.5cm, 0.0cm 입력한다.

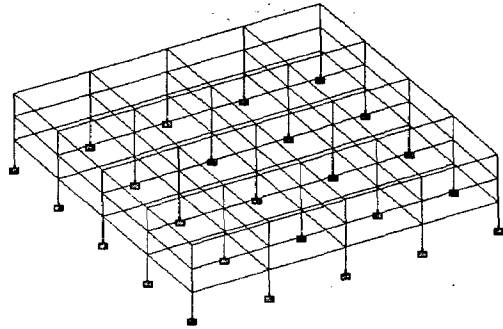


Fig. 5 4 bay- 3 story structure

Fig. 6과 Fig. 7은 13m 고정단 구조물의 정하중 및 동하중에 대한 모멘트도를 나타내며, Table 1은 스패길이 및 지점구속조건에 따른 구조물의 최대모멘트를 나타낸다. Fig. 7에 나타났듯이 동하중이 작용할 경우에는 하층부의 부제모멘트가 상층부보다 크음을 알 수 있다. 그리고 모멘트값을 비교하면 스패길 길 경우 정하중에 의한 모멘트는 증가하지만 동하중에 의한 모멘트는 감소함을 알 수 있다. 구속조건에 의한 영향을 살펴보면 지점이 힌지인 경우에는 정하중에 의한 모멘트는 조금 증가하는 반면 동하중에 의한 영향이 감소함으로써 전체적으로 보에 작용하는 최대모멘트가 고정단의 경우보다 작음을 알 수 있다.

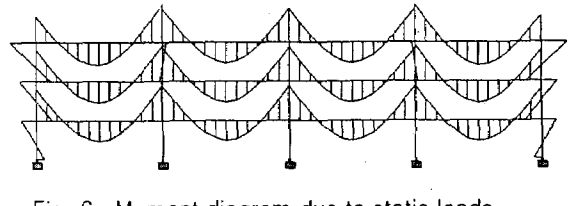


Fig. 6 Moment diagram due to static loads

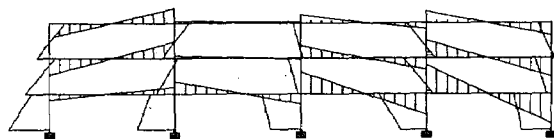


Fig. 7 Moment diagram due to support displacements

Table 1 Comparison of max. moments due to different span lengths and support conditions

스팬	지점 구속조건	최대모멘트(t·m)		
		정하중	동하중	정하중+동하중
13m	고정	86.99	74.84	161.83
13m	힌지	88.56	52.89	141.45
15m	고정	115.92	59.84	175.77
15m	힌지	118.61	40.82	159.43

비정형구조물에 대한 응력을 검토하기 위하여 13m 스패의 정형구조물과 동일한 조건에서 중앙부 기둥만 없는 Fig. 8과 같은 구조시스템을 선택하였다. Fig. 9는 중앙부 2차원 골조의 입면도를 나타내는데 2층 중앙보가 26m로 장스팬화되어 있다.

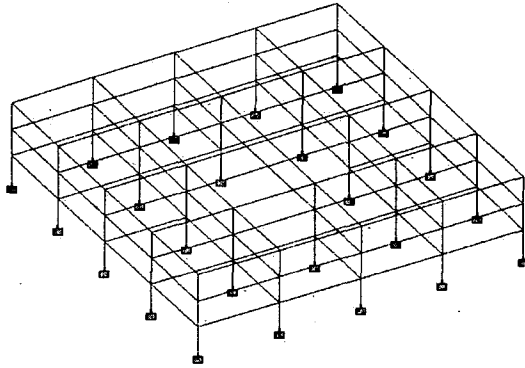


Fig. 8 4 bay- 3 story non-typical structure

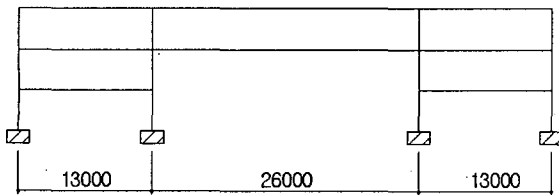


Fig. 9 2-D frame of center line

Fig. 10과 Fig. 11은 13m 비정형구조물의 정하중 및 동하중에 대한 모멘트도를 나타내며, Table 2는 정형구조물과 비정형구조물의 응력을 비교한 표이다.

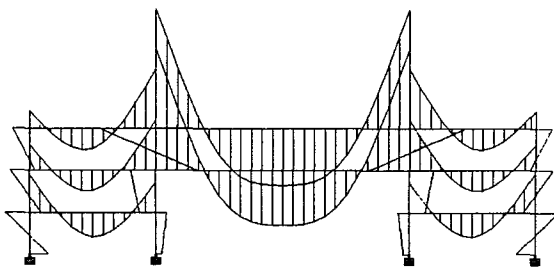


Fig. 10 Moment diagram due to static loads (non-typical structure)

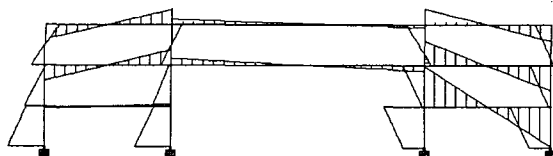


Fig. 11 Moment diagram due to support displacements(non-typical structure)

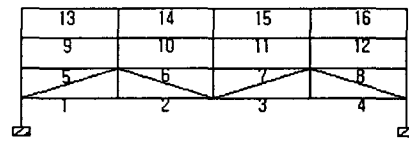
Table 2 Max. moments of typical and non-typical structures

시스템 조건	지점	최대모멘트(t·m)		
		정하중	동하중	정하중+동하중
정형	고정	86.99	74.84	161.83
정형	현지	88.56	52.89	141.45
비정형	고정	281.68	9.50	291.18
비정형	현지	286.45	5.55	286.45

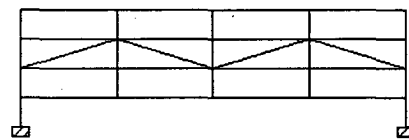
비정형구조물의 경우 중앙부 보가 장스팬(26m)이 되어 정하중에 의한 모멘트가 크게 증가하게 된다. 한편 동하중에 의한 모멘트는 크게 감소하게 됨을 알 수 있다. 그리고 비정형구조물의 경우 지점구속조건에 의한 모멘트의 변화는 정형구조물에 비하여 비교적 작게 나타난다.

3.2 장스팬 구조물의 효과적인 트러스 보강위치

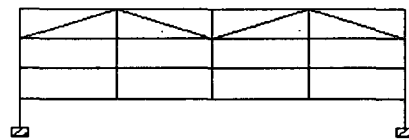
장스팬 구조물의 보강을 위해서는 트러스를 배치하게 되는데, 본 연구에서는 정하중 및 동하중이 작용할 경우의 층별 트러스보강 위치에 따른 응력변화를 검토하여 효과적인 트러스보강 위치를 선정하도록 한다. Fig. 12는 층별 트러스의 배치를 달리한 트러스 보강시스템을 나타내며, 각각에 대한 응력분포를 분석한다. 구조물의 1층 스패는 52m, 2~4층의 스패는 13m이며 층고는 4m이다. 보와 트러스의 단면은 H형강인 H800x300x14x 26으로 하고, 기둥단면은 튜브인 □ 700x 700x 19으로 한다. 수직하중으로는 9.6t/m의 분포하중을 적용하고, 지점강제침침은 오른쪽 지점에 28cm 하부로 작용시킨다.



(a)TRUSS1



(b)TRUSS2



(c)TRUSS3

Fig. 12 Three different truss models

Table 3은 트러스 보강시스템별 최대모멘트값을 나타내는데, 본 예제에서는 정하중이 크게 작용하기 때문에 최대모멘트가 작용하는 보의 정하중에 의해 결정됨을 알 수 있다. 한편, 동하중만 작용할 경우에는 표에서 나타나듯이 1번 보에 최대모멘트를 받게 되는데, 이것은 오른쪽 지점변위가 아래로 작용함으로써 1번 보에서 최대모멘트가 작용하기 때문이다.

정하중과 동하중이 동시에 작용 때는 2층에 트러스를 배치한 경우(TRUSS1) 보의 최대모멘트는 385.6tm로서 TRUSS2보다 10%,

TRUSS3보다 20% 정도 작게 발생함을 알 수 있다. 따라서 트러스를 하층부에 보강한 경우 보 모멘트가 상층부에 보강한 경우보다 작게 작용하기 때문에 구조설계시 단면크기를 줄임으로써 더 경제적으로 설계할 수 있다.

Table 3 Three different truss models

	최대모멘트(t·m)		
	정하중	동하중	정하중+동하중
TRUSS1	383.28(12)	16.57(1)	385.64(12)
			383.28
TRUSS2	396.18(1)	26.12(1)	422.30(1)
			396.17
TRUSS3	460.84(5)	26.12(1)	463.29(5)
			460.84

* ()안의 숫자는 보의 번호를 나타냄(Fig. 12 참고)

3.3 보 단부 구속조건에 의한 응력변화

수평하중에 대한 강성을 충분히 확보하기 위해서는 보와 기둥의 접합부를 강접합(rigid-connection)으로 하는 것이 일반적이지만 부유식 상부구조물의 경우에는 수평하중보다는 파랑하중에 의해 발생하는 부체의 상하변위에 의한 영향이 크기 때문에 보-기둥 접합부를 강접합으로 할 경우에는 이에 대한 부가모멘트가 크게 증가하게 된다. 이와 같은 부가모멘트를 저감하기 위해서는 접합부를 반강접(semi-rigid)이나 핀(pin)으로 하는 방법을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 보단부의 구속조건에 의한 응력변화를 검토하여 효율적인 구조시스템을 정하고자 한다. 예제 구조물(Fig. 5)의 스패를 13m 및 15m인 경우에 보단부 구속조건을 고정, 50%고정, 힌지로 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석 결과를 Table 4에 나타내었으며 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

Table 4 Comparison of max. moments by member releases

스패	보단부 구속조건	최대모멘트(t·m)		
		정하중	동하중	조합하중
13m	고정	87.0	74.8	161.8(100%)
"	50%고정 (반강접)	85.2	40.4	125.6(77%)
"	힌지	136.0	0.0	136.0(84%)
15m	고정	115.9	59.8	175.7(100%)
"	50%고정 (반강접)	113.5	31.9	145.4(82%)
"	힌지	181.1	0.0	181.1(103%)

- 반강접(50%구속)의 경우 동하중(파랑하중)에 의한 영향이 줄어들며, 힌지의 경우 동하중의 의한 영향이 없음을 알 수 있다.
- 스패 13m의 경우 힌지 및 반강접의 조건에서는 모멘트가 각각 16%, 23% 감소한다.
- 스패 15m의 경우 반강접의 조건에서는 모멘트가 18% 감소하지만, 힌지의 조건에서는 3% 증가한다.
- 따라서 장스패의 경우에는 보 단부가 힌지로 되면 정하중에 의한 보 중앙부의 모멘트가 크게 증가하여 최대모멘트가 커

지는 경우도 발생함을 설계시 유의해야 한다.

- 반강접의 경우 스패에 상관없이 최대모멘트가 감소하므로 보 부재사이지를 줄일 수 있으며 구조물량 감소로 인한 경제성을 도모할 수 있다.

4. 상부구조물 설계 예

4.1 건축물 개요

상부시설 시설계획안의 중앙부 건물중에서 국제회의장, 해양문화센터, 해양정보센터, 해양호텔에 대한 구조안전성평가를 수행한다. 대상건물의 배치도 및 조감도는 각각 Fig. 13과 Fig. 14에 나타나 있다.

- 메인데크의 크기 : 가로 1,500m, 세로 500m, 깊이 10m
- 중앙동의 크기 : 가로 351m, 세로 169m, 층고(1-3층: 4m, 4-9층: 3m)
- 중앙동의 용도 : 1-3층(국제회의장, 해양문화센터, 해양정보센터), 4-9층(호텔)

상부구조물은 철골조 라멘구조 형식(하부층 스패 13m, 상부층 스패 6.5m)이며 강재의 재료특성은 SM50의 용접구조용 내후성 열간압연재로서 항복강도는 33.0t/m², 강재의 탄성계수는 2.1×10⁶ kg/cm²이다. Fig. 15~20은 구조평면도와 구조입면도를 각각 나타낸다.

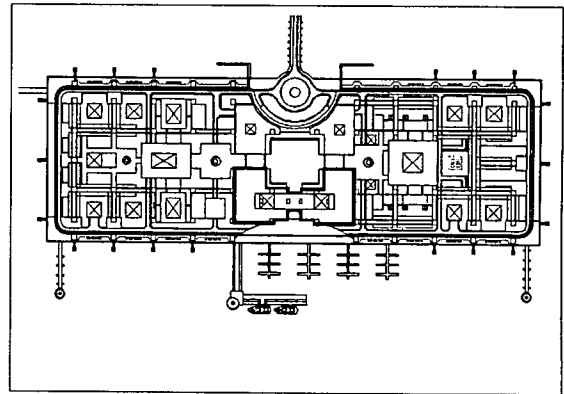


Fig. 13 Superstructure Facilities

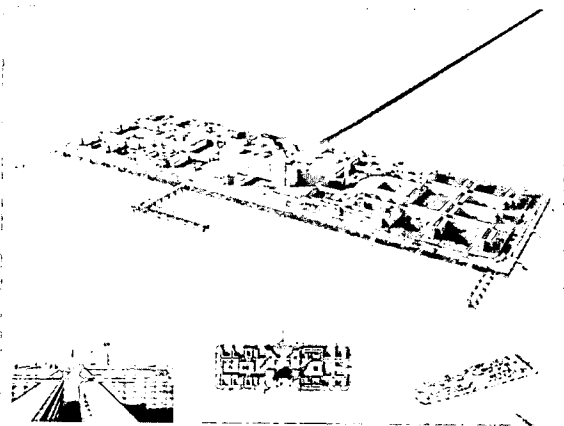


Fig. 14 Bird's-eye view

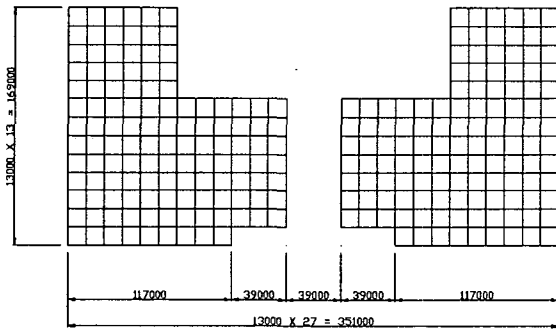


Fig. 15 Structural plan (1~2 floor)

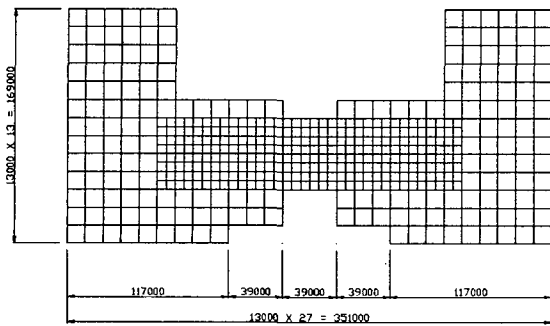


Fig. 16 Structural plan (3 floor)

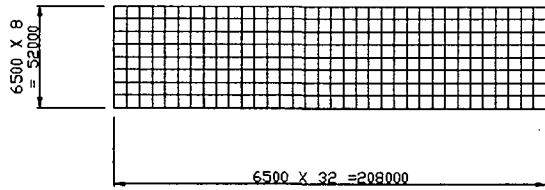


Fig. 17 Structural plan (4~6 floor)

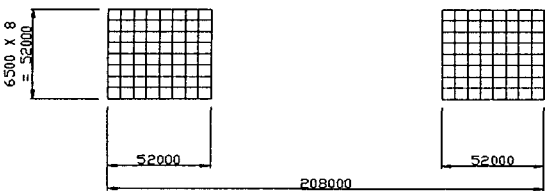


Fig. 18 Structural plan (6~9 floor)

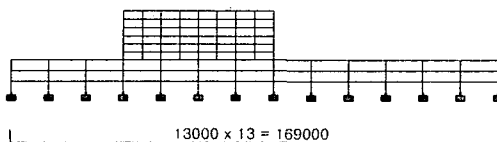


Fig. 19 Structural elevation (Y-axis, lateral direction)

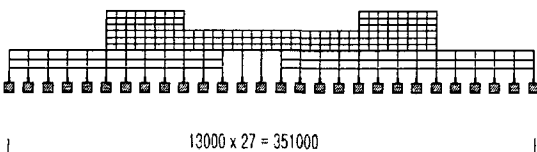


Fig. 20 Structural elevation (X-axis, longitudinal direction)

4.2 구조해석 결과

하중적용에 있어 고정하중 및 적재하중은 각각 473kg/m^2 과 270kg/m^2 으로 하며, 동하중으로는 X방향과 Y방향의 지점지점으로 각각 Fig. 3과 Fig. 4의 값을 적용한다.

하중조합은 정하중(고정하중+적재하중), 동하중(파랑하중), 정하중과 동하중이 동시에 작용하는 세 경우로 하며, 주각부의 구속조건은 고정단과 힌지의 두 경우에 대하여 비교검토한다.

Table 5에는 보, 기둥의 응력해석 결과값을 나타내었다. 표에서 CASE1, CASE2는 정하중과 X방향 파랑하중(파의 입사방향 0°)이 동시에 작용하는 경우의 값이며, CASE1은 주각부가 고정단, CASE2는 주각부가 힌지인 경우이다.

그리고 CASE3, CASE4는 정하중과 Y방향 파랑하중(파의 입사방향 90°)이 동시에 작용하는 경우의 값이며, CASE3은 주각부가 고정단, CASE4는 주각부가 힌지인 경우이다.

Table 5 Member forces(Maximum values)

		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	
보	모멘트 (t-m)	정하중	94.05	93.26	88.80	89.00
		동하중	184.31	192.02	236.25	245.17
		정하중+동하중	278.36	285.28	325.05	334.17
	전단력 (t)	정하중	33.49	33.24	32.42	32.65
		동하중	29.48	30.64	37.18	38.71
		정하중+동하중	62.97	63.88	69.75	71.36
기둥	모멘트 (t-m)	정하중	-0.07	-0.06	-0.07	-0.06
		동하중	45.97	51.05	0.24	0.24
		정하중+동하중	45.89	50.98	0.17	0.17
	축력 (t)	정하중	983.85	984.02	983.85	984.02
		동하중	137.78	136.88	131.37	130.97
		정하중+동하중	1121.6	1120.9	1115.2	1115.6

해석결과에 나타나듯이 정하중과 동하중(부채상하변위)은 연직하중이기 때문에 주각부 구속의 차이에 의한 최대응력의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 보의 경우 동하중에 의한 영향을 크게 받는 반면 기둥의 경우에는 축하중이 지배적이며 정하중에 의한 영향이 크게 나타난다. 한편 보의 경우 90° 파랑하중에 의한 모멘트값이 크게 나타나며 CASE4에서 최대모멘트값을 가진다.

중앙동 건물 중앙부의 통로에 기둥이 없을 경우에는 보가 39m의 장스팬화되고 보에 과도한 응력이 작용하기 때문에 보의 단면 성능을 크게 향상시키고 동시에 Fig. 21과 같은 트러스의 보강이 필요하다. 트러스 부재는 H-800x300x14x26으로 보는 H-1500x600x20x30(단면적 648cm^2 , 단면계수 $32,569.9\text{cm}^3$) 플레이트거더로 할 경우 허용응력을 만족한다.

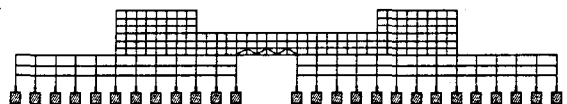


Fig. 21 Braced system with trusses

4.3 보 단부 구속조건에 의한 해석결과

3층 4경간 구조물의 해석결과를 기초로 하여 시설계안 상부구조시스템의 보 단부의 구속조건에 따른 응력변화를 검토하여 효율적인 구조시스템을 제안한다.

4층이상 상부층의 보 단부는 횡하중에 대한 영향을 고려하여 강접으로 하였으며 하부층인 1~3층의 보 단부를 고정, 반강접, 힌지로 달리하여 최대모멘트를 비교하였다. Table 6은 구조해석 결과값으로 보 단부 구속조건에 따른 최대모멘트의 변화를 나타낸다.

Table 6 Comparison of max.moments of main building structure

파랑하중 방향	보단부 구속조건	최대모멘트(t·m)		
		정하중	동하중	조합하중
단변방향	고정	88.81	236.25	325.06(100%)
	50%고정 (반강접)	85.86	114.98	200.84(62%)
	힌지	136.03	0.00	136.03(42%)
장변방향	고정	94.06	184.31	278.37(100%)
	50%고정 (반강접)	90.76	106.39	197.14(71%)
	힌지	136.03	0.00	136.03(49%)

파랑하중이 단변방향으로 작용할 경우에는 보 단부를 반강접과 힌지로 하면 최대모멘트가 각각 38%, 58% 감소함을 알 수 있다. 장변방향의 파랑하중에 대해서는 반강접의 경우 29%, 힌지의 경우 51% 최대모멘트가 감소한다. 단변방향이 동하중에 의한 영향이 크며, 이 경우에 구속조건을 반강접으로 하면 효과가 크게 나타난다.

단변방향 파랑하중 작용시 보 단부조건이 힌지의 경우에는 최대모멘트가 4층에 발생하며 고정단일 경우에 발생하는 모멘트인 156t·m보다 증가한 204t·m가 발생한다. 따라서 보 단부조건을 층별로 또는 부분적으로 다르게 할 경우에는 각 보 부재의 응력 변화에 따른 부재사이즈의 증감을 설계시 충분히 고려하여 한다.

보 단부를 강접으로 할 경우에는 부재를 H-900×300×16×28(단면적 308.8cm²)로 하여야 허용응력을 만족하지만 반강접시에는 H-792×300×14×28(단면적 243.4cm²)이면 충분하며 보 부재의 사이즈를 줄임으로써 지중을 저장할 수 있으며 구조물량도 저장하여 경제성을 도모할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 가상파랑하중 산정법, 비정형구조물의 응답특성, 장스팬 구조물 트러스 보강위치, 보 단부 구속조건에 의한 응력변화 등을 예제 구조물을 통하여 분석하였으며, 초대형 부유식 해상구조물 상부구조체의 구조해석결과에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 육상구조물과 달리 구조시스템 선정시 특히 고려하여 할 점은 동하중에 의한 영향이며, 동하중에 의해 단면이 결정될 경우에는 강재수직변위의 구배가 큰 부분의 보 단면을 증가 시킴으로써 경제적인 구조시스템을 이룰 수 있다.
- 비정형구조물의 경우 중앙부 보가 장스팬이 되어 정하중에 의한 모멘트가 크게 증가하게 된다. 한편 동하중에 의한

모멘트는 크게 감소하게 됨을 알 수 있다. 그리고 비정형 구조물의 경우 지점구속조건에 의한 모멘트의 변화는 정형구조물에 비하여 비교적 작게 나타난다.

- 트러스를 하층부에 보강한 경우 보 모멘트가 상층부에 보강한 경우보다 작게 작용하기 때문에 구조설계시 단면크기를 줄임으로써 더 경제적으로 설계할 수 있다.
- 보 단부의 구속조건을 반강접으로 할 경우에는 동하중에 의한 영향이 크게 줄어든다. 따라서 보 부재의 사이즈를 줄이고 지중을 저장할 수 있으며 구조물량도 저장하여 경제성을 도모할 수 있다.

Acknowledgement

This research was supported by the Ministry of Maritime Affairs & Fisheries. The writers are grateful for this support.

5. 참고문헌

- [1] 日本建築學會, 海洋建築物構造設計指針(固定式)· 同解説, 1985
- [2] 日本建築學會, 海洋建築物構造設計指針(浮遊式)· 同解説, 1990
- [3] 메가플로터 技術研究組合, 超大型浮體式 海洋構造物 研究成果報告書, 1995
- [4] 건축물 하중기준 및 해석, 사단법인 대한건축학회, 2000
- [5] 小林理市, 海洋建築物の設計, オモム社, 1995
- [6] 日本建築センタ, 海洋建築物安全評價指針, 1992
- [7] 竹中工務店, 메가포트 空港施設設計に伴う터미널빌딩 檢討作業業務成果報告書, 마린포트 推進機構, 1997.12
- [8] 竹中工務店, 三井造船, 상재건조물 구조배치의 조사연구, 1999.3
- [9] 메가플로터 技術연구조합, 초대형 부유식구조물 技術기준안 동해설, 1999
- [10] 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 技術개발 연구보고서 (1차년도), 1999.12
- [11] 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 技術개발 연구보고서 (2차년도), 2000.12
- [12] 홍사영 외, 대형 해양구조물 거동해석 기법 개발, 선박해양 공학연구센터, 과거처 특정 연구개발사업 보고서, 1994-1996
- [13] 정태영 외, 해양공간이용 대형 보합플랜트 개발, I. 시스템 종합기술개발, 한국기계연구원, 과거처 특정 연구개발사업 보고서, 1995-1998
- [14] 신현경 외, 부유식 해양구조물에 관한 연구, 울산대학교, 과거처 특정 연구 개발 사업 보고서, 1994-1996