

# 심해계류 모형시험 기법 연구: OTEC 계류시스템의 혼합형 모델링

홍섭 · 김진하 · 홍석원 · 홍사영  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Purnima Jalihal  
National Institute of Ocean Technology, India

## Study on Model Test Technique of Deepwater Moorings: A Hybrid Modeling of A OTEC Mooring System

Sup HONG, Jin-Ha Kim, Seok Won Hong, Sa-Young Hong  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering / KORDI, Daejon 305-600, Korea

Purnima Jalihal  
National Institute of Ocean Technology, India

**KEY WORDS:** Deepwater Mooring 심해계류, Scaled Model Test 축척모형시험, Hybrid Modeling 혼합형 모델,  
OTEC Mooring 온도차발전 계류

**ABSTRACT:** This paper describes an investigation how to carry out model tests of deepwater moorings exceeding the basin depth range. A hybrid mooring model, a combination of mooring lines scaled model and a couple of linear springs, is taken into account as an equivalent substitute of a full depth mooring system. Such an idea is applied to the model test of an OTEC mooring system to be installed in 1000m deep ocean. A 1/25 scaled model test of surface vessel and the upper part of mooring system is performed at ocean engineering basin. Possibility and limitation of the hybrid mooring modeling is discussed.

### 1. 서 론

해저석유 개발을 비롯해서 해양자원 개발을 위한 노력은 더 옥 깊은 심해로 확대되고 있다. 브라질 Campos Basin 등 새로운 해저유전 개발 수심은 1000m를 초과하고 있는 상황이며, 이때 투입되는 부유식생산저장시스템(FPSO)의 계류는 새로운 기술적 도전이 되고 있다. 한편, 대표적인 무한한 청정 해양에 네지인 해양온도차 발전(OTEC)은 표층과 심층수 간의 20°C 이상의 온도차의 확보에 효율적인 부유식 OTEC 시스템의 경우 500~1000m 수심에서의 심해 계류가 큰 문제가 되고 있다.

최근 들어 해저유전 개발의 계류수심이 깊어짐에 따라서 일반적인 체인계류 적용의 한계성을 극복하기 위하여 무거운 체인의 대체요소로 합성로프(synthetic rope) 사용의 기술적 타당성 검증에 관한 노력이 수행되고 있다. 또한, 부유식 OTEC 플랜트의 경우에는 단열성과 유연성이 뛰어난 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 재질의 냉수관(CWP) 설치의 안전성 검증이 핵심적으로 다루어지고 있다.

심해계류 설계를 위해서는 계류부유체와 계류시스템간의 연성을 고려한 통합거동 시뮬레이션 기법이 사용되고 있다. 계류 모형시험은 현존하는 해양수조 크기의 제한 때문에 전체 시스템의 축척모형시험은 현실적으로 불가능하다. 즉, 수심 1000m

심해계류의 경우 축척비 1/50를 적용하여도 깊이 20m인 수조가 필요하게 된다. 이러한 이유로, 해양수조를 보유하고 있는 각 연구기관들은 이론해석 결과의 검증 및 이론모델의 보완 목적이 심해계류 모형시험 기법 적용을 시도하고 있다.

혼합형(hybrid) 모델은 수조 공간의 제한에 따른 불가피한 선택의 하나로서 수조의 기능 및 성능을 고려하여 축척비를 적절히 선택해서 부유구조물과 전체 계류시스템의 상부를 모델링하고 수조 깊이 때문에 축척모델링이 불가능한 하부는 수치 해석 절차를 거쳐서 등가적인 선형스프링의 조합으로 대체하는 방법이다(Watts 1999, Buchner et al. 1999, Clauss and Vannahme 1999).

본 논문에서는 심해계류의 하이브리드 모델링 기법을 한국해양연구원과 인도 해양기술연구소(NIOT)간의 공동연구(홍석원 외 2000) 대상인 부유식 해양온도차발전(OTEC) 계류시스템의 모형시험에 적용함으로써 그 결과를 분석하고 문제점을 토의하고자 한다.

### 2. 혼합형(Hybrid) 계류모델

#### 2.1 모형시험 계획

모형시험의 결과로부터 계류시스템 원형의 거동을 추정할 수 있으려면, 축소모형 및 시험조건과 원형간의 물리적 상사법

칙을 만족시키는 모형시험 기법이 적용되어야 한다.

해상 부유구조물의 동적 거동에 미치는 계류시스템의 영향은 계류복원력과 계류감쇠력으로 구분된다.

일반적으로 실내 수조 내에 계류시스템을 축소 재현하는 데에는 많은 어려움이 따르며, 특히, 수심이 400m 이상이 되면 수조 내에 전체 계류시스템의 축소 재현은 불가능하다.

Fig. 1은 인도 해양기술연구소(NIOT)가 제안한 심해계류 OTEC 계류시스템의 개념을 보여준다. 즉, 냉수관(CWP)을 계류부재로 겸용하는 일점계류(single point mooring) 방식을 취하고 있다.

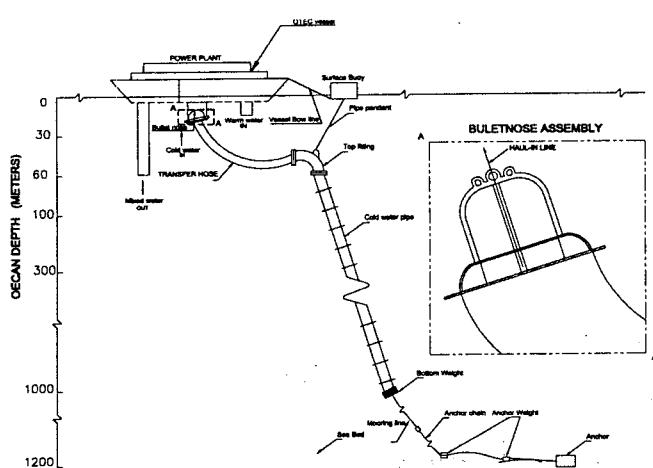


Fig. 1 Concept of NIOT's OTEC System

축수관 시스템의 구성은 다음과 같다.

- CWP: 길이 1070m, 외경 1m, 내경 0.87m, 재질 HDPE
- Transfer Hose: 길이 135m, 외경 0.7m HDPE관 3개
- Vessel bowline: 길이 50m, 중량 126.9kg/m
- Buoy: 외경 7.5m, 높이 6.5m, 배수량 37톤
- Pendant: 길이 31m, 중량 227.8kg/m
- Ballast weight: 중량 6톤
- 계류체인: 길이 650m, 중량 89kg/m
- 싱커: 중량 20톤, 수량 2개

모형시험 기본계획 수립에는 다음의 조건들을 고려하였다.

- 계류동력학의 효과가 최대한 반영된 모형시험
- 축척 효과를 줄이기 위해 가능한 축척비를 줄인다
- 계류부재의 단면의 축소 재현이 용이한 축척비 선정
- 실해역 계류강성의 등가적 재현

## 2.2 혼합형 계류모델

OTEC 플랫폼의 계류시스템에 대한 혼합식 계류모델링의 개념은 Fig. 2에 도시한 바와 같다. 즉, 재현이 가능한 계류시스템의 상층부에 대해서만 정확한 계류모델링 기법을 적용하고, 수조 수심의 제한 때문에 재현이 불가능한 계류시스템의 하부는 잘라내어 등가적 수평 및 수직 스프링으로 대체 구현하는

방안이다.

이와 같은 혼합식 계류모델의 장점은 계류장력이 가장 크게 발생하며 계류작 운동과 부유체 거동 및 유체유동 간의 상호작용이 직접적이고 가장 활발하게 일어나는 계류시스템 상부에 대한 정확한 모델링과 하부 계류복원력 계수를 조합함으로써, 계류부유체의 운동성능과 계류작 장력 발생에 대한 비교적 정확한 추정을 가능케 하는 점이다. 반면, 하부 계류시스템의 운동 및 계류감쇠력의 정확한 재현에는 한계가 있다.

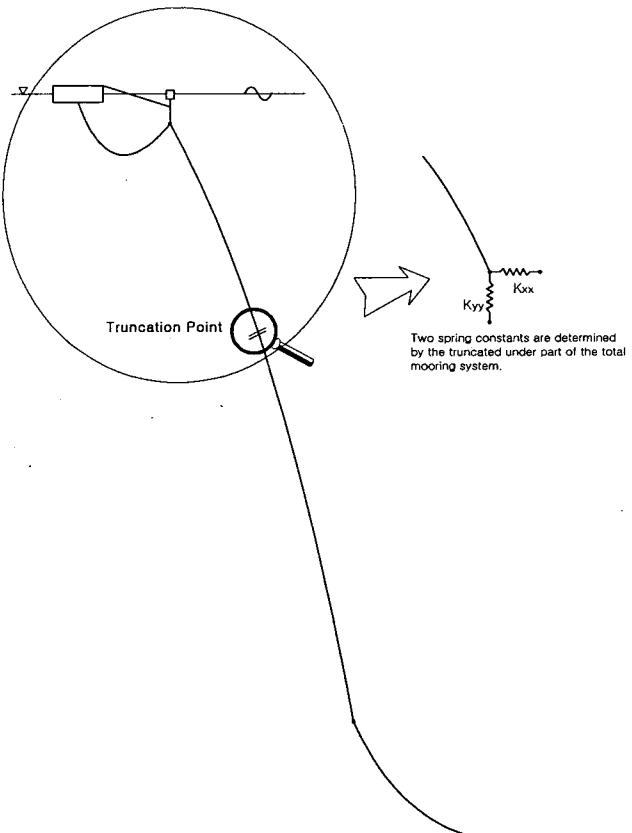


Fig. 2 Concept of hybrid mooring model

## 2.3 모형축척비 선정

한국해양연구원 해양시스템안전연구소가 보유하고 있는 해양공학수조의 조파 수심은 3.5m이고 수조 바닥 중앙부에 위치한 직경 5m의 심수부(Pit)는 12.5m의 수심을 추가로 제공하고 있다.의 제원 및 기능과 계측센서의 정밀도 한계 등을 고려하여 모형축척비를 적절히 선정하여야 한다.

바아지 모형의 적정 중량과 CWP 외경 모사를 위한 합성재료 듀브 제작구매 가능성을 고려하여 모형 축척비를 1/25로 선정하였으며, 냉수축수용 Sump와 온수 축수관 및 해수 방출관을 정확히 재현해 OTEC 바아지 모형을 제작하였다(Table 1).

## 2.4 절단위치 및 하부 계류강성

Fig. 1과 같은 일점식 계류시스템의 계류강성은 환경 외력

중 정적하중(풍력, 조류력, 파표류력) 및 그에 따른 계류시스템의 정적 표류변위에 의해 결정된다. 정적 표류력이 낮은 경우에는 계류강성 또한 매우 낮은 느슨한 계류(slack mooring)가 되고 정적 표류력 증가와 더불어 계류시스템은 팽팽한(taut). 상태로 전환된다. 따라서, 이와 같은 모든 조건에 대한 계류강성의 재현은 매우 어려우며, 각 경우에 대한 모형시험의 조건이 크게 늘어나게 된다.

Table 1 Particulars of NIOT's OTEC Barge

	Prototype	Model
Scale ratio	1	1/25
L <sub>bp</sub> [m]	68.5	2.74
B [m]	16.0	0.64
KG [m]	3.41	0.137
K <sub>xx</sub> (0.2B) [m]	6.4	0.256
K <sub>yy</sub> (0.4L) [m]	17.125	0.685
GM <sub>T</sub> [m]	11.18	0.447
LCG(A.P) [m]	32.842	1.314
Displ. [ton]	1613.5	0.103

본 연구에서는 해양공학수조의 중앙 심수부를 활용하여 최대한 계류시스템 상충부 모델링 범위를 확대하여 절단 위치를 가능한 하부로 선정하고자 하였다. 이를 위해서는 두 가지 항목이 선택의 기준이 되었다.

- CWP 절단위치에서의 계류강성의 재현 가능성
- 심수부내 CWP 평형상태의 재현을 위한 여유공간 확보

이 두 가지 항목은 OTEC 바아지에 작용하는 정적 하중에 따른 계류시스템의 변형과 그때 발생하는 계류강성과 직접적 연관을 가진다.

본 연구에서는 약 100노트 풍속의 황천 시 OTEC 바아지에 600kN 정도의 정적하중이 작용된다고 가정하고 계류시스템에 대한 준정적 해석을 수행하였다. 이때, CWP의 정적 형상은 약 42.5도의 수평경사각을 가지는 것으로 확인되었으며, 심수부로부터 약 42도로 해수면으로 올라오는 CWP 모형이 심수부 가장자리 벽에 닿지 않고 여유 공간을 확보 할 수 있는 CWP 상충부 길이는 약 212m 정도로 판단되었다.

준정적 해석 결과로부터 CWP 상단인 이송관과의 연결부로부터 각각 196.7m, 213.6m, 230.6m 떨어진 3개 절점 위치의 수평 및 수직 변위와 그때의 수평 및 수직 장력성분을 분석함으로써 세 위치에서의 수평 및 수직 계류강성을 알아보았다. Fig. 3은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

CWP 상단으로부터 212m 떨어진 절단점에서의 계류강성은 Fig. 3으로부터 Table 2와 같이 선정하였다.

Table 2 Truncated Mooring Stiffnesses

Item	Prototype	Model (1/25)
Horizontal Mooring Stiffness	12.0 kN/m	19.6 g/cm
Vertical Mooring Stiffness	24.3 kN/m	36.7 g/cm
Truncated Length of CWP	212 m	8.48 m

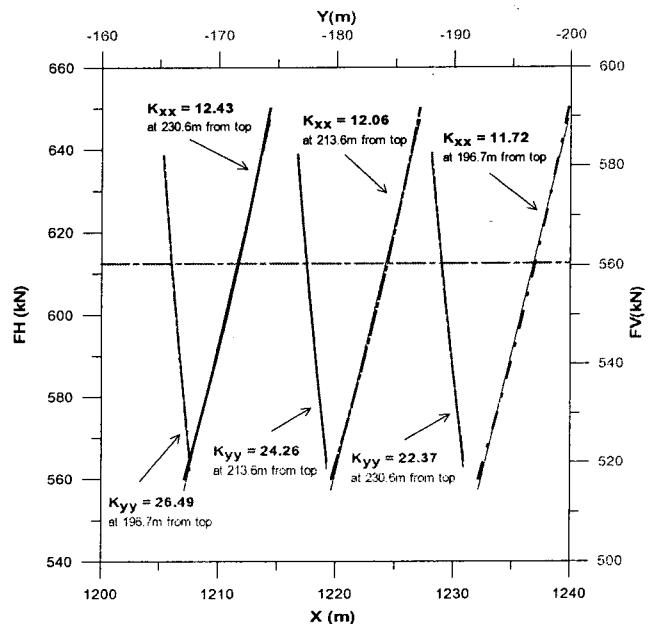


Fig. 3 Mooring Stiffnesses at Three Points of CWP

## 2.5 냉수관/이송관 및 계류체인의 상사모델

계류 모형시험을 위하여 계류시스템을 구성하는 냉수관 및 이송관은 단면의 굽힘강성을 무시하고 축강성만의 상사 모델링하였다. 이때, 축척계류모형은 다음의 상사조건들을 만족시키도록 하였다.

- 기하학 조건
- 동력학 조건
- 축탄성 조건

## 2.5 계측항목 및 계측센서

본 모형시험 계측항목과 사용된 계측센서는 다음과 같다.

### OTEC 바아지 운동변위

- 스트랩다운(가속도계 7개): Strap-down에 의한 바아지 파주기 운동변위 계측
- 광학센서(카메라, LED 3개): 장주거 표류운동 계측
- RBM(용량식 파고계 3개): 선수 및 선측 상대파고 계측
- 2분력계: 선미부 Counter Weight(정적하중 모사) 계측

### 계류장력

- 선수계류선 장력센서(방수형 1축 Loadcell 1개): Bowline의 장력 계측
- CWP 하단 계류스프링 장력센서(방수형 1축 Loadcell 2개) 입사파
- 파고계(용량식 3개) : 입사파고, 회절 및 반사파고 계측

## 2.6 하이브리드 계류모형의 제작 및 설치

Table 3은 설계된 모형의 목표치와 제작된 모형의 실측치간의 오차를 비교 보여준다. 한편, 절단 하부의 계류강성을 등가

시킬 수평 및 수직 스프링상수(Table 2)는 각각 26.3g/cm와 37.7g/cm로 구현되었다. Fig. 4는 제작된 계류모형으로 구성된 전체 하이브리드 계류모델이 모형시험수조내에 설치되는 상황을 도시적으로 나타내고 있다. Fig. 5는 수조 심수부내에 턴테이블에 설치된 수평 및 수직 스프링의 연결 상황을 보여준다.

Table 3 Manufacture Errors of Mooring Model Items

Mooring Item	Target		Measured		Error (%)
	L[m]	W[g]	L[m]	W[g]	
CWP	8.48	-19.8 (in water)	8.48	-16.0	19.2
Transfer Hose	5.4	69.2 (in water)	5.4	72.0	4.1
Pendant	1.2	380.4 (in air)	1.2	395	3.8
Howser line	2.0	347.8 (in air)	2.0	350	0.6

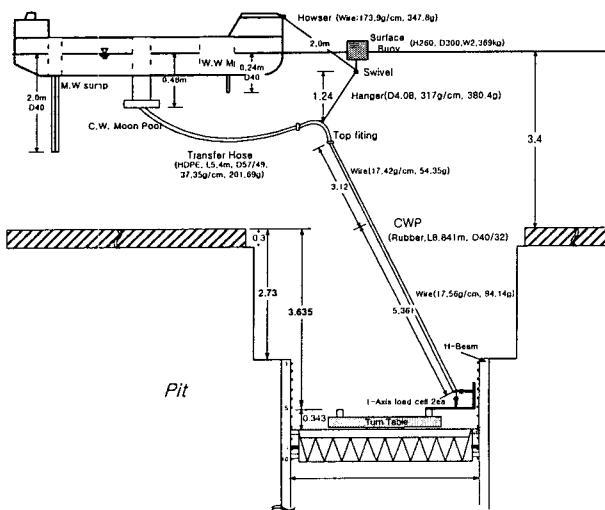


Fig. 4 Lay-out of Hybrid Mooring Models in Test Basin

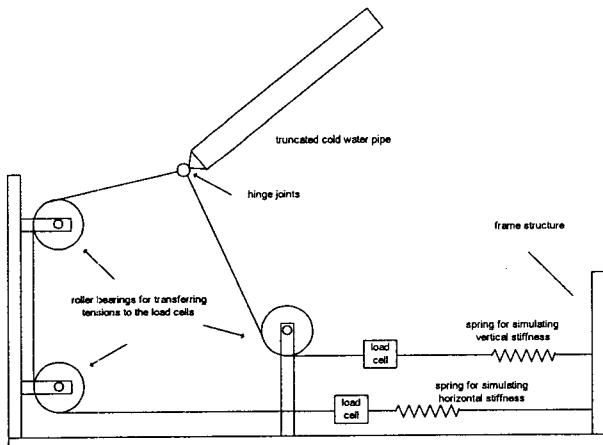


Fig. 5 Mooring Springs at Truncation Point

### 3. 모형시험 및 결과

#### 3.1 모형시험 조건

OTEC 플랫폼의 혼합식 계류모델에 대한 2가지 불규칙파 중의 계류성능 계측시험을 수행하였다(Table 3.5).

Table 4 Wave Conditions of OTEC Model Tests

Sea State	SP1 (operation. cond.) Prototype/Model	SP2 (storm cond.) Prototype/Model	Remarks
H <sub>1/3</sub>	4.25m / 0.17m	7.0m / 0.28m	
Modal period(T <sub>p</sub> )	9.51s / 1.902s	15.0s / 3.0s	T <sub>p</sub> /T <sub>1</sub> =0.773

바아지 모형에 작용하는 정적 하중은 실선의 경우 600 kN에 해당하는 중량을 미세 와이어와 도르래를 이용하여 바아지 모형 선미에 연결함으로써 모사하였다.

이와 같은 정적하중의 작용 모델은 일점식 계류의 경우 적지 않은 구속조건이 된다. 즉, 실해역에서 조류/해류와 바람의 영향과 계류시스템 간의 상호작용에 의해 전체 OTEC 플랫폼 시스템이 바람 및 해류 방향을 중심으로 좌우로 천천히 움직이는 일명 *Fish Tailing* 현상이 구속된다.

하지만, 이러한 모형시험 조건의 제한은 현재 해양공학수조의 기능상 파도와 조류의 동일 방향 재현이 불가능하기 때문에 불가피하였다.

Fig. 7은 수조에 설치된 OTEC 계류모형시험 상황을 보여주는 사진이다.

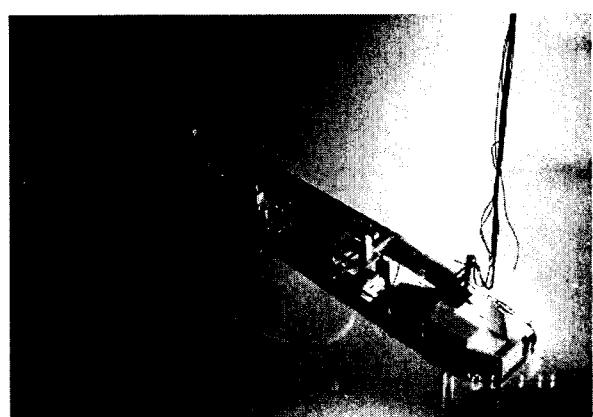


Fig. 7 OTEC Barge Model Installed in Test Basin

#### 3.2 모형시험 및 결과 분석

Fig. 8은 구현된 하이브리드 계류모델의 정적하중-표류변위 시험 계측결과를 보여준다. 혼합식 계류시스템의 계류강성은 53.1 g/cm이며, 실선의 경우 3.32 ton/m에 해당된다.

Fig. 9a와 9b는 불규칙파 중 OTEC 계류 바아지의 거동을 보여주는 순간 사진의 일례이다.

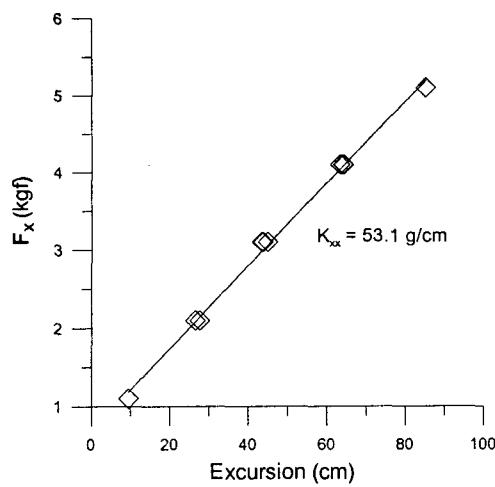


Fig. 8 Load-Offset Test Result

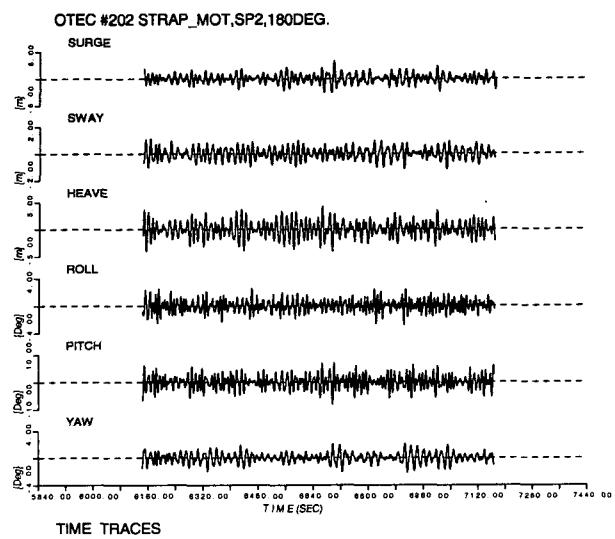


Fig. 10 A Time Series of Measured Motion Data At SP2

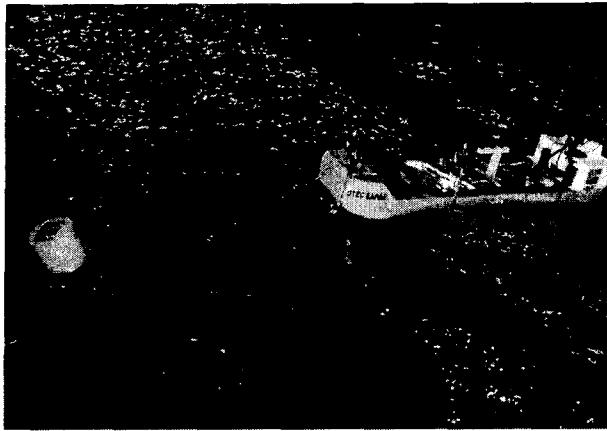


Fig. 9a A Snapshot of OTEC Barge Motion in Waves

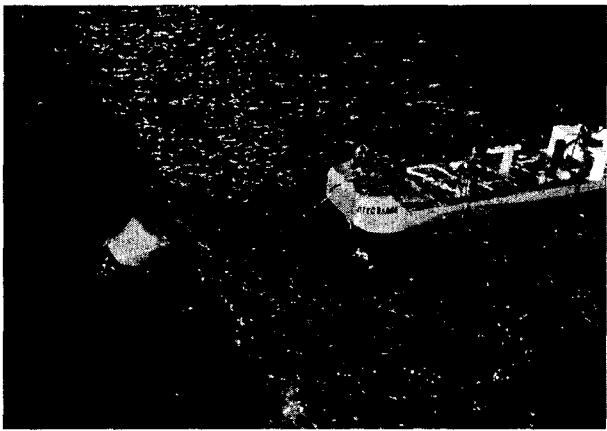


Fig. 9b A Snapshot of OTEC Barge Motion in Waves(continued)

Fig. 10 - Fig. 12는 각각 폭풍조건(SP2)에서의 입사파에 대한 바azzi 운동변위와 상대파고 및 계류장력의 시계열 취득자료를 나타낸다.

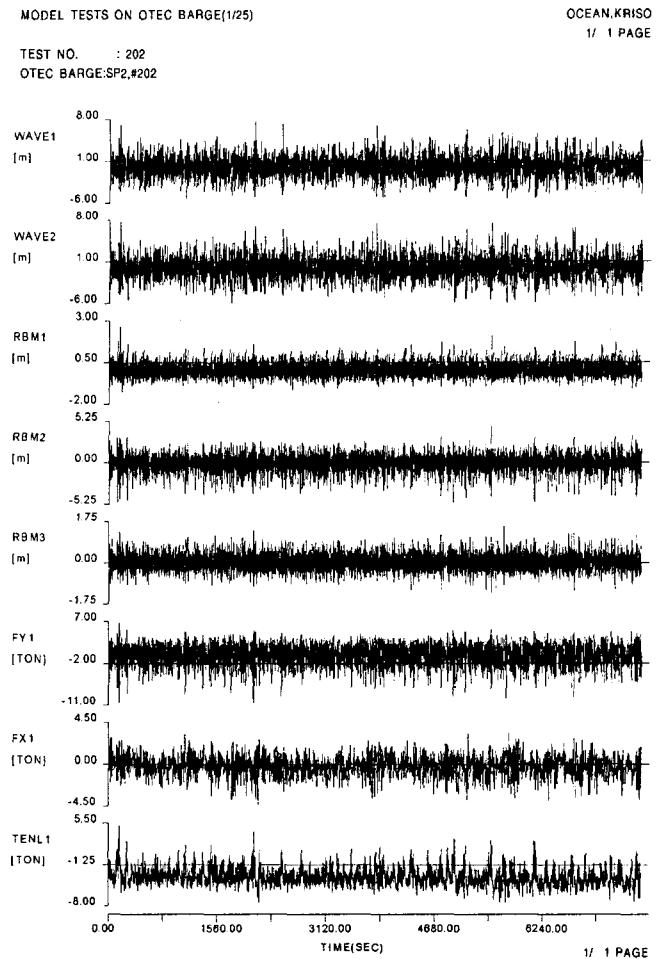


Fig. 11 A Time Series of Measured Data At SP2 Condition  
: Incident Wave Height, Relative Motions, Stern-line Tensions, Horizontal Spring Tension

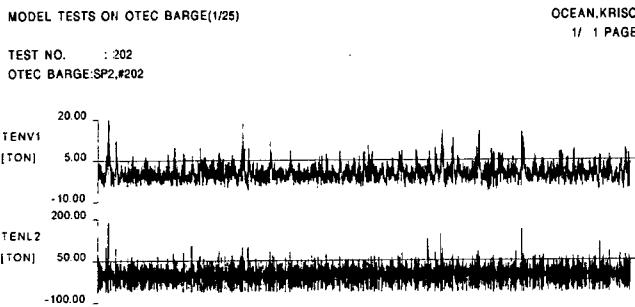


Fig. 12 A Time Series of Measured Data At SP2 Condition  
: Vertical Spring Tension and Bowline Tension

바아지 모형의 파랑운동응답과 계류장력에 관한 통계 해석은 Zero Up-Crossing 방법에 의해 수행되었으며, 통계적 유의값들은 각각 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 5 Measured Barge Motions

	Significant Double Amplitude of Motions	
	SP1 (operation. cond.)	SP2 (storm cond.)
Surge (m)	1.53	5.20
Sway (m)	0.50	1.77
Heave (m)	2.10	5.63
Roll (deg)	2.36	3.16
Pitch (deg)	6.76	8.84
Yaw (deg)	0.77	2.64

Table 6 Measured Mooring Tensions

	Significant Dynamic Tensions (Ton)	
	SP1 (operation. cond.)	SP2 (storm cond.)
Bowline Tension	85.93	96.73
$T_H$ at Trunc. Pos.	2.35	4.15
$T_V$ at Trunc. Pos.	4.19	7.84

#### 4. 결 론

본 논문에서는 제한된 수조 수심에서의 심해계류 모형시험 수행 방법의 하나인 하이브리드 모델링 기법을 부유식 OTEC 시스템의 일점 계류에 대하여 적용하여 모형시험을 수행함으로써 심해계류 안전평가에 활용 가능한 모형시험 및 계측기법을 소개하였다.

본 논문의 하이브리드 계류모델링에 의한 심해계류 모형시험은 계류설계 안전 평가에 적용할 수 있는 가능성과 한계점으로 동시에 가진다.

우선, 하이브리드 모델링을 통하여 가장 극심한 계류장력이 발생하는 부유구조물과 계류시스템간의 연결부 영역을 정밀하게 모델링하고 불가피하게 포기해야하는 계류시스템 하부의

계류복원 특성을 재현함으로써 심해계류에 있어서 매우 중요한 계류 동력학의 왜곡(distortion)을 제한하는 점은 하이브리드 모델링 기법의 대표적 가치로 사료된다.

하지만, 잘려진(truncated) 계류시스템의 하부 영역의 동적 거동 및 계류감쇠력이 제외됨으로써 부유구조물의 파랑 운동변위 및 아울러 운동변위의 영향을 받는 계류장력의 예측결과의 신뢰도 향상을 위한 지속적 연구가 필요로 된다.

본 혼합형 모델링 기법은 현재 연구개발 중인 심해계류 시스템 동력학 해석을 위한 시뮬레이션 기법과 연계함으로써 보다 향상된 모형시험 기법으로 정립될 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원에 의한 한·인도 해양에너지 개발 공동연구과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 홍석원 외 (2000), “한·인도 해양에너지 개발 공동연구”, 해양수산부 지원 연구사업.  
 Buchner, B., Wichters, J.E.W. and de Wilde, J.J. (1999). “Features of the State-of-the-art Deepwater Offshore Basin”, Proc. of the 31st Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC 10841, pp. 12.  
 Clauss, G.F. and Vannahme, M. (1999), “An Experimental Study of the Nonlinear Dynamics of Floating Cranes”, Proc. 9th ISOPE Conference, Brest, France.  
 Watts, S. (1999), ‘Hybrid Hydrodynamic Modelling’, Journal of Offshore Technology, The Institute of Marine Engineers, London, February, pp. 13-17.

1999년 11월 17일 원고 접수

1999년 12월 20일 수정본 채택