인장계류된 원통형 실린더의 동적 거동 해석

황재혁 · 조효제 · 강일권*

한국해양대학교, *경상대학교 해양산업연구소

(2202년 10월 17일 접수)

A Dynamic Analysis of Tension-Legged Circular Cylinder in Irregular Waves

Hwang Jae-Hyuck, Jo Hyo-Jae and Kang Il-Kwon*

Korea Maritime University, *Institute of Maritime Industry, Gyoungsang National University

(Received October 17, 2002)

Abstract

The technology development for ocean resources can be represented by the increase of water depth. TLP, Tension Leg Platform, is one of the most feasible systems for deep sea development. TLPs show a complex dynamic behavior resulting from the dynamic interactions among platform, tether system and riser system due to their hydrodynamic and structural dynamic characteristics in waves.

This paper aims at the theoretical and experimental analysis on motion response of TLP in waves. It is composed of two parts as follows : (1) wave and wave loadings (2) TLP motion.

1. 서 론

해양에 관련된 공학과 기술은 해양의 석유와 천연가스의 개발과 더불어 급속히 발달하였지만, 향후 대수심역 해양공간 이용 및 해저자원과 에너지의 개발을 중심으로 점점 더 발전해 나갈 것이며, 21세기의 새로운 해저자원 개발은 대부분 500m 이상의 심해에서 이루어질 것으로 예상된다[1].

본 연구에서는 심해 석유자원의 시추 및 생산을 위한 대표적인 구조물로서 최근 FPSO(Floating, Production, Storage & Offloading), SPAR와 함께 많은 관심을 모으고 있는 인장계류식 해양구조물(TLP : Tension Leg Platform)을 연구 대상으로 한다. TLP는 각종 실험연구를 통하여 작은 수직 운동변위 및 우수한 작업성으로 인해 대수심 해양공간이용 및 해저자원과 에너지 개발관련 심해용 플랫폼으로서 중추적 역할을 수행해오고 있으나, 바람과 조류, 저주파수 파랑표류력에 의한 표류운동, 해상 불규칙파 성분의 합주파수 기진에 의한 Springing과 Ringing 등과 같은 비선형 거동특성이 유발되어 계류부재의 심각한 피로문제를 동반함이 건조된 실선(*Prototype*) TLP의 모형시험에서 관측된 바 있다. 미국, 유럽, 일본 등의 해양 선진국에서는 TLP의 뛰어난 조업실적 등으로 21세기에 수요가 증가할 것으로 예상하고, 경제적인 TLP의 실용화 기술개발을 위한 많은 연구와 해양실험이 진행되고 있다[2-10].

본 연구에서는 인장계류된 원통형실린더(Tension-Legged Circular Cylinder)의 동적 거동을 해석하기 위하여 TLC모델을 제작하여 해양공학수조에서 실험을 수행하였다. 실험은 규칙파, 불규칙파의 20가지 경우와 테더강성의 3가지 경우에 대하여 수행하였다. 이론해석에서는 실험모델에 작용하는 파강제력을 특이점 분포법을 적용하여 주파

수 영역과 시간영역에서 구하였다. 실험해석에서는 6분력계를 이용한 파랑강제력, 광점 위치 측정장치를 이용한 2차원 운동응답, 수중장력계를 이용한 변동 장력응답을 계측하였다. 이렇게 계측된 실험치들을 이론치와 비교·검토하여 실험치의 유효성을 검증하였다.

2. 이론해석

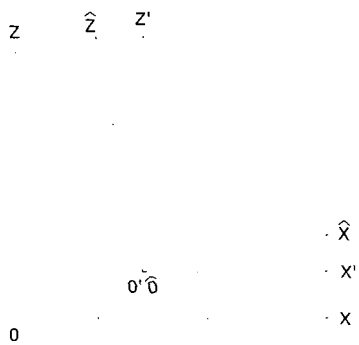

Fig. 1. Coordinate Systems.

불규칙 파랑 중에서 인장계류식 해양구조물(TLP)을 강체로 가정하여 TLP에 작용하는 선형 및 비선형 파강제력을 추정하기 위해 포텐셜이론을 적용한다. 섭동법에 의한 전개식을 2차항까지 취하여 경계치 문제의 해를 구하는 것으로써 입사파의 주기와 동일한 선형 파강제력(1차 파강제력)과 성분파 주파수의 차이나 합으로 나타나는 비선형 파강제력(2차 파강제력)을 추정한다. 먼저 이론의 정식화를 위하여 Fig. 1과 같이 정수면상에 원점 O를 가지고, Z축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간고정 좌표계 $O-XYZ$, 물체와 함께 운동하는 물체고정 좌표계 $\hat{O}-\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ 및 공간고정 좌표계와 평행한 물체고정 좌표계 $O'-X'Y'Z'$를 사용한다.

2.1 경계치 문제와 파강제력

자유표면 경계조건과 물체표면 경계조건 이외에 해저 경계조건 및 무한원방 경계조건을 만족하도록 지배방정식인 Laplace 방정식의 해를 구하는 것에 의해 1차 및 2차 속도포텐셜을 구할 수 있으며, 1차와 2차의 경계치 문제로 분리할 수 있다. 압력에 의한 유체력을 계산하기 위하여 압력 P를 평균위치에 대하여 Taylor 전개하고 경계치 문제에서 얻어지는 속도포텐셜을 고려해서 정리하면 다음과 같이 표현되고,

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

압력에 의한 유체력은 다음의 식에 의해 구해진다.

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

인장계류식 해양구조물에 작용하는 파강제력과 모멘트는 섭동전개에 의해 얻어지는 1차 및 2차항을 취하여 1차 파강제력과 모멘트 및 2차 파강제력과 모멘트를 구할 수 있다.

2.2 시간영역에서의 응답 해석

본 연구에서는 파강제력과 모멘트의 시간이력(time history)을 주파수영역에서 구해지는 파강제력과 모멘트의 주파수 응답함수를 Fourier 변환함으로써 얻어지는 임펄스 응답함수를 콘볼루션 적분하여 구한다. 먼저, 파강제력 $\{F_W(t)\}$과 모멘트 $\{M_W(t)\}$를 Volterra급수로 표현하여 2차항까지 취하고 1차 및 2차 파강제력과 모멘트로 분리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{F_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\{h_F^{(1)}(\tau)\}\,\zeta(t-\tau)\,d\tau \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\{F_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\{h_F^{(2)}(\tau_1,\tau_2)\}\,\zeta(t-\tau_1)\,\zeta(t-\tau_2)\,d\tau_1 d\tau_2 \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\{M_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(1)}(\tau)\}\, \zeta(t-\tau)\, d\tau \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\{M_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\}\, \zeta(t-\tau_1)\, \zeta(t-\tau_2)\, d\tau_1 d\tau_2 \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서 $\{h_F^{(1)}(\tau)\}$, $\{h_F^{(2)}(\tau)\}$ 및 $\{h_M^{(1)}(\tau)\}$, $\{h_M^{(2)}(\tau)\}$는 각각 1차 및 2차 파강제력과 모멘트의 임펄스 응답함수이다. 파강제력과 모멘트의 전달함수가 구해지면, Fourier 역변환에 의해 파강제력과 모멘트의 임펄스 응답함수를 계산할 수 있고, 임펄스 응답함수와 수면변위의 시간이력의 곱을 적분함으로써 파강제력과 모멘트의 시간이력을 구할 수 있다.

3. 실험 및 TLC 모형

인장계류된 원통형 실린더(TLC, Tension-Legged Circular Cylinder)에 작용하는 파강제력의 계측을 위해 6분력계(6 axis loadcell)를 이용하였다. 구조물의 동적 거동 해석을 위해 구조물의 상단부 수직선상에 위치하는 계측점 두 곳에 적외선 발광다이오드(LED) 타겟을 부착하고 광점위치계측장치(light spot position detector)를 이용해 X, Y방향의 위치정보를 통해 2차원 운동응답을 해석하였다. 계류삭(tether)의 변동장력 계측은 방수형 1축 로드셀을 사용하였으며, 파고의 계측에는 서보식 파고계를 이용하였다. TLC 모형실험에 대한 파랑조건은 규칙파의 경우 주기 0.6~1.3초에서 파고 2*cm*, 4*cm*이며, 불규칙파는 유의파고(H1/3) 2*cm*, 4*cm*와 평균주기(T) 1초, 1.2초에 대한 두가지 변수의 ISSC 스펙트럼을 적용하였다. 또한 2.5*kgf/m*, 6.34*kgf/m*, 10.71*kgf/m*의 각각 다른 스프링 강성(spring stiffness)을 갖는 인장계류삭(tether)을 설치하여 그에 따른 동적 응답 및 변동장력(tension variation)을 해석하였다.
Fig. 2는 원통형 실린더 하부면의 중심점에 테더 모형을 인장계류시킨 TLC모델의 설치개념도이며, Table1은 설치된 모형의 제특성치이다.

Table 1. Particulars of TLC

Draft	0.2 *m*
Center of Gravity	0.125 *m* (from the free surface)
Weight	0.710 *kgf*
Displacement	1.004 *kgf*
Pre-Tension	0.294 *kgf*

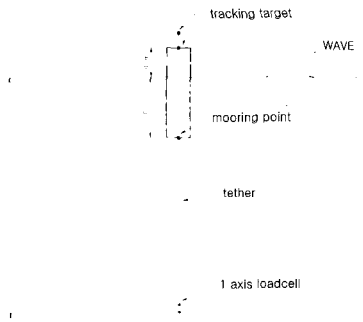

Fig. 2. Configuration of Model Installation.

4. 실험결과 및 고찰

동적 거동특성의 파악을 위하여 우선 해양공학 수조내에 설치된 TLC 모델의 각 운동모드별 고유주기를 계측하였다. Fig. 3은 테더강성 2.5*kgf/m*의 경우 자유감쇠실험(Free Decay Test)을 통해 얻은 시계열 계측신호의 결과이다.

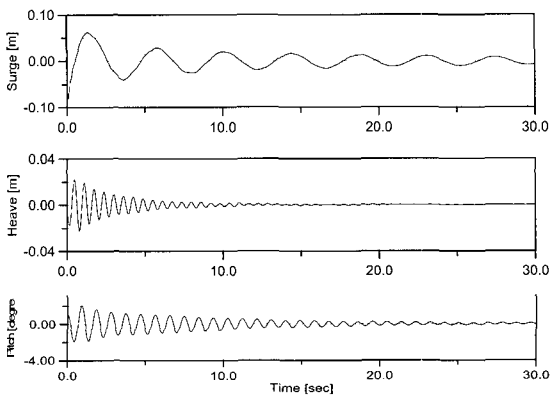

Fig. 3. Time Series of Free Decay Test.

본 연구의 실험에 사용된 모형은 원통형 실린더 하부면의 중심점에 테더모형을 인장계류 시켰기 때문에 테더 강성의 변화에 따른 Heave 고유주기는 변화가 있으나, Surge, Pitch 모드의 고유주기는 거의 변화가 없는 것을 확인하였다.

4.1 규칙파중의 응답해석

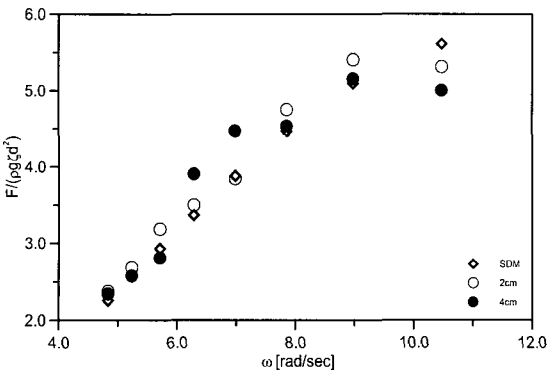

Fig. 4. Comparison between Measured & Calculated (surge).

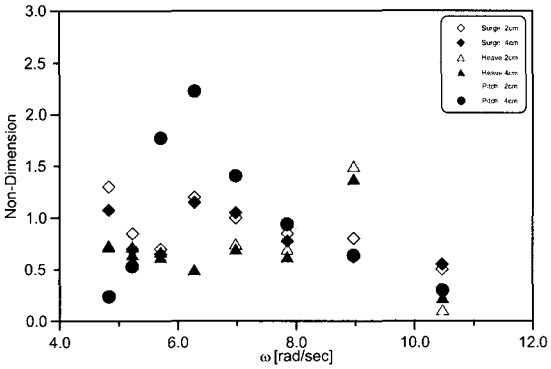

Fig. 5. Nondimensional Motion Response in Regular Waves.

Fig. 4는 서지모드의 특이점 분포법에 의해 계산된 파강제력과 실험에 의해 계측된 파강제력의 무차원 비교를 보여주고 있다. Fig. 5는 테더의 강성이 2.5 *kgf/m*인 경우의 Surge, Heave, Pitch 모드의 운동응답을 나타내고 있다. 여기서 Surge와 Heave는 입사파의 진폭으로, Pitch는 입사파의 진폭과 파수(wave number)로 무차원화 시켰다. 실험에 적용된 규칙파의 주기영역은 0.1초 간격으로 0.6초에서 1.3초까지인데 이 모델의 경우 Heave(0.61), Pitch(0.92)의 고유주기가 여기에 포함된다.

Fig. 5에서 주기 0.6초와 0.7초 사이에서 Heave 공진현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 보다 정확한 분석을 위해 Fig. 6에 주기 0.7초, 파고 4*cm*의 조건에서 계측된 tracking target의 X, Y변위의 시계열을 나타내었다. Pitch 모드의 경우는 전 모형에서 공진현상이 나타나는 것을 확인하였으며, 특히 테더강성이 10.71*kgf/m*인 모형의 Peak치가 가장 높게 나타나는데, 이는 TLP의 설계시 테더 강성의 변화에 따라 양상이 달라지는 변동장력과 부유체의 동적 거동간의 상호간섭의 영향을 충분히 고려해야 한다는 것을 보여주고 있다. 또한 Heave 운동의 스펙트럼분석을 통해 합주파수, 차주파수에 의한 비선형 유체력(2ω, 3ω)으로 인해 입사파의 주파수보다 훨씬 빠르거나 느리게 응답하는 비선형 운동응답을 해석할 수 있다. 2차 파강제력에 의한 Ringing현상과 여러 연구자들에 의해 예측되고 있는 3차 파강제력에 의한 ringing 현상보다 더 빠르게 응답하는 Singing현상 등을 규칙파중에서도 분석할 수 있다. 또한 규칙파중에서 비선형 동적 응답의 원인은 실험모델에 가해지는 입사파의 파강제력에 의한 Impact의 영향과 모델의 고유주기운동과의 합성으로 일어난다.

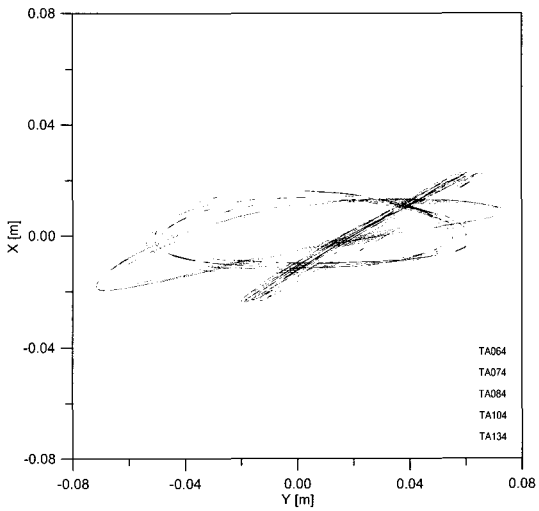

Fig. 6. Time History of X & Y Position.

Fig. 7은 강성이 상이한 테더의 변동장력의 응답을 입사파의 주파수대별로 나타내고 있다. 변동장력의 응답은 수직운동응답과 유사하게 공진이

일어나는 실험조건에서 최대치가 나타났다. 전체 경우에서 최대응답치와 최소응답치의 차이는 0.1*kgf* 정도 되며, 동일주파수에서 파고가 높을 경우에 그래프상에서 넓은 응답분포를 보이고 있다. TLP의 동적 응답중, 특히 고주파수 수직모드(Stiff Mode)에서는 유기되는 파의 산란과 상호간섭효과(Diffraction & Interaction Effect), 공진(Resonance), 수평운동과 종운동의 연성효과 등에 의해 복잡한 응답특성을 보이며, 이는 테더 장력 변화에 영향을 미친다.

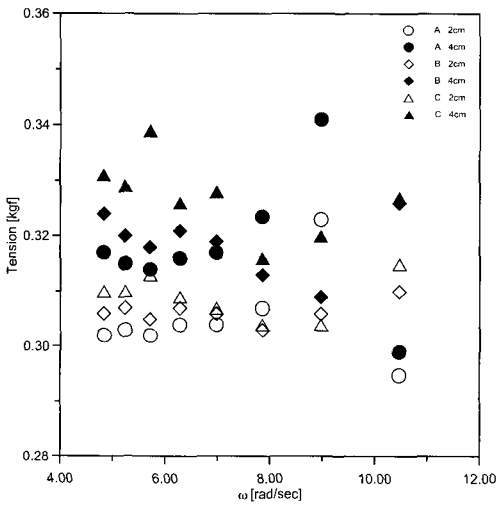

Fig. 7. Tension Response in Regular Waves.

4.2 불규칙파중의 응답해석

Fig. 8은 불규칙파 중에서 TLC의 유의운동진폭을 각 모드별로 나타내고 있다. Fig. 9, Fig. 10은 테더강성이 10.71 *kgf/m*인 모형의 평균주기 1.0초, 파고 4*cm* 조건에서 계측된 파고와 Surge 운동의 스펙트럼이다. Fig. 11은 Surge 운동의 시간이력과 운동스펙트럼의 저주파수대에서 peak치를 보이는 영역을 다시 시계열로 변환하여 한 그래프에 표시한 것이다. 이 그래프의 분석을 통해 set down 등을 유발시키는 장주기현상을 분석할 수 있다. 인장계류식 구조물에 파가 입사하면 입사파의 주기를 가지는 파강제력 이외에 자유표면의 비선형성에 기인하는 두 개의 서로 다른 주파수를 가지는, 즉 입사파의 차주파수(difference frequency)와 합주파수(sum frequency)의 파가 존재하며, 차주파수(장주기)에서의 유체력은 표류력을 나타내는데, 이 표류력에 의한 해양구조물의 표류운동은 계류삭에 과대한 인장력을 유발시키며 조업조건을 악화시킨다. 실험결과의 분석을 통해 변동장력의 유의치는 테더의 spring stiffness가 강할수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

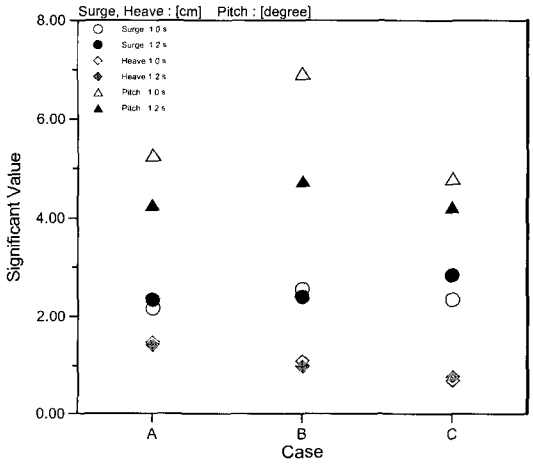

Fig. 8. Significant Response Amplitudes.

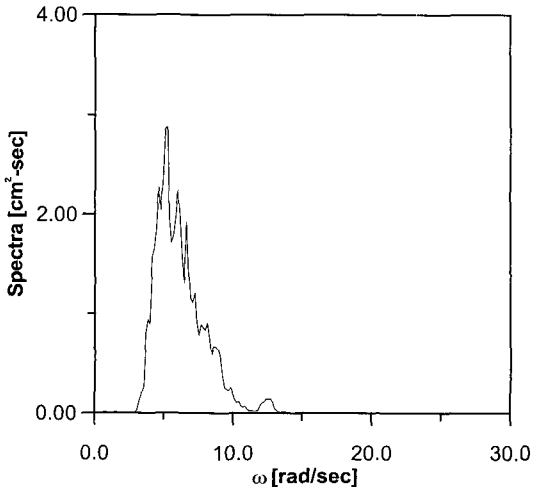

Fig. 9. Wave Spectra.

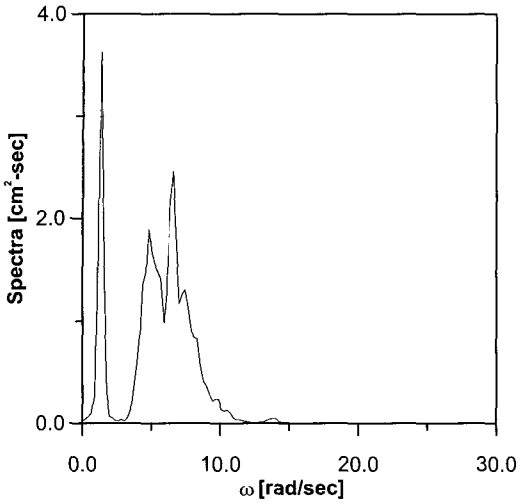

Fig. 10. Surge Response Spectra.

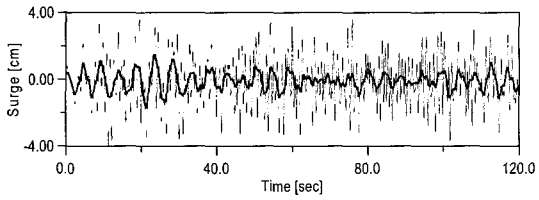

Fig. 11. Slow Drift Oscillation.

5. 결 론

인장계류된 원통형실린더의 동적 거동해석에 관한 일련의 연구수행 결과는 다음과 같다.

1) 실린더형 부유체의 중심점을 인장계류시킨 새로운 개념의 부유식 구조물의 동적거동특성을 파악하였다.
2) 규칙파에서도 부유체와 테더(tether), 입사파의 상호간섭으로 인한 운동특성을 해석하였다.
3) 비선형유체력(2ω, 3ω)으로 인한 비선형 운동응답 특성을 분석하였다.
4) 테더강성(tether stiffness)의 결정에 있어서 부유체와의 상호간섭 효과 뿐만 아니라 고주파수 영역에서의 공진을 충분히 고려하여 결정해야 한다.
5) 구조물의 설계시 Surge mode에서는 장주기 표류운동을 발생시키므로 Set down 등의 현상을 고려해야 한다.

참고문헌

1. Mercier, J. A., Birell, N. D., Chivvis, J. C. and Hunter, A. F.(1991) : "Tension Leg Platforms-Progress and Prospects", SNAME Transactions, Vol. 99, 249-279.
2. 홍사영 등(1998) : "심해 계류인장각 플랫폼의 모형시험 기법 개발", 한국기계연구원 연구보고서.
3. Kobayashi, M., Shimada, K. and Fujihira, T.(1985) : "Study on Dynamic Responses of a TLP in Waves", OMAE, 29-35.
4. Taylor, E. R. and Jefferys, E. R.(1986) : "Variability of Hydrodynamic Load Predictions for a Tension Leg Platform", Ocean Engineering, Vol. 13, 449-490.
5. Jain, A. K.(1996) : "Offshore Tension Leg Platform Behaviour under Wave and Wind Force", Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, 220-227.
6. 金綱正夫 · 日根野元裕 · 島田 潔 · 石田成幹(1994) : "1本カラム型TLP動的應答の海洋實驗", 日本造船學會論文集 第176號, 213-221.
7. 구자삼 · 박찬후 · 이창호(1996) : "인장계류식 해양구조물의 동적응답 해석(II)", 한국해양공학회지, 제10권 1호, 25-35.
8. 구자삼 · 조효제 · 이창호(1994) : "다방향 불규칙파중의 TLP의 동적응답해석(주파수영역해석)", 한국해양공학회지, 제8권 1호, 23-32.
9. Teigen, P.(1999) : "Experiments and Analysis with Fully Coupled Mini-TLP/Barge System", Proceedings of the Ninth-International Offshore and Polar Engineering Conference, 347-354.
10. Niedzwecki, J. M., Liagre, P. F., and Borgman, L. E.(2001) : "Directional Sea Response of a Mini-TLP", Proceedings of the Eleventh-International Offshore and Polar Engineering Conference, 447-452.