

Truss Spar의 파강제력에 대한 실험적 연구

조효제* · 구자삼** · 최한석*** · 박주용* · 오태원* · 김병우**** · 하문근****

*한국해양대학교 해양시스템공학부

**부경대학교 조선해양시스템공학과

***부산대학교 조선해양공학과

****삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

An Experimental Study for the Wave Exciting Force of a Truss Spar

HYO-JAE JO*, JA-SAM GOO**, HAN-SUK CHOI**, JU_YONG PARK*, TAE-WON OH*, BYUNG-WOO KIM***
AND MUN-KEUN HA***

*Division of Ocean System Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Marine System Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

****Shipbuilding and Plant Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd, Geosje, Korea

KEY WORDS: Truss Spar 트러스형 스파, Wave Exciting Force 파랑강제력, Time Domain Analysis 시간영역해석, Singularity Distribution Method 특이점분포법, Heave Damping Plate 상하운동감쇠판

ABSTRACT: This study presents the wave forces for spar platforms. The advantage of a spar platform is that it is easy to manufacture and has excellent to motion characteristics. It is important to precisely determine the wave force acting on spar platforms for their basic design of them. We measur the wave exciting force for both the classic spar and truss spar models, and accomplish the numerical calculation using diffraction theory. The results show that experimental values have good agreement with theoretical values. However it is difficult to accurately estimate the value considering the heave plate of truss spar due to the viscosity.

1. 서 론

해저 석유개발 및 해양자원 개발을 위한 노력은 더욱 깊은 심해로 확대되고 있다. 이에 따라 가혹한 해양환경하중에 견딜수 있는 새로운 개념의 구조물이 필요하게 되었다. Spar는 운동성능의 우수성과 제작의 간편함 등의 장점으로 인해 기존의 가동 중인 구조물로부터 얻어지는 자료를 바탕으로 보다 경제적이고 우수한 성능을 가진 구조물로서 사용되어질 것으로 전망된다 (Halkyard, 1996).

Spar는 본체를 전부 실린더형상으로 하고 있는 것과 상부에는 실린더이고 하부에 Heave 감쇠판을 부착한 Truss형으로 대별된다. 특히 Truss형 Spar는 적은 홀수에도 불구하고 우수한 운동성능과 제작비의 절감이라는 잇점으로 다수의 구조물의 건설이 계획되어 있다(Glanville et al., 1997). 실린더형 Spar에 작용하는 유체력과 선형 및 비선형 거동에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다(Jha et al., 1997 ; Mekha et al., 1995 ; Ran and Kim, 1996 ; Gao et al., 1996 ; 조규남 등, 2000 ; 박광동 등, 2001).

노준범 등(2002)은 실린더형 Spar의 하부에 Heave 감쇠판을 붙여 그 효과와 운동특성을 규명하였다. 이상과 같이 대부분의 연구는 실린더형 Spar에 대한 것으로 Truss형 Spar에 대한 유체력이나 거동특성에 대하여 연구 발표된 논문은 많지 않은 실정이다.

따라서 본 논문에서는 실린더형과 Truss형의 두 가지 Spar 구조물 모형을 제작하여 실험적 방법 및 수치 계산을 통한 파강제력을 서로 비교 분석하였다. 특히 Truss형 Spar에 부착된 Heave 감쇠판이 파강제력에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 이론 계산

파랑 중 해양구조물에 작용하는 유체력 산정을 위해서 구조물을 강체로 가정하고, 유체는 비점성, 비압축성, 비회전으로 가정한다. 주파수 영역에서의 유체력은 특이점분포법을 이용하고, 시간영역 응답함수는 주파수 영역에서 얻어지는 파강제력 전달함수로부터 Fourier 변환하여 얻어진다. 이와 같은 이론의 정식화를 위하여 Fig. 1과 같이 정수면상에 원점 O 를 가지고, Z 축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간 고정 좌표계 $O-XYZ$, 물체와 함께 운동하는 물체 고정 좌표계 $O'-XYZ'$ 와 공간 고정 좌표계와 평행한 물체 고정 좌표계 $O'-X'Y'Z'$ 를 사용한다.

제1저자 조효제 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1

051-410-4302 hjjo@hhu.ac.kr

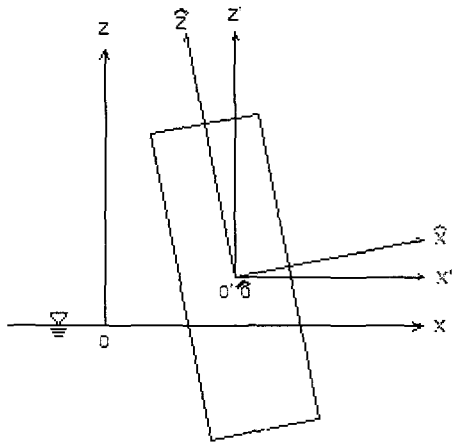


Fig. 1 Coordinate Systems

2.1 파강제력의 전달함수

본 논문에서는 선형이론에 의거하여 계산을 수행하고 있지만, 약비선형이론인 섭동전개법에 의한 압력의 표시식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(X, Y, Z, t) = & -\rho gZ - \varepsilon\rho[\phi_i^{(1)} + gZ^{(1)}] \\
 & - \varepsilon^2[\rho\phi_i^{(2)} + \frac{\rho}{2}|\nabla\phi^{(1)}|^2 + \rho\{X^{(1)}\} \cdot \nabla\phi_i^{(1)} \\
 & \quad + \rho gZ^{(2)}] + O(\varepsilon^3) \\
 = & P(0) + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 위첨자(1)과 (2)는 각각 1차 및 2차항에 해당하고, 아래첨자는 편미분을 나타낸다. 그리고 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, t 는 시간, ϕ 는 속도포텐셜, $\{X\}$ 는 변위벡터를 나타낸다. 1차 속도포텐셜 및 변위는 1차경계치 문제와 운동방정식으로부터 얻어지고, 2차 속도포텐셜은 2차 경계치문제로부터 얻어진다. 구조물에 작용하는 힘과 모멘트는 압력을 침수표면에 대해 적분함으로써 구해진다.

$$\{F_k(t)\} = - \int \int_{S_H} P(X, Y, Z, t) \{n_k\} dS, \quad (k=1\sim6) \tag{2}$$

여기서 k 는 각각의 운동모드를 나타내고, n_k 는 각각의 모드에 대한 넓은 의미의 방향여현, S_H 는 침수표면을 나타낸다. 구조물에 작용하는 파랑강제력은 섭동전개에 의해 이상과 같이 얻어지지만 이를 1차까지만 취하고, 이를 단위파고에 대해 표시하면 다음과 같이 1차 파랑 강제력에 대한 주파수 응답함수를 얻을 수 있다.

$$\{H_k^{(1)}(\omega)\} = (\rho \int \int_{S_H} -i\omega_k(\phi_{ik}^{(1)} + \phi_{Dk}^{(1)}) \{n\} dS) \tag{3}$$

여기서 ϕ_I 는 입사파, ϕ_D 는 산란파에 대한 속도포텐셜을 나타낸다.

2.2 시간 영역에서의 파강제력

본 논문에서는 주파수영역에서 얻어지는 파강제력의 전달함수를 Fourier 변환함으로써 얻어지는 임펄스 응답함수(impulse response function)를 이용하는 계산법을 적용하였다(조효제 등 1991).

즉, 시간영역에서의 파강제력은 다음식과 같이 임의형상의 파형과 임펄스 응답함수의 convolution 적분의 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_k^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_k^{(1)}(\tau) \zeta(t-\tau) d\tau \tag{4}$$

여기서 $h_k^{(1)}(\tau)$ 는 k 모드의 1차 파강제력의 임펄스응답함수이고, $\zeta(t)$ 는 파형의 시간이력을 나타낸다. 임펄스 응답함수는

$$h_k^{(1)}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_k^{(1)}(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \tag{5}$$

와 같이 표현되고, $H_k^{(1)}$ 는 1차 파강제력의 전달함수이다. 이와 같은 계산방법에 의하면 임의 형상의 파형에 해당하는 각 순간의 파강제력을 추정할 수 있다.

3. 실험 조건 및 모형

3.1 실험 조건

본 연구에서 대상으로 하는 Classic과 Truss Spar에 각각 작용하는 파강제력을 계측하기 위해서는 6분력계(6 axis load cell)를 이용하였다. 6분력계는 스트레인게이지식으로 3축 방향의 힘과 각축에 대한 모멘트를 동시에 계측 가능하며 힘의 측정범위는 $\pm 10\text{kg}$ 이고 모멘트의 측정범위는 $\pm 1\text{kg}\cdot\text{m}$ 이다. 그리고 파고의 측정에는 서보(Servo)식 파고계를 이용하였다. 본 실험에서 사용된 수조는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 $1 \times 1.1 \times 25\text{m}$ (B×D×L)의 조파수조로 조파기는 피스톤 형식으로 파고 20cm 까지 발생 가능하다.

금번 실험에 이용한 규칙파는 주기 0.6~2.0초, 파고 2cm, 4cm의 두 종류를 선택하였고 불규칙파는 유의파고 2cm, 4cm, 평균주기 1초, 1.2초에 대한 두 가지 변수를 적용한 ISSC 스펙트럼을 목적 스펙트럼으로 사용하였다.

3.2 모형

6분력계를 부착할 수 있도록 제작한 파강제력 측정용 모형인 Classic과 Truss Spar를 각각 제작하였다. 이에 대한 도면과 사진은 Fig. 3와 Photo 1에 나타낸다.

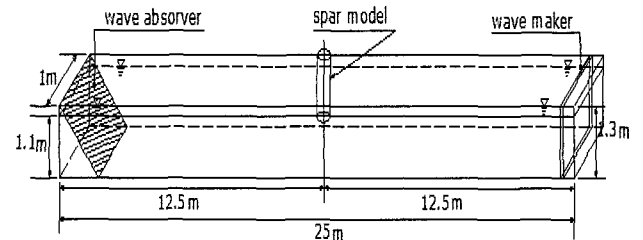


Fig. 2 Schematic Diagram of Ocean Engineering Wave Basin

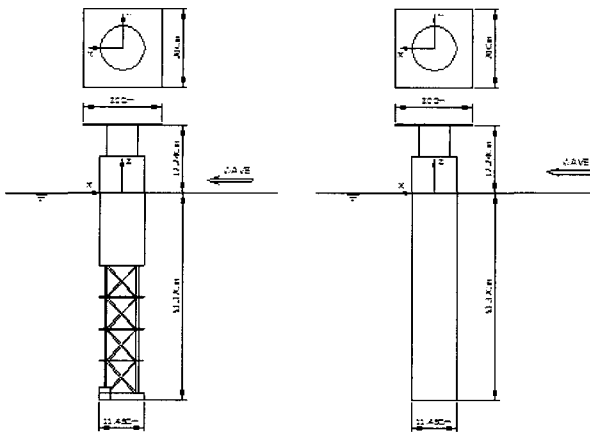


Fig. 3 Configuration of Models for Experiment of Wave Exciting force

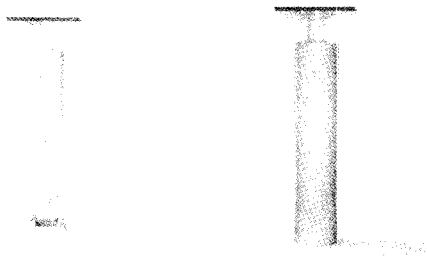


Photo 1 Photos of Models for Experiment of Wave Exciting Force

4. 결과 및 고찰

Classic Spar와 Truss Spar의 파강제력에 대한 특성을 검토하기 위하여 규칙파중에서의 파강제력과 주파수응답합수를 비교하였다. 그리고 각각의 실험결과를 이론계산결과와 비교하여 이론계산의 한계점에 대한 고찰과 실험결과와의 검증작업을 병행하였다. 여기서 이론계산은 특이점분포법을 적용하여 Diffraction Theory로 계산을 수행하였다. 특이점분포법 계산을 위해 Truss Spar는 Heave Plate의 요소를 더하여 529개, Classic Spar는 225개의 요소개수로 분할하였다.

4.1 규칙파중에서의 파강제력

Fig. 4~6는 Classic과 Truss Spar의 Surge, Heave, Pitch에 대한 파력 및 모멘트를 무차원값으로 나타낸 것으로, X축은 원진동수(ω)를 나타낸다. Classic Spar의 경우 각 모드별 힘이나 모멘트는 이론값과 실험값이 대체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있고, Heave의 경우에는 High Frequency에서 실험값이 좀 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 Diffraction Theory에 의해 계산된 이론값은 점성의 영향이 고려되지 않은 반면, Classic Spar는 실린더의 단면적에 비해 실린더 측면의 접수면적이 훨씬 넓어, 유체입자의 속도가 상대적으로 큰 고주

파수 영역에서 유체입자의 상하 운동에 의한 점성의 영향을 무시할 수 없기 때문인 것으로 생각된다. Truss Spar의 경우 Surge와 Pitch의 경우에는 이론값과 실험값이 대체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있지만 Pitch의 고주파수 영역에서 실험치가 다소 적게 나타나는 경향은 Heave Plate의 영향으로 판단된다. 그리고 Heave의 경우에는 전 주파수 영역에 걸쳐서 실험값이 적게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 Heave 감쇠를 위해 Truss부에 설치한 박판의 유체역학적 영향을 Diffraction Theory에서는 충분히 반영할 수 없는 것으로 사료된다. 여기서 Heave Plate가 점성을 포함한 유체역학적인 상호간섭효과로부터 Heave 파강제력을 상당량 감소시키는 것으로 판단할 수 있다. 또한 Truss Spar가 Classic Spar에 비해서 Surge 파강제력이 상당량 감소하는데 반해서 Heave나 Pitch의 경우에는 Truss Spar에 작용하는 파력 및 모멘트가 Classic Spar보다 다소 증가하는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 특히 Heave의 경우 실험치는 실린더의 홀수가 상당히 낮음에도 불구하고 Heave Plate의 영향으로 Classic Spar의 값에 접근할 정도로 적은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 Truss Spar에 부착한 Heave Plate의 영향을 중점적으로 조사하기 위하여 원통만이 있을 경우와 Truss에 Heave Plate를 부착한 전체 구조물에 작용하는 파력을 비교하였다. 이들에 따르면 Surge는 Heave Plate의 영향을 거의 무시할 수 있을 정도이며, Heave는 이론계산에서도 Heave Plate의 영향으로 파강제력을 다소 떨어뜨린다는 것을 알 수 있지만 실험치에는 이르지 못하고 있다. 상대적으로 홀수가 낮은 원통만에 작용하는 파강제력은 이론치와 실험치가 아주 잘 일치하는 것으로 보아 이미 Fig. 5에서 설명한 내용이 설득력 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 Truss Spar에 부착한 Heave Plate가 Heave 파강제력에 미치는 영향을 보다 구체적으로 조사하기 위하여 Heave Plate의 설치 간격을 변화시키면서 이론계산을 통해 비교하였다. 기본 모형의 Plate 설치 간격이 8.2cm인 것에 대해 16.4cm 및 2cm로 변화를 주어 계산을 수행하였다. 이에 따르면 Plate 설치간격이 다소 영향을 미치기는 하지만 그다지 지배적인 요소는 아닌 것으로 사료된다.

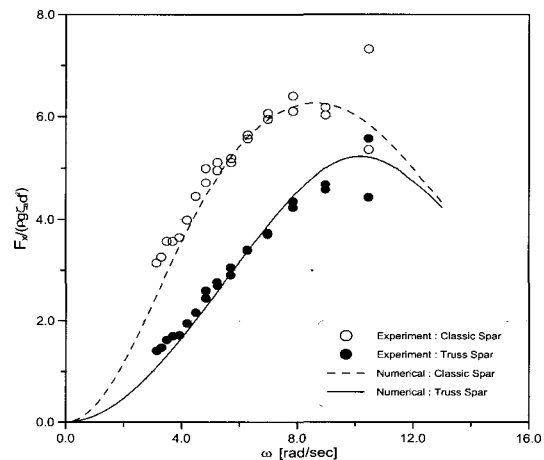


Fig. 4 Comparison on Surge Exciting Forces between Classic and Truss Spar

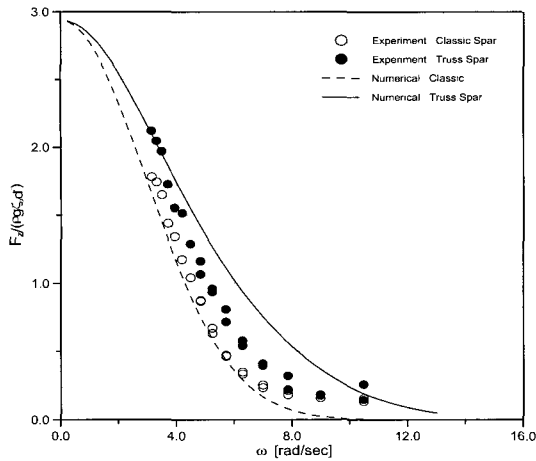


Fig. 5 Comparison on Heave Exciting Forces between Classic and Truss Spar

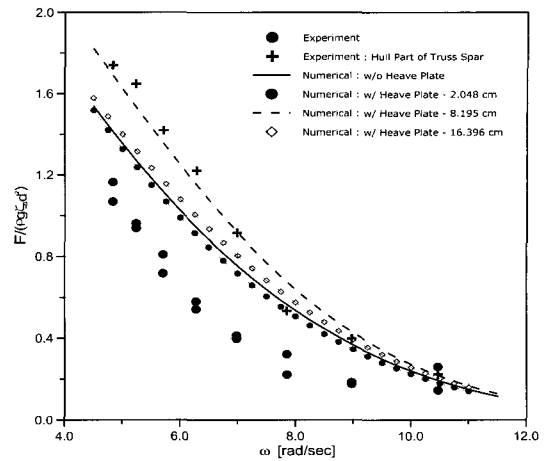


Fig. 8 Heave Exciting Force according to the Various Space of Heave Plates

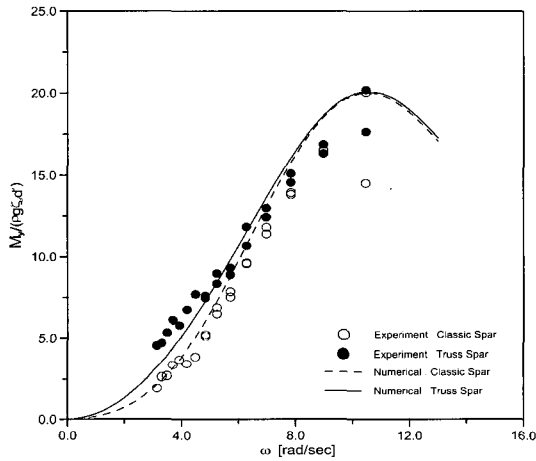


Fig. 6 Comparison on Pitch Exciting Moments between Classic and Truss Spar

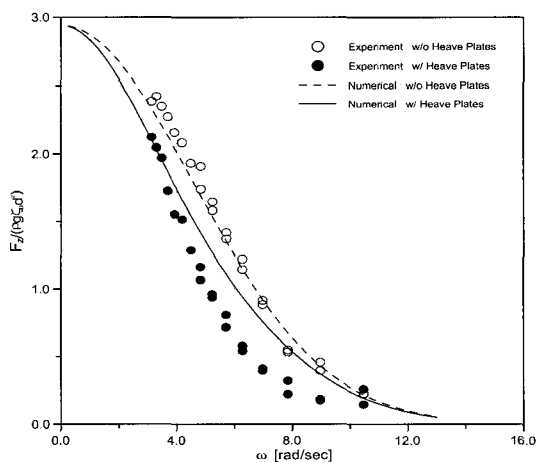


Fig. 7 Comparison on Heave Exciting Force of Truss Spar between with and without Heave Plate

4.2 불규칙파 중의 파강제력

본 실험에서 사용한 불규칙파는 ISSC 스펙트럼으로부터 구현한 것으로 평균주기 1.0sec, 유의파고 4cm를 사용하였다.

Fig. 9~12에서는 Classic Spar에 대한 각 모드별로 이론계산과 실험에 의한 강제력의 스펙트럼을 비교하여 나타내고 있다. 이에 따르면 역시 Surge에 대한 스펙트럼은 이론치에 비해 실험치가 크게 나타나는 반면, Heave 강제력에 대한 스펙트럼은 이론치가 다소 크게 평가되고 있다. 이는 Spar의 홀수가 깊어 바다의 영향, 즉 천수파의 영향으로 사료된다.

Fig. 13~14에서는 Truss Spar에 대해 각각 Surge와 Heave 모드의 실험값과 이론값을 비교하고 있다. 여기서도 Surge 강제력의 경우에는 실험값이 과대 평가되며, Heave 강제력은 앞에서 언급한 바와 같이 Heave Plate의 영향으로 이론치가 과대 평가되면서 peak치의 주기는 고주파수 영역으로 옮겨가는 것을 알 수 있다.

그리고 두 가지 주기와 유의파고를 가지는 불규칙파중에서 각 모형들에 작용하는 파강제력의 유의치를 비교한다. Fig. 14는 Surge 파강제력의 유의치로 Classic, Truss Spar 및 Truss의 원통부만에 대한 것을 각 불규칙파에 따른 변화량을 비교하여 나타내었다. Surge 강제력의 유의치는 전 파랑에 걸쳐 Classic Spar에 비해서 Truss Spar의 경우가 현격하게 감소되며, Truss Spar는 Heave Plate를 부착한 트러스 부분이 있더라도 파강제력에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 Heave 강제력의 유의치로 Truss Spar에서 원통부만 있는 경우에 비하여 트러스 부분을 부착함으로써 전 파랑에 대해 Heave 강제력이 현격하게 감소함을 알 수 있다. Classic Spar와의 비교에서는 주기 1.0sec의 경우에는 Truss Spar가 다소 크게 나타나지만 오히려 1.2sec의 경우에는 Truss Spar의 Heave 강제력이 보다 감소하게 된다. 이는 불규칙파의 평균주기에 따라서 파강제력이 달라짐을 나타내고 있다.

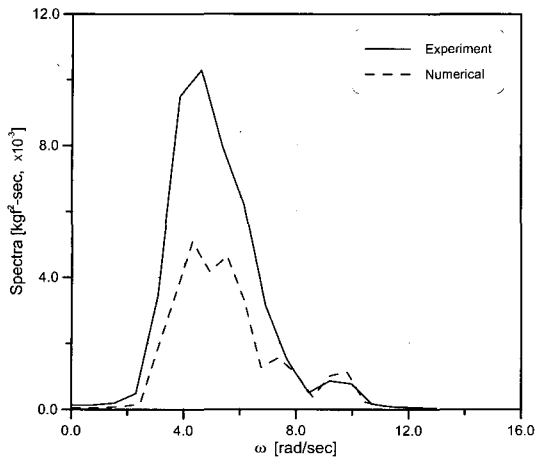


Fig. 9 Spectra of Surge Force for Classic Spar

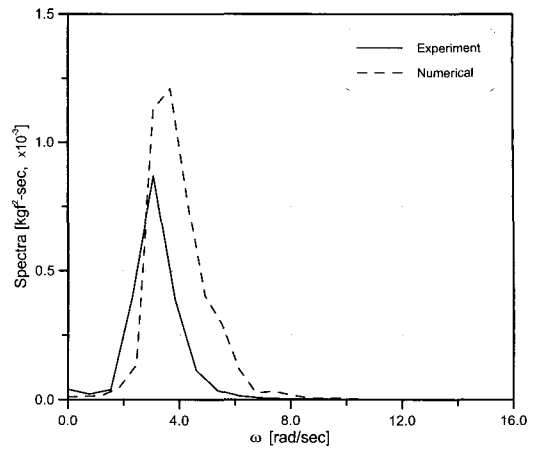


Fig. 12 Spectra of Heave Force for Truss Spar

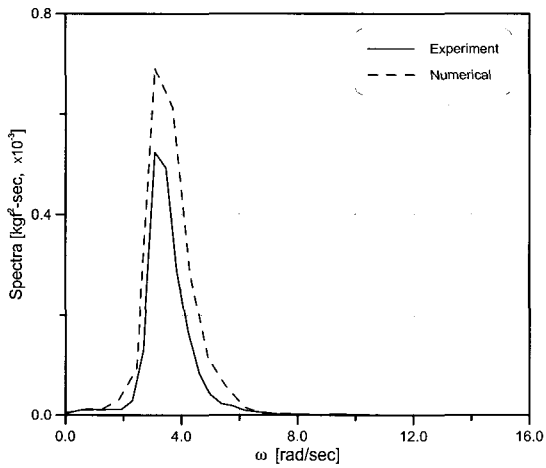


Fig. 10 Spectra of Heave Force for Classic Spar

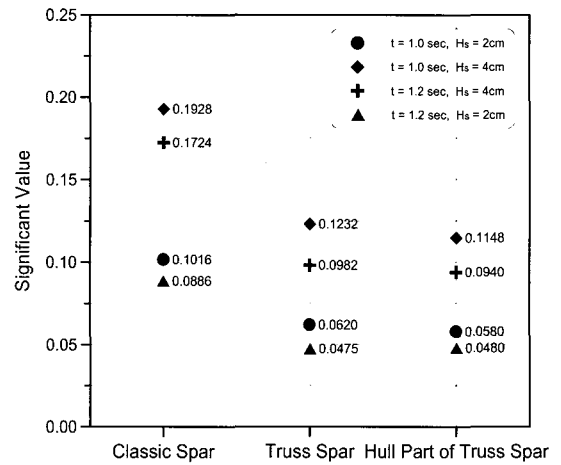


Fig. 13 Significant Value of Surge Force for Models in Irregular Waves

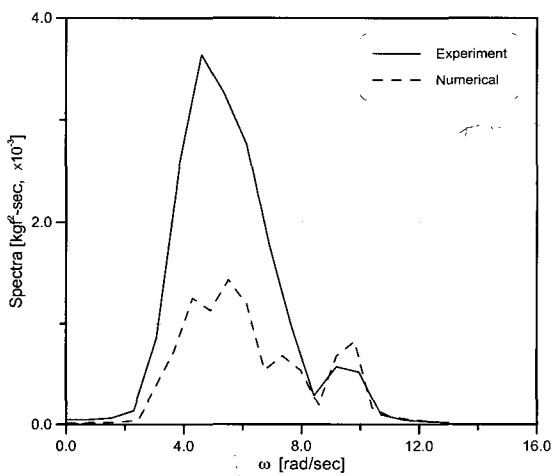


Fig. 11 Spectra of Surge Force for Truss Spar

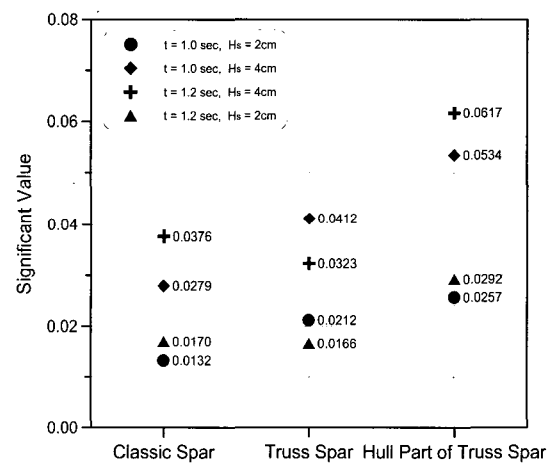


Fig. 14 Significant Value of Heave Force for Models in Irregular Waves

4.3 과도수파 중의 파강제력

4.3.1 과도수파의 재현

해양구조물이 받는 외력 중 가장 큰 영향을 미치는 인자는 파도에 의한 것이다. 미소 진폭에 의한 파력의 추정에는 포텐셜 이론의 계산에 따른 방법 등이 있으나 해양환경이 거칠게 되어 파의 파고가 구조물의 직경에 비해 상대적으로 커지게 되면 비선형성을 고려한 파력 해석이 필요하게 된다. 그러나 이론적 계산에 있어서는 완전한 수식 모델링의 어려움 때문에 완전 비선형 파력 산정법은 아직 정립되어 있지 않은 실정이다. 파력중 비선형 성분의 특성을 조사하기 위하여 수조에서 높은 파고를 가지는 파를 생성시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 각 모형에 작용하는 비선형유체력, 특히 쇄파에 의한 파력의 특성을 조사하기 위하여, 수조시험에서 과도수파 발생법을 이용한 집중파를 재현하여 대파고 비선형 파랑중의 파력을 측정하였다(조효제 등, 2001).

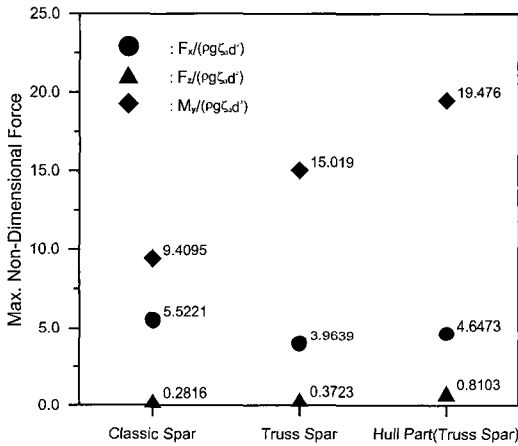


Fig. 15 Maximum Non-dimensional Forces for Models in the Transient Wave

4.3.2 파강제력

Fig.15는 각 모형에 작용하는 순간 최대 강제력과 모멘트값들을 무차원화하여 나타낸 것으로 전 모형에 있어서 Surge 강제력이 Heave 강제력보다 훨씬 크게 작용하면서 원통에만 작용하는 순간 강제력이 Truss Spar 전체에 작용하는 힘보다도 다소 증가한다는 것을 보여준다. Pitch 모멘트는 Classic, Truss, 원통 순으로 점차 크게 작용하고 있다.

5. 결 론

Spar의 여러 가지 형상에 따른 동적거동을 비교 조사한 결과 파강제력은 Diffraction 이론에 의한 이론계산에 의해서 양호하게 추정할 수 있지만, Truss Spar와 같이 박판의 Heave Plate를 가지는 경우에는 이론계산에 의한 추정은 오차를 내포

하고 있다. Truss Spar의 경우에는 Heave Plate를 설치함에 따라 Heave 운동에 대한 감쇠력이 증대할 뿐만 아니라 파랑강제력도 상당량 감쇠시키는 것으로 나타난다. Truss Spar에 설치한 Heave Plate의 간격은 파랑강제력에 그다지 영향을 미치지 않는다. Classic Spar와 Truss Spar의 파강제력을 비교하면 Surge는 Truss가 현격하게 줄어드는 반면, Heave 강제력은 Truss의 경우 홀수가 알은 실린더가 있음에도 불구하고 Classic과 비슷한 크기를 준다.

참 고 문 헌

노준범, 최항순, 박인규, 신현수 (2002). "SPAR 플랫폼의 상하운동 감쇠장치", 대한조선학회 춘계학술대회논문집, pp 250-253.

박광동, 조효제, 구자삼 (2001). "실린더에 작용하는 파력 및 조류력에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 14-19.

조효제, 구자삼, 이상길 (2001). "파도 수파중의 복합실린더에 작용하는 쇄파력에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 8-13.

조규남, 이근무, 최영철 (2000). "해양구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제1호, pp 6-10.

Cao, P. and Zhang, J. (1996). "Slow Motion Response of Compliant Offshore Structures" Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference 1, pp 296-303.

Glanville, R.S., Halkyard, J.E., Davies, R.L. and Frimm, F. (1997). "Neptune Project: Spar History and Design Considerations" Offshore Technology Conference, (OTC-8382), Houston.

Halkyard, J.E. (1996). "Status of Spar Platforms for Deepwater Production Systems" Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference 1, pp 262-272.

Jha, A.K., de Jong, P.R. and Winterstein, S.R. (1997). "Motion of Spar Buoy in Random Seas: Comparing Predictions and Model Test Results" Proceedings of the Behaviour of Offshore Structures, pp 333-347.

Mekha, B.B., Johnson, C.P. and Roesset, J.M. (1995). "Nonlinear Response of a Spar in Deep Water: Different Hydrodynamic and Structural Models" Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference 111, pp 462-469.

Ran, Z. and Kim, M.H. (1996). "Nonlinear Coupled Response of a Tethered Spar Platform in Waves" Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference 1, pp 281-288.

2004년 9월 20일 원고 접수

2004년 10월 19일 최종 수정본 채택