

바이지형 FPSO의 횡운동 성능에 대한 연구

최윤락* · 김진하** · 송명재*** · 김용수***

*울산대학교 수송시스템공학부

**한국해양연구원 해양시스템안전연구소

***대우조선해양(주) 선박해양기술연구소

An Analysis of Rolling Performance for a Barge-Type FPSO

YOON-RAK CHOI*, JIN-HA KIM**, MYUNG-JAE SONG*** AND YOUNG-SU KIM***

*School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI, Daejeon, Korea

***Ship & Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Keoje, Korea

KEY WORDS: Free Roll Decay Test 횡운동 자유감쇠시험, Quadratic Damping 2차항 감쇠, Wideband Wave Spectrum 광대역 파랑스펙트럼, Equivalent Linear Damping 등가 선형 감쇠

ABSTRACT: To predict rolling performance for a barge-type FPSO, the evaluation of correct nonlinear roll damping is critical. The square section of FPSO causes a fair amount of viscous damping effect. Free roll decay tests were conducted to estimate nonlinear roll damping for a barge-type FPSO of three different loading conditions. The roll motion RAO was deduced by model tests in the wave condition of wideband spectrum. In numerical calculation, the quadratic damping was considered as equivalent linear damping using the results of free roll decay test. Tested roll performance in JONSWAP wave spectrum was compared with numerical results. These two results show good agreement, in spite of proximity in peak wave period and roll natural period.

1. 서 론

유가의 급상승으로 인해 해양석유자원의 개발이 증가하고 또한 심해역 및 한계유전의 개발도 활발해 지고 있다. 한편 지구 온난화에 따른 각종 규제로 인해 고열량 청정 에너지원인 천연가스의 수요가 급증하고 있다. 이러한 해양자원의 수요 및 경제성의 증가에 따라 다양한 형태의 해양자원개발용 구조물이 활발히 건조, 개발되고 있으며 그 중 부유식구조물인 FPSO가 가장 각광을 받고 있다. 초기의 FPSO는 탱커를 개조하여 사용하였으나 현재는 신조 FPSO가 주종을 이루고 있으며 점차 대형화하는 추세이다. 구조물 형태상으로는 개조 FPSO의 선박형 형상에서 제작이 쉽고 적재 용량상 유리한 직사각형 바이지형태로 전환되고 있다.

FPSO의 파랑중 운동성능을 해석하는 데 있어 6자유도운동 중 횡운동을 제외한 나머지 5개의 운동모우드는 이론적 해석 결과와 모형시험의 결과가 비교적 잘 일치하나 횡운동의 경우 선형이론으로 해석이 어려운 횡운동 감쇠력으로 인해 이론적 해석치의 부정확도가 크다. 특히 FPSO와 같은 사각단면을 가지는 부유체의 경우 비선형 감쇠의 영향이 매우 중요하다.

현재까지 횡운동 감쇠에 대한 많은 실험적 연구가 수행되었는

데, Ikeda et al. (1976, 1977, 1978)은 2차원 단면들에 대한 횡운동감쇠를 측정하여 경험식을 제시한 바 있다. Park et al. (2000)과 Yuck et al. (2003)은 횡운동 중심이 감쇠에 미치는 영향을 연구하였고 Chakrabarti (2001)은 선박과 바이지에 대한 경험식을 제안하였다.

본 연구에서는 바이지형 LNG FPSO의 비선형 2차항 감쇠계수를 자유감쇠시험을 통해 추정하였고 홀수 변화에 따른 영향을 고찰하였다. 이때 시험결과로부터 2차항 감쇠계수를 추정하기 위해 Faltinsen (1990)의 방법을 사용하였다. 횡운동 RAO를 측정하기 위해 광대역 파랑 스펙트럼을 가진 불규칙 해상상태에서의 실험을 수행하였고 JONSWAP 스펙트럼 조건에서의 횡운동 성능도 측정하였다. 자유감쇠시험에서 추정된 2차항 감쇠계수를 이용하여 이론해석을 수행하였으며 이를 모형시험결과와 비교하였다.

2. 횡운동 자유감쇠 모형시험

길이 448미터, 배수량 422,000톤의 바이지형 LNG FPSO에 대해 KRISO 해양공학수조에서 모형시험을 수행하였다. 모형의 축척비는 1/80이며 3개의 홀수상태(발라스트, 설계, 예인 조건)를 모두 고려하였다. 감쇠에 민감한 횡운동을 측정하는데 있어 점측식 계측장비는 부가적인 감쇠력을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 영향을 제거하기 위해 비점측식 계측장비의 일종인

제1저자 최윤락 연락처: 울산광역시 남구 무거2동

052-259-2158 yrchoi@ulsan.ac.kr

광학측정시스템을 사용하였다. FPSO의 주요 요목은 Table 1과 같고 Fig. 1에 모형선의 사진을 게재하였다.

Table 1 Main Particulars of LNG FPSO

Item	unit	Loading Condition		
		Design	Ballast	Towing
Length, Lpp	m	448.23	448.23	448.23
Breadth, B	m	70.0	70.0	70.0
Draft(FP)	m	14.25	14.88	8.58
Draft(Mid)	m	14.25	14.88	8.94
Draft(ΔP)	m	14.25	14.88	9.31
Displacement	m ³	411,871	430,800	253,534
LCCG	m	+8.35	+8.11	+7.83
G'M	m	9.69	16.94	28.05
KG	m	22.44	17.79	22.24
Kyy=Kzz	m	0.25Lpp	0.25Lpp	0.25Lpp
Kxx	m	0.37B	0.37B	0.36B

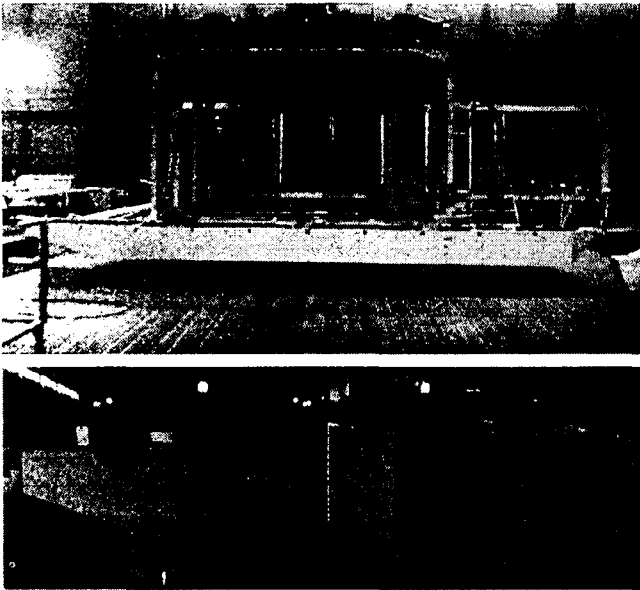


Fig. 1 Photos of Tested Model

2차항 감쇠를 고려한 비연성 횡운동 자유감쇠 운동방정식은 다음과 같다.

$$(I_{11} + a_{44})\ddot{\theta} + b_{44L}\dot{\theta} + b_{44Q}|\dot{\theta}| + c_{44}\theta = 0 \quad (1)$$

자유감쇠시험 결과로부터 2차항 감쇠계수(b_{44Q})를 추출하기 위해 Faltinsen (1990)의 방법을 사용하였다. 기본적으로 이 방법은 한 주기당 에너지 소산량을 동일하게 하는 등가선형감쇠력 개념이며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{2}{T_n} \log\left(\frac{\theta_k}{\theta_{k+1}}\right) = \frac{b_{44L}}{I_{44} + a_{44}} + \frac{16}{3} \frac{b_{44Q}\theta_m}{(I_{44} + a_{44})T_n} \quad (2)$$

여기서, θ_m 은 한 주기 동안의 횡운동 평균진폭이고 T_n 은 횡운동 고유주기이다.

Fig. 2에 감쇠곡선의 한 예를 나타내었는데, 넓은 사각단면 형상으로 인해 횡운동의 감쇠가 매우 급격하여 점성 감쇠력이 지배적임을 알 수 있다. 식 (2)를 도식화한 결과는 Fig. 3에 나와 있다. 이 그래프에서 이산화된 데이터에 대한 적합직선(fitted line)의 기울기가 2차항 감쇠계수($b_{44Q}/(I_{44} + a_{44})$)이며 y절편이 선형감쇠계수($b_{44L}/(I_{44} + a_{44})$)이다. 그림에서 보면 선형감쇠계수가 음의 값을 보이는데, 이는 데이터의 이산 및 점성감쇠의 지배적 영향에 기인한 부정확성 때문이다. 본 연구에서는 자유감쇠시험으로부터 2차항 감쇠계수만을 추출하여 사용하였고 선형감쇠계수는 포텐셜이론에 기반한 수치해를 사용하였다.

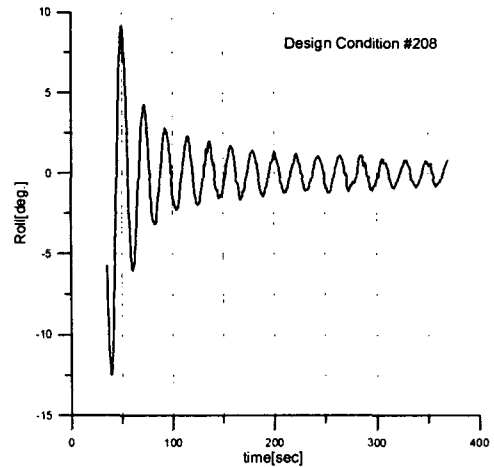


Fig. 2 Roll Decay Curve for Design Condition

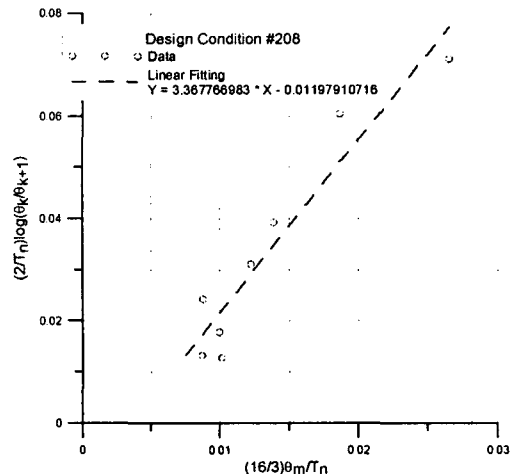


Fig. 3 Diagram for determination of Damping Value in Connection with Eq. (2)

하나의 흘수조건에 대해 2회의 감쇠시험을 수행한 결과, 2차항 감쇠계수의 추정치는 Table 2와 같다. 여기서 부가전량을 포함한 회전관성질량 모우먼트는 고유주기 측정치와 메터센터 높

이와의 관계로부터 산출되었다.

Table 2 Quadratic Damping Value

Loading Condition	Roll Natural Period [sec]	$I_{44} + a_{44}$ [ton·m ⁴]	b_{44Q} [ton·m ⁴]
Ballast	14.9	4.14E+08	1.02E+09
Design	21.4	4.64E+08	1.63E+09
Towing	13.7	3.39E+08	9.80E+08

3. 횡운동 수치해석

파랑중 횡운동의 수치해석은 고차경계요소법에 기반을 둔 전산프로그램 MLINHYDH를 사용하여 수행되었다(Choi, et al., 2001 & 2002). 운동방정식의 감쇠력부분은 선형 파랑감쇠력항과 2차항 감쇠력항으로 구성되었으며 2차항 감쇠력은 Table 2의 측정치를 사용하였다. 진동수영역 해석을 위해 2차항 감쇠력을 다음 식과 같이 등가선형감쇠력으로 치환하여 반복계산시 사용하였다.

$$b_{44Q} |\dot{\theta}| \dot{\theta} = -i\omega^2 \frac{8}{3\pi} b_{44Q} |\theta| \theta e^{-i\omega t} \quad (3)$$

계산을 위해 FPSO 집수면을 요소형상으로 표현한 그림을 Fig. 4에 도시하였다. 사용된 요소는 9점 2차 사각형 요소와 6점 2차 삼각형 요소이다.



Fig. 4 Facet Representation of FPSO (Design Condition)

4. 횡운동 RAO

RAO를 얻기 위한 모형시험 방법은 몇 가지가 있는데 그 중 규칙파 중 모형시험을 통해 RAO를 측정하는 방법이 통상적이다. 그러나 규칙파 중 시험법은 넓은 범위의 많은 진동수 값에 대한 RAO값을 구하기는 위해서는 상당량의 모형시험이 수행되어야 한다. 한편 불규칙파 중 모형시험법은 1회의 모형시험으로 많은 진동수에서의 RAO값을 추정할 수 있어 규칙파 중 시험법보다 유리한 면이 있다.

본 연구에서는 넓은 범위 진동수영역에서의 RAO를 구하기 위해 실제 해양파와 성격이 다른 광대역 스펙트럼을 가진 불규

칙 해상상태에서 모형시험을 수행하였다. 사용된 스펙트럼의 인레를 Fig. 5에 도시하였는데 파 에너지 밀도가 비교적 일정한 백색잡음의 형태를 가진다. 조파를 위한 스펙트럼의 목표치는 실선기준으로 0.25-1.4rad/sec의 진동수 범위를 가지며 스펙트럼 광역변수(spectral broadness parameter) ϵ 의 값은 0.575이다. $\epsilon=0$ 인 협대역 스펙트럼(narrow-band spectrum)에서는 잘 알려진 바와 같이 rms값과 유의파고의 비가 4이나 $\epsilon=0.575$ 에서는 약 3.8로 감소된다 (Korvin-Kroukovsky, 1961). 본 연구에서는 유의파고가 3m(WN0.5), 6m(WN1.0)인 2개의 스펙트럼을 사용하여 실험하였다. 이때 WN0.5 해상상태는 WN1.0 해상상태를 구현하기 위한 조파기 스트로우크를 절반 값으로 주어 생성하였다. 그림에서 보이는 높은 진동수 영역에서의 파 에너지 감소는 조파기의 응답 한계에 기인한다. 모형시험 시 모형의 표류를 억제하기 위해 약한 스프링으로 계류하여 시험을 수행하였고 RAO를 구하기 위한 파랑스펙트럼은 계측치를 사용하였다.

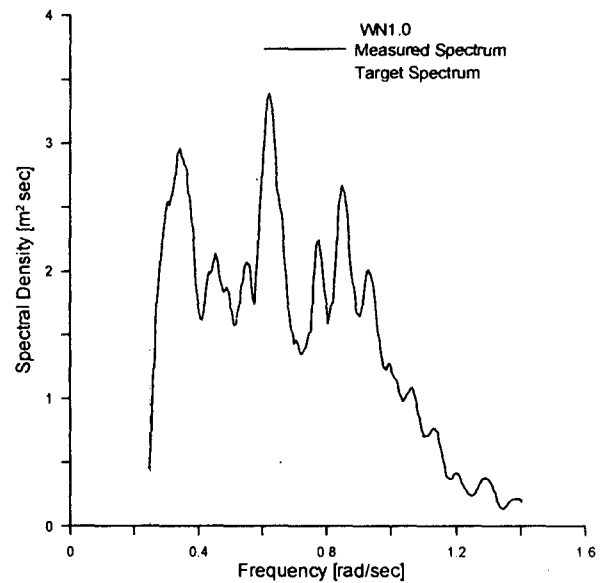


Fig. 5 Wideband Wave Spectrum WN1.0

Fig. 6에서 Fig. 8에 발라스트, 설계, 예인 홀수조건에 대한 횡파중 RAO 시험결과를 각각 도시하였고 이론계산 결과도 함께 보였다. 공진점 부근에서 WN1.0에서의 결과치가 WN0.5의 값보다 훨씬 적은 값을 주는데 이는 비선형 횡운동 감쇠력 때문이다. 공진점에서 WN1.0(Hs=6m) 결과와 WN0.5(Hs=3m) 결과의 비는 발라스트, 설계, 예인조건에서 각각 0.73, 0.63, 0.68이다. Table 1에서 보듯이 설계조건과 발라스트조건에 배수량 및 홀수가 거의 동일하나 메터센터 높이가 각각 9.69, 16.94m인 점을 고려하면 긴 고유주기(작은 메터센터 높이)가 더 큰 점성감쇠를 야기함을 알 수 있다.

시험치와 2차항 감쇠를 고려한 이론 계산치를 비교해 보면 자유감쇠시험으로부터 추정된 2차항 감쇠계수가 적절함을 알 수 있다. 설계조건에서 시험치와 이론 계산치의 고유진동수가 약간 불일치하는 이유는 모형시험에서 목표 관성반경을 정확하게 구현하지 못하였기 때문이다.

5. 불규칙파 중 횡운동 성능 추정

대상 FPSO의 운동성능 및 안전성을 검토하기 위해 작업해역 및 예인 중 설계파랑조건에 대해 모형시험과 이론해석을 수행하였다. 자세한 파랑조건은 Table 3에 나와 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 발라스트 홀수조건과 예인 홀수조건에서의 고유주기가 스펙트럼 피크주기와 매우 근접하고 있다. 따라서 이 경우 점성감쇠력에 의해 횡운동 성능이 결정됨을 알 수 있다.

Table 3 Irregular Wave Conditions

Environ. Condition	Loading Condition	Type of Wave Spectrum	Sig. Wave Height	Peak Period	Remark
On-Site	Ballast Design	JONSWAP ($\gamma=2.0$)	4.5m	15.0 s	100-yr return period
Towing	Towing	JONSWAP ($\gamma=3.3$)	10.6m	14.7 s	10-yr return period

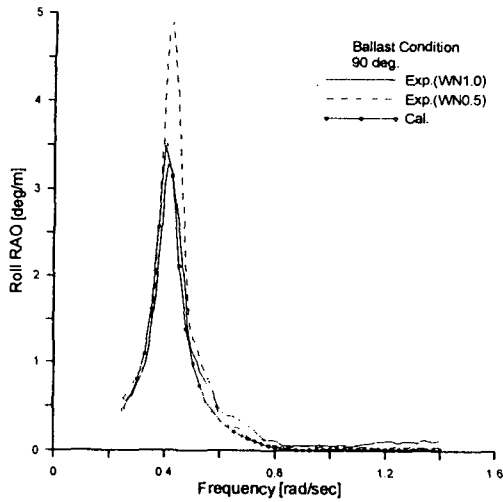


Fig. 6 Roll RAO for Ballast Condition in Beam Sea

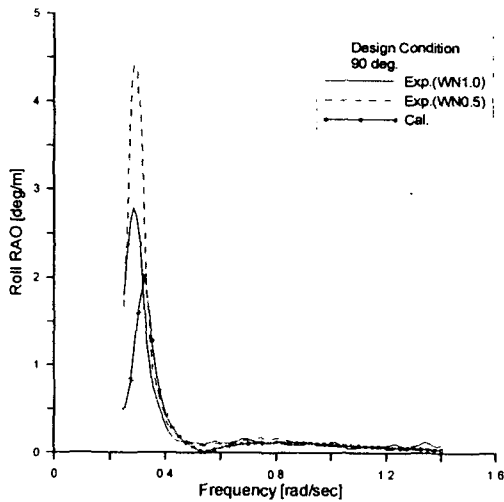


Fig. 7 Roll RAO for Design Condition in Beam Sea

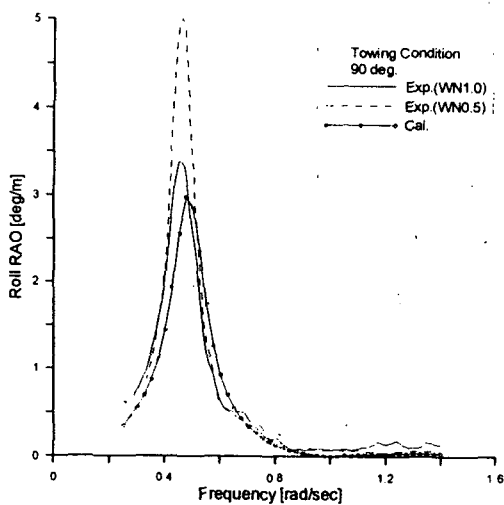


Fig. 8 Roll RAO for Towing Condition in Beam Sea

Fig. 9에서 Fig. 11에 횡파 중 횡운동 rms값을 도시하였고 Table 4에 표로 정리하였으며 헬기 갑판에서의 횡가속도도 함께 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 횡운동이 점성감쇠력에 민감함에도 불구하고 모형 시험치와 이론 계산치 간의 일치도가 매우 좋다. 이로부터 Table 2에 정리된 2차항 감쇠계수 측정치가 정확하며 실제적 효용가치가 높음을 알 수 있다. 설계조건에서의 낮은 횡운동 수준은 고유주기와 파랑주기의 현격한 차이 때문이다.

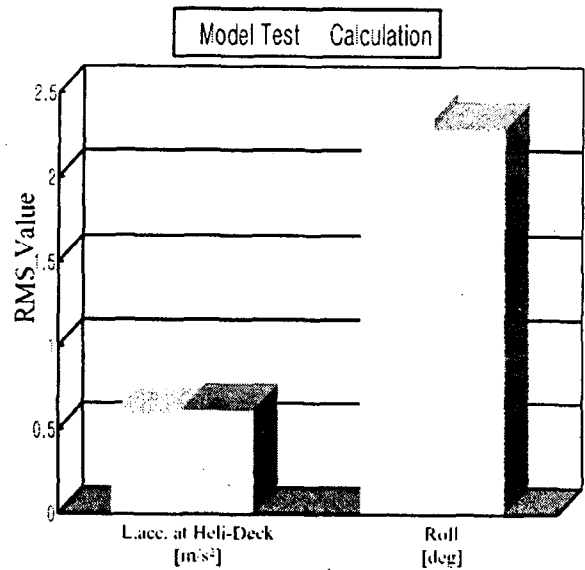


Fig. 9 RMS Values of Roll and Lateral Acceleration at Heli-Deck for Ballast Condition ($H_s=4.5m$, $T_p=15sec$, Beam Sea)

6. 결론

본 연구에서는 바이지형 LNG FPSO에 대하여 횡운동 자유감쇠 모형시험을 수행하여 2차항 감쇠계수를 추정하였다. 그리고 광대역 파랑 스펙트럼을 사용하여 횡운동 RAO를 구하였다. 또한 작업해역 및 예인 중 설계파랑조건에 대해 횡운동 성능을 모형시험 및 이론계산을 통하여 추정하였다.

연구수행 결과는 다음과 같다.

- 넓은 사각단면을 가진 바이지형 FPSO는 점성감쇠력이 크게 발생시킨다.
- 자유감쇠시험을 통하여 비교적 정확한 2차항 감쇠계수를 추정할 수 있다.
- 횡운동 고유주기가 길수록 점성감쇠력의 크기는 증가한다.
- 자유감쇠시험으로부터 추정된 2차항 감쇠계수를 이용하여 이론계산을 수행한 결과, 불규칙 파랑의 피크주기가 고유주기와 근접함에도 불구하고 매우 정확한 횡운동 성능을 추정할 수 있다.

참고 문헌

- Chakrabarti, S. (2001). "Empirical Calculation of Roll Damping for Ships and Barges", *Ocean Eng.*, Vol 28, No 4.
- Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S. (2001). "An Analysis of Second-order Wave Forces on Floating Bodies by Using Higher-order Boundary Element Method", *Ocean Eng.*, Vol 28, No 1.
- Choi, Y.R. and Hong, S.Y. (2002). "An Analysis of Hydrodynamic Interaction of Floating Multi-body using Higher-order Boundary Element Method", *Proc. 12th ISOPE*, Vol 3.
- Faltinsen, O.M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge Univ. Press.
- Ikeda, Y., Himeno, T., and Tanaka, N. (1976). "On Roll Damping Force of Ship-Effect of Friction of Hull and Normal Force of Bilge Keels", *J. Kansai Soc. N.A.*, No 161.
- Ikeda, Y., Himeno, T., and Tanaka, N. (1977). "On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull", *J. SNAJ*, Vol 142.
- Ikeda, Y., Himeno, T., and Tanaka, N. (1978). "Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed", *J. SNAJ*, Vol 143.
- Korvin-Kroukovsky, B.V. (1961). *Theory of Seakeeping*, SNAME.
- Park, I.K., Shin, H.S., Kim, J.W. and Cho, J.W. (2000). "Effect of Roll Center Position on the Roll Damping of FPSO", *Proc. 10th ISOPE*, Vol 1.
- Yuck, R.H., Lee, D.H. and Choi, H.S. (2003). "Estimation of Roll Damping Coefficients for Non-conventional Mid-ship Sections", *Proc. 13th ISOPE*, Vol 3.

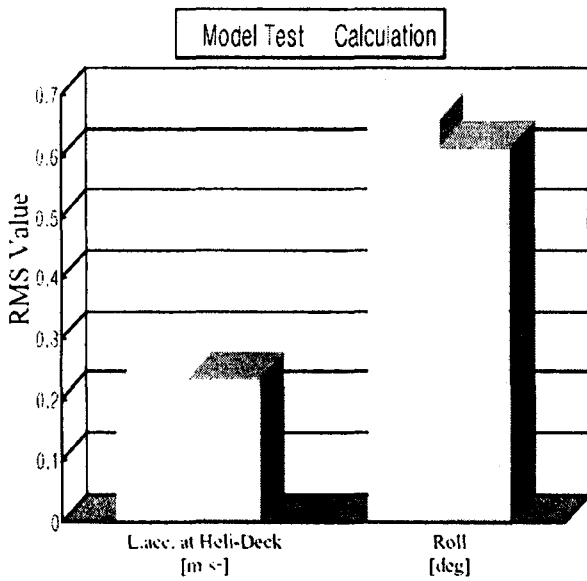


Fig. 10 RMS Values of Roll and Lateral Acceleration at Heli-Deck for Design Condition ($H_s=4.5m$, $T_p=15sec$, Beam Sea)

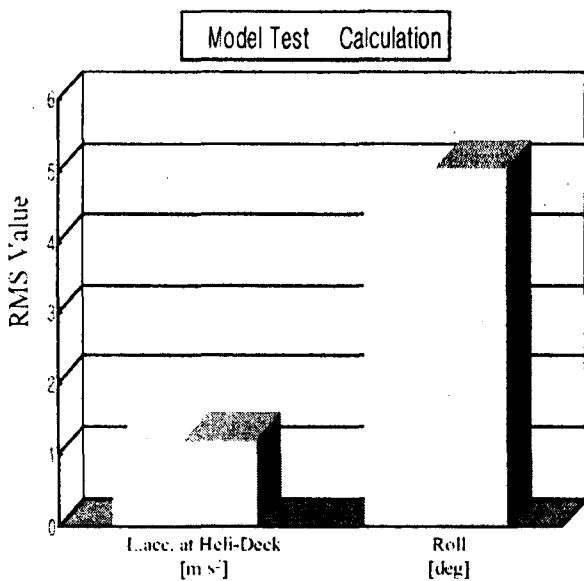


Fig. 11 RMS Values of Roll and Lateral Acceleration at Heli-Deck for Towing Condition ($H_s=10.6m$, $T_p=14.7sec$, Beam Sea)

Table 4 RMS Values of Roll and Lateral Acceleration in Irregular Beam Seas Listed in Table 3

Loading Condition	Lateral Acceleration at Heli-Deck [m/s^2]		Roll [deg.]	
	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
Ballast	0.59	0.62	2.35	2.29
Design	0.23	0.23	0.66	0.61
Towing	1.16	1.21	4.92	5.04