

## 강제동요 시험을 이용한 모형 계류삭의 동적 응답 연구

조석규\* · 홍사영\* · 홍섭\* · 김현조\*\*

\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

\*\*매사추세츠공과대학 해양공학과

# A Research on Dynamic Tension Response of Model Mooring Chain by Forced Oscillation Test

SEOK-KYU CHO\*, SA-YOUNG HONG\*, SUP HONG\* AND HYUN-JOE KIM\*\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI, Daejeon, Korea

\*\*Department of Ocean Engineering, MIT, USA

**KEY WORDS:** Catenary Mooring 카테나리 계류, Chain 체인, Dynamic Response 동적 응답, Force Oscillation Model Test 강제동요 모형시험

**ABSTRACT:** A series of forced oscillation tests on a model mooring chain was carried out to investigate dynamic tension characteristics. The model test was conducted at two different water depths to gather basic data for a 'truncated mooring test' and 'hybrid mooring test'. The truncated and hybrid mooring tests are important for overcoming the limitation of water depth that existed in previous model tests. The resultant tension RAO provides a good possibility of approximation of dynamic tension by equivalent weight adjustment for different water depths. Because the hybrid mooring test is an adequate combination of model test and simulation, an accurate simulation model for the mooring system is essential. The simulation results show good agreement with model test results

### 1. 서 론

최근에 석유개발회사들은 기존에 개발하지 않던 심해역(약 800m~3000m)에서의 oil field를 개발하는데 노력을 증대시키고 있다. 이러한 작업이 이루어지고 있는 곳으로는 Norwegian Sea, Gulf of Mexico, Brazil 주변 그리고 서부 아프리카 지역을 들 수 있다. 이렇게 심해역으로 작업영역이 확대되면서 실험실에서 수심의 제한으로 전체 시스템에 대한 모형시험을 통한 검증작업은 제약을 받을 수밖에 없다. 일반적으로 지금까지 실험실에서는 모형 스케일이 1/40~1/100를 써왔는데 이러한 모형스케일로는 현재의 시설로서 심해역을 만족시킬 수 없다. 따라서, 최근에 심해 계류 시험을 위해서 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중 몇 가지 제안된 방법들로서는 1/200의 'ultra small scale'에 대한 모형시험을 수행하거나, truncated mooring system에 대한 시험을 수행하고 수치계산을 통해서 실제 수심까지 확대하는 등의 방법이 있다(Stansberg and Oritsland, 2000; Buchner and Wichers, 1999).

현재 본 연구소가 보유중인 해양공학수조는 수심이 최대 3.5m로서 네덜란드의 MARIN이나 노르웨이의 MARINTEK이 보유한 해양공학수조의 1/3의 수심이기에 때문에 계류모형시험

에 있어서의 수심의 제약은 더욱 심각할 것으로 생각된다.

따라서, 이러한 수심의 제약을 극복하는 모형시험 기법의 개발 및 수치계산 프로그램의 개발을 기반으로 하여 모형시험과 수치계산을 결합한 형태의 hybrid 계류 해석기법을 적극적으로 개발해 나가야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 기본적인 실험의 하나인 계류삭에 대한 강제동요 모형시험을 통하여 모형 계류시스템의 동적 특성 데이터를 확보하고자 한다. 또한, 심해계류시스템의 모형시험을 위한 기초적인 데이터를 확보하기 위하여 7.0m와 3.5m 2배 차이가 나는 수심에 대해서 계류삭이 수심에 대한 등가무게를 가지도록 하여 동적tension의 특성을 파악하였다. 그리고, 모형 chain에 대해서는 수치해석을 수행하여 결과를 비교함으로써 해석 프로그램의 성능을 검토하였다.

### 2. 강제동요 시스템의 구성 및 모형 계류삭의 선정

계류삭의 모형시험을 위해서는 모형시험을 위한 모형 chain의 선정, 강제동요장치의 준비와 모형 계류삭에 걸리는 힘을 계측하기 위한 장력계를 포함한 계측시스템의 구성으로 크게 나눌 수 있다. Fig. 1에서 계류삭의 강제동요시험의 개략적인 개념도를 나타내었다.

#### 2.1 강제 동요 시스템의 구성 및 센서의 구성

강제동요장치는 선박용 강제동요 장치로서, 수평방향으로 1축, 수직방향으로 2축을 동시에 움직일 수 있는 장비이다(Fig. 2). 계

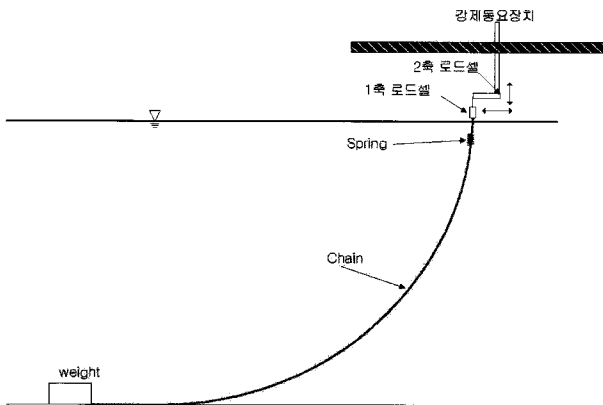
제1저자 조석규 연락처: 대전광역시 유성구 사서함 23  
042-868-7501 skcho@kriso.re.kr

류삭의 강제동요시험에서는 수직방향 1축과 수평방향 1축을 독립적으로 사용하여 수평과 수직방향의 강제동요를 수행하였다. 센서와 계류삭은 수직축에 설치된 봉의 하단에 설치되며 봉의 높이를 조절하여 계류삭과 수면과의 상대 거리를 조절하였다. 강제동요장치는 동요주기 2Hz에서  $\pm 1.5\text{cm}$  정도의 stroke를 안정적으로 가지며, 최대 stroke는 수평방향은  $\pm 6\text{cm}$  수직방향은  $\pm 8\text{cm}$  이다.

수평방향과 수직방향에 포텐서미터를 설치하여 매 시험마다 stroke와 주기를 계측하였다. 시험에 사용한 stroke의 크기와 동요 주기를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 'real frequency'는 포텐서미터를 이용하여 계측한 동요주기를 나타낸다. 또한 모형 chain 과 polyester rope는 10kg weight를 끝단에 설치하여 바닥에 고정하여 움직이지 못하도록 하였다.

**Table 1** Specifications of frequency and stroke in forced oscillation test

Nominal Frequency (Hz)	Real Frequency (Hz)	Stroke Amplitude (cm)
0.4	0.3891	6., 4., 2.
0.5	0.5035	6., 4., 2.
0.6	0.6113	6., 4., 2.
0.7	0.7133	6., 4., 2.
0.8	0.7776	4., 2., 1.
0.9	0.9506	4., 2., 1.
1.0	1.0700	4., 2., 1.
1.2	1.2225	2., 1.

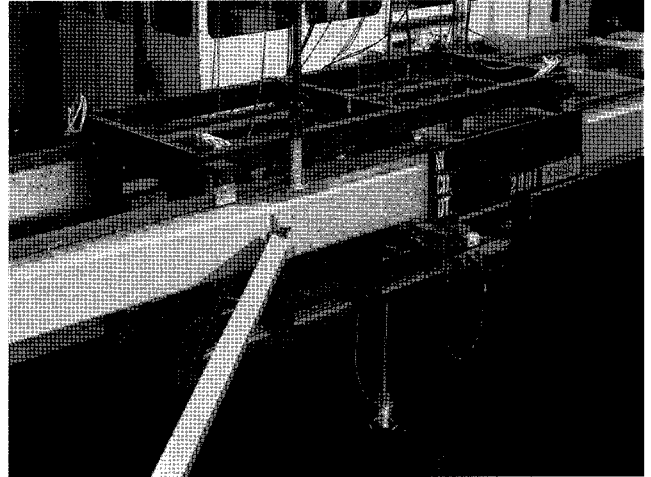


**Fig. 1** Schematic diagram of forced oscillation system for catenary mooring of chain

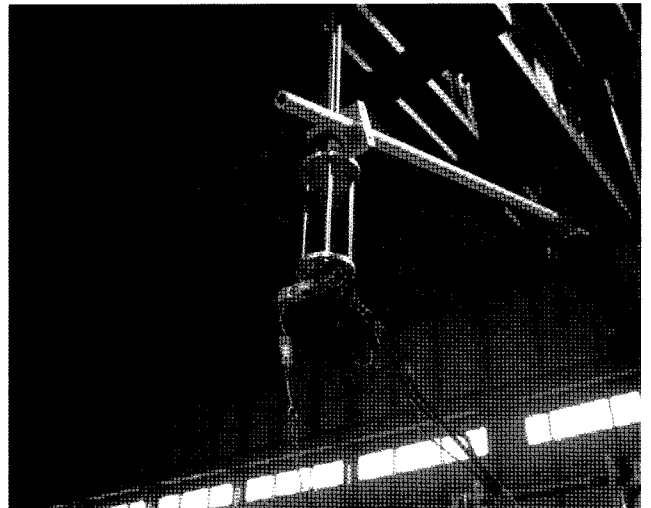
이번 시험에서 계측항목은 계류삭에 걸리는 인장력이며, 이를 계측하기 위하여 2분력계와 1축 장력계로 힘을 계측하였다. 1축 장력계로 직접 계류삭에 걸리는 인장력을 계측하였으며, 2분

력계는 계류삭에 걸리는 힘을 계측하고, 이로부터 구한 인장력과 1축 로드셀로 계측한 인장력의 크기를 비교하였다(Fig. 3).

2분력계는 자체 하중만으로 강제동요시 동적 힘이 계측되므로 이러한 성분을 없애주기 위하여 로드셀만 설치한 후 단독 강제 동요시험을 수행하여 이러한 동적성분을 계측하고 후에 계측한 계류삭에 걸리는 힘에서 빼주었다.



**Fig. 2** Forced oscillator



**Fig. 3** two components loadcell with a model chain

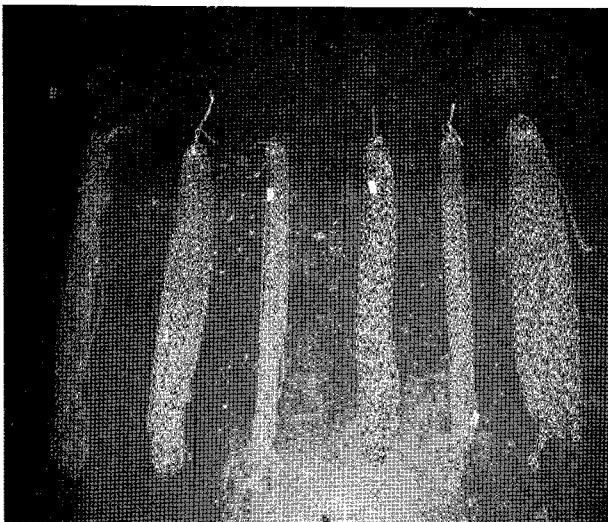
**2.2 모형계류삭의 선정**

모형 chain은 실제 계류삭의 특성을 모사하기 위해서 'Deepstar FPSO (Wichers and Devlin, 2001)'에서의 깊이 915m(3000ft)에 대해서 설계된 open link, 지름 90mm, G4 등급의 chain을 대상으로 삼았다. 각기 무게와 크기가 다른 6종류의 chain(Fig. 5)중에서 대상 chain의 수중무게에 대하여 1/47에 해당하는 모형 chain을 선택하였다. 모형 chain의 무게 특성은 Table 2에 나타나 있다. 앞의 축척비에 의하면 본시험에서의 수심 7m, 3.5m는 실선에서 각각 330m, 165m에 해당한다. chain의 axial stiffness(EA)는 맞추지 않았다. 모형시험에서

의 pretension은 MBL( Maximum Break Load )의 10, 20, 30%를 기준으로 시험을 수행하였다.

**Table 2** Measured weight characteristics of a model chain

weight in air per unit length (kg/m)	weight in water per unit length (kg/m)	ratio between weight in air and water
0.07466	0.06485	0.8698



**Fig. 4** Photograph of model chains

**2.3 Truncated Mooring Test**

현재 당 연구소가 보유중인 해양공학수조의 수심(최대 3.5m)에서 1/60 모형선을 가정하면 실험 가능한 실제 수심은 대략 200m 정도이다. 모형시험시 충분한 수심을 확보하기 위하여 MARINTEK의 "Verideep" 프로젝트에서와 같이 1/200 모형까지 제작하여 시험하는 시도가 현재 이루어지고 있다 (Stansberg and Oritsland, 2000). 하지만, 현재 해상에서 800m에서 3000m 까지의 수심에서의 작업을 한다고 하면, 이러한 수심에서의 계류시스템을 모형시험을 할 수 있는 해양공학수조는 존재하지 않으며, 따라서, 제한된 수심에서 실제의 계류시스템을 모사하기 위한 여러 가지 방법들이 연구되고 있다 (Buchner and Wichers, 1999).

그 중 하나의 아이디어는 높은 수심의 계류시스템을 제한된 수심에서 touch-down 지점 근처에서 자르고 스프링을 삽입하여 정적 및 동적운동 특성을 맞춰주는 것이다(홍석원 등, 2000; 홍섭 등, 2001).

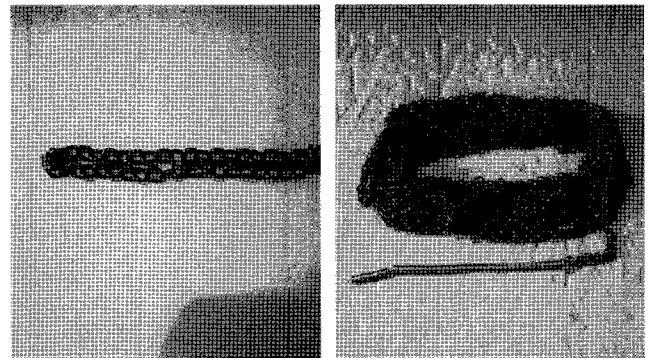
하지만, 이러한 방법은 사전에 충분한 계산결과와 모형시험의 자료가 축적이 되어 있어야 가능하므로, 본 연구에서는 네덜란드의 MARIN연구소에서 제안한 방법(Aalbers and Merchant, 1996)을 사용하여 수심의 변화에 따른 정적/동적

운동 특성을 살펴보기로 한다. 즉, chain을 수심의 비에 맞게 단위길이당 무게를 맞춰주는 것이다.

예를 들면, 7.0m와 3.5m 수심에서 시험을 수행한다고 하면, 7.0/3.5 = 2 즉, 수심 3.5m에서 chain의 단위길이당 무게를 2배로 무겁게 한다. 이렇게 하면 적당한 static 하중을 맞출 수 있으며, inertia에 의한 동적 하중을 모사할 수 있게 해준다. 반면 작은 수심에서 chain은 suspended 길이가 작기 때문에 동적하중에 대한 drag force의 영향이 작게된다는 단점이 있다.

본 시험에서는 수심 7.0m 와 3.5m의 무게비가 2이기 때문에 7.0m 수심에서 사용한 chain을 2중으로 겹쳐서 무게를 2배로 하고 강제동요 시험을 수행하여 결과를 살펴보았다. Fig. 5에 chain을 2중으로 겹쳐서 고정된 모형을 나타내었다. 겹쳐진 chain은 약 5cm 간격으로 서로 고정하였다.

수심 7.0m는 당연구소가 보유하고 있는 예인수조에서 시험을 수행하였으며, 3.5m 수심은 해양공학수조에서 시험을 수행하였다.



**Fig. 5** Photograph of the model chain in 3.5m water depth

**3. Chain 계류삭의 강제동요 모형시험**

**3.1 Bollard Pull Test**

강제동요 시험 이전에 bollard pull (static pull-out)시험을 수행하였다. Bollard pull 시험에서는 주어진 pretension에 대해서 계류삭 상단의 위치를 일정하게 변화를 주면서 계류삭에 걸리는 tesnsion을 계측하였다. 수심 7.0m 의 경우 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있으며, offset이 커지면서 인장력이 급격하게 증가하는 catenary 특성을 잘 보여주고 있다.

수심 3.5m, chain의 경우에는 chain의 무게가 수심 7.0m의 2배인 경우에 대하여 스프링을 삽입/삽입하지 않는 경우에 대하여 bollard pull 시험을 수행하였다. 1/2로 감소한 수심에 대해서 무게가 2배로 증가하였기 때문에 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 bollard pull 시험의 결과는 서로 일치하지 않으며, 3.5m 수심에서 더욱 큰 변화량을 갖게된다. 이러한 정적특성을 맞춰주기 위해서 적절한 stiffness의 선형 스프링을 삽입하여야 하는데, 본 시험에서는 40cm/kg의 스프링으로 높은 수심에서의 정적특성을 맞출 수 있었다. 하지만, 이러한 선형 스프링의 삽입은 동적 응답을 왜곡시키기 때문에 적절한 위치와 스프링의

stiffness를 선택하여야만 한다. 본 연구에서는 스프링의 영향을 없애기 위하여 스프링을 삽입하지 않고 강제동요 시험을 수행하였다.

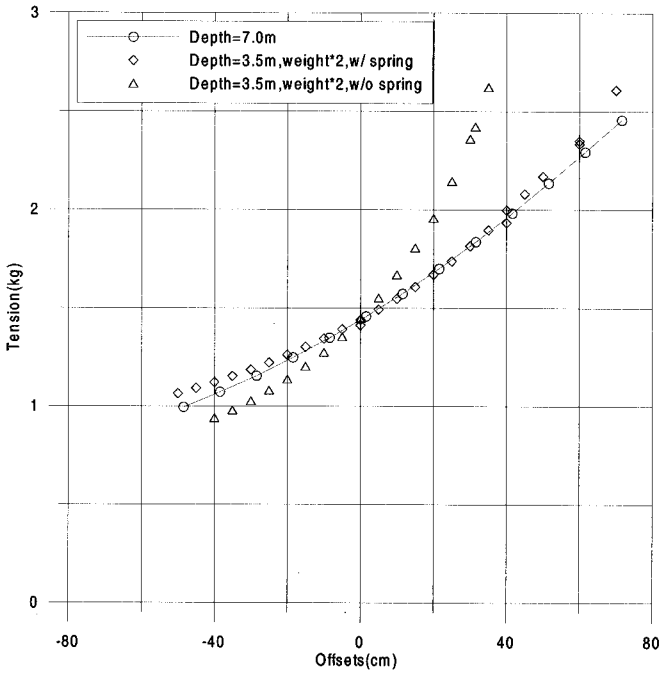


Fig. 6 Result of bollard pull test for the model chain

3.2 모형 계류사의 강제동요 시험 결과

Fig. 7~8 에서는 pretension 2.41kg에서 다른 수심에 대한 인장력 RAO를 동요주파수에 대해서 비교한 결과를 보여주고 있으며, Fig. 9~16 에서는 수심 7.0m와 3.5m에서의 강제동요 시험에서 나온 인장력 RAO를 pretension에 대해서 나타내고 있다.

결과를 보면 stroke의 크기, 강제동요주기 및 pretension에 대하여 인장력 RAO가 차이가 남을 알 수 있다. 일반적으로 시뮬레이션에서 동적 영향을 무시하고 quasi-static으로 계산하는 경우에는 stroke의 크기, 강제동요주기 및 pretension에 대하여 인장력 RAO는 일정한 값을 가지는 것으로 가정하게 된다. 하지만, 결과에서 볼 수 있듯이 동적영향에 의하여 stroke의 크기, 동요주기 및 pretension에 대하여 인장력 RAO는 다른 값을 가지게 되며, stroke의 크기, pretension이 커지면서 그 응답도 커지는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 7~8에서 볼 수 있듯이 동요주파수(Hz)가 커지면서 응답도 커지게 되며 인장력 RAO는 동요주파수에 대하여 2차항으로 근사가 되는 것으로 나타났다.

2배 수심에 대해서 무게를 맞춘 chain에 대한 인장력 RAO는 예상한 바와 같이 비교적 일치함을 알 수 있었다. 특히, 저주파수, pretension이 작은 경우에는 일치도가 높음을 알 수 있다. 따라서, 수심이 다를 경우 등가한 무게를 가진 chain으로서 인장력의 동적응답을 근사시킬 수 있음을 알 수 있다.

강제동요 방향에 대한 영향은 같은 진폭과 주기에서 수평방향의 인장력 RAO가 수직방향의 인장력 RAO보다 크게 나타

나고 있다. 수평방향의 인장력 RAO의 경우 pretension이 작고 stroke가 작은 경우 stroke에 대하여 불안정한 결과를 보여주는데 반해 수직방향의 강제동요에서는 이러한 현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 수평방향의 인장력이 수직방향의 인장력에 비해서 크게 나타나고 불안정한 이유는 계류사의 운동 궤적이 커지기 때문에 생기는 유체동역학적인 힘과 강제동요 장치의 기계적인 진동에 의한 것이라고 사료된다.

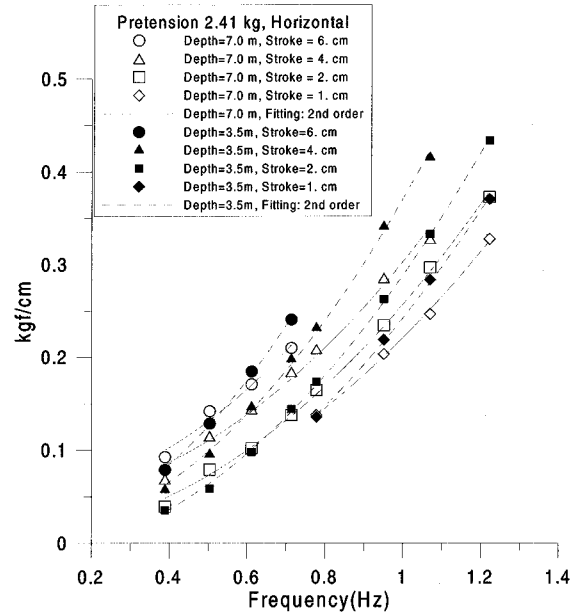


Fig. 7 Comparison of tension RAOs of the chain due to horizontal forced oscillation with variation of water depth and chain weight

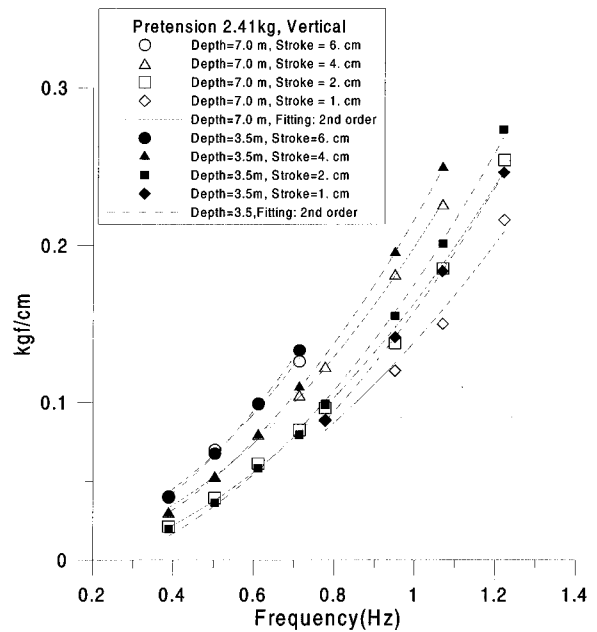


Fig. 8 Comparison of tension RAOs of the chain due to vertical forced oscillation with variation of water depth and chain weight

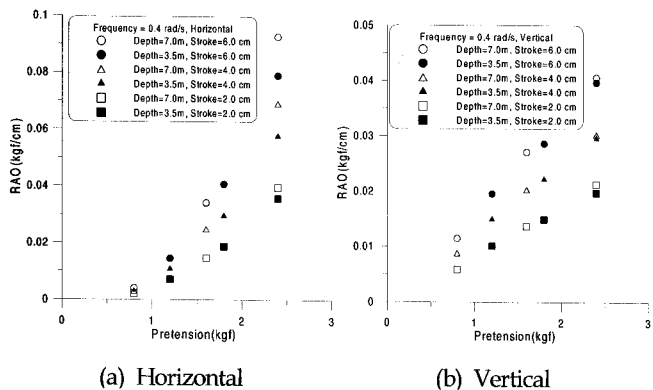


Fig. 9 Tension RAOs of the chain at frequency 0.4Hz

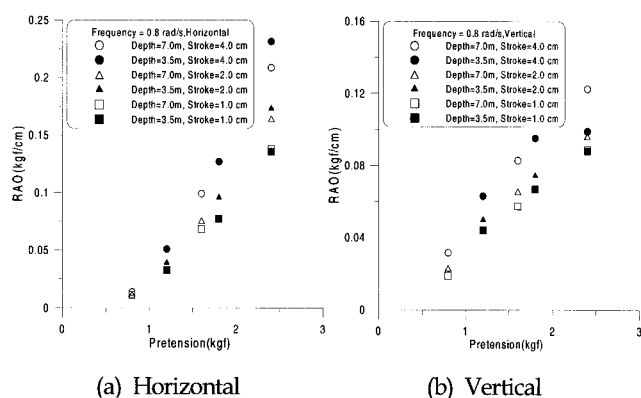


Fig. 13 Tension RAOs of the chain at frequency 0.8Hz

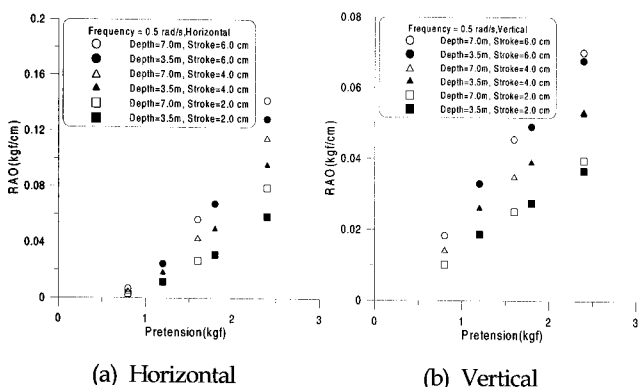


Fig. 10 Tension RAOs of the chain at frequency 0.5Hz

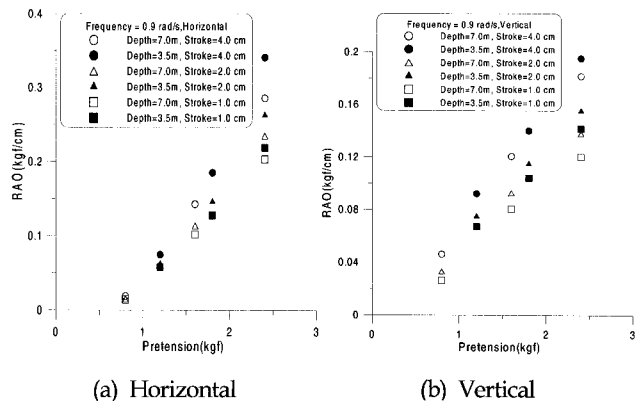


Fig. 14 Tension RAOs of the chain at frequency 0.9Hz

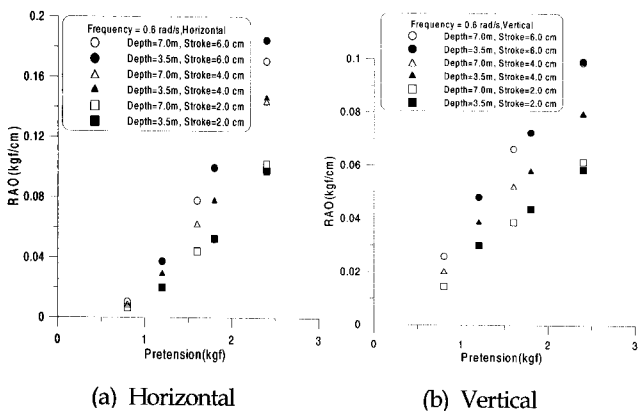


Fig. 11 Tension RAOs of the chain at frequency 0.6Hz

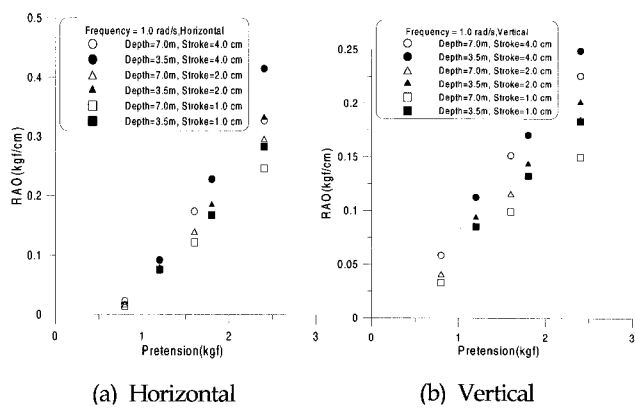


Fig. 15 Tension RAOs of the chain at frequency 1.0Hz

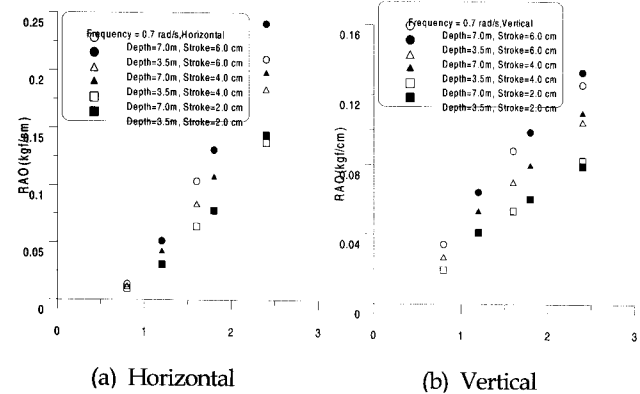


Fig. 12 Tension RAOs of the chain at frequency 0.7Hz

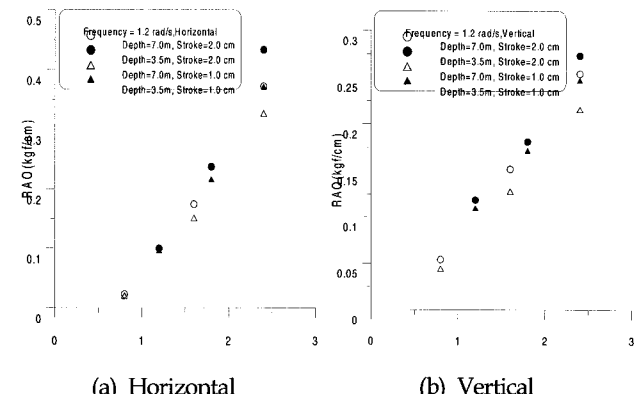


Fig. 16 Tension RAOs of the chain at frequency 1.2Hz

### 4. Chain 계류삭의 강제동요 시뮬레이션

#### 4.1 계류삭의 강제 동요 시뮬레이션 프로그램

Fig. 17는 계류삭의 동력학 문제 정식화를 위한 전체좌표계와 국부좌표계 및 두 좌표계의 단위벡터,  $(\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3)$ 와  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ 간의 좌표변환 오일러 각( $\theta, \phi$ )의 정의를 보여준다.

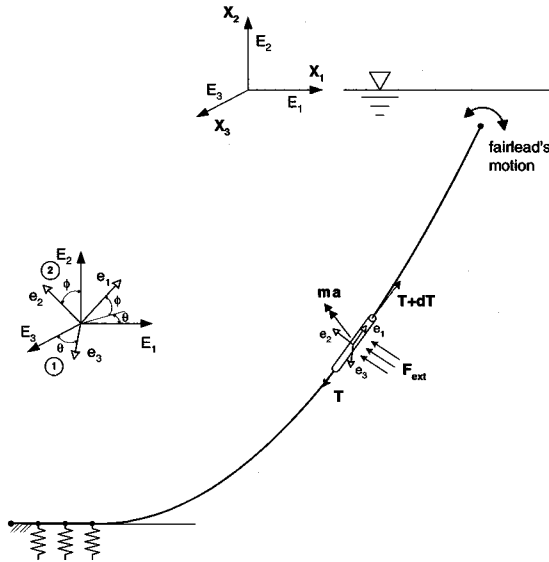


Fig. 17 Coordinates systems and Euler angles for formulation of mooring dynamics

계류삭의 비선형 거동을 기술하는 지배방정식은 힘의 평형 조건식과 운동학적 적합조건식 그리고 재료역학 관계식으로 구성된다.

미소요소(ds)에 작용하는 힘의 평형조건식은 다음과 같이 벡터형태로 표현된다.

$$(T \vec{e}_1) + w \vec{E}_2 + \vec{F}_{ext} = m \vec{a} \tag{1}$$

이때, T는 계류장력, w는 계류삭의 단위길이당 수중자중,  $\vec{F}_{ext}$ 는 유체력, m은 계류삭의 단위길이당 질량,  $\vec{a}$ 는 운동가속도, ( )는 계류삭의 길이에 대한 편미분을 나타낸다.

단위길이(ds)의 계류삭에 작용하는 외부 유체력  $\vec{F}_{ext}$ 의 성분은 다음과 같이 모리스 방정식을 사용하여 산출 가능하다.

$$d\vec{F}_{ext, n} = \rho_w \nabla ds C_M \vec{a}_{f, n} - \rho_w \nabla ds (C_M - 1) \vec{a}_n + \rho_w C_D D ds (\vec{v}_{f, n} - \vec{v}_n) |\vec{v}_{f, n} - \vec{v}_n| \tag{2}$$

이때,  $\rho_w$ 는 물밀도,  $\nabla = \pi D^2/4$ ,  $C_M$ 는 계류삭 단면의 질량계수,  $C_D$ 는 계류삭 단면의 점성항력계수, D는 계류삭 직경을 가리키며, n = 2, 3에 대하여  $\vec{a}_{f, n}$ 은 물입자 가속도의 법선

벡터,  $\vec{v}_{f, n}$ 은 물입자 속도의 법선벡터,  $\vec{a}_n$ 는 계류삭 가속도의 법선벡터,  $\vec{v}_n$ 은 계류삭 속도의 법선벡터 성분을 나타낸다.

한편, 접선방향의 외부 유체력은 다음의 산출식을 사용한다.

$$dF_{ext, 1} = \frac{\rho_w}{2} C_F \pi D ds (v_{f, 1} - v_1) |v_{f, 1} - v_1| \tag{3}$$

Fig. 17의 오일러각( $\theta, \phi$ )을 사용하면, 계류삭 부재의 운동학적 적합 조건식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} v_1' - v_2 \phi' + v_3 \theta' \cos \phi &= \dot{\epsilon} \\ v_2' + v_1 \phi' - v_3 \theta' \sin \phi &= (1 + \epsilon) \dot{\phi} \\ v_3' - v_1 \theta' \cos \theta + v_2 \theta' \sin \theta &= -(1 + \epsilon) \dot{\theta} \cos \phi \end{aligned} \tag{4}$$

이때, (·)은 시간에 대한 편미분을 나타내며,  $v_1, v_2, v_3$ 는 각 질점의  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ -방향의 속도성분이고  $\epsilon$ 은 축방향 스트레인이다. 본 연구에서는 계류삭 부재의 재료역학 조건식을 동체적 변형을 가정하여 다음의 후크법칙을 적용하였다.

$$\epsilon = \frac{T}{EA} \tag{5}$$

여기서, EA는 계류삭의 축강성을 가리킨다.

계류삭의 동력학을 기술하는 지배방정식 식(1)~식(5)은 강한 비선형성을 보인다. 계류삭의 경계조건으로서 부유체와의 연결점인 fair-leader에서의 운동 변위와 해지면 앵커점 및 지반과의 접촉 등이 고려된다.

이와 같은 비선형 계류동력학 해석기법으로서 계류삭을 집중질량 모델로 이산화하고 지반접촉 문제는 질량-스프링-댐퍼를 이용하여 단순하게 모델링한 후, 미소증분-반복 알고리즘과 Newmark 수치적분법을 이용하는 시간영역 해석기법이 개발 적용된 바 있다(Hong and Hong, 1996, 1997).

#### 4.2 예제 계산 및 실험결과와의 비교

수치계산은 모형시험 결과와의 비교를 통해 계산프로그램의 신뢰성을 검증하는 것이 목적이며, 이로부터 수치실험을 통한 심해 복합계류 시스템의 truncated 모형시험 시 적합한 모형계류시스템의 설계와 모형시험 결과의 확장해석에 적용할 수 있는 프로그램을 개발할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 모형체인 계류삭의 강제동요 시험 결과와의 비교를 위해 다음의 조건에 대한 계산을 수행하였다.

- 계류삭 수중 중량 : 0.06485 kg/m
- 계류삭 질량 : 0.07466 kg/m
- 계류수심 : 7 m
- 초기 수평 계류장력 : 11.277 N
- $x_L/z_L = 2.1828$
- $x_L$ : fairleader와 지반접촉면사이의 수평거리,  $z_L$ :수심
- $(s_L - x_L)/z_L = 0.2803$
- $s_L$ : fairleader와 지반접촉면까지의 계류삭의 길이

- 항력계수 :  $C_F = 0.05$ ,  $C_D = 2.6$
- 질량계수 :  $C_M = 2.0$
- 요소 개수 : 총 60개(현수부 30개, 지반 접촉부 10m에 대해 30개)

CD와 CM은 여러번의 계산을 통해 모형시험결과와 유사한 값을 갖도록 조절하여 결정된 값이다. 모든 계산 조건에 대해 CD와 CM 값은 위에서 결정한 값을 고정하여 사용하였다. 수치실험 결과 CM값의 변화에는 결과에 큰 차이가 없었으나 CD 값의 변화에는 결과가 민감하게 변화였다.

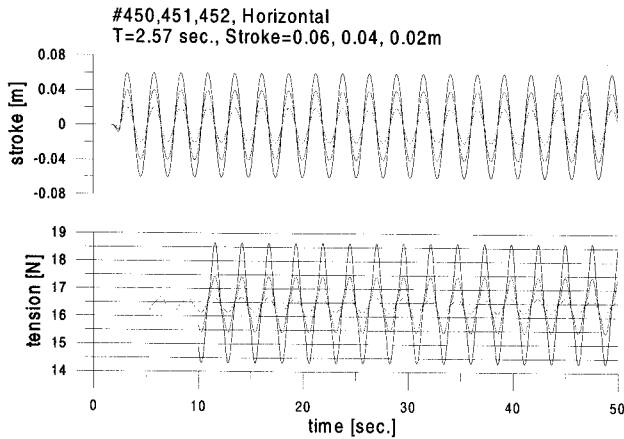


Fig. 18 Time history of horizontal forced oscillation simulation

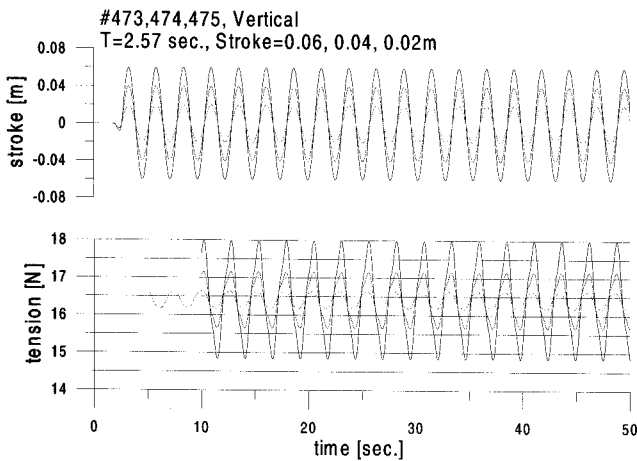


Fig. 19 Time history of vertical forced oscillation simulation

Fig. 18과 Fig. 19에는 동요주기 2.57초인 경우 각 각 수평 방향과 수직방향 강제동요 시뮬레이션 결과를 시계열로 표시한 예를 나타내었다. 정현파형 강제동요에 의한 장력의 변화가 비선형적으로 나타남을 볼 수 있으며, 그림의 예에서는 수직방향 강제동요의 경우에 비선형성이 더 큰 것으로 보이나 실제 장력의 변화는 더 작은 것으로 나타났다.

Fig. 20과 Fig. 21에 실험조건과 동일한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 실험결과와 같이 비교하여 나타내었다. 그림에서

속이 빈 기호는 실험결과이며 속이 찬 기호는 시뮬레이션 결과이다. 실험치와 시뮬레이션 결과 모두 주파수의 제곱함수로 잘 표시(fitting)되는 것을 볼 수 있으며 실험치와 시뮬레이션 결과의 일치도는 대체로 양호한 것으로 보인다. 동요 진폭 변화에 따른 일치도의 차이는 시뮬레이션에서 사용한 CD 및 CM 값의 부정확성에 기인하는 부분이 있을 것으로 사료된다.

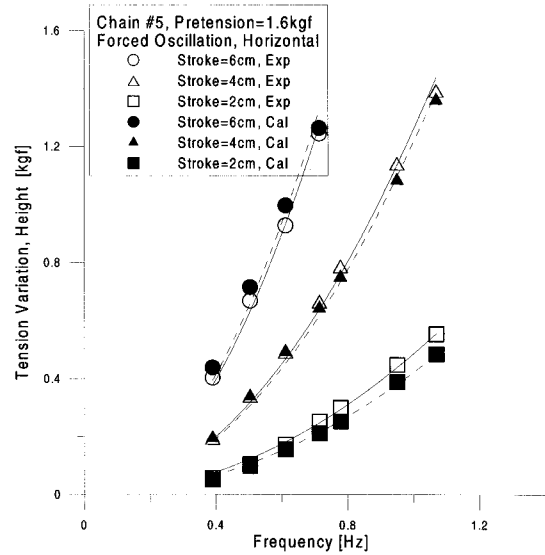


Fig. 20 Tension variation due to horizontal forced oscillation

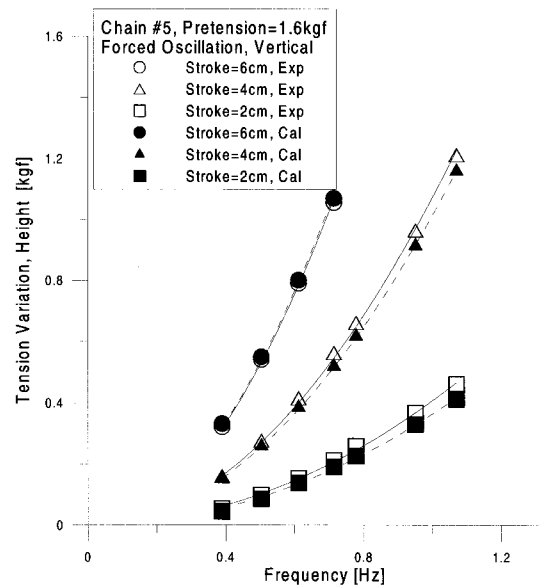


Fig. 21 Tension variation due to vertical forced oscillation

수평강제동요 시뮬레이션의 경우는 동요진폭이 0.04m 인 경우 일치도가 가장 좋게 나타나고 그 보다 진폭이 큰 경우에는 시뮬레이션이 실험치 보다 약간 큰 예측치를 주었으며 동요 진폭이 작은 경우에는 실험치 보다 약간 작은 결과를 주었다. 동일 조건에서 수직 강제 동요의 경우에는 동요진폭 0.06m 인 경우가 실험치와 가장 좋은 일치를 보였으며 진폭이 작은 경

우 시뮬레이션 결과가 실험치보다 약간 작게 나타났다. 전반적으로 시뮬레이션 결과의 실험치와의 일치도는 양호한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 모형 계류삭에 대한 강제동요 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이번 계류시스템 강제동요 모형시험을 통하여 모형 계류시스템의 동적 특성 데이터를 확보하였다. 또한, 현재 활발하게 연구중인 심해계류시스템의 모형시험을 위하여 2배 수심에서의 모형시험을 수행하여 기초적인 데이터를 얻을 수 있었다. 이러한 데이터는 앞으로 예상되는 truncated 계류 시험의 가능성을 검토하고 hybrid 계류성능 모형시험을 위한 계류해석프로그램을 검증하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

(2) 해양공학수조의 수심의 한계를 극복하기 위한 하나의 방법으로 모형 계류삭의 무게를 수심비로 증가해 주는 방법에 대하여 7.0m, 3.5m 수심에 대한 강제동요 시험을 수행하여 그 유용성에 대해서 검토하였다.

모형시험 수심이 제한된 경우 chain의 무게를 실제 수심과 수조 수심의 비만큼 늘리는 방법으로 인장력의 동적 응답을 상당히 정확하게 모사할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만 이러한 방법은 offset-인장력의 정적시험 결과에서는 수심이 깊을 때보다 stiff한 결과를 주게 된다. 이러한 차이를 선형 스프링으로 맞추게 되면 동적 응답이 작아지고 왜곡되는 결과가 나오게 된다. 따라서, 적절한 스프링의 삽입을 통해서 정적 및 동적 응답을 모사할 수 있는 방법을 연구해야 할 것으로 생각된다.

또한, 실제 수심 1000m의 경우에는 1/60 축척비에서 16.7m의 수심을 확보하여야 한다. 이런 경우에 해양공학수조에서 16.7/3.5=4.77의 무게비를 만족하는 chain으로 시험을 수행할 경우 본 연구에서 수행한 무게비 2배의 결과가 제대로 적용될 수 있는지에 대한 검토가 이루어져야 하며, 수심의 차이가 많이 나는 경우 무게를 변화시켜주는 방법에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 이런 경우에는 모형시험과 시뮬레이션의 적절한 조합으로 hybrid 모형시험을 수행할 수밖에 없을 것으로 사료된다. 이를 위해서는 정확도가 높은 시뮬레이션 프로그램의 개발이 필수적이라고 판단된다.

(3) 전반적으로 시뮬레이션 결과의 실험치와의 일치도는 양호한 것으로 판단된다. 이상의 비교로서 시뮬레이션 프로그램의 성능은 대체로 우수한 것으로 판단되며 이로부터 수치실험을 통해 모형 계류시스템의 특성 파악이 가능할 것으로 예상된다. 향후 체인, 와이어 등이 동시에 사용되는 복합계류 시스템에 대한 검증이 필요할 것으로 생각되며 심해 계류시스템에 본격적으로 사용이 예상되는 polyester와 같은 비선형 재질에 대해서도 본 프

로그래ムの 적용이 가능한 가에 대한 수치실험이 필요한 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원한 기본연구사업 "기상재난 파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발"과 "해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술 고도화 연구" 의결과 중 일부임을 밝힌다.

#### 참 고 문 헌

- 홍석원, 홍사영, 김현조, 홍섭, 최종수 (2000). 해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술 고도화(I), 한국해양연구소 보고서, UCE00901-2292.
- 홍섭, 홍사영, 홍석원, 김현조, 최종수 (2001). 해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술 고도화(II), 한국해양연구소 보고서, UCE00490-2372.
- Aalbers, A.B. and Merchant, A.A (1996). " The Hydrodynamic Model Testing for Closed Loop DP Assisted Mooring ", Paper 8261, Ocean Technology Conference, Houston.
- Buchner, B. and Wichers, J.E.W. (1999). " Features of the State-of-the-art Deepwater Offshore Basin ", Paper 10814, Ocean Technology Conference, Houston.
- Hong, S Y. and Hong, S. (1996). "Motion Simulation of a Floating Structure Coupled with Mooring Lines", Proceedings of 6th International Offshore & Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA.
- Hong, S. and Hong, S. Y. (1997). "Effects of Mooring Line Dynamics on Position Keeping of a Floating Production System", Proceedings of 7th International Offshore & Polar Engineering Conference, Honolulu, USA.
- Stansberg, C.T. and Oritsland, O. (2000). " Verideep: Reliable Methods for Laboratory Verification of Mooring and Stationkeeping in Deep Water ", Paper 12087, Ocean Technology Conference, Houston.
- Wichers, J.E.W. and Devlin, P.Y. (2001). "Effect of Coupling of Mooring Lines and Risers on the Design Values for a Turret Moored FPSO in Deep Water of the Gulf of Mexico", Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, June 17-22, pp 480-487.

2005년 2월 4일 원고 접수

2005년 4월 11일 수정본 채택