

# Truss Spar의 파강제력에 대한 실험적 연구

조효제\* · 구자삼\*\* · 오태원\* · 김병우\*\*\* · 하문근\*\*\*

\*한국해양대학교 해양시스템공학부

\*\*부경대학교 조선해양시스템공학과

\*\*\*삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

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

HYO-JAE JO\*, JA-SAM GOO\*\*, TAE-WON OH\*, BYUNG-WOO KIM\*\*\* AND MUN-KEUN HA\*\*\*

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

\*\*Pukyong National University, Department of Naval Architecture & Marine System Engineering, Busan, Korea

\*\*\*Shipbuilding & 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 spar platform is that it is easy to manufacture and excellency to motion characteristics. It is important to estimate exactly wave force acting on spar platforms for basic design of them. We measured the wave exciting force for classic spar and truss spar model, and accomplished the numerical calculation using diffraction theory. The results show that experimental values are good agreement with theoretical values. But it is difficult to estimate accurate value considering the heave plate of truss spar due to the viscosity.

### 1. 서론

해저 석유 개발 및 해양자원 개발을 위한 노력은 더욱 깊어짐에 따라 확대되고 있다. 이에 따라 가혹한 해양환경하중에 견딜 수 있는 새로운 개념의 구조물이 필요하게 되었다. Spar는 운동성능의 우수성과 제작의 간편함 등의 장점을 들어 기존의 가동중인 구조물로부터 얻어지는 자료를 바탕으로 보다 경제적이면서 성능이 향상된 형상으로 향후 계속 건조될 것으로 전망되고 있다.

부유식 구조물에 작용하는 파력은 크게 입사파의 주기와 동일한 선형 파강제력과 성분파 주파수의 차이나 합으로 나타나는 비선형 파강제력으로 분류할 수 있다. 선형 파강제력은 구조물에 작용하여 변형과 운동을 유발하므로 운동응답 및 구조해석에 있어 중요한 외력이다. 반면, 비선형 파강제력은 힘의 크기는 선형 파강제력에 비해 매우 작으나 계류식 부유구조물의 공진을 유발하는 장주기 표류력, 합주파수 기진력 등으로 작용하므로 부유식 해양구조물의 설계에 있어 반드시 고려되어야 하는 외력이다.

본 연구에서는 두가지 형태의 Spar구조물 모형을 제작하여 실험적 방법 및 수치 계산을 통한 파강제력을 서로 비교 분석하였다.

파랑중 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.2.1과 같이 정수면상에 원점  $O$ 를 가지고,  $Z$ 축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간 고정 좌표계  $O-XYZ$ , 물체와 함께 운동하는 물체 고정 좌표계  $\hat{O}-\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ 와 공간 고정 좌표계와 평행한 물체 고정 좌표계  $O'-X'Y'Z'$ 를 사용한다.

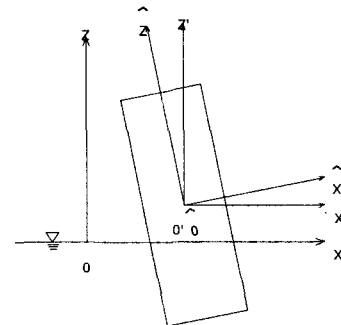


Fig.2.1 Coordinate Systems

### 2. 이론계산

## 2.1 파랑제력의 전달함수

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

$$P(X, Y, Z, t) = -\rho g \hat{Z} - \varepsilon \rho [\phi_t^{(1)} + gZ^{(1)}] - \varepsilon^2 [\rho \phi_t^{(2)} + \frac{\rho}{2} |\nabla \phi^{(1)}|^2 + \rho \{X^{(1)} \cdot \nabla \phi_t^{(1)} + \rho g Z^{(2)}\}] + O(\varepsilon^3) = P(0) + \varepsilon P^{(1)} + \varepsilon^2 P^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (1)$$

여기서 위첨자(1)과 (2)는 각각 1차 및 2차항에 해당하고, 아래첨자는 편미분을 나타낸다. 그리고  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $t$ 는 시간,  $\phi$ 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.

$$\{F_k(t)\} = - \int \int_{S_H} P(X, Y, Z, t) (n_k) dS, \quad (k=1\sim 6) \quad (2)$$

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.

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

여기서  $\phi_i$ 는 입사파,  $\phi_D$ 는 산란파에 대한 속도포텐셜을 나타낸다.

## 2.2 시간 영역에서의 파랑제력

본 논문에서는 주파수영역에서 얻어지는 파랑제력의 전달함수를 Fourier변환함으로써 얻어지는 임펄스 응답함수(impulse response function)를 이용하는 계산법을 적용하였다(Kim, 1991).

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

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

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

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

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

## 3. 실험 조건 및 모형

### 3.1 실험 조건

본 연구에서 대상으로 하는 Classic과 Truss Spar에 각각 작용하는 파랑제력을 계측하기 위해서는 6분력계(6 axis loadcell)를 이용하였다. 6분력계는 스트레인 게이지식으로 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 측정은 서보(Servo)식 파고계를 이용하였다. 본 실험에서 사용된 수조는 Fig.3.1에 나타난 바와 같이  $1 \times 1.1 \times 25\text{m}$ (B×D×L)의 조파수조로 조파기는 피스톤 형식으로 파고 20cm까지 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 두가지 변수를 적용한 ISSC 스펙트럼을 목적 스펙트럼으로 사용하였다.

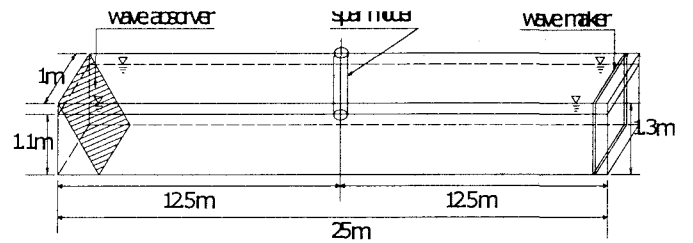


Fig.3.1 Schematic of Ocean Engineering Wave Basin

### 3.2 모형

6분력계를 부착할 수 있도록 제작한 파랑제력 측정용 모형인 Classic과 Truss Spar를 각각 제작하였다. 이에 대한 도면은 Fig.3.2에 나타낸다.

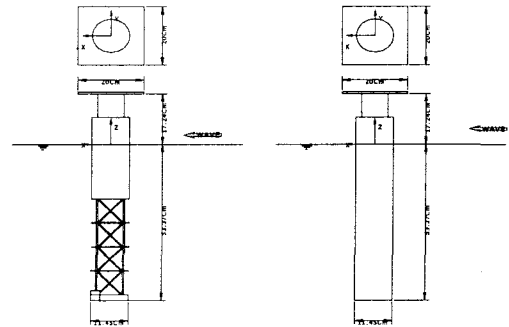


Fig.3.2 Configuration of Model for Experiment of Wave Exciting force

## 4. 파랑제력

Classic Spar와 Truss Spar의 파랑제력에 대한 특성을 검토하기 위하여 규칙파중에서의 파랑제력과 주파수응답함수를 비교하였다. 그리고 각각의 실험결과를 이론계산결과와 비교하여

이론계산의 한계점에 대한 고찰과 실험결과의 검증작업을 병행하였다. 여기서 이론계산은 특이점분포법을 적용하여 Diffraction Theory로 계산을 수행하였다. 특이점분포법 계산을 위해 Fig.4.1과 같이 Truss Spar는 529개, Classic Spar는 225개의 요소개수로 분할하였다. Fig.4.1중의 3번째 모델은 Truss Spar의 Heave 감쇠를 위하여 설치한 Heave Plate가 파강제력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 독립된 원통부분(Hull Part)만에 작용하는 파강제력 계산을 수행하기 위한 계산모델에 대한 것이다.

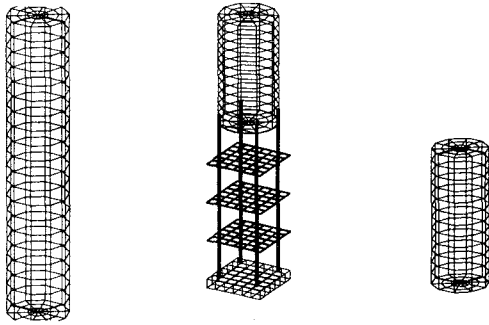


Fig.4.1 Pannelled Model of Classic Spar, Truss Spar, Hull part of Truss Spar

#### 4.1 규칙파중에서의 파강제력

Fig.4.2~4.4는 Classic과 Truss Spar의 Surge, Heave, Pitch에 대한 파력 및 모멘트를 무차원값으로 나타낸 것으로, X축은 원진동수( $\omega$ )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 고주파수 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.4.5에서는 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.4.3에서 설명한 내용이 설득력 있음을 알 수 있다.

Fig.4.6에서는 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 미치는 것은 하지만 그다지 지배적인 요소는 아닌 것으로 사료된다.

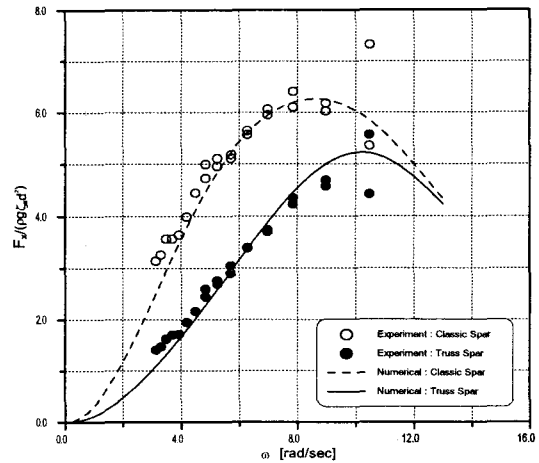


Fig.4.2 Comparison on Surge Exciting Forces bet. Classic & Truss

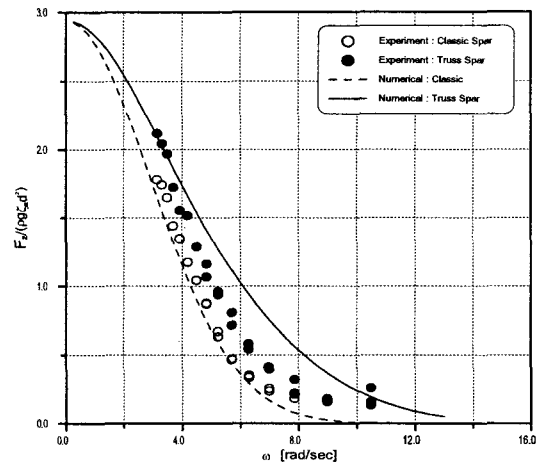


Fig.4.3 Comparison on Heave Exciting Forces bet. Classic & Truss

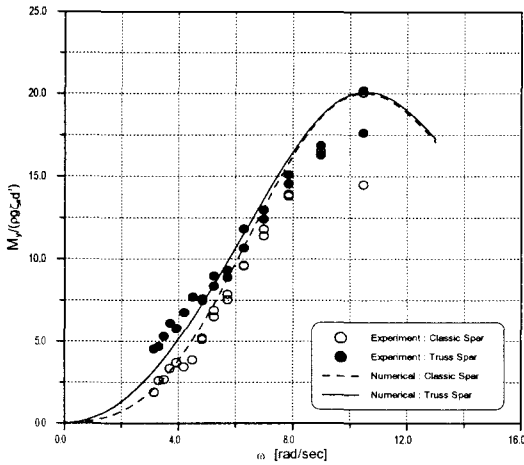


Fig.4.4 Comparison on Pitch Exciting Moments bet. Classic & Truss

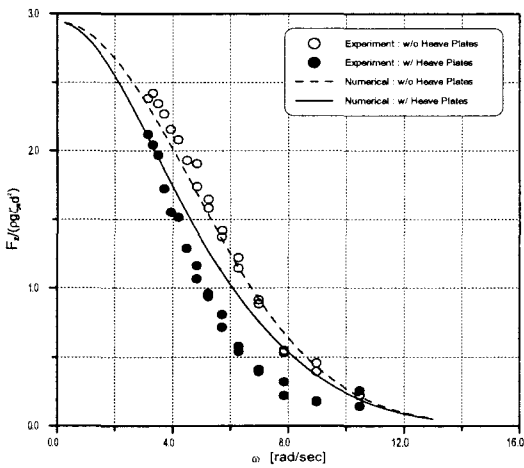


Fig.4.5 Comparison on Heave Exciting Force of Truss Spar bet. with & without Heave Plate

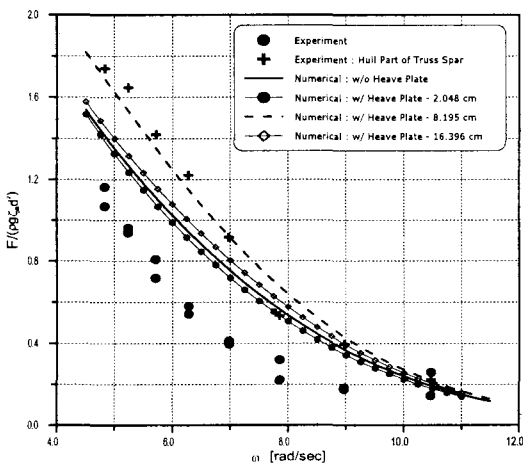


Fig.4.6 Heave Exciting Force according to the Various Space of Heave Plates

#### 4.2 불규칙파중의 파강제력

Fig.4.7은 불규칙파의 스펙트럼을 나타내고 있으며, 여기서 주기 1.0sec, 유의파고 4cm의 목적 스펙트럼을 점선으로 나타내고 실선은 계측된 파의 스펙트럼이다. 본 수조의 특성과 천수의 영향으로 계측스펙트럼의 평균주기가 조금 길어지는 것으로 나타난다.

Fig.4.8~4.9에서는 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 천수파의 영향으로 사료된다.

Fig.4.10~4.11에서는 Truss Spar에 대해 각각 Surge와 Heave모드의 실험값과 이론값을 비교하고 있다. 여기서도 Surge 강제력의 경우에는 실험값이 과대평가되며, Heave 강제력은 앞에서 언급한 바와 같이 Heave Plate의 영향으로 이론치가 과대 평가되면서 피크치의 주기는 고주파수 영역으로 옮겨가는 것을 알 수 있다.

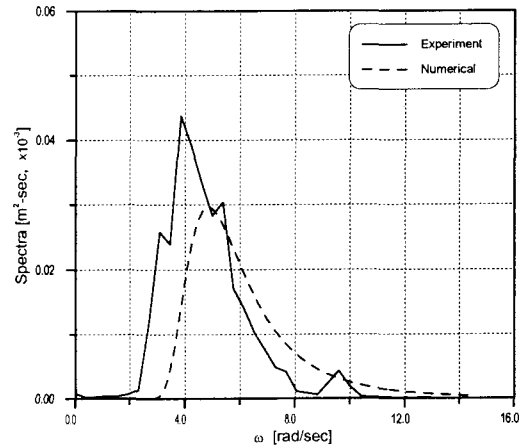


Fig.4.7 Comparison on Wave Spectra between Target and Measuring [ $H_{1/3}=4\text{cm}$ ,  $T=1.0\text{sec}$ ]

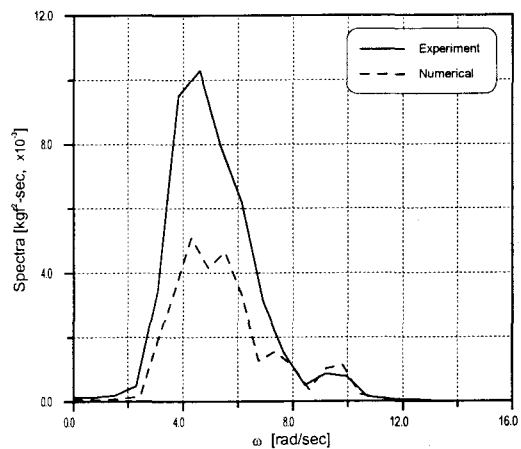


Fig.4.8 Spectra of Surge Force for Classic Spar

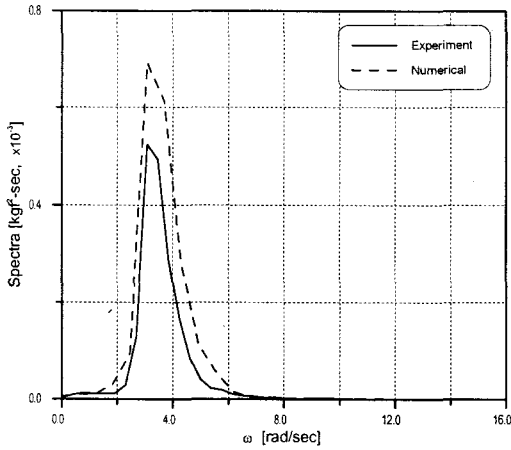


Fig.4.9 Spectra of Heave Force for Classic Spar

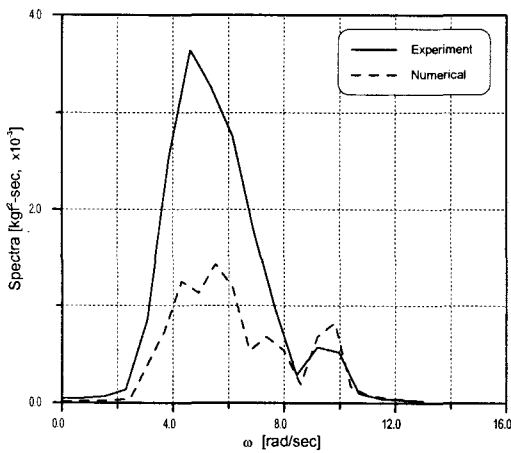


Fig.4.10 Spectra of Surge Force for Truss Spar

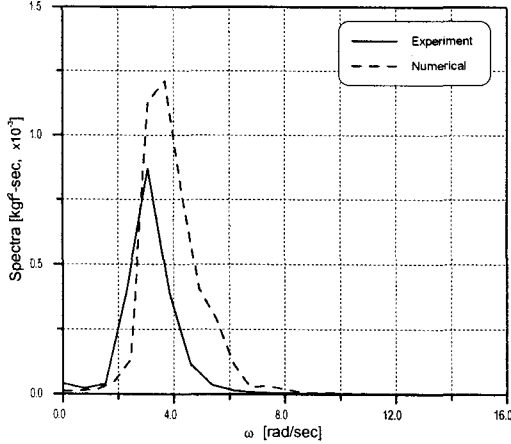


Fig.4.11 Spectra of Heave Force for Truss Spar

(1) 유의치 비교

여기서는 두가지 주기와 유의파고를 가지는 불규칙파중에서 각 모형들에 작용하는 파강제력의 유의치를 비교한다. Fig.4.12는 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 트러스부분이 있더라도 파강제력에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig.4.13은 Heave 강제력의 유의치로 Truss Spar에서 원통부만 있는 경우에 비하여 트러스부분을 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.

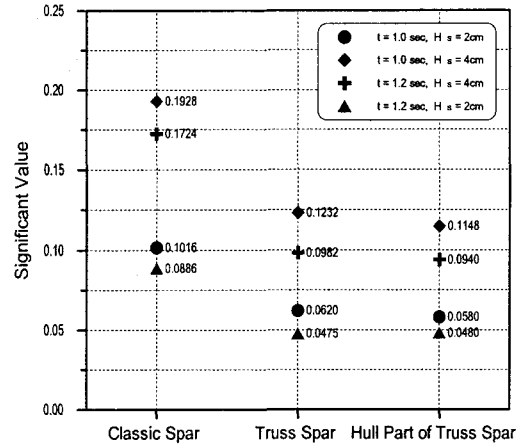


Fig.4.12 Signification Value of Surge Force for Models in Irregular Waves

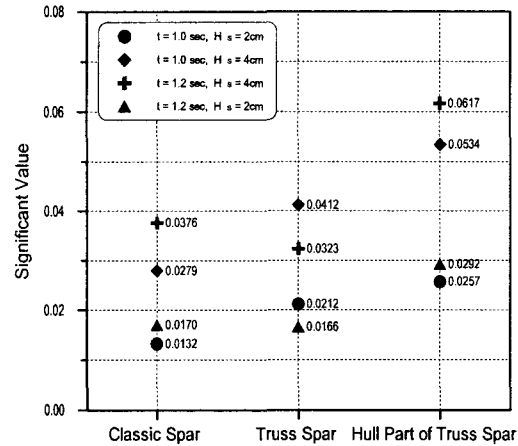


Fig.4.13 Signification Value of Heave Force for Models in Irregular Waves

4.3 과도수파중의 파강제력

(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 파력해석이 필요하게 된다. 그러나 이론적 계산에 있어서는 완전한 수식모델링의 어려움 때문에 완

## 참고문헌

- [1] Fisher, F.H., Spiess, F.N., 1963. Flip floating instrument platform. *Journal of the Acoustical Society of America* 35 (10), 1633 1644.
- [2] Bax, J.D., de Werk, K.J.C., 1974. A floating storage unit designed specifically for the severest environmental conditions. *Society of Petroleum Engineers (SPE paper 4853)*.
- [3] Van Santen, J.A., de Werk, K., 1976. On the typical qualities of spar type structures for initial or permanent field development. *Offshore Technology Conference, (OTC-2716)*, pp. 1105 1118.
- [4] Glanville, R.S., Halkyard, J.E., Davies, R.L., Frimm, F., 1997. Neptune project: spar history and design considerations. *Offshore Technology Conference, (OTC-8382)*, Houston, Texas.
- [5] Glanville, R.S., Paulling, J.R., Halkyard, J.E., Lehtinen, T.J., 1991. Analysis of the spar floating drilling production and storage structure. *Offshore Technology Conference, (OTC-6701)*, pp. 57 68.
- [6] Mekha, B.B., Johnson, C.P., 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, 462 469.
- [7] E.B. Carpenter, J.W. Leonard and S.C.S. Yim, *Ocean Engng*, Vol. 22, No. 8, pp. 765-784, 1995
- [8] Mekha, B.B., Weggel, D.C., Johnson, C.P., Roesset, J.M., 1996. Effect of second order diffraction forces on the global response of spars. *Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference* 1, 273 280.
- [9] Halkyard, J.E., 1996. Status of spar platforms for deepwater production systems. *Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference* 1, 262 272.
- [10] Cao, P., Zhang, J., 1996. Slow motion response of compliant offshore structures. *Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference* 1, 296 303.
- [11] Ran, Z., 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, 281 288.
- [12] Jha, A. K., de Jong, P.R., 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.

전 비선형 파력 산정법은 아직 정립되어 있지 않은 실정이다. 파력중 비선형 성분의 특성을 조사하기 위하여 수조에서 높은 파고를 가지는 파를 생성시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 과도수파발생법을 이용한 집중파를 생성시키는 방법이 있다. 과도수파 발생법은 Takezawa가 주파수 영역에서 조파기의 전달 함수와 성분파의 위상속도를 고려하여 발생시키는 방법이 주로 이용된다.

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

## (2) 파강제력

Fig.4.14는 각 모형에 작용하는 순간 최대 강제력과 모멘트값들을 무차원화하여 나타낸 것으로 전 모형에 있어서 Surge 강제력이 Heave 강제력보다 훨씬 크게 작용하면서 원통만에 작용하는 순간 강제력이 Truss Spar 전체에 작용하는 힘보다도 다소 증가한다는 것을 보여준다. Pitch 모멘트는 Classic, Truss, 원통 순으로 점차 크게 작용하고 있다.

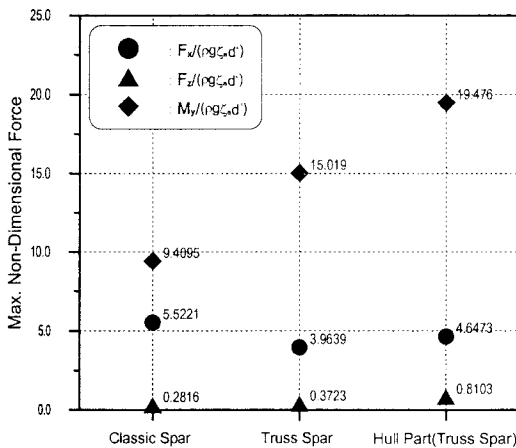


Fig.4.14 Maximum Non-dimensional Forces for Models in the Transient Wave

## 5. 결론

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 내포하고 있다. Truss Spar의 경우에는 Heave Plate를 설치함에 따라 Heave 운동 감쇠력의 증대 뿐만 아니라 파랑강제력도 상당량 감쇠시키는 것으로 나타난다. Truss Spar에 설치한 Heave Plate의 간격은 파랑강제력에 그다지 영향을 크게 미치지 않는다. Classic Spar와 Truss Spar의 파강제력을 비교하면 Surge는 Truss가 현격하게 줄어드는 반면, Heave 강제력은 Truss의 경우 홀수가 얇은 실린더가 있음에도 불구하고 Classic과 비슷한 크기를 준다.