

병렬계류된 선박의 감쇠력에 관한 실험연구

김진하* · 홍사영* · 김영식* · 김덕수** · 김용수**

* 한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

** 대우조선해양(주)

Experimental Study on Damping of Side-by-Side Moored Vessels

JIN-HA KIM*, SA-YOUNG HONG*, YOUNG-SIK KIM*, AND DEOK-SU KIM**, Young-SU KIM**

*Ocean Development System Department, KRISO/KORDI, Daejeon, Korea

** Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., LTD, Koje, Korea

KEY WORDS: side-by-side mooring 병렬계류, hydrodynamic interaction 동유체력 상호간섭, free decay test 자유감쇠시험, linear viscous damping 선형점성감쇠, time-domain simulation 시간영역 시뮬레이션

ABSTRACT: Low-frequency damping characteristics of side-by-side moored LNG-FPSO and LNGC are investigated through a series of free decay model tests in calm water and under wind load condition. It is shown that low frequency damping of LNGC changes dramatically, sway damping increases more than six times for 4m distance condition while it decreases by 30% for 20m distance compared with a single LNGC case. Simulation using the experimental data enhances the results, which demonstrates the necessity of experimental low-frequency damping coefficients for simulation of side-by-side vessels motion behavior.

1. 서 론

최근 에너지 수요가 석유에서 보다 환경친화적인 LNG로 바뀌에 따라 그 수요가 증가하고 있는 LNG FPSO는 지금까지의 부유식 석유 생산시스템인 FPSO-shuttle 시스템의 하역(Off-loading)작업이 주로 탄탱 방식의 계류배치 상태에서 이루어진 것과는 달리 하역 장비의 운용관점에서 셔틀탱커가 FPSO의 측면에 근접하여 계류되는 소위 병렬계류(side-by-side mooring)배치를 하게 됨으로 FPSO와 셔틀탱커 등의 다수 부체간의 유체역학적 상호간섭 해석이 설계 및 운용 관점에서 중요하게 되었다.

따라서 이에 대한 이론해석 및 실험적 연구의 필요성이 높아지게 되었으며, 최근 근접한 부체의 상호작용 해석에 대한 연구로는 Inoue and Islam(2001)의 수치해석 및 모형시험을 통한 횡동요의 영향 고찰, Huijsmans, Pinkster and Wilde(2001)의 근접한 부체 사이의 수치해석상의 문제를 검토한 바 있으며, Buchner, Dijk and Wilde(2001)의 시뮬레이션을 통한 부체간 연성효과에 기인한 동유체력의 영향에 대한 연구등을 들 수 있다. 최윤락 등(2001)은 고차경계요소법을 사용하여 다수부체의 상호간섭을 해석하였으며, 김진하 등(2001), 홍사영 등(2002), 최용호 등(2002)과 Hong et al.(2003)은 다수부체의 운동모형시험 연구를 수행하였고, 김현조 등(2002)은 계류된 선박의 장주기 표운동의 감쇠력에 관한 모형시험연구를 수행하였다. Buchner et al.(2001)와 Hong et

al.(2003)에서 밝힌 바와 같이 병렬계류된 근접 선박의 수직면 상 운동은 포텐셜이론에 의한 연성 동유체력을 고려하면 상당히 정확히 예측이 가능하지만, 수평면상의 장주기 표류운동 해석의 정도를 높이기 위해서는 모형시험에 의한 두 선박간의 상대적인 감쇠력이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 병렬 계류된 LNG-FPSO와 LNGC(LNG Carrier)에 대해 정수 및 풍하중에 따른 수평방향의 자유감쇠 시험을 통해 두 선박상호간의 상대적인 감쇠효과를 살펴보았다. 실험 계측 결과를 통해 얻어진 감쇠계수를 시뮬레이션에 적용하여 과도한 수평면 운동이 현실적으로 예측되는 결과를 얻었다.

2. 모형시험

2.1 모형선

모형선은 대우조선에서 설계한 LNG FPSO 와 LNGC 2척을 모형시험의 대상선박으로 선정하였다. 모형선의 축척비는 파랑조건 재현에 대한 조파장치의 가용량을 고려하여 1/80로 선정하였으며, 하역작업상황을 고려하여 LNG FPSO는 만재홀수, LNGC는 발라스트 홀수로 하였다.

대상선의 주요제원은 Table 1에 나타내었다.

모형선의 동역학적 불성치는 경사시험과 관성시험을 통한 GM과 관성반경시험을 통해 대상선과 3% 이내로 상사하였다.

Table 1 Main dimensions of LNG FPSO, LNGC

Item	unit	LNG FPSO (Full)	LNG Carrier (Ballast)
Length, Lpp	m	448.23	266.0
Breadth, B	m	70.0	43.4
draft(FP)	m	14.255	9.4
draft(Mid)	m	14.255	9.4
draft(AP)	m	14.255	9.4
displacement	m ³	411,861	78,591
LCCG	m	+8.345	+2.633
GM	m	9.685	8.35
KG	m	22.436	12.084
Kyy=Kzz	m	0.25Lpp	0.25Lpp
Kxx	m	0.37B	0.35B

2.2 모형선 계류배치

모형선의 병렬계류시스템은 선박간의 계류형태를 자유(free condition)조건 및 구속조건(fixed condition)으로 나누어 구성하였다.

자유조건(free condition)은 계류선박간의 동유체역학 및 기구적인 상호간섭을 고려한 계류형태인 반면 구속조건(fixed condition)은 하나의 선박을 고정된 벽면조건으로 고려한 계류형태이다. Fig.1 은 병렬계류시스템의 감쇠력 계측을 위한 계류조건에 대한 개략도를 보여주고 있다.

모형선의 계류시스템은 대상선의 계류강성을 상사한 선형 스프링과 와이어를 이용하여 구성하였다. LNG FPSO의 전후방향 고유주기를 약 80초로 가정하여 전후방향 스프링 강성은 2588kN/m, 초기장력은 10,055kN 로 산정하였다. 또한, 4점 및 2점 계류선 배치에 대해 등가의 스프링 강성을 가지도록 하기 위해 4점 계류선인 경우에 배치각도를 45도로 하였다.

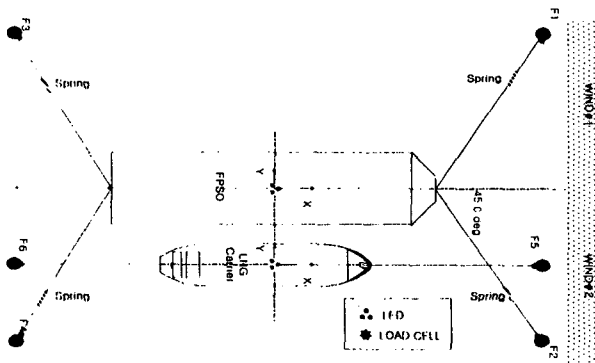


Fig. 1 The layout of the side-by-side mooring system

2.3 계측조건 및 항목

다물체 감쇠력 추정을 위한 모형선의 자유감쇠(Free decay)는 정수(still water) 및 풍하중(wind force)이 작용하는 경우에 대해 수행하였다.

자유감쇠시험은 각각 단독인 경우(1Body)와 두 선박인 경우(2Body)에 선박간의 거리를 실선기준으로 4m, 10m, 20m에 대해 정수중 및 풍하중 작용시 전후운동(surge), 좌우운동(sway), 횡동요(roll), 선수동요(yaw)등을 계측하였다.

각 선박에 작용하는 풍하중은 Tanker 선의 경우 종방향 풍하중 계수를 OCIMF 자료를 참고하여 식(1)로 산정하였다.

$$F_r = C_{rw} \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 A_T \tag{1}$$

여기서, C_{rw} 는 종방향 풍하중 계수로서 0.6이며, ρ_w 는 공기밀도, V_w 는 풍속이며, A_T 는 종방향 투영면적이다.

본 연구에서는 풍속을 40kts 로 한 경우 FPSO 및 LNGC에 작용하는 풍하중은 각각 700톤, 240톤에 해당된다. Fig. 2 는 해양공학수조 바람발생장치의 rpm에 대한 풍하중의 계측 결과이다. rpm 에 대한 풍하중이 2차곡선으로 fitting 한 경우에 잘 일치하고 있다.

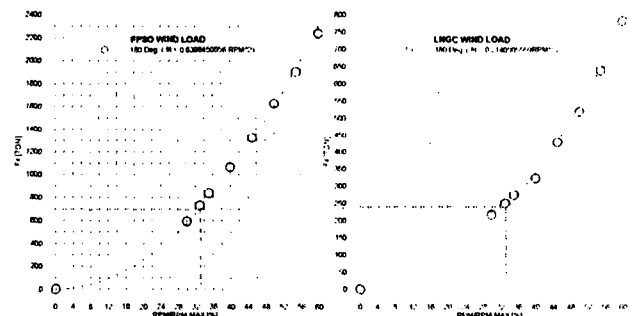


Fig. 2 The Results of wind force vs rpm

자유감쇠시험에서 작용하는 힘은 각 모형선용 와이어와 선형스프링으로 지지대 기둥에 연결하여 지지대에 고정된 장력계를 통해 계측하였으며, 두 선박의 6자유도 운동은 각 선박에 LED를 부착하고, 3대의 CCD 카메라를 이용하여 변위를 계측하는 고정도 비접촉 운동계측장치(RODYM6)를 사용하여 계측하였다(Fig. 3).

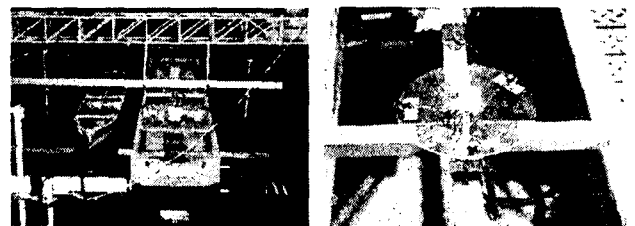


Fig. 3 Test set-up and motion sensor

3. 모형시험 결과 및 고찰

두 선박간의 유체역학적 상호간섭영향을 고려하기 위한 자유감쇠모형시험은 한국해양연구원 해양공학수조(길이56m, 폭30m, 수심3.4m)에서 수행하였다.

선형점성계수(B_{ij})는 시스템이 작은 감쇠력을 가진다는 가정 하에 식(2)로 표현될 수 있다(Hooft, 1982).

$$B_{ij} = \frac{\delta \sqrt{C_{ij}(M+a_{ij})}}{\pi} \quad (2)$$

여기서, C_{ij} 는 복원력계수, M은 선박의 질량, a_{ij} 는 부가 질량, δ 는 logarithmic decrement 로서, 일정한 값을 가지며 식(3)과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{\ln x_t - \ln x_{t+1}}{N} \quad (3)$$

여기서, N 은 동요된 개수를 나타낸다.

본 연구에서는 자유감쇠 실험을 정수 및 풍하중상태에서 20Hz의 취득주파수(sampling frequency)로 실선시간 기준 약 900초 동안 계속하였다. 얻어진 계측신호의 시계열 자료는 zero-upcrossing 법의 통계 처리방법에 의해 ±진폭의 최대치를 구해 logarithmic decrement를 산정하였다.

Fig. 4에는 LNGC의 좌우운동 자유감쇠운동결과를 시계열로 비교하였다. 맨 위의 그림이 단독상태이며 차례로 거리가 4m, 10m, 20m인 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 제일 근접한 4m의 경우 좌우동요 감쇠력이 급격히 증가하여 거의 임계치에 다다른 것을 볼 수 있다. 하지만 거리가 10m에서는 증가폭이 크게 줄다가 거리가 20m에 이르면 오히려 단독 상태보다 감쇠력이 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 병렬계류된 선박의 경우 두 선박 간에 거리에 따라 좌우동요 감쇠력의 변화가 매우 심하게 나타나며 이러한 영향이 시뮬레이션에서 고려되어야 장주기 표류운동을 신빙성 있게 예측할 수 있음을 의미하는 것으로 실험을 통한 장주기 운동감쇠력의 계측이 매우 중요함을 나타낸다.

Fig. 5에는 LNGC의 자유감쇠운동결과를 logarithmic decrement로 나타내었다. 좌우운동의 경우 시계열 데이터의 특성을 그대로 반영하고 있음을 알 수 있다. 4m의 경우 단독 상태에 비해 약 6배로 증가한 것을 볼 수 있다. 전후운동의 경우에는 거리 4-10m인 때 약 2배로 증가하다가 거리가 20m 정도 되면 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 횡동요의 경우에는 4m에서는 약간 증가하지만 10-20m에서는 감쇠력의 증가보다는 오히려 감쇠력이 줄어드는 경향을 보이고 있으며 선수동요의 경우에는 거리에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 FPSO가 고정된 경우에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 5의 경우와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 나타난 것은 FPSO가 LNGC에 비하여 크고 FPSO의 계류강성이 강하여 LNGC의 운동에 의한 영향을 크게 받지 않은 결과로 해석될 수 있다.

Fig. 7에는 선수방향에서 바람이 있는 경우 LNGC의 자유감쇠운동 결과를 나타내었다. 전후운동의 경우 바람에 의해 미미하나마 약간 증가하는 경향을 보이며 나머지 운동의 경우에도 큰 차이를 보이지는 않으나 좌우운동의 감쇠력은 4m 거리에서는 바람에 의해 감쇠력이 50%로 줄어든 반면 10m 거리에서는 약 40% 증가하는 결과를 나타내어 거리에 따른 바람의 효과가 크게 변함을 보여주고 있다.

Fig. 8에는 Hong et al.(2003)의 방법에 따른 불규칙파종의 시간영역 시뮬레이션 결과를 spectrum으로 표시하여 나타내었다. 실험치로부터 구한 감쇠계수를 사용한 경우 그렇지 않은 경우에 비해 장주기 운동의 일치도가 매우 개선되는 것을 알 수 있으며 이러한 결과는 병렬계류된 선박의 장주기 거동 시뮬레이션에서 자유감쇠실험을 통한 장주기 감쇠계수 사용이 필수적임을 뒷받침한다.

4. 결 론

병렬계류된 두 선박에 대한 정수중 및 풍하중시의 수평방향의 자유감쇠시험을 수행하고 시간영역에서의 거동시뮬레이션과 비교 검토한 결과에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 병렬계류된 LNGC의 장주기 운동감쇠력이 정수 중 및 바람하중 하에서 LNG-FPSO와의 거리에 따라 복잡하게 변화하며 운동 모드에 따라 그 경향이 다르게 나타났다.
2. 병렬계류된 LNG-FPSO와 LNGC에 대한 자유감쇠운동 시험결과, LNGC의 감쇠력이 좌우동요의 경우 거리변화에 따라 가장 큰 차이를 나타내었으며 4m 거리에서 단독상태에 비해 약 6배의 증가효과를 나타내었다.
3. 거리변화에 따른 감쇠력이 감소하는 효과도 관찰되었으며 거리 20m에서 LNGC의 좌우동요 감쇠력이 약 30% 감소하였으며 횡동요의 경우 거리 10-20m에서 35-40% 감소하였다.
4. 바람에 의한 장주기 감쇠력의 변화는 그리 크지 않으나 좌우동요 감쇠력의 경우 거리 4m, 10m 두 조건에서 정수 중에 비해 각각 50% 감소와 50% 증가라는 상반된 결과를 나타내었다.
5. 실험에서 계측된 감쇠력 계수를 시뮬레이션에 적용한 결과 그 정도가 크게 향상되어 병렬계류된 선박의 장주기 운

동 감쇠력은 실험을 통한 데이터가 반드시 필요함을 보였다.

후 기

본 연구는 공공기술이사회가 지원한 “해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술 고도화 연구”와 대우조선해양(주)가 지원한 “다물체 계류시스템 동적 거동해석연구” 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- 김진하, 김현조, 최윤락, 홍사영(2001), “계류방식에 따른 FPSO-셔틀탱커의 동유체력 간섭에 대한 실험연구”, 해양공학연구회 제 46차 Workshop 논문집, pp53-64
- 김현조, 홍사영, 김진하(2002), “장주기 표류운동의 감쇠력에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제39권 4호
- 최용호, 홍삼권, 김문성(2002) “LNG-FPSO와 계류된 LNG 운반선의 Two-Body 운동에 관한 실험적 연구”, 해양공학연구회 제 47차 Workshop, pp19-26.
- 최윤락, 홍사영,(2001) “고차경계요소법을 이용한 다수 부체 동유체력 해석”, 대한조선학회 2001년도 추계 학술대회 논문집, pp198-203.
- Buchner, B., Dijk, A. and Wilde, J., (2001) "Numerical Multiple-Body Simulation of Side-by-Side Mooring to an FPSO", Proc. 11th ISOPE, Vol. 1, pp343-353.
- Hooft, J.P.,1982, Advanced dynamics of marine structure, Willey-Interscience Inc., New York.
- Huijsmans, R.H.M., Pinkster, J.A., de Wilde, J.J.,(2001).“ Diffraction and radiation of waves around side-by-side moored vessels”, Proc. 11th ISOPE, Vol.1, pp406-412.
- Inoue, Y. and Islam, R., (2001) "Effect of Viscous Roll Damping on Drift Forces of Multi-body Floating System in Waves", Proc. 11th ISOPE, Vol. 1, pp279-285.
- S.Y.Hong, J.H.Kim, H.J.Kim and Y.R.Choi(2002), " Experimental study on behavior of tandem and side-by-side moored vessels", Proc. 12th ISOPE, Vol. 3, pp841-847.
- S.Y. Hong, J.H.Kim, S.K. Cho, Y.R. Choi and Y.S. Kim(2003), "Numerical and Experimental Study on Hydrodynamic Interaction of side-by-side Moored Multiple Vessels", Proc. 2003 International Symposium, Deepwater Mooring System, October 2-3, Houston, pp198-215

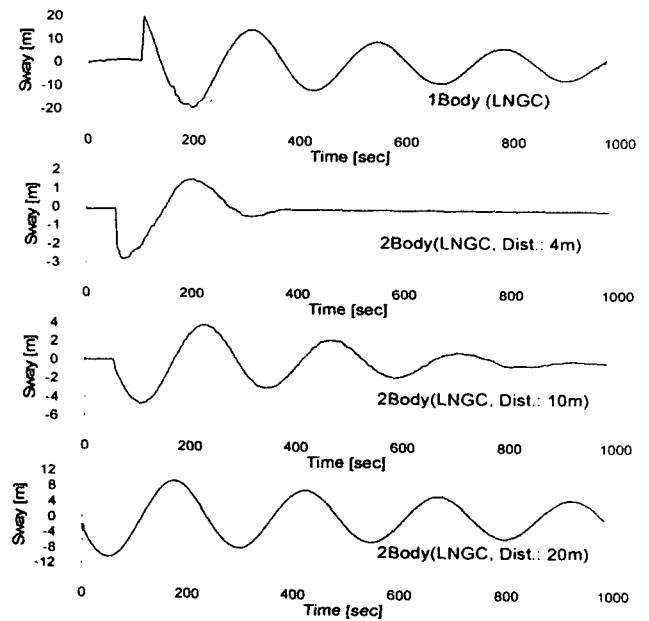
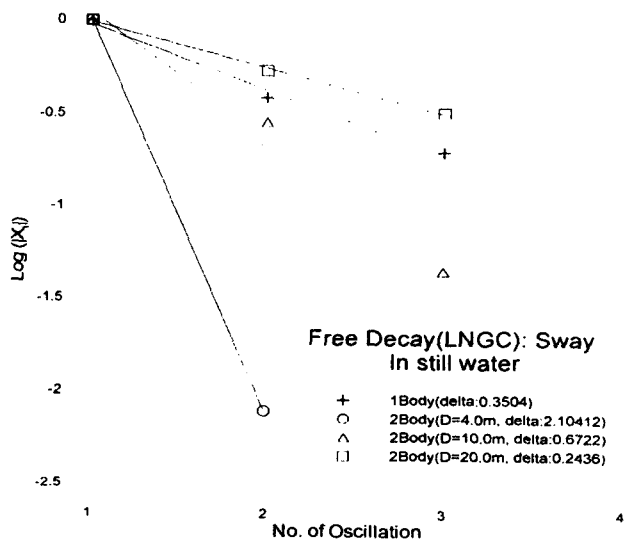
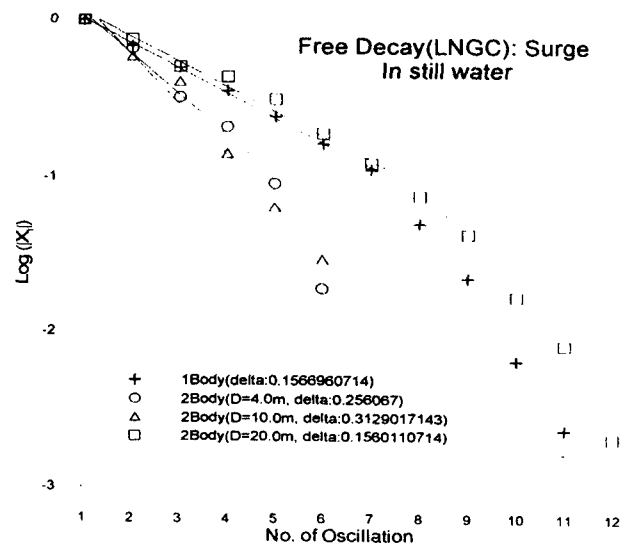


Fig. 4 Time series of sway on LNGC



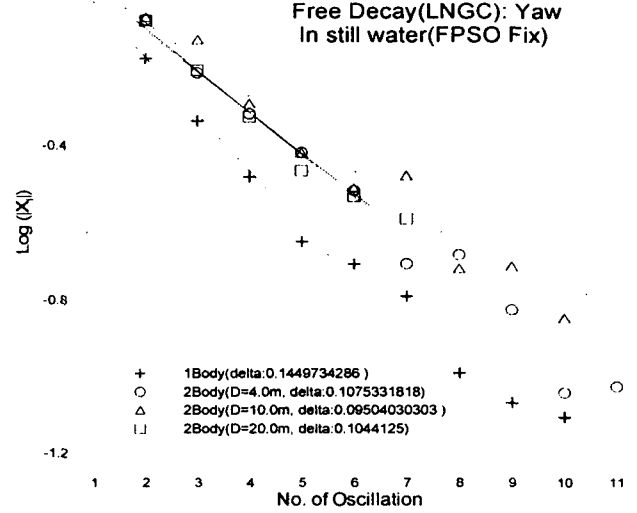
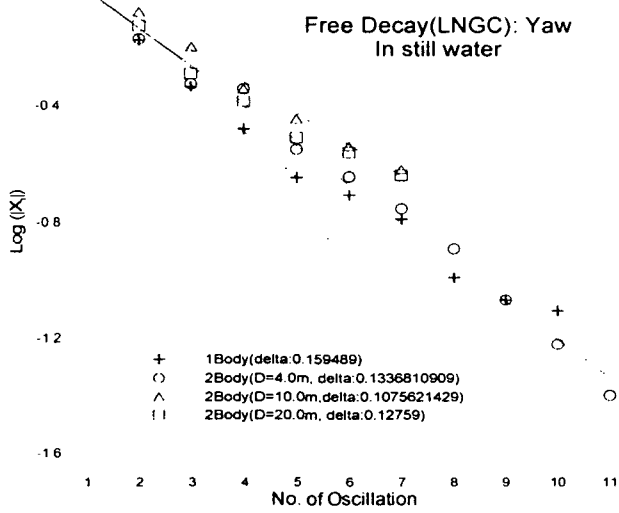
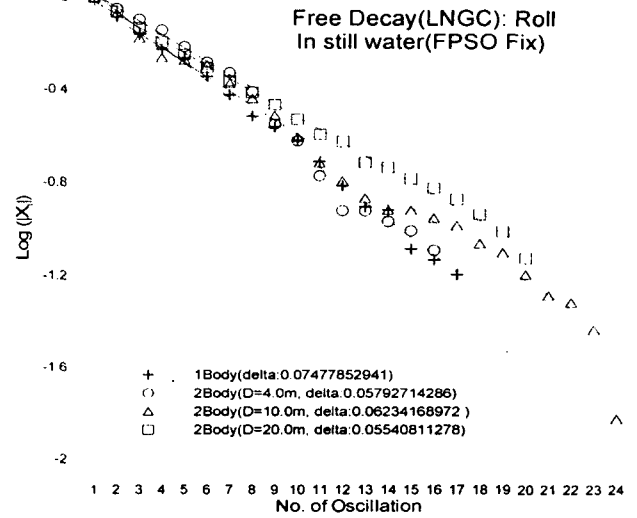
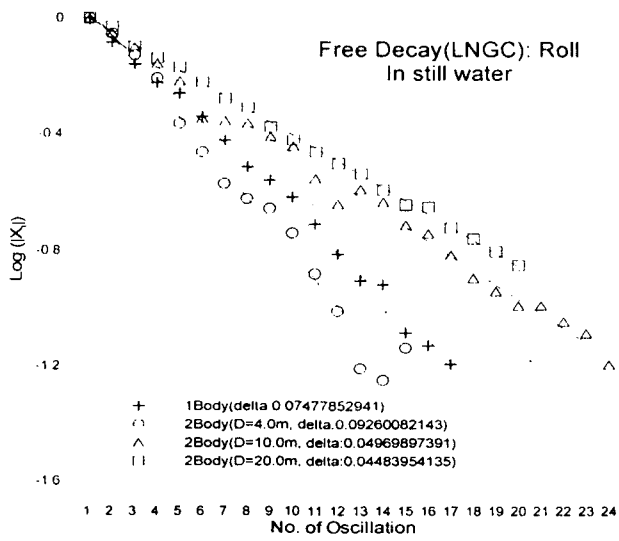


Fig. 5 The test results of of LNGC in still water

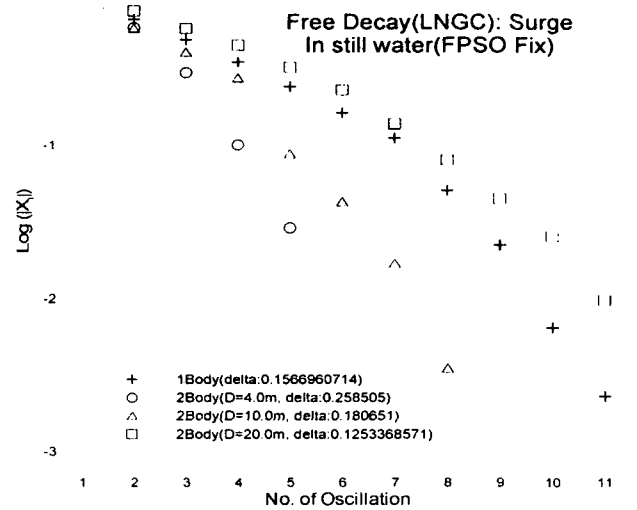
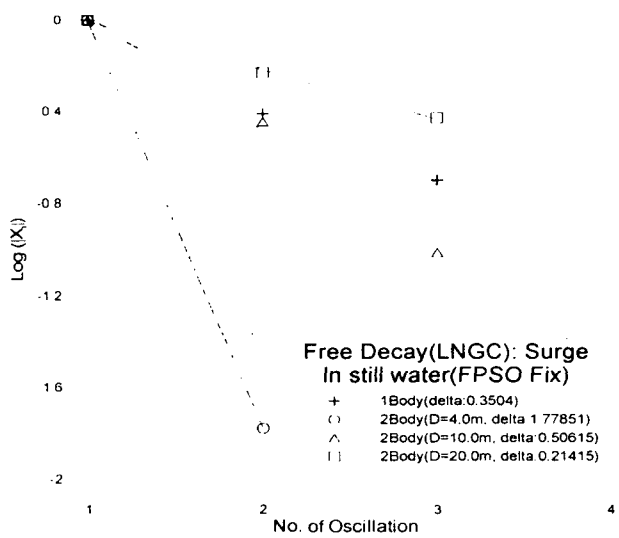


Fig. 6 The test results of LNGC with fixed FPSO in still water

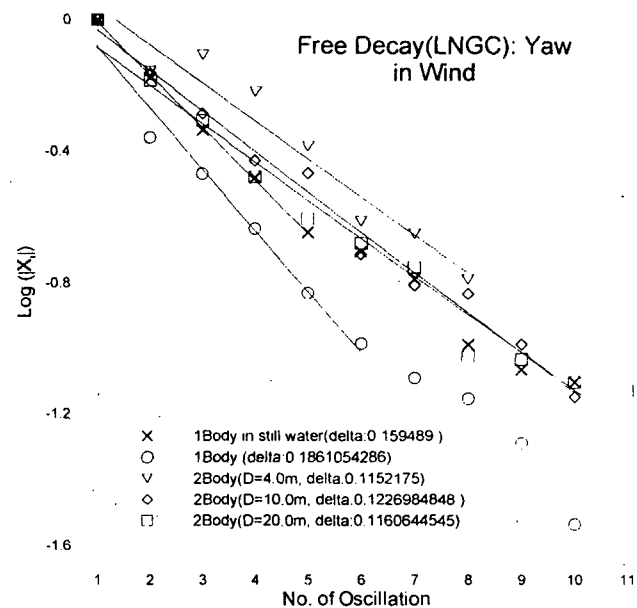
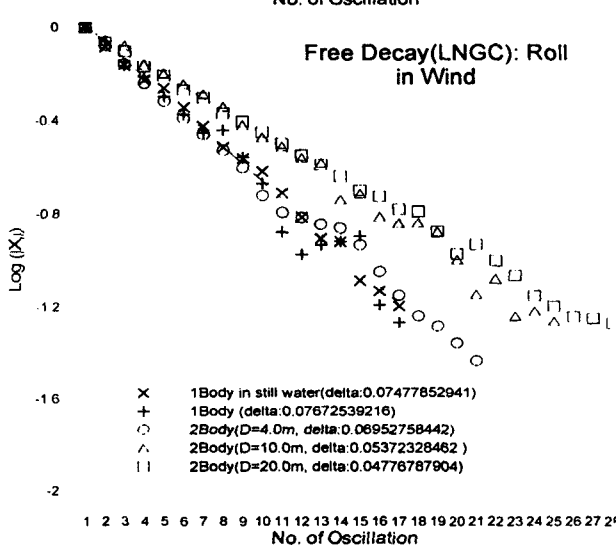
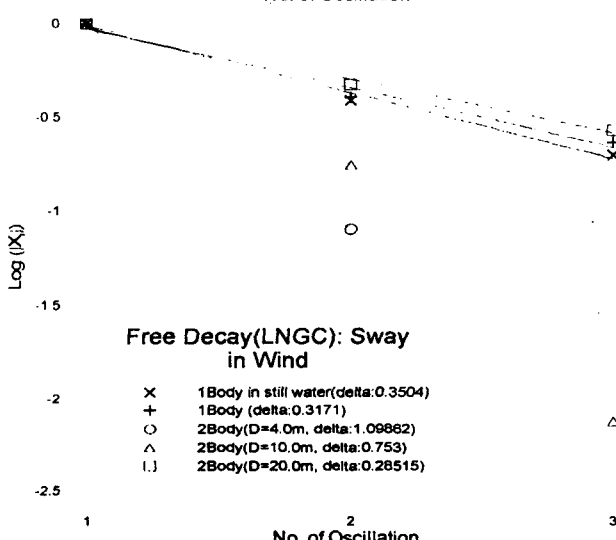
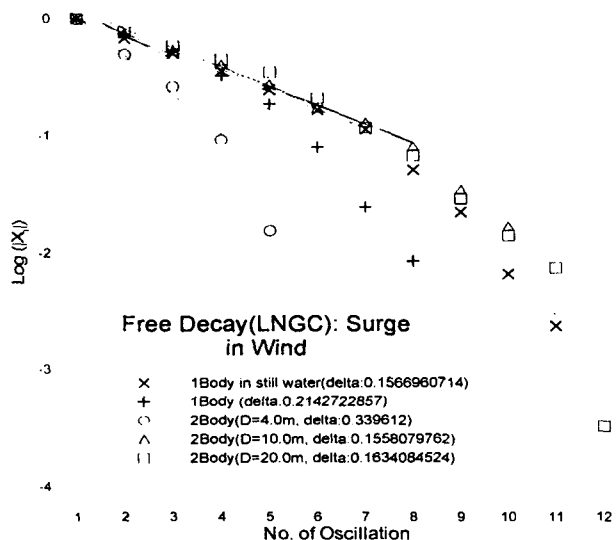


Fig. 7 The test results of LNGC in wind

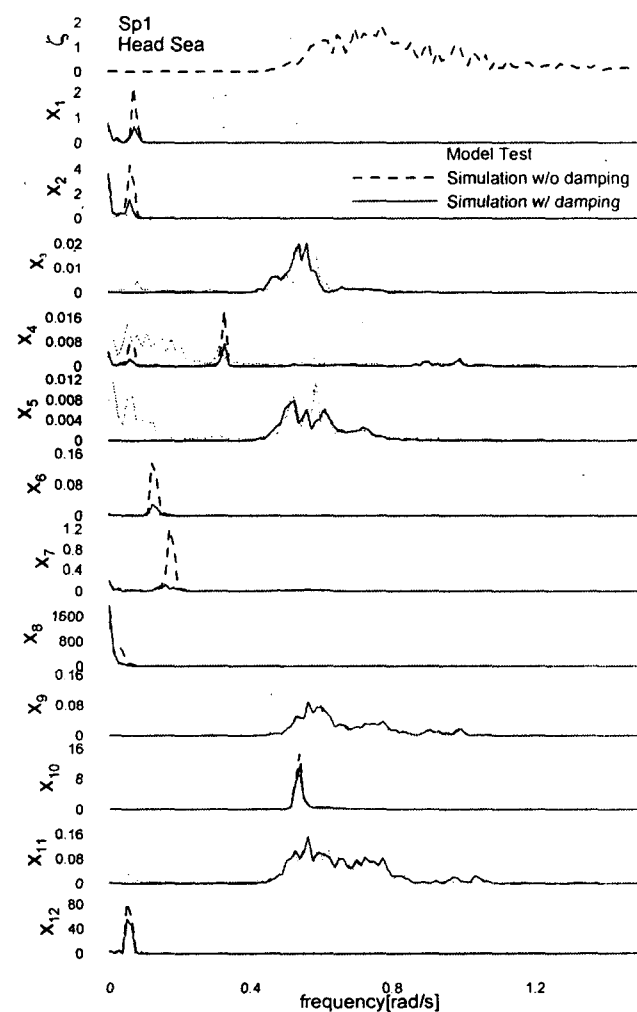


Fig. 8 The motion spectra of LNG-FPSO and LNGC in head sea ($H_{1/3}=3.25m$, $T_p=9.0sec$, ITTC)