

## 초대형 부유식 구조물의 돌핀-펜더계류시스템에 관한 실험연구

김진하<sup>\*\*</sup>, 조석규<sup>\*</sup>, 홍사영<sup>\*</sup>, 김영식<sup>\*</sup>

한국해양연구원 해양시스템안전연구소<sup>\*</sup>

### Experimental Study on a Dolphin-Fender Mooring System for Pontoon-Type Structure

Jin-Ha Kim<sup>\*\*</sup>, Seok-Kyu Cho<sup>\*</sup>, Sa-Young Hong<sup>\*</sup> and Young-Shik Kim<sup>\*</sup>

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering(KRISO), KORDI<sup>\*</sup>

#### Abstract

In this paper a dolphin-fender moored pontoon-type floating structure in shallow water depth is studied focusing on mooring force. The pontoon-type floating structure is 500m long, 300m wide. The structure has partially non-uniform drafts of 2.0m and 3.0m. The employed mooring system is a guyed frame type dolphin-fender system. The 1/125 scale model fender system is made of rubber tube to have bi-linear load deflection characteristics. A series of model tests has been conducted focusing on motion and fender force responses in regular and irregular waves at KRISO's ocean engineering basin. Non-linear numerical simulation of fender reaction force has been carried out and the results are compared with those of model tests. The simulated rigid body motion and mooring forces also have been compared with the test results.

※Keywords: Pontoon-type Structure(폰툰형구조물), Dolphin-fender Mooring System(돌핀-펜더계류시스템), Non-linear Fender Characteristics Curve(비선형 펜더특성곡선), Time Domain Numerical Simulation(시간영역 수치시뮬레이션), Probability of Exceedance(초과확률)

#### 1. 서론

최근 개발 가능한 육상 공간의 포화 및 매립

에 따른 환경문제에 대한 인식이 증가함에 따라 부유식 구조물을 이용한 해양공간 이용이 활발히 논의되고 있다. 일본에서는 메가플로트 프로젝트(1995-2000)를 통하여 해상공항의 설계 및 건조 기술을 개발한 바 있으며 부체식 공법이 매립식 공법, 말뚝식 잔교 공법과 함께 하네다 공항의 제 4 활주로 확장을 위한 대상공법으로 검토된 바 있다.

접수일:2004년 10월 4일, 승인일:2004년 11월 15일

†주저자, E-mail: jhakim@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7525

이러한 초대형 부유식 구조물은 구조설계과정에서의 환경외력에 의한 유탄성 해석뿐만 아니라 계류시스템의 안정성 평가도 설계과정에서 중요하게 고려되어야 한다. 천해역 부유식 구조물의 계류장치로서는 돌핀-펜더계류시스템이 널리 사용되고 있다. 특히, 고무펜더는 재하시 이력특성을 가지며, 펜더반력이 선형적으로 증가하는 초기선형강성구간과 반력이 일정한 정반력구간등 비선형적 복원특성을 보인다(Ide et al. 1998, Saito et al. 1999).

돌핀-펜더 계류시스템에 대해서 일본에서 부유식 석유생산기지에 대한 장기간 실험역 실험 및 수치계산 결과를 비교한 연구(Ikegami and Shuka 2001), 메가플로트 제 2 실증구조물에 대한 실험역 실험 결과와의 수치 시뮬레이션 비교연구(Shimada and Miyajima 2002)등 깊이 있는 연구가 이루어져 왔으며 이러한 연구 결과를 통해 폰툰형 초대형 부유식 구조물(VLFS)의 수평운동에서는 강체운동을 가정한 이론해석이 유효함을 보였다.

국내에서는 초대형 부유식 구조물의 유탄성 운동응답에 대한 수치계산(이호영 등 2001, 홍사영 2001) 및 실험연구(신현경 등 1999) 등이 활발히 이루어진 반면 돌핀-펜더계류시스템에 대한 연구는 최윤락 등(1999)의 모형시험연구, 양용진 등(2002)의 시뮬레이션 연구가 있으나 유탄성 응답 해석에 비해 그리 활발하지 못한 실정이다.

본 연구에서는 펜더의 비선형 복원특성곡선을 고려하여 돌핀-펜더계류된 부유구조물의 파랑중 모형시험을 수행하였다. 또한, 파랑중 초대형 부유식 구조물의 강체운동과 비선형 펜더반력특성곡선을 이용하여 시간영역 수치시뮬레이션을 수행하여 부유구조물의 강체운동과 계류력응답을 산정하였다. 이를 실험결과와 비교/검토함으로써 계류시스템의 안정성 평가를 수행하였다.

## 2. 모형시험

폰툰형 부유식 구조물은 길이가 500m, 폭이 300m, 흘수가 각각 2m 와 3m 인 불균일 강성을 가지는 해상리조트 시설의 구조물을 상정하였다(홍사영 2001). Fig. 1 은 돌핀-펜더계류된 부유식

구조물의 형상을 보여주고 있다. 전체 구조물은 10 개의 단위모듈로 구성되며 그림에서 4 와 7 의 단위모듈은 호텔부의 설비가 갖추어져 다른 모듈에 비해 보다 큰 부력을 가지도록 흘수를 크게 하여 설계하였다. 부유식 구조물에는 6 기의 돌핀이 대칭으로 설치되었다. 돌핀-펜더 계류시스템은 1 기의 돌핀에 4 기의 고무펜더가 설치된 가이드 프레임 형(Guyed frame type)의 구조물로 설계되었다. 모형축척비는 부유식 구조물의 제원과 조파장치의 파랑재현성, 수심 등을 고려하여 1/125 로 선정하였다.

초대형 부유식 모형은 실선의 굽힘강성과 중량의 동역학적 상사를 적용하여 제작하였으며, 돌핀-펜더계류부의 돌핀은 강체로 가정하여 수조바닥면에 앵커볼트를 설치하여 고정하였다. 실선의 정반력형 펜더(높이: 2.5m, 최대반력: 375톤)의 비선형 반력-변형을 특성곡선을 상사하기 위해 고무튜브를 이용한 펜더모형을 고안하여 제작하였다.

Fig. 2 는 펜더모형과 실선펜더의 비선형 복원특성의 계측값과 수치계산용 펜더모델링을 보여주고 있다. 펜더모형은 대축적으로 인한 고무튜브제원의 제한성과 제작오차로 인해 초기선형강성구간에서는 실선펜더와 유사하나, 정반력구간에서 최대 펜더반력이 실선펜더보다 약 2.5 배 크게 제작되었다.

규칙파는 실선기준 파고 2.0m, 파 주기 5 초 부터 25 초의 범위에 걸쳐 1 초 간격으로 재현하였다.

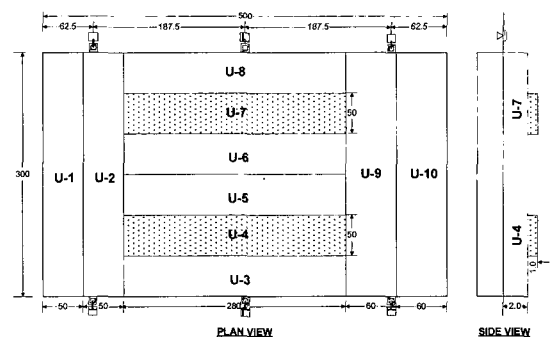


Fig. 1 Schematic overview of a pontoon-type floating structure

또한, 불규칙파는 유의파고 0.5m, 모달주기 10 초의 작업조건(SP1)과 유의파고 1.0m, 모달주기 13 초의 설계조건(SP2)으로 나누어 JONSWAP 파도스펙트럼( $\gamma=3.3$ )으로 재현하였다. 파향은 선수 파와 횡파로 하였다.

풍력과 조류력은 파향별로 부유식구조물에 중량 물을 부가하여 구현하였다.

Table 1 은 바람과 조류조건의 정적하중을 나타내고 있다.

본 연구에서 부유식 구조물의 운동응답은 선형 CCD 카메라를 이용한 비접촉식 3 차원 고정도 운동계측장치(RODYM6D)를 사용하여 다수의 위치에서 운동변위를 계측하였다. 펜더반력은 돌핀의 중앙부에 2 분력형 로드셀을 설치하여 계측하였으며 취득주파수는 50Hz 이다.

부유구조물의 운동과 펜더반력 등의 시험결과는 zero-upcrossing 법을 이용하여 통계처리하였다. Fig. 3 은 계측시스템의 개략도를 나타내고 있다.

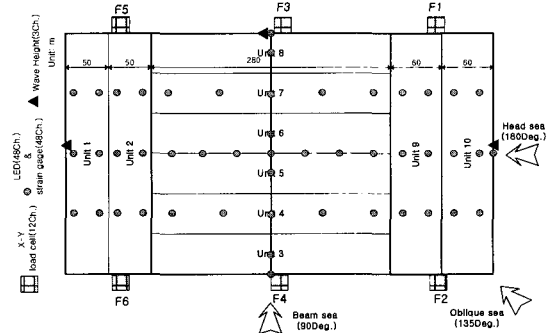


Fig. 3 Measurement sensors of model tests

### 3. 수치시뮬레이션

초대형 부유식 구조물의 강제운동을 가정하고 비선형 펜더특성곡선을 고려한 시간영역수치시뮬레이션 프로그램이 개발되었다(홍사영 2001). 돌핀-펜더계류된 구조물의 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$\sum_j [(M_{ij} + A_{ij}(\infty))\ddot{x}_j + K_{ij}x_j] = F_{wi} - \sum_j \sum_{p=0}^n R_{ij}(p)\dot{x}_j(n-p)dt \quad (i,j=1,2,6) \quad (1)$$

여기서,  $x_j$  는 무게중심에서의 강제운동,  $M_{ij}$  는 질량행렬,  $A_{ij}(\infty)$  는 무한주파수에서의 부가질량행렬,  $K_{ij}$  는 돌핀-펜더계류계의 계류복원력행렬,  $R_{ij}$  는 시간기억함수,  $F_{wi}$  는 파랑기진력과 표류력이다. 동유체력계수와 파랑기진력은 고차경계요소법(HO BEM)을 이용하여 계산하였다(홍사영 2001).

Fig. 4 는 수평운동의 시간기억함수를 보여준다.

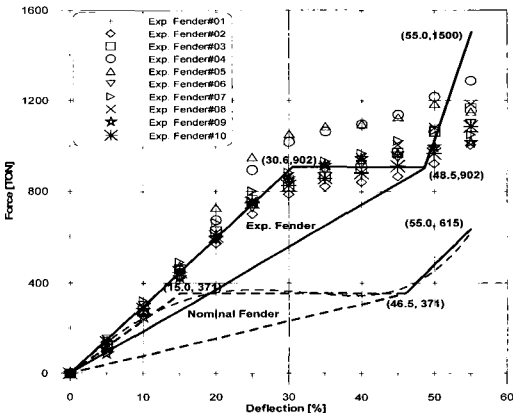


Fig. 2 Test results of load-deflection curve of constant reaction fender(solid line: test fender modeling, dashed line: nominal fender modeling)

Table 1 Condition of wind and current, and corresponding loads

	Wind	Current	Sum
Speed [m/s]	40	1.14	-
Fx [ton]	685.2	61.1	746.3
Fy [ton]	897.7	85.2	982.9

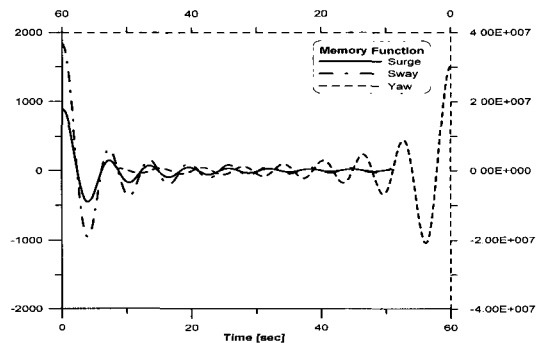


Fig. 4 Time memory function of horizontal motion

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 실선기준 수심 40m에 대해 해양공학 수조에서 수행된 모형시험 사진이다.

Fig. 6은 규칙파중의 펜더모형과 실선펜더에서 돌핀구조물과 펜더와의 간격(이하 “펜더간격”)에 대한 돌핀-펜더계류된 부유구조물의 무게중심에서의 수평운동응답을 나타내고 있다. 선수파에서 전후운동의 이론계산 및 실험결과는 좋은 상관관계를 가지고 있다. 수치시물레이션에서는 이론계산치와 유사한 0.47rad/sec에서 공진주파수가 나타나며, 계산결과가 실험치에 비해 매우 크게 나타나고 있다. 이는 모형시험 또는 수치시물레이션에서 돌핀-펜더계류부의 감쇠력의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 향후, 수평운동에 의한 돌핀-펜더계류부 감쇠력 추정에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 횡파조건에서 계산결과와 공진주파수는 선수파와 동일한 반면에 실험값에서는 피크치가 나타나지 않았다.

Fig. 7은 Fig. 3에서 나타난 특정위치(F6)에서 규칙파중의 펜더반력의 rms 값을 나타내고 있다. 여기서, 그림에 표기된 “Exp”는 모형시험 결과이며, “Expc”는 무게중심에서의 운동계측치를 강제운동가정과 펜더의 수치모델을 사용하여 계산한 펜더반력이다. 실험치와 계산치가 잘 일치하므로, 펜더모델링의 유효함을 알 수 있다.

돌핀-펜더간격에 대한 펜더반력은 운동응답과 유사한 경향을 보이며 실선펜더가 펜더모형을 이용한 계산결과보다 약 40%정도 작게 나타났다.

선수파중에서 Fig. 6의 전후운동의 공진주파수부근에서 실험결과가 계산결과보다 크게 나타난 반면, 펜더반력은 실험과 계산결과가 비교적 좋은 상관관계를 나타내었다. 이는 펜더높이의 30%이상의 펜더변형이 발생하면 정반력 구간에 해당하여 반력이 일정하기 때문이다. 횡파조건에서 펜더반력의 수치계산결과가 공진주파수부근에서 실험결과보다 크게 나타난 반면, 저주파수에서는 작게 나타났다. 이는 모형펜더의 설치시 돌핀-펜더간격이 불균일하여 모형시험과 수치계산에서 공진주파수가 다르기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8은 횡파에서 불균일한 펜더간격의 영향을

보이고 있다. 즉, 펜더간격의 균일한 변화에 대한 펜더반력은 Fig. 6과 Fig. 7에서 나타난 것처럼 큰 차이가 없는 반면에 불균일한 펜더간격에 의해서 횡운동의 공진주파수의 이동이 나타나고 있다.

Fig. 9는 불규칙파중의 펜더반력의 rms와 최대값의 실험결과를 나타내고 있다. 풍력과 조류력의 정적하중이 작용하는 파랑조건(“CWF”로 표기)이 파랑만이 있는 경우보다 펜더반력이 크게 나타났다. 최대 펜더반력은 600톤 이하이며, 이는 불

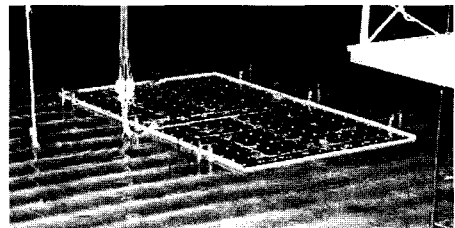


Fig. 5 A snapshot of the model in waves

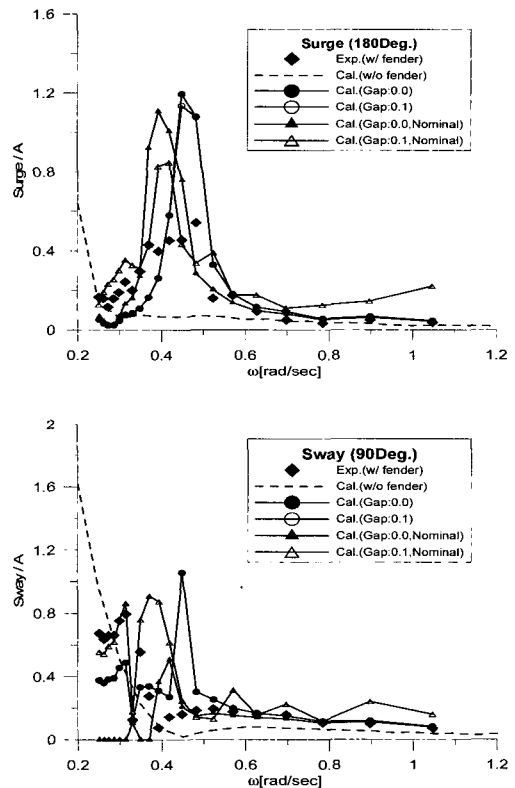


Fig. 6 Motion responses in regular waves

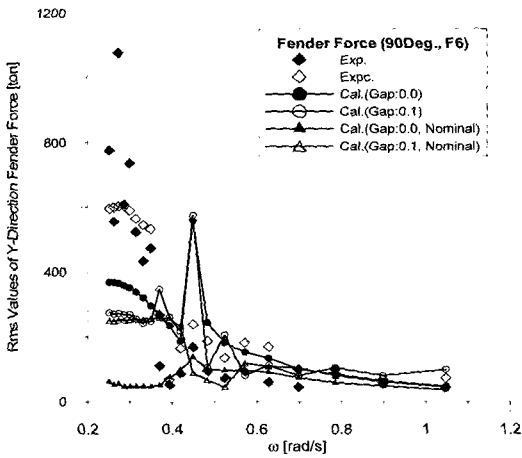
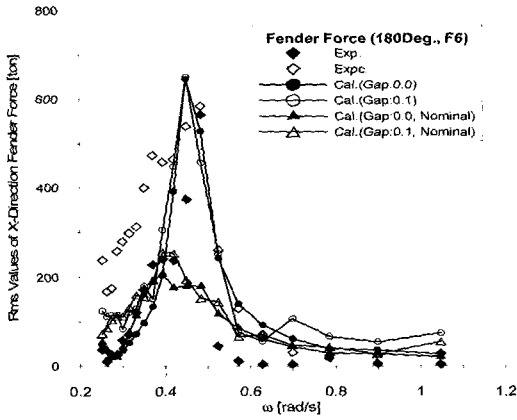


Fig. 7 RMS values of fender force in regular waves

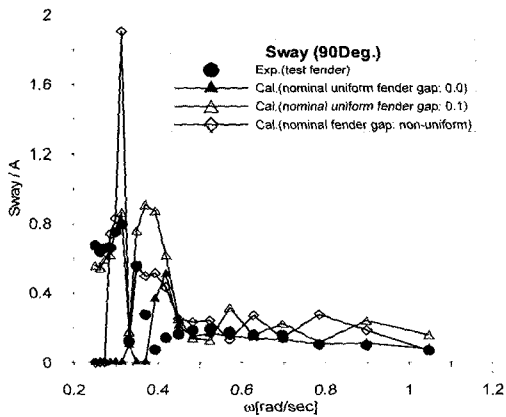


Fig. 8 Motion responses for varying fender gap in regular waves

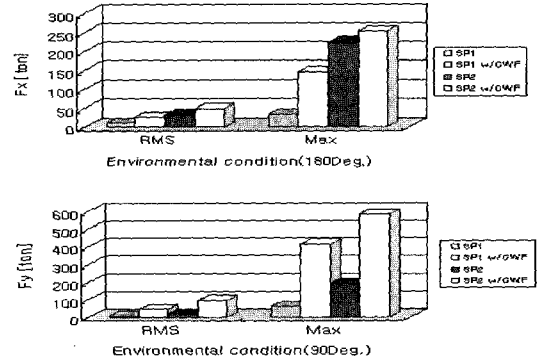


Fig. 9 The test results of fender force in irregular waves & co-linear conditions

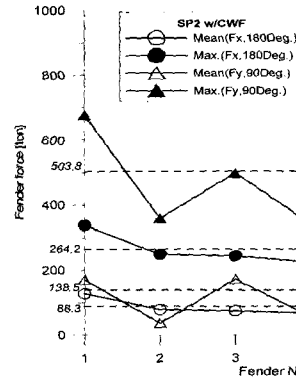


Fig. 10 The comparison between mean and maximum test results in co-linear waves

규칙 파중에서의 펜더반력이 초기 선형강성구간 내에 있음을 보여준다. 풍력과 조류력의 정적하중이 작용하는 경우에 횡파조건이 선수파보다 큰 펜더반력을 나타내고 있다. 펜더반력의 최대값은 풍력과 조류력의 정적하중이 부가된 설계조건인 횡파에서 나타났다. 이는 최대 펜더반력이 각 돌핀에 설치된 펜더간격과 같은 펜더의 초기 조건에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

Fig. 10 은 불규칙파랑조건에서 정적하중이 부가된 경우에 Fig. 3 의 돌핀위치에 따른 펜더반력의 실험결과를 나타내고 있다. 횡파조건에서 펜더간격의 불균일성에 기인한 펜더반력의 차이가 선수파보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 11 은 펜더간격이 영일때의 수치계산과 모형시험결과를 비교하여 나타내고 있다.

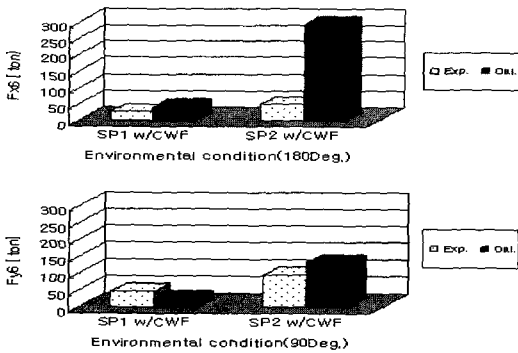


Fig. 11 RMS values of fender force in co-linear conditions

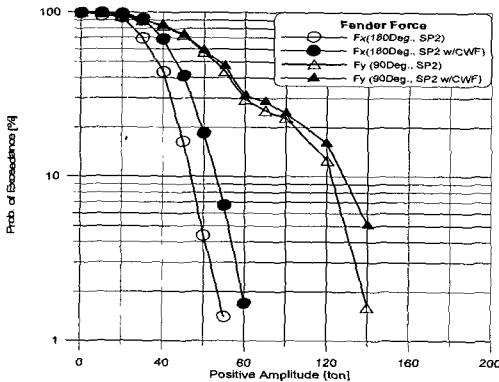


Fig. 12 Probability of exceedance curves of nominal fender force

수치계산결과가 실험값보다 보수적인 결과를 보이며, 특히 설계조건(SP2)에서 계산결과가 실험값보다 크게 나타나고 있다. 이는 파랑의 설계조건(SP2)의 모달주파수가 0.483 rad/sec 로써, Fig. 9 와 Fig. 10 에서 나타난 파랑중 돌핀-펜더계류계의 공진주파수인 0.47 rad/sec 에 근접하여 상대적으로 큰 펜더반력을 보이는 것으로 판단된다. 실선펜더인 경우에 계류계의 안정성 평가를 위해 설계조건에 대한 수치시물레이션을 수행하였다.

Fig. 12 는 불규칙파에서 펜더반력의 최대진폭값에 대한 초과누적확률의 수치시물레이션 결과이다. 선수파 및 횡파에서 누적초과확률이 1%에 해당하는 펜더반력이 각각 100 톤과 200 톤 정도로 Fig. 2 의 초기 선형강성구간에 해당된다. .

### 5. 결론

비선형 복원특성을 고려한 돌핀-펜더계류시스템의 모형시형과 수치시물레이션을 통해 얻어진 주요결과는 다음과 같다.

1. 부유구조물의 무게중심에서의 운동계측치를 강체운동으로 가정한 펜더의 수치모델과 모형시형의 펜더반력이 잘 일치하여, 펜더 모델링의 유효함을 알 수 있었다.

2. 균일한 펜더간격은 펜더반력이 유사한 반면, 불균일한 펜더간격의 경우에 구조물의 동적거동 변화에 따른 펜더반력의 차이가 크게 나타났다.

3. 불규칙파 설계파 조건에서 돌핀-펜더계류시스템의 안정성을 검토한 결과, 펜더모형 및 실선펜더의 펜더반력이 모두 초기 선형강성구간에 해당함을 알 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 해양수산 연구개발과제인 ‘초대형 부유식 해양구조물 기술개발’과 공공기술연구회가 지원하는 기본연구사업 ‘해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술고도화’의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

- 신현경, 박인규, 신현수, 김성경, 양영수, 1999, " 천흥수 부유식 해양구조물의 유탄성 모형시형 기법개발에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 4 호, pp. 64-76.
- 양용진, 정태영, 박성환, 홍사영, 2002, " 돌핀계류된 초대형 부유구조물의 비선형 운동응답 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 307-310.
- 이호영, 신현경, 임춘규, 김외현, 강정문, 윤명철, 2001, " 불규칙파중에서 돌핀계류된 해상 공항에 대한 운동," 대한조선학회 논문집, 제 38 권,

제 2 호, pp. 10-18.

- 최윤락, 홍석원, 김현조, 김진하, 1999, “ 부유식 해양플랜트 종합모형시험을 통한 파랑중 하중/운동 응답해석,” 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 405-409.
- 홍사영, 2001, 초대형 부유식 해상구조물 기술 개발, 해양수산부, 제 3 차년도 기술보고서
- Ide, T., Suzuki, H. and Yoshida, K., 1998, “ Effect of in-plane elastic responses and space correlation of wind on progressive collapse behavior of mooring system of Very large floating structure,” Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.183., pp. 189-194.
- Ikegami, K. and Shuku, M., 2001, “ Design and field measurement of mooring system for the world’s first floating type oil storage system in Kami-Gotoh, Japan,” Floating structures in coastal zone, pp. 324-335.
- Saito, M., Kato, S. and Ohmatsu, S., 1999, “ Estimation method of failure probability of mooring system of VLFS as a breakwater exists,” Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.185., pp. 175-180.
- Shimada, K. and Miyajima S., 2002, “ Comparison of mooring simulations and measurement for mega-float phase-II mode I,” Proc. 12<sup>th</sup> ISOPE, Vol. I, pp. 261-266.



< 김진하 >



< 조석규 >



< 홍사영 >



< 김영식 >