

반강접 접합부를 적용한 초대형 부유식 구조물 상부구조체에 대한 동적해석

송화철* · 김우년**

*한국해양대학교 해양공간건축학부 부교수, **한국해양대학교 해양건축공학과 대학원

Dynamic Analysis of Superstructures on Very Large Floating Structure with Semi-Rigid Connections

Hwa-Cheol Song* · Woo-Nyon Kim**

*Division of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Graduate Student, Department of Oceanic Architectural Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요약 : 초대형 부유식 구조물의 경우 지진하중보다 파랑하중에 의한 영향이 크게 작용하기 때문에 파랑하중에 의한 하부부체의 변형이 상부구조물에 부가모멘트를 발생시키는 요인이 된다. 이러한 부가모멘트를 저감시키기 위해 본 연구에서는 강접합과 핀접합 사이의 거동을 하는 반강접 접합부를 적용하였다. 초대형 부유식 구조물의 상부구조체에 반강접 접합부를 적용할 경우 보의 부가모멘트를 감소시킬 수 있으며, 더욱 경제적인 설계가 가능하다. 본 논문에서는 4경간 3층 예제구조물에 대하여 파랑하중에 의한 영향을 분석하고, 구조물의 반강접 접합부 적용에 따른 효율성을 검토하였다. 접합부는 각형강관 외-다이아프램 접합부를 적용하였으며 파랑하중에 의한 동적 특성을 분석하기 위하여 시간이력해석을 수행하였다. 초대형 부유식 구조물의 상부구조물의 경우 파랑하중에 의해서 정하중의 최대모멘트 응답이 강접 구조물에서는 33% 증가하였으며, 스프링 모델을 이용한 반강접 구조물에서는 26% 증가하였다.

핵심용어 : 파랑하중, 반강접 접합부, 각형강관 외-다이아프램, 시간이력해석

Abstract : The additional moment occurs because the superstructures of VLFS are influenced by wave loads instead of earthquake loads. In order to reduce the additional moment, this study used the semi-rigid connections which lie between fully rigid and pinned. If the semi-rigid connections are used for superstructures of VLFS, the moment of beams can be reduced and more economical construction will be possible.

This study aims to show the effect of wave loads on structure and the efficiency of the semi-rigid connections due to wave loads by analyzing the time history responses. The dynamic behaviors of the rigid frame are compared with those of the semi-rigid frame considering of static loads, wave loads and combination loads for a four-bay, three-story frames. The semi-rigid connection type is a steel tubular column with square external-diaphragm connections and the time history analysis is used for the dynamic responses. The additional moment responses due to wave loads increase 33% in the rigid frame, 26% in the semi-rigid frame with the spring model.

Key words : Wave loads, Semi-rigid connection, Steel tubular column with square external-diaphragm, Time history analysis

1. 서론

인간의 활동장소인 부유식해상구조물(Very Large Floating Structure : VLFS)의 상부시설은 이용자를 위해 시설의 적합한 기능성과 안전성을 반드시 확보하여야 한다. VLFS의 상부시설의 경우 육상 구조물과 같이 지진하중의 영향을 받지 않지만 파랑하중에 의한 영향이 크게 작용한다. 해상구조물에 작용하는 파랑하중은 VLFS의 하부부체에 변형을 일으켜 상부구조물에 부가모멘트를 발생시키는 요인이 되며, 파랑하중에 의한 시설의 안전성을 확보하기 위해서는 이러한 파랑하중에 대한 구조물의 동적 거동을 검토하는 것이 필요하다(곽 등,

2001).

일반적으로 철골구조물의 보-기둥 접합부는 볼트의 경우 핀접합으로 모멘트에 대한 구속력이 없다고 가정하고 있으며 해석과 설계시에도 해석의 편의상 모멘트 전달과 회전 구속력에 대해 강접합과 핀접합 2종류로 이상화하여 사용하고 있다. 하지만 실제로 이러한 보-기둥 접합부는 작용하는 외력에 대하여 어느 정도의 회전강성을 가지고 있기 때문에 철골 골조 해석시 실제 회전강성을 고려하여 반강접 접합부에 대한 접근을 해야 하며, 경제적인 측면에서도 구조물에 반강접 접합부를 적용할 경우 강접합에 비해 제작비가 저렴하기 때문에 반강접 접합부에 대한 필요성이 제기되고 있다(송 등, 2003).

* 대표저자 : 송화철(중신회원), song@mail.hhu.ac.kr 051)410-4582

** 정회원, nyon2000@cricmail.net 051)410-4946

본 논문에서는 3층 4경간의 예제구조물에 대하여 정적하중과 유탄성 응답에 따른 파랑하중이 동시에 작용할 경우 강접골조와 반강접 접합부를 이용하여 모멘트와 수평변위에 대한 동적응답특성을 분석하고, 반강접 접합부 적용에 따른 효율성을 검토하였다.

접합부는 각형강관 외-다이아프램 접합부를 적용하였으며 초대형 부유식 구조물의 상부구조물에 파랑하중에 의한 동적특성을 분석하기 위하여 정밀 동적해석법인 시간이력해석(Time History Analysis)을 수행하였다.

2. 각형강관 외-다이아프램 접합부

본 모델에서 적용한 반강접 접합부는 Fig. 1과 같이 비충진강관의 중앙접합타입(CEN Type)에 대한 각형강관 외-다이아프램 접합부로, Three-Parameter Power Model을 근간으로 소성강성을 초기강성의 1/50로 처리하여 접합부의 변형을 식(1)와 같이 적용하였다(채, 2001).

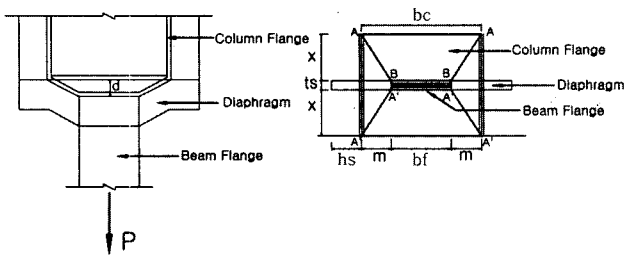


Fig. 1 Steel tubular column with square external-diaphragm

$$M(\theta) = \frac{R_{ki} \cdot \theta}{(1 + \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right|^n)^{1/n}} + R_p \cdot \theta$$

$$= \frac{M_0 \cdot \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right|}{(1 + \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right|^n)^{1/n}} + \frac{R_{ki}}{50} \cdot \theta \quad (1)$$

여기서, M_0 = 기준모멘트, θ_0 = 기준회전각, n = 형태결정계수, R_{ki} = 초기 접합부의 강성, 그리고 $\theta_0 = M_0 / R_{ki}$ 이다.

기준모멘트(M_0)는 참고문헌 3)에서와 같이 단순인장실험에서 항복선 이론을 이용하여 각형강관의 인장축 보플랜지의 중국상황을 예측하는 이론식에 의한 예측 가능한 값인 중국인장내력(P_{cal})에 보춤(H_b)을 곱한 값(M_{cal})과 보의 전소성모멘트(M_p)에 변형경화를 고려해 10%로 증가시킨 값 중에 작은 값을 M_0 로 사용하였으며 아래의 식 (2)와 같다.

$$M_0 = \text{MIN}[1.1 \times M_p, M_{cal}(= P_{cal} \times H_b)] \quad (2)$$

3. 시간이력하중 산정

파랑하중을 고려한 상부구조물의 동적해석법인 시간이력해석을 위해서는 하부부체의 거동을 시간이력하중으로 치환하

여 상부구조물에 적용하여야 한다. 이와 같은 시간이력해석을 위해서는 시간이력하중을 산정하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 한국해양연구원에서 수행한 500m×300m×6m 부유체의 유탄성응답 해석의 결과인 변형모드를 상부구조물의 주각부에 입력하여 파랑하중을 고려하였다(해양수산부, 2003). 식 (3)은 유탄성응답에 따른 지점별 데이터를 이용하여 시간에 따른 일정한 파주기에 대한 지점별 변위를 나타낸 식이며 Fig. 2는 시간 $t = 0$ 일 때의 지점별 지점변위를 나타낸다.

Z(t) at t = 0

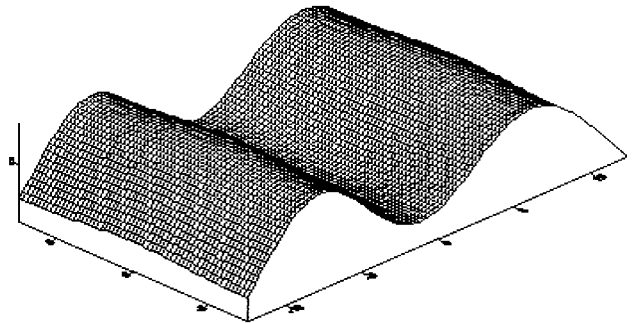


Fig. 2 Elastic responses at t = 0

$$Z(t) = \text{Re}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) + \text{Im}(z) \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) \quad (3)$$

여기서, t = 시간 (Time), $Z(t)$ = 시간에 따른 지점변위, T = 파주기, $\text{Re}(z)$ 및 $\text{Im}(Z)$ = 유탄성응답에 따른 지점별 데이터이다.

시간이력해석을 위한 시간이력하중을 산출하기 위하여 상부구조물 주각부의 위치에 해당하는 지점에 13초의 파주기를 적용하였다. 시간은 0.02초 간격(Time interval)으로 30초까지 1501개의 데이터를 산출하여 적용하였으며, 산출된 시간이력하중은 주기 13초, 진폭 22.63cm의 시간이력변위로 Fig. 3과 같다.

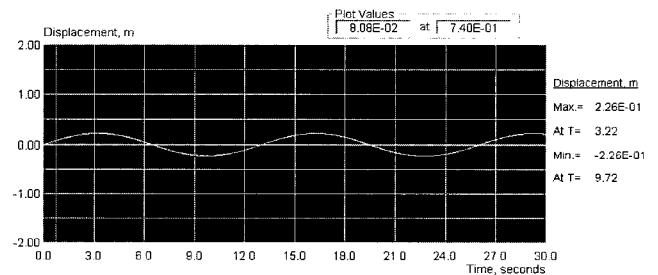


Fig. 3 Time history displacement

4. 적용 예제구조물의 개요

예제구조물은 총고 4m, 스패 13m의 4경간 3층 정형구조물로 Fig. 4와 같이 강접 및 반강접 구조물을 나타내었으며, 보 단면은 H형강인 H 800×300×14×26, 기둥단면은 튜브인 □

700×700×19로 단면 성능은 Table 1과 같다.

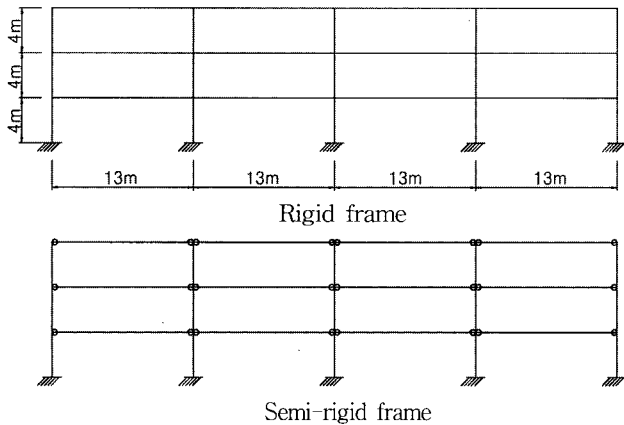


Fig. 4 4 Bay - 3 Story frame

Table 1 Member properties

	Section	Properties
Girder	H 800×300×14×26	A=267.4cm ² , Z=7300cm ³
Column	□ 700×700×19	A=517.5cm ² , Z=11439cm ³
Steel	SM 490 (f _y : 3.3 tf/cm ² , E : 2.1×10 ⁶ kgf/cm ²)	

반강접 접합부로 사용된 각형강관 외-다이아프램의 부재치수 및 적용변수 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Member size and parameters of steel tubular column with square exterior-diaphragm connections

Member	b _c	t _c	b _f	t _f	h _s	t _s
		70	1.9	30	2.6	7.5
Parameter	M ₀	1991 kNm	R _{ki}	187719 kNm/rad		

여기서, b_c = 강관의 폭, t_c = 강관의 두께, b_f = 보 플랜지의 폭, t_f = 보 플랜지의 두께, h_s = 직각 외-다이아프램의 폭, t_s = 직각 외-다이아프램의 두께이다.

하부부체의 파랑하중에 의한 영향을 상부구조물에 동적하중으로 입력하기 위해서 Drain-2DX(V. Prakash, 1992)의 원도용 구조해석 프로그램인 RAM-Xlinea(RAM, 1998)를 사용하였다. 동적 비선형해석이 가능한 이 프로그램은 절점에 변위시간이력을 적용할 수 있어 구조물의 지점에 동적변위하중을 입력할 수 있다.

강접 구조물의 경우 기둥과 보부재는 TYPE 2(Plastic Beam-Column Element)를 적용하였으며, 반강접 구조물의 경우는 반강접 거동을 고려하기 위해 TYPE 4(Simple Connection Element)를 양단부에 적용하였다. 본 연구에서는 반강접 접합부의 비선형스프링으로 이선형(bilinear) 모델을 사용하였다.

질량(Mass)은 각 절점에 집중되는 집중질량(Lumped

mass)으로 가정하여 중앙부 절점에 80kN·sec²/m, 가장자리 절점에 40kN·sec²/m을 적용하였다.

정하중(고정하중+적재하중+풍하중) 및 파랑하중은 Fig. 5에 도시하였으며, 파랑하중은 앞에서 언급한 Fig. 3의 시간이력하중을 적용하였다.

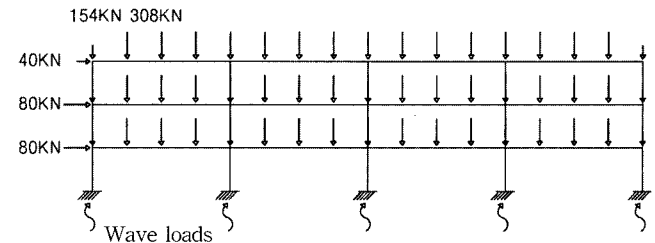


Fig. 5 Wave loads considering out-of-phase effect

RAM-Xlinea에서 지점변위 데이터를 각 주각부에 입력하기 위하여 각 주각부의 자유도 제약조건을 스프링으로 지정하였으며, 본 예제구조물에서는 변위시간이력이 수직방향으로 작용하기 때문에 각 주각부의 Y방향의 구속조건을 스프링으로 하였다. 그리고 예제구조물에 out-of-phase 효과를 반영하기 위하여 각 주각부에 0.5초의 시간지연(Time Delay) 조건을 적용하였다.

5. 동적응답 분석

상부구조물의 주기는 고유치해석(Eigenvalue Analysis)을 통해서 고유주기를 구할 수 있으며, Table 3은 강접 접합부와 반강접 접합부의 모드별 고유주기를 나타내었다.

Table 3 Natural period

Connection Type	Period (sec)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Rigid	0.576	0.160	0.123
Semi-rigid	0.689	0.178	0.123

강접 및 반강접 구조물의 고유주기를 보면, 1차 주기의 경우 강접 구조물에 비해 반강접 구조물의 주기가 20%정도 증가함을 알 수 있다.

동적응답 분석을 위한 하중은 정하중(고정하중+적재하중+풍하중), 파랑하중, 정하중과 파랑하중이 동시에 작용하는 조합하중 등 세가지 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

5.1 접합부에 따른 동적응답 분석

(1) 최대모멘트응답 분석

주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 파랑하중이 작용할 경우 조합하중에 의한 최대모멘트응답값을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4 Max. moment responses by different connection types Unit : kN · m

Connection Type	Static load	Wave load	Combination load
Rigid	1336.16	435.85	1734.97 (1.30)
Semi-rigid	876.42	231.01	1091.89 (1.25)

정하중이 작용할 경우를 기준으로 하여 조합하중이 작용할 경우에는 최대모멘트가 강접 및 반강접 접합부에서 1.30배, 1.25배 증가한다.

구조물에 반강접 접합부를 적용할 경우 반강접 구조물의 모멘트 응답은 강접 구조물에 비해 정하중에서 34.4%, 파랑하중 47.0%, 조합하중 37.1% 감소되며, 조합하중에 의한 보의 최대모멘트응답이력을 나타내면 Fig. 6과 같다.

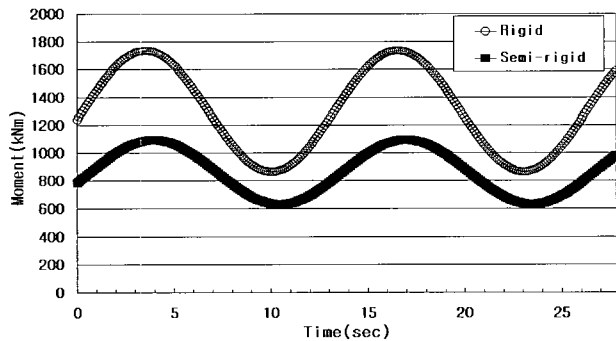


Fig. 6 Max. moment responses subjected to combination loads

(2) 최대수평변위응답 분석

정하중, 파랑하중, 조합하중에 대한 강접 및 반강접 구조물의 최대수평변위응답을 나타내면 Table 5와 같다. 하중에 따른 구조물의 변위응답을 살펴보면, 정하중이 작용할 경우 반강접 구조물은 강접 구조물에 비해 최대수평변위응답이 25.8% 증가하고 있으며, 파랑하중이 작용할 경우는 13.7% 감소하고 있다. 하지만, 정하중에 의한 변위응답은 미소한 반면 파랑하중에 의한 변위는 전체 변위응답에서 지배적으로 작용하고 있어 강접 및 반강접 접합부에 따른 구조물의 수평변위응답은 하중별로 비슷한 양상을 보이고 있다. Fig. 7은 조합하중에 의한 최대수평변위응답을 나타내며, 본 예제 건물은 저층 구조물이므로 접합부별 차이가 없는 것으로 사료된다.

Table 5 Max. lateral displacement responses by different connection types Unit : kN · m

Connection Type	Static load	Wave load	Combination load
Rigid	0.387	3.489	3.880
Semi-rigid	0.487	3.011	3.496

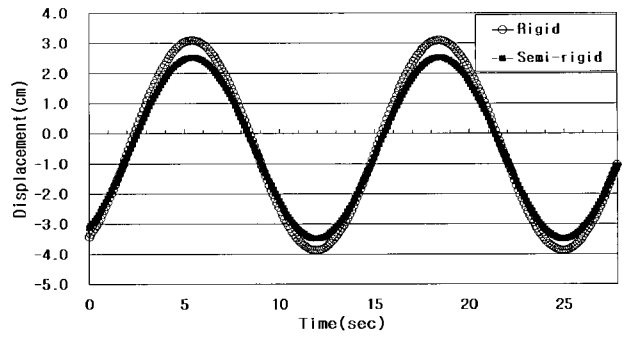


Fig. 7 Max. lateral displacement responses subjected to combination loads

5.2 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 동적응답 분석

(1) 최대모멘트응답 분석

파랑하중의 진폭비 변화에 대한 강접 및 반강접 구조물의 최대모멘트응답을 정리하면 Table 6, Fig. 8과 같다. 파랑하중의 진폭비가 변화함에 따라 강접 구조물의 최대모멘트응답은 진폭비 1(진폭 22.63cm)인 경우 435.85kNm, 진폭비가 1/2인 경우 217.93kNm, 진폭비가 1/4인 경우 108.96kNm로 선형적으로 감소하고 있으며, 반강접 구조물에서도 강접 구조물과 같이 선형비례관계를 가졌다.

Table 6 Max. moment responses by amplitude variation Unit : kN · m

Load	Connection Type	amplitude ratio 1	amplitude ratio 1/2	amplitude ratio 1/4
Static load	Rigid	1336.16	1336.16	1336.16
	Semi-rigid	876.42	876.42	876.42
Wave load	Rigid	435.85	217.93	108.96
	Semi-rigid	231.01	115.50	57.75
Combination load	Rigid	1734.97	1517.05	1408.08
	Semi-rigid	1091.89	976.39	918.63

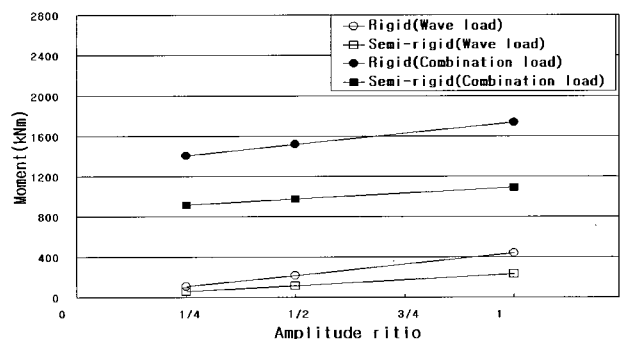


Fig. 8 Max. moment responses by amplitude variation

(2) 최대수평변위응답 분석

파랑하중의 진폭비 변화에 대한 강접 및 반강접 구조물의 최대수평변위응답을 정리하면 Table 7, Fig. 9와 같다. 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위응답은 최대모멘트응답과 같이 강접 구조물의 경우 진폭비 1인 경우 3.489cm를 기준으로 진폭비 1/2에서의 변위는 1.744cm로 50% 감소되며, 진폭비 1/4에서는 25% 감소되어 선형비례관계를 가지며, 반강접 구조물에서도 선형적으로 변화하였다. 진폭비에 따른 최대수평변위응답이 정하중보다는 파랑하중에서 수평변위가 지배적으로 작용하고 있기 때문에 조합하중에 의한 전체 수평변위응답도 파랑하중에 의한 응답에 따르고 있음을 알 수 있다.

Table 7 Max. lateral displacement responses by amplitude variation Unit : cm

Load	Connection Type	amplitude ratio 1	amplitude ratio 1/2	amplitude ratio 1/4
Static load	Rigid	0.387	0.387	0.387
	Semi-rigid	0.487	0.487	0.487
Wave load	Rigid	3.489	1.744	0.872
	Semi-rigid	3.011	1.506	0.753
Combination load	Rigid	3.880	2.135	1.263
	Semi-rigid	3.496	1.990	1.237

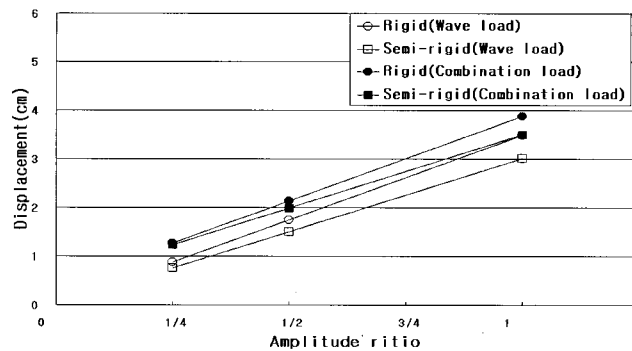


Fig. 9 Max. lateral displacement responses by amplitude variation

5.3 파랑하중의 주기 변화에 따른 동적응답 분석

(1) 최대모멘트응답 분석

상부구조물의 1차주기는 0.576으로 부체변형 주기 13초와 차이가 크기 때문에 동적응답이 작게 나타난다. 만약 파랑하중의 주기가 작아질 경우 구조물의 고유주기와 하중의 주기가 근접해져서 동적응답이 증가하게 될 것이다. 따라서 파랑하중의 주기 변화에 따른 동적응답을 분석해야 한다. 파랑하중의 주기 변화에 대한 강접 및 반강접 구조물의 최대모멘트응답을 진폭비별로 나타내면 Table 8, Fig. 10과 같다.

Table 8 Max. moment responses by period variation

Unit : kN · m

\		Connection Type	3.25sec	6.5sec	9.75sec	13.0sec
amplitude ratio 1	Rigid		3890.65	1333.58	683.10	435.85
	Semi-rigid		1699.07	619.82	341.23	231.01
amplitude ratio 1/2	Rigid		1945.80	666.79	341.55	217.93
	Semi-rigid		849.54	309.91	170.61	115.50
amplitude ratio 1/4	Rigid		972.90	333.40	170.77	108.96
	Semi-rigid		424.77	154.96	85.31	57.75

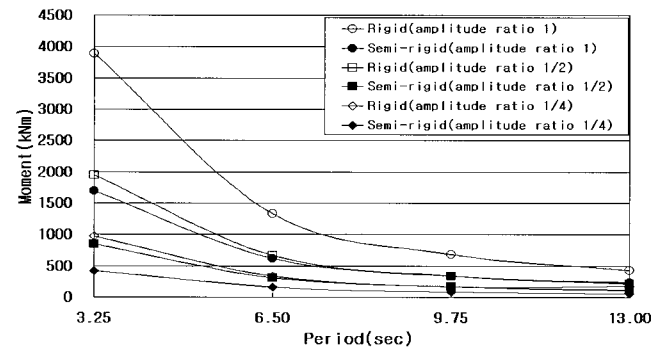


Fig. 10 Max. moment responses by period variation

파랑하중의 주기가 변화하면 파랑하중이 단주기화 될 수록 공진점에 가까이 가면서 최대모멘트 응답은 크게 증대하는 비선형거동을 보이며, 특히 강접 구조물에서 비선형거동이 두드러지게 나타난다. 진폭비 1인 경우 주기 13.0초에 대한 3.25초의 모멘트응답은 강접 구조물에서는 8.92배, 반강접 구조물에서는 7.35배 증가하였다.

(2) 최대수평변위응답 분석

파랑하중의 주기 변화에 대한 강접 및 반강접 구조물의 최대수평변위응답을 진폭비별로 나타내면 Table 9, Fig. 11과 같다. 파랑하중의 주기가 작아질수록 최대수평변위응답은 모멘트응답과 같이 비선형거동을 보이며, 진폭비가 1인 경우 주기 13.0초에 대한 3.25초의 최대수평변위응답은 강접 구조물에

Table 9 Max. lateral displacement responses by period variation Unit : cm

\		3.25sec	6.5sec	9.75sec	13.0sec
amplitude ratio 1	Rigid	6.799	6.153	4.505	3.489
	Semi-rigid	5.964	5.321	3.890	3.011
amplitude ratio 1/2	Rigid	3.412	3.077	2.253	1.744
	Semi-rigid	2.983	2.661	1.945	1.506
amplitude ratio 1/4	Rigid	1.706	1.538	1.126	0.872
	Semi-rigid	1.491	1.330	0.973	0.753

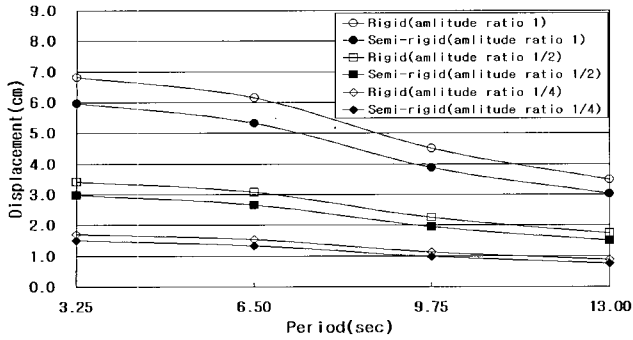


Fig. 11 Max. lateral displacement responses by period variation

서는 1.96배, 반강접 구조물에서는 1.98배 증가하였다. 강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대수평변위응답은 진폭비 1인 경우 13.0초에서 13.7%, 9.75초에서 13.6%, 6.5초에서 13.5%, 3.25초에서 12.3% 감소하고 있으며, 진폭비 1/2와 진폭비 1/4인 경우에도 유사한 응답을 보이고 있다. 즉 강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대수평변위응답이 각 주기에서 유사한 비율로 감소되고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 초대형 부유식 구조물의 상부구조체에 시간 이력하중을 적용하여 강접 골조와 반강접 골조 시스템에 대한 동적해석을 수행하였다. 동적해석을 위해 유탄성응답 해석에 의한 변형모드를 이용하여 파랑하중을 산정하였으며, 산정된 파랑하중의 진폭 및 주기 등을 변화시켜 반강접 접합부의 효율성을 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 시간이력변위하중이 작용할 경우 강접 및 반강접 구조물의 최대모멘트응답이 전체응답에서 20%~25% 차지하므로 부유식 상부구조물의 경우 파랑하중에 의한 부가모멘트의 검토가 수행되어야 한다.

2. 각형강관 외-다이아프램에 의한 반강접 접합부 적용시 강접 접합부에 비해 모멘트응답이 정하중 34.4%, 파랑하중 47.0%, 조합하중 37.1% 감소되었다. 따라서 구조물에 반강접 접합부를 적용할 경우 모멘트응답 저감으로 인한 경제적인 설계가 가능하다.

3. 최대모멘트응답은 파랑하중의 진폭비가 감소에 따라 동적응답이 선형적으로 감소하며, 반강접 구조물이 강접 구조물에 비해 모멘트 변화가 적었다. 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트응답은 단주기화 될 수록 공진점에 가까이 가면서 응답이 크게 증가하는 비선형거동을 보이며, 특히 강접 구조물에서 두드러지게 나타났다.

4. 최대수평변위응답에서도 진폭비가 변화함에 따라 선형적으로 거동하였으며, 주기 변화에서는 비선형 거동을 보였다. 하중에 따른 최대수평변위응답의 경우 정하중에 의한 영향은 미소한 반면 파랑하중에 의한 수평변위응답은 전체응답에서 지배적으로 작용하였다.

후 기

본 연구는 2004년 한국해양연구원 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 광명하, 송화철(2001), "초대형 부유식 구조물 상부구조체의 시간이력해석" 대한건축학회논문집, 제21권 제2호.
- [2] 송화철, 이은숙(2003), "반강접 접합부를 적용한 초대형 부유식 구조물 상부구조체의 2차 탄성해석", 한국항해항만학회지 제27권 제1호.
- [3] 채용수, 최성모, 김동규(2001), "직각판 외-다이아프램형식 각형강관기둥-H형강보 반강접 접합부를 가진 골조의 탄소성 거동에 관한 해석적 연구", 대한건축학회논문집, Vol 17 No 10.
- [4] 한국해양연구소(2003), "초대형 부유식 해상구조물 기술개발 연구보고서", 해양수산부.
- [5] V. Prakash, G. H. Powell, S. D. Campbell, F. C. Filippou(1992), DRAIN-2DX Preliminary Element User Guide.
- [6] RAM-Xlinea Version 3.0 User's Manual, 1998

원고접수일 : 2005년 2월 7일

원고채택일 : 2005년 5월 9일