한국해양공학회 2002년도 추계학술대회 논문집 PP.155~160

천해역 유연부이 계류시스템에 관한 실험연구

김진하 · 홍사영 · 홍석원 · 홍섭
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

An experimental study on compliant buoy mooring system in shallow water

JIN-HA KIM, SA-YOUNG HONG, SEOK-WON HONG AND SUP HONG
Ocean Development System Department, KRISO/KORDI, Daejon, Korea

KEY WORDS: compliant buoy mooring 유연부이계류, vertical mooring leg 수직계류각, horizontal mooring line 수평계류선, mooring parameter 계류변수, cumulative distribution 누적확률분포

ABSTRACT: *In this paper, a compliant buoy mooring system of a floating cylindrical structure in shallow water depth is studied experimentally. The compliant buoy mooring system consists of four buoys, vertical mooring legs and horizontal mooring lines. A series of model test were carried out at KRISO ocean engineering basin for various mooring parameters; line length, pretension of mooring leg and mooring layouts and environmental conditions; regular and irregular waves combined with current and wind. The mooring line tensions and 6-DOF motions of the floating structure were measured using water-proof load cells and 3 CCD camera system. The results of a series of model tests were discussed on nonlinear motion behaviors of the floating structure and characterisitics of cumulative distributions of mooring line peak tensions.*

1. 서 론

일반적으로, 수심 20-30m의 천해역에서 현수선 계류방식은 바람, 조류 등 정적 외력에 대하여 부유체 및 계류선의 과도한 표류변위가 유발되며 파도 및 돌풍 등에 의한 동적 운동변위가 중첩될 때 계류선 및 앵커의 파지용량의 한계가 쉽게 초과되는 문제점을 가지고 있다(홍석원 외, 1996).

이러한 문제의 해결 방안으로서 외력에 대한 변위가 비록 크더라도 부유체의 운동이 유연하게 흡수될 수 있는 유연부이 계류시스템(*compliant buoy mooring*)을 제안하였다(홍석원 외, 1997).

유연부이 계류시스템은 와이어 로우프와 같이 자중에 비해 인장강도가 높은 계류선을 사용하여 인장 계류된 부이에 부유체를 수평계류선으로 연결하여 계류하는 방식이다.

이러한, 유연부이 계류시스템은 천해역의 부유식 파력발전장치(*Oscillating Water Column*)의 계류시스템으로 적용성이 제안되어 관련 연구가 수행되었다(홍석원 외, 1997).

그러나, 기존 연구에서는 수조기능상의 제한으로 인해 무한수심조건에서의 불규칙 선수파중의 모형시험만이 수행되어 계류설계하중의 추정에 대한 충분한 검토가 이루어지지 못하였다. 따라서, 천해역에서 파력, 풍력과 조류력 등의 복합 환경외력의 조합에 의해 부유체의 파랑응답 변위, 계류시스템의 변형량과 최대 계류력에 대한 실험연구가 필요하였다.

본 논문에서는 천해역의 복합환경조건에서 유연부이 계류시스템의 다양한 계류변수에 대한 모형시험을 수행하여 부유체의 비선형 거동과 최대계류장력에 대한 누적확률분포등의 응답특성을 분석하고, 성능 개선안을 검토하였다.

2. 모형시험

2.1 모형시스템 구성

대상모형은 앞선 연구에서 제안된 천해역 부유식 파력발전장치구조물과 유연부이 계류시스템을 기준모형으로 선정하였다. Table 2.1과 2.2 는 각각 파력발전장치(이하 OWC로 표기함.) 및 유연부이 계류시스템(이하 CBM으로 표기함.)의 기준모형에 대한 주요 제원을 나타내고 있다.

모형시험을 위한 축척비는 본 연구소 해양공학수조(L×B×D: 56m×30m×4.5m)의 천해역 수심재현과 조파장치, 조류발생장치와 바람발생장치등의 환경재현장치의 가용량을 고려하여 1/21 축척 모형으로 선정하였다.

파력발전장치

부유식 파력발전장치의 본체와 상부구조물은 각각 FRP와 아크릴의 경량 구조물로 제작되었다. 부유식 파력발전장치 모형은 기하학적 상사와 무게중심과 관성반경등의 동역학적 상사조건를 만족하도록 중량을 조정하였다.

유연부이 계류시스템

유연부이 계류시스템의 수직계류선은 와이어 로우프를 사용하여 길이를 동일하게 제작하였으며, 자중에 비하여 상대적으로 인장강도가 높으므로 부가적인 계류강성상사를 위한 스프링은 설치하지 않았다. 부이와 부유체를 연결하는 수평계류선은 외부 작용하중 및 운동변위에 의한 장력 이외에 자체 자중에 의한 장력은 무시하도록 수중에서 거의 중성부력을 갖는 합성섬유인 나일론 로우프를 사용하였다. 나이론 로우프

는 기하학적 상사조건을 만족하도록 제작되었으며, 축강성은 선형스프링을 양단에 설치하여 상사하였다. 또한, 수평 및 수직계류선을 연결하는 삼각판(tri-plate)은 제원과 중량을 축척비로 상사하여 알루미늄 판으로 제작하였다. 또한, 부이는 직경과 깊이등의 제원과 중량을 동일하게 모사한 우레탄 포옴(urethan foam)을 사용하였다. Fig. 1은 부유식 파력발전장치와 유연부이 계류시스템의 모형사진을 보여주고 있다.

Table 1 Characteristics of dimensions on OWC

Item	unit	OWC	
		Proto	Model
Outer Dia.	m	13.0	0.619
Inner Dia.	m	10.0	0.476
Freeboard	m	6.5	0.310
Draft	m	7.5	0.357
Displacement	ton	274.0	0.0296
GM	m	0.8	0.0381
KG	m	5.2	0.248

Table 2 Characteristics of dimensions on CBM

	Item	unit	Buoy Mooring System	
			Proto	Model
Buoy	Dia.	m	2.0	0.0952
	Height	m	2.5	0.119
	Weight	kg	1,200	0.130
	Draft	m	1.875	0.0893
	Displacement	kg	6,038	0.652
Nylon Rope	Length	m	20.0	0.952
	Dia.	mm	50	2.38
	Kzz	kg/m	10,000	22.67
Wire Rope	Length	m	20.0	0.952
	Dia.	mm	30.0	1.43
	Kzz	kg/m	50,000	5.40
	Pretension	kg	1,800	0.194
Chain	Length	m	5.0	0.238
	Dia.	mm	26	1.24
Anchor	Dimension	m	4×4×1	-
	Weight	ton	45.6	0.00492

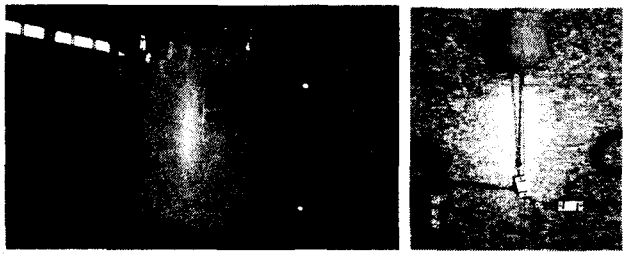

Fig. 1 Photo of OWC & CBM model

2.2 환경조건

파도, 조류 및 바람등의 해상 환경조건은 파력발전장치의 생존조건(survival condition)을 적용하였다.

파도

규칙파 및 불규칙파는 반사파를 고려하여 30도 경사파를 선수파(180°)로 정의하였다. Fig. 2는 모형시험에 적용된 파향과 좌표계(coordinate system)를 나타내고 있다. 여기서, β는 파향 입사각이며, 모형의 무게중심과 수선면의 교점에 원점을 가지고, 연직 상방향이 양(+)인 직각 우수좌표계를 사용하였다. 규칙파는 하나의 파고에 대해 부유체의 외경에 대한 파장비(Lw/Do)를 고려하여 생성하였다. 또한, 불규칙파는 천해역 황천조건(survival condition)을 적용하여 파고와 주기에 의해 산정되는 ITTC 파도 스펙트럼을 적용하여 생성하였다. Table 3 은 규칙파 및 불규칙파의 파도조건을 보여주고 있다.

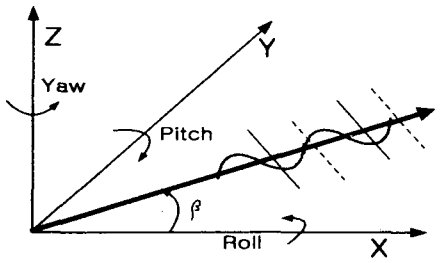

Fig. 2 Coordinate System

Table 3 Wave conditions for model test

Wave	Proto		Model		Heading [Deg]
	H[m]	T[s]	H[m]	T[s]	
Regular Waves					
R01	2.0	4.082	0.095	0.891	180
R02		5.0		1.091	
R03		5.786		1.263	
R04		6.151		1.342	
R05		6.505		1.420	
R06		6.853		1.495	
R07		7.197		1.571	
R08		7.539		1.645	
R09		7.882		1.720	
R10		8.571		1.870	
R11		9.981		2.178	
R12		13.685		2.986	
Irregular Waves					
Wave	Hs[m]	Tp[s]	Hs[m]	Tp[s]	Heading [Deg]
SP1	5.25	9.18	0.25	2.00	180°
SP2	5.25	9.18	0.25	2.00	165°

조류

조류는 파력발전장치 깊이의 1/2에 해당되는 3.75m 수심에서 2노트의 조류속도를 재현하도록 프로펠러 타입 유속계(propeller type current meter)를 사용하여 생성하였다. 해양공학수조에서 조류는 한 방향으로 제한되며, 모형시험에서 선수파와 조류의 사이각은 60도이다.

바람

바람은 수면상 10m 기준에서 50노트의 조건에 대해 정적 하중을 추정하여 기준모형을 설치하여 바람발생장치를 이용하여 정적하중을 맞추었다. 본 모형시험에 있어 바람발생장치는 풍력뿐만 아니라 수조의 조류의 방향성 제한에 따라 임의 각도의 조류력을 재현하기 위한 장치로 사용되었다. 바람발생장치의 가용 RPM 용량내에서 바람과 조류가 중첩된 환경하중을 구현하기 위하여 파력발전장치 상부구조물위에 경량의 직사각형 스치로폼을 설치하여 하중을 맞추었다.

Fig. 3은 바람발생장치의 RPM변화에 대한 풍력과 풍력 및 조류력의 합력에 해당하는 2가지 환경외력의 2차 다항식으로 fitting 결과를 나타내고 있다.

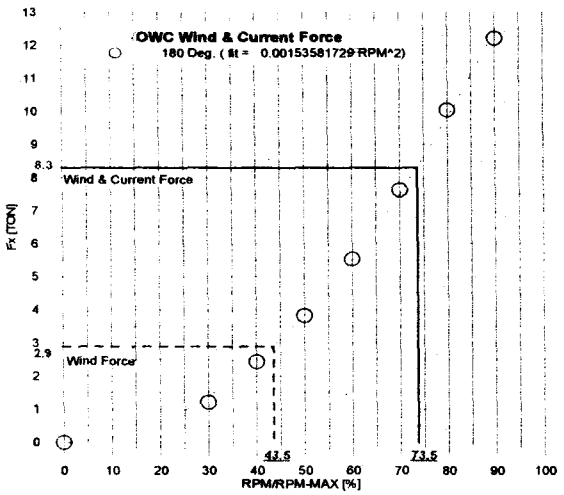

Fig. 3 Wind & current force vs. RPM of wind fans

2.3 계류배치조건

유연부이 계류시스템의 성능평가를 위해 파력발전장치의 계류시스템에 선정된 CaseM-1을 기준형으로 하여, 수평나이론 로우프 및 수직와이어 로우프길이, 계류선 각도, 부유체 GM 등 다양한 계류변수의 변화에 따른 계류배치조건을 결정하였다. Table 4와 Fig. 4은 각각 유연부이 계류시스템의 계류배치에 대한 시험조건과 개략도를 나타내었다. 여기서, 계류선 각도는 선수파와 수평계류선과의 사이각으로 정의하였다.

Table 4 Test conditions of Mooring arrangement

ITEM / Case	OWC	Mooring System				Mooring Parameter
	GM [m]	No.	Angle [Deg]	Wire [m]	Nylon [m]	
CaseM-1	0.8	4	75	25	30	-
CaseM-2	0.8	4	75	15	30	wire rope
CaseM-3	0.8	4	75	25	60	nylon rope
CaseM-4	0.8	4	15	25	30	mooring angle
CaseM-5	1.5	4	75	25	30	GM
CaseM-6	0.8	4	45	25	30	mooring angle
CaseM-7	0.8	3	75	25	30	Failure

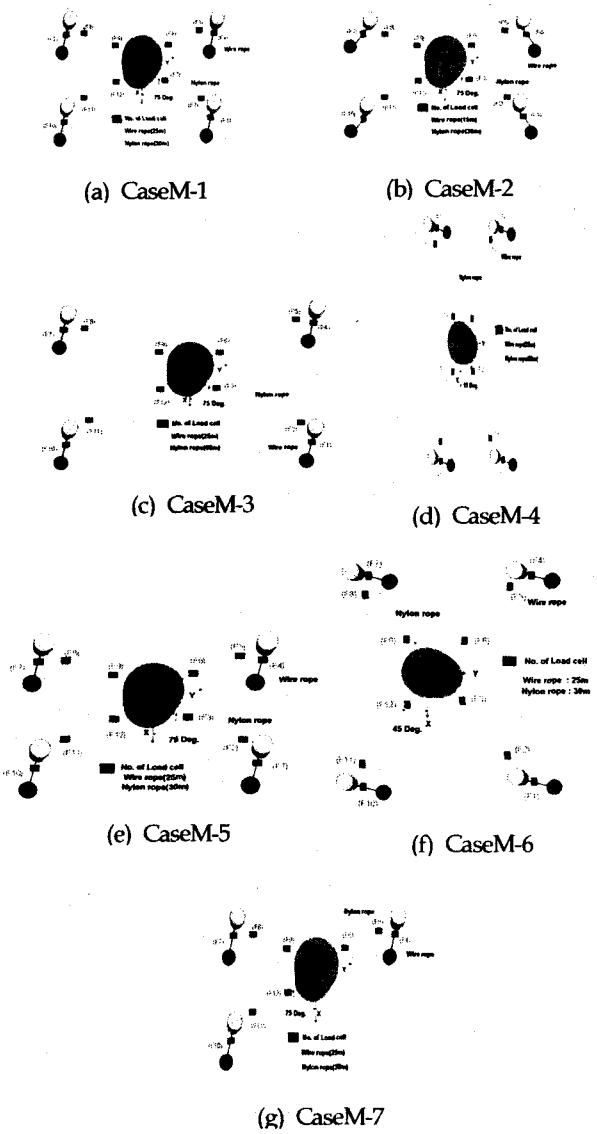

Fig. 4 The cases of model setup for CBM

2.4 계측항목 및 시스템 구성

유연부이 계류시스템의 성능평가를 위해 복합환경하중에서의 부유식 파력발전장치의 6자유도 운동변위와 유연부이 계류시스템를 구성하는 수평나이론 로우프와 수직 와이어 로우프의 계류장력을 계측하였다. 6자유도 운동은 모형선에 설치한 LED의 적외선 신호를 3대의 CCD 카메라를 이용하여 각각 X, Y, Z축의 변위를 감지하는 고정도의 비접촉 운동계측시스템인 RODYM6로 계측하였다. 또한, 유연부이 계류계의 나이론 로우프와 수직와이어 로우프의 계류장력은 20kgf 용량의 소형 방수용 수중 장력계(water proof loadcell)를 계류선에 설치하여 계측하였다. Fig. 5은 계측시스템 구성의 개략도를 보여주고 있다.

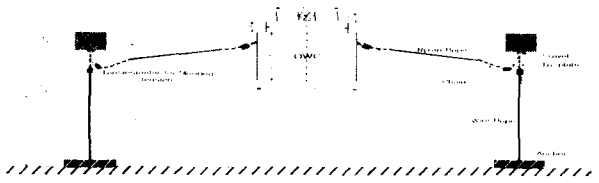

Fig. 5 Schematic view of test setup

계측신호는 Daqboard 자료취득시스템에 의해 A/D 변환(Analog to Digit)하여 P/C에서 물리량을 검출하였다.

계측신호의 시계열 자료는 zero-upcrossing 법의 통계처리 해석을 이용하여 RMS(Root Mean Square), 평균치, 유의값(파고, ±진폭), 최소, 최대치등을 구하였다.

3. 모형시험 결과 및 해석

운동 장력계측 모형시험에 앞서 정적실험(static test)을 수행하였다. 정적실험은 파력발전장치 본체 중앙선상에 와이어를 연결하여 중량을 부가하여 계류장력의 변화를 계측하였다. 정적시험의 계류장력은 유연부이 계류시스템의 준정적 이론해석으로 구한 이론치와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 원과 삼각표시는 각각 Fig. 4(a), Fig. 4(d)의 계류배치에 대한 결과치이다. 파력발전장치에 정적하중을 부가함으로써 유연계류시스템의 장력이 선형적으로 증가되고 있며, 준정적 해석에 의한 이론 및 실험결과가 좋은 일치를 보이고 있다.

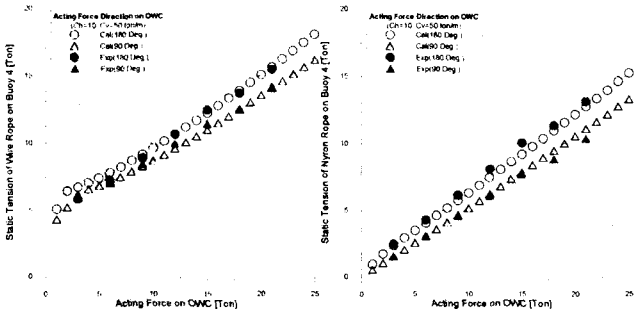

Fig. 6 Comparison of results on static test

복합환경하중에서의 운동 장력계측 모형시험은 본 연구소의 해양공학수조에서 수행하였다. Fig. 7은 모형시험 수행사진을 나타내며, Fig. 8은 계측신호의 일례를 보이고 있다.

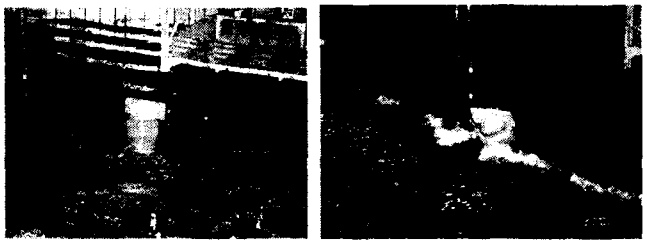

Fig. 7 A snapshot of model test in regular& irregular wave

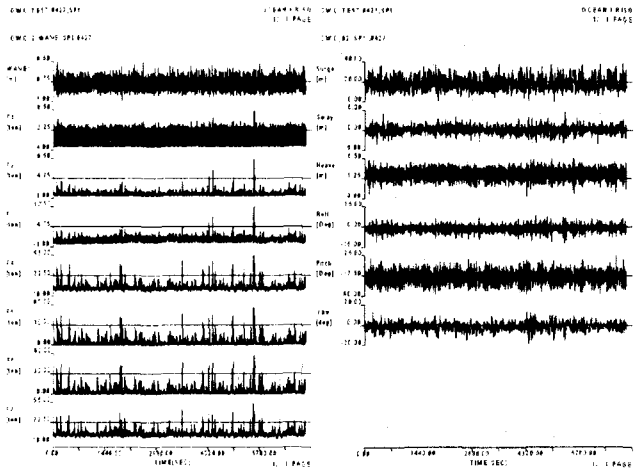

Fig. 8 Time series of tension & motion measurements

Fig. 9는 규칙파중 운동응답을 나타내고 있다. 여기서, 병진운동은 파진폭, 회전운동은 파진폭과 기울기의 곱으로 무차원하여 나타내었다.

전후운동(surge)의 경우는 0.8-1.0 rad/sec에서 최대응답을 나타내고 있으며, CaseM-6의 경우가 최대응답이 가장 작은 반면, 좌우운동(sway)의 경우는 오히려 CaseM-6가 가장 큰 응답을 보이는 비선형 거동특성을 나타내고 있다. 이러한 현상은 횡동요(roll)와 종동요(pitch)의 회전운동에서 CaseM-4의 조건에서도 나타났다. 이는 파랑중 비선형 에너지 전달효과에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 횡동요는 파랑중 부유체-계류계의 계류배치각에 지배적인 응답특성을 보이고 있다. CaseM-4의 경우는 계류선 각도가 상대적으로 작아 부유체-계류시스템의 불안정한 계(system)를 형성하여 횡동요가 커진 것으로 사료된다.

상하운동(heave)의 경우는 0.9rad/sec 부근에서 최대응답을 나타내며, 다른 운동모드에 비해 모든 계류변수에 대해 특정한(unique) 응답특성을 보인다. 이는 상하운동은 유연부이 계류계에 무관한 것에 기인한다.

Fig. 10은 계류변수에 따른 규칙파중의 장력응답을 나타내고 있다. 여기서, 장력응답은 계측된 파도의 진폭으로 나누어 표기하였으며, 선수파(SP1)에서 장력의 파상측(weather side) 응답에 대해서만 나타내었다. 와이어 로프의 장력응답은 0.8 rad/sec 부근에서 최대응답을 보이며, CaseM-2 의 경우가 장력이 가장 작게 나타났다. 이는 CaseM-2 는 와이어로프의 길이를 줄여 초기에 수중부이(swamp buoy)형태로 인장 계류함으로써, 부이의 파랑중 동적하중이 감소되어 부이와 연결된 와이어로프의 계류장력이 상대적으로 작게 나타난 것으로 사료된다. 나이론 로우프 장력은 계류배치에 따른 장력의 차이는 크지 않으나, 장력의 최대치는 와이어로프의 경우처럼 CaseM-2가 가장 작다.

Fig. 11 ~ Fig. 14는 파도, 조류 및 바람의 복합환경외력의 장력 누적확률분포(probability of cumulative distribution)를 나타내었다. 계류장력의 누적확률분포는 zero-upcrossing 통계해석법에서 계측된 시계열자료의 극치(peak value)의 크기와

횟수를 누적하여 확률로 나타내었다.

Fig. 11은 불규칙파중에서 계류배치에 대한 수평 및 수직계류선 장력의 누적확률을 도시하였다.

장력 누적확률은 CaseM-4, CaseM-3, CaseM-2, CaseM-1 경우는 유사하며, CaseM-6가 가장 낮은 반면, CaseM-5가 가장 높게 나타났다. 이는 CaseM-6의 대칭적 계류배치에서는 임의 방향에서 발생되는 비선형 회전운동을 안정적으로 흡수할 수 있는 계류선의 존재 가능성이 타 계류배치보다 높아서 상대적인 계류장력의 감소를 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 파도, 조류 및 바람의 작용방향이 동일한 경우(co-linear condition)에서의 계류배치에 대한 수평 및 수직계류선의 장력의 누적확률을 나타내고 있다.

불규칙파랑중의 장력응답결과와 유사하게 CaseM-6가 장력 누적확률이 가장 낮은 반면, CaseM-5가 가장 높게 나타났다. 또한, 부유체 GM변화에 대한 계류장력응답의 차이는 작게 나타났다. 이는 천해역의 복합환경조건에서는 과대한 회전운동이 유발되어서 부유체 GM의 영향이 상대적으로 감소된 것으로 사료된다.

Fig. 13은 CaseM-3의 경우에 파도(Eir1), co-linear(Eir2), 파도와 바람이 동일한 방향으로 작용하며 조류가 60도 각도로 작용하는 경우(Eir3)등 3가지 환경조건에 대한 장력의 누적확률을 나타내고 있다. Eir1, Eir2, Eir3의 환경조건순서로 장력의 누적분포확률이 높게 나타나고 있다. 이는, 파도와 조류 및 바람이 공존하는 복합환경하중이 파도만 작용하는 경우보다 계류장력이 크게 나타나며 특히, Eir3 의 경우에 누적확률이 가장 높게 나타났다. 이는 환경하중방향이 다른 경우 부유체와 유연부이 계류계사이의 충분한 표류변위가 일어나지 못하여 로우프의 선장력이 감소함으로써, 계류선 장력의 스내핑(snapping)현상이 보다 빈번하게 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 Eir1과 Eir2의 환경조건에 대해 CaseM-1과 1쌍의 수평 및 수직계류선이 파단된 CaseM-7경우에 장력의 누적확률을 나타내었다. CaseM-7의 경우가 CaseM-1보다 계류장력이 크게 나타나며, 최대계류장력도 약 5톤 정도 증가되었다.

4. 결론

복합환경조건에서 부유체와 유연부이 계류계의 성능평가 모형시험을 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 파랑중 부유체의 전후운동과 좌우운동, 횡동요와 종동요의 운동응답은 상호모드의 비선형 운동에너지의 전달현상이 관측되었다. 이러한 회전운동은 계류장력응답과 비례하여 나타나므로 부유체의 회전운동을 억제하는 감쇠장치의 설치가 필요하다. 또한, 상하운동은 유연 계류시스템과 무관하여 파주파수 변화에 관계없이 특징한(unique)경향을 나타내었다.

2. 수직계류선의 길이를 짧게하여 수중부이(*Swamp buoy*)형태로 배치한 경우와 수평계류선의 길이를 길게한 경우가 계류장력이 가장 작다.

3. 복합환경조건에 대해 유연부이 계류시스템의 수평계류선이 수직계류선보다 계류장력이 크게 나타나며, 이는 유연계류시스템에서 수평계류선이 스내핑(snapping)현상의 발생빈도가 높은데 기인한다.

4. 최대계류장력은 파랑만 있는 경우, co-linear한 경우, 파도와 바람의 방향이 동일하고 조류가 60도 각도를 이루고 작용하는 환경조건의 순서로 크게 나타났다. 그러므로, 천해역에서의 계류시스템의 설계에서는 조류와 바람 및 파도의 복합 환경외력의 작용방향의 조합을 고려한 연구가 필요하다.

5. 계류선 각도가 45도의 대칭적인 계류배치가 최대계류장력이 가장 작게 나타났다. 그러므로, 복합 환경하중에서는 계류선 각도를 대칭으로 배치한 다점 유연부이 계류시스템(multi-point compliant buoy mooring)이 계류장력의 감소를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 복합환경하중에서 부유체의 GM변화에 대해 최대 계류장력값의 차이는 크지 않았다. 향후, 부유체의 회전운동에 관계된 계류점(fairlead)의 위치변화에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

7. 수직 및 수평계류선이 파단된 경우는 그렇지 않은 경우보다 최대장력이 크게 나타났다. 이러한 계류선의 장력증가는 일련의 계류선 파단과 전체 부유체-계류계의 좌초를 초래할 수 있다. 그러므로, 계류설계시 보수적인(conservative) 안전성 관점에서 계류선 파단에 대한 계류장력의 증가를 고려한 위해도 해석(risk analysis)의 수행이 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원의 "한·인도 해양에너기 개발공동연구"과제의 일환으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분들의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍석원 외(1996). "해양에너지 이용 파력발전(60kW)장치 개발 (II)", 연구보고서, 한국전력공사
2. 홍석원 외(1997). "해양에너지 이용 파력발전(60kW)장치 개발(III)", 연구보고서, 한국전력 공사
3. 김진하 외(1998). "부유식 파력발전장치의 계류설계 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회
4. Berteaux(1976) H. O. "Buoy Engineering", John Wiley & Sons, Inc.

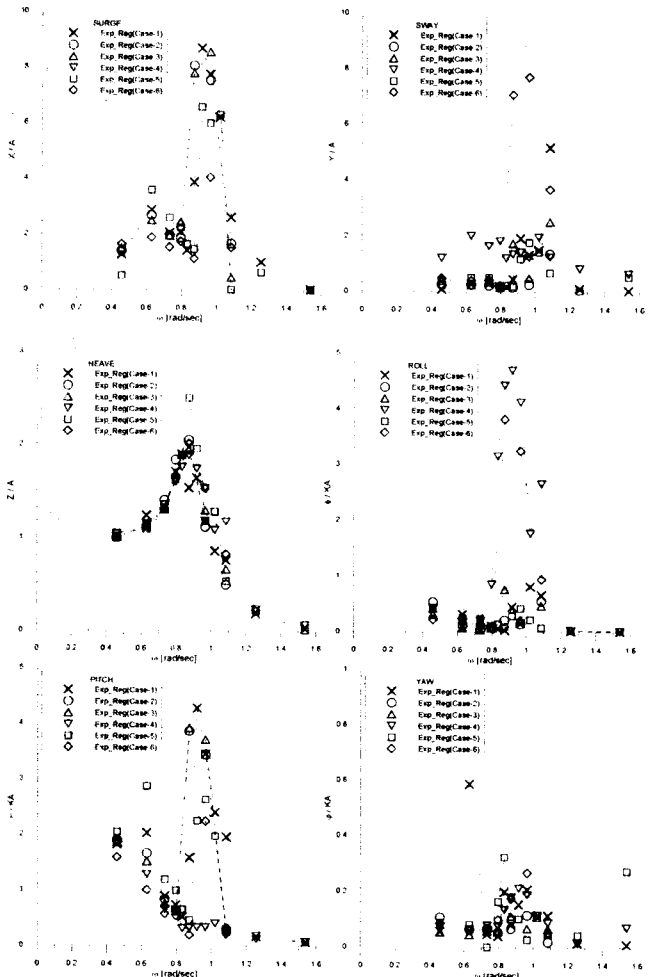

Fig. 9 Motion responses for each case in regular waves

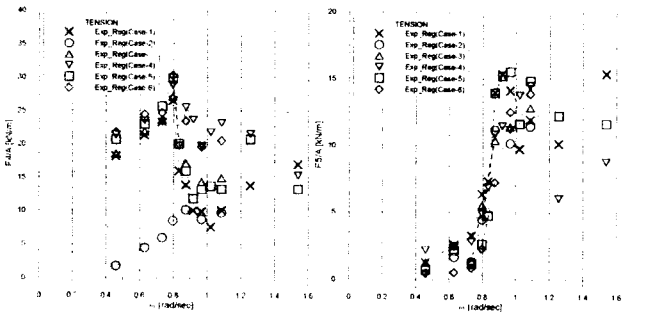

Fig. 10 Comparison of tensions for cases in regular waves

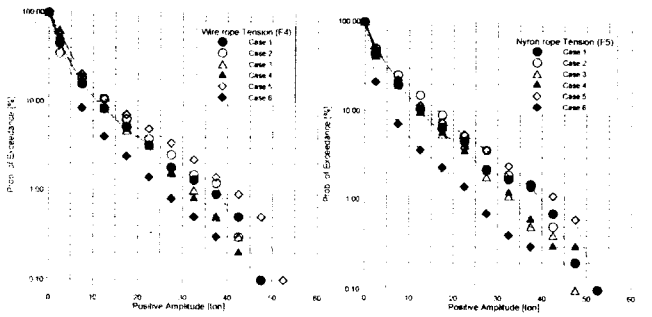

Fig. 11 Probability of peak tensions in irregular wave

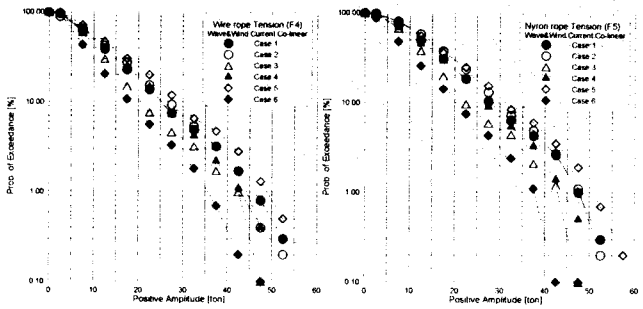

Fig. 12 Probability of peak tensions in co-linear condition

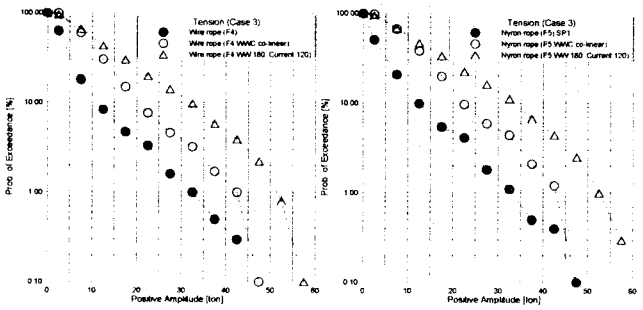

Fig. 13 Probability of peak tensions in Eir1~Eir3(CaseM-3)

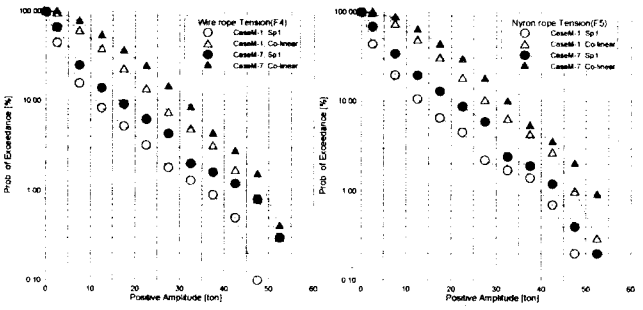

Fig. 14 Probability of peak tensions in Eir1&Eir2(CaseM1&7)