

# 해양시스템 모형실험을 위한 수중 운동계측시스템 개발 연구

최종수\* · 홍 섭\*

\*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

## Development of Underwater Motion Measurement System for Model Test of Ocean System

JONG-SU CHOI\* AND SUP HONG\*

\*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Underwater Motion Measurement 수중 운동계측, Blue Ringlighter 청색 링라이트, FALCON Motion Capture System FALCON 모션캡처 시스템, Mooring line 계류사

**ABSTRACT:** An underwater motion measurement system was constructed for applications to the model basin. A commercial motion capture system, FALCON of MotionAnalysis Corp., which corrects automatically the distortion caused by refraction of the light passing through water and air, was adopted for underwater motion measurement. The modifications of FALCON system were performed: waterproofing camera housings, markers, connectors, and a new blue ring lighter. The accuracy of the motion measurement was obtained within the calibration error of 0.87mm in average and 0.89mm in standard deviation for the distance of 500mm between two markers on the calibration device. The volume of 2100mm(length)× 2100mm(breadth) ×2300mm(Height) was covered with 4 cameras of the underwater motion measurement system. For the performance verification, motion measurement test of a vertical mooring chain model excited at the top end was carried out. The 3D motions of mooring model were measured with variable amplitude and period of the forced excitation. Higher order motions of the mooring model were observed as the excitation period decreases. The performance of the system was verified by successfully measuring 3D motion of mooring model.

### 1. 서 론

계류시스템은 해저자원 개발용 플랫폼과 해양 공간이용을 위한 각종 해양구조물 등에 널리 적용되고 있다. 최근 심해로 해양 개발의 영역이 확대되면서 계류시스템의 설계와 안전성 평가를 위한 발전된 기법의 개발이 요구된다. 이러한 심해 계류시스템의 최적 설계와 정확한 안정성 평가를 위해 수치해석 기법과 실험적 평가기법의 고도화가 절실히 요구된다.

계류시스템의 핵심 요소인 계류사의 거동에 대한 수치해석 기법은 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 다양한 시간 영역에서의 수치적분을 통한 시뮬레이션의 기법이 개발되었다. 이러한 수치해석의 결과는 모형실험을 통해 검증 받아야 한다. 계류사의 끝단에서의 장력이나 구조물 본체의 스트레인의 계측을 통해 수치해석의 결과가 검증되고 있으나(홍섭 외, 2000), 계류사 거동의 직접적인 계측을 통한 검증은 아직 활발하지 않다.

최근 영화애니메이션, 의공학, 스포츠 등의 분야에서 근거리 광학적 계측기법(close range photogrammetry)을 이용한 비접촉 운동계측 시스템이 활발히 사용되고 있다(예를 들어서 MotionAnalysis, QUALISYS, VICON 등). 이러한 광학식 운동계측 시스템은 비접촉이기 때문에 계류사와 같은 계측대상의

운동에 영향이 적다는 장점이 있다. 이러한 상황을 고려할 때 본 연구에 광학식 운동계측 시스템이 가장 적합한 것으로 판단된다.

계류사이나 라이저와 같은 세장체의 수중운동에 대한 광학식 계측기법에 관한 연구 사례는 찾기 어려우며, 광학식으로 수중 운동계측 모형실험을 수행한 결과가 일부 발표된 바 있다. Park 외(2002)는 상단 고정된 파이프의 와유기 진동을 모두 6대의 카메라를 이용하여 계측하였다. Maeda 외(2004)는 일점 계류된 해양 시스템의 모형실험을 수행하였다. 이 모형실험에서 20대의 카메라를 이용한 3차원 운동계측 시스템이 사용되어 계류사 모형의 운동이 계측되었다.

본 논문은 광학식 수중 운동계측시스템의 개발을 위한 접근 방법과 계측 정도 및 사용 제한범위 등에 관한 소개를 다루고 있다. 먼저, 수중 촬영 시 발생하는 빛의 굴절 등의 왜곡에 대한 캘리브레이션이 용이한 광학식 운동계측 시스템 중 몇 가지를 시장조사를 통해 비교 분석하였으며, MotionAnalysis사의 FALCON 모션캡처 시스템(이하 FALCON system)을 이용하여 수중 운동계측 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 수중에서 계류사 모형의 운동을 계측하고 성능을 분석하였다. 개발된 계측기법은 추후 수중 세장체의 운동특성 연구에 활용될 예정이다.

## 2. 수중 운동계측 시스템

### 2.1 FALCON 시스템

현재 한국해양연구원에서 보유하고 있는 MotionAnalysis사의 FALCON 시스템은 실시간 3차원 광학식 비접촉 운동계측 시스템이다. 본 장비는 위치추적 대상체에 케이블이 전혀 연결되지 않는 수동형 모션캡처 시스템이다. 본 시스템을 기반으로 수중 운동계측 시스템이 구축되었다. FALCON 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있다.

#### 2.1.1 시스템 구성

##### (가) FALCON 카메라 시스템

- CCD 카메라
  - 648(H)×242(V): 60/120/180/240Hz
  - 648(H)×484(V): 60/120Hz
  - 셔터속도: 1/500~1/8000sec(5단)
- 적색 동조 디지털 스트로보
  - 파장: 630nm
  - 스트로보 지속시간 : 조정
  - 광각 링 라이트: 76 Red LEDs
- 적색 필터
  - TIFFEN사의 B&W필터, Red 29
- CCD 카메라용 렌즈
  - 초점거리 4.8mm~25mm 채택 가능
  - 현재 6mm가 장착되어 있음.
  - 1/2 inch C-mount

##### (나) Midas 컨트롤러

- 비디오 영상처리보드 내장
- 산업용 PC형태
- OS : Windows 2000
- 보드상 2차원 실시간 물체위치추적
- 카메라정보 EvaRT용 컴퓨터로 전송

##### (다) EvaRT 소프트웨어

- 전처리: 카메라 파라미터 조정 가능
- 캘리브레이션
- 3차원 위치 인식
- 후처리: 데이터 처리와 애니메이션

#### 2.1.2 영상처리 기법

FALCON 시스템의 영상처리는 계측 대상에 부착된 마커(marker)의 위치정보를 얻음으로써 계측대상의 3차원 위치를 구하는 방식으로 이루어진다.

링라이트에서 발생된 특정 파장의 빛이 재귀반사형 테이프 로 입혀진 구형 마커에서 반사되어 카메라로 들어온다. 빛을 입사방향과 동일한 방향으로 반사시키는 재귀반사 테이프형 마커는 카메라 주위에 설치되어 있는 링라이트로부터 입사되는 빛을 카메라로 반사시키는 성능이 뛰어나다.

이때, 링라이트에서 발생된 파장과 동일한 빛만을 통과시킬 수 있는 필터를 거치게 되면 주변의 잡광들은 대부분 어둡게

되고 단지 마커에서 반사된 빛만이 원형의 형태로 인식된다.

각각의 카메라는 이렇게 인식된 마커의 원형형상에서 도심을 구하게 된다. 구하여진 도심정보는 통합되어 3차원 위치가 인식된다.

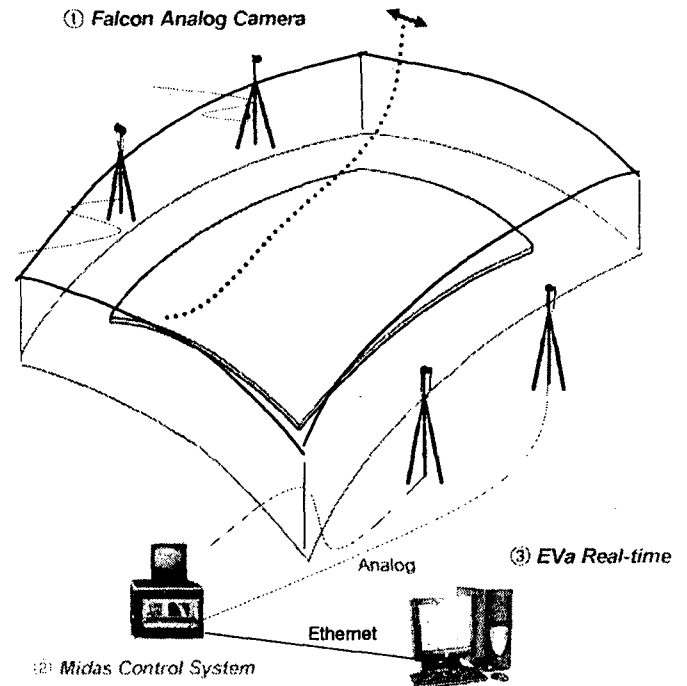


그림 1 Falcon 시스템의 구성

#### 2.1.3 캘리브레이션 기법

본 시스템은 기존의 그리드(grid) 기법에 비해 작업효율과 정밀도를 높일 수 있는 동적 캘리브레이션 방법을 사용한다. 본 캘리브레이션 기법은 렌즈의 초점거리가 짧아질수록 발생하는 영상왜곡을 선형화시키는 카메라선형화 알고리즘(camera linearization algorithm)을 포함하고 있다. 따라서, 렌즈의 변경으로 렌즈의 초점거리가 변화되어도 효율적인 캘리브레이션이 가능하다.

## 2.2 수중 응용시 고려사항

### 2.2.1 전자 및 광학 시스템 방수

계측 카메라를 방수하우징 내부에 설치함으로써 수중에 적용하고자 하였다. 이때, 주변 물 과 카메라 내부의 습한 공간 간의 온도 차이에 의해, 카메라 벽면과 전면 유리에 이슬이 맺히는 결로현상이 발생할 수 있다. 건조하고 차가운 상태에서 조립하는 것이 이러한 결로현상을 막기 위한 방안 중 하나이다.

FALCON 시스템에서 사용하고 있는 반사체는 물과 직접 접촉하게 되면 반사기능을 거의 상실된다. 따라서 마커를 방수하거나 방수 처리된 마커를 사용하여야 한다.

### 2.2.2 빛의 감쇠

태양광의 적색은 630nm, 녹색은 530nm, 청색은 470nm 정도의 고유한 파장을 가진다. 그림 2는 빛의 색깔별로 수중에서 도달할 수 있는 거리를 나타낸다. 청색이 적색에 비해 10배 정도 멀리까지 도달할 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 색깔별 수중 도달깊이의 차이 때문에 깊은 물에서의 수중영상 촬영시 카메라에 특별한 조정을 하지 않으면 영상전체가 푸른색 계통으로 보인다(박수현, 2002).

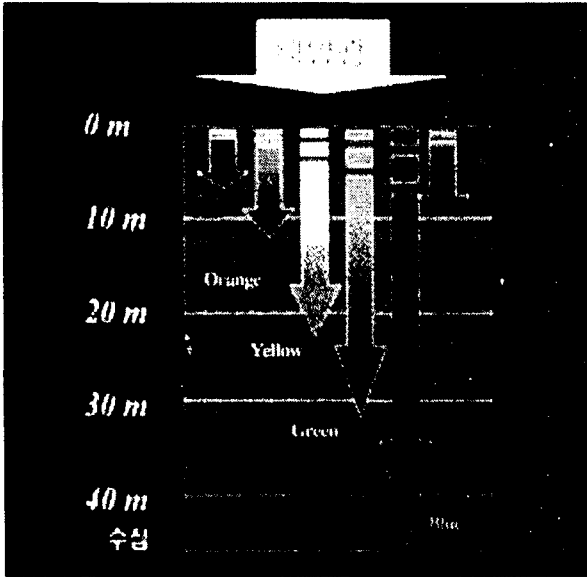


그림 2 태양광을 구성하는 고유 파장의 빛이 도달할 수 있는 수심(박수현, 2002)

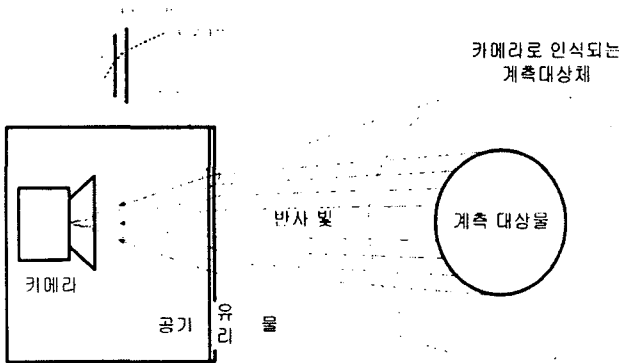


그림 3 방수하우징 내부에서 수중 계측대상물을 촬영할 때의 빛의 굴절

### 2.2.3 빛의 굴절

매질에 따른 빛의 진행속도의 차이에 의해 빛이 밀도가 다른 매질 속으로 들어가게 되면 진행방향이 달라지는 굴절현상이 발생된다. 빛이 매질(1)에서 매질(2)로 진행할 때 굴절각과 입사각의 비는 항상 일정하는데 이 값을 매질(1)에 대한 매질(2)의 굴절률이라고 한다. 공기 중의 빛의 굴절률을 1.00이라고

기준할 때 담수에서는 1.33, 해수일 때는 1.34라는 고유의 값의 굴절률을 나타낸다(박수현 2002).

방수하우징에 설치된 카메라로 들어오는 빛은 공기와 물의 경계면으로 인해 굴절하게 된다(그림 3 참조). 이렇게 굴절된 빛은 물체를 0.752 (1/1.33) 정도 가깝게 보이도록 한다. 따라서 방수하우징 내에 설치되어 있는 카메라의 수중영상은 실제 초점거리보다 1.33배 긴 초점거리의 렌즈를 장착한 것과 유사한 효과가 나타난다.

### 2.2.4 수중 이물질로 인한 마커 인식 오류

카메라 근처에서 떠있는 부유물은 거리가 가깝기 때문에 링라이트 조명에 의한 반사 빛의 강도가 크다. 이러한 부유물 반사 빛은 카메라에서 마커로 오인될 수 있다. 따라서 계속시 불의 청결을 유지하여야 한다.

## 2.3 수중 응용을 위한 제작품

### 2.3.1 카메라 방수하우징

FALCON 카메라의 방수하우징을 알루미늄재질로 설계 제작하였다. 그림 4는 방수하우징과 카메라의 사진이다. 좌측부터 순서대로 카메라 방수하우징 전면부, 카메라, 신호케이블, 전원케이블, 카메라 방수하우징 후면부 등을 촬영하였다. 표면은 알루미늄의 부식을 막기 위해 경질 아노다이징(anodizing) 처리를 하였다. 아노다이징 처리시 검정색을 사용하여 카메라에 반사 잡광을 최대한 줄이도록 하였다. 제작된 방수하우징은 내압시험기(제작사 "파티마" 보유)에서 5기압의 압력을 5분간 가압하여 내압성능에 이상이 없음을 확인하였다.

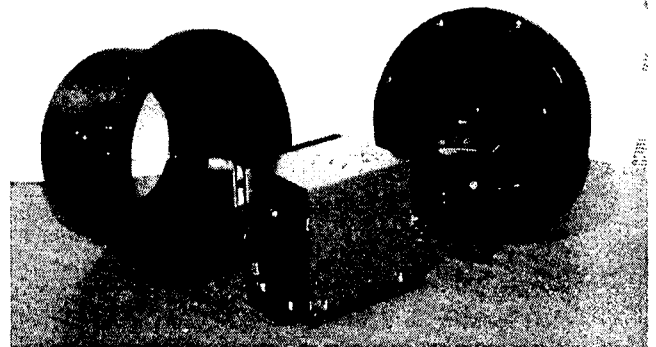


그림 4 방수 하우징과 FALCON 카메라

### 2.3.2 청색 링라이트

본 연구에서는 앞의 2.2.2절에서 설명한 바와 같이 수중에서는 청색 빛의 감쇠가 가장 적은 특성을 활용하기 위해 기존의 FALCON 시스템이 채택한 적색 링라이트 조명장치 대신 그림 5와 같은 청색 링라이트를 사용하였다.

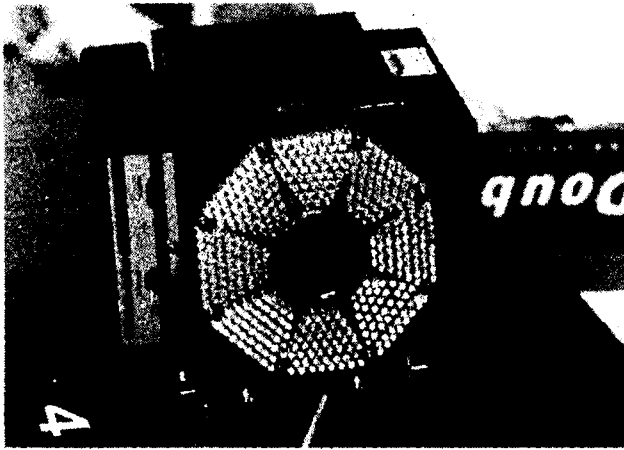


그림 5 청색 링라이트가 설치된 FALCON 카메라

### 2.3.3 기타 제작품

방수하우징에 연결된 컨넥터는 방수형으로 선정되었다. 신호선의 경우 타지미(TI)사의 1108시리즈의 방수 컨넥터(수심 30m 방수)를 사용하였으며, 전원선의 경우 파티마사의 방수 전용 컨넥터를 사용하였다. 신호용 케이블은 동축케이블을 사용하였다.

계류삭 모델과 캘리브레이션 장치에 부착된 마커는 각각 플랜지 외경 38mm의 반구형 아크릴을 이용하여 방수하였다.

## 3. 검증실험

### 3.1 실험 모델

수중 운동계측시스템의 성능을 확인하고 시뮬레이션과의 상호 검증을 위해 그림 6과 같은 계류삭 모델을 설계 제작하였다. 계류삭 모델의 상단에 볼조인트와 1축 로드셀을 설치하였고, 그 아래로 마커와 체인을 일정 간격으로 연결하였다. 이때 사용된 12개의 마커는 25mm(1.0 인치)이며 재귀반사형 테이프로 입혀져 있다. 최하단부에는 100g의 무게추를 설치하였다. 볼조인트 하부의 공기중 무게는 965g이고, 수중 무게는 673g이다.

계류삭 모델의 초기 축강성은 139.9kgf/m이고 0~5kgf까지의 평균 축강성은 158.5kgf/m이었다.

### 3.2 실험장치 구성

그림 7과 같이 카메라 4대와 계류삭 모델을 배치하였다. 이때 계류삭 모델의 계측범위는 전체 길이 3.4m중 2.1m이고, 전체 12개의 마커 중 8개만 계측하였다. 카메라 대수의 부족으로 계측 범위가 제한되었다.

본 실험은 한국해양연구원의 해양공학수조의 대차에서 수행되었다. 본 시스템의 가진은 대차내에 설치되어 있는 강제동요 장치를 이용하였다.

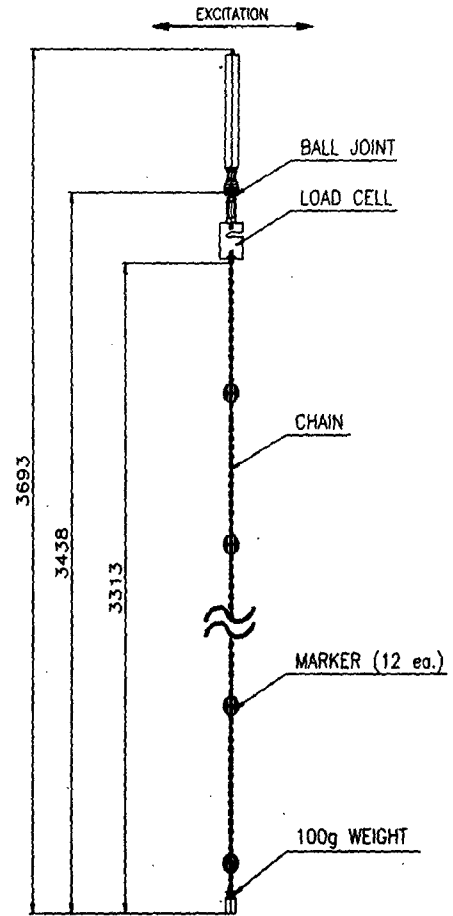


그림 6 계류삭 모델의 개략 도면

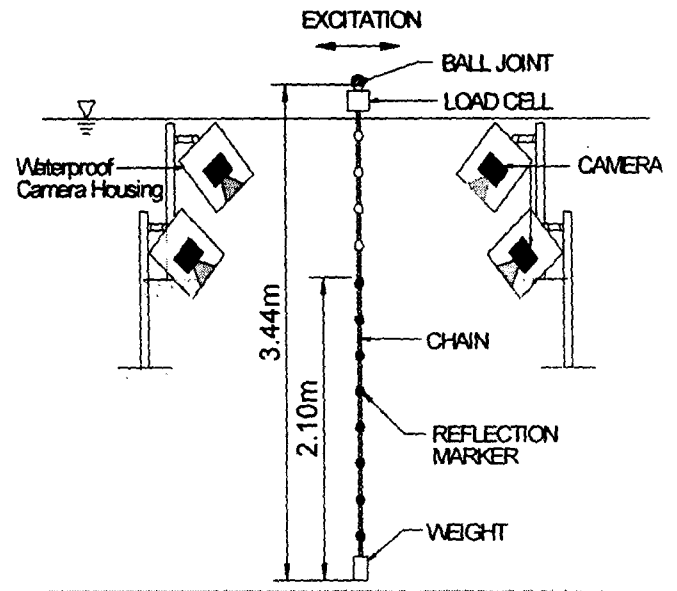


그림 7 계류삭 운동계측 모형실험 장비 및 계류삭 모델의 설치도

### 3.3 실험 계획

실험변수는 강제동요장치의 주기와 가진 진폭으로 선정하였다. 가진 주기의 범위는 0.5sec (2Hz)~21sec(0.0476Hz)이고, 가진 폭의 범위는 50mm, 300mm, 550mm의 3가지로 정하였다. 강제동요장치의 운동범위를 초과하지 않는 범위 내에서 표 1 과 같이 계측실험을 수행하였다.

계류삭 모델의 6자유도 운동과 회전점의 장력을 계측하였다. 회전점의 장력은 단축 로드셀(봉신 로드셀, DBBP-20, 20kgf, 3.0mV/V, SNJ02109)을 사용하여 계측하였다.

표 1 계류삭 모형실험의 실험변수

가진 주기 [sec]	가진 진폭[mm]		
	50	300	550
21			
16		15초	15초
11			
6			초과범위
3	수행않음		초과범위
1		초과범위	초과범위
0.5		초과범위	초과범위

### 3.4 캘리브레이션

캘리브레이션의 결과는 표 2에 나타내었다. 각 카메라의 2차원 영상의 수평방향(U방향)과 수직방향(V방향)의 오차값과 초점거리를 나타내었다. 또한, 양 끝단의 마커의 간격이 500mm인 Wand의 캘리브레이션 결과를 나타내었다. 각 카메라의 U 방향과 V방향의 오차는 각각 0.2, 0.26이하이었다. 그리고 500mm의 Wand 길이에 대해 평균 500.87mm이고 표준편차 0.89mm로 계측되었다.

모든 카메라에 초점거리 6mm의 렌즈를 체결하였으나, 캘리브레이션 결과 평균 8.265mm의 초점거리 결과가 나타났다. 2.2.3절에서 설명한 바와 같이, 이러한 초점거리 변화는 마커에서 반사된 빛이 관측 유리를 통해 카메라의 CCD소자에 도달하기까지 발생하는 굴절 때문에 일어나는 현상이다. 이와 같은 초점거리의 증가는 물과 공기 사이를 지나는 빛의 굴절을 이용한 예상된 결과와 동일하였다.

표 2 캘리브레이션 결과

Wand 캘리브레이션				
카메라	1	2	3	4
U-Res	0.18	0.18	0.18	0.19
V-Res	0.26	0.23	0.24	0.21
초점거리	8.25	8.25	8.29	8.27
Wand 길이(기준값 500mm)				
계측 평균값 [mm]				500.87
표준 편차 [mm]				0.89

그림 8의 중앙부의 블록과 같이 쌓여져 있는 부분이 분수중 운동계측시스템을 이용하여 계측 가능한 영역이다. 이 영역은 동시에 2대 이상의 카메라에서 촬영될 수 있는 범위를 나타낸다. 본 시스템을 이용한 계측 가능 범위가 약 2100mm×2100mm×2300mm이다.

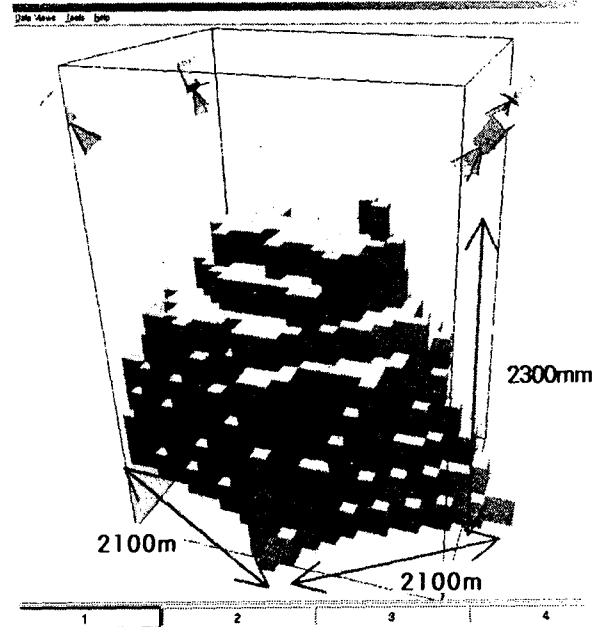


그림 8 카메라 4대를 사용한 수중 운동계측시스템의 계측가능 영역

## 4. 결 과

운동계측의 기준 좌표계는 그림 9와 같다. 좌표계의 원점은 수조의 밑바닥면의 카메라 4대의 중심점 근처에 있다. 여기서 가진되는 방향은 X방향이며 수심은 음(-)의 z방향이다.

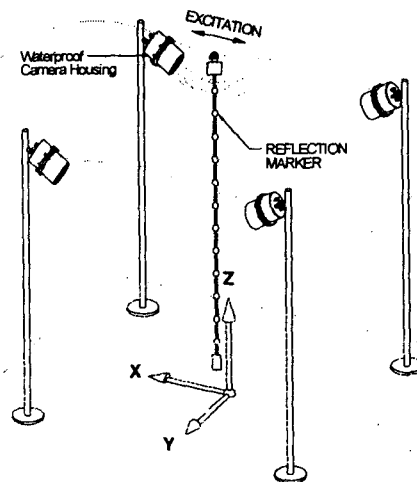


그림 9 기준 좌표계

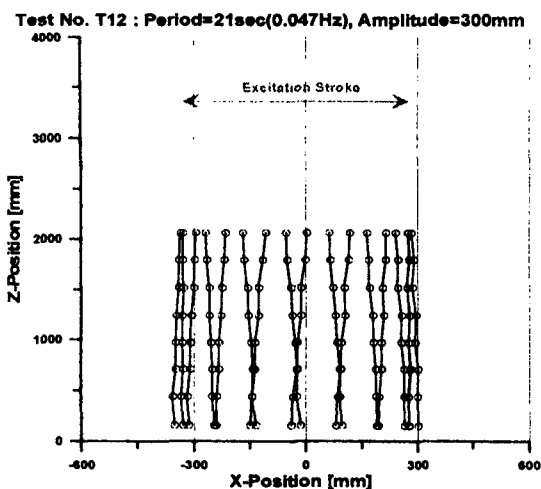


그림 10 계류삭 모형의 운동계측결과: X-Z방향, 진폭 300mm, 주기 21초

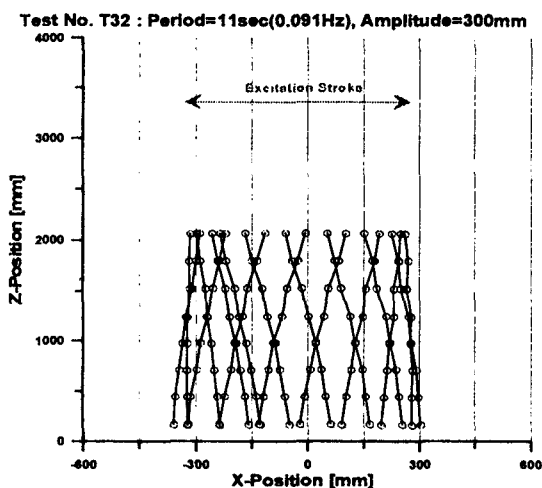


그림 11 계류삭 모형의 운동계측결과: X-Z방향, 진폭 300mm, 주기 11초

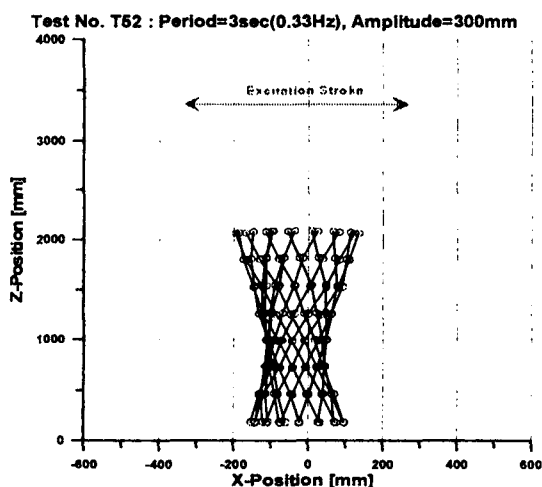


그림 12 계류삭 모형의 운동계측결과: X-Z방향, 진폭 300mm, 주기 3초

그림 10~12는 가진 진폭 300mm에서 정상상태 한 주기 동안의 계류삭 모델에 부착된 마커들의 가진방향(X)-수심방향(Z)이 이루는 평면에서 관찰된 궤적이다.

그림 13은 가진 주기 0.5초이고 가진 진폭 50mm에서의 로드셀의 장력의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 로드셀의 위치가 회전조인트부 직접 연결되어 있으므로 로드셀의 장력은 회전 조인트에서의 장력과 거의 동일하다. 그림 14는 그림 13의 주파수 영역에서의 값을 보여준다. 가진 주파수는 2Hz이나 와(vortex)발생 주기인 4Hz에서 큰 값이 나타나는 것을 보여준다.

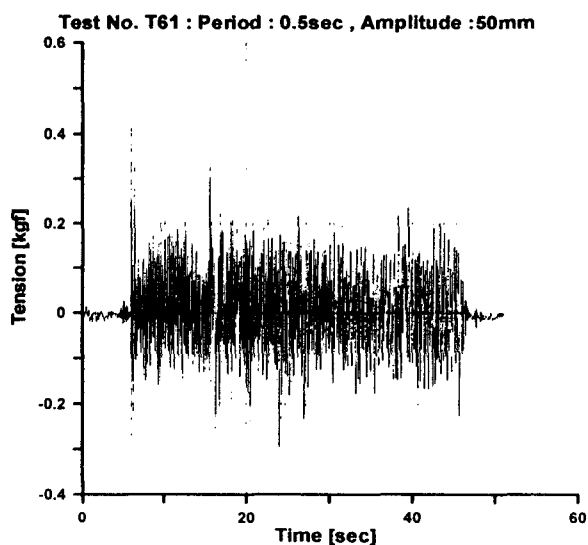


그림 13 계류삭 모형의 장력(가진 주기 0.5초, 가진 진폭 50mm)

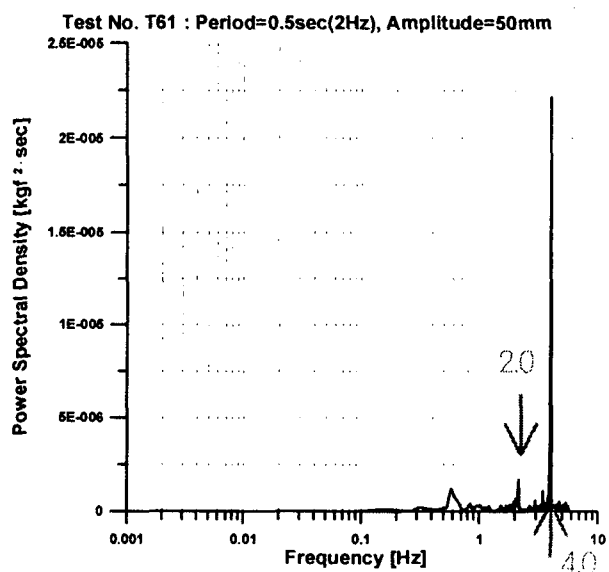


그림 14 계류삭 모형의 계측 장력의 파워 스펙트럼 (가진 주기 0.5초, 가진 진폭 50mm)

## 5. 결 론

세상체형 수중 해양구조물의 모형실험에서 대상체의 3차원 운동을 계측할 목적으로 수중 운동계측시스템을 구축하였다. 본 수중운동계측시스템을 사용하여 아래와 같은 제한범위 내에서 성공적으로 대상체의 운동을 계측하였다.

- 계측범위: 2100mm×2100mm×2300mm
- 샘플링 주파수: 60Hz
- 정밀도: 500mm간격에 대해 오차의 평균 0.87mm, 표준편차 0.89mm
- 마커: 플랜지 외경 38mm, 구형

본 수중 운동계측시스템의 구축을 통해, 수중 운동계측 모형 실험의 연구 기반이 마련되었으며, 수중 운동시뮬레이션 기법의 검증 및 고도화 목적에 활용될 계획이다.

## 후 기

본 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 “해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술 고도화 연구”사업의 일환으로 이루어 졌음을 밝혀둡니다.

## 참 고 문 헌

- 박수현 (2002), “꿈꾸는 바다”,해저여행, pp.61~64
- 홍섭 외 (2000), “해양온도차 발전기술 개발 - IV: 해양온도차 발전시스템의 해양구조물 설계기술 개발과제 최종보고서”, 과학기술부
- H.I. Park, Y.P. Hong, M. Nakamura, W.Koterayama (2002), "An Experimental Study on Transverse Vibrations of A Highly Flexible Free-Hanging Pipe in Water", Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, May 26-31, pp. 199-206
- Katsuya Maeda, Kenkichi Tamura, Kentaro Kokubun, Yutaka Ohkawa, Ryuzo Takai, Kyoko Shintomi (2004), "Model Tests of Ocean Nutrient Enhancer 'Takumi' in Deep-sea Basin", Proceedings of The Fourteenth (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, May 23-28, pp. 72-77
- MotionAnalysis사 홈페이지 (2004), <http://www.motionanalysis.com>
- QUALISYS사 홈페이지 (2004), <http://www.qualisys.se>
- VICON사 홈페이지(2004), <http://www.vicon.com>