

다방향 불규칙파중의 TLP의 동적응답해석 (주파수영역 해석)

구 자 삼* · 조 효 제** · 이 창 호***
(1993년 9월 15일 접수)

Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms in Multi-directional Irregular Waves (Frequency Domain Analysis)

Ja-Sam Goo* · Hyo-Jae Jo** · Chang-Ho Lee***

Key Words : Dynamic Response(동적응답), Tension Leg Platform(인장 계류식 해양구조물), Multi-directional Irregular Wave(다방향 불규칙파), Frequency Domain Analysis(주파수영역 해석), Three Dimensional Source Distribution Method(3차원 특이점 분포법), Spectral Analysis Method(스펙트럼 해석법)

Abstract

A numerical procedure is described for simultaneously predicting the motion and structural responses of tension leg platforms (TLPs) in multi-directional irregular waves. The developed numerical approach is based on a combination of a three dimensional source distribution method, the finite element method for structurally treating the space frame elements and a spectral analysis technique of directional waves. The spectral description for the linear responses of a structure in the frequency domain is sufficient to completely define the responses. This is because both the wave inputs and the responses are stationary Gaussian random process of which the statistical properties in the amplitude domain are well known. The hydrodynamic interactions among TLP members, such as columns and pontoons, are included in the motion and structural analysis. The effect of wave directionality has been pointed out on the first order motion, tether forces and structural responses of a TLP in multi-directional irregular waves.

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학 선박공학과

** 정회원, 부산대학교 공과대학 조선공학과

*** 정회원, 부산수산대학교 공과대학 선박공학과 대학원

1. 서 론

최근 육상자원의 고갈과 공간부족으로 대수심역 해양공간이용 및 해저자원 개발의 필요성이 점점 증가되고 있는 추세이다. 따라서 해상에서의 위치유지 및 조업성능이 뛰어난 TLP에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그런데 TLP의 파랑응답에 대한 대부분의 연구는 장파장파(Long Crested Waves)를 환경외력의 하나로 취급하고 있으나 실제 이들 구조물이 계류되어 있는 실패역은 단파장파(Short Crested Waves)이므로 이를 고려한 연구가 요구되고 있는 실정이다.

지금까지 행해진 다방향파중의 해양구조물에 대한 연구로서는 파력,^{1,2)} 선형 응답^{3) 5)} 및 비선형 응답⁶⁻⁸⁾ 등을 들 수 있다. 선형응답에 대해서는 Jo,³⁾ Sand et al.,⁴⁾ Takezawa⁵⁾ 등의 이론 및 실험을 통하여 선형중첩에 의해 정도 좋게 추정할 수 있다는 것이 실증되고 있다. 그러나 이들의 연구는 대부분 해양구조물의 운동응답에 국한되고 있는 실정으로 해양구조물의 구조설계적인 관점에서 보면 내력응답에 대한 다방향파의 영향도 충분히 검토되어질 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 다방향 불규칙파중에서의 TLP의 동적응답해석법을 개발하고 이 해석법을 이용하여 TLP의 동적응답특성에 미치는 다방향파의 영향을 평가하였다. 본 동적응답해석법은 저자들이 전보⁹⁾에 발표한 탄성응답해석법으로부터 구해지는 주파수응답함수와 다방향파 스펙트럼을 이용하여 동적응답 스펙트럼을 구하는 것으로 되어있다. 이는 정규확률과정인 다방향파가 시간불변 선형계인 해양구조물에 입력될 때 그 응답도 정규확률과정으로 간주할 수 있기 때문이다. 본 해석기법은 실패상에 계류된 탄성체인 해양구조물의 동적내력응답 및 운동응답의 통계치를 동시에 추정할 수 있으므로 TLP와 같은 해양구조물의 초기설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 이론해석

다방향파의 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega, \chi)$ 는

$$S_{\zeta}(\omega, \chi) = D(\omega, \chi) S_{\zeta}(\omega) \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 방향분포함수(Directional Distribution Function) $D(\omega, \chi)$ 와 일차원 파 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega)$ 를 이용하여 표현할 수 있다. 방향분포함수의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 코사인함수로서 다음과 같이 표현된다.¹⁰⁾

$$D(\chi) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi}\Gamma(S+\frac{1}{2})} \cos^{2S}(\chi-\theta_0) \dots (2)$$

$$\chi = \theta + \theta_0$$

단, θ_0 는 입사파의 주방향, θ 는 주방향과 성분파의 진행방향이 이루는 각을 표시하고, S는 에너지의 방향에 따른 분포를 나타내는 파라메타이고, $S \rightarrow \infty$ 일 때, 한방향파(One-directional Waves) 즉, 장파장파가 된다. 그리고 방향분포 파라메타 S를 변화시켜도 에너지가 일정하게 되도록 다음과 같이 정규화 시킬 필요가 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta) d\theta = 1 \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서 사용된 일차원 파 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼으로 다음과 같이 표현된다.¹¹⁾

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^5 \exp\left[-0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^4\right] \dots\dots\dots (4)$$

여기서, ω 는 파의 원주파수(Circular Frequency, rad/sec), $H_{1/3}$ 는 유의파고(Significant Wave Height), T_1 는 평균주기(Mean Period)이다.

선형입출력계에 있어서, 입력에 대한 출력은 단위충격응답함수(unit impulse response function)와 입력의 시간력과의 Convolution Integral로 표현되어진다. 여기서는 입력으로서 방향파의 수면상 승량 $\zeta(t, x)$ 를 취했을 때 출력을 TLP의 각 응답 $x(t, x)$ 로 표시한다. 단 t는 시간, x는 위치벡터를 나타낸다. 수면 상승량 및 응답의 자기상관함수는 다음과 같이 표기된다.

$$R_{\zeta}(\tau, \delta) = E[\zeta(t, x) \cdot \zeta(t+\tau, x+\delta)] \dots\dots (5)$$

$$R_{\alpha}(\tau, \delta) = E[x(t, x) \cdot x(t+\tau, x+\delta)] \dots\dots (6)$$

이때, τ 는 시간차이고, δ 는 위치벡터의 차를 나타낸다. 응답의 자기상관함수는 단위충격함수를 이용하여 표현하면

$$\begin{aligned} R_{\alpha}(\tau, \delta) &= \iiint \iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &E[\zeta(t-\tau_1, x-\delta_1) \zeta(t+\tau-\tau_2, x+\delta-\delta_2)] d\tau_2 d\delta_2 \\ &d\tau_1 d\delta_1 \\ &= \iiint \iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &R_{\zeta}(\tau+\tau_1-\tau_2, \delta+\delta_1-\delta_2) d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \end{aligned}$$

와 같이 주어진다.

여기서 Wiener-Khintchine 공식

$$R_{\alpha}(\tau, \delta) = \iiint \int_{-\infty}^{\infty} S_{\alpha}(\omega, K) e^{i(K \cdot \delta - \omega \tau)} dK d\omega \dots\dots\dots (7)$$

을 식에 대입하면 다음과 같이 응답 스펙트럼이 구해진다.

$$\begin{aligned} &\iiint \int_{-\infty}^{\infty} S_{\alpha}(\omega, K) e^{i(K \cdot \delta - \omega \tau)} dK d\omega \\ &= \iiint \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2, \delta_2) e^{-i(K \cdot \delta_2 - \omega \tau_2)} d\delta_2 d\tau_2 \right. \\ &\left. \iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) e^{-i(K \cdot \delta_1 - \omega \tau_1)} d\delta_1 d\tau_1 \right] S_{\zeta}(\omega, K) \\ &e^{i(K \cdot \delta - \omega \tau)} dK d\omega \\ &= \iiint \int_{-\infty}^{\infty} H_{\alpha}(\omega, K) H_{\alpha}^*(\omega, K) S_{\zeta}(\omega, K) \\ &e^{i(K \cdot \delta - \omega \tau)} dK d\omega \end{aligned}$$

$$S_{\alpha}(\omega, K) = |H_{\alpha}(\omega, K)|^2 S_{\zeta}(\omega, K) \dots\dots (8)$$

주방향 θ_0 인 다방향파에 대한 주파수 응답 스펙트럼 $S_{\alpha}(\omega, \theta_0)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{\alpha}(\omega, \theta_0) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_{\alpha}(\omega, \theta_0+\theta)|^2 S_{\zeta}(\omega, \theta_0+\theta) d\theta \dots\dots\dots (9)$$

단 $H_{\alpha}(\omega, \theta_0+\theta)$ 는 TLP의 주파수응답함수(단위진폭의 규칙파에 대한 응답)로서 저자들이 이전에 개발한, 구성부재간의 유체역학적 상호간섭

효과를 고려하여 내력응답 및 운동응답을 동시에 구할 수 있는 탄성응답 해석법⁹⁾을 이용하여 구해지며, $S_{\zeta}(\omega, \theta_0+\theta)$ 는 다방향파 스펙트럼을 나타내고 있으며 본 계산에 사용된 하나의 예를 Fig. 1에 나타내고 이는 $S=1$ 인 경우이다.

이와같은 방법으로 동적응답 스펙트럼이 구해지면 다방향 불규칙파중에서의 동적응답진폭의 유의치(significant value)는 다음과 같이 주어진다.¹²⁾

$$X_{1/3}(\theta_0) = 2.0 \sqrt{m_0(\theta_0)} \dots\dots\dots (10)$$

$$m_0(\theta_0) = \int_0^{\infty} S_{\alpha}(\omega, \theta_0) d\omega \dots\dots\dots (11)$$

여기서 $m_0(\theta_0)$ 는 스펙트럼의 0차 모우멘트로서 분산을 나타낸다.

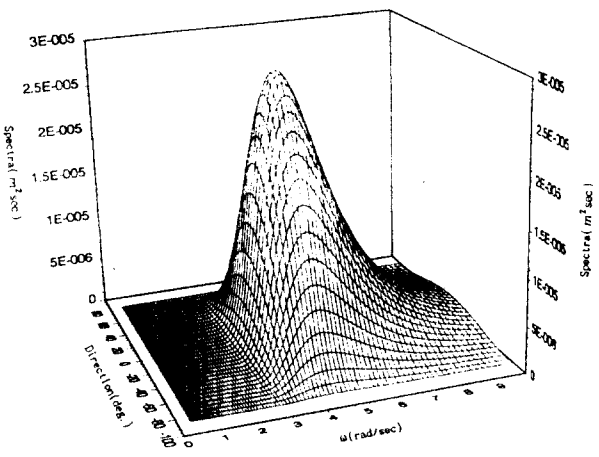
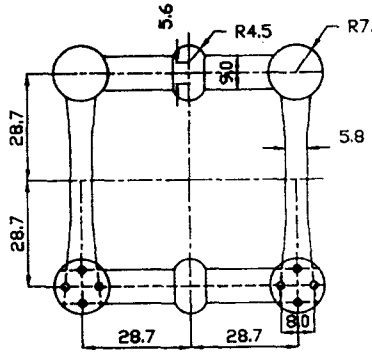


Fig. 1 Directional Wave Spectrum($S=1, T_1=1.1$ sec, $H_{1/3}=0.16$ m)

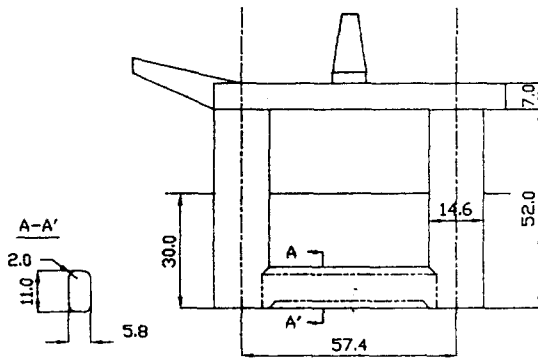
3. 수치계산 및 고찰

본 수치계산은 전보⁹⁾에서 취급한 Fig. 2와 같은 TLP모델을 사용하였다. Fig. 3은 보 요소(Beam Elements)로 이루어진 골조구조의 요소분할도이고 표기된 번호는 절점번호를 나타내고 있다. 절점번호 1,2,3,4의 변위를 이용하여 6자유도의 운동응답을 구하고, 절점번호 69,70,71,72는 계류부재

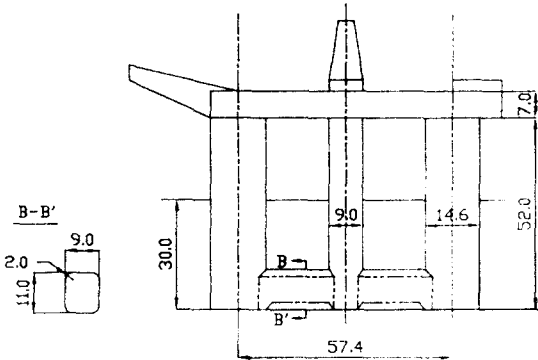
unit : cm



(a) Plan view of the lower hull



(b) Forward profile



(c) Starboard profile

Fig. 2 Configuration of the Tension Leg Platform

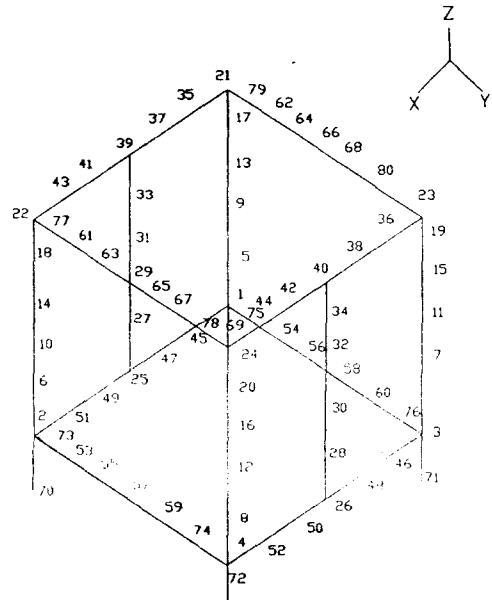


Fig. 3 Node Number of 3-Dimensional Frame Structure for the Tension Leg Platform

(Tendons)의 취부절점으로 각각 계류점 1,2,3,4로 지칭하기로 하고 이 절점의 변위를 이용하여 계류 부재의 변동장력을 구한다. 횡방향 Lower Hull의 절점번호 55와 57사이의 보 요소 및 횡방향 Deck Girder의 절점번호 63과 65사이의 보 요소를 각각 보 요소 3,13로 지칭하기로 하고 이 요소에 대한 내력응답을 대표적으로 나타내기로 한다. 사용된 일차원 스펙트럼은 유의파고 16cm, 평균주기 1.1sec인 ISSC 스펙트럼이고, 수심은 5 m, 방향분포 파라메타 S는 1에서 무한대까지 변화시키면서 계산을 수행하였다. 방향분포 파라메타 S가 무한대라고 하는 것은 한방향파를 나타내고 있고 S가 작아짐에 따라 다방향으로 에너지가 분산하고 있는 것을 나타낸다. 그리고 방향분포 파라메타가 변하더라도 모든 파의 에너지는 일치하도록 하였다.

Fig. 4는 각각 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw의 운동응답의 유의치를 나타내고 있다. 파의 주방향 및 주방향을 중심으로 양쪽으로 5°씩 취한 각각 18개의 성분파의 방향을 합쳐 37개의 다방향파로 계산한 결과이다. 횡축은 파의 주방향을

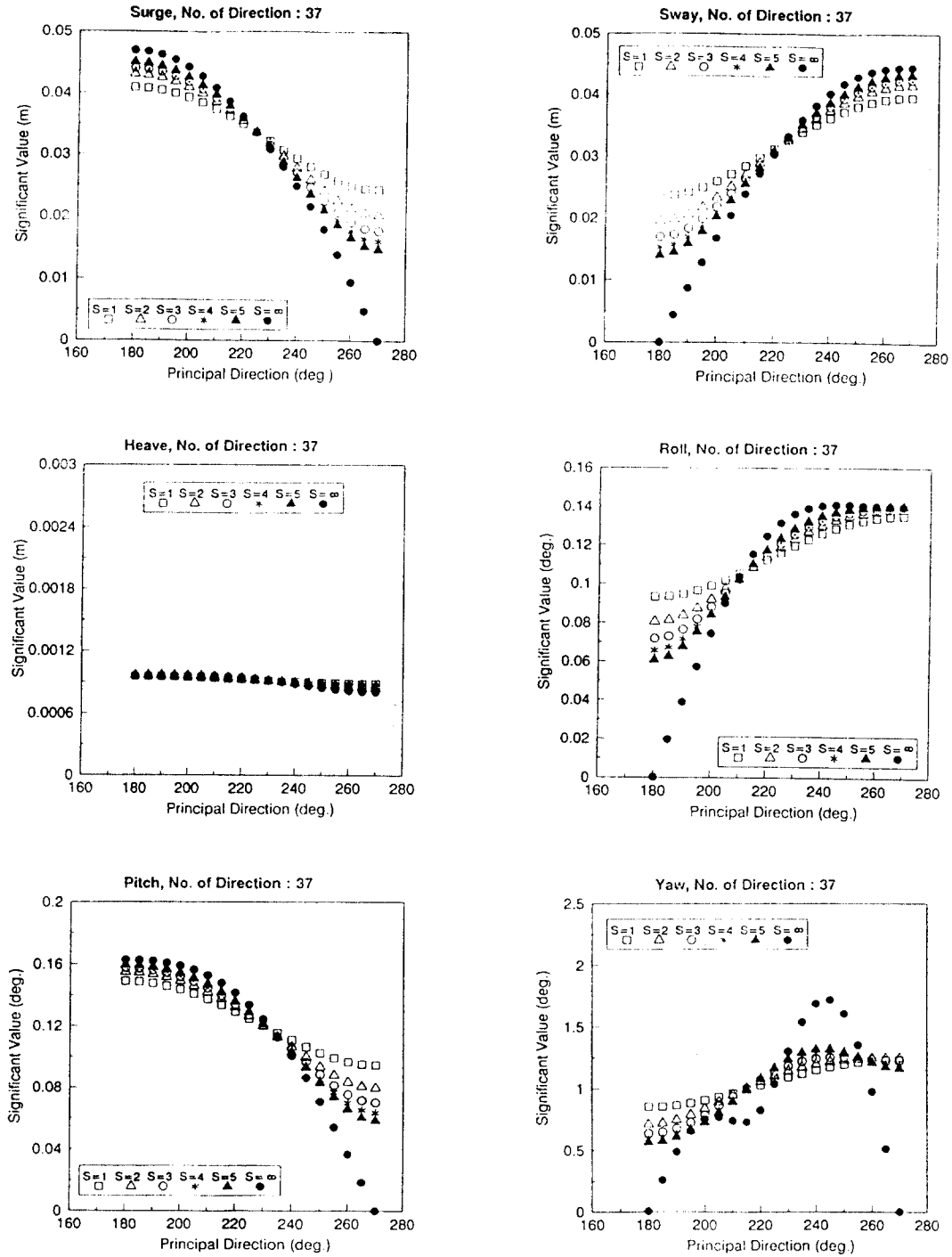


Fig. 4 Significant Values of Motions for Various Principal Directions and Parameters of Direction Function

180°에서 5°씩 변화시키면서 270°까지 나타내고 있고 종축은 유의치를 취하여 통계치의 변화를 나타내고 있다. 방향분포 파라메타의 변화에 따라 Heave이 외의 운동모우드에 대해서는 다방향과의 영향이 나타나고 있고, 한방향과의 비교해 보면 한방향과의 응답이 크게 나타나는 주방향에 대해서는 작게 나타나고, 한방향과의 응답이 없거나 작게 나타나는 주방향에 대해서는 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 주방향이 45°부근에서는 방향분포 파라메타의 변화에도 불구하고 그다지 응답의 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 즉, 다방향과의 영향을 요약하면 한방향과의 $S \rightarrow \infty$ 의 응답과 $S=1$ 의 응답이 일치하는 주방향을 기점으로 응답의 역전 현상이 나타나고 한방향과의 응답이 큰 영역은 작게 나타나고 작은 영역은 크게 나타남을 알 수 있다. 결국 본 연구의 선형응답의 범위내에서 다방향과의 영향은 응답을 평준화시키는 방향으로 작용하므로 큰 한방향과의 응답을 다소 경감시키고 있음을 알 수 있다. 구체적으로 보면 ITTC에서 권장하는 방향분포¹⁰⁾와 동일한 형으로 주어지는 $S=2$ 인 경우의 최대 응답과 한방향과의 최대응답을 비교하면 Heave, Roll는 거의 변동이 없고 Surge, Sway, Pitch, Yaw는 다방향과의 영향으로 각각 8%, 7%, 5%, 29% 정도 감소하고 있다. 대체적으로 Yaw를 제외한 운동응답은 최대응답에서 다방향과의 영향이 작게 나타나고 Yaw에 대해서는 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 실험상에 있어서 조업에 영향을 끼치는 주 인자는 Heave, Surge, Sway 등이므로 다방향과의 영향이 그다지 크지 않다고 생각된다.

Fig. 5는 각각 계류점 1,2,3,4에 연결된 계류부재의 변동장력의 유의치를 나타내고 있다. 다방향과의 영향은 전반적으로 운동응답의 경향과 유사하나 응답의 감소효과가 다소 크다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 한방향과의 $S=2$ 인 경우의 최대응답을 비교하면 계류점 1,2,3,4에 연결된 계류부재는 다방향과의 영향으로 각각 10%, 23%, 25%, 11% 정도 감소하고 있다. 따라서 계류부재의 설계에 있어서 가장 큰 장력응답이 나타나는 계류부재가 10% 정도 감소하고 있으므로 다방향

과의 좋은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있고, 피로수명 등의 산정에 있어 다방향과의 영향을 고려하면 보다 정확하게 평가 될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 6은 보요소 3,13에 대한 축력, 수직 전단력, 수직 굽힘모우멘트의 내력응답의 유의치를 나타내고 있다. 주방향 180°의 한방향과의 내력응답을 보면 구성부재간의 상호간섭을 무시하면 0으로 될 것이나 본 동적응답해석법은 구성부재간의 상호간섭효과를 고려하고 있으므로 응답이 다소 나타나고 있음을 알 수 있다. 단, 전단력응답에 대해서는 구조물의 대칭성에 의해 동 위상의 힘이 작용하므로 0이 된다. 다방향과의 영향은 전반적으로 운동응답의 경향과 거의 유사하고 응답의 감소효과가 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 구체적으로 한방향과의 $S=2$ 인 경우의 최대응답을 비교하면 보요소 3과 13 모두 축력, 수직 전단력, 수직 굽힘모우멘트는 다방향과의 영향으로 각각 16%, 4~5%, 4~5% 정도 감소하고 있다. 구조설계에 영향을 끼치는 주 인자는 축력 및 굽힘모멘트에 의한 응력이고 요소 3,13의 부재에서는 응력이 최소한 12% 정도 감소되는 효과를 가져오므로 구조부재의 설계에 있어서도 다방향과는 좋은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이상의 계산결과는 37개의 방향성분파로 계산한 결과이나 그것이 연속적인 다방향파를 충분히 나타내고 있는가를 조사해 볼 필요가 있다. 따라서 Fig. 7은 방향성분파의 갯수를 증가시켜 가면서 Surge, 보 요소 3의 축력과 굽힘모우멘트, 계류부재 1의 장력응답의 유의치에 대한 수렴성을 나타내고 있다. 이 결과에 의하면 지금까지 취급해 온 37개의 방향성분파로 연속적인 다방향파를 표현하는 데 충분하다는 것을 알 수 있다. 또한 이 수렴성 조사에 의하면 본 연구의 대상구조물인 TLP의 경우에는 13개 정도의 방향성분파로 계산을 수행하여도 좋을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서 취급한 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

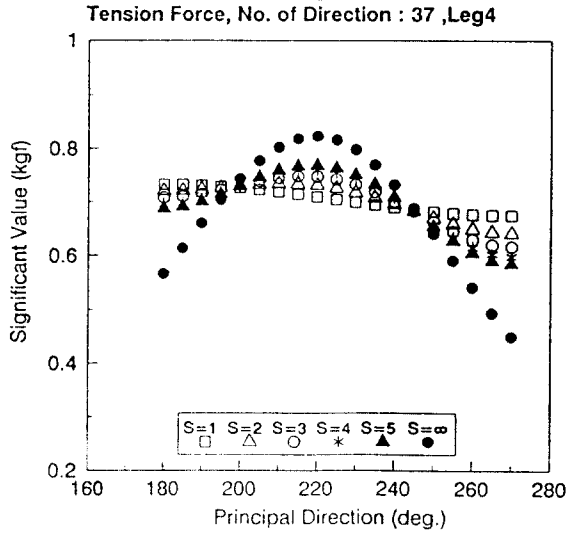
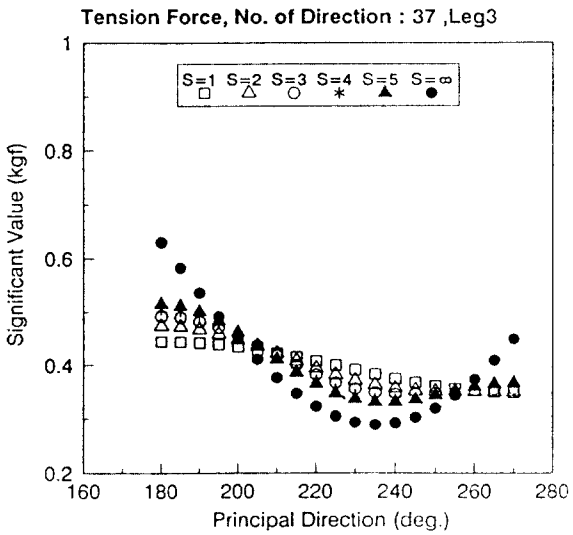
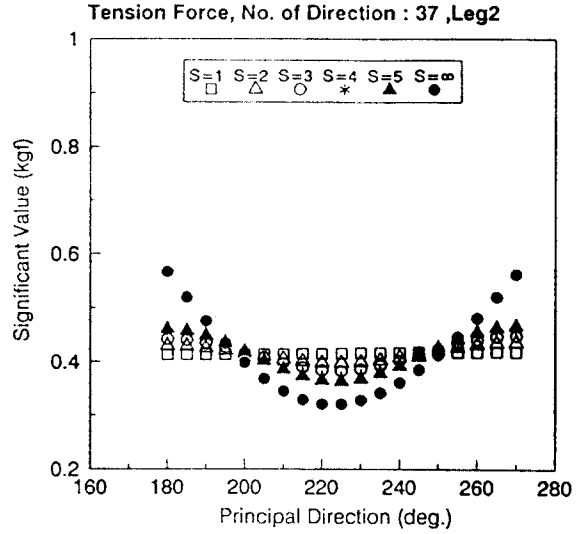
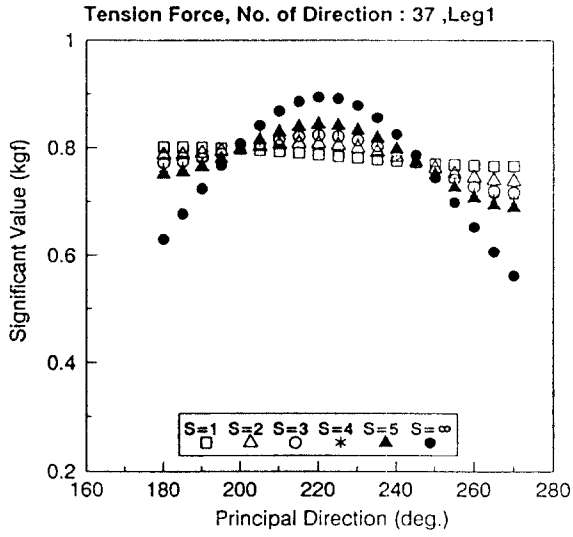


Fig. 5 Significant Values of Tensions for Various Principal Directions and Parameters of Direction Function

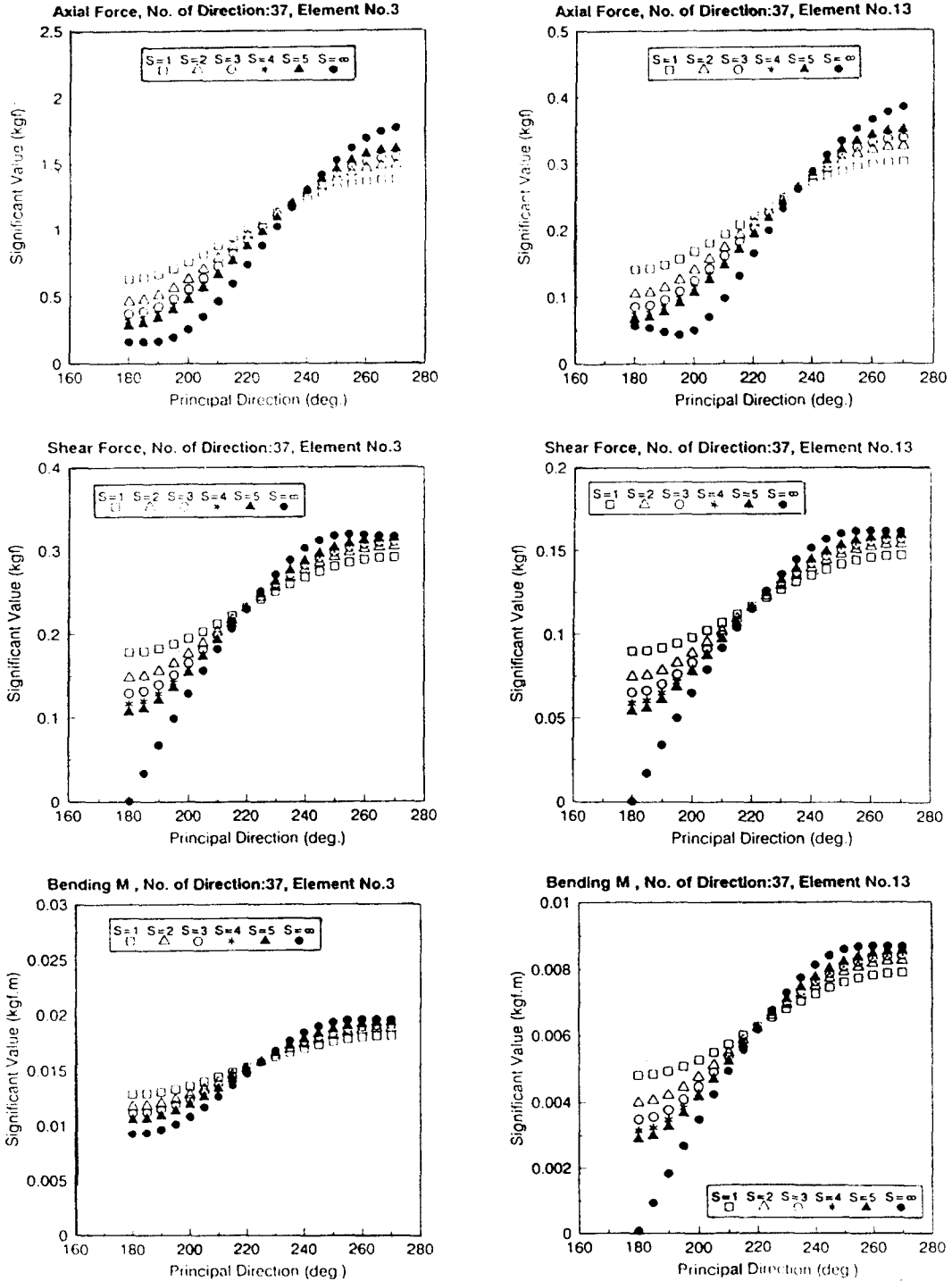


Fig. 6 Significant Values of Structural Responses for Various Principal Directions and Parameters of Direction Function (No. 3, 13 of Beam element)

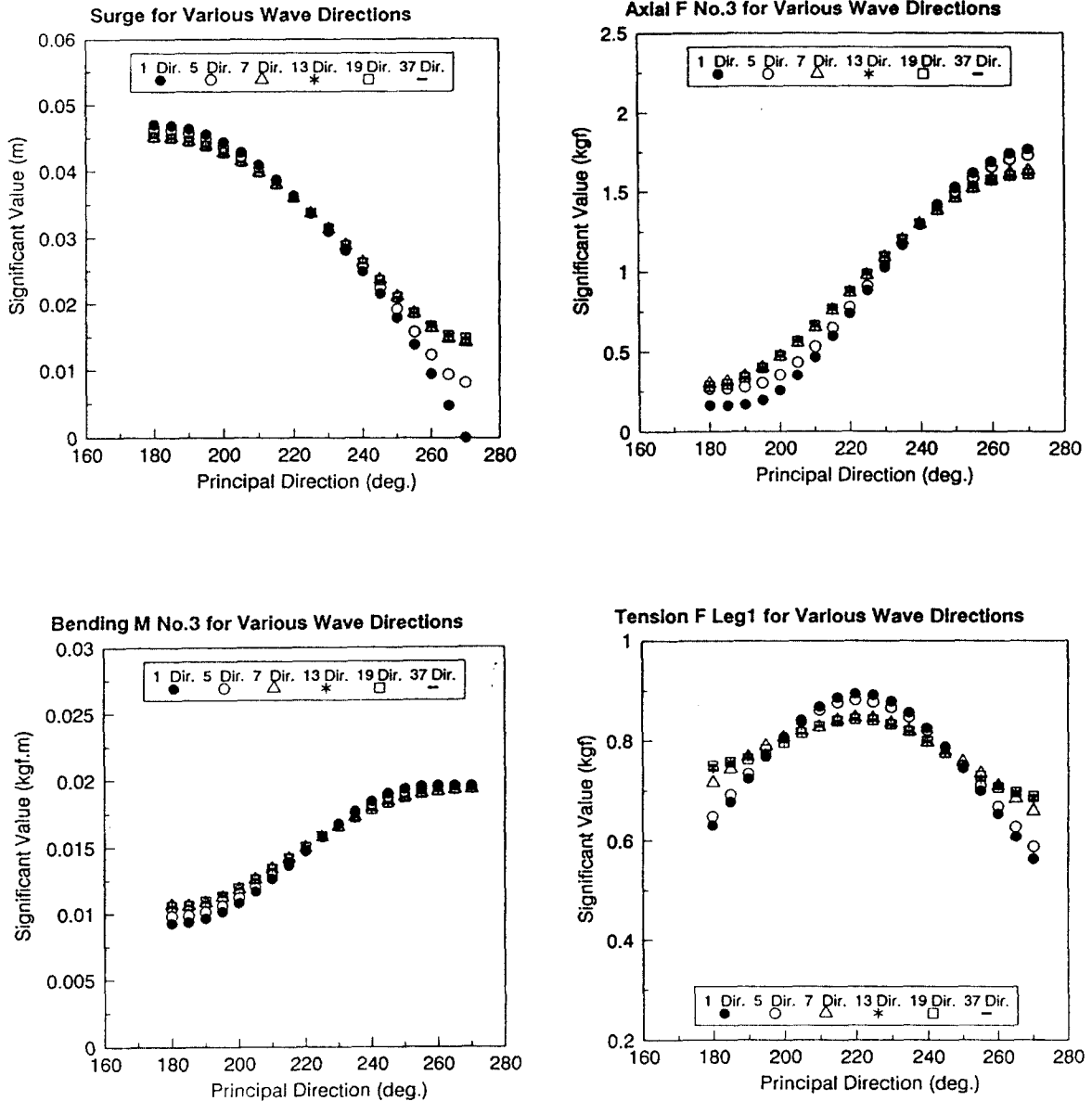


Fig. 7 Significant Values of Dynamic Responses for Various Principal Directions and Number of Wave Direction(Parameter S=5)

- 1) 다방향파중에서 TLP의 전체구조를 탄성체로서 동적으로 취급할 수 있고, 구성부재간의 유체역학적인 상호간섭효과를 고려하여 내력 응답 및 운동응답의 유의치를 동시에 구할 수 있는 동적응답 해석법을 개발하였다.
- 2) 한방향파중에서 운동응답이 큰 모우드에 대해서는 다방향파의 영향으로 응답이 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 운동응답이 나타나지 않는 모우드에 대해서는 다방향파의 영향이 무시될 수 없을 정도로 나타났다.
- 3) 계류부재의 장력응답 및 구조부재의 내력응답에 대한 다방향파의 영향도 운동응답과 유사한 경향을 보이고 있고, 다방향파의 영향으로 응력이 10~12% 정도 감소하므로 계류부재 및 구조부재의 피로설계에 있어서 다방향파의 영향을 고려하면 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있다.
- 4) 방향수의 수렴성 조사 결과 TLP와 같은 구조물의 경우에는 13개 정도의 방향성분파로 연속인 다방향파를 재현할 수 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Isaacson, M. and Nwogu, O., "Short-crested Wave Forces on a Vertical Pile", OMAE, pp. 47-54, 1988
- 2) Aage, C. et al., "Wave Loads on a Cylinder in 2-D and 3-D Deep Water Waves", OMAE, pp. 175-181, 1989
- 3) Jo, H. J., Maeda, H. and Miyajima, S., "Effects of Directional Waves on the Behaviour of Semisubmersible Rigs", PRADS, pp. 116-129, 1992
- 4) Sand, S. E., Romeling, J. and Kirkegaard, J., "Influence of Wave Directionality on Response of Semisubmersible", OMAE, pp. 239-245, 1987
- 5) 竹澤誠二, 小林顕太郎, "方向スペクトル波中における海洋構造物の応答-その1線形一次応答-", 日本造船學會論文集, 165號, pp. 141-152, 1989
- 6) Maeda, H., Jo, H. J. and Miyajima, S., "Effects of Directional Waves on the Low-frequency Motions of Moored Floating Structures", ISOPE, pp. 489-495, 1992
- 7) Pinkster, J. A., "The Influence of Directional Spreading of Waves on Mooring Forces", OTC 5629, pp. 129-140, 1988
- 8) 竹澤誠二, 小林顕太郎, "方向スペクトル波中における海洋構造物の応答-その1非線形應答-", 日本造船學會論文集, 166號, pp. 139-150, 1989
- 9) 구자삼, 이창호, 홍봉기, "인장 계류식 해양구조물의 동적응답해석법의 개발", 한국해양공학회지, 7권 1호, pp. 133-146, 1993
- 10) 高石敬史, 其 他, "海洋波の方向波スペクトルについて", 日本造船學會誌, 第740號, pp. 94-113, 1991
- 11) 山内保文, "不規則現象論", 海文堂, pp. 138-149, 1986
- 12) Price, W. G. and Bishop, R. E. D., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", John Wiley & Sons, pp. 180, 1974