

Morison 방정식을 이용한 Tension Leg Platform의 동적해석

Dynamic Analysis of a Tension Leg Platform Using Morison's Equation

片	宗	根*
Pyun,	Chong	Kun
朴	佑	善**
Park,	Woo	Sun
尹	楨	邦***
Yun,	Chung	Bang

Abstract

An efficient method for the calculation of wave forces on a tension leg platform(TLP) is presented in this paper. It is based on the Morison's equation with two corrective terms. One is the reduction of the inertia forces on the vertical columns in order to include the wave diffraction effect particularly for small wave conditions. The other is the inclusion of the hydrodynamic forces acting at the bottoms of the columns. Numerical studies are carried out for a TLP in 1000 ft water with two different wave heading angles(0° and 45°). The reponse amplitude operators(RAO's) for the TLP motions and top tether tension variations are obtained by the present method and the theoretically more accurate method based on the diffraction theory. A comparison has been made between the results obtained by two methods.

요 지

본 논문에서는 Tension Leg Platform(TLP)에 작용하는 파랑하중을 간단한 Morison 방정식을 이용하여 효율적으로 산정할 수 있는 방법에 대해서 연구하였다. 본 방법에서는 MacCamy-Fuchs 산란파이론에 기초를 둔 파동력 감소계수를 도입하여 파의 산란효과를 근사적으로 고려하였으며, Morison 방정식상에서는 무시되는 연직기둥의 바닥에 작용하는 수직력을 이 면에서의 동압력과 수직방향의 부가질량에 관련된 관성력으로 산정하여 고려하였다. 수치해석은 1000 ft 수심에 위치한 가상적인 구조물에 0° 및 45° 로 입사하는 파에 대하여 전술한 방법 및 이론적으로 보다 정확한 산란파이론에 의한 방법을 사용하여 수행하였으며, TLP 운동 및 tether의 상단 인장력의 전달함수(RAO)를 구하여 비교 검토하였다.

1. 서 론

본 논문에서는 Tension Leg Platform(TLP)의 거동해석을 위한 효율적인 파랑하중의 산정방법

* 정희원 · 명지대학교 부교수, 토목공학과

** 정희원 · 한국과학기술원 박사과정, 토목공학과

*** 정희원 · 한국과학기술원 부교수, 토목공학과

에 대해서 연구하였다. TLP 란 최근에 개발된 심해용 해양구조물의 하나로, 작업공간을 제공하는 상판구조, 부력을 전담하는 선체구조로 이루어진 platform 과 이에 수평 및 수직지지를 제공하는 연직장력부재(tension legs; tethers) 및 기초구조로 구성되어 있다. 이 구조물은 파력의 효과를 완화시킬 수 있도록 구조물이 일정범위 내에서 파력에 따라 움직이도록 설계된 것이 특징(compliant structure)이다.

TLP 의 선체구조에 작용되는 파랑하중을 산정하는 방법은 크게 다음의 두가지로 나눌 수 있다. 첫째는 선체구조를 구성하는 부재가 파동장에 큰 영향을 미칠 정도로 크다고 보고 산란파이론(diffraction theory)을 적용하는 방법이고, (1,2,3) 둘째는 부재가 작아서 이 영향이 크지 않다고 가정하여 Morison 방정식을 사용하는 방법이다. (4,5,6) 산란파이론에 의한 산정방법은, Morison 방정식에 의한 방법에 비하여, 이론적으로 더 정확하다고 할 수 있으나 많은 계산시간이 소요된다는 문제점이 있다. 반면, Morison 방정식에 의한 방법은 간단히 파랑하중을 산정할 수 있으나, 부재의 직경이 큰 경우에는 파력을 과다하게 산정하게 되는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, Hudspeth 와 Pyun 등은 직경이 큰 부재에 대해서는 산란파이론을 적용하고, 직경이 작은 부재에 대해서는 Morison 방정식을 적용하는 방법을 사용하였다. (7) 그러나 이 방법도 산란파이론을 사용하므로, 아직도 상당한 계산시간이 소요된다는 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 Morison 방정식만 사용하되 파의 산란효과를 적절히 고려할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 구체적으로 언급하면, 큰 직경을 갖는 연직기둥에 수평방향으로 작용하는 파랑하중에 대해서는 MacCamy-Fuchs 의 산란파이론의 결과(8)에 기초를 둔 감소계수를 도입하여 파의 산란효과를 근사적으로 고려하였다. 또한, Morison 방정식을 사용할 때 누락되는 연직부재의 바닥에 작용하는 파랑하중은 이면에서의 동압력과 수직방향의 부가질량에 관련된 관성력으로 산정하여 고려하였다.

예제해석은 1000 ft 수심에 위치한 가상적인 구조물에 대하여 수행하였으며, 파랑하중 산정방법

들의 비교를 목적으로, 위의 방법외에, Morison 방정식만 사용한 경우, 연직기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중을 고려한 경우 및 기둥에 대해서 산란파이론을 적용한 경우 등에 의한 해석을 수행하고 그 결과들을 비교 분석하였다.

2. 구조물의 모형화

본 논문에서는 그림-1에서 보인 바와 같이 부력을 전담하는 연직축대칭 기둥과 이들을 연결하고 있는 세부재(직경이 작은 부재)로 이루어진 TLP 를 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 효율적인 거동해석을 위해 상판구조는 집중질량으로 대체하였으며, 선체구조는 강체운동을 한다고 가정하였다. platform 과 지반을 연결하는 tether 는 질량을 갖지 않는 선형경계요소로 다음과 같이 이상화하였다.

$$K_V^T = EA_T / L_T \quad (1. a)$$

$$K_H^T = T_0 / L_T \quad (1. b)$$

$$K_R^T = T_0 L_C / 2 \quad (1. c)$$

여기서, K_V^T 와 K_H^T = 기둥의 바닥에 부착된 수직 및 수평 경계요소의 강성; K_R^T = 기둥의 중앙에 부착된 회전방향 경계요소의 강성; E, A_T, T_0 와 L_T = tether 의 탄성계수, 단면적, 상단에서의 초기 인장력과 길이; L_C = 연직기둥의 길이를 나타낸다.

정수압에 의한 복원력은 다음과 같은 강성을 갖는 수직 및 회전 방향의 등가스프링(equivalent spring)으로 대체하였다.

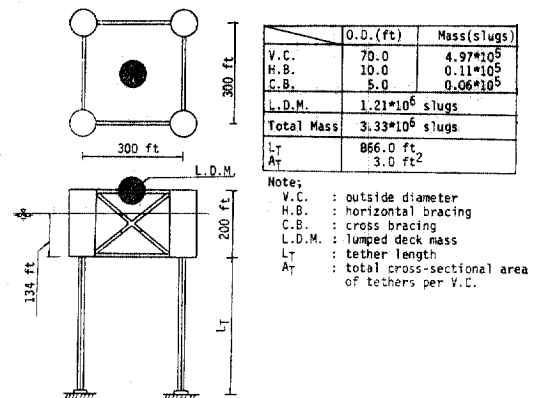


그림 1. Example structure

$$K_H = \rho g \pi D^2 / 4 \quad (2. a)$$

$$K_H = \rho g L_D \pi D^2 / (D^2 / (4L_D) - 2(L_C - L_D)) \quad (2. b)$$

여기서, K_H 와 K_H' 는 연직기둥의 중앙에 부착된 수직 및 회전방향 스프링의 강성; D 와 L_D =기둥의 직경 및 홀수심; ρ 와 g =유체의 밀도 및 중력 가속도를 나타낸다.

3. 파랑하중의 산정

연직기둥을 연결하고 있는 세부재에 작용하는 파랑하중은 Morison 방정식으로 구했으며, 큰 직경을 갖는 연직기둥에 작용하는 파랑하중은 Morison 방정식을 사용하되, 파의 산란효과와 기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중을 근사적으로 고려하여 산정하였다. 즉, 연직기둥의 미소부재에 수평방향으로 작용하는 파랑하중은 다음과 같이 산정하였다.

$$dF_{C,n} = R_f C_M \rho dV \vec{V}_n - (C_M - 1) \rho dV \vec{X}_n + \frac{1}{2} \rho C_D dA |\vec{V}_n - \vec{X}_n| (\vec{V}_n - \vec{X}_n) \quad (3)$$

여기서, \vec{V}_n 와 \vec{X}_n =부재의 중심에서 물입자의 수평속도 및 가속도 벡터; \vec{X}_n 와 \vec{X}_n =부재의 수평속도 및 가속도 벡터; dA =부재를 수평방향으로 투영한 면적; dV =부재의 배수용량; ρ =유체의 밀도; C_M 과 C_D =관성 및 항력계수를 나타내며, R_f 는 MacCamy-Fuchs 산란파이론⁽⁸⁾의 결과로부터 결정한 감소계수로 연직기둥의 직경(D)과 입사파의 파장(L)의 함수로 아래와 같이 나타내진다.

$$R_f = \frac{1}{C_M} \cdot \frac{4}{\pi^3 (D/L)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(J_1'(\pi D/L))^2 + (Y_1'(\pi D/L))^2}} \quad (4)$$

여기서, $J_1(\cdot)$ 와 $Y_1(\cdot)$ 은 각각 1차 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수를 나타내며, prime(')은 argument에 대한 미분을 나타낸다.

연직기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중($F_{C,v}$)은 근사적으로 바닥 중앙점에서의 동압력(P_{dy})과 수직방향의 부가질량(M_a)에 관련된 항으로 아래와 같이 산정하여 고려하였다⁽⁹⁾.

$$F_{C,v} = P_{dy} \pi D^2 / 4 + M_a (\dot{V}_v - \ddot{X}_v) \quad (5)$$

$$M_a = 4\rho (D/2)^3 / 3$$

여기서, \dot{V}_v 와 \ddot{X}_v 는 연직기둥 바닥의 중앙점에서 물입자와 구조물의 연직방향 가속도를 나타낸다.

식(3)의 우변을 살펴보면, 점성저항력을 나타내는 세번째항이 비선형항임을 알 수 있다. 본 논문에서는, 주파수영역 해석을 수행하기 위해서, 물입자 속도($|\dot{V}_n|$)가 미소부재의 속도($|\dot{X}_n|$)보다 상당히 작다는 가정하에 점성저항력을 다음과 같이 선형화하였다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{1}{2} \rho C_D dA |\dot{V}_n - \dot{X}_n| (\dot{V}_n - \dot{X}_n) \approx \frac{1}{2} \rho C_D dA (|\dot{V}_n| \dot{V}_n - 2|\dot{V}_n| \dot{X}_n) \approx \frac{1}{2} \rho C_D dA (\dot{V}_n^* - 2C^* \dot{X}_n) \quad (6)$$

여기서, \dot{V}_n^* 와 $C^* \dot{X}_n$ 는 $|\dot{V}_n| \dot{V}_n$ 와 $|\dot{V}_n| \dot{X}_n$ 를 Fourier 급수로 전개했을 때 파동의 진동수와 같은 진동수를 갖는 항이다.

4. 운동방정식 및 거동해석

각 부재에 작용하는 힘들을 platform의 무게 중심에 위치한 전체좌표계로 변환시켜 조합하면 다음과 같은 선형운동방정식을 얻게 된다.

$$[M + M_a] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K_T + K_H] \{X\} = \{F(\omega)\} \quad (7)$$

여기서, $\{X\}$, $\{\dot{X}\}$ 와 $\{\ddot{X}\}$ =전체좌표계에 대한 platform 운동의 6-자유도 변위, 속도와 가속도 벡터; $[M]$ 과 $[M_a]$ =platform의 자체질량 및 부가질량행렬; $[C]$ =점성저항력에 기인한 감쇠행렬; $[K_T]$ 와 $[K_H]$ =tether 및 정수압에 의한 강성행렬; $\{F(\omega)\}$ =파랑 기진력벡터를 나타낸다.

식(7)에서, 파랑 기진력벡터와 이에 의한 platform 운동의 변위벡터를 다음과 같이 조화진동의 형태로 나타낼 때,

$$\{F(\omega)\} = \{\bar{F}(\omega)\} \exp(-i\omega t) \quad (8. a)$$

$$\{X(\omega)\} = \{\bar{X}(\omega)\} \exp(-i\omega t) \quad (8. b)$$

platform 운동은 다음과 같은 연립방정식으로부터 구할 수 있다.

$$[K(\omega)] \{\bar{X}(\omega)\} = \{\bar{F}(\omega)\} \quad (9)$$

여기서, $[K(\omega)]$ 는 동적강성행렬(dynamic stiffness matrix)로 다음과 같이 나타내진다.

$$[K(\omega)] = -\omega^2 [M + M_a] - i\omega [C] + [K_T + K_H] \quad (10)$$

5. 해석결과와 비교분석

본 논문에서 예제해석용으로 선택한 TLP는 1000 ft 수심에 위치한 가상 구조물로 그림-1에 그 제원과 함께 나타내었다. 관성계수(C_M)와 항력계수(C_D)는 $D_n V$ 에서 권장하는 방법⁽¹¹⁾을 사용하여 결정하였다. 구조물의 자유진동주기를 계산해 본 결과, 수평면 상의 운동(surge, sway, yaw)은 75~92 초정도로 대단히 긴 주기를 갖는 반면, 연직면 상의 운동(heave, pitch, roll)은 1~2 초 정도로 아주 짧은 주기를 갖음을 알 수 있었는데, 이 주기들은 실제 해상상태에서 파에너지가 밀집되어 있는 주기(4~20 초)를 현저히 벗어나고 있어 공진현상은 거의 일어나지 않으리라는 것을 알 수 있다.

platform의 운동해석은 주로 제 3절에서 기술

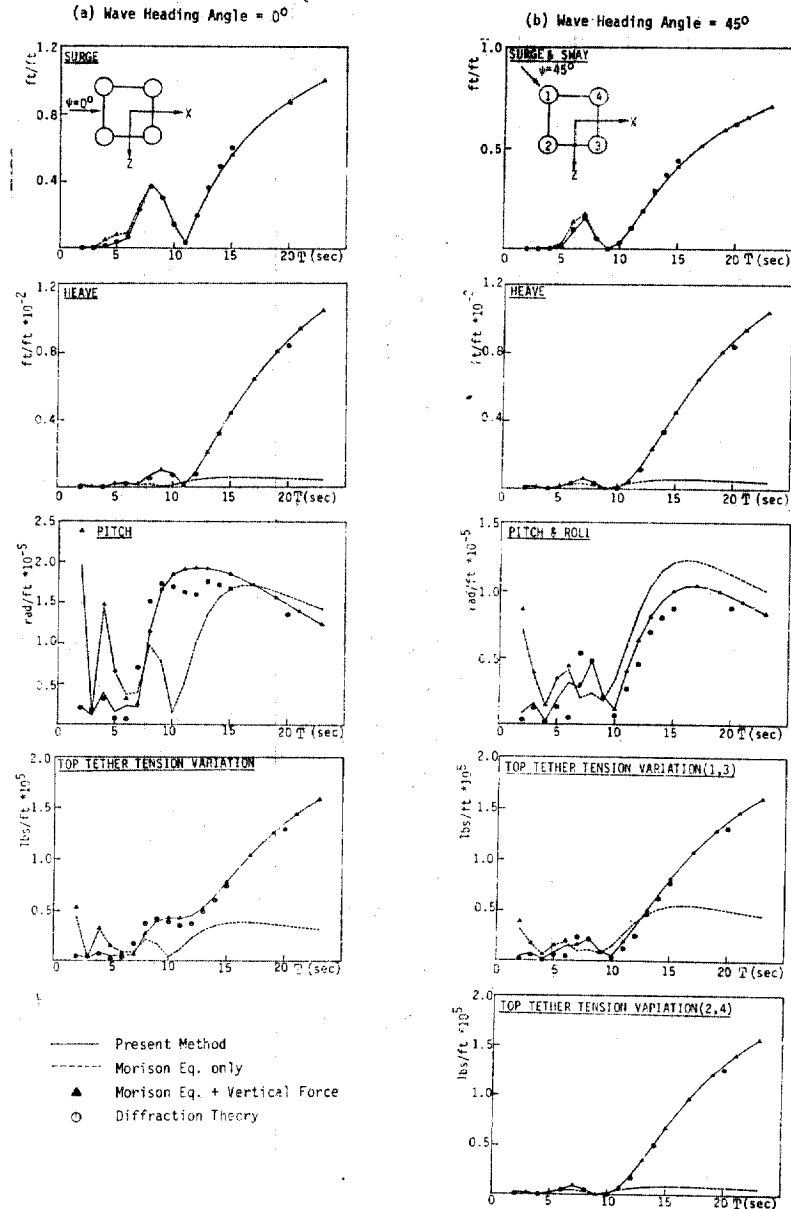


그림 2. Comparisons of RAO's by four different methods of wave force calculation

한 파랑하중 산정방법에 의해 0° 및 45° 로 입사하는 파에 대해 수행하였다. 또한 비교를 목적으로 큰 직경을 갖는 연직기둥에 대해서는 산란파이론을 사용하고 세부재에 대해서는 Morison 방정식을 사용한 경우도 해석을 수행하였으며, 본 논문에서 도입한 감소계수의 효과 및 연직기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중의 영향을 알아보기 위하여, Morison 방정식만 사용한 경우와 바닥에 작용하는 파랑하중을 고려한 경우의 해석도 수행하였다.

그림-2는 0° 및 45° 로 입사하는 파에 대한 platform의 각 방향 운동 및 tether의 상단 인장력의 전달함수(RAO: Response Amplitude Operator)를 나타내고 있다. 각 운동을 살펴보면, 본 논문에서 사용한 파랑하중 산정방법에 의한 결과와 이론적으로 보다 정확한 산란파이론에 의한 결과는 모든 파주기에 대해서 서로 잘 일치하고 있는 반면, Morison 방정식만을 사용한 결과는 surge 운동을 제외하고는 심각할 정도로 맞지 않음을 알 수 있다. 즉, Morison 방정식만을 사용하면 8초 이상의 주기를 갖는 큰 파에 대해서는 heave와 pitch(또는 roll)운동을 작게 예측하게 되는 반면, 7초 이하의 작은 파에 대해서는 큰 pitch(또는 roll)운동을 예측하게 된다. 또한, 연직기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중을 고려한 경우를 살펴보면, 8초 이상의 파에 대해서는 상당히 개선된 결과를 주게 됨을 알 수 있으나, 7초 이하의 작은 파에 대해서는 아직도 과다한 pitch(또는 roll)운동을 예측하게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 Morison 방정식만을 사용했을 때 8초 이상의 파에 대한 heave와 pitch(또는 roll)운동이 작게 산정되는 것은 연직기둥의 바닥에 작용되는 파랑하중이 누락되었기 때문이고, 7초 이하의 작은 파에 대한 pitch(또는 roll)운동이 크게 나타나는 것은 파의 산란효과를 고려하지 않아 파랑기진력이 과다하게 산정된 때문이라고 할 수 있다. 이상의 결과로 볼 때, 본 연구에서 사용한 감소계수는 7초 이하의 작은 파의 경우에 파의 산란효과를 적절히 고려하고 있음을 알 수 있고, 연직기둥의 바닥에 작용하는 파랑하중은 8초 이상의 큰 파에 대한 heave와 pitch(또는 roll)운동에 지대한 영

향을 끼치게 됨을 알 수 있다.

platform의 surge와 heave 운동을 살펴보면, 8초 부근에서는 극대값이, 11초 부근에서는 극소값이 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 연직기둥의 간격과 입사파의 파장과와의 관계(spacing effect)에 기인한 것이다. 이와 같이 입사파의 파장과 연직기둥의 간격은 platform의 운동과 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 이 관계를 이용하면, 예상되는 주요 파조건들에 대하여 platform의 운동을 최소화시키는 기둥간격에 대한 최적화도 가능할 것이다.

점성저항력의 영향을 살펴 본 결과, 고유진동수 부근을 제외하고는 그 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이는 TLP가 관성력이 주요한 구조물이기 때문에 나타나는 현상이다.

본 논문에서 사용한 방법의 효율성을 산란파이론에 의한 방법과 비교한 결과, VAX-11/730 컴퓨터를 사용해서 한 입사파에 대한 platform 운동을 계산하는데, 산란파이론에 의한 방법은 CUP 20초가 소요되는데 반해, 본 논문에서 사용한 방법은 2초가 소요되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 TLP의 거동해석을 위한 효율적인 파랑하중 산정방법으로 Morison 방정식을 사용하되 이에 적절한 보정을 도입하는 방법에 대해서 연구하였으며, 예제해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입사파의 주기가 작은 경우에 크게 문제되는 산란효과는 파동력 감소계수를 도입하므로써 적절히 고려할 수 있다.

(2) Morison 방정식상에서 무시되는 연직기둥의 바닥에 작용하는 수직력은, 입사파의 주기가 큰 경우, heave 및 pitch(또는 roll)운동에 지대한 영향을 주며, 이를 본 연구에서와 같은 방법으로 적절히 보정할 수 있다.

(3) 연직기둥의 간격과 입사파의 파장과와의 관계가 TLP의 운동에 미치는 영향이 큼을 알 수 있으며, 이 관계를 이용하면, TLP의 운동을 최소화시키는 기둥간격에 대한 최적화도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. C.J. Garrison, "Dynamic Response of Floating Bodies," OTC, 2067, 1974.
2. N. Salvesen, C.H. von Kerczer, D.K. Yue, and F. Stern, "Computations of Nonlinear Surge Motions of Tension Leg Platforms," OTC, 4394, 1982.
3. M. Kobayashi, K. Shimada, and T. Fujihira, "Study on Dynamic Responses of a TLP in Waves," *Proc. of the 4th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, Dallas, Texas, February 17~21, 1985.
4. J.R. Paulling and E.E. Horton, "Analysis of the Tension Leg Stable Platform," OTC, 1263, 1970.
5. C.L. Kirt and R.K. Jain, "Wave Induced Oscillations of Tension-Leg Single Buoy Mooring System," OTC, 2494, 1976.
6. T. Yoneya and K. Yoshida, "The Dynamics of Tension Leg Platforms in Waves," *Transactions of ASME*, Vol. 104, March 1982.
7. R.T. Hudspeth, C.K. Pyun, T. Nakamura, and B. Kruchoski, "User's Manual for Marathon TLP for Vertically Axisymmetric Buoyant Pontoons and Slender Member Cross Bracing," Marathon Oil Company Report, January 1982.
8. R.C. MacCamy and R.A. Fuchs, "Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory," Tech. Memo. No. 69, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1954.
9. J.P. Hooft, *Advanced Dynamics of Marine Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
10. C.K. Pyun, W.S. Park, and C.B. Yun, "Dynamic Analysis of the Tension Leg Platform Subjected to Wave Forces," *5th Congress APRD-IAHR*, Seoul, Korea, August 18~20, 1986.
11. *Det Norske Veritas, Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore Units*, 1975.

(接受: 1987. 7. 21)