

부유체형식과 흘수조건 및 긴장재배치특성이 불규칙파랑이 작용하는 부유식 주탑을 갖는 사장교의 동적 거동에 미치는 영향분석

김승준¹ · 원덕희² · 장민서³ · 이윤우³ · 강영종^{4*}

¹조교수, 대전대학교 건설안전방재공학과, ²선임연구원, 한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터

³박사과정, 고려대학교 건축사회환경공학과, ^{4*}교수, 고려대학교 건축사회환경공학과

Effects of the Floater Type, Initial Draft, and Tendon Arrangement on the Dynamic Behavior of the Cable-stayed Bridges with Floating Towers under Irregular Waves

Kim, Seungjun¹, Won, Deok Hee², Jang, Min-Seo³, Lee, Yun-Woo³, Kang, Young Jong^{4*}

¹Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon, Korea

²Senior Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

³Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

^{4*}Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

Abstract - Waves are considered as the one of the governing loads for designing the large offshore floating structures due to the characteristics of their structural and environmental conditions. In this study, the behavioral characteristics of the cable-stayed bridges with floating towers under the wave conditions were investigated. The irregular wave was modelled using JONSWAP wave spectrum with specific significant wave height and peak period for considering more realistic environmental conditions. Performing the global performance analysis based on the theory of hydrodynamic analysis, the dynamic responses of the floating structures under the irregular wave condition were obtained, such as displacements at the specific locations and the axial stresses of stay cables and tendons. Case studies were conducted to investigate the effects of the main design parameters, such as floater types, draft, inclination of floater columns and tendons, on the change of the structural responses of the floating bridges under the irregular wave condition.

Keywords - Floating cable-stayed bridge, Floating tower, Irregular wave, Tendon, Hydrodynamic analysis

1. 서론

부유식 교량은 교량의 무게와 수면 아래 위치하는 구조체에 작용하는 부력이 힘의 평형을 이루는 거동을 보인다. 즉, 일반적인 해상 교량과 달리 고정식 하부구조물 없이 목표하는 위치에 계류될 수 있는 특성에 따라 깊은 수심을 갖는 환경에 적합한 구조형식을

갖는다.^{[1],[2],[3]} 이러한 부유식 교량은 이미 20세기 중반부터 미국, 노르웨이, 가이아나 등에서 건설되어 왔는데, 단순한 형상의 부유체가 상부구조를 지지하는 단지간장을 갖는 연속교의 형태로 주로 건설되어 왔다.^[2] 다시 말해, 장지간장을 갖는 교량으로서의 부유식 교량은 아직까지 실제 건설된 사례가 없다. 그러나 최근 노르웨이 교통국(Norwegian Public Roads Administration)에서는 신설 고속도로 노선(E39 project)에 포함된 깊은 수심의 협만 8개소에 해중터널과 부유식 케이블지지교량의 실제 건설계획을 발표하였고, 기본 및 상세설계를 위한 연구를 수행 중에 있다.^{[3],[4],[5],[6],[7],[8]} 이 프로젝트가 성공적으로 수행된다면 세계최초로 1.0km 이상의 지간장을 갖는 초장대 부유식 교량의 운영이 예상된다.

부유식 교량의 구조적 그리고 환경적 특성에 따라 크기와 작용

Note.-Discussion open until October 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 07, 2019; revised March 21, 2019; approved on March 21, 2019.
Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-3290-3317 Fax. +82-2-921-5166

E-mail. yjkang@korea.ac.kr

방향이 끊임없이 변화하는 파랑과 조류 그리고 바람하중을 받게 되고 이 하중은 초대형 부유식 구조물의 동적 거동을 직접적으로 유발하게 된다. 이러한 특성에 따라 이 환경하중들은 부유식 교량의 설계를 지배하는 하중으로 고려된다. 즉, 부유식 교량의 합리적인 설계와 시공 그리고 유지관리를 위해서는 무엇보다도 해당 지역의 환경조건을 명확히 정의하고, 이에 대한 구조물의 정·동적 구조 거동을 정확하게 해석할 수 있어야 한다.

초장대 부유식 교량의 해석기법 및 주요 구조거동특성연구가 이 노르웨이의 프로젝트를 기반으로 활발히 수행되고 있다. Villoria et al.(2017)은 상시 운영 (operation condition) 조건에서 해당 해역(노르웨이 E39노선 내)의 100년 재현주기 환경 조건 중 바람과 파도에 대한 정·동적 부유식 초장대 현수교의 구조안전성 연구를 수행하였고, 연구결과를 바탕으로 그들의 개념 모델은 노르웨이 환경조건에 대해 적용이 가능하다는 결론을 발표한 바 있다.^[5] Papinutti et al.(2017) 역시 시간영역해석을 기반으로 바람과 파도에 대한 부유식 현수교의 동적 거동특성을 연구하였다.^[6] Painutti et al.(2017)은 유사 구조물의 동적 특성을 주파수영역해석기법을 통해 분석하였다.^[7] 그리고 Dørum et al.(2017)은 부유식 주탑을 지지하는 부유체와 선박의 충돌에 따른 구조안전성을 해석적으로 분석하는 등^[8] 노르웨이 E39 프로젝트를 중심으로 부유식 초장대교량 연구가 활발히 진행되고 있다. 참고로, 노르웨이 E39 프로젝트를 중심으로 한 연구들에서 고려된 파랑의 유의파고와 침투주기의 범위는 각각 1.5~3.0m, 4.0~6.3초로 상대적으로 온화한 조건에서의 효용성 연구가 수행되었다.

국내에서는 Kim et al.(2018)이 부유식 주탑을 갖는 사장교의 규칙 파랑에 대한 거동 특성을 유체동역학해석기법을 기반으로 연구하였다.^[2] 이 연구에서는 파랑의 주기에 대한 구조물의 동적 반응 특성을 분석하여 구조물의 고유 주기 특성을 연구하였고, 주요 설계변수의 영향을 정량적으로 분석하였다. Jang et al.(2018)은 계류선 배치에 따른 부유식 사장교의 정적 거동 특성에 대해 해석적으로 분석하였다.^[9]

이처럼 부유식 주탑을 갖는 초장대 케이블리지교량의 정·동적 구조거동특성을 분석한 연구들이 활발히 수행되기 시작했다. 국내 연구의 경우 부유식 사장교의 정적 거동특성 및 규칙 파랑조건에 대한 동적 거동특성 연구가 수행되었고, 노르웨이 연구의 경우 불규칙파랑조건에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 상대적으로 온화한 환경조건에 대한 효용성 연구가 수행되었다. 즉, 극심한 불규칙 파랑이 작용하는 환경조건에서의 동적 거동 특성 연구는 아직 수행된 바 없기 때문에 본 연구에서는 극심한 환경조건에서의 구조거동특성에 대해 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 불규칙 파랑을 모사할 수 있는 파 스펙트럼 중에서 다양한 대형 해양구조물

의 설계 시 적용되는 JONSWAP 파 스펙트럼을 활용하였고, 국내 환경조건에 대한 구조거동특성을 분석하기 위해 Son et al. (2015), Kim and Won(2017) 등에서 고려된 제주 지역의 100년 재현주기 파랑조건^{[10],[11]}에 해당하는 극심한 환경조건을 고려하여 환경하중을 정의하였다. 불규칙 파랑에 대한 구조물의 전체적 거동특성을 해석적으로 분석하기 위해 JONSWAP 파 스펙트럼으로 정의된 불규칙 파랑에 대한 시간영역 동적 해석을 수행하고 그 결과를 정량적으로 분석하여 불규칙파랑에 대한 거동을 분석하였다. 또 한 본 연구에서는 부유식 주탑을 지지하는 부유체의 형상, 부유체 흡수 및 부유체 컬럼의 기울기 그리고 긴장재 초기 기울기가 불규칙 파랑에 대한 본 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 파랑 중 부유식 주탑을 갖는 사장교의 전체적 해석 이론

2.1 수중 선 요소의 유체동역학해석을 위한 지배미분방정식 및 유체력 정의

자유 수면 이하에 위치하여 정적(자중, 부력, 조류 등에 의한 하중) 및 동적 하중(파랑에 의한 하중)을 받는 선요소의 지배미분방정식은 Garrett의 Slender rod 이론^{[12],[13]}을 통해 구성 할 수 있다.

$$-(Br'')' + (\lambda \vec{r}')' + \vec{q} = m \ddot{\vec{r}} \quad (1)$$

$$\lambda = T - Bk^2$$

$$\frac{1}{2}(\vec{r} \cdot \vec{r} - 1) = \frac{T}{A_t E} \approx \frac{\lambda}{A_t E}$$

여기서, B : 휨 강성, T : 인장력, k : 곡률, m : 단위 길이 당 질량, $\vec{q}$: 단위 길이 당 분포하중벡터, λ : 라그랑지 곱수, E : 탄성 계수, A_t : 유효 단면적

작용하는 파랑의 파장(wave length)에 대해 현저히 작은 단면적을 갖는 선요소에서는 파랑에 의한 회절(diffraction)효과를 무시할 수 있다고 알려져 있고, 이 때 선요소가 받는 유체력은 Morison 식을 통해 고려할 수 있다. 즉, 식 (1)의 지배미분방정식에서 수중 선요소가 받는 하중은 단위 길이 당 분포하중벡터로 고려할 수 있다. 자중과 부력을 제외한 파랑 및 조류에 의한 유체력은 Morison 식을 통해 관성력(inertia force) 및 항력(drag force)의 항으로 식 (2)와 같이 적용 가능하다.^[13]

$$q_n = C_p \rho A_c \dot{v}_n + C_D \frac{1}{2} \rho D |v_{nr}| v_{nr} + C_m \rho A_c \ddot{r}_n \quad (2)$$

여기서, C_p , C_D , and C_m : 관성, 항력, 부가질량 계수

$\dot{v}_n$, v_{nr} , and $\ddot{r}_n$: 법선 방향 유체 가속도, 수직 상대 속도, 수직

구조물 가속도

ρ, D, A_e : 유체 밀도, 외경, 단면적

2.2 포텐셜 이론에 의한 파랑의 정의

특정 주기 및 진폭을 갖는 규칙 파랑이 작용할 때 자유 수면 이하 임의위치에서의 물 입자의 운동은 포텐셜 이론을 통해 정의할 수 있다. 식 (3)~(7)은 규칙파랑에 의한 자유수면높이, 속도포텐셜, 각주파수, x, y 방향으로의 물 입자 속도를 나타낸다. [2], [13]

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\omega}{k} a \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \\ &= \frac{g}{\omega} a \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (\text{wave dispersion relation}) \quad (5)$$

$$u_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \omega a \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \omega a \frac{\sinh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

여기서, $\eta(x, t)$: 시간 t , 수평좌표 x 지점에서의 자유수면의 높이, k : 파수, ω : 파의 각주파수, g : 중력가속도, Φ : Airy 파의 속도 포텐셜, u_x, u_z : x, z 방향에 대한 물 입자 속도

즉, (3)~(7)을 통해 임의 위치의 물입자의 속도 및 가속도를 정의할 수 있고 이를 식 (2)에 대입하면 특정 주기 및 파고를 갖는 규칙파랑 작용 시 임의 위치의 선요소에 작용하는 유체력을 관성 및 항력항으로써 직접적으로 정의할 수 있다.

부유식 교량의 자중과 차량하중 그리고 부력 등을 정적 하중의 형태로 재하고, 파랑에 의한 유체력은 식 (2)를 통해 동적 하중의 형태로 고려하여 시간영역 동적 해석을 수행하면 이른바 유체동역학적 구조거동을 해석할 수 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 불규칙 파랑에 대한 동적 해석을 주로 수행하였다. 불규칙 파랑의 영향을 고려하기 위해 정의된 불규칙 파랑에 대한 파 스펙트럼과 동일한 에너지를 갖는 유한개의 규칙파랑성분을 임의의 위상과 함께 정의하고, 이를

중첩하여 유체동역학해석에 외력 항으로 적용하였다. 이에 대하여 3장에 보다 상세히 기술하였다.

3. 부유식 주탑을 갖는 케이블지교량의 불규칙 파랑 중 동적 거동 특성

3.1 분석모델 개요

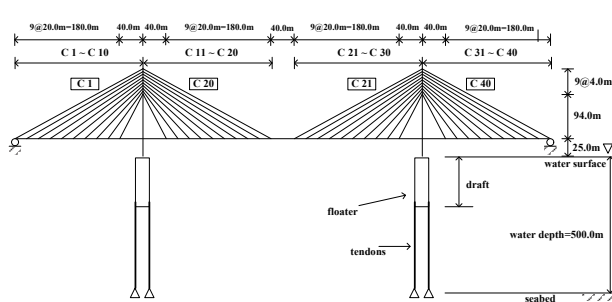
본 연구에서는 Fig. 1.(a)와 같은 전체 길이 920.0m(중앙지간장 480.0m)의 부유식 사장교를 다루었다. 해당 교량은 2면의 팬 형으로 배치된 총 80개의 케이블로 거더가 지지되는 상부구조 형식을 갖고, 주탑은 부유체로 지지되며 이 부유체는 해저지반에 고정된 긴장재(Tendon)로 위치 제어된다. 이 모델의 주탑 및 상부구조 형식은 Kim et al.(2018)에서 연구된 모델^[2]과 동일하고, 주탑을 지지하는 부유체는 각각 16개의 긴장재로 지지되는 형식을 갖는다. Table 1은 본 연구에서 고려한 부유식 사장교의 형상 및 부유체를 제외한 주요 기하학적 제원을 나타낸다.

주탑을 지지하는 부유체에서 발생하는 부력은 237,553 kN로 설계되었고, 이는 본 교량의 전체 자중(주탑, 거더, 폰툰, 긴장재 및 콘크리트 바닥판 자중) 및 차량하중(차로폭 3.5m의 왕복 6차선 고려)에 의해 발생하는 주탑 한 기에 작용하는 수직력의 2.0배에 해당하는 값이다. 즉, 본 주탑의 부력-수직력 비율(buoyancy-vertical force ratio, BVR)은 2.0으로 설계되었다.

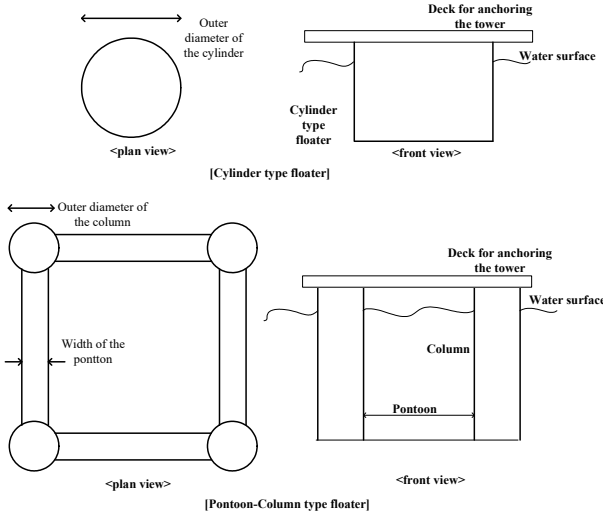
본 연구에서는 부유식 사장교의 파랑 중 동적 거동을 면밀히 분석하기 위해 다양한 설계인자의 영향을 해석적으로 분석하였는데, 먼저, 본 구조물을 지지하는 부유체의 형식에 따른 운동 특성을 비교·분석하였다. 이를 위해 Fig. 1.(b)와 같이 A. 실린더 형 부유체 및 B. 폰툰-컬럼 형 부유체로 각각 지지된 부유식 교량의 동적 거동 특성을 분석하였다. 실린더형 부유체의 직경과 길이, 두께는 각각 40.0m, 18.8m, 0.04m 이다. 폰툰-컬럼 형 부유체에서 컬럼과 폰툰의 단면형상은 각각 원형 및 사각단면으로 가정하였고, 컬럼의 직경 및 길이는 각각 12.0m, 30.0m, 폰툰의 가로×세로×길이는 각각 8.0m, 8.0m, 38.0m이다. 즉, 이 부유체의 폭(컬럼 중심-중심 간

Table 1. Main particular of the considered floating bridge models

	Girder	Tower	Stay cables	Tendons
Axial stiffness EA (kN)	1.58E5	1.57E8	2.10E3	7.65E3
Bending stiffness EI, in-plane (kN·m ²)	3.04E5	1.32E6	-	-
Bending stiffness EI, out-of-plane (kN·m ²)	5.76E6	6.91E7	-	-
Unit weight (kN/m ³)	77.01	77.01	77.01	77.01
Drag coefficient	-	-	-	1.2
Added mass coefficient	-	-	-	1.0



(a) general configuration



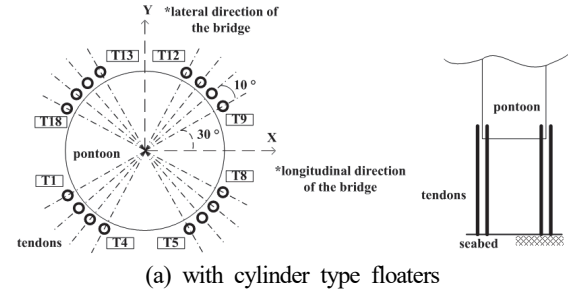
(b) examined floater types

Fig. 1. General configuration of the examined cable-stayed bridge with floating towers

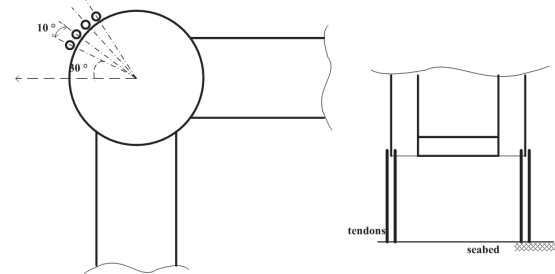
격)은 50.0m로 설계되었다.

그 후 폰툰-컬럼 형 부유체를 갖는 사장교의 동적 거동에 대하여 중점적으로 분석하였고, 부유체의 흘수와 컬럼의 기울기 및 긴장재의 초기 기울기에 따른 구조물의 파랑에 대한 구조 반응 변화특성을 분석하였다.

부유체를 지지하기 위해 설계된 계류선으로 본 연구에서는 강관 형식의 긴장재를 사용하였다. 본 절에서 검토된 긴장재 단면은 외경 0.6m, 두께 0.02m의 강관(API X70 steel)으로 설계되었다. Fig. 2와 같이 4개의 긴장재 클러스터가 90° 간격으로 실린더 형 부유체 및 폰툰-컬럼형 부유체의 컬럼에 배치되었고, 각 클러스터 내의 개별 긴장재는 10°로 배치되어 있다. 앞서 언급한 대로 주요 고정하중인 구조물의 자중과 차량하중으로 고려되는 활하중에 의해 주탑에 작용하는 수직력의 2배 크기의 부력이 정적으로 작용하므로 두 힘의 차이에 의해 긴장재에 초기 장력이 도입된다. 즉, 파랑하중과 같은 동적 하중이 작용하기 전에 긴장재는 이미 수직력과 부력의 차이에 의한 초기 긴장 상태에 놓이게 된다.



(a) with cylinder type floaters



(b) pontoon-column type floaters

Fig. 2. Floater types and tendon arrangement

3.2 고려환경조건

극심한 환경조건에서의 본 구조물의 동적 거동 특성을 분석하고, 실제적 활용을 위한 최적의 설계 개념을 도출하기 위해 본 연구에서는 100년 재현 주기의 파랑모형을 정의하여 해석에 외력으로 적용하였다. 본 연구에서 고려한 파랑 조건은 Son et al. (2015), Kim and Won. (2017) 등에서 고려된 제주지역의 100년 재현 주기 파랑조건으로서, 유의파고 $H_s=11.32\text{m}$, 첨두주기 $T_p=15.1\text{s}$ 를 갖는다. 이를 시간 영역 전체계 해석에서 주요 외적 인자로 고려하기 위해 JONSWAP 파 스펙트럼을 통해 파랑 모형을 구성하여 해석 모델에 적용하였다.

$$S(f) = (\alpha g^2 / 16\pi^4) f^{-5} e^{(-5/4[f/f_m]^{-4})\gamma^b} \quad (8)$$

여기서, $b = \exp(-1/2\sigma^{-2}[f/f_m - 1]^2)$

$$\sigma = 0.07 \text{ for } f \leq f_m, 0.09 \text{ for } f > f_m$$

$$f_m = 1/T_p$$

α : spectral energy parameter

T_p : 첨두 주기

H_s : 유의 파고

γ : 형상계수

g : 중력가속도

식 (2)와 같이 수중 선요소가 받는 유체력은 물입자의 속도 및 가속도에 의해 계산되고, (3)~(7)에 잘 나타난 대로 파랑에 의한 물 입자의 속도 및 가속도는 균일 파랑에 의한 수면 높이 변화의 함수(cos 함수)를 통해 표현이 가능하다. 따라서 불규칙파랑 작용 시 유

발되는 물입자의 운동 역시 수면 높이 변화의 함수로 고려하면 효과적으로 물입자 운동에 따른 유체력을 계산할 수 있다. 이에 따라 Fig. 3.과 같이 정의된 불규칙 파랑 스펙트럼에 대한 동적 해석을 위해 이 스펙트럼과 동일한 크기의 에너지를 갖는 균일 파랑 성분군(regular wave components)을 구성하고 임의의 위상각이 부여된 각 파랑 성분을 중첩하여 해석 모델에 작용시킴으로써 불규칙 파랑에 의한 물입자의 속도 및 가속도를 효과적으로 계산할 수 있도록 하였다.

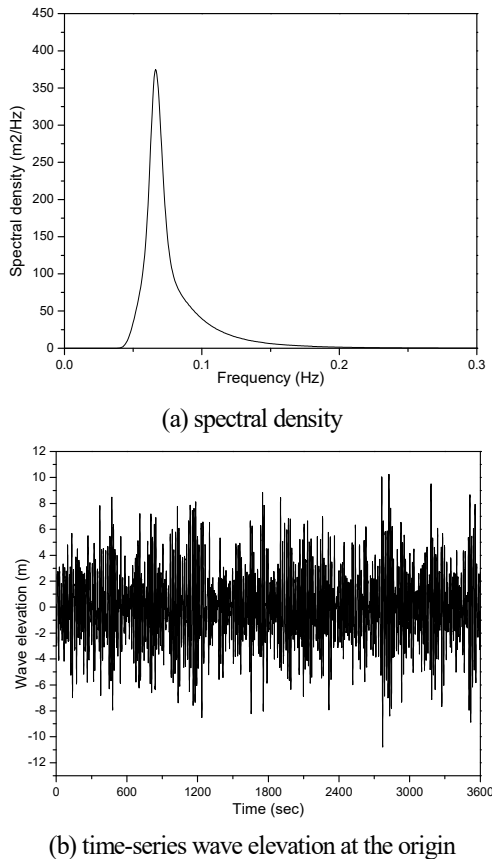


Fig. 3. Considered irregular wave model ($H_s=11.32\text{m}$, $T_p=15.1\text{sec}$, $\gamma=3.3$, JONSWAP wave spectrum)

3.3 해석모델 및 해석기법

파랑에 대한 동적 거동을 분석하기 위해 유체동역학이론 기반의 시간 영역 전체계 동적 해석을 수행하였다. 이를 위해 구조물을 구성하는 주요 부재 중 주탑과 거더, 부유체(실린더, 폰툰, 컬럼)는 보요소로 모델링 하고, 긴장재와 상부 케이블은 트러스요소를 사용하여 모델링 하였으며, 긴장재 및 케이블의 역학적 특성을 고려하기 위해 압축력을 받지 못하도록 처리하였다.(no compression option 적용)

파랑의 직접적인 영향을 받는 부유체의 주요 구조 부재는

Morison 식을 적용하여 파랑에 의한 물입자 운동에 의해 작용하는 유체력을 외력으로 매 해석 단계에 고려할 수 있도록 하였다. 즉, Morison 식을 부유체의 실린더, 폰툰, 컬럼에 부가질량계수 및 항력계수를 적용하여 물 입자 운동에 의해 유발되는 부가질량에 의한 힘 및 항력이 유체력으로 반영되도록 하였다. 본 해석연구에서 원형 단면의 구조부재에 대해 고려된 항력계수 및 부가질량계수는 각각 1.2, 1.0이고 사각 단면의 구조부재에 대해서는 각각 2.1, 1.51을 적용하였다. 유체동역학 기반의 전체계 동적 해석은 ABAQUS Standard 및 AQUA V2018을 통해 수행하였다. 즉 ABAQUS Standard를 통해 구조형상과 재료특성, 지점조건 그리고 유체력을 제외한 하중조건(자중 및 차량하중)을 모델링하고, ABAQUS AQUA를 통해 수심 500.0m의 유체환경 및 파랑조건을 모델링하였다. Fig. 4.는 이러한 방법론에 입각하여 모델링 된 부유식 사장교 모델을 보여준다.



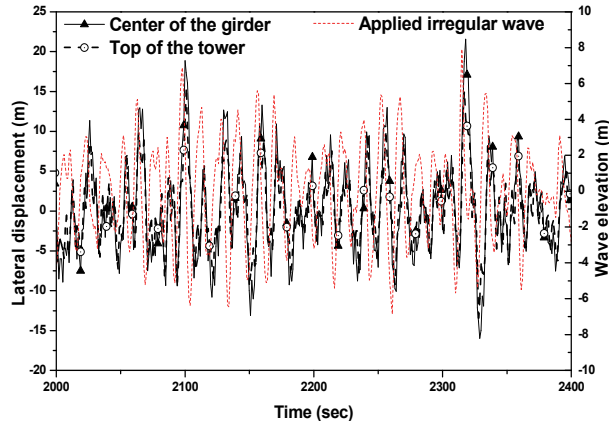
Fig. 4. Analysis model (floating cable-stayed bridge with pontoon-column type floaters)

정의된 불규칙 파랑에 대한 본 구조물의 동적 반응을 직접적으로 얻기 위해 자중과 활하중, 부력에 대한 정적해석·파랑에 대한 시간영역 유체동역학해석으로 구성된 2 단계 해석을 수행하였다. 불규칙 파랑에 대한 시간영역 동적 해석은 동적 하중의 점진적 증가구간으로 활용되는 ramp-up 구간(200.0초 구간)을 포함하여 총 3800.0초 구간에 대해 0.01초의 시간간격으로 수행되었고, 이 해석을 통해 부유식 주탑 및 거더 주요 위치에서의 동적 변위와 긴장재 및 케이블의 장력(또는 단면 수직 응력)을 얻은 후 이를 종합적으로 분석하여 불규칙 파랑에 대한 부유식 교량의 동적 거동 특성을 해석적으로 분석하였다.

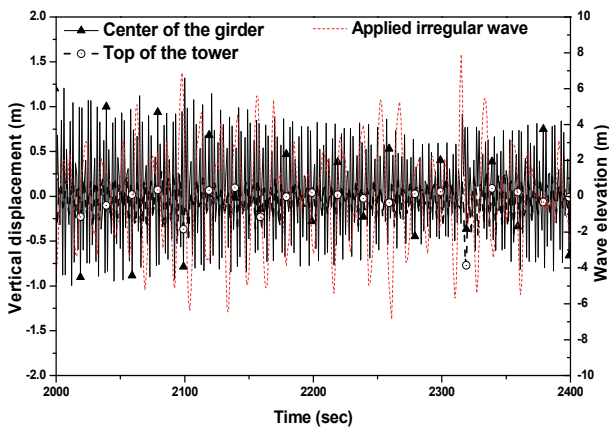
3.4 부유체 형식에 따른 운동 특성 비교

본 절에서는 주탑을 지지하는 부유체의 형식에 따른 불규칙 파랑에 대한 운동 특성을 비교·분석한다. Fig. 5.와 Fig. 6.은 Fig. 3.의

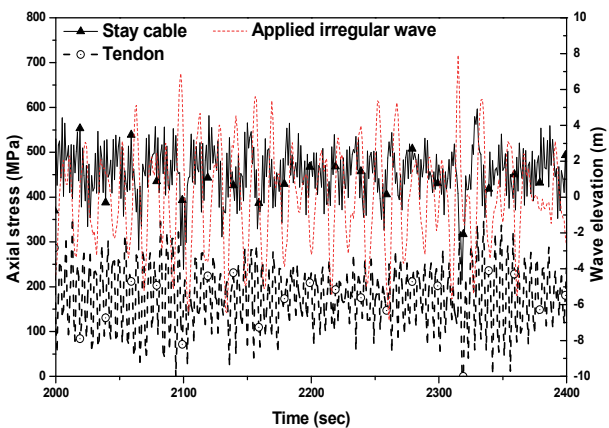
불규칙 파랑이 작용할 때 실린더 형 부유체 및 폰툰-컬럼 형 부유체에 의해 지지되는 부유식 교량 주요 위치에서의 변위와 긴장재 (T1) 및 상부케이블(C20) 단면에서의 수직 응력을 시간영역 데이터로써 나타낸다.(총 3,800초 해석결과 중 2,000~2,400초 구간)



(a) lateral displacement of the tower and girder

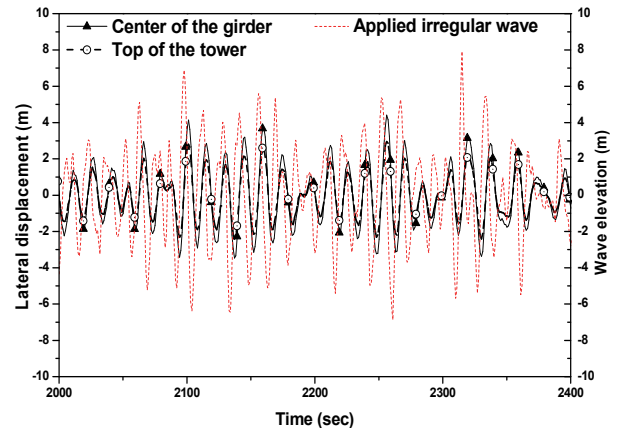


(b) vertical displacement of the tower and girder

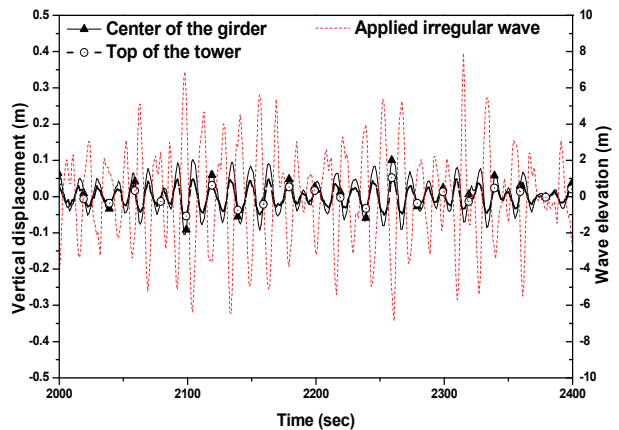


(c) axial stress of the tendon (T1) and stay cable (C20)

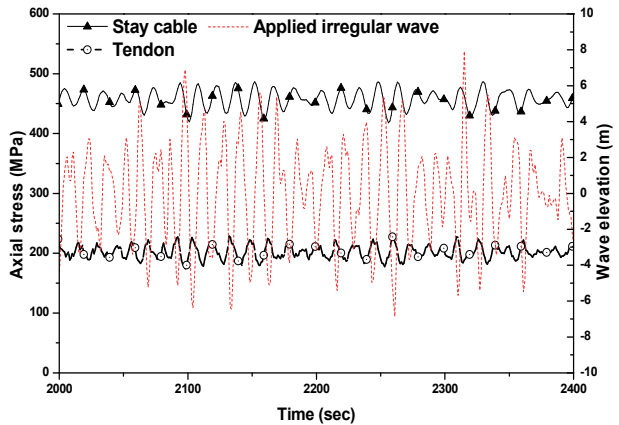
Fig. 5. Time-series structural responses of the floating cable supported bridge with the cylinder type floater



(a) lateral displacement of the tower and girder



(b) vertical displacement of the tower and girder



(c) dynamic stress of the tendon (T1) and stay cable (C20)

Fig. 6. Time-series structural responses of the floating cable supported bridge with the pontoon-column type floater

먼저, 본 해석결과는 작용하는 파랑의 파고변화는 본 부유식 구조물 주요 위치에서의 변위 및 단면응력변화를 직접적으로 유발하는 것을 명확히 보여준다. 교량 교축 직각방향으로 파랑이 작용할 때 1차적으로 부유체의 운동을 유발하는데, 이 부유체의 운동에 의해 주탑이 가진되고, 주탑에 고정된 케이블 및 케이블로 지지

되는 거더에 동적 응답이 유도되는 등의 상호작용이 나타난다. 해석 결과, 파고 변화와 주탑, 거더의 수평 및 수직 변위는 일정한 위상차를 보이며 나타남을 알 수 있다. 또한 본 해석 결과 상부 케이블 및 긴장재의 수직응력변화는 각각 주탑 및 거더의 수평 운동 및 수직운동과 함께 하는 것을 알 수 있다.

부유체 형식이 다른 두 교량 모델의 구조적 반응을 비교하면, 폰톤-컬럼 형 부유체로 지지된 교량 모델이 동일한 불규칙 파랑에 대해 월등히 작은 구조 반응을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 비교된 두 부유체 중에서 폰톤-컬럼 형 부유체에 더 작은 유체력이 작용함에 따른 것이다. 동일한 부력이 요구될 때 폰톤-컬럼 형 부유체로 설계하는 경우, 자유수면으로부터 가까운 곳에 위치하는 구조부재(컬럼)의 직경을 줄이고 자유수면으로부터 먼 위치에 구조부재(폰톤)를 배치하여 동일한 파랑에 의한 유체력을 경감시킬 수 있다. 이러한 원리가 본 해석연구를 통해 입증되었다.

Table 2~Table 4는 주요 위치의 수평, 수직변위 및 케이블과 긴장재의 수직응력의 통계치를 비교한다.

Table 2. Statistical values of the lateral motion of the bridge under the irregular wave

	w cylinder type floater		w pontoon-column type floater	
	center of the girder	top of the tower	center of the girder	top of the tower
Min (m)	-15.98	-14.63	-5.22	-3.80
Max (m)	24.20	18.60	6.74	4.67
Average (m)	0.41	0.26	0.04	0.02
Standard deviation (m)	6.13	4.58	1.82	1.26

Table 3. Statistical values of the vertical motion of the bridge under the irregular wave

	w cylinder type floater		w pontoon-column type floater	
	center of the girder	top of the tower	center of the girder	top of the tower
Min (m)	-2.01	-1.86	-0.14	-0.09
Max (m)	2.54	0.52	0.17	0.08
Average (m)	0.07	-0.04	0.00	0.00
Standard deviation (m)	0.62	0.18	0.05	0.03

Table 4. Statistical values of the axial stresses of the tendon (T1) and stay cable (C20) under the irregular wave

	w cylinder type floater		w pontoon-column type floater	
	cable (C20)	tendon (T1)	cable (C20)	tendon (T1)
Min (MPa)	155.10	0.00	395.09	161.64
Max (MPa)	650.79	465.55	500.42	239.69
Average (MPa)	453.25	178.17	456.87	201.81
Standard deviation (MPa)	63.21	75.77	15.96	11.59

1시간의 시간영역 구조 응답에 대한 최대, 최소, 평균 및 표준편차를 직접 비교한 결과, 폰톤-컬럼형 부유체가 도입된 부유식 교량 모델에서는 검토된 모든 응답이 감소함을 알 수 있다. 특히 구조물의 수평 및 수직 방향 변위를 급격히 저감시킴에 따라 상부 케이블 및 긴장재 단면에 발생하는 수직 응력의 최대값 뿐만 아니라 최대값과 최소값의 차이 그리고 표준편차 역시 효과적으로 저감시키는 것으로 나타났다. 따라서 폰톤-컬럼 형 부유체 도입은 케이블 및 긴장재의 강도 설계 측면 뿐만 아니라 피로 설계에 대해서도 매우 유용할 것으로 기대된다.

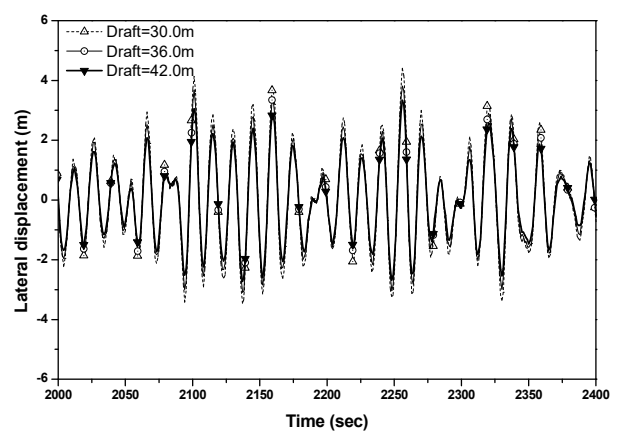
3.5 부유체 흘수에 따른 동적 거동 분석

본 절에서는 부유체의 흘수에 따른 불규칙 파랑에 대한 동적 거동 변화 특성을 해석적으로 분석하였다. Table 5와 같이 폰톤-컬럼 형 부유체의 흘수를 변화시켜 동일한 불규칙 파랑에 대한 동적 거동을 비교·분석하였다. 본 연구를 위해 부유체의 전체 부피와 폭 그리고 폰톤의 단면크기를 일정하게 유지하고 컬럼의 길이 및 단면적을 조절하여 흘수를 조절하였다.

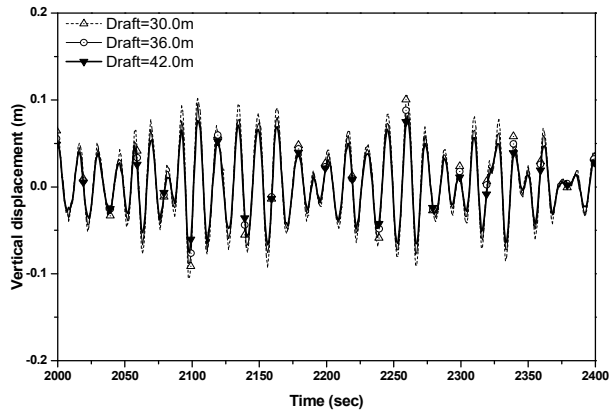
Table 5. Geometric properties of the column for the study of effects of the draft

Length (m)	30.0	36.0	42.0
Outer diameter (m)	12.0	11.0	10.0

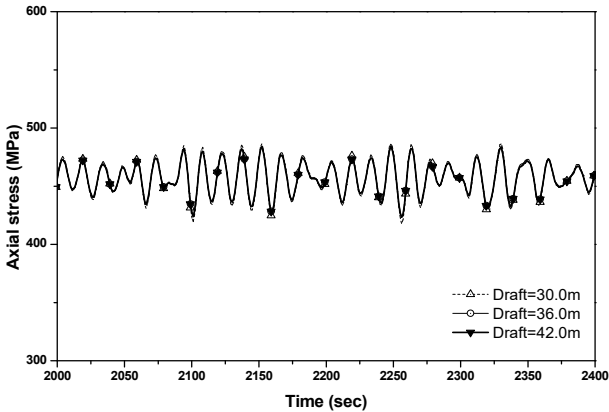
Fig. 7.과 같이 부유체 흘수 변화에 따라 불규칙 파랑에 대한 반응의 주기의 변화 없이 변동폭 및 최대, 최소값의 변화가 명확히 유도됨을 알 수 있다. 부유체의 전체 체적을 유지하며 흘수를 증가시킴에 따라 컬럼의 직경이 줄고 폰톤의 위치가 자유수면으로부터 멀어짐에 따라 동일 파랑에 대한 유체력 감소를 예상할 수 있고, 이에 따라 검토된 모든 구조적 반응이 감소함을 알 수 있다.



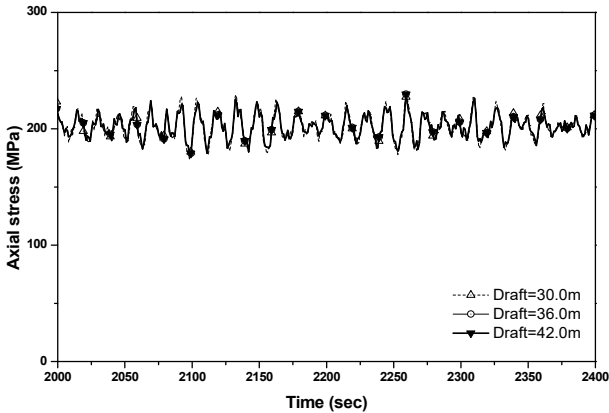
(a) lateral displacement at the center the girder



(b) vertical displacement at the center the girder



(c) axial stress of the stay cable (C20)

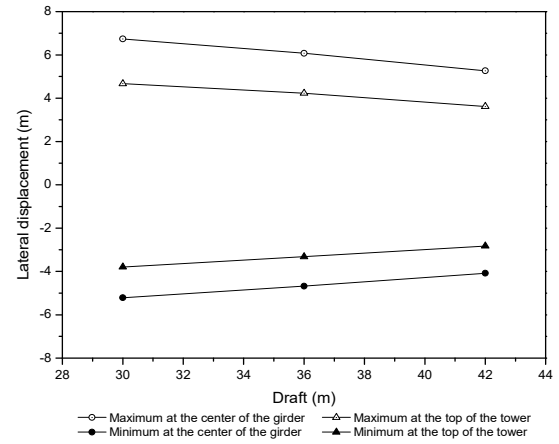


(d) axial stress of the tendon (T1)

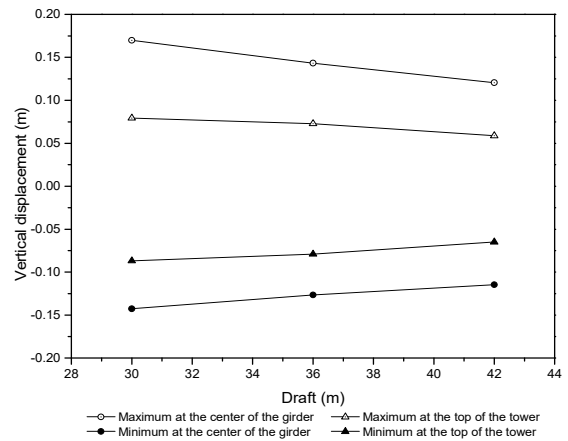
Fig. 7. Time-series structural responses of the floating cable supported bridge with different draft

Fig. 8.은 흘수 변화에 따른 주요 구조적 반응의 최대, 최소값의 변화를 나타낸다. 이 그래프에서 잘 나타난 대로 동일한 불규칙 파랑 조건에 대하여 발생하는 최대 변위 및 최대와 최대 변위 간 차이가 감소함에 따라 결과적으로 상부 케이블 및 긴장재의 최대 응력 및 최대와 최소 응력 간 차이가 역시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 더 깊은 부유체 흘수의 도입을 통해 유체력을 감소시켜 파랑에 대한 구조적 반응을 경감시킬 수 있는 것으로 본 해석연구결과 명

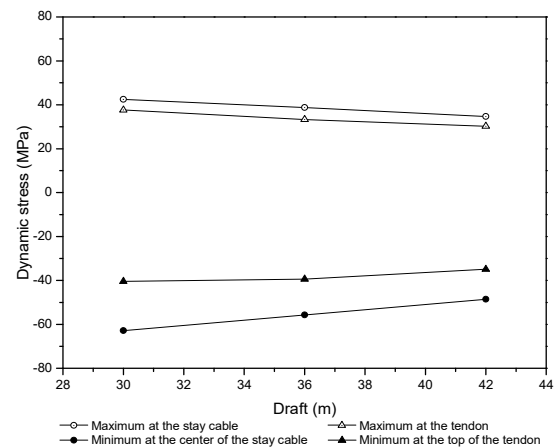
확히 확인되었다, 다만, 동일한 전체 부피를 유지하며 흘수를 증가시키는 경우 컬럼의 직경 감소에 따른 컬럼 자체의 구조강도 및 강성의 감소와 함께, 조류에 의한 VIM (Vortex-Induced Motion) 효과 증대의 역효과가 야기될 수 있으므로 최적의 흘수 선정에 있어서 신중한 필요가 있을 것으로 판단된다.



(a) lateral displacement of the girder and tower



(b) vertical displacement of the girder and tower



(c) dynamic stress of the stay cable (C20) and the tendon (T1)

Fig. 8. Effect of the draft on the maximum and minimum structural responses

3.6 부유체 컬럼 기울기에 따른 동적 거동 분석

부유체를 지지하는 계류선 간의 수평 간격은 부유체와 긴장재 간의 연결점의 위치에 따라 좌우된다. 계류선 간 수평 간격이 클수록 부유식 주탑의 회전변위, 즉 Roll 및 Pitch에 대한 강성이 증가할 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 다시 말해, 바람, 파도, 조류 등과 같은 수평하중이 구조물에 작용할 때 부유체의 회전변위는 긴장재에 의해 도입되는 회전강성에 좌우될 것이다. 부유식 주탑을 갖는 사장교의 구조형식 특성 상 부유체에 발생하는 회전변위는 주탑의 기울임을 즉시 유발한다. 이 기울임에 따라 주탑 상단으로부터 추가의 수평 변위가 발생하고 이것은 결과적으로 거더 등 상부 구조의 수평 변위를 야기하게 된다. 따라서 파도에 의해 부유체에 직접적으로 유발되는 수평변위 뿐 만 아니라 회전변위 역시 효과적으로 제어해야 하는 것은 자명한 일이다.

본 절에서는 동일 체적을 갖는 부유체의 컬럼의 기울기에 따른 동적 거동 특성을 해석적으로 검토하였다. 본 검토를 위해 15°의 초기 기울기를 갖는 긴장재로 계류된 부유체의 흘수는 30.0m로 일정하게 하고, 컬럼의 기울임 각도를 0°(수직), 5°, 10°, 15°로 설정하여 동일한 불규칙 파랑에 대한 주요 구조적 반응을 비교·분석하였다.

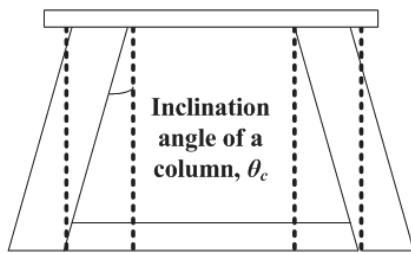
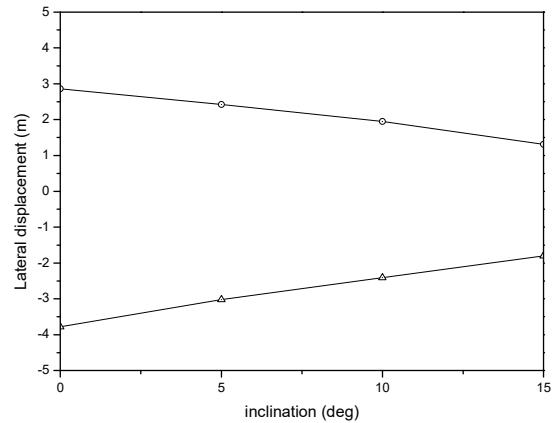


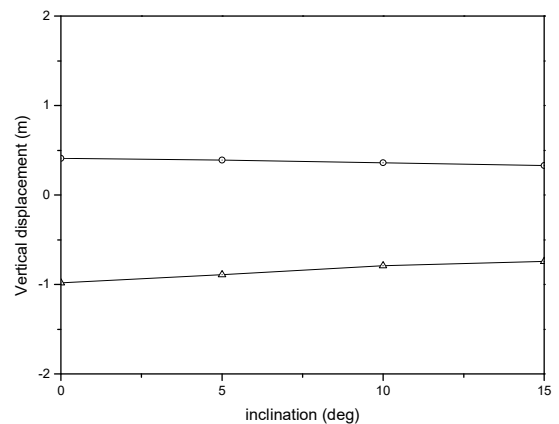
Fig. 9. Definition of the column inclination

해석결과, 본 검토 범위에서 Fig. 9와 같이 컬럼의 기울기가 도입될수록 동일한 파랑 조건에서 주탑 최상단 최대변위 및 최대, 최소변위 간 차이가 감소되는 것을 명확히 알 수 있다. 이는 Fig. 10.(c)에 잘 나타난 바와 같이, 컬럼 기울기 증가에 따른 긴장재에 의한 회전강성 증대로 부유체의 회전변위가 감소한 것에서 비롯된다. 컬럼의 기울기가 15°인 모델에서 부유체의 최대 회전각은 1.31°로, 이는 비교군인 수직 컬럼을 갖는 모델의 회전각(2.68°) 대비 48.9%수준이다. 본 해석모델의 주탑 높이(130.0m) 및 주탑의 수평변위를 유발하는 성분특성을 고려하면 컬럼 기울기 변화는 Fig. 10.(a)와 같이 의미있는 수준의 동적 변위 감소를 유도할 수 있는 것으로 풀이된다. 케이블 및 긴장재의 동적 응력 역시 컬럼의 기울기 증가에 따라 감소하는 특성을 보였으나, 주탑 수평변위의 감

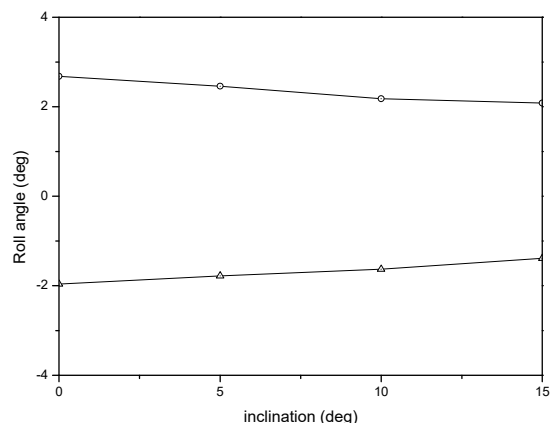
소율에 비해 상대적으로 크게 나타나지는 않았다. 케이블과 긴장재의 최대 동적응력은 15° 기울기 적용 시 수직 컬럼 모델 대비 각각 10.24%, 6.5% 감소하는 것으로 나타났다. 비록 최대응력의 감소율이 변위감소율에 비해 상대적으로 작지만, 변동응력의 크기가 절대적으로 영향을 미치는 피로수명에 대해서는 의미 있는 결과라고 볼 수 있다.



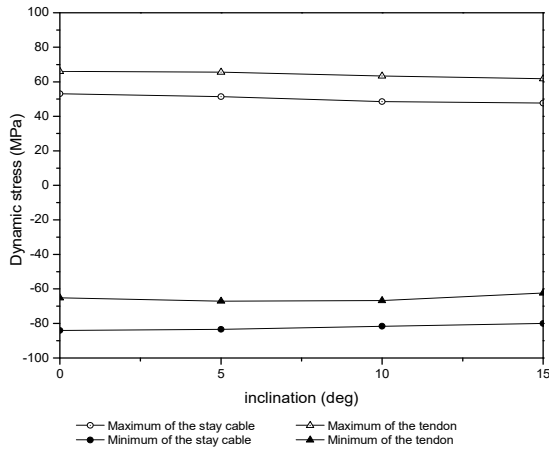
(a) lateral displacement of the girder and tower



(b) vertical displacement of the girder and tower



(c) roll angle at the bottom of the tower



(d) dynamic stress of the stay cable (C20) and the tendon (T1)
Fig. 10. Effect of the inclination of the floater column on the maximum and minimum structural responses (initial inclination of the tendons = 15°)

3.7 긴장재 초기 기울기에 따른 동적 거동 분석

본 연구에서는 부유식 주탑의 동적 거동 양상에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 긴장재의 기하학적 제원에 대한 영향성을 해석적으로 분석하였다. Fig. 11.은 본 연구에서 고려한 긴장재 초기 기울기를 설명하고, Fig. 12.는 시간영역 해석결과로부터 정리된 주요 응답의 최대 및 최소값을 나타낸다.

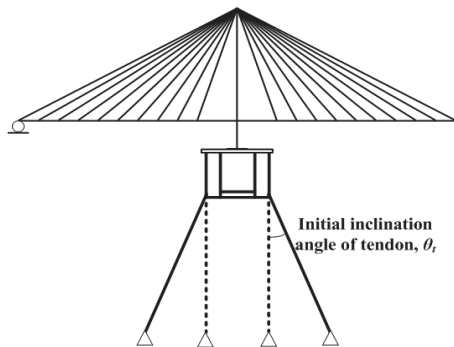
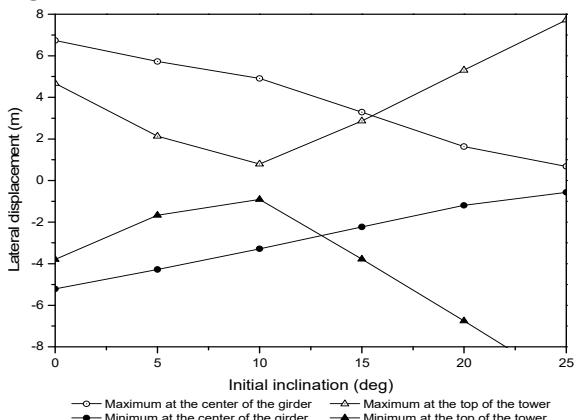
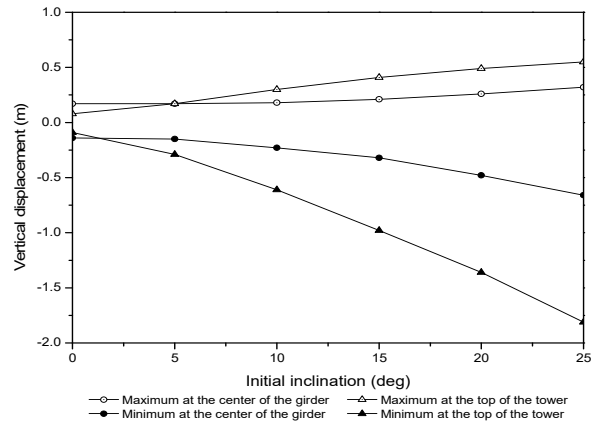


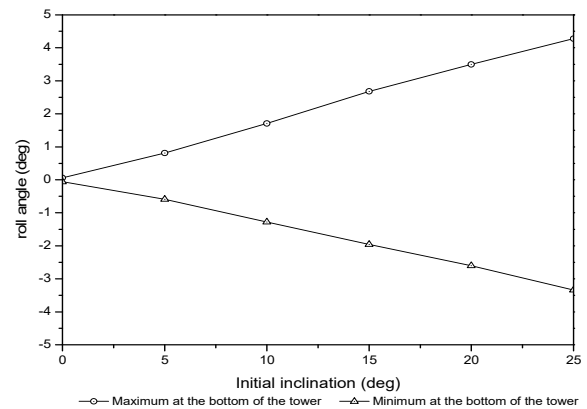
Fig. 11. Definition of the initial inclination of the tendons



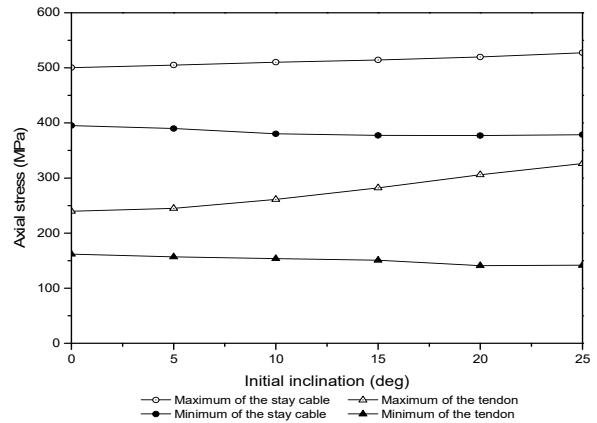
(a) lateral displacement of the girder and tower



(b) vertical displacement of the girder and tower



(c) roll angle at the bottom of the tower



(d) axial stress of the stay cable (C20) and the tendon (T1)
Fig. 12. Effect of the initial inclination of the tendons on the maximum and minimum structural responses

해석 결과, 긴장재에 더 큰 초기 기울기가 도입될수록 긴장재에 의한 수직방향 강성이 감소하여 수직방향의 최대 및 최소 변위의 절대값이 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타난다. 주목할 점은 Fig. 12.(a)에 나타난 수평 변위이다. 거더의 수평 변위는 기울기 증가에 따라 점차 감소하는 특성을 보이나, 주탑의 수평 변위는 긴장재

기울기가 10도 이상인 모델부터는 오히려 증가하는 특성을 보인다. 이는 Kim et al.(2018)의 연구에서도 언급된 바와 같이 긴장재 초기 기울기가 클수록 수직 방향 강성 뿐만 아니라 회전 강성 역시 감소하게 된다. 즉, 동일 파랑에 대하여 더 큰 회전 변위가 부유체에 1차적으로 발생하는데, 주탑의 전체 수평 변위는 부유체의 수평 변위 및 회전 변위에 영향을 받으므로 긴장재 기울기 증가에 따라 주탑의 수평 변위는 결과적으로 증가하는 양상이 나타나게 된다. 부유체의 회전에 대한 영향을 상대적으로 덜 받는 거더의 수평 변위 역시 더 큰 긴장재의 기울기가 고려될 경우 다시 수평 변위 역시 증가할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 13.은 주탑 최하단부에서 발생하는 수평변위와 함께 주탑의 길이 L_t 와 주탑 최하단의 회전변위 θ_r 의 코사인 값을 곱하여 함께 도시한다. 기본적으로 주탑 최하단에서의 수평변위와 회전변위에 의해 주탑 최상단에 발생하는 추가의 수평변위는 180°의 위상차를 갖고 발생하는데, 더 큰 긴장재 초기 기울기가 고려될수록 주탑 최하단의 수평변위는 감소하고 회전에 의한 수평변위성분은 증가함에 따라 결과적으로 주탑 최상단의 수평변위가 증가하는 것을 본 결과를 통해 예상할 수 있다.

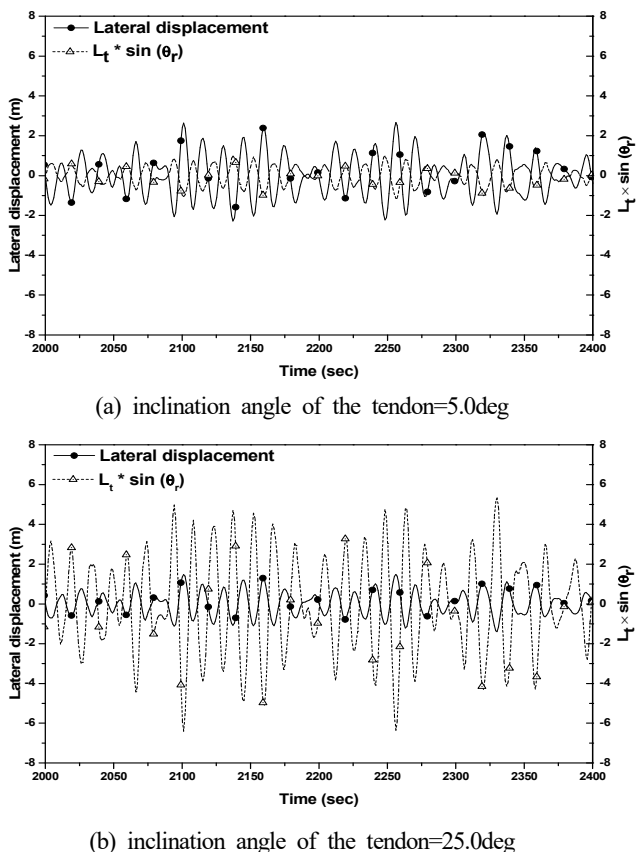


Fig. 13. Time-series lateral displacement and roll angle at the bottom of the tower

4. 결론

본 연구에서는 부유식 주탑을 갖는 사장교의 불규칙 파랑에 대한 동적 거동특성을 해석적으로 분석하였다. 본 연구에서는 100년 재현 주기의 파랑 조건에 대한 구조물의 주요 위치에서의 변위와 긴장재 및 케이블의 단면 응력 등을 주로 검토하여 본 신형식 해상 교량의 실제 적용을 위한 합리적인 기본설계 개념도출에 도움이 되고자 구조물의 주요 설계 인자에 대한 영향 분석을 위주로 수행되었다.

먼저, 부유식 주탑을 지지하는 부유체의 형식 및 흘수 조건에 따라 파랑에 의한 유체력이 크게 달라질 수 있음을 본 해석결과 나타났다. 본 연구 결과, 단순한 실린더형 부유체 보다는 폰톤-컬럼 형의 부유체가 동일 파랑 작용 시 유체력을 더 저감시킬 수 있을 것으로 평가되었고, 이와 함께 깊은 흘수(deep draft) 설계 역시 유체력 저감에 도움이 되는 것으로 분석되었다. 다만, 흘수 증가에 따른 컬럼의 구조 강성 저하 및 조류에 의한 VIM(Vortex-induced Motion) 발생에 유의해야 할 것으로 예상된다.

부유체 컬럼 및 긴장재의 초기 기울기의 영향 역시 해석적으로 분석하였다. 본 연구결과, 부유체 컬럼 기울기의 도입을 통해 긴장재 강성에 의해 부유식 주탑에 부가되는 회전강성을 증대시켜 결과적으로 주요 구조부재의 수평변위를 저감시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 다만, 긴장재나 케이블의 응력 변화에는 상대적으로 미미한 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 긴장재 초기 기울기에 대한 영향 분석 결과, 더 큰 기울기의 적용에 따라 1차적으로 부유체의 수평변위가 감소하는 효과를 기대할 수 있겠으나, 동시에 수직 및 회전방향 변위는 오히려 증가하는 특성을 보였고, 이에 따라 주탑 최상단 수평 변위는 10°도 이상의 초기 기울기가 도입되는 경우 오히려 증가하는 양상을 보여 긴장재 초기 기울기 도입은 구조물의 사용성 및 구조안전성 측면을 면밀히 검토하여 최적의 값으로 결정해야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서 다루지 않은 설계 변수 중 긴장재의 외경 및 단면적 그리고 부유체의 밸러스트(ballast) 역시 구조물의 정·동적 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 구조물의 효과적인 설계 개념 도출을 위해 위의 영향인자에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(No. 17 CT AP-C133500-01) 및 2016년도 한국연구재단 이공학개인지초연구 지원사업 한국형SGER(No. 2016R1D1A1A02937083)을 통해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 김승준, 원덕희(2017) 부유식 주탑을 갖는 케이블지지교량의 해석 및 설계, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제65권, 제8호, pp.84-87.
Kim, S., and Won, D.H. (2017) Analysis and Design for Cable-Supported Bridges with Floating Towers, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 65, No.8, pp.84-87 (in Korean).
- [2] 김승준, 원덕희, 강준석(2018) 부유식 주탑을 갖는 케이블 지지교량의 파랑 중 동적 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제30권, 제4호, pp.205-216.
Kim, S.J., Won, D.H., and Kang, J.S. (2018) Dynamic Behavior of Cable-Stayed Bridges with Floating Towers Under Waves, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.4, pp.205-216 (in Korean).
- [3] Villoria, B., Holtberget, S.H., Dørum, C., Veie, J., Jena, P., and Madsen, P. (2017) Concept Overview of a Multi-Span Suspension Bridge on Floating Foundations, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.3037-3044.
- [4] Eidem, M., Minoretta, A., Xiang, X., and Fjeld, A. (2017) Basic Design for a Submerged Floating Tube Bridge Across the Digernessundet, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.3018-3024.
- [5] Villoria, B., Veie, J., Holtberget, S.H., and Jena, P. (2017) Multi Span Suspension Bridge on Floating Foundations – Behaviour Under Operation, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, IABSE, Canada, pp.509-516.
- [6] Papinutti, M., Aas-Jakobsen, K., Kaasa, L.H., Bruer, A., Marley, M.H., Veie, J., and Holtberget, S.H. (2017) Coupled Wind and Wave Load Analyses of Multi-Span Suspension Bridge Supported by Floating Foundations, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, IABSE, Canada, pp.3052-3059.
- [7] Papinutti, M., Bruer, A., Marley, M.H., Kvaleid, J., Hatami, A., Pathak, R., and Bhide, S. (2017) A Frequency Domain Tool for Investigation of Wind Response of TLP Suspension Bridges, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, IABSE, Canada, pp.198-205.
- [8] Dørum, C., Sha, Y., and Storheim, M. (2017) Multi-Span Suspension Bridge on Floating Foundations – Behaviour Under Ship Impact, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, IABSE, Canada, pp.1257-1263.
- [9] 장민서, 이윤우, 김승준, 한희석, 강영중, 한상윤(2018) 계류선 배치에 따른 부유식 사장교의 정적 전체계 거동특성 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제30권, 제4호, pp. 193-203.
Jang, M.S., Lee, Y.W., Kim, S.J., Han, W.S., Kang, Y.J., and Han, S.-Y. (2018) Global Static Performance Analysis of the Cable-Stayed Bridges with Floating Tower according to Tendon Arrangement, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.4, pp.193-203 (in Korean).
- [10] 손정민, 신승호, 홍기용(2015) 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템의 등가설계파 기법 적용에 관한 연구, 한국해양환경 에너지학회지, 한국해양환경 에너지학회, 제18권, 제3호, pp.135-142.
Son, J.M., Shin, S.H., and Hong, K. (2015) A Study on Equivalent Design Wave Approach for a Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, KOSMEE, Vol.18, No.3, pp.135-142.
- [11] 김승준, 원덕희(2017) 불규칙 파랑 중 해중 터널 계류선의 단기 피로 손상 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제1호, pp.49-60.
Kim, S., and Won, D.H. (2017) Investigation of Fatigue Damage of the Mooring Lines for Submerged Floating Tunnels Under Irregular Waves, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.1, pp.49-60 (in Korean).
- [12] Garrett, D.L. (1981) Dynamic Analysis of Slender Rods, *Journal of Energy Resources Technology*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.104, No.4, pp.302-306.
- [13] Cifuentes, S., Kim, S., Kim, M.H., and Park, W.S. (2015) Numerical Simulation of the Coupled Dynamic Response of a Submerged Floating Tunnel with Mooring Lines in Regular Waves, *Ocean Systems Engineering*, Techno-Press, Vol.5, No.2, pp.109-123.

요 약 : 대형 부유식 구조물의 구조 및 환경적 특성에 따라 파랑은 구조물의 설계를 지배하는 주요한 외력으로 고려된다. 본 연구에서는 부유식 주탑을 갖는 사장교의 파랑 중 구조적 거동에 대하여 분석하였다. 보다 실제적인 환경하중특성을 고려하기 위해 불규칙 파랑을 JONSWAP 스펙트럼을 통해 모델링하고, 이에 대한 동적 반응을 얻기 위한 유체동역학 해석 기반의 시간영역 전체계 해석을 수행하여 구조물의 주요 위치에서의 변위와 계류선과 상부 케이블의 장력 등 주요 구조 응답 특성을 분석하였다. 매개변수해석연구를 통해 본 구조물의 주요 설계 변수인 부유체 형식과 흘수, 부유체 절립 및 긴장재의 기울기가 구조물의 주요 구조 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 부유식 사장교, 부유식 주탑, 불규칙 파랑, 긴장재, 유체동역학해석