

## 케이슨의 예인 안정성 평가를 위한 모형 시험 시스템과 해석 기법의 개발

김중혁<sup>1</sup> · 서정화<sup>2</sup> · 김한결<sup>3</sup> · 김창희<sup>2</sup> · 유극상<sup>3</sup> · 이신형<sup>2,3</sup> · 박창욱<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>삼성중공업

<sup>2</sup>서울대학교 해양시스템공학연구소

<sup>3</sup>서울대학교 조선해양공학과

<sup>4</sup>(주) 오서닉 엔지니어링 컨설팅 사업부

### Development of a Model Test System and Analysis Method for Assessing Towing Stability of a Caisson in Wet Towing

Jong-Hyeok Kim<sup>1</sup>, Jeonghwa Seo<sup>2</sup>, Han-Gyeol Kim<sup>3</sup>, Changhee Kim<sup>2</sup>, Geuksang Yoo<sup>3</sup>,  
Shin Hyung Rhee<sup>2,3</sup> and Chang-wook Park<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

<sup>2</sup>Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>3</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>4</sup>Oceanic Inc, Division of Engineering Consulting, Gangneung 25451, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 대형 케이슨의 단독 예인 조건에서의 예인 안정성을 해석하기 위한 모형시험 시스템을 개발하였다. 그리고 이를 이용해 9,300톤급 케이슨의 단독 예인 중 안정성을 추정하는데 활용하였다. 케이슨이나 다른 부유체의 예인 안정성 평가를 위한 일반적인 모형시험 시스템에서는 일정한 예인 속도로 모형을 예인하는데 반해, 제안된 예인 시스템은 예인삭에 일정한 예인력을 제공하도록 설계되었다. 실제 예인 조건에서는 예인선에 의해 대상 물체가 일정한 동력으로 예인되기 때문에, 일정한 장력이 가해지는 새 모형 시험 시스템을 이용하여 예인 조건을 실제와 더 유사하게 모사할 수 있을 것으로 기대된다. 실험은 예인수조 시설에서 수행되었고, 9,300톤급 대형 케이슨의 1/30 축척비의 모형을 사용하였다. 모형 시험을 통해 케이슨 모형의 6자유도 운동과 예인삭의 장력 변동을 계측하고 해석하였다. 새 시스템을 이용하였을 경우 기존의 실험 시스템의 사용 결과에 비해 모형의 운동과 예인삭 장력이 감소하였다. 흘수와 초기 트림의 변화가 모형 시험에 적용되었으며, 초기 트림의 경우 예인 안정성에 도움이 되는 것으로 나타났다.

**Abstract :** The present study aims to design and utilize a model test system of a Caisson in wet towing condition, to assess towing stability of a 9,300 ton class caisson. The suggested towing system was designed to provide regular tension on the towline, whereas the previous model test system towed the model in constant speed. The new model test system was expected to reproduce the towing condition more realistically than the test system with constant speed condition, as the tugboat in actual towing condition tows the towline with constant power. Model tests were conducted in a towing tank with 1/30 scaled model. In the model tests, six-degrees-of-freedom motion of the caisson model and tension on the towline were measured and analyzed. By using the new system, fluctuation of the motion of model and tension on the towline decreased. The variation in the draft and initial trim was applied in the model tests. In the initial trim condition, the motion and towing force decreased.

**Keywords:** Caisson(케이슨), Wet towing(단독 예인), Towing stability(예인 안정성), Model test(모형 시험), 6DOF motion(6자유도 운동)

\*Corresponding author: cwpark2016@gmail.com

## 1. 서 론

대부분의 해양 구조물은 자체적인 추진력이 없기 때문에 예인선(Tugboat)을 통해 설치 위치까지 예인되어 이동한다. 예인되는 구조물은 제어가 가능한 조종 성능을 갖추지 못하였기 때문에 예상하지 못한 거동이 발생했을 때 대처가 어려워 대형 해난 사고로 발전할 수 있다. 불안정한 거동은 조류, 파랑, 바람과 같은 외력이 일반적인 원인이다. 하지만 예인 대상을 부유식 도크(Floating dock)이나 바지선(Barge)을 이용하지 않고 물에 직접 띄워 예인하는 단독 예인(Wet towing) 조건에서는 예인체 주위의 난류 유동에서 발생하는 와동의 유기로 인한 진동이 원인이 되기도 한다. 일부 해양 구조물들은 기능을 우선시한 설계로 인해 유선형이 아닌 유체역학적으로 불리한 정사각형이나 원형의 형상으로 설계된다. 이런 형상의 구조물을 예인 운송 시 큰 와동이 유기되기 때문에 더 강한 진동이 발생할 수 있어서, 예인 안정성을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 따라서 해양 구조물의 예인 중의 안정성에 대한 해석을 설계 단계에서 수행하고, 안정성을 증대시키기 위한 방안을 개발하기 위한 연구가 필요하다.

해상에서의 예인 시스템의 안정성 해석은 난류 유동의 불규칙적인 요동, 예인선과 예인체를 연결하는 예인삭(Towline)의 장력과 진동, 예인체의 6자유도 운동을 포함한 대단히 복잡한 물리계를 다뤄야 한다. Latorre (1988)은 바지선의 예인에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 바지선의 예인 시 운동 방정식을 구하고, 실선 스케일의 바지선에 작용하는 저항을 모형 실험을 통해 추정하여 운동 방정식에 대입하였다. 모형 실험의 결과는 실제 스케일의 바지선보다 더 나은 예인 안정성을 보이는 것을 확인하였다. Sohn and Kim (2000)은 예인선 시스템의 동적 거동에 대한 수학적 모델을 개발하여 풍압력의 영향을 조사하고 예인삭의 길이 변화와 예인 안정성의 관계를 설명하였다. Fang and Ju (2009)는 예인되는 벌크 운반선에 대해서 파랑 조건이 예인 안정성에 미치는 영향을 수학적 모델링을 통해 연구하였다. 선수와 중 조건과 긴 예인삭 조건에서 안정성이 개선되는 것을 확인하였다. Nam et al. (2012)는 예인 시스템에 대한 수학적 모델을 바탕으로 예인삭의 장력 계산 기법을 제안하였다. 이 연구에서는 예인되는 선체의 마찰, 풍압, 조파저항에 더하여 작동하지 않는 추진기의 저항 성분을 함께 고려하였으며, 추가로 예인삭의 부가저항을 더하여 전체 예인 시스템의 장력을 계산해내었다. Fitriadhy et al. (2013)은 바람이 예인되는 선박의 안정성에 미치는 영향을 연구하였다. 풍하중을 고려하여 예인삭에 걸리는 장력과 바지선의 거동을 해석하고 뒷바람 조건에서 예인삭 장력의 순간적인 최대 값이 증가함을 확인하였다.

예인 안정성에 대한 기존의 연구는 주로 바지선이나 일반 선형에 대해 이루어졌다. 이들 선박은 흘수가 작고 유선형의 형상을 가져 저항 성분의 예측이 쉽고, 긴 길이로 인해 안정성을 확보하기가 쉽다. 하지만 사각이나 원형의 해양 구조물의 wet towing 환경에서는 앞서의 연구 내용들에서 다룬 물리 현상에 더하여 해양 구조물 주위의 난류 유동으로 인한 비선형적 현상을 함께 고려해야 한다. 큰

주기의 와동 발달, 구조물 후면의 급격한 압력과 유속의 감소 등은 바지나 일반 선형에서는 찾아보기 어려운 문제이다. 하지만 와동의 유기로 인한 횡력의 발생은 예인되는 구조물의 주기적인 운동을 촉발시킬 수 있기 때문에, 예인 안정성에 큰 영향을 미친다.

Eik and Marchenko (2012)는 원통 모양의 빙산 모형을 예인하는 실험을 수행하고, 모형의 운동 중 진동을 해석하여 외부 요인이 운동에 미치는 영향을 분석하였다. Kang et al. (2015)는 원형 기둥들로 구성된 Jack-up 구조물의 예인 중 운동 응답을 해석하여 다양한 해상상태에서의 과도한 운동 발생을 추정하였다.

본 연구에서는 정육면체에 가까운 형상의 9,300톤급 대형 케이슨을 예인하는 과정에서의 예인 안정성을 평가하고 예인 중 저항을 추정하기 위한 모형 시험 시스템을 설계하였다. 이 모형 시험 시스템을 이용하여 대형 케이슨의 정수 중 예인 시험을 수행하고 케이슨의 예인 중 안정성을 평가하는 방법을 제안하였다.

## 2. 실험 시설 및 대상

### 2.1 실험 시설과 장비

본 연구에서는 9,300톤급 케이슨이 실험 대상으로 사용되었다. 이에 대한 모형을 제작하고 예인 시험을 수행하였다. 아크릴 판재로 제작된 케이슨의 축척 비는 1/30이다. Fig. 1은 실험에 사용된 케이슨의 실물 형상이다. 케이슨은 x방향으로 예인된다. 케이슨의 한쪽 면에는 파도를 감쇠하기 위한 슬릿(slits)이 나 있고, 운송 중에는 슬릿에 덮개를 장착하여 슬릿을 통한 침수를 막는다. Fig. 2와 같이

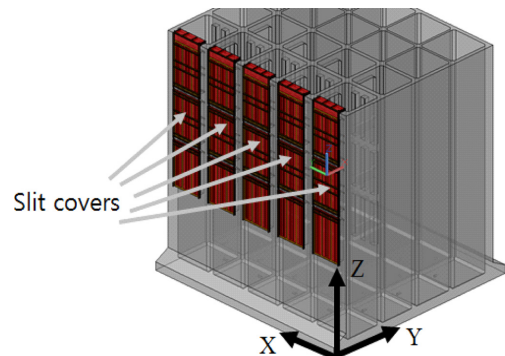


Fig. 1. Design of the caisson and slit covers.

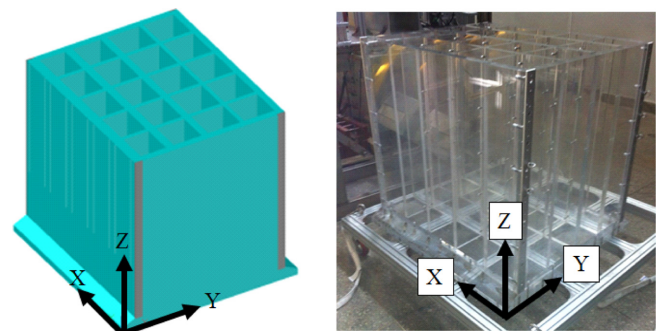


Fig. 2. Simplified geometry of the caisson model (left) and manufactured test model (right).

**Table 1.** Principal dimensions of the caisson

Item	Unit	Full scale	Model	Error
Scale ratio		1	1/30	
Length	m	28.7	0.957	-
Beam	m	27.7	0.923	-
Depth	m	28.0	0.933	-
Displacement	m <sup>3</sup>	9,350	0.350	-1.1%
Longitudinal center of gravity	m	13.26	0.439	-0.68%
Vertical center of gravity	m	11.76	0.404	3.1%
Radius of gyration (x)	m	12.69	0.417	-1.4%
Radius of gyration (y)	m	11.91	0.388	-2.3%
Radius of gyration (z)	m	12.12	0.392	-3.0%

형에 모사하였다.

본 연구에 사용된 케이슨 모형은 일반 선박 모형과 달리 내부가 격벽으로 나뉘어져 실험 모형의 배수량과 무게 중심, 관성 반경 등의 설정이 자유롭지 못하다. 따라서 모형 제작 단계에서 실제 케이슨의 밀도, 형상 등을 모두 모사하는 데에 초점을 맞추었다. 실제 케이슨의 설계 치수와 제작된 모형의 치수를 Table 1에 나타내었다. 무게중심 위치는 Fig. 2의 원점 위치부터의 거리로 정의되었다. 모든 치수는 최대 3%의 오차 범위를 만족하도록 설계 및 제작되었는데, 이는 선박 운동 시험에 대한 국제 수조 회의(International Towing Tank Conference, ITTC)의 기준인 5% 미만보다 정확한 수준이다.

실험은 서울대학교 예인수조에서 수행되었다. 예인수조는 길이 110 m, 폭 8 m, 깊이 3.5 m이며, 길이 방향으로 최대 속도 5 m/s의 예인전차가 이동할 수 있다. 예인전차의 속도는 입력 속도의 0.2% 내의 속도를 유지하도록 제어된다.

실제 케이슨 모형을 목표 예인 속도인 4 노트(knots)로 예인 하는 경우에 대해 프루드(Froude)상사를 통해 실험 조건을 설정하였다. 실험은 케이슨의 흘수, 초기 트림(trim)을 변경하여 수행하였다. 각 실험 조건에 대한 예인 속도, 대표 레이놀즈(Reynolds) 수, 실험 조건을 정리하여 Table 2에 나타내었다. 대표 레이놀즈 수는 케이슨의 x방향 길이를 기준으로 계산되었다. 모형과 실선간의 레이놀즈 수 차이가 발생하였지만 케이슨의 예인에서 주된 저항 성분은 케이슨 모서리에서의 유동 박리 현상일 것으로 생각되어 저항 결과의 무차원화 시 레이놀즈 수의 차이로 인한 유의미한 차이는 없을 것으로 생각되었다. 케이슨 모형의 흘수는 17 m과 20 m 두 가지 경우가 적용되었고 각각의 경우에 대해 초기 트림을 10°로 가한 경우와 0°의 트림을 적용한 경우로 실험을 진행하였다. 양의 초기 트림은 무게 중심을 뒤쪽으로 옮겨 예인당하는 쪽이 떠오르는 방향으로 정의되

었다. 따라서 본 연구에서는 총 4가지의 실험 조건이 적용되었다.

**2.2. 모형 시험 시스템 설계**

일반적인 예인 수조 실험은 예인 전차가 일정한 속도로 이동하며 모형을 예인한다. 실험 모형은 동력계에 바로 고정되고 예인 전차는 동력계와 모형을 일정한 속도로 예인하게 된다. 이는 비정상적 유동과 시간에 따른 요동이 거의 기대되지 않는 일반 선박의 모형 시험에는 적합하지만, 케이슨과 같이 시간에 따른 변동이 큰 유동 현상에서는 적합하지 못하다.

그리고 실제 해양 구조물의 예인 조건에서는 예인 속도가 아니라 예인선에서 전달되는 예인 동력이 일정한 조건이 적용된다. 따라서 기존의 예인 속도를 일정하게 유지하는 예인 시스템과 달리 예인선의 장력을 일정하게 유지할 수 있는 예인 시스템이 필요하다. Fig. 3은 일반적인 예인속도 일정 모형시험 시스템과 케이슨의 예인 시험을 위해 새로 개발된 예인력 일정 시스템의 개략적인 구조이다. 예인 시스템이 예인전차 상에 설치되어 일정한 속도로 전진한다는 기본 개념은 두 시스템 모두 동일하다. 하지만 새 모형 실험 시스템에서는 예인전차 상에 일정한 예인력의 제공을 위한 도르레 시스템이 설치된다.

예인선의 반대쪽 끝에 걸린 무게추의 무게를 변화시켜 장력을 조절할 수 있게 하였다. 예인 시스템 전체는 예인전차에 의해 일정한 속도로 전진하게 된다. 케이슨의 평균 저항과 같은 무게의 무게추가 적용될 경우, 예인되는 케이슨에는 무게추의 무게만큼의 장력이 걸려 케이슨의 평균 예인 속도와 전차의 진행 속도가 같아져 실제 케이슨의 예인 환경과 유사한 조건을 구현할 수 있다.

다만 무게추의 무게와 케이슨의 진행 속도가 조화를 이루는 정도에 대한 기준이 필요하다. 본 연구에서는 정수 중 실험 시 초기 장력을 위한 무게추의 예인 중 상하 변동이 120초의 계속 시간 중 전체 예인선 길이의 5% 미만으로 유지되는 조건을 반복 시험을 통해 찾아내어 무게추를 설정하였다. 우선 저항계수 1.0을 가정하여 예상 저항 범위를 구하였고, 이에 대응되는 무게추 영역을 시험하였다.

실제 케이슨의 예인을 위한 배치도를 참고하여, 예인선, 예인선, 케이슨의 길이를 포함한 전체 선단의 길이를 200 m 이하로 유지하는 선에서 예인선의 길이를 정하였다. 케이슨은 슬릿 덮개가 설치

**Table 2.** Test conditions for the wet towing

	Model scale	Full scale
Towing speed (m/s)	0.376	2.058 (4 knots)
Reynolds number	302,000	49,624,000
Froude number	0.122	
Draft (m)	0.567 / 0.667	17 / 20
Trim (°)	0 / 10	0 / 10

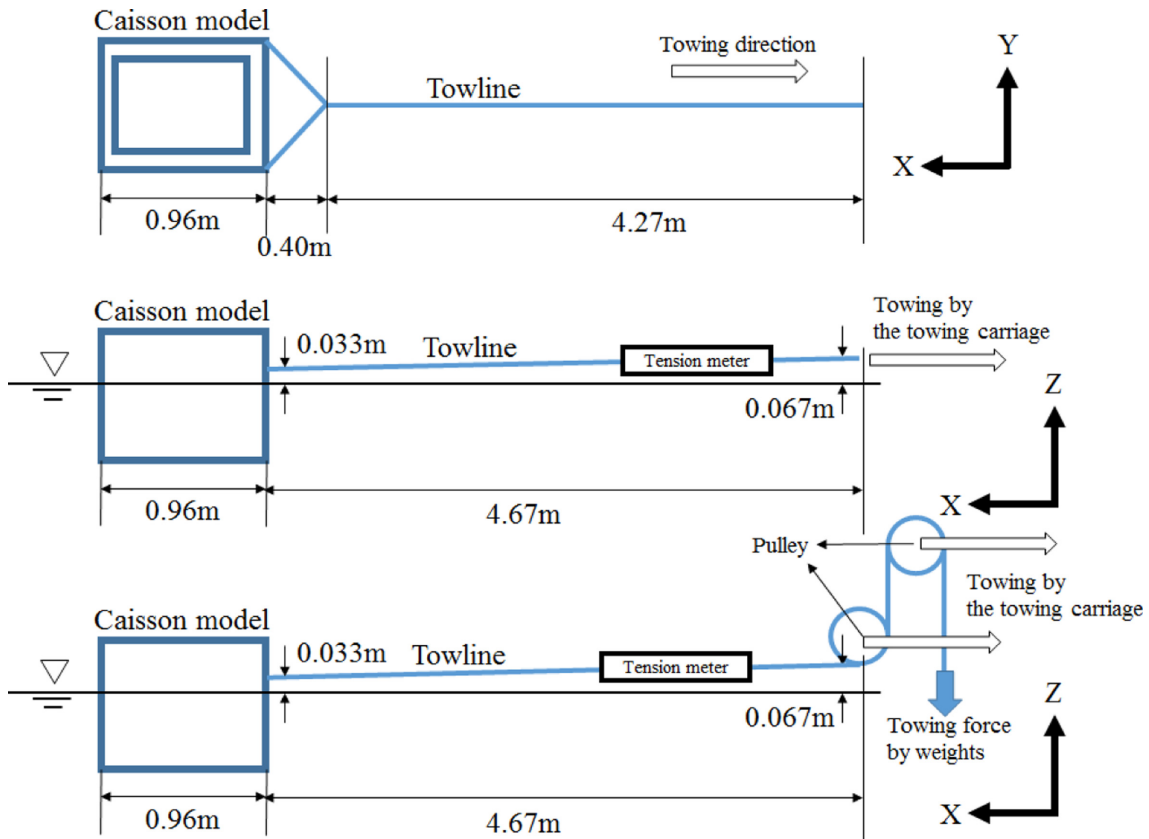


Fig. 3. Arrangement of the test model and towline in the model test (top: plain view; middle: towing system with constant towing speed; bottom: towing system with regular towing force).

된 면을 측면으로 하여 예인하였다. 슬릿 덮개가 설치된 면의 길이가 더 길기 때문에 이렇게 예인할 경우 더 작은 저항이 기대되었다. 실제 케이슨의 예인 지점은 수면으로부터 1 m 지점으로, 두 예인선이 90° 각도로 만나 하나의 예인선으로 합쳐져서 예인선에 연결되도록 하였다. 예인선의 반대쪽 끝은 수면으로부터 2 m 높이에 위치하게 된다. 모형 실험도 동일한 배치로 수행되었다.

케이슨 주위 유동은 비정상 유동이므로 케이슨의 저항은 불규칙적으로 요동하게 된다. 실험 중 예인전차 측의 예인점의 위치가 고정되어 있으면 케이슨의 운동 중 종동요(Pitch)와 전후동요(Surge)의 운동을 억제하기 위하여 예인선에 추가적인 장력이 가해질 수 있다. 제시된 시스템을 이용하여 예인점이 케이슨의 전후로 요동할 경우 무게추가 상하로 왕복하기 때문에 예인선의 장력이 일정한 수준으로 유지된다. 예인력이 일정하게 유지되면 그 값과 예인 전차의 속도와의 곱을 구하여 예인선의 동력이 일정하게 유지되는 실제와 유사한 환경을 만들 수 있다.

실험에서 사용된 계측 시스템은 Seo et al. (2014)의 연구에서 사용된 것과 같다. 장력의 계측은 예인선에 설치된 최대 장력 범위 50N의 장력계를 이용하였다. Full bridge strain gauge가 설치되어 장력계의 변형을 계측하였다. 케이슨의 6자유도 운동은 Xsens사의 MTw 제품을 사용하였다. 이는 3방향 각운동, 3방향 선형 운동을 계측할 수 있는 관성 계측장치로, 크기가 작아 모형의 무게중심

위치에 설치하기가 용이하였다. 본 연구에서는 6자유도 운동 중 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 횡동요(Roll), 선수동요(Yaw) 운동을 중심으로 해석하였다.

우선 앞에서 설명된 계측 시스템과 예인 시스템을 이용하여 대상 케이슨 모형을 17m 흘수, 0° 트림 조건에서 각각 예인하여 예인 속도 일정 조건과 예인력 일정 조건의 결과를 비교하였다.

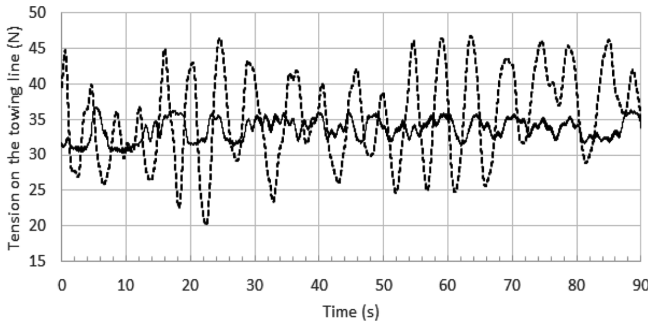
케이슨의 예인 운동은 모서리에서의 외동 유기 등의 비정상적 유동이 지배적이므로 많은 반복 실험을 통해서 수렴된 결과를 얻는

Table 3. Mean tension on the towline in two different towing conditions

Repeated number	Regular towing force condition (N)	Constant towing speed condition (N)
1	34.6	34.6
2	36.6	35.6
3	36.2	35.8
4	31.2	34.6
5	34.8	34.6
6	34.0	34.6
7	32.6	34.2
8	32.8	34.0
9	32.8	34.0
10	34.4	34.0
Mean	34.0	34.6

**Table 4.** Result of Caisson towing model tests in still water

Towing system	Towing force	Standard deviation of tension on the towline	Standard deviation of pitch angle
Unit	N	N	°
Constant towing speed	34.0	4.76	0.422
Regular towing force	34.6	1.47	0.114



**Fig. 4.** Comparison of time-series data of tension (dashed line: constant towing speed, solid line: constant towing force).

것이 중요하여, Table 3과 같이 반복 실험을 통해 얻은 각 시험 조건의 결과를 비교하였다. 10회의 모형시험 반복에서 표준편차는 평균의 1.8%로 나타나 충분히 수렴된 평균 결과를 얻을 수 있음을 우선 확인하였다.

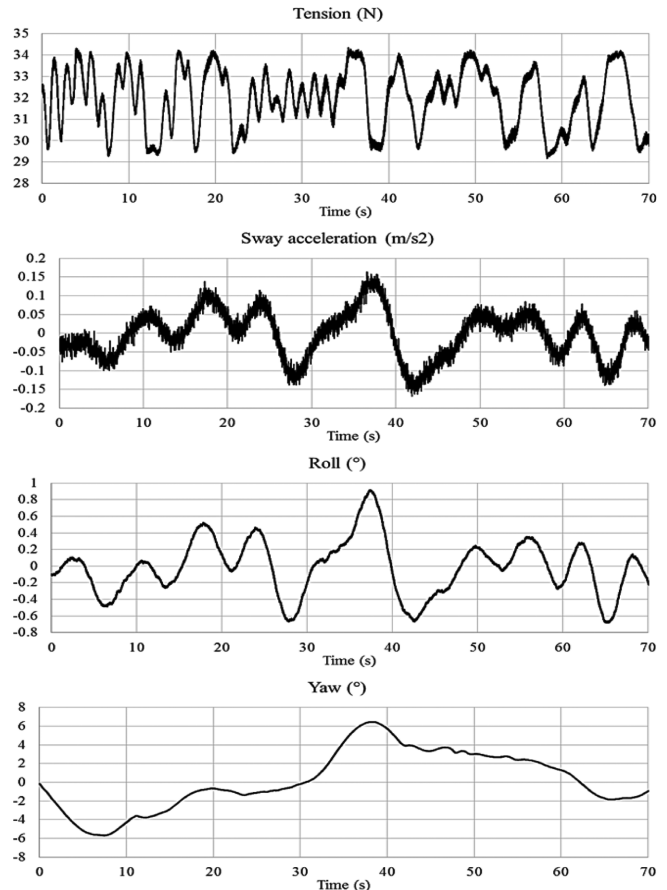
10회의 반복 시험을 수행하여 얻은 평균 장력, 표준편차와 중동요 요동 값을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 평균 예인력에서는 차이가 2% 미만으로 나타났지만, 실험 중 계측된 운동과 예인 동력의 표준편차에서는 큰 차이가 있었다.

케이슨은 예인 시 모서리에서의 주기적인 와동 유기로 인한 저항과 자세의 순간적인 변화가 항상 발생한다. 예인 속도 일정 조건에서는 케이슨이 뒤로 기우는 운동을 하게 될 때 자세 변화를 예인선이 구속하게 된다. 이는 더 강한 순간 장력을 발생하고, 반작용으로 케이슨이 급격하게 앞으로 끌려가면서 앞으로 기울게 된다. 이로 인해 일정 예인 속도 조건에서 운동과 장력의 순간 변화가 더 크게 나타났다.

Fig. 4는 초기 트림 0°, 17 m 흘수 조건에서 계측된 예인력의 시계열 그래프로, 새 일정 예인력의 예인 시스템의 경우 순간적 예인 하중이 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서 일반 모형선의 경우와 같이 케이슨을 일정한 속도로 직접 예인하는 실험은 케이슨 예인선의 장력 변화를 실제보다 과도하게 추정해낼 가능성이 있다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 논의

장력이 일정하도록 설계된 실험 시스템을 이용하여 17 m 흘수, 4 knots 선속, 0° 초기 트림 조건의 케이슨 모형 예인 중 얻어진 장력, 6자유도 운동 중 좌우동요, 횡동요, 선수동요의 시계열 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실제로는 동일 실험이 10회 반복되었지만, 대표적인 1회 시험의 시계열 결과를 나타내었다.



**Fig. 5.** Time-history of tension, sway acceleration, roll, and yaw in calm water: 17 m draft, 4 knots, and 0° initial trim condition

전체적으로 장력은 4N 범위 안에서 요동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 계측된 평균 장력의 11.5% 정도인데, 급격한 장력의 변화가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 좌우동요 가속도와 횡동요는 같은 위상으로 발생하여 두 운동이 밀접한 관련이 있음을 알 수 있고, 선수동요의 경우 60초 가량의 매우 큰 주기의 운동만이 관찰되었는데, 그 크기가 ±6° 였다.

실험을 통해 얻은 시계열 정보를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transform, FFT)으로 해석하여 주파수 영역으로 표시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. FFT 결과는 10회 반복 실험의 FFT 결과를 종합한 것이다.

장력 해석 결과에서는 0.2, 0.7 Hz 주파수 영역에서 요동 성분이 발생한 것을 볼 수 있고 이는 케이슨 모형에 주기적인 운동이 발생하는 것을 의미한다. 횡동요는 고유 횡동요 주기인 0.18 Hz 운동과 매우 낮은 주파수 영역의 운동이 확인되었다. 선수동요 운동은 앞

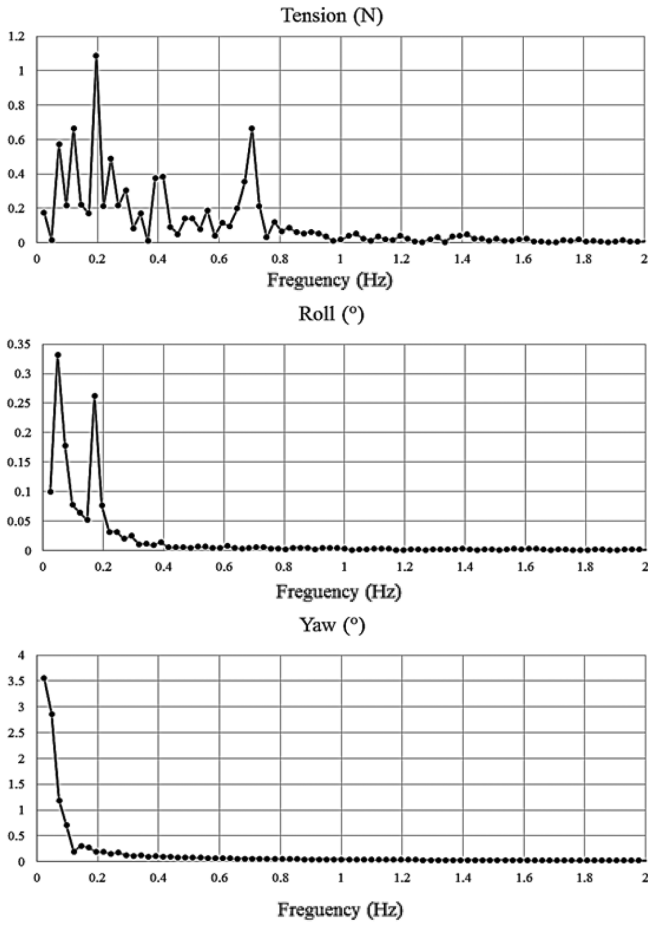


Fig. 6. FFT analysis results of tension, roll, and yaw motion in calm water: 17 m draft, 4 knots, and 0° initial trim condition.

서 시계열 결과에서도 확인하였듯 매우 큰 주기로 발달하였다.

초기 트림 10° 결과 중 예인사의 장력의 FFT 결과를 초기트림 0° 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 특히 0.7 Hz 영역의 와동 유기로 인한 운동 성분이 없어져서 케이슨의 주기적 운동이 줄어들고, 낮은 주파수의 운동만 남은 것을 알 수 있다. 이는 초기 트림이 적용된 케이슨이 예인 시 운동의 발생이 줄어들어 더 안정적임을 의미한다.

평균 장력, 장력의 표준편차, 횡동요와 선수동요 운동의 표준편차와 최대/최소값을 비교하여 Table 5에 정리하였다. 17 m 흘수 조건에 초기 트림이 있는 경우, 평균 장력뿐만 아니라 운동이 더 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 전면 투영면적이 줄어들면서 저항이 감소하는 것과 전면 아래쪽 모서리의 유동 박리가 줄어드는 것이 주

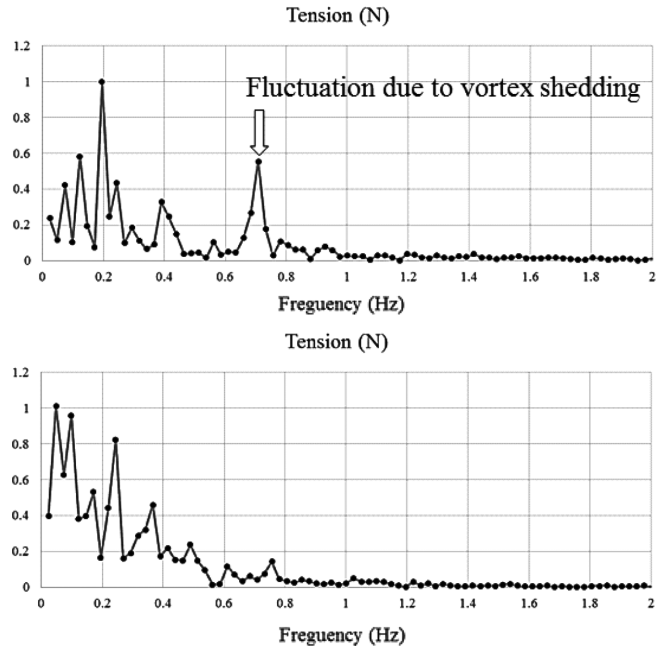


Fig. 7. Comparisons of tension with initial trim variations: 0° (top) and 10° (bottom).

된 원인으로 보인다.

횡동요의 감소는 주로 흘수변화에서 확인되었다. 큰 흘수 조건에서는 무게중심이 더욱 아래로 내려가기 때문에 케이슨의 안정성이 증가하여 횡동요가 감소한다. 또한 전체 중량의 증가로 와동 유거나 장력의 변동과 같은 외력에 대한 반응이 줄어든다.

반면 선수동요는 초기 트림의 변화와 연관이 있는 것으로 보인데, 무게중심이 뒤로 이동하면서 진자운동의 주기가 길어져 케이슨에 작용하는 장력의 시간에 따른 변동이 줄어들기 때문으로 생각된다. 또한 케이슨 주위의 와동 발생이 감소하면서 선수동요를 발생하는 주기적인 와동 유기의 영향이 줄어드는 것도 주요한 원인으로 보인다. 이러한 운동 변화는 최대/최소값의 변화에서도 확인할 수 있다.

따라서 케이슨의 안정적인 예인을 위해서는 전면부가 들리는 초기 트림을 적용할 것이 권장된다. 하지만 20 m 흘수 조건에서는 초기 트림으로 인한 이득이 저항 측면에서는 얻어지지 않았고, 운동 크기의 감소만이 확인되었다. 전체적인 안정성은 20 m 흘수 조건에서 더 나은 것으로 나타났지만, 이는 예인 시 저항 증가를 수반하기 때문에 작업 환경의 상황에 따라 저항 감소와 예인 안정성의 중요도를 따져 흘수를 결정해야 할 것으로 보인다.

Table 5. Results of wet towing model tests in calm water

Draft in full scale (m)	Trim (°)	Mean tension (N)	Standard deviation of tension (N)	Standard deviation of motion (°)		Max-min of motion (°)	
				Roll	Yaw	Roll	Yaw
17	0	33.8	2.15	1.22	3.92	3.42	9.21
	10	29.3	1.51	0.99	3.44	3.17	8.26
20	0	37.7	1.82	0.48	3.57	2.18	8.01
	10	37.1	1.42	0.29	3.38	1.46	7.42

**Table 6.** Prediction of the effective power for wet towing of the caisson

Draft in full scale (m)	Trim (°)	Effective power (kW)
17	0	2135
	10	1854
20	0	2522
	10	2359

실험을 통해 얻어진 저항 값을 이용하여 실제 케이슨의 예인 시 동력을 추정하여 Table 6에 나타내었다. 케이슨과 같이 뚱뚱하여 유동 박리가 크게 발생할 것으로 기대되는 형상은 일반적인 모형선과 달리 조파저항이나 마찰저항의 비중이 작고, 대신 전후면의 압력차로 인한 저항 성분이 큰 비중을 차지한다. 낮은 선속에서 예인되므로 조파저항을 무시할 수 있다. 또한 표면에서의 마찰저항은 등가 평판의 마찰저항을 바탕으로 산정하였을 때 모든 실험 조건에서 전저항 계수의 3% 미만으로 나타났다. 따라서 특별한 축척 효과에 대한 보정 없이 모형선과 실선 크기에서 동일한 저항 계수가 작용한다고 가정하여 실선 예인 소요 동력을 추정해내었다.

4 knots로 예인할 때, 트림 10° 조건에서 1854 kW의 유효 동력 (effective power)이 추정되었다. 20 m 흘수 조건에서는 2500 kW 내외의 유효 예인 동력이 추정되었는데, 일반적인 5000마력 예인선의 전달 동력인 3730 kW에 준추진 효율을 50%로 가정하여 얻어지는 예인 동력인 1865 kW를 기준으로 평가하자면 4노트의 속도로 예인이 어려운 수준이다. 따라서 경제적인 이유로 5000 마력급 예인선 1기로 예인 가능한 17 m 흘수 조건, 10° 초기 트림 조건의 예인이 권장되며, 실해역에서는 파랑이 없는 조건이라면 4 knots에 조금 미치지 못하는 정도의 속도로 예인을 할 수 있을 것으로 예측되었다. 이 조건에서는 0° 초기 트림에 비해 운동의 크기가 줄어 안정성이 확보되는 효과도 기대할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 예인 동력을 일정하게 하는 예인 시스템을 개발하였고, 이를 이용하여 케이슨 모형 예인 시험을 수행하였다. 기존의 예인 시스템에 비해 현실적인 물리현상을 잘 반영한 새 시스템을 이용한 결과 기존의 예인 속도 일정 시스템은 장력과 운동의 요동을 더 크게 발생시키는 문제가 있었음을 확인하였다.

개선된 예인 시스템을 이용한 케이슨 모형의 예인시험을 통해 wet towing조건의 케이슨의 정수 중 예인 동력과 안정성을 추정하였다. 케이슨 전면이 들리는 트림 조건에서 전면의 투영 면적이 줄어들고 외동 유기를 감소시켜 더 작은 저항을 발생시켰다. 작은 저항

이 발생하는 트림 조건에서는 케이슨의 운동이 감소하기도 하였다.

이후 추가적인 연구를 통해 케이슨 주위의 외동 발달을 억제하기 위한 부가물을 개발하여 장착하고, 본 연구에서 개발된 실험 시스템을 이용하여 예인 성능 평가를 수행한다면 예인 시 저항 감소와 예인 안정성의 개선을 함께 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 삼성물산(주)의 지원과 한국연구재단(No.2013R1A1A2012597), 한국산업기술평가관리원(10060329), 민군융합기술연구사업(No. CMP-16-03-KISTI)의 지원을 받아 수행된 연구임

#### References

- [1] Eik, K. and Marchenko, A., 2010, Model Tests of Iceberg Towing, Cold Reg. Sci. Technol., Vol. 61, No. 1, pp. 13-28.
- [2] Fang, M.-C. and Ju, J.-H., 2009, The Dynamic Simulations of the Ship Towing System in Random Waves, Mar. Technol, Vol. 46, No. 2, pp. 107-115.
- [3] Fitriadhy, A., Yasukawa, H., and Koh, K.K., 2013, Course Stability of a Ship Towing System in Wind, Ocean Eng., Vol. 64, pp. 135-145.
- [4] Kang, W.-H., Zhang, C. and Yu, J.-X., 2016, Stochastic Extreme Motion Analysis of Jack-Up Responses During Wet Towing, Ocean Eng., Vol. 111, No. 1, pp. 56-66.
- [5] Latorre, R., 1988, Scale Effect in Towed Barge Course Stability Tests, Ocean Eng., Vol. 15, No. 4, pp. 305-317.
- [6] Nam, T.-K., Jung, C.-H. and Jeong, J.-S., 2012, A Study on the Calculation of Resistance of the Ship to be Towed and Towline Tension, J. Navigation Port Res., Vol. 36, No. 8, pp. 607-612.
- [7] Seo, J., Park, C.W. and Rhee, S.H., 2014, Model Test System for Towing Stability of a Very Large Caisson, The Annual Conference of the Korean Society of Marine Environment and Energy, Seoul, Republic of Korea, 20-21 November, 2014.
- [8] Sohn, K.H. and Kim, Y.K., 2000, A Study on Course Stability of Towing and Towed Vessels System under Wind Pressure, J. Korean Inst. Navigation, Vol. 24, No. 3, pp. 113-122.

Received 22 June 2016

Revised 6 October 2016

Accepted 14 November 2016