

# 불규칙 파랑 중 직접 예인하는 케이슨의 상판침수에 대한 시간 영역 해석 Time Domain Analysis on Deck Wetness of a Caisson Wet-towed in Irregular Waves

허재경\* · 박창욱\*\*

Jae-Kyung Heo\* and Chang-Wook Park\*\*

**요 지 :** 불규칙 파랑 중에서 직접 예인하는 케이슨의 상판침수에 대한 수치해석을 수행하였다. 패널법을 이용하여 주파수 영역에서의 선형 운동해석을 수행하였고, 통계적 방법을 통해 상판침수를 예측하였다. 시간영역 해석에서는 예인시스템, 환경하중 등을 상세히 구현하여 운동해석을 수행하였고, 상판침수 결과를 주파수 영역에서의 결과와 비교하였다. 또한, 시간 영역 해석에서는 예인선의 수 및 배치에 대한 검토를 수행하여 상판침수 측면에서 예인시스템이 미치는 영향과 운송조건을 고찰하였다.

**핵심용어 :** 상판침수, 직접 예인, 케이슨, 시간영역 부유체 운동해석

**Abstract :** A numerical analysis on deck wetness is carried out for a large caisson directly wet-towed by tugs in irregular waves. A constant panel method is used for linear analysis in frequency domain and a statistical post-processing for the deck wetness is presented. Hydrodynamic coefficients obtained from the frequency domain computation are imported for time domain analysis which enables complete modeling for towing equipment, environment, etc. Both frequency and time domain computations over two sea states are performed and comparison is made. In the time domain analysis, towing systems of various arrangements of tugs are investigated from short-term prediction for the largest deck wetness and the number of occurrences of deck wetness.

**Keywords :** deck wetness, wet-towing, caisson, time domain seakeeping analysis

## 1. 서 론

일반적으로 케이슨은 반잠수식 바지선의 갑판 위에서 건조하며, 완공 후에는 바지선에 안전하게 고박시킨 후 설치지역으로 바지선과 함께 예인선을 이용하여 운송한다(Seok et al., 2010). 그러나, 대형 케이슨의 경우에는 파랑 중 바지선의 운동에 기인한 관성력으로 인하여 바지선과의 고박이 제한될 수 있으며, 이는 운송이 가능한 환경조건을 심각하게 제한시킬 수 있다.

이러한 대형 케이슨의 경우에는 케이슨을 해상에 진수시켜서 예인선으로 직접 운송하는 방법(wet-towing)이 대안으로 검토될 수 있다. 이 방법은 대형 해양구조물의 해상운송에 오래전부터 이용되어 왔다(Nielsen, 2007). 바지선으로 운송하는 경우에는 바지선의 파랑 중 운동특성이 검토 대상이 되나, 구조물을 직접 예인하는 경우에는 구조물의 형상, 중량, 예인방법 등을 고려하여 운동특성을 파악한 후 운송계획을 수립해야 한다. 항만 공사용 케이슨은 가로와 세로 길이가 거의 같은 육면체 형상의 구조물로 기존의 다른 해양 구조물과 비교

하여 볼 때, 특징적인 운동 응답 특성을 가지고 있다고 볼 수는 없다. 그러나, 상판에 충수(ballasting)를 위한 개구부를 가지고 있어서 운송 중 해수가 상판을 통해 침입하여 안정성을 위협할 수 있다. 개구부를 운송시에 폐쇄시켜 해수의 침입을 막을 수 있으나, 이에 따른 추가적인 비용과 시간이 요구된다.

파랑의 상판 침수 문제는 선박이나 해양구조물의 설계단계에서 고려되는 전통적인 문제로 DNV-RP-C205(2014)에서와 같이 주로 파랑과의 상대 변위 해석을 통해 평가한다. 선박의 경우에는 복원력 뿐만 아니라 충격하중 측면에서도 검토하며(Kim, 2005), 반잠수식 시추선 등의 해양구조물 역시 air-gap 해석을 수행하여 안전성 및 작업성에 미칠 수 있는 영향을 설계단계에서 고려한다. 해양구조물의 air-gap 해석은 주파수 영역에서의 운동해석 결과를 주로 이용하나, TLP(Tension Leg Platform) 등과 같이 계류 장치의 영향을 고려해야 하는 경우에는 시간영역해석을 수행하기도 한다.

본 연구에서는 케이슨의 직접 운송시 발생하는 상판 침수 문제에 대하여 시간영역에서 운동해석을 수행하고, DNV-RP-

\*DNV GL - Software (Corresponding author : Jae-Kyung Heo, DNV GL, Software, Haeundae I-Park C1, 38, Marine city 2-ro, Haeundae-gu, Busan, 612-824, Korea, Tel: +82-51-610-7700, Fax: +82-51-611-7154, jae.kyung.heo@dnvgl.com)

\*\*삼성물산 품질기술실 기술팀 (Construction Technology Team, Samsung C&T Corporation)

C205에 따라 상대변위를 구하여 상판침수를 평가한다. 주파수 영역과 시간영역에서의 단기 해석(short-term analysis) 결과를 비교하여 시간영역 해석의 필요성을 확인한다. 또한, 시간영역 해석에서는 예인선의 수 및 배치를 달리하여 예인 시스템이 상판 침수에 미치는 영향을 비교하고, 본 케이스의 상판침수 안전성을 향상시킬 수 있는 예인 시스템과 해상상태를 제시한다.

## 2. 수학적 모델링

### 2.1 주파수 영역

본 연구에서는 DNV GL의 운동 및 파랑하중 해석 프로그램인 Wadam(2014)을 사용하였다. Wadam은 WAMIT(Lee, 1995)을 기초로 개발된 프로그램으로, 파랑 중 부유체 주위의 유동장을 비압축 및 비회전성인 포텐셜 유동으로 가정한다. 선형이론에 따라 조화 진동하는 속도 포텐셜을 아래 식 (1)과 같이 중첩시켜 나타낼 수 있으며, 이는 식 (2)부터 (4)의 경계치 문제를 만족한다.

$$\phi = \phi_I + \phi_S + \phi_R \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on seabed \& body} \quad (4)$$

여기서, 식 (1)의 하첨자  $I, S, R$ 은 각각 입사, 산란, 방사 포텐셜을 나타내며, 경계조건 (3), (4)의  $t, g, n$ 은 각각 시간, 중력가속도, 법선벡터이다.

위 경계치 문제는 경계요소 적분법을 사용하여 풀 수 있으며, Wadam에서는 등가의 패널법(constant panel method)을 사용한다. 구해진 속도 포텐셜을 Bernoulli 방정식에 대입하여 압력을 구하고, 이를 적분하여 운동방정식에 사용될 힘과 모멘트를 계산한다.

### 2.2 시간 영역

시간 영역 해석을 위해 DNG GL의 SIMO(2015) 프로그램을 사용하였다. 아래 식 (5)는 시간영역에서의 운동방정식을 보여주고 있다.

$$(m + A_{\infty})\ddot{x} + D_1\dot{x} + D_2f(\dot{x}) + Kx + \int_0^t h(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau = q(t, x, \dot{x}) \quad (5)$$

$$h(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} c(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (6)$$

여기서,  $x$ 와  $t$ 는 각각 변위와 시간을 나타내며,  $m, A_{\infty}, D_1, D_2, K$ 는 각각 질량, 무한대 주파수에서의 부가질량, 선형 감쇠, 이차 감쇠, 복원력 행렬이다. 식 (6)의  $h(\tau)$ 는 지연함수(retardation function)로써, 주파수 영역 해석에서 구해진 선형감쇠 계수  $c(\omega)$ 로부터 계산된다.

식 (5)의 우변  $q(t, x, \dot{x})$ 는 외력 벡터로 환경하중과 로프, 펜더, 위치 유지 장치 등 시스템 구성에 필요한 각종 장치들로부터 발생하는 하중을 포함한다.

## 3. 수치해석 절차

케이스의 파랑 중 시간영역 운동 해석을 위한 수치해석 절차를 Fig. 1에 나타내었다. 설계된 케이스를 개구부를 포함하여 모델링한 후, 개구부마다 층수량을 조절하여 복원성 검토를 수행한다. 복원성 검토가 완료된 층수 조건을 주파수 영역 운동 해석에 적용하여 운동 해석을 수행하고, 운동응답 RAO(Response Amplitude Operator)와 부가질량, 선형감쇠 계수, 파랑 강제력 등 시간영역 해석에 필요한 유체력을 구해낸다. 시간영역 해석 단계에서는 주파수 영역 해석 결과 외에 예인줄을 포함한 예인 시스템과 조류력 등을 모델링에 포함시킨 후 불규칙파에서의 운동해석을 수행한다. 본 논문에서는 복원성 검토가 완료된 이후 단계의 운동해석 과정에 대해서 기술한다.

## 4. 주파수 영역 해석

### 4.1 케이스 제원

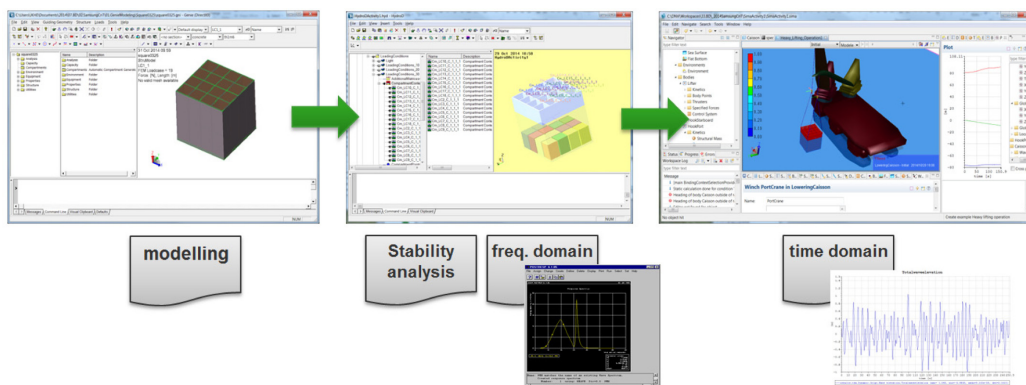


Fig. 1. Procedure for time domain motion analysis.

본 연구에 사용한 케이슨 제원은 현재 삼성물산에서 시공 중인 가거도항 방파제에 적용된 설계를 참조한 것으로, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 20 개의 개구부를 가지고 있다. 예인 흡수를 맞추기 위하여 각 탱크에 해수를 채웠으며, 해수로 인한 자유표면 효과를 GM에 반영시켰다.

케이슨의 길이, 폭, 높이는 각각 28.7 m, 23.7 m, 28.0 m이고 배수량은 약 14,000 ton이다. 이 때 흡수는 20 m이며, 횡경사와 종경사는 모두 0°이다. 자유표면 효과를 고려한  $GM_x$ 와  $GM_y$ 는 각각 1.9 m, 2.9 m이다.

#### 4.2 운동 응답

패널 수로 인한 영향을 확인하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 세 가지 패널 모델을 생성하고 운동응답을 비교하였다. 시간평균 표류력(mean surge drift force)의 경우에는 자유표면 근처에 많은 패널을 요구하므로 이에 대한 영향도 검토하였

다(Pan et al., 2013). 계산에 사용된 원점은 수선면 상에서 케이슨의 중앙점에 위치한다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 횡동요(roll), 종동요(pitch)와 길이방향의 시간 평균 표류력에서 세 가지 패널 모델이 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 따라서, 패널 수에 의한 영향은 무시할 만한 수준인 것을 확인할 수 있으며, 이후 모든 계산에 패널 수 1,510개의 패널 모델을 사용하였다.

#### 4.3 통계적 상판 침수 평가

상판침수에 대한 정의는 DNV-RP-C205에 따라 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 상대변위  $a$ 가 음수이면 상판침수가 발생한다고 판정할 수 있다. 이 때, 상판 침수 면적이나 침수량 등은 고려하지 않는다.

$$a(x, y, t) = a_0 + z(x, y, t) - \zeta(x, y, t) \quad (7)$$

여기서,  $a_0$ 는 정수상태일 때 자유수면으로부터 상판까지의 높이이며,  $z$ 와  $\zeta$ 는 케이슨 임의의 위치에서의 변위와 파고이다.

케이슨의 상판침수를 평가하기 위하여 케이슨의 수직변위와 파고 RAO를 Fig. 5에서와 같이 5개 위치에서 구하면, 상대변위에 대한 RAO와 응답 스펙트럼을 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\omega) = H_{vert.mot}(\omega) - H_{elev.}(\omega) \quad (8)$$

$$S_r(\omega) = S_w(\omega)|H(\omega)|^2 \quad (9)$$

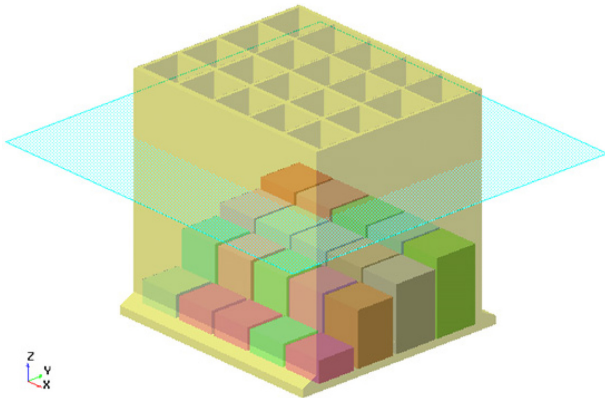


Fig. 2. Caisson and loading condition.

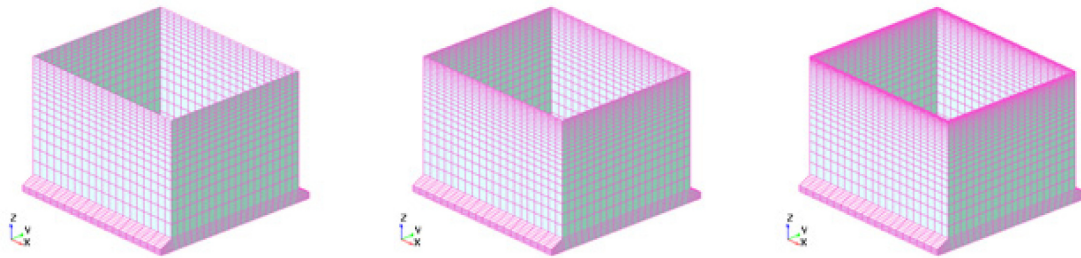


Fig. 3. Panel models (left: 1,230 panels; center: 1,510 panels; right: 1,790 panels).

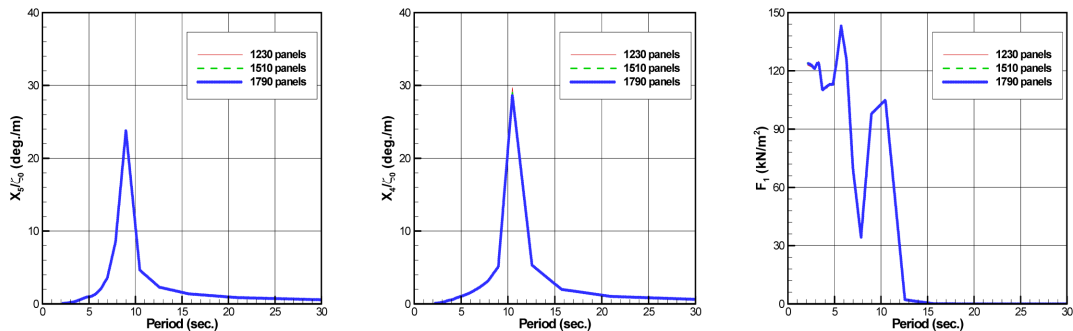


Fig. 4. RAOs of roll, pitch and mean surge drift force.

여기서,  $H_{vert.mot}$  과  $H_{elev.}$  는 Fig. 5에서 정의된 P점에서의 수직변위와 Elevation에서의 파고에 대한 RAO이다. 이 때 파고  $H_{elev.}$  는 케이슨으로부터의 산란 및 방사를 고려한 것이다.  $S_r$  는 식 (8)로부터 구해진 상대 변위 RAO에 대한 응답 스펙트럼이며,  $S_w$  는 불규칙파 스펙트럼이다. 본 해석에 사용한 불규칙파 스펙트럼은 식 (10)의 ISSC(International Ship and Offshore Structure Congress) 스펙트럼으로  $A=0.44347$  이다(Faltinsen, 1993).

$$S(\omega) = H_s^2 \frac{AT_1}{8\pi} \left( \frac{\omega T_1}{2\pi} \right)^{-5} e^{-A \left( \frac{\omega T_1}{2\pi} \right)^4} \quad (10)$$

여기서,  $T_1$ 은 평균주기(mean wave period)로,  $T_1 = 2\pi m_0/m_1$  와 같이 정의되며, 평균 제로 업크로싱 주기(mean zero up-crossing period)인  $T_z$ 과는  $T_1 = 1.086 T_z$ 의 함수관계가 성립한다.

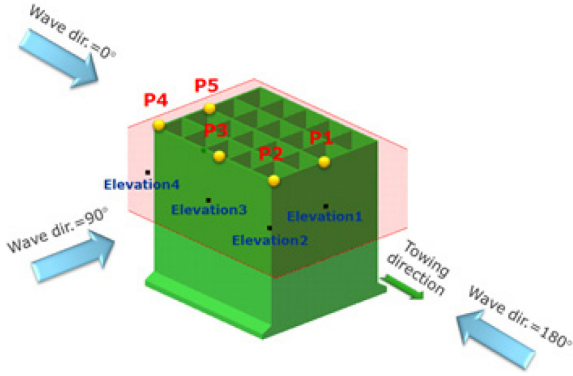


Fig. 5. Definitive sketch of locations for vertical motion and wave elevation.

본 연구에서는 파향에 따른 영향을 명확히 하기 위하여 장파정(long-crested)파로 가정하였다. 계산에 사용한 두 불규칙파의 유의파고( $H_s$ ) 및 평균주기( $T_1$ )는 각각 2 m, 6 sec.와 3 m, 7 sec.이며, Fig. 6에 스펙트럼을 도시하였다. 유의파고는 우리나라 연근해의 해상상태(sea state) 3~4 정도로 가정하여 설정하였으며, 향후 운송 항로가 확정되면 국내 연안에 적합한 불규칙파 스펙트럼으로 검토하는 것이 필요하다.

상대변위 응답이 Rayleigh 분포를 따른다고 가정하면, 식 (11)의 Rayleigh 분포함수를 이용하여 단기예측을 수행할 수 있다.

$$p(x) = \frac{x}{m_0} e^{-\frac{1}{2} \frac{x^2}{m_0}} \quad (11)$$

여기서,  $m_0$  는 식 (9)의 상대변위 응답스펙트럼으로부터 얻어진 0차 모멘트이다.

Fig. 6의 불규칙파에 대하여 3시간 동안의 단기예측을 수행하여, 식 (7)에서 정의된 상대변위  $a$ 에 대한 초과확률(probability of exceedance) 약 63%에 해당하는 MPLR(Most Probable Largest Response)을 케이슨의 5개 위치에서 구하였다.

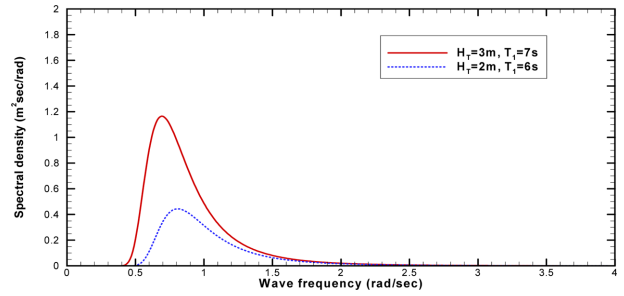


Fig. 6. Wave spectrums.

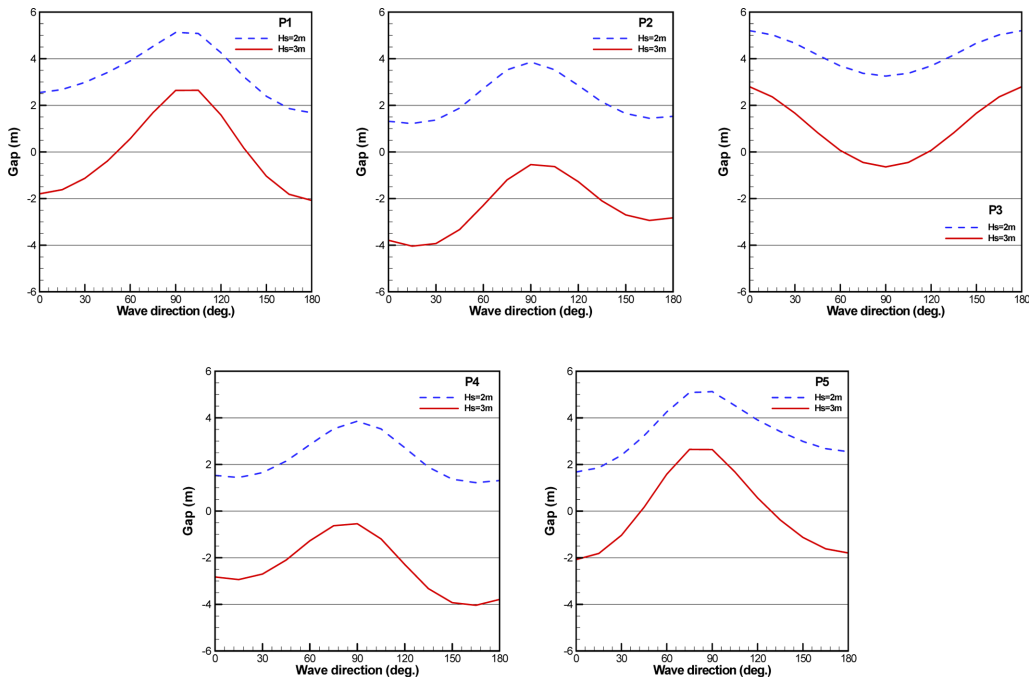


Fig. 7. 3 hour short-term prediction of deck wetness from frequency domain analysis.



Fig. 7은 케이슨의 5개 위치에서의 상대변위를 파향에 대해 보여주고 있다. 상대변위가 음수인 경우에는 파고가 상판보다 높으므로 상판이 침수한다고 판정할 수 있다. 유의파고 2 m인 경우에는 모든 위치에서 상관침수가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

그러나, 유의파고 3 m인 경우에는 5개 지점 모두에서 상대변위가 모두 음의 값으로 나타났다. P1과 P5에서는 파향이 케이슨의 전부(head wave)와 후부(following wave) 쪽으로 향할 때 음의 상대변위 값이 나타났으며, P3에서는 횡파인 90°에서 상대변위가 낮게 나타났다. 모서리 위치인 P2와 P4에서는 모든 파향에 대해 음의 상대변위 값을 보이고 있다. 주파수 영역 계산에서는 예인속력, 예인줄 등이 고려되어 있지 않으므로, P1과 P5, P2와 P4는 서로 파향에 대해서 대칭적인 결과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

## 5. 시간 영역 해석

### 5.1 예인 모델

시간영역 해석에서는 Fig. 8과 같이 세 종류의 예인시스템을 상판 침수 관점에서 비교하였다. Fig. 8의 (a)와 (b)에서 케이슨의 중심으로부터 예인선까지의 거리는 100 m이고, (c)에서 예인선간의 간격은 50 m이다. 예인선의 운동이 상관침수에 미치는 영향이 작다는 가정과 예인방법만의 비교를 위하여 예인선은 고정된 상태로 계산하였다. 예인줄은 선형스프링으로 모델링 되었으며, 스프링 강성으로는  $3 \times 10^7$  N을 사용하였다.

3 knots의 속도로 예인되는 케이슨에는 예인으로 인한 항력이 발생한다. 본 계산에서는 예인으로 인한 항력을 조류력으로 모델링하였다. 조류력 계수는 CFD 해석에서 얻어진 값을 사용하였다(Park, 2014). 그 밖에 파 표류력을 외력에 포함하였다.

### 5.2 시간영역 계산 결과

시간영역에서의 상관침수 평가를 위하여 Fig. 6의 불규칙 파 스펙트럼에 대해 3시간 길이의 불규칙파 시계열을 각 파향별로 발생시켰다. 상관침수와 같이 최소값을 구하는 문제에서는 파향당 1회의 불규칙파와 시뮬레이션만으로는 신뢰할 수 있는 결과를 얻어낼 수 없다. 이를 위하여, 난수(random seed)를 이용하여 각 파향별로 서로 다른 15개의 불규칙파를 실현(realization)하였고, 15개의 불규칙파 시계열에 대해 얻어진 상대변위를 취합하여 상관침수를 평가하였다. Fig. 9는 이에 대한 예로써, 한 파향에 대해 얻어진 15개의 상대변위 시간이력을 보여주고 있다. 붉은 원은 15개의 시뮬레이션으로부터 각각 얻어진 극소값이며, 최대 1 m에서 최소 -1.3 m까지 분포하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 3시간 단기 시뮬레이션으로부터 얻어진 상대변위의 파향별 최소값을 비교하고 있다. 최소값은 파향별로 15회의 시뮬레이션으로부터 각각의 최소값을 구한 후 이들의 평균값을 취하였다(GL Noble Denton 0031/ND, 2013).

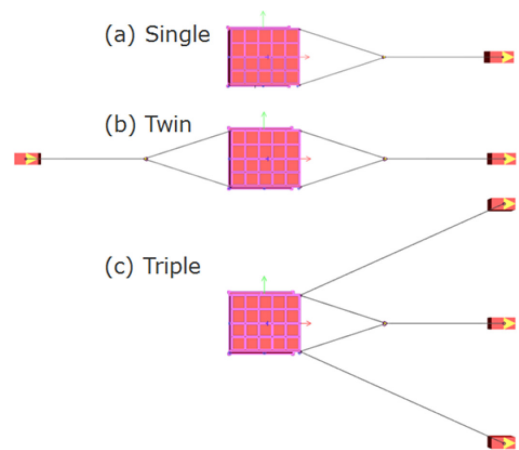


Fig. 8. Arrangement of towing tugs for time domain analysis.

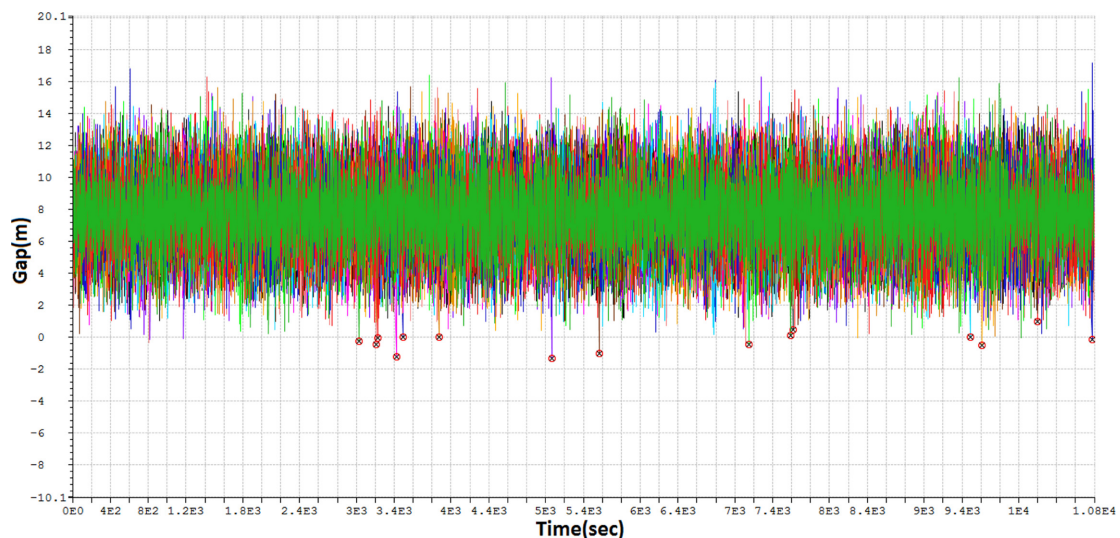


Fig. 9. Example of post-processing of 15 realizations for a specific wave direction.

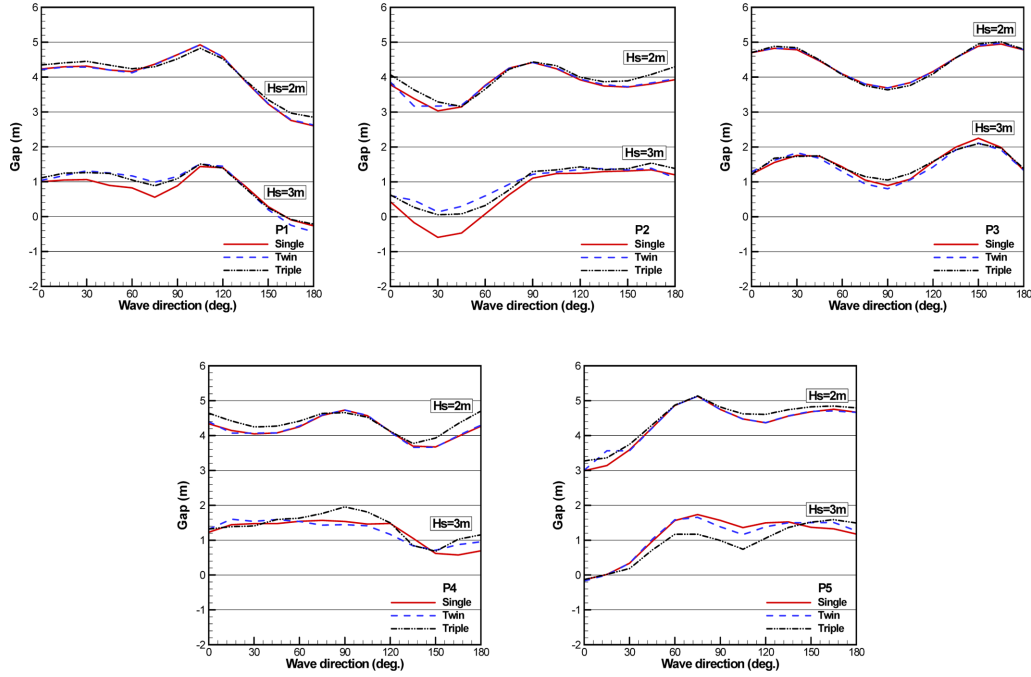


Fig. 10. 3 hour short-term prediction of deck wetness from time domain analysis.

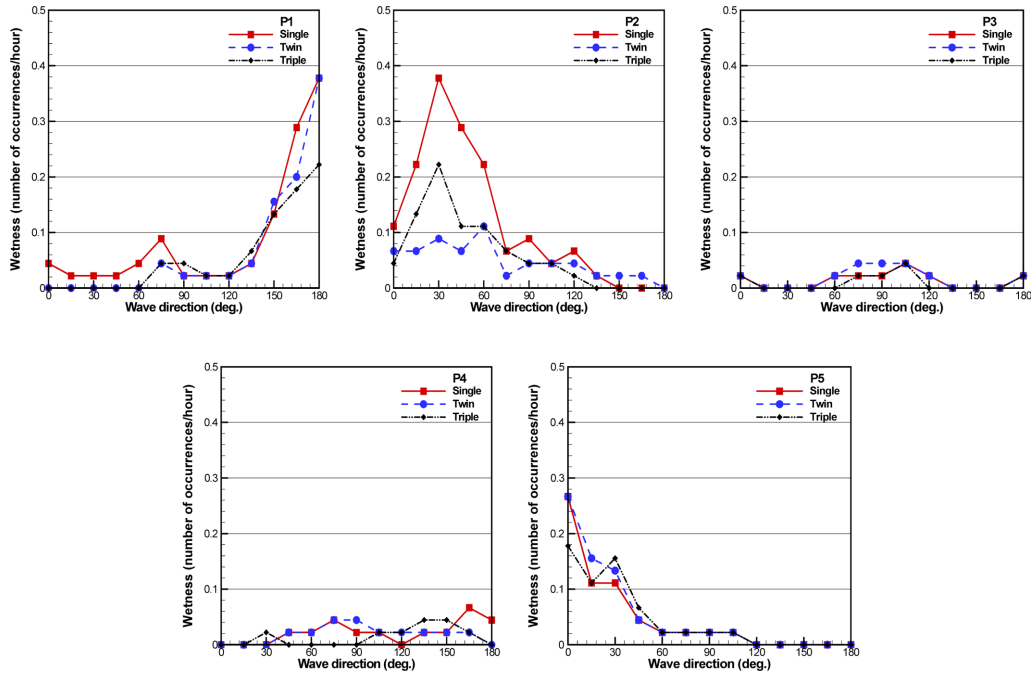


Fig. 11. Number of occurrences of deck wetness.

주파수영역에서의 계산결과인 Fig. 7과 비교해 볼 때, 예인 줄을 고려한 시간 영역 계산 결과가 좀 더 안전한 값을 주는 것으로 나타났다. 유의파고 2 m에서는 모든 예인시스템이 안전한 것으로 나타났으나, 3 m에서는 세 가지 예인 시스템 모두에서 상관침수가 발생하는 것으로 나타났다. 케이스의 전방에 위치한 P1에서는 전방으로부터 진행하는 파향 180°일 때 모든 예인시스템에서 상관침수가 발생하였다. 그러나, 전방 모서리에 위치한 P2에서는 후방으로부터 진행하는 파향 15~60°에서 상대변위가 가장 낮게 나타났다. 후방 모서리에

위치한 P4에서도 상대변위는 파도가 전방으로부터 진행할 때 작아지는 것을 확인할 수 있다. 케이스 후방에 위치한 P5에서는 파향 0°일 때, 모든 예인시스템에서 상관침수가 발생하고 있다.

상대변위의 파향에 대한 대칭성 측면에서는 주파수 해석에서의 경향과 유사하나, 케이스의 전방에 위치한 P1과 P2의 상대변위가 후방의 P5와 P4에 비하여 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 예인줄이 상대변위 계산에 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

상관침수는 상대변위의 최소값 외에 발생횟수의 검토도 유의미하다(NORDFORSK, 1987; NATO, 1998). 함정 등의 설계에서는 시간당 갑판침수 발생 횟수를 평가기준으로 정하여 검토하고 있으나, 케이슨의 예인에 있어서는 평가기준이 알려져 있지 않으므로 예인시스템간의 상대비교를 수행하였다. 시간당 상관침수 발현횟수는 각 파향 별로 실행된 15회 시뮬레이션, 즉 45시간의 결과로부터 구하였다.

Fig. 11에서 보는 것처럼 상관침수는 케이슨 전방에 위치한 P1과 P2에서 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 파도가 전방으로부터 진행할 때에는 전방에 위치한 P1에서 상관침수가 가장 많이 발생하며, 후방으로부터 접근할 때에는 P2와 P5위치에서 상관침수가 빈번해지는 것을 볼 수 있다. 예인 시스템 측면에서는 한 척의 예인선으로 예인할 때 상관침수가 가장 많이 일어나고 있으며, 두 척 이상에서 감소하는 것으로 나타났다. 예인선 두 척인 경우와 세 척의 경우에서 큰 차이가 나타나지 않았다.

따라서, 상관침수 관점에서 본 케이슨은 유의파고 2 m 이하에서 운송하는 것이 안전하다고 할 수 있다. 예인선의 수가 2척 이상인 경우에는 유의파고 3 m 이하에서도 운송이 가능할 것으로 예상되며, 전체 운송항로 및 운송시간 등에 대한 검토가 필요할 것이다. 침수를 막기 위한 장치를 설치한다면 전방 개구부에 보다 많은 주의를 기울일 필요가 있다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 파랑 중 운동해석을 수행하여 대형 케이슨의 예인 시 발생하는 상관침수를 예측하고, 예인시스템이 미치는 영향을 비교하였다.

주파수영역 해석은 예인시스템을 고려할 수 없는 이유로 시간영역 해석 보다 과도한 결과를 주는 것으로 나타났다. 이에 비하여, 시간영역 해석에서는 예인줄, 예인속력, 환경하중 등을 반영할 수 있으므로 정성적으로 타당한 결과를 도출하였다. 따라서, 케이슨의 직접 예인 시 발생할 수 있는 상관침수에 대해서는 시간영역 해석을 통해 검토하는 것이 바람직하다.

본 케이슨의 적재상태에서는 유의파고 2 m 조건에서 상관침수가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 유의파고 3 m에서는 상관침수가 발생하며, 케이슨의 후방부 보다는 전방부에서 많이 발생하였다.

두 척 이상의 예인선으로 예인하는 것이 상관침수 측면에서 안전한 것으로 확인되었으며, 한 척의 예인선으로 예인하는 경우에는 유의파고 2 m 이하일 때 안전할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 논문 게재를 지원해 준 삼성물산과 DNV GL에 감사를 표합니다.

## References

- DNV-RP-C205. (2014). Environmental conditions and environmental loads. Det Norske Veritas. 115-130.
- Faltinsen, O. M. (1993). Sea Loads on Ships and Offshore Structures. 23-25.
- GL Noble Denton 0031/ND. (2013). Guidelines for float-over installations/removals. GL Noble Denton. 16-21.
- Kim, Y.J. (2005). Estimation of impact loads of slamming and green water and its application to design. Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea. 42(2), 26-40.(in Korean)
- Lee, C.-H. (1995). WAMIT theory manual. MIT.
- NATO. (1998). STANAG 4154 (edition 3) - Common procedures for seakeeping in the ship design process.
- Nielsen, F.G. (2007). Lecture notes in marine operations. Norwegian University of Science and Technology. 48-56.
- NORDFORSK. (1987). Assessment of ship performance in a sea-way.
- Pan, Z.Y., Vada, T., and Hassen, F.-C. W. (2013). A mesh dependency study for the mean drift forces by pressure integration. Proc. ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE 2013-10249.
- Park, J.C. (2014). Analysis on floating and towing stability for a large caisson. Pusan National University.(in Korean)
- Seok, J., Park, J.-C., Heo, J.-K., Kang, H.-Y., Bae, Y.-H., Kim, M.-H., and Kang, Y.-K. (2010). Stability evaluation during transportation of caisson for breakwater. J. Ocean Engineering and Technology, 24(4), 13-22.(in Korean)
- SIMO. (2015). SIMO Theory manual ver. 4.4. Marintek.
- Wadam. (2014). Wadam User manual. ver. 9.1. Det Norske Veritas.

Received 10 November, 2015

Revised 23 December, 2015

Accepted 23 January, 2016