

스파 플랫폼의 Mathieu 형 불안정성에 미치는 감쇠판의 영향

노준범^{†*}, 최항순^{*}

서울대학교 조선해양공학과^{*}

The Effect of Damping Plate on Mathieu-type Instability of Spar Platform

Jun Bum Rho^{†*} and Hang Soon Choi^{*}

Dept of Naval Arch., Seoul National University

Abstract

This paper describes motion stability of a spar platform with and without a damping plate in regular waves. The heave and pitch motion equation is derived in terms of Mathieu equation and the stability diagram is obtained. It is shown that the spar platform with damping plate has smaller unstable region than that without damping plate in the stability diagram. Model tests are carried out to verify the mathematical analysis. Under the condition that the pitch natural period is approximately double the heave natural period and the heave motion is amplified at heave resonance, unstable pitch motions are evoked. However the unstable motion is stabilized in cases of spar platform with damping plate. Therefore the damping plate is an effective device to stabilize the motion of spar platform.

※ Keywords: Spar platform(스파 플랫폼), Mathieu-type instability(매튜형 불안정성), Stability diagram(안정성도), Damping plate(감쇠판)

1. 서론

스파 플랫폼에 관한 기술은 일찍이 연구용 선박, 통신중계기지, 저장용 탱크 등 여러 해양 구조물에 사용되어 왔으며, 최근에는 심해 원유 개발을 위해 깊은 흘수를 가진 스파 플랫폼이 개발되었다(Halkyard 1996, Glanville et al. 1991).

스파 플랫폼은 긴 실린더 구조위에 작업용 플랫폼을 설치한 형식의 구조물이다. 깊은 흘수를 가지고 있기 때문에 동적 응답이 작아 위치유지는 중동요 중심에 부착된 카테나리 계류선에 의해 이루어진다. 멕시코만에 투입된 스파 플랫폼의 운동 주기는 대략 전후운동 160 초, 상하운동 28 초, 중동요 60 초이다(Converse and Bridge 1996). 이와 같이 스파 플랫폼은 운동 주기가 매우 길기 때문에 거친 해상조건을 가진 지역에 경쟁력있는 해양 구조물이라 할 수 있다. 그러나 원통형 스파 플랫폼

접수일: 2004년 11월 22일, 승인일: 2005년 1월 21일

†주저자, E-mail: maroh@chol.com

Tel: 02-880-7335

폼은 상하운동의 감쇠가 작기 때문에 공진시 상하운동이 입사파고의 8~10 배에 달하는 등 매우 큰 운동이 일어난다. 입사파에 의해서 스파 플랫폼의 상하운동이 증폭되는 경우 스파 플랫폼의 종동요 운동이 영향 받을 수 있다. 이는 종동요 운동 방정식의 복원력항이 시간에 따라 변하는 Mathieu 형 불안정성을 의미한다(Rho and Choi 2002). 이는 선박의 과도한 횡동요로 인한 비선형 불안정성으로 나타난 바가 있다(나운철 등 1994, Oh and Nayfeh 1997). 또한 스파플랫폼의 상하운동과 종동요의 고유주기의 배수관계는 두 운동모드 사이에 연관으로 인한 강한 비선형성을 야기할 수 있다(Haddow et al. 1984).

본 연구에서는 스파 플랫폼의 Mathieu 형 종동요 불안정성을 다루었다. 이를 위하여 스파 플랫폼의 종동요 운동방정식을 감쇠력이 고려된 Mathieu 방정식으로 유도하고 해의 안정성을 살폈다. 또한 이러한 종동요의 불안정성을 억제하기 위하여 감쇠판을 부착하였을 때 안정성에 어떤 영향이 있는지를 이론적 및 실험적으로 고찰하였다.

2. Mathieu 형 불안정성

스파 플랫폼은 상하운동의 공진주기의 파가 오면 매우 큰 상하운동을 한다. 이 경우 상하운동이 종동요의 복원 모멘트에 영향을 주어 복원 모멘트가 시간에 따라 변화하게 된다. 이렇게 되면 무시할 수 없는 정도로 상하운동과 종동요의 연성이 나타나게 되고, Mathieu 형 불안정성을 고려해 주어야 한다.

파랑하중을 직접 받지 않는 상하운동과 연성된 선형 종동요 방정식은 다음과 같다.

$$(I_{55} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_5\dot{\eta}_5 + \rho g \nabla GM \eta_5 = 0 \quad (1)$$

이 종동요 방정식에서 복원 모멘트는 배수량(∇)과 메타센터 높이(GM)에 비례한다. 배수량에 비해 수선면적의 모멘트가 작아 BM은 매우 작은 값을 갖는다. 때문에 GM에 영향을 주는 지배적 인자는 무게중심과 부심의 수직위차이다. 만약, 상하운동의 크기가 크면 GM과 배수량은 일정하지

않고 상하운동(η_3)에 의해 시간에 따라 변하게 된다. 이 경우 식(2)와 같이 복원력 항이 시간에 따라 변하는 Mathieu 방정식이 된다.

$$\ddot{\eta}_5 + 2\zeta\omega_{n5}\dot{\eta}_5 + \omega_{n5}^2\left(1 - \frac{\eta_3}{2GM_0}\right)\eta_5 = 0 \quad (2)$$

이 식에 $\eta_3 = \eta_3 \cos(\omega_3 t)$, $\tau = \omega_3 t$, $\bar{\omega} = \omega_{n5} / \omega_3$, $\varepsilon = \eta_3 / 2GM_0$, $\mu = \zeta\omega_{n5}$ 을 대입하면, Mathieu 방정식은

$$\ddot{\eta}_5 + 2\mu\dot{\eta}_5 + \bar{\omega}^2(1 - \varepsilon \cos \tau)\eta_5 = 0 \quad (3)$$

과 같이 된다. 물리적으로 ε 은 복원력 항의 변화를, $\bar{\omega}$ 는 종동요 고유운동주기와 상하운동 주기의 비를 나타낸다. 감쇠계수 μ 는 자유감쇠실험을 통하여 구한 값으로 0.08 이다(노준범과 최항순 2003). (3)식은 $(\varepsilon, \bar{\omega})$ 의 값에 따라 해의 안정성이 결정된다 (Nayfeh 1973, Nayfeh and Mook 1979). 그림 Fig. 4의 안정도에서 보듯이, 특정한 주기에서는 ε 이 작은 값이어도 불안정한 해를 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 상하운동의 주기와 종동요의 고유주기가 배수관계에 있게 되면 작은 상하운동에도 불안정한 종동요가 나타날 수 있음을 보여준다.

3. 실험

본 연구에서는 스파 플랫폼의 종동요 불안정성을 실험을 통하여 살펴 보았다. 모델은 가운데 문풀이 있는 실린더 형상이고, 지름이 0.1m, 길이가 0.65m, 흘수는 0.5m 이다. 모델의 상하운동과 종동요의 고유주기는 각각 1.47 초, 2.92 초이다. 실험은 서울대학교 2 차원 수조에서 수행하였다. 실험 구성은 Fig. 1과 같다.

규칙파 중에서 스파 플랫폼의 운동을 측정하였다. 측정에 이용된 센서는 1 축 가속도계, 경사계와 파고계이다. 위의 센서를 통하여 규칙파의 입사파고, 스파 플랫폼의 상하운동과 종동요를 측정하였다. 규칙파 중에서 스파 모델이 조화 운동을 하고, 이때 가속도와 변위는 주파수의 제곱의 관계가 성립하므로 식(4)로 변위를 구하였다.

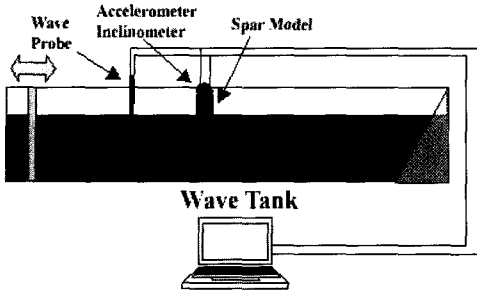


Fig. 1 Experimental setup

$$\eta_3 = -\frac{\ddot{\eta}_3}{\omega^2} \quad (4)$$

본 연구에서 플랫폼의 지름보다 30% 큰 지름을 가진 감쇠판이 종동요의 Mathieu 형 불안정성에 미치는 효과를 알아 보았다. 감쇠판은 상하운동의 공진에서 운동크기를 약 50%의 감소시키지만, 종동요에는 별다른 영향을 주지 못하는 것으로 알려져 있다(노준범 등 2002, Rho and Choi 2002).

먼저 감쇠판이 없는 실린더에 대한 불안정성을 측정하였다. 입사파의 주기가 상하운동의 고유주기와 같고 종동요 고유주기의 1/2 일 때, Mathieu 형 불안정한 종동요가 발생함을 그림 Fig. 2 에서 확인할 수 있다.

Fig. 2 에서 보듯이 입사파에 의해서 상하운동은 계속 증폭되다가 어느 순간부터 종동요에 영향을 미쳐서 진폭 15° 이상의 매우 큰 종동요를 발생시킨다. 이는 상하운동과 종동요사이 에 에너지가 주기적으로 주고받는 에너지 전이현상으로 이해할 수 있다. 즉, 이는 대표적 비선형 현상으로 Mathieu 형 불안정성에 기인한 것이다.

Fig. 2 의 결과와 동일한 조건의 입사파에 대해서 모델에 감쇠판을 부착하였을 경우 이러한 Mathieu 형 불안정성이 일어나는지 실험을 통하여 알아보았다. Fig. 3 에서 보듯이 감쇠판에 의하여 상하운동은 작아지고, Mathieu 형 불안정한 종동요는 발생하지 않았다.

감쇠판을 붙였을 때 종동요의 불안정한 운동이 나타나지 않는 이유는 상하운동의 크기가 감쇠판

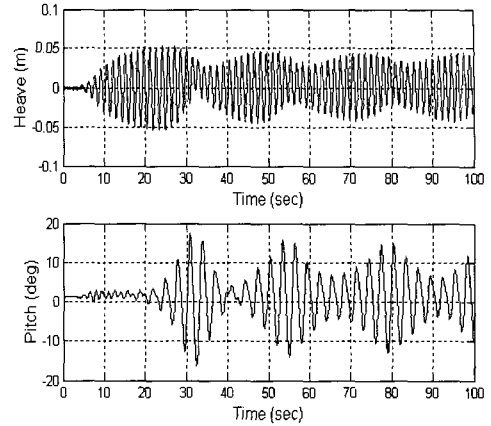


Fig. 2 Time history of unstable pitch motion without damping plate

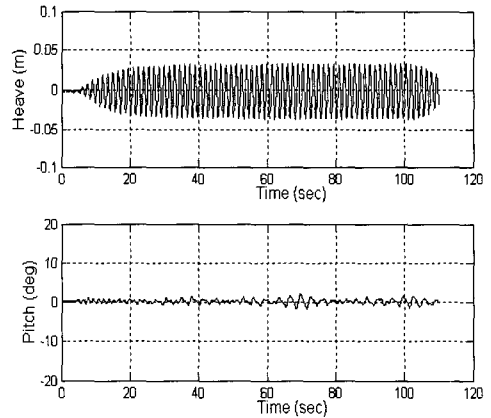


Fig. 3 Time history of stable pitch motion with damping plate

에 의해서 줄어들었기 때문으로 보인다. 감쇠판의 효과를 이론적으로 분석하기 위하여 종동요 Mathieu 방정식의 안정성을 입사파고에 대해서 살펴보았다. 이때, 상하운동은 종동요의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 이를 통해 얻은 종동요 방정식의 안정도는 각각 Fig. 4 및 Fig. 5 와 같다.

Fig. 4 및 Fig. 5 에서 $\bar{\omega}$ 은 상하운동의 주기와 종동요 고유주기의 비를 나타내고, ϵ 은 입사파고와 GM 의 비를 나타낸다. 어렵게 나타낸 영역은

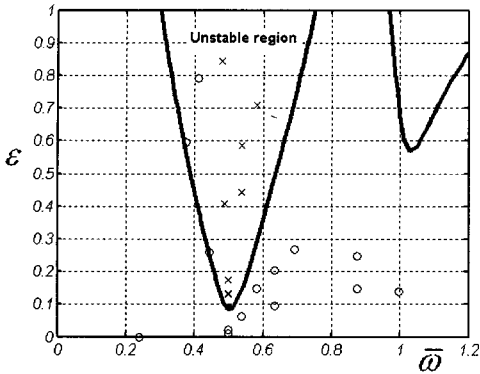


Fig. 4 Stability diagram of Mathieu Equation without damping plate

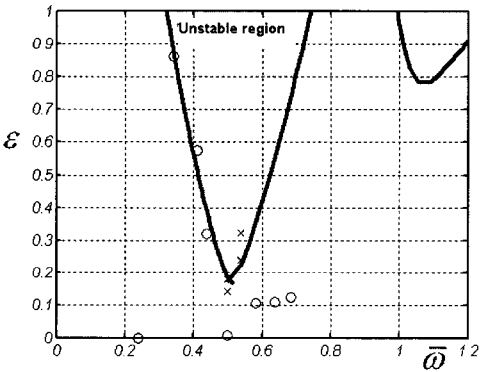


Fig. 5 Stability diagram of Mathieu Equation with damping plate

중동요 방정식이 불안정한 해를 가지는 영역이고, o 표와 x 표는 각각 실험에서 안정한 또는 불안정한 중동요를 보인 결과를 나타낸다.

Fig. 4 는 감쇠판이 없는 경우의 중동요 방정식의 안정성을 나타낸다. 여기서 상하운동과 중동요의 주기비가 0.5 인 경우 매우 작은 파에 대해서도 불안정한 중동요가 나타남을 알 수 있다. 또한 실험에서 얻은 결과와 이론을 통해서 해석한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 감쇠판이 있는 경우의 중동요의 안정성을 나타내는데, Fig. 4 에 비해서 불안정한 영역이 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. 또한 주기비가 0.5 부근에서 불안정한 중동요를 보이는 입사파의 크기도 감쇠판이 없는 경우보다 커진 것을 알

수 있다. 이를 통해서 감쇠판은 스파 플랫폼 중동요의 Mathieu 형 불안정성을 억제함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스파 플랫폼 중동요의 Mathieu 형 불안정성을 이론적 및 실험적으로 살펴 보았다. 상하운동을 줄이기 위한 장치인 감쇠판이 중동요의 불안정성에 어떠한 영향을 미치는지 알아 보았다. 감쇠력이 고려된 Mathieu 방정식의 안정성 분석을 통하여 감쇠판을 부착했을 때 불안정한 영역이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 실험을 통해서 감쇠판이 불안정한 중동요를 억제한다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 나운철, 권순홍, 하동대, 1994, "다중 시간법에 의한 선박 횡동요 응답의 통계적 특성 연구," 대한조선학회 논문집, 제 31 권, 제 1 호, pp. 102-110.
- 노준범, 최항순, 박인규, 신현수, 2002, "Spar 플랫폼의 상하운동 감쇠장치," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 250-253.
- 노준범, 최항순, 2003, "계류된 Spar 플랫폼의 안정성해석," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 214-219.
- Converse, R. and Bridges, R., 1996, "Adapting Gulf of Mexico Spars to West of Shetland," 11th International Conference Floating Production Systems, London.
- Glanville, R.S., Pauling, J.R., Halkyard, J.E. and Lehtinen, T.J., 1991, "Analysis of the Spar Floating Drilling Production and Storage Structure," Offshore Technology Conference paper 91-6701.
- Haddow, A.G., Barr, A.D. and Mook, D.T., 1984, "Theoretical and Experimental Study of Modal Interaction in a Two-degree-of-freedom Structure," Journal of Sound and

Vibration, Vol. 97(3), pp.451-473

- Halkyard, J.E., 1996, " Status of Spar Platforms for Deepwater Production Systems, " Proceedings of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-96, Los Angeles.
- Nayfeh, A.H., 1973, Perturbation Methods, John Wiley & Wiley, New York.
- Nayfeh, A.H and Mook D.T., 1979, Nonlinear Oscillations, John Wiley & Wiley, New York.
- Oh, I.G. and Nayfeh, A.H., 1997, " Nonlinearly Interacting Responses of the Two Rotational Modes of Motion- Roll and Pitch Motions," Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Rho, J.B. and Choi, H.S., 2002, " Heave and Pich Motions of a Spar Platform with Damping Plate," Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-2002, Kyu-shu.



< 노 준 범 >



< 최 항 순 >