

Model Test for Towing Stability and Seakeeping of a Multi-Purpose Mobile Base

해상풍력 일괄설치시스템 예인 안정성 및 내항성능 평가를 위한 모형시험

Dong-Ho Cho, Jun-Shin Lee, Moo-Sung Ryu, Min-Uk Jung, Ho-Yeop Lee, Kwan-Woo Han, Seung-Han Kim
조동호, 이준신, 유무성, 정민욱, 이호엽, 한관우, 김승한

Abstract

A model test for assessment of towing stability and seakeeping of a multi-purpose mobile base (MMB) was performed in calm water and wave conditions. Scale ratio of the MMB was 1/48. Tension of the towing line was measured during tests to estimate effective power to tow the full scale MMB. The tests were repeated with towing speed. In addition, an inertial measurement unit was used to measure six DOF motion of the model. Seakeeping performance was assessed through the captive model test.

전력연구원에서 설계한 5 MW급 일괄설치시스템의 예인안정성 및 내항성능 검증을 위해 수조모형시험을 실시하였다. 1/48 축소모형을 만들어 정수 및 파랑 중 시험을 수행하였다. 실선기준 4, 5, 6 knots의 대응속도로 예인하며 예인선의 장력을 계측하고, 실선의 필요 예인 동력을 추정하였다. 또한, 관성계측장치를 이용하여 모형의 6자유도 운동을 계측하였으며, 파랑 중 구속모형시험을 통해 내항성능을 확인하였다.

Keywords: Offshore Wind Turbine, Transportation and Installation, Model Test, Towing Stability, Seakeeping

I. Introduction

A. 연구의 필요성

한전 전력연구원에서는 해상풍력단지 건설비용 저감을 위해 풍력발전기와 하부기초를 안벽에서 조립 후 한 번에 운송 설치하는 일괄설치공법 연구 [1]를 수행 중이며, 새로운 설치공법에 맞는 전용 운반 설치 시스템을 개발하고 있다. 5 MW급 풍력터빈의 하부 구조물 설계결과 석션버킷의 최대크기가 28 m로 계산되어 선체의 최소 너비가 45 m로 확정되었다. 선체 폭의 최소값이 제한됨으로 인해 길이 대비 폭이 넓은 형태의 선체 설계가 불가피하며, 이 경우 저항이 커지고 예인안정성이 나빠질 수 있으므로 이에 대한 선형 평가가 필요하다.

모형시험을 통한 실선 저항의 추정은 Froude [2]에 의해 처음으로 시작되었다. 선박의 전체 저항을 각 성분별로 나누고 저항 성분별 모형선-실선 상관관계를 이용하여 실선 저항 추정을 시도하였다. 국제선형시험수조회의는 1957ITTC 모형선-실선 상관곡선 [3]을 실선저항 추정의 기준으로 택하였으며, 1978년 단추진기선의 성능추정방법 [4]을 저항 추정의 표준으로 정했다. 본 연구에서도

ITTC의 표준방법을 이용하여 실선저항을 추정하였다.

예인안정성의 경우 Nam et al. [5]은 스케그 유무에 따른 운송 바지선의 예인안정성에 관한 모형시험, 수치해석을 수행하고, 스케그를 부착한 경우 수평력이 증가하여 수평면 거동이 급격하게 줄어들어 안정을 찾아감을 보였다. 또한, 예인줄의 길이 및 예인속도와 안정성에 대해 모형시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교하여 제시하였다. Bu et al. [6]은 스케그의 수에 따른 예인안정성에 대한 모형시험과 수치해석을 수행하였으며, 스케그의 경우 1개인 경우 개선이 미비했고, 2개인 경우 예인안정성을 개선함을 보였다. 본 연구에서는 추가로 스케그 형상에 따른 예인안정성의 차이를 확인하기 위하여 동일한 크기를 가진 스케그에 끝단이 각진 형태와 둥근 형태에 대해 예인줄 이송시험을 수행하였다.

설계된 선형의 건조 전에 주요한 성능들에 대한 검증이 모형 시험 단계에서 수행되어야 한다. 공학문제 중에는 극히 제한된 문제만이 수학적 해석만으로 해결이 가능하고, 대부분의 문제들은 시험에 의존하여 해결한다. 수치 시뮬레이션의 발달에 따라 복잡한 유동도 계산에 의해 예측이 가능해졌으나, 결과의 타당성은 시험이나 실험결과와 대조하여 검증해야 하고, 경우에 따라 시험결과에 맞 춰 변수들을 조정해야 할 필요가 있다. 선박의 경우 잉여저항은

Article Information

Manuscript Received November 25, 2019, Revised March 10, 2020, Accepted March 13, 2020, Published online June 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Dong-Ho Cho (dh.cho@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

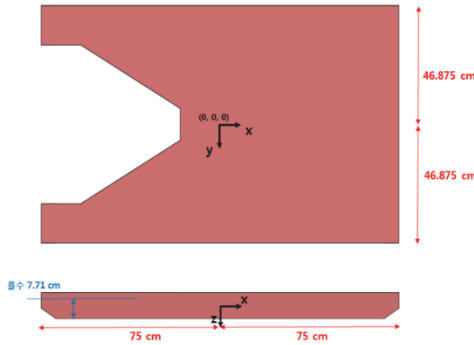


Fig. 1. 수조시험 1/48축소모형.

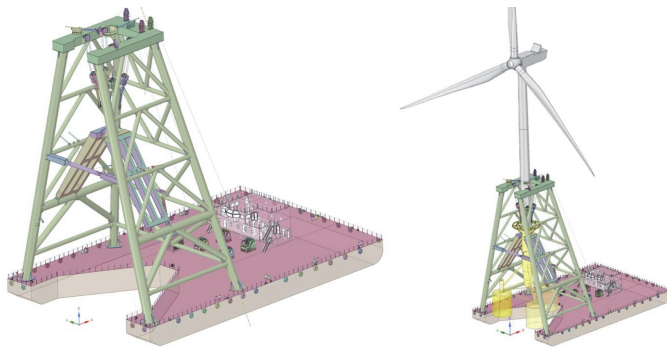


Fig. 2. 풍력발전기 적재 및 미적재 모델.

정형화된 수식이 존재하지 않아 모형시험을 통해 도출되어야 한다. 만재흘수량 10,000톤급 일괄설치시스템(Multi-purpose Mobile Base, MMB)에 대하여 실선저항예측, 예인안정성, 내항능능 및 조류력에 의한 선체 안정성을 검증하고자 모형시험을 실시하였다.

II. 수조모형 시험

A. 모형선

1) 상사

MMB의 크기는 길이 72 m, 폭 45 m, 높이 5 m, 흘수 3.7 m이다. 예인수조 크기(110 m × 8 m × 3.5 m) 및 예인전차의 최대속도(5 m/s)를 고려하여 축척비(N)는 48을 선정하였다. 사용된 모형선의 형상은 Fig. 1과 같다.

실형(prototype)을 사용한 시험은 비용과 시간이 많이 소요되므로 모형시험에 의존한다. 차원해석이라는 도구를 빌어 유동성량들 사이에 성립해야 할 관계식을 무차원 파라미터의 항으로 도출하고, 상사율이 성립하도록 모형시험을 수행하여 실형의 유동을 예측할 수 있다. 일반적으로 두 개의 유동이 상사하기 위해서는 1. 기하학적 상사, 2. 운동학적 상사, 3. 역학적 상사가 충족되어야 한다. 기하학적 상사는 두 유동사이에서 서로 대응하는 모든 길이의 비가 일정한 값을 갖는다는 것을 의미하며, 운동학적 상사는 유체가 흐를 때 물체와 경계 뿐만 아니라 유동이 그리는 유선까지도 기하학적으로 상사한 유동을 말한다. 역학적 상사는 모든 대응점에 작

TABLE 1
실선, 및 모형선 제원

제원	실선	모형선	
스케일 [축척비]	1	1/48	
길이 (m)	72	1.5	
풍력발전기 적재	흘수	3.7 m	7.71 cm
	배수량	9813 ton	89.73 kg
미적재	흘수	3.7 m	7.71 cm
	배수량	9857 ton	89.13 kg
기준 수온 (°C)	15 (해수)	20 (청수)	
밀도 (kg/m ³)	1,026.0	998.2	
동점성 계수 (m ² /s)	1.19×10 ⁻⁶	1.0034×10 ⁻⁶	
점성 계수 (Pa·s)	0.00122	0.001002	

TABLE 2
실선 무게중심 및 관성모멘트

실선기준	적재	미적재	
무게중심 (m)	x	41.54	41.46
	y	0.00	0.00
	z	13.29	7.24
<i>I_{xx}</i> (kg·m ²)	9.381×10 ⁹	4.633×10 ⁹	
<i>I_{yy}</i> (kg·m ²)	2.950×10 ¹⁰	7.059×10 ⁹	
<i>I_{zz}</i> (kg·m ²)	2.342×10 ¹⁰	6.881×10 ⁹	

용하는 힘의 비가 일정한 두 유동을 말한다. 밀도분포가 상사된 두 유동에서 역학적 상사가 이루어지면 자동으로 운동학적 상사와 기하학적 상사가 이루어진다.

유체에서 역학적인 상사를 만족시키는 주요 무차원수로는 레이놀즈수, 프루드수, 오일러수, 마하수, 코시수, 웨버수 등이 있다. 이 중 선박 수조모형시험에서 상사를 맞춰야 하는 무차원수는 레이놀즈수($Re = \rho VL / \mu = VL / \nu$)와 프루드수($Fr = V / \sqrt{Lg}$)이다. 물리적 의미로 레이놀즈수는 관성력($F_{관성} = ma \propto (\rho L^3)(\frac{V}{L/V}) = \rho L^2 V^2$)과 점성력($F_{점성} = \tau A \propto (\mu \frac{V}{L})(L^2) = \mu LV$)의 상대적 크기를 뜻한다. 프루드수는 관성력과 중력($F_{중력} = mg \propto (\rho L^3)g = \rho L^3 g$)의 상대적 크기를 나타낸다. 레이놀즈수는 점성력이 상대적으로 크게 작용하는 유동에서 매우 중요한 무차원수이며, 파이프 유동에서 발생하는 마찰저항을 알아보고자 할 때 사용된다. 프루드수는 중력이 유동을 지배하는 문제에서 중요한 무차원수이며, 개수로 문제 및 기타 자유표면을 갖는 문제가 이에 해당한다. 예로 배가 항해할 때 증력파에 의하여 발생하는 조파저항 등을 다룰 때 상사변수로 사용된다. 1/48의 축소모형으로 시험시 유속을 두 무차원수에 대해서 구해보면 Eq. (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 Re &= \rho \frac{V_m L_m}{\mu} = \frac{\rho V_s L_s}{\mu} \\
 \therefore V_{m,Re} &= \frac{L_m}{L_s} V_s = \frac{1}{48} V_s \\
 Fr &= \frac{V_m}{\sqrt{L_m g}} = \frac{V_s}{\sqrt{L_s g}} \\
 \therefore V_{m,Fr} &= \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \sqrt{\frac{1}{48}} V_s
 \end{aligned} \tag{1}$$

TABLE 3
수조 조파장치 제원

Type	8 분할 Plunger
Max. wave height	0.5 m
Wave period	0.5-3.5 sec.
Wave spectrum	ITTC, ISSC, JONSWAP, Neumann Pierson & Moskowitz 등

TABLE 4
군산지점 해면관측 통계자료

군산 해상	유의파고	평균주기
H0 (Calm sea)	-	-
H1 (군산에서 1개월 간 측정된 유의파고 사용)	0.4 m	4.2 sec
H2 (군산에서 1개월 간 측정된 최대파고 사용)	1.4375 m	7.07 sec

TABLE 5
수조모형 시험의 불규칙파

조파기	유의파고	평균 주기	피크주기
H0	-	-	-
H1	0.00833 m	0.6062 sec	0.786 sec (7.99 rad/s)
H2	0.02995 m	1.0204 sec	1.322 sec (4.75 rad/s)

즉, 요구되는 모형시험의 속도가 다르므로 두 무차원수를 동시에 만족하는 모형시험은 불가능하다. 예인시험의 시험환경은 자유수면 근처의 유동이 중요하기 때문에 프루드수를 상사시켜 수행하며, 상사를 제외한 레이놀즈수와 관련된 마찰저항은 경험식을 이용하여 별도로 추정한다.

2) 모형선 제원

모형선의 구체적인 제원은 TABLE 1에 나타났다. 풍력 발전기의 적재 상태와 미적재 상태에 대한 형상과 무게중심 및 관성모멘트 정보를 Fig. 2와 TABLE 2에 나타났다. 무게중심 표현 시에는 선미 끝단의 바닥면에서의 측정된 거리를 이용하여 표현하였으며, 관성모멘트 값은 무게중심에서의 값을 실선 기준으로 하여 나타났다.

모형선의 무게중심 및 관성모멘트를 조절하기 위하여 무게추를 배열하였다. 먼저, 무게 추와 모형선을 질점들로 나누어 이론적인 계산을 수행하였고, 준비수조에서 선수와 선미의 흘수를 맞추며 무게 추들의 최종적인 위치를 결정하였다.

B. 입사파조건

조파장치는 실제 해상상태를 재현하여 파랑 중 모형시험을 수행하기 위해 파를 발생시키는 장치로 Flap 형태 및 Plunger 형태의 조파장치가 있다. 서울대학교 예인수조에 설치된 조파장치는 2차원 규칙파 및 불규칙파를 생성할 수 있는 8분할 Plunger형의 조파장치로서 선박 및 해양구조물의 파중 운동 및 조종성, 안정성 시험 등의 수행이 가능하다.

또한 조파장치를 이용한 시험 또는 모형시험시 생성된 파를 효과적으로 소멸시키기 위한 소파장치가 수조의 조파장치 반대편에 설치되어 있다. 조파장치의 자세한 제원은 TABLE 3에 나타났다.

본 연구에서는 MMB가 운용되는 실제 해상상태에 해당하는 불규칙파를 생성하기 위해 통계청에서 제공하는 TABLE 4의 군산지점 평균 유의파고와 평균 파주기를 사용하였다. 유의파고($h_{1/3}$)는

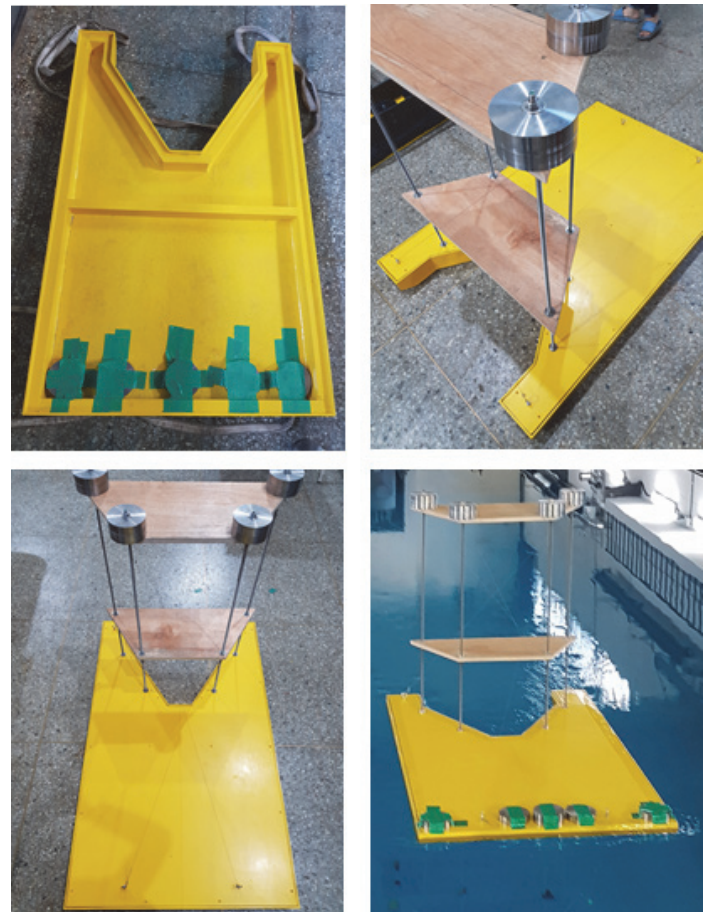


Fig. 3. MMB 모형선.

입의 관측 시간 동안 관측된 파고 중에서 파고가 높은 순서로 전체 1/3에 해당하는 파고들의 평균값이다.

모형시험에 사용된 불규칙파 2 조건을 TABLE 5에 나타났다. H0 조건은 정수 상태로 파가 없으며, H1 조건은 군산에서 1개월 간 측정된 유의파고 정보와 주기를 사용하여 정하였다. H2 조건은 군산에서 1개월 간 측정된 최대파고 값을 파고가 높은 순서로 1/100에 해당하는 파고들의 평균값으로 두고 유의파고를 계산하였다. 1/100 최대파고는 유의파고의 1.6배($h_{1/100}=1.6h_{1/3}$) 정도로 알려져 있다.

불규칙해면은 규칙파의 선형조합으로 표현할 수 있다. ITTC (International Towing Tank Conference)에서 해면의 발달상태에 따라 여러 스펙트럼을 제안하며, 일정한 바람이 장시간 불어 완전발달한 해면에 대해 Pierson-Moskowitz 스펙트럼 사용을 권장한다.

특히, 해면의 유의파고와 특성주기가 예측된 경우라면, ITTC1978 [4]에 의해 Eq. (2) 의 2-parameter Pierson-Moskowitz 스펙트럼 사용을 권한다.

$$S_{\zeta}(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} e^{-\frac{B}{\omega_w^4}} [m^2 \cdot s] \tag{2}$$

여기서 $A = \frac{173h_{1/3}^2}{T_1^4}$, $B = \frac{691}{T_1^4}$ 이고, T_1 은 평균주기 $T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1}$ 이다. m_0, m_1 은 스펙트럼 모멘트 $m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$ 이다.

모형시험 시에 파고는 실선 기준 값에 비해 1/N배가 되어

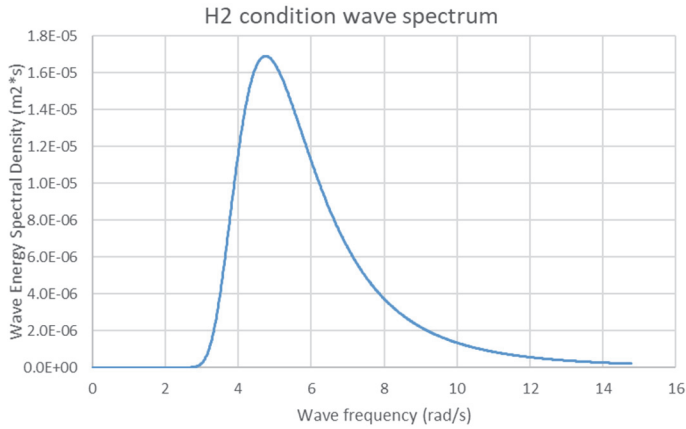
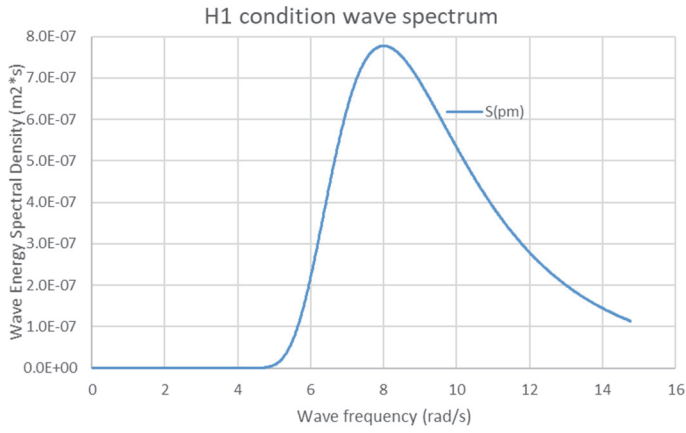


Fig. 4. 수조모형시험 불규칙파 스펙트럼.

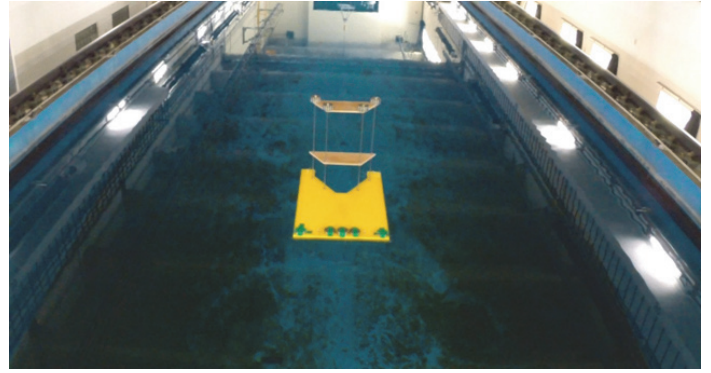


Fig. 6. 예인줄 이송시험 현장 사진.

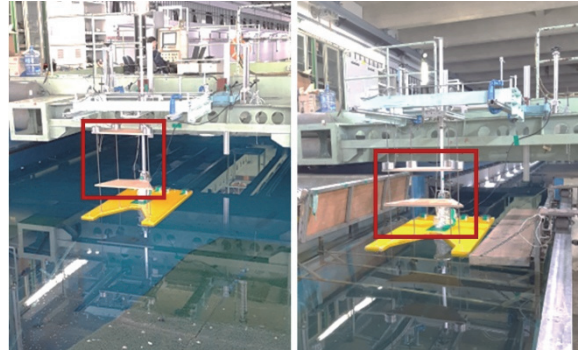


Fig. 7. 구속모형시험 현장사진.

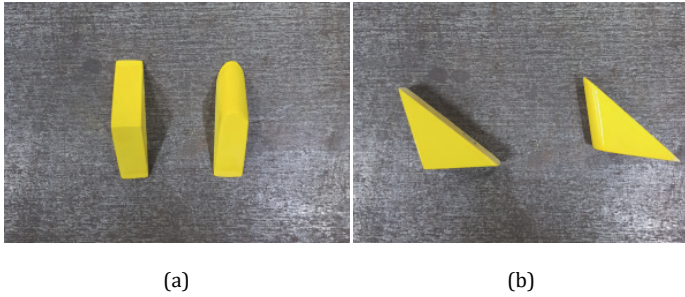


Fig. 5. 스케그 형상 좌)등근 스케그, 우)각 스케그.

야 하고, 주기는 $1/\sqrt{N}$ 배가 되어야 한다. 조파기를 통해 구현된 H1 조건과 H2 조건에 해당하는 파 스펙트럼은 Fig. 4와 같다. H1 조건의 불규칙파는 각주파수 4.5-16 사이의 정규파의 선형조합을 통해 구현할 수 있다.

C. 모형시험 방법

1) 예인줄 이송시험

바지의 경우 일반 선박 보다 길이 대비 너비가 넓어 예인 시 좌우동요가 크게 발생하게 된다. 이러한 좌우동요를 줄이기 위해서 선체하단에 스케그 부가물을 부착하여 예인안정성을 높인다. 스케

그 형상에 따른 예인 안전성을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 크기는 동일하지만, 끝단이 각진 형태와 둥근 형태에 대하여 예인줄 이송시험을 수행하였다.

풍력발전기가 적재된 상태에 대해서만 예인줄 이송시험을 수행하였으며, 예인줄로는 바낙스 사의 6호 낚싯줄을 사용하였다. 낚싯줄의 직경은 0.41 mm, 강도는 27.5 kg/lb이다. 실선이 예인되는 상황을 똑같이 모사하기 위해 예인줄의 길이는 4 m이고, 예인줄 사이의 각도는 40°가 되도록 설정하였다.

예인전차에 고정되는 예인줄에 장력계를 설치하여 모형선 예인시에 걸리는 장력을 측정하였다. 선박의 운동계측을 위해서 비디오 동영상을 분석하여 좌우동요 거리와 선수동요 각을 계산하였다. 최초 계획은 모형선 중심에 Inertial Measurement Unit (IMU) 센서를 탑재하여 디지털 신호를 취득하려 하였으나, 실제 모형선을 예인한 결과 상대적으로 낮은 속력과 모형선의 느린 움직임으로 인하여 IMU 센서가 측정할 수 있는 범위 이하의 결과를 보여 IMU 센서를 이용한 디지털 신호는 취득할 수 없었다. 모든 시험조건에서 모형선의 움직임을 비디오 녹화하였으며, 녹화된 이미지를 1초 단위로 분석하여 모형선의 궤적을 추적하였다. 모형선의 선수각도 역시 녹화된 비디오 영상을 이용하여 계산되었다. 모형선의 중심선과 선수수선, 선미수선이 만나는 위치에 각각 Pole을 설치하였으며, 녹화된 이미지에서 y 방향 변위를 분석하고 모형선의 길이와 비교하여 최종적으로 모형선의 선수각도를 계산하였다. 분석에 사용된 이미지 예시를 Fig. 6에 나타냈고, 예인줄 이송시험의 자세한 조건에 대해서는 TABLE 6에 나타냈다.

TABLE 6
예인줄 이송시험 조건

스케그 형상	동근 스케그	각진 스케그
선속 [knots]	4, 5, 6	4, 5, 6
파 조건	H0, H1, H2	H0, H1, H2
풍력 발전기	적재	적재
총 케이스	9	9

TABLE 7
구속모형시험 종류 및 조건

구속시험	저항시험	조류력	내항시험
선속 [knots]	4, 5, 6	4, 5, 6	0
파 조건	H0, H1, H2	H1, H2	H1, H2
사향 각도 (°)	0	0, 45, 90	0, 45, 90, 180
풍력발전기	적재, 미적재	적재	적재
총 케이스	18 (3×3×2)	18 (3×2×3)	8 (2×4)

2) 구속모형시험

본 연구에서 수행된 구속모형시험의 종류로는 저항시험, 조류력 계측시험, 내항시험이 있다. 구속모형시험의 자세한 조건에 대해서는 TABLE 7에 나타내었다. 6자유도 장비를 이용하여 상하동요, 종동요각, 횡동요각 변화를 측정하였다. 측정하지 않는 전후동요, 좌우동요, 선수동요각은 고정하여 시험을 수행하였다. 풍력발전기 적재 상태와 미적재 상태의 흡수는 동일하나 관성모멘트 값이 상이하며 각 경우에 대한 세팅 과정은 Fig. 7과 같다. 풍력발전기 미적재 상태에는 무게 추가 아래로 내려와 무게중심이 아래쪽에 위치하게 된다.

III. 결과

A. 예인줄 이송시험 결과

스케그의 종류와 파 조건에 따른 좌우동요 거리와 선수동요 각을 바탕으로 하여 예인줄안정성을 판단하였다. 선속에 따른 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 좌우동요 거리는 선체의 폭으로 무차원화하여 나타냈으며, 선수동요 각은 degree 단위로 표시하였다.

모든 시험 조건에서 시간이 지남에 따라 모형선의 좌우동요 거리와 선수동요 각이 0으로 수렴함을 알 수 있다. 모형선의 초기 자세는 수렴 정도에 큰 영향을 미치는데, 이는 초기 자세에 따라 예인줄에 부하되는 장력의 크기와 장력이 모형선에 작용하는 방향이 달라지기 때문이다.

예인줄에 걸리는 장력은 모형선이 예인되면서 받는 저항과 같은 값을 가지며, 본 모형시험에서는 장력계를 통하여 장력을 측정하였다. 4 knots 조건에서 장력의 시계열 결과를 예시로 Fig. 9에 나타냈다. 예인이 시작되는 초기에 장력이 급격하게 증가하나 일정 시간이 지난 후에는 작은 폭으로 진동하는 정상 상태에 도달한다. 장력계는 초당 50개의 데이터 취득이 가능하며, 정상 상태 구간에서 평균과 표준편차를 구하였다. 4 knots에서는 60초 동안의 데이터, 5 knots에서는 50초 동안의 데이터, 6 knots에서는 40초 동안의 데이터를 사용하였다.

실선의 저항 추정을 위하여 ITTC-1957 방법을 사용하였다. 축척비 N 으로 만들어진 모형선을 사용하여 대응속도에서 모형선을

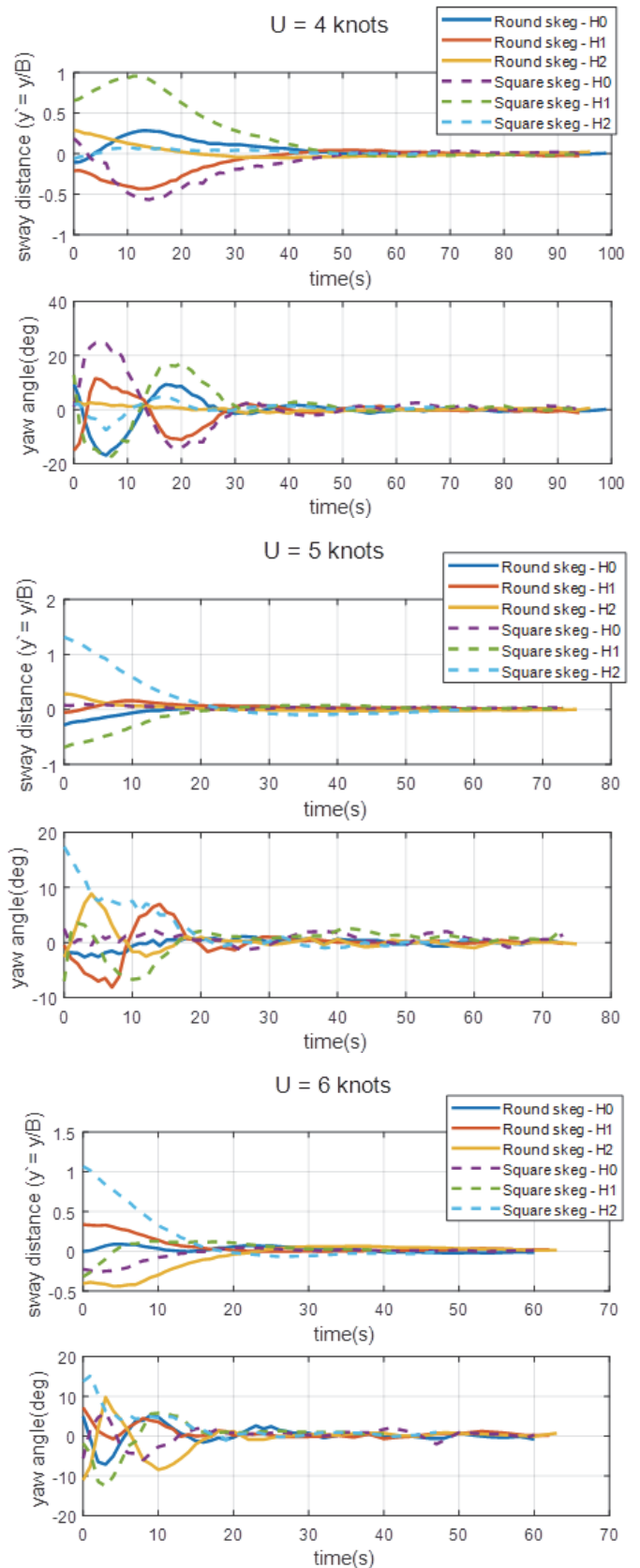


Fig. 8. 스케그 형상에 따른 이송모형 시험 결과.

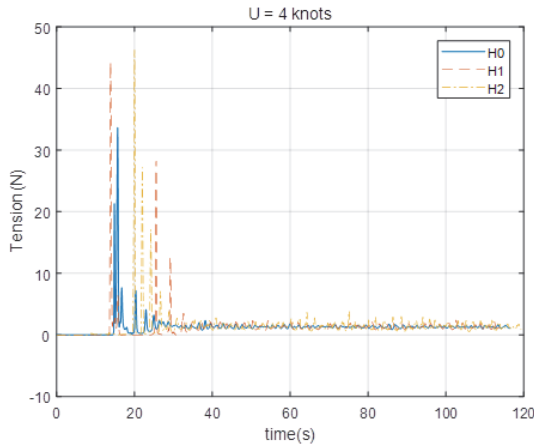


Fig. 9. 예인시험 결과 - 예인장력.

TABLE 8
정수 중 실선 저항 추정 결과

속도 [knot]	스케그 형상	잉여저항 R_{RS} [kN]	마찰저항 R_{FS} [kN]	총 저항 R_{TS} [kN]
4	각	197.9573	16.8323	214.7897
	등근	202.5262	16.8323	219.3586
5	각	316.9794	25.4935	342.4729
	등근	357.7099	25.4935	383.2034
6	각	544.4781	35.8003	580.2784
	등근	530.9255	35.8003	566.7259

예인하여 총 저항값(R_{TM})을 계측한다.

$$R_{TM} = R_{FM} + R_{RM} \quad (3)$$

계측된 총 저항은 모형선의 마찰저항(R_{FM})과 잉여저항(R_{RM})의 합이다. 여기서, 잉여저항은 형상저항(점성저항)과 조파저항의 합이다. 모형시험을 통해 측정된 힘 성분은 스케일이 고려된 차원을 가진 값이므로, 무차원화를 통하여 실선과 비교 및 분석이 가능하다. 측정된 저항 값(R_{TM})을 물의 밀도(ρ), 침수표면적(S), 선속(V)을 이용하여 Eq. (4)와 같이 무차원화된 저항계수(C_{TM})를 얻을 수 있다.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{0.5\rho_M S_M V_M^2} \quad (4)$$

총 저항계수(C_T)는 총 저항과 같이 마찰저항계수(C_F)와 잉여저항계수(C_R)의 합으로 표시할 수 있으며, 마찰저항은 ITTC1957 [3]에서 채택한 마찰저항 경험식을 사용하며 레이놀즈수와 관련된 함수로 Eq. (5)로 표현된다. 마찰저항 시험식의 경우 실제 선박의 마찰저항을 추정하기에는 부정확하나 현재까지 개발된 모델 중에 더 적절한 방법이 없기 때문에 ITTC에서 채택하고 있다. 다만 식의 적용은 학술, 연구, 시험용으로만 제한한다.

$$C_T = C_F(Re) + C_R(Fr) \quad (5)$$

$$C_{FM}(Re) = \frac{0.075}{[\log_{10}(Re_M) - 2]^2}$$

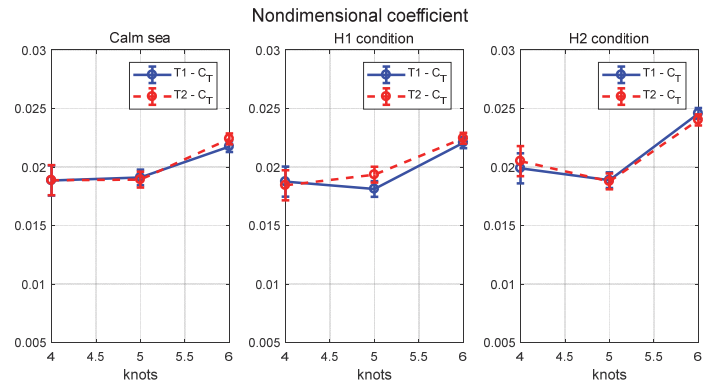


Fig. 10. 저항시험 결과 - 총 저항계수.

총 저항계수에서 마찰저항계수를 빼주어 모형선의 잉여저항계수를 구한다.

$$C_{RM}(Fr) = C_{TM} - C_{FM} \quad (6)$$

지금까지의 절차를 통해서 모형선의 저항계수를 모두 계산했다. 이 저항계수들을 활용하여 실선의 저항을 추정할 수 있다.

잉여저항은 프루드수와 관련된 함수이다. 프루드수 상사를 적용한 모형시험을 실시하였기에 모형시험에서 계산된 잉여저항계수와 실선의 잉여저항계수는 동일한 값을 가지며, 이를 통해 실선의 잉여저항(R_{RS})를 계산한다.

$$C_{RM} = \frac{R_{RM}}{\rho_M \frac{V_M^2}{2} S_M} = \frac{R_{RS}}{\rho_S \frac{V_S^2}{2} S_S} = C_{RS} \quad (7)$$

$$R_{RS} = \frac{\rho_S \frac{V_S^2}{2} S_S}{\rho_M \frac{V_M^2}{2} S_M} R_{RM} = \frac{\rho_S}{\rho_M} N^3 R_{RM} \quad (8)$$

레이놀즈수는 상사를 시키지 않았으므로, 실선의 마찰저항계수는 실선의 레이놀즈수로부터 계산한다.

$$C_{FS}(Re) = \frac{0.075}{[\log_{10}(Re_S) - 2]} \quad (9)$$

잉여저항계수와와의 합을 통해 실선의 총 저항계수와 총 저항을 구한다.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS}(= C_{RM}) \quad (10)$$

$$R_{TS} = C_{TS} \frac{1}{2} \rho_S S_S V_S^2 \quad (11)$$

각 저항성분 별 실선 추정 결과를 TABLE 8에 나타냈다. 스케그의 형상에 따른 예인안전성의 큰 차이는 없으며, 등근 스케그와 각진 스케그 모두 예인안전성을 가짐을 확인하였다. 따라서 이후에 수행된 저항시험, 조류력 계측시험, 내항시험에서는 제작이 용이한 각진 스케그를 부착하여 시험을 수행하였다. 총 저항 580.28 kN에 해당하는 예인선에 요구되는 마력은 2,435 마력으로 요구조건인 3,000마력 이하를 만족한다.

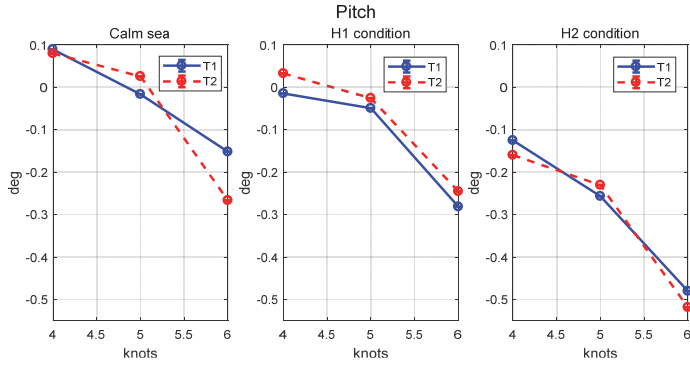


Fig. 11. 저항시험 결과- 종동요각.

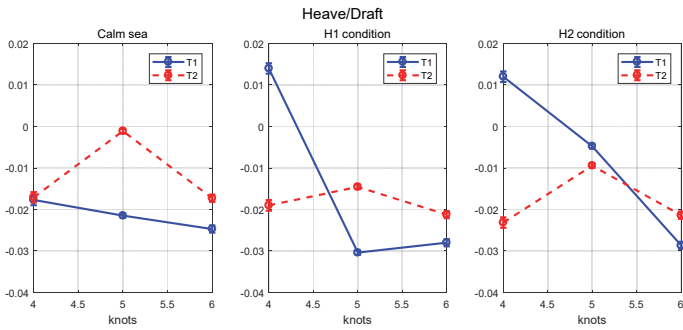


Fig. 12. 저항시험 결과 - 상하동요(흘수로 무차원).

B. 구속모형시험 - 1. 저항시험 결과

풍력발전기 적재상태와 미적재 상태에 대한 저항시험을 수행하였다. 두 경우는 동일한 흘수를 가지지만, 관성모멘트 값과 z방향 무게중심이 다르다. Fig. 10에 파 조건에 따른 총 저항계수 결과를 오차범위와 함께 나타냈다. T1은 풍력발전기 적재 상태, T2는 풍력발전기 미적재 상태를 뜻한다.

T1과 T2 조건은 동일한 수선 면적을 가지기 때문에, 선체가 받는 유체력 및 모멘트는 유사한 값을 가진다. T1과 T2 조건에서 관성모멘트와 무게중심의 차이에 따른 힘과 자세 변화가 크지 않음을 모형시험을 통해 확인하였다.

총 저항계수를 살펴보면, 예인줄 이송시험에 비해 저항이 17% 정도 작게 측정됨을 알 수 있다.

예인줄 이송시험에서는 모든 방향의 힘이 장력으로 측정되었으나, 저항시험에서는 선박을 고정하여 x 방향의 힘만 측정하였기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다. 또한, 저항시험시에는 좌우동요, 횡동요, 선수동요가 제한되어 6자유도 운동을 하는 예인줄 이송시험에 비해 자유도가 작고, 추가적으로 발생하는 움직임이 작아 상대적으로 작은 힘이 측정된다.

Fig. 11과 Fig. 12에 운동체의 자세 결과를 나타냈다. 상하동요 변화는 흘수로 무차원화하여 나타냈다. 동요 각 변화는 모든 조건에서 1° 이내로 매우 작은 값을 가지며, 속도가 빠를수록 감소하는 경향이 있다. 종동요 각이 음의 값으로 작아지게 되면, 이는 저항 증가의 원인이 된다. Fig. 12서 4, 5 knots 조건보다 종동요 각이 작은 6 knots 조건에서 총 저항계수가 증가함을 알 수 있다.

상하동요 변화는 모든 조건에서 흘수에 비해 매우 작으며,

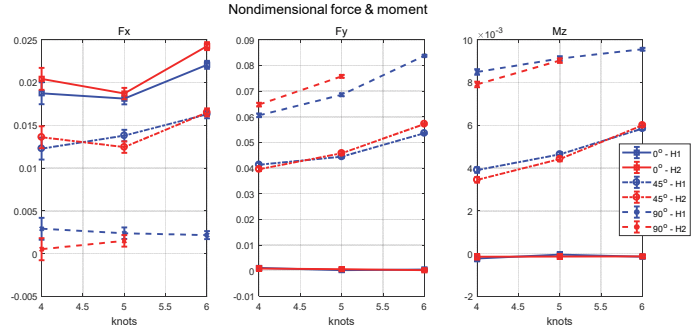


Fig. 13. 조류력 계측시험 결과 - 힘, 모멘트.

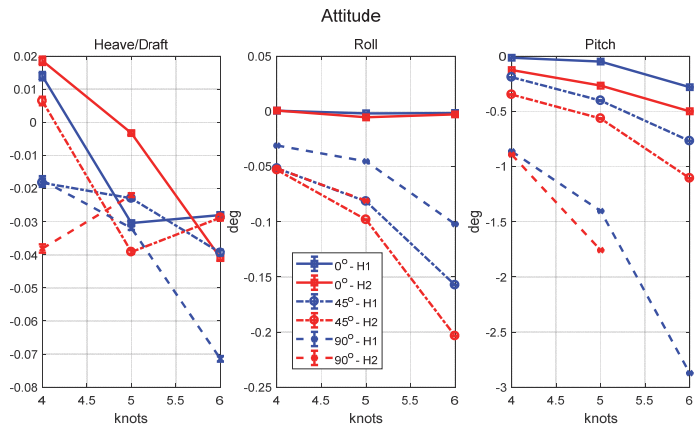


Fig. 14. 조류력 계측시험 결과 - 무차원화 선체거동.

0.01의 무차원화 값에 해당하는 실제 물리량은 실선 기준으로 3.7 cm 정도이다. 불규칙파가 존재하는 상황에서도 상하동요 변화는 실선 기준 10 cm 이하로 운항이 가능함을 확인하였다.

C. 구속모형시험 - 2. 조류력 계측시험 결과

풍력발전기 적재 상태에서 유속이 4, 5, 6 knots, 물체고정좌표계의 x축과 조류가 이루는 각도가 0, 45, 90°에 대해 조류력 계측시험을 수행하였다. 선박에 작용하는 힘과 모멘트 및 자세를 측정하여 평균값을 도출하였으며, 측정된 힘과 모멘트는 Eq. (12)에 무차원화하여 표시하였다.

$$F' = \frac{F}{0.5\rho U^2 L^2}$$

$$M' = \frac{M}{0.5\rho U^2 L^3}$$

(12)

무차원화값은 다음표를 붙여 차원화값과 구분이 가능하며, 시험을 통해 계산된 무차원화값을 이용하여 실선의 힘과 모멘트를 추정할 수 있다. 실제 선박에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하기 위해서는 위 식의 U에 실선의 선속을 대입하고, L에 실선의 길이를 대입하여 F와 M을 구할 수 있다. 힘과 모멘트는 물체고정좌표계를 기준으로 하여 측정되었으며, 무차원화된 힘과 모멘트 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 6 knots의 조류가 90° 방향에서 유입될 때는 모

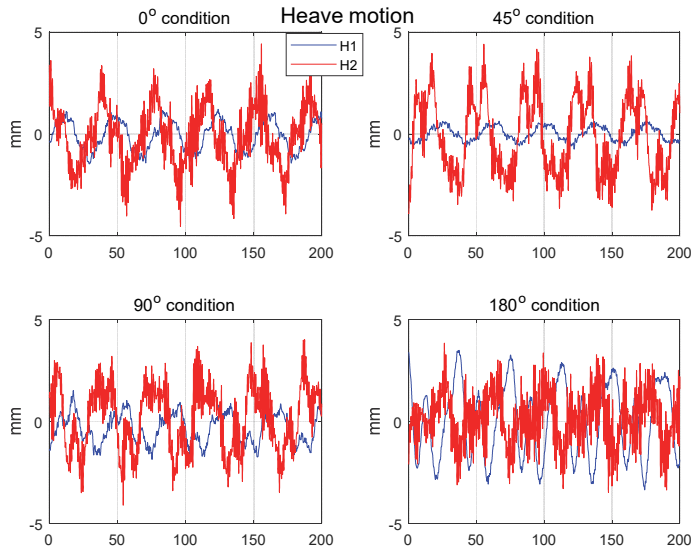


Fig. 15. 내항시험결과 - 상하동요 시계열.

형이 받는 힘이 크고, 자세변화가 커 시험이 불가능하였다. 선체가 받는 F_y 와 M_z 는 F_x 에 비해 더 크므로, 센서의 오차 영향이 작다. 선체가 x 방향으로 가장 큰 힘을 받는 경우는 선수에서 조류가 유입되는 경우이다. 5 knots의 조류가 선수 방향에서 유입되는 경우에 실선 기준으로 F_x 는 약 350 kN의 힘이 작용한다. 선체가 y 방향으로 가장 큰 힘을 받아, 큰 선수동요 모멘트가 발생하는 경우는 우현에서 조류가 유입되는 경우이다. 5 knots의 조류가 우현 방향에서 유입되는 경우에 실선 기준으로 F_y 는 약 1,200 kN의 힘이 작용하며, M_z 는 약 1,100 kN·m의 선수동요 모멘트가 작용한다.

모든 시험조건에 대한 자세 변화 결과를 Fig. 14에 나타냈다. 저항시험 결과와 마찬가지로 상하동요는 홀수로 무차원화하여 표시하였다.

모든 시험조건에서 횡동요각 변화는 0.2° 이내로 매우 작음을 확인하였다. 종동요각 변화는 조속이 5 knots 이하인 경우에 2° 이내이다. 상하동요 변화는 실선 기준으로 15 cm 이내로 작은 값을 가진다. 모든 시험조건에 대해서 자세 변화는 크지 않으며, 이는 바지선의 수선 면적과 부피가 넓어 작은 자세 변화에도 선체가 받는 유체력에 비해 큰 복원력이 작용하기 때문이다.

D. 구속모형시험-3. 내항시험 결과

풍력발전기 적재 상태에서 물체 고정좌표계의 x 축과 조류가 이루는 각도가 0, 45, 90, 180° 에 대해 내항시험을 수행하였다. 모형선이 정지된 상태에서 파에 의한 선체 운동을 측정하여 선체의 운동응답을 식별하기 위해 내항시험을 수행하였다.

불규칙파 조건은 TABLE 5의 H1과 H2 조건이며, 모형시험에서 측정된 상하동요의 시계열 결과를 Fig. 15에 나타냈다. 횡동요각과 종동요각의 변화는 파에 의한 영향을 식별할 수 없을 정도로 0° 근처에서 매우 작은 값을 가져 상하동요 결과만을 분석하였다.

상하동요 변화는 생성된 불규칙파의 주기(H1: 0.594초, H2: 1 초)에 비해 훨씬 큰 40초 정도의 주기로 진동한다. 이는 모형시험시에 생성되는 아주 미세한 장파에 의한 영향으로, 예인수조 길이인 110 m를 반파장으로 가지는 장파이다. 이러한 장파는 예인수조

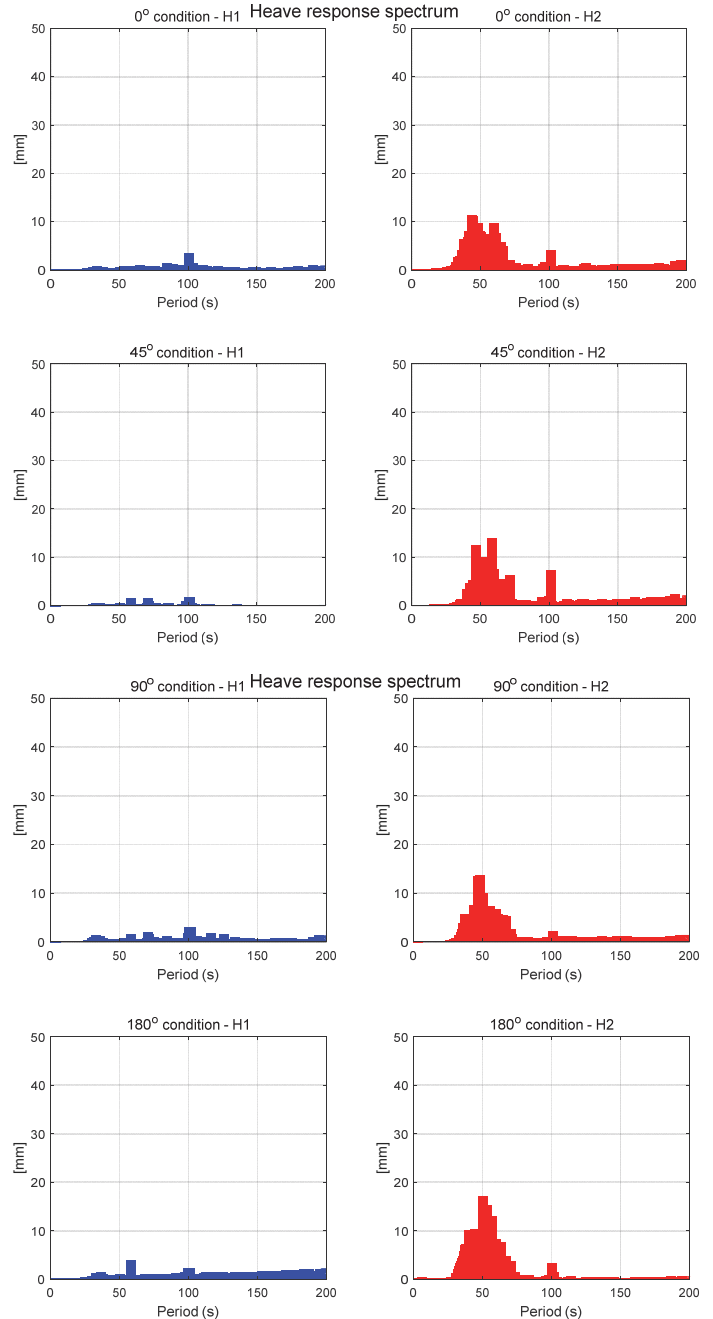


Fig. 16. 내항시험결과 - 상하동요 스펙트럼.

의 끝단에서 변위가 0이 되며, 예인수조의 중간지점에서 매우 작은 진폭을 가지며, 소파기를 이용하여 생성된 파를 제거한다고 하여도 완전히 소멸시키는 것이 어렵다.

장파의 영향을 제외한 조파기에 의해 구현된 불규칙파에 의한 영향을 분석하기 위해 푸리에 변환을 이용하였다. 시간에 따른 결과 $x(t)$ 를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환하여 응답 스펙트럼 $X(\xi)$ 을 Eq. (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$X(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi i \xi t} dt \tag{13}$$

모형시험을 통해 얻어진 응답 스펙트럼을 실선 기준으로 표

현하기 위해 상하동요 스펙트럼의 크기는 48배가 되었고, 주기는 $\sqrt{48}$ 배가 되었다. 0, 45° 조건에서 얻어진 상하동요 스펙트럼과, 90, 180° 조건에서 얻어진 상하동요 스펙트럼을 Fig. 16에 나타냈다.

유의파고가 낮은 H1 조건에서는 파에 의한 선체의 운동변화가 거의 없음을 알 수 있다. 유의파고가 높은 H2 조건에서는 주기가 50초인 부근에서 피크가 발생하며, 상하동요 운동 값은 10-20 mm 정도이다. 수면파는 Eq. (14)의 dispersion relation을 만족한다.

$$\begin{aligned} \omega^2 &= gk \tanh(kh) \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \quad (14)$$

주기가 50초에 해당하는 파장은 수심이 깊은 바다에서 Eq. (15)를 통해 파장을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega^2 &= gk = \frac{g^{2\pi}}{\lambda} \quad (\text{deep sea, } h \rightarrow \infty) \\ \lambda &= g \frac{2\pi}{\omega^2} = g \frac{T^2}{2\pi} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 식을 통해 주기 50초에 해당하는 파의 파장은 3.9 km로 매우 크며, 이러한 장파를 만날 가능성은 매우 작다. 따라서, 실제 해상상황에서 상하동요 운동의 변화는 크지 않을 것으로 예상된다.

IV. Conclusion

만재배수량 10,000톤급 MMB 성능 및 안전성 평가를 위한 예인수조 모형시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 예인줄 이송시험에서 등근 스케그와 각진 스케그는 예인 시에 시간이 지남에 따라 좌우동요 거리와 선수동요 각이 0°로 수렴하며, 스케그의 형상에 따른 차이는 매우 작다. 예인 시에 측정된 장력을 실선 기준으로 추정하였을 때, 5 knots 선속에서 약 380 kN 정도의 장력이 발생할 것으로 예상된다.

둘째, 저항시험에서 속도 변화와 풍력발전기 적재 유무에 따른 상하동요 및 종동요각 변화는 크지 않다. 저항시험 결과로 주어진 총 저항계수와 무차원화된 자세 결과를 차원화하여 실선의 저항과 자세 추정이 가능하다. 예인줄 이송시험에 비해 17% 정도 작은 저항이 측정되었다. 이는 저항시험에서 자유도가 제한되고, x 축 방향의 힘만 측정하기 때문이다. 불규칙파가 존재하는 상황에서도 종동요각 변화는 1° 이내이며, 상하동요 변화도 실선 기준 10 cm 이내로 흘수에 비해 작은 값을 가진다.

셋째, 조류력 계측시험을 통해 유속 조건과 유속 방향에 따른

힘과 모멘트 및 자세 변화를 측정하였다. 모든 조건에서 자세 변화는 크지 않으며, 이는 MMB의 수선 면적과 부피가 커 선체가 받는 유체력에 비해 복원력이 더 크기 때문이다. x축 방향으로 가장 큰 힘을 받는 경우는 선수 방향에서 조류가 들어오는 경우이며, 5 knots의 조류가 존재할 때 실선 기준 약 350 kN 정도의 힘을 받는다. y축 방향으로 가장 큰 힘을 받아 큰 선수동요 모멘트가 발생하는 경우는 우현 방향에서 조류가 들어오는 경우이며, 5 knots의 조류가 존재할 때 실선 기준 약 1,200 kN 정도의 힘이 F_y 로 추정되며, 약 1,100 kN·m의 모멘트가 M_z 로 추정된다.

넷째, 불규칙파 중의 내항시험에서 횡동요각과 종동요각의 변화는 거의 없으며, 시계열로 얻어진 상하동요 결과를 푸리에 변환을 통하여 주파수 영역으로 계산하였다. 유의파고가 낮은 H1 조건에서는 파에 의한 선체의 운동변화가 거의 없으며, 유의파고가 높은 H2 조건에서는 실선 기준 주기가 50초인 부근에서 피크가 발생한다. 이 때의 상하동요 운동도 10-20 mm 정도로 3.7 m 값을 가지는 흘수에 비해 매우 작은 값을 가진다. 주기 50초에 해당하는 파의 파장은 깊은 수심을 가지는 바다에서 3.9 km로 매우 크며, 실제 해상상황에서는 상하동요 운동의 변화는 크지 않을 것으로 예상된다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R16EA07.

본 연구는 한국전력공사의 주력연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호: R16EA07).

References

- [1] 한국전력공사 전력연구원, “해상풍력 일괄설치시스템 개발(2단계 연차 보고서), 2018.
- [2] Froude, W. “Experiments on surface friction”, British Association Reports,” 1872 and 1874.
- [3] ITTC 1957 “8th international Towing Tank Conference,” Madrid, 15-23 Sep. 1957.
- [4] ITTC 1978 “15th international Towing Tank Conference,” 3-10 Sep. 1978.
- [5] Nam B.W., Hong S.Y., Kim J.H., Choi S.K., Kim J.W., 2014, “An Experimental and Numerical Study on Towing Stability of a Transportation Barge,” Journal of Ocean Engineering and Technology, 28(2), 102-110.
- [6] 부경태, 홍춘범, 양희준, 김윤수, 신수철, 2004, “FPSO의 예인 시 침로 안정성에 관한 수치적 연구”, 대한조선학회지, 41(3), pp. 56-63.