



부유식 주탑을 갖는 케이블지지교량의 파랑 중 동적 거동

김승준^{1*} · 원덕희² · 강준석³

¹조교수, 대전대학교 건설안전방재공학과, ²선임연구원, 한국해양과학기술원 연안방재연구센터, ³조교수, 서울대학교 조경지역시스템공학부 조경학과

Dynamic Behavior of Cable-stayed Bridges with Floating Towers under Waves

Kim, Seung Jun^{1*} · Won, Deok Hee² · Kang, Jun Suk³

¹Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

²Scientist Researcher, Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, 15627, Korea

³Assistant Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract - The environmental loadings such as wind, wave, and current mainly affect the structural behaviors of the floating bridges which can be effectively applied as the transportation systems for offshore fields or fjords in deepwater. It can be simply expected that the cable-stayed bridges with floating towers exhibit complex structural behaviors of conventional floating structures and cable-supported structures. For example, the motion of the floating towers induced by the wind and wave can excite the stay cables and the girder due to the interaction between the floating towers, cables, and the girder. In this study, the dynamic behavioral characteristics of the cable-stayed bridges with floating towers are analytically investigated. By performing hydrodynamic analysis in time-domain the hydrodynamic characteristics of the floating bridges under regular waves are investigated. In addition, the effects of the wave parameters and tendon design on the dynamic behavior of the floating tower are analytically studied.

Keywords - Floating bridges, Floating towers, Mooring, Tendons, Hydrodynamic analysis

1. 서론

넓은 폭원을 갖는 강 또는 깊은 수심의 바다 및 협만 등을 건너기 위한 교통 시설물로서 고정식 교각을 갖는 해상교량, 해저터널 및 침매터널 등 기존의 구조물과 다른 전혀 새로운 개념의 구조형식이 지속적으로 연구되어 왔다. 특히 깊은 수심이라는 환경적 제약을 극복하기 위해 부유식 해중 터널 (Submerged floating tunnel, SFT)과 부유식 교량 (Floating bridge) 개념이 대안으로 꾸준히 제시되어 왔다. 아직까지 해중 터널은 전 세

계적으로 실제 건설 사례가 없는데 반해, 부유식 교량은 Table 1과 같이 20세기 중반부터 미국, 노르웨이, 가이아나 등에서 건설되어 지금까지 운용되고 있는데, 단순 관광 목적의 보도교 차원을 넘어서 해당 지역의 지형 및 환경적 특성에 따라 깊은 수심의 해저지반에 교각의 안착이 어려운 기술적 한계를 극복하기 위해 건설되었다는 점에 주목할 필요가 있다.^[1]

부유식 교량이라 함은 말 그대로 교량의 무게와 수면 아래 잡기는 구조부재에 작용하는 부력이 정적 평형을 이루어 부유하는 특성을 갖는다. 즉, 수심이 매우 깊어 교각 및 기초의 건설이 기술적으로 매우 어렵고 비경제적인 경우, 수면 이하의 하부구조를 생략하고 이 대신 폰톤 (Pontoon)이라는 부력재를 도입하여 부력의 원리를 이용, 상부구조를 지지할 수 있도록 하게 한다.^{[1],[2]}

Table 1과 같이 지금까지 건설되어 온 부유식 교량은 주로 폰톤이 상부구조를 지지하는 형태를 갖는 단경간장의 연속교가 대부분이고, 장경간장의 케이블지지교량을 포함하는 부유식 교량은 1994년 노르웨이에서 건설된 Nordhordland bridge가 유

Note.-Discussion open until February 28, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 29, 2018; revised July 26, 2018; approved on July 30, 2018. Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-280-4574 Fax. +82-42-280-2576

E-mail. skim@dju.kr

Table 1. Floating bridges in the world

Bridge	Total length (km)	Bridge type	Location	Completion year
William A. Bugge Bridge	2,398 (*floating range 1,988)	Concrete girder with pontoon	Washington, USA	1961
Evergreen Point Floating Bridge (SR 520 Bridge)	2,310	Concrete girder with pontoon	Washington, USA	1963
Lacey V. Murrow Memorial Bridge	2,018	Concrete girder with pontoon	Washington, USA	1940
Demerara Harbour Bridge	1,851	Concrete girder with steel pontoon	Georgetown, Guyana	1978
Homer M. Hadley Memorial Bridge	1,772	Concrete girder with steel pontoon	Washington, USA	1989
Bergøysund Floating Bridge	931	Steel truss girder with concrete pontoon	Kristiansund, Norway	1992
Nordhordland bridge	1,614 (*cable-stayed bridge = 368)	Cable-stayed bridge with floating tower	Bergen and Meland, Norway	1994

일하다. 즉, 장대 및 초장대교량으로서의 부유식 교량은 아직까지 실제 건설된 사례가 없다. 다만, 최근 노르웨이 교통국(Norwegian Public Roads Administration)에서 자국 신설 고속도로 노선(E39 project) 내의 깊은 수심을 갖는 협만 8개소에 해중터널과 부유식 케이블지교량의 실제 투입을 발표하였고, 기본 및 상세설계를 위한 연구를 수행 중에 있다.^{[1],[2],[3],[4],[5]}

Bruno et al.(2017)은 상시 운영(operation condition)조건에서 초장대 부유식 교량의 구조안전성에 대해 해석적으로 검토하였는데, 정적 하중 뿐 만 아니라 바람과 파도에 의한 구조물의 주요 동적 응답을 검토하였고 노르웨이의 환경적 특성을 고려한 100년 재현주기 환경하중에 대해서도 적용이 가능하다는 결론을 발표하였다.^[4] Papinutti et al.(2017)은 긴장재로 긴장된 부유식 주탑을 갖는 부유식 현수교에 대하여 바람과 파도에 의한 동적 거동특성을 연구하였다.^[6] 이 두 연구에서는 시간영역해석 기법을 통한 구조물의 동적 특성을 분석한 데 반해, Painutti et al.(2017)은 유사한 구조물에 대한 동적 특성을 주파수영역해석 기법을 통해 분석하였다.^[7]

기본적으로 해중터널이나 부유식 교량 등 초대형 부유식 구조물의 설계 시에는 바람이나 파도, 조류 등의 환경하중이 설계를 지배하는 주요 인자로서 고려된다. 특히 시간에 따라 작용방향과 크기가 변화하는 바람과 파도는 설계를 지배하는 수준의 구조물의 동적 거동을 유발하게 된다.^{[4],[6],[8],[9]} 지금까지 건설되어 온 단경간의 연속교 형태의 부유식 교량과 달리 길이 1.0km를 상회하는 장경간의 부유식 케이블지교량은 구조물의 수직 및 수평방향에 대한 운동을 효과적으로 제어할 수 있는 계류시스템(moor-

ing system)이 필수적인데, 환경하중에 의해 유발되는 부유식 구조물의 동적 거동은 필연적으로 이 부유식 구조물을 구성하는 주요 구조부재에 동적 응력을 유발하여 최대 응력의 증가 뿐 만 아니라 피로손상을 누적시키게 된다. 따라서 이와 같은 부유식 구조물의 합리적인 명확한 설계를 위해서는 첫 번째로 해당 지역의 환경적 조건을 정의하고, 두 번째로 이러한 환경적 조건 하에서의 환경 하중에 대한 구조물의 구조적 반응을 해석하여 이를 기반으로 구조물의 안전성과 사용성을 평가할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 부유식 주탑을 갖는 케이블지교량의 파랑 중 동적 특성을 해석적으로 분석하였다. 본 연구에서 구조적 거동특성을 분석하는 교량은 해저지반에 고정된 긴장재(tendon)가 부유식 주탑의 운동을 제어하고 이 주탑에 케이블(stay cable)이 정착되어 교량 거더 등 상부구조를 지지하는 구조형식을 갖는다. 구조물의 동적 특성을 분석하기 위해 유체동역학(Hydrodynamics) 기반의 시간영역 동적해석을 수행하여 작용하는 파랑에 대한 구조물 주요 위치에서의 변위와 긴장재 및 케이블의 동적 응답을 분석하였다.

본 해석연구를 통해 규칙파랑과 구조 응답 간의 주요 상관관계를 분석하고, 파랑의 주기 및 파고 등 작용하는 환경하중과 부유식 주탑을 지지하는 긴장재의 기하학적 설계인자가 본 구조물의 동적 거동 및 응답특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 파랑 중 부유식 주탑을 갖는 케이블지지 교량의 유체동역학 해석

2.1 실린더 형 폰톤의 유체동역학해석을 위한 지배미분 방정식 및 유체력

자중, 부력, 조류와 같은 정적 하중 및 파랑에 의한 동적 하중을 받는 부유식 주탑의 실린더 형 폰톤의 지배미분방정식은 Garrett의 Slender rod 이론^[10]을 통해 구성 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &-(Br'')' + (\lambda r')' + \vec{q} = m\vec{r} \\
 &\lambda = T - Bk^2 \\
 &\frac{1}{2}(\vec{r} \cdot \vec{r} - 1) = \frac{T}{A_t E} \approx \frac{\lambda}{A_t E}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, B =휨 강성 (bending stiffness), T =인장력 (tensile force), k =곡률 (local curvature), m =단위 길이 당 질량 (mass per unit length), \vec{q} =단위 길이 당 분포하중벡터 (distributed force on the rod per unit length), λ =라그랑지 곱수 (Lagrange multiplier), E =탄성 계수 (Young's modulus), A_t =유효 단면적 (effective sectional area)

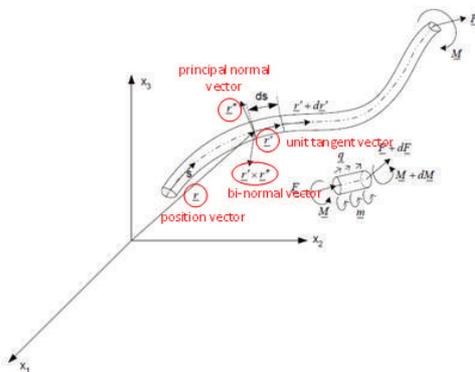


Fig. 1. General definition of submerged slender rods

식 (1)에서 수중 선요소가 받는 하중은 단위 길이 당 분포하중 벡터로 고려 가능한데, 자중과 부력을 제외한 파랑 및 조류에 의한 유체력은 Morison 식을 통해 관성력 (inertia force) 및 항력 (drag force)의 향으로 식 (2)와 같이 적용 가능하다.

$$\vec{q}_n = C_I \rho A_e \dot{v}_n + C_D \frac{1}{2} \rho D |v_{nr}| v_{nr} + C_m \rho A_e \ddot{r}_n \tag{2}$$

여기서, C_I , C_D , and C_m =관성, 항력, 부가질량 계수 (inertia, drag, and added mass coefficient)

\dot{v}_n , v_{nr} , and \ddot{r}_n =법선 방향 유체 가속도, 수직 상대 속도, 수직 구조물 가속도 (normal fluid acceleration, normal relative velocity, and normal structural acceleration)

ρ , D , A_e =유체 밀도, 외경, 단면적 (fluid density, outer diameter, and outer cross sectional area)

2.2 파랑 정의 - 규칙파 (regular waves)

실린더 형 폰톤에 작용하는 규칙파는 포텐셜 이론 (wave potential theory)에 의해 진행 파 (Propagating wave)로써 정의할 수 있다. 이 이론을 통하여 특정 주기 및 진폭을 갖는 규칙 파랑 작용 시 자유수면 이하 임의위치에서의 물 입자의 운동을 정의할 수 있고, 이를 식 (2)에 적용하면 시간에 따른 특정 위치의 실린더 형 구조물에 작용하는 유체력을 계산할 수 있다.

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \tag{3}$$

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

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

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

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

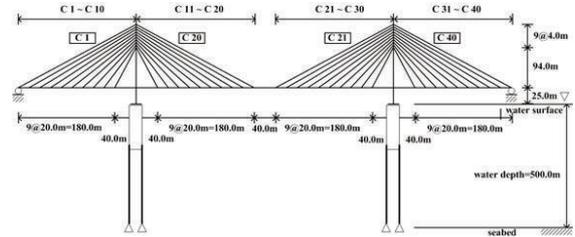
여기서, $\eta(x, t)$ =시간 t , 수평좌표 x 지점에서의 자유수면의 높이 (surface elevation), k =파수 (wave number), ω =파의 각주파수 (angular wave frequency), g =중력가속도 (gravity acceleration), Φ =Airy 파의 속도 포텐셜 (wave velocity potential), u_x, u_z = x, z 방향에 대한 물 입자의 속도

이처럼 특정 주기 및 파고를 갖는 파랑이 작용할 때 수중 구조 부재에 작용하는 유체력을 시간영역에 대해 직접적으로 고려가 가능하다. 즉, 구조물의 자중과 차랑하중, 부력 등은 정적 하중으로 재하하고, 파랑에 의한 유체력은 시간에 따라 변화하는 동적 하중으로 재하하고 직접적분법에 의한 시간영역동적해석을 수행하면 파랑 중 구조물의 동적 반응을 직접적으로 해석할 수 있다. Garrett의 Slender rod 이론과 Morison 식 그리고 Wave potential 이론에 입각한 수중 구조물의 시간영역 유체동역학해석기법에 대한 검증은 선행연구들에서 충분히 수행된 바 본 논문에서는 이에 대한 상세한 언급을 생략한다. [8],[9],[11],[12]

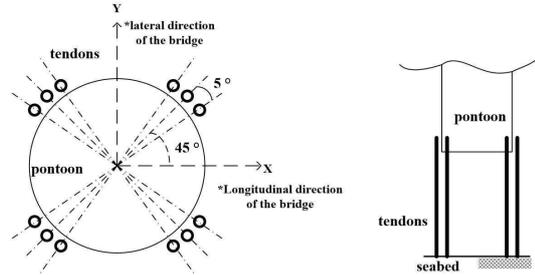
3. 부유식 주탑을 갖는 케이블지지교량의 파랑 중 동적 거동 특성

본 연구에서는 Fig. 2.와 같이 전체 길이 920.0 m (중앙경간장 480.0m)의 부유식 주탑을 갖는 사장교모델을 해석하였다. 본 기본 해석 모델은 Kim et al. 의 사장교의 비선형거동연구에서 활용된 사장교모델을 응용^{[13],[14]}하여 설계한 모델로서, 거더는 2면의 팬 형 배치형식을 갖는 총 80개의 케이블로 지지되고 이 케이블은 두 개의 부유식 주탑에 고정되어 있다. 부유식 주탑의 하부에는 직경 40.0m, 길이 18.8m, 두께 0.04m의 실린더형 폰툰(cylindrical pontoon)를 설계하여 주탑 자체의 자중 및 케이블로 전달되는 상부구조물 자중에 의한 수직력에 대해 저항하도록 하였다. 설계된 폰툰 한 기에 의한 부력은 237,553 kN으로 이는 고려된 구조물의 자중에 의해 주탑 한 기에 부가되는 전체 수직력의 2.0 배에 해당하는 값인데, 이 수직력과 부력 간의 차이가 긴장재의 초기 장력을 결정한다. 본 해석에서는 부유식 주탑과 거더, 폰툰, 긴장재, 케이블 등 주요 구조부재의 고정하중

과 함께 콘크리트 바닥판 (차도 폭 3.5m의 왕복 6차선 고려)의 무게를 함께 고려하였다.



(a) front view



(b) tendon arrangement



(c) FE model

Fig. 2. General configuration of the examined cable-stayed bridge with floating towers

Table 2. Main particular of the considered floating bridge models

	Girder	Tower	Floater	Stay cables	Tendons
EA (kN)	1.58E5	1.57E8	1.05E6	2.10E3	7.65E3
EI, in-plane (kN·m ²)	3.04E5	1.32E6	2.10E8	-	-
EI, out-of-plane (kN·m ²)	5.76E6	6.91E7	2.10E8	-	-
Unit weight (kN/m ³)	77.01	77.01	77.01	77.01	77.01
Drag coefficient	-	-	1.2	-	1.2
Added mass coefficient	-	-	1.0	-	1.0

Table 3. Considered environmental condition

	Water depth(m)	Seabed elevation	Wave type	Wave period (sec)	Wave height (m)
Particulars	500.0	Flat	Regular (Airy)	1.0~40.0	1.0

부유식 주탑의 계류형식으로 본 연구에서는 직경 0.6m, 두께 0.02m (단면적 $A_t=0.0364m^2$)의 원형강관 형식의 API X65 grade 긴장재 (tendon)를 활용하였다. 개별 부유식 주탑은 총 12기의 긴장재로 계류되는데, Fig. 2.(b)와 같이 총 4개의 긴장재 클러스터가 90°의 간격으로 배치되어 있고, 개별 클러스터에는 3개의 긴장재가 5° 간격으로 배치되어 있다. 폰툰에 의해 도입되는 부력을 주탑에 가해지는 수직력보다 크게 하고 두 힘 간의 차이를 긴장재가 저항하도록 하여 일정 수준 이상의 긴장상태에 놓이는 계류선의 강성에 의해 부유식 주탑의 위치가 제어되도록 하였다. 이러한 개념은 해양플랜트 중 TLP (Tension Leg Platform)의 계류방식으로부터 응용되었다. Fig. 2.(c)와 같이 유체동역학해석을 위한 해석모델은 부유식 주탑, 폰툰, 거더, 케이블, 긴장재로 구성되어 모델링되었다.

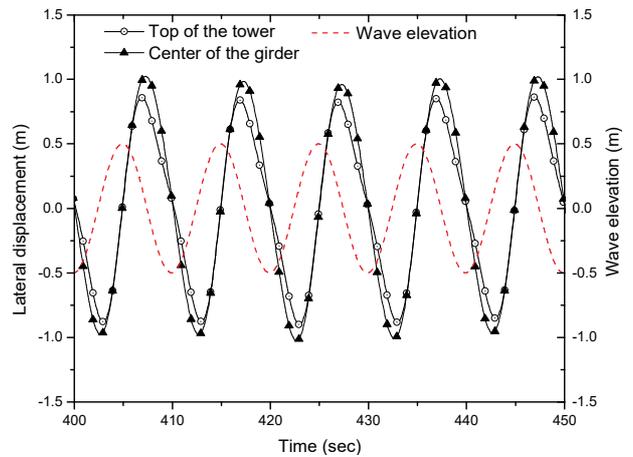
주탑과 거더, 실린더 형 폰툰은 보요소로 모사하고 긴장재와 케이블은 트러스요소를 사용하여 모사하였으며 압축력에 저항하지 못하는 케이블 및 긴장재의 거동특성을 고려하기 위해 압축력에 대한 강성을 무시하였다. 해석은 ABAQUS V2017^[15]을 통해 수행되었는데, 본 부유식 구조물에 작용하는 파랑을 모사하기 위해 ABAQUS AQUA를 이용하여 Fig. 2.(a)의 수심 500.0m의 유체장을 정의하고 특정 주기 및 파고를 갖는 규칙파랑 작용 시 수면 이하의 물 입자의 운동을 계산하게 하였다. 이에 따라 물 입자 운동에 따른 수중 선요소에 작용하는 유체력을 외력으로 반영하기 위해 긴장재와 실린더형 폰툰에 Morison 식 적용에 필요한 상수인 항력계수 (drag coefficient)와 부가질량계수 (added mass coefficient)를 정의하여 시간영역 동적해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려한 기본 해석 모델의 재료 및 기하학적 변수와 환경 조건은 Table 2 및 Table 3과 같고, 4장에서의 매개변수해석을 위해 긴장재의 단면적은 $1.0A_t \sim 2.5A_t$ (직경은 일정), 초기 기울임각은 $0^\circ \sim 25^\circ$ 의 범위에 대해 해석모델을 변경하였다.

특정 파랑에 대한 부유식 구조물의 동적 거동을 해석하기 위하여 시간영역 유체동역학해석을 수행하였다. 본 해석기법은 두 단계 해석 (2-step analysis)을 통해 수행되는데, 첫 번째 해석단계에서는 전체 구조물의 자중과 부유식 주탑 하단의 실린더형 폰툰이 받는 부력을 정적 하중으로 재하한 정적 해석을 수행하고, 두 번째 해석 단계에서는 파랑에 대한 동적 해석 (implicit dynamic analysis in time domain)이 수행되었다. 규칙 파랑에 대한 시간영역해석은 동적 하중의 점진적 증가구간으로 활용되는 ramp-up 구간 200.0초를 포함하여 총 600.0초 구간에 대해 0.01초의 시간간격으로 수행되었고, 본 해석을 통해 특정

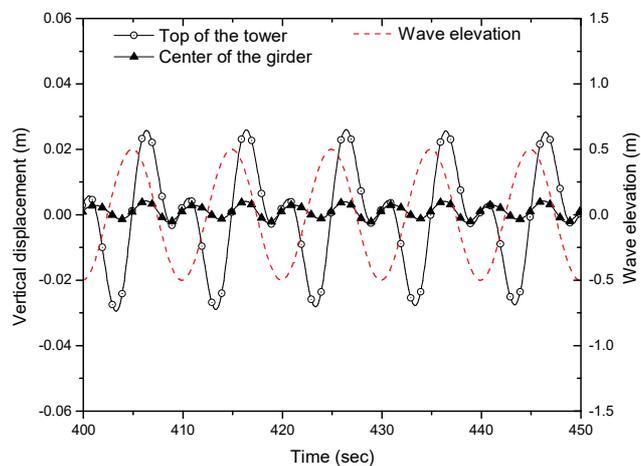
파랑에 대한 부유식 주탑 및 거더 주요 위치에서의 동적 변위와 긴장재 및 케이블의 장력을 얻은 후 이를 분석하여 부유식 교량의 동적 거동 특성을 해석적으로 분석하였다.

3.1 규칙 파랑과 부유식 교량의 동적 응답 간의 상관관계 분석

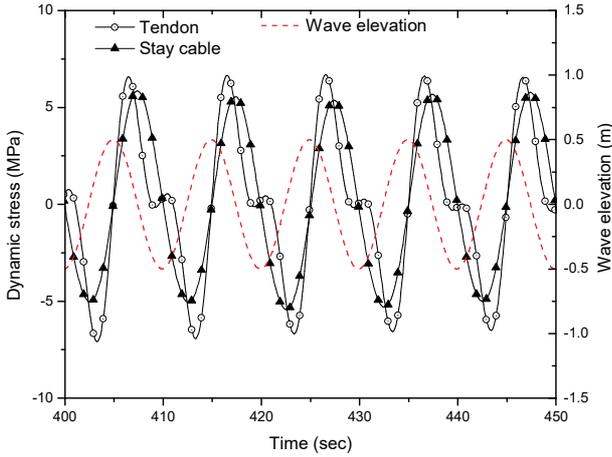
본 절에서는 유체동역학해석을 통해 도출된 규칙 파랑에 의한 부유식 교량의 동적 응답 특성을 검토한다. Fig. 3.은 작용하는 규칙 파랑에 의한 파고 변화와 부유식 교량 주요 위치에서의 변위와 긴장재, 케이블의 동적 응력의 변화를 시계열로 표현한다.



(a) lateral displacement of the tower and girder



(b) vertical displacement of the tower and girder



(c) dynamic stress of the tendon and stay cable

Fig. 3. Relation between wave height and dynamic response of the structure (wave period=10.0sec)

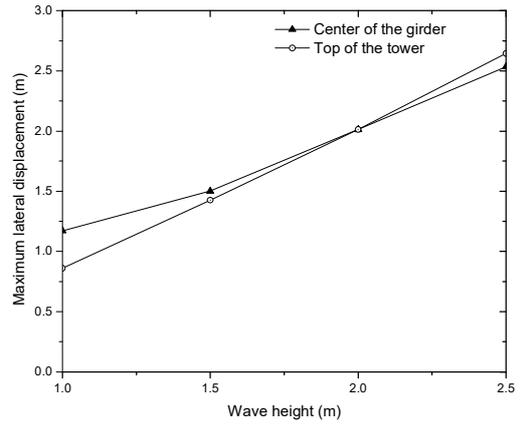
본 검토모델에 고려된 파랑의 파고는 1.0m이고, 구조물의 교축직각방향으로 진행되는 규칙 파랑에 대하여 주탑 및 거더의 수평방향 최대 동적 변위는 각각 0.899 m, 1.009m, 수직방향의 최대 동적 변위는 0.028m, 0.004m로 나타났다.

Fig. 3.과 같이 부유식 주탑과 거더는 작용하는 파랑의 파고변화에 대해 90° 위상차를 보이며 파랑과 동일한 10.0초 주기로 수평운동을 하는 것으로 나타나는 반면, 부유식 주탑의 수직운동은 파랑의 주기 10.0초 및 5.0초 주기의 운동이 중첩되어 나타나는 것으로 나타난다. 이것은 특히 부유식 주탑의 수직방향 운동에 직접적인 영향을 미치는 긴장재의 강성특성에 따른 것으로, 긴장재에 의한 부유식 구조물의 고유주기의 반응과 작용하는 파랑에 의한 반응이 혼재되어 나타난 데서 그 원인을 찾을 수 있다.

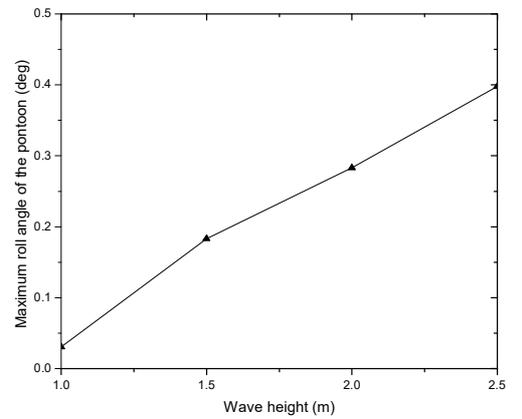
부유식 주탑을 지지하는 긴장재와 거더를 지지하는 케이블의 동적 응력 역시 기본적으로는 주탑 및 거더의 수평운동과 함께 나타남을 알 수 있는데, 긴장재의 경우 주탑의 수직 운동과 함께 수직응력이 변화하고, 상부케이블의 경우 주탑 및 거더의 수평 운동에 따라 변화하는 특성이 명확하게 나타난다.

3.2 규칙 파랑에 대한 구조물 주요 응답 특성 - A. 파랑의 파고에 따른 응답 특성

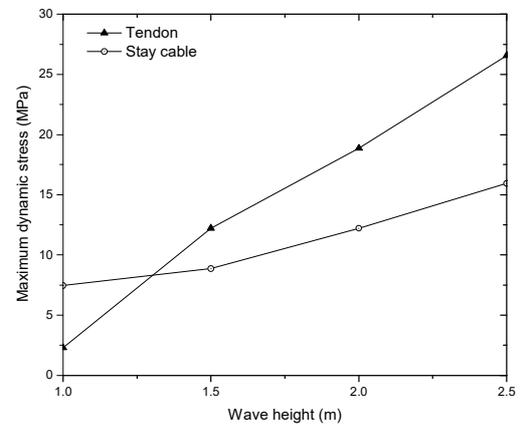
Fig. 4.는 10.0초 주기를 갖는 규칙파랑 작용 시 부유식 케이블지교량 주요 위치에서의 최대동적응답의 변화를 도시한다.



(a) lateral displacement of the girder and tower



(b) roll angle of the pontoon

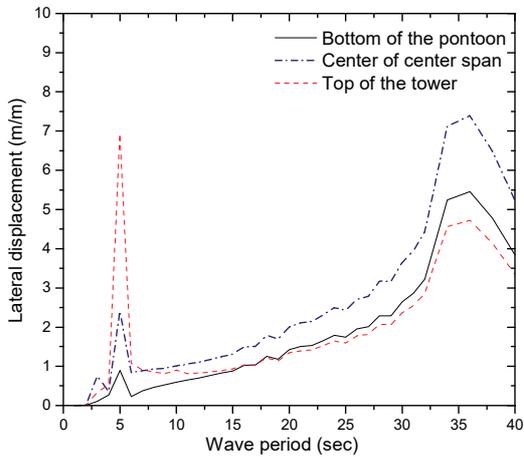


(c) dynamic stress of the tendon and stay cable

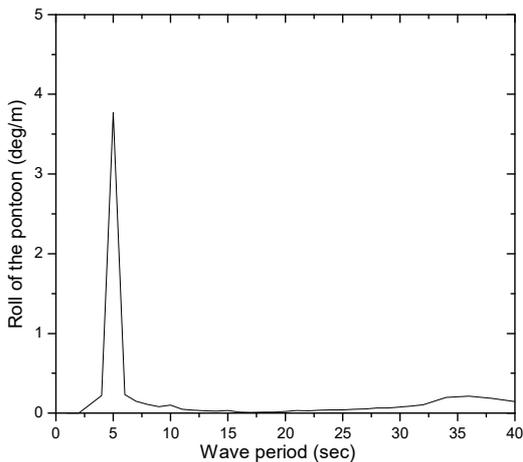
Fig. 4. Dynamic response of the structure under the regular wave with various wave heights

Fig. 4.와 같이 작용하는 파랑의 파고 증가 시 구조물의 주요 응답 역시 증가하는 것을 본 해석결과를 통해 명확히 알 수 있다. 이는 앞선 수식 (3)~(7)에 잘 나타난 대로 수중구조부재가 받는 유체력은 파랑에 의한 물입자의 운동에 비례하고 물입자의 운동은 작용하는 파랑의 파고에 비례하기 때문에 이러한 거동 특성이 나타난다. 다만 본 구조물은 다양한 구조부재가 결합되어 기하학적 비선형성이 명확하게 나타나기 때문에 파고에 따라 선형적인 비례특성은 보이지 않음을 본 해석 결과 잘 나타난다. 구조물의 변위응답이 파고가 커질수록 더 크게 나타남에 따라 구조물을 지지하는 긴장재와 케이블의 동적 응력 역시 증가하는 경향을 보였다.

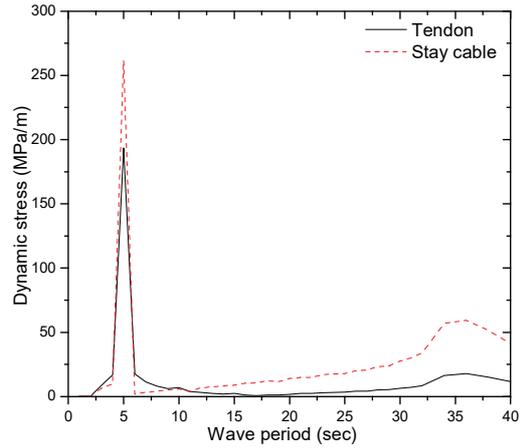
3.3 규칙 파랑에 대한 구조물 주요 응답 특성 - B. 파랑의 주기에 따른 응답 특성



(a) lateral displacement of the members



(b) roll angle of the pontoon



(c) dynamic stress of the tendon and stay cable

Fig. 5. Dynamic response of the structure under the regular wave with various wave period

작용하는 규칙파랑의 고유주기와 본 구조물 간의 상관관계를 규명하기 위해 단위 파고 (1.0m wave height)를 갖는 단일한 규칙파랑 작용 시 본 부유식 구조물의 주요 동적 응답특성을 해석적으로 분석하였다. 일반적인 부유식 구조물의 규칙파랑에 대한 Motion RAO (Response Amplitude Operator)는 대상 구조물의 각 운동방향에 대한 동적 응답특성을 직접적으로 대변하는 물리적 지표로서, 설계자는 이를 통해 파랑에 대한 본 구조물의 공진주파수 대역을 분석할 수 있다. 명확한 기하학적 비선형성을 보이는 부유식 케이블지지교량의 파랑에 대한 Motion RAO 및 긴장재/케이블의 Tension RAO를 얻기 위해 1.0 sec ~ 40.0 sec 의 범위를 갖는 단일 규칙파랑을 각각 재하하여 얻은 최대 응답치를 정리하여 Fig. 5.와 같은 RAO를 얻었다.

먼저, 본 구조물의 수평방향 운동은 5.0초에서 명확한 공진주기를 보인다. 이 주기에 대한 수평방향 동적 응답의 크기에 대해 파랑이 직접 작용하는 폰톤과 주탑 최상단 그리고 중앙경간 중앙부에서 직접 비교하면 폰톤에서 가장 작고 주탑 최상단에서 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 본 구조물의 구조특성과 함께 분석되어야 한다. Fig. 5.(b)와 같이 폰톤은 수평방향 운동 뿐만 아니라 횡동요 (roll)의 회전운동도 나타난다. 본 주탑의 높이는 폰톤최상단으로부터 155.0m이므로 폰톤의 회전운동은 상당한 수준의 주탑 수평운동으로 치환된다. 본 해석 결과 동일 주기에서 폰톤의 회전운동이 강하게 나타나는 것을 감안하면 주탑 최상단의 수평 변위는 작용하는 파랑에 의한 구조물의 전체적 수평방향 운동과 함께 회전운동에 의한 추가적인 수평방향운동성분

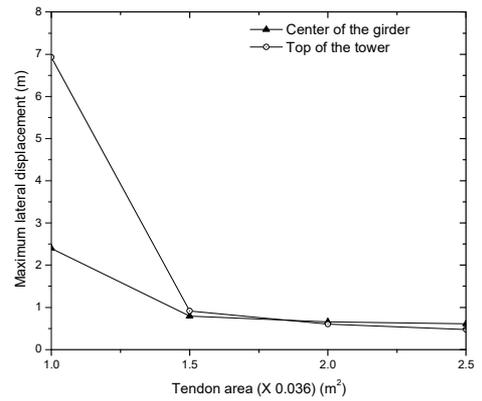
이 크게 기여됨에 따라 나타난 현상으로 풀이된다. 주탑의 수평 운동은 케이블로 지지된 거더의 운동을 유발한다. 이에 따라 거더 역시 명확한 수평운동이 발생하게 된다. 수평운동은 장주기 파랑에 대해서도 명확히 나타나는데, 이것은 직립의 긴장재로 계류된 일반적인 부유식 구조물이 갖는 수평 운동에 대한 장주기 특성이 반영되어 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 정리하면, 단주기 (5.0초 영역)에서는 폰톤의 회전운동이 주탑의 수평 운동에 주로 기여하고, 장주기 영역에서는 폰톤의 수평 운동이 주탑 및 거더의 수평 운동을 유발하는 것으로 해석된다.

이러한 거동특성에 있어서 긴장재 및 케이블의 수직응력도 민감하게 변화하였는데, 폰톤의 회전운동이 강하게 나타나는 5.0초 구간에서 동적 응력이 강하게 나타나는 것으로 나타났다. 일반적인 TLP의 긴장재 장력변화 특성과 유사하게, 본 구조물의 형태적 특성에 따라 긴장재 장력변화는 결과적으로 폰톤의 운동, 특히 긴장재의 길이변화를 즉각적으로 유발하는 폰톤의 수직운동 및 회전운동에 직접적인 영향을 받는데, Fig. 5.(c)와 같이 상대적으로 매우 강한 동적 응력은 폰톤의 회전운동에 대한 고유주기인 5.0초에서 명확하게 나타남을 알 수 있다. 이와 유사하게 거더를 지지하는 케이블의 장력 역시 5.0초에서 명확한 증폭특성을 보였고, 이에 더하여 장주기 영역에서도 상당한 수준으로 나타나는데, 이는 Fig. 5.(a)와 (b)와 같이 장주기 영역에서 주탑과 거더 간 수평 운동의 차이가 증가함에 따라 거더와 주탑을 연결하는 케이블의 장력의 변동이 강하게 나타나는 데서 기인한 것으로 분석된다.

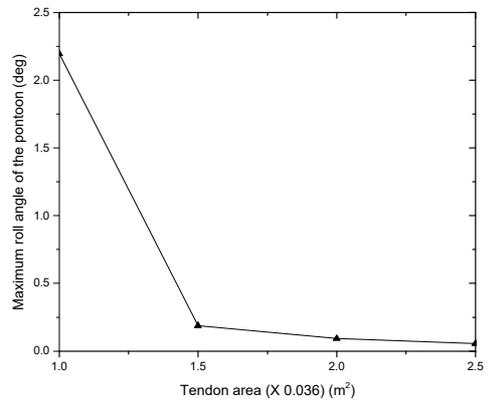
4. 긴장재 강성 및 배치특성에 따른 구조물의 동적응답 특성

4.1 긴장재 강성에 따른 동적응답특성

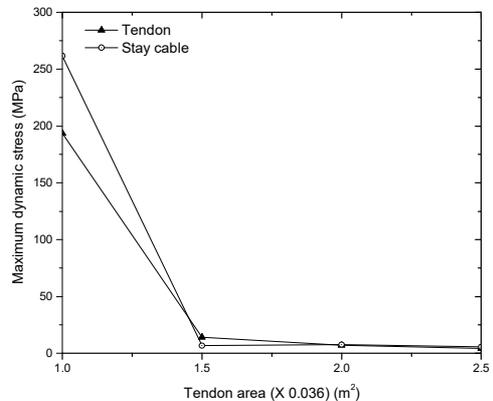
Fig. 5.와 같이 본 기본 해석 모델은 5.0초 영역에서 고유주기를 갖는 것으로 분석된다. 큰 축방향 강성을 갖는 부재로 위치가 제어되는 TLP 구조물의 고유주기는 긴장재 강성에 의해 결정되는 것이 일반적이고, 본 구조물 역시 이러한 거동특성이 나타나는 것으로 분석된다. 본 절에서는 긴장재 단면적 변화에 따른 동적응답변화를 해석적으로 분석하였다. 이를 위해 기본 해석 모델의 고유주기영역에 해당하는 5초 주기의 규칙 파랑과 8초 주기의 규칙 파랑 (파고=1.0m)에 대하여 1.0A_t~2.5A_t 범위의 긴장재 단면적을 갖는 부유식 케이블지교량의 동적응답특성을 분석하였다.



(a) lateral displacement of the girder and tower

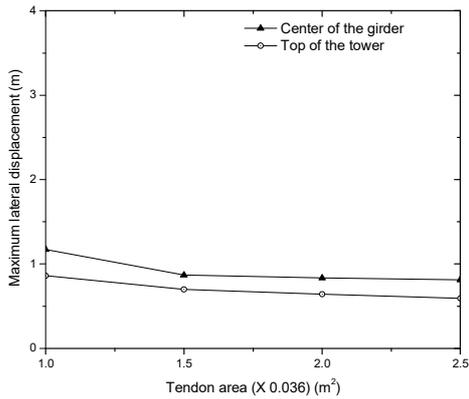


(b) roll angle of the pontoon

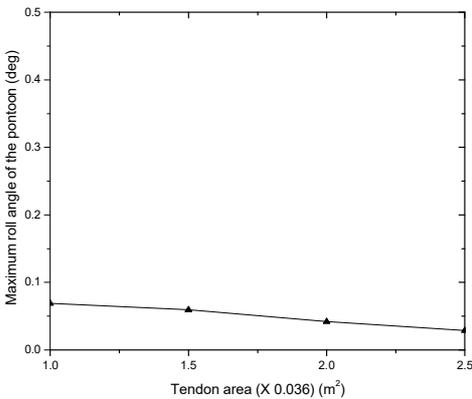


(c) dynamic stress of the tendon and stay cable

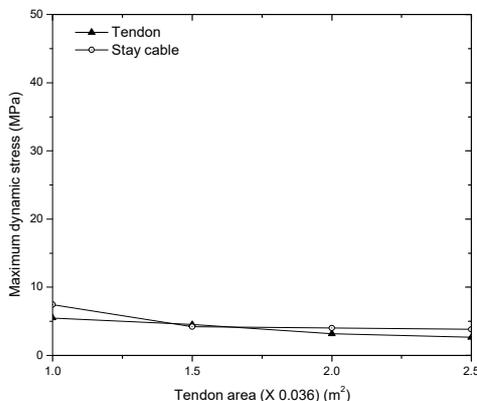
Fig. 6. Effect of the tendon area on the dynamic response of the structure under the 5.0sec period wave



(a) lateral displacement of the girder and tower



(b) roll angle of the pontoon



(c) dynamic stress of the tendon and stay cable

Fig. 7. Effect of the tendon area on the dynamic response of the structure under the 8.0sec period wave

Fig. 6. 및 7.과 같이 긴장재 단면적 증가에 따른 강성증가는 부유식 케이블지지교량의 동적응답을 감소시키는 것이 수치적으로 검증되었는데, 특히 Fig. 6.과 같이 기본 해석 모델의 고유주기에 해당하는 5.0초 주기 규칙파랑에 대한 반응에 있어서 긴장재 단면적이 0.5배 증가된 모델에서 극단적인 동적반응감소를

보였다. 이는 긴장재 강성증대에 의해 구조물의 고유주기가 변화하고 이에 따라 작용하는 파랑에 대한 공진현상이 회피됨에 따라 나타난 효과로 분석된다. 이것은 Fig. 8.에 더욱 명확히 나타나는데, 긴장재 단면적이 증대된 모든 모델에서 공진을 회피함에 따라 균일한 동적변위가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 부유식 구조물의 고유주기는 결과적으로 긴장재의 강성이 지배하는 것이 본 해석연구에서 증명되었다.

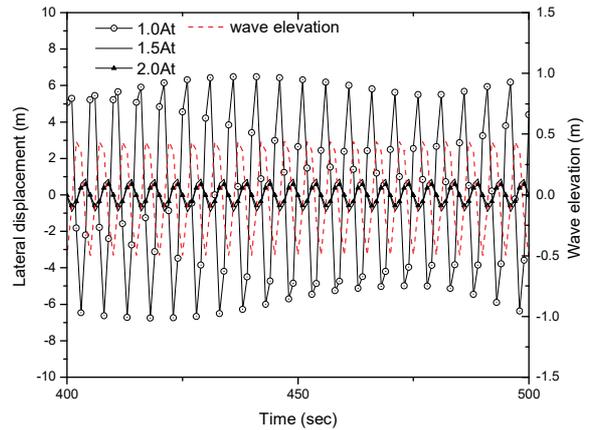


Fig. 8. Time-series lateral displacement of the tower under the 5.0sec period wave

4.2 긴장재 기울임에 따른 동적응답특성

본 구조물은 파랑에 의해 유발된 부유식 주탑의 운동이 거더의 운동을 야기하는 부유식 주탑-케이블-거더 간 상호작용이 지배적으로 나타난다. 이에 따라 본 구조물의 교축 직각방향으로 진행하는 파랑에 의한 부유식 주탑의 운동 제어가 본 구조물의 구조 안전성 및 사용성에 있어서 매우 중요하게 인식된다. 작용하는 파랑에 대한 부유식 구조물의 동적 응답을 제어하려면 먼저 본 부유식 구조체의 자유도에 대한 강성을 증대시키거나 작용하는 파랑의 고유주기영역과 겹치지 않는 고유주기를 갖도록 설계해야 한다. 그러나 작용하는 파랑의 유의파고 (significant wave height)가 나타나는 첨두주기 (peak period) 영역을 회피하는 것은 가능하나 모든 유효한 파랑의 주기영역을 완벽히 회피하는 것은 불가능하기 때문에, 첫 번째로는 첨두주기 영역을 회피하고, 두 번째로는 구조물의 각 운동방향에 대한 강성을 증대시키는 순으로 설계를 해야 한다. TLP는 기본적으로 강한 강성을 갖는 긴장재로 하여금 부유식 구조물의 고유 주기를 첨두 주기보다 짧게 유도하여 공진을 회피하는 특성을 갖고, 반대로 반잠수식 플랫폼 (Semi-Submersible Platform)은 첨두 주기보다 더 긴 고유주기를 갖도록 설계된다. 본 연구에서 다루는 부유식 주탑은

긴장재를 통해 고유 주기를 파랑의 침두 주기보다 짧게 하고 수직 방향 동적 응답을 최소화 하는 방법론을 통해 기본 해석 모델이 도출되었다. 이에 따라 본 절에서는 배치된 긴장재의 기울임이 동일 파랑에 대한 구조물의 수평운동에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. Fig. 9.는 긴장재 초기 기울임 각도변화에 따른 동적응답변화 특성을 나타낸다.

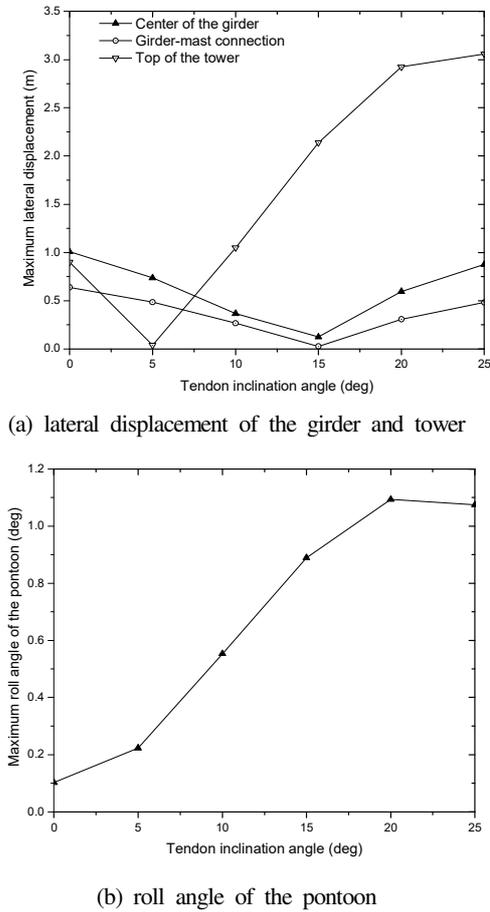


Fig. 9. Effect of the tendon inclination on the motion of the structure under the regular waves (wave period=10.0sec)

경사진 긴장재의 배치는 폰톤 등 부유체의 수평방향 강성의 증대를 예상할 수 있고, 이에 따라 동일 파랑의 교축직각방향으로의 작용 시 발생하는 구조적 응답 역시 감소할 것이라 예상할 수 있다. 이러한 거동 특성은 긴장재의 기울임 각도가 15°가 될 때까지 거더의 파랑 작용방향으로의 동적 변위가 감소하고 주탑의 수평변위는 5°가 될 때까지 감소하는 것이 해석적으로 나타났다. 그러나 본 그림에서 명확하게 나타나듯이 그 이상의 기울임 각도가 적용될 때 오히려 모든 변위가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9.(b)의 폰톤의 횡동요각의 변화와 함께 분석이 가능하다.

긴장재의 기울임각이 증가할수록 긴장재에 의해 도입되는 회전에 대한 강성은 지속적으로 감소하게 되고, 이러한 원리로 폰톤의 회전각은 긴장재 기울임각 증가와 함께 증가하는 특성을 보인다. 주탑의 수평 변위는 파랑에 의한 폰톤의 수평 운동 뿐 만 아니라 폰톤의 회전운동에 의해서도 나타난다. 즉, Fig. 9.와 같이 긴장재 기울임에 따른 회전강성의 저하, 이에 따른 회전운동의 증가에 의해 결과적으로 특정 각도 이상의 긴장재 기울임 적용 시 오히려 수평운동이 증가하는 것으로 분석된다.

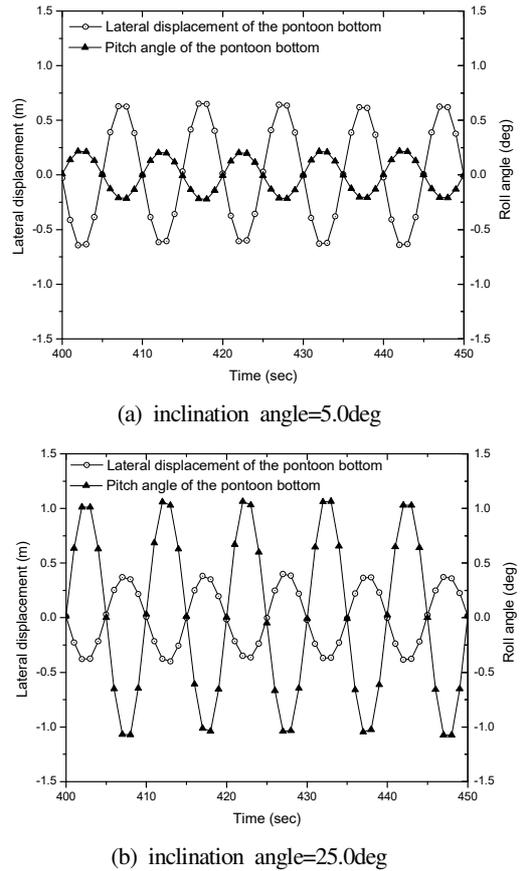


Fig. 10. Time-series lateral displacement and roll of the pontoon

Fig. 10.과 같이 작용하는 규칙파랑에 대하여 폰톤의 수평 및 횡동요는 180°의 위상차를 보인다. 다시 말해 폰톤의 수평운동과 회전운동에 의한 주탑의 수평운동성분 역시 180°의 위상차를 보이며 나타나는데 긴장재 기울임이 증가하면서 폰톤의 수평운동성분은 감소하나 회전운동이 오히려 증가하여 이 두 효과가 중첩되어 결과적으로 특정 각도 이상의 기울임이 적용될 때 주탑 및 거더의 수평방향 동적반응은 오히려 증가하는 것으로 분석되었다. 이에 반해 거더는 긴장재의 기울임이 15° 이상일 때 수평 변위응답이 다시 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 본 해석모델조

건에 따라 거더의 변위는 거더와 주탑의 연결부의 수평운동에 대한 영향을 많이 받는데, 폰톤의 회전변위에 의한 수평운동성분이 주탑의 최상단에 비해 크지 않기 때문에 일정 크기 이상의 기울임 조건까지는 긴장재의 기울임각의 증가에 따라 수평 변위 응답이 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 부유식 주탑을 갖는 케이블 지지교량의 파랑에 대한 동적 응답 특성을 해석적으로 분석하였다. 본 해석 연구 결과, 일반적인 케이블지지교량에서 나타나는 주탑-케이블-거더 간 상호작용 뿐 만 아니라, 긴장재로 계류된 부유식 초대형 구조물의 유체동역학적 거동 특성이 본 구조물에도 유사하게 나타나는 것으로 분석되었다. 구조물의 동적 거동 특성에 있어서 긴장재의 강성에 의해 구조물의 고유주기가 결정되는 것이 본 해석 연구 결과 확인되었다. 본 구조물의 기본 설계 시, 일반적인 파랑의 침투 주기를 포함한 주기대역을 고려한 파랑과의 공진회피 설계 방안이 필요한데, 이와 같은 부유식 교량의 고유주기는 긴장재의 강성에 지배적인 영향을 받는 것에 착안하여 긴장재의 필요 강성을 결정하는 데에 중요한 개념으로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

긴장재 강성(단면적) 및 초기 기울임이 파랑에 대한 동적 응답에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 먼저 긴장재의 강성증대는 구조물의 기본적인 강성의 증대를 야기함으로써 그 자체만으로도 구조적 반응의 감소를 유도할 수 있는데, 이에 더하여 구조물의 고유주기를 지배적으로 변화시키는 것을 본 매개변수연구를 통해 증명하였다. 또한 긴장재 기울임에 따라 폰톤의 수평운동은 감소하나 동시에 회전운동은 증가하는데, 두 운동성분은 180° 위상차를 보이므로 결과적으로 특정 각도 이상의 기울임이 설계될 때 오히려 주탑 및 거더의 수평 운동은 증가하는 특성을 보였다. 즉, 구조적 안전성 및 사용성 측면에서 최적의 긴장재 기울임 각도가 존재함을 본 해석연구를 통해 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (과제번호 17CTAP-C133500-01) 에 의해 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, *Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.65, No.8, pp.84-87 (in Korean).
- [2] 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.
- [3] Eidem, M., Minoretti, 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.
- [4] 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*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.509-516.
- [5] Dørum, C., Sha, Y., and Storheim, M. (2017) Multi-Span Suspension Bridge on Floating Foundations – Behaviour Under Ship Impact, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.1257-1263.
- [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*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 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*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.198-205.
- [8] 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.
- [9] Kim, S., and Won, D. (2017) Hydrodynamic Analysis of the Submerged Floating Tunnels Under Irregular Waves, *Proceedings of 39th IABSE Symposium*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Canada, pp.3025-3032.
- [10] 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.
- [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] 원덕희, 김승준(2017) 긴장재 느슨해짐에 따른 해중 터널의 동적 불안정 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제6호, pp.401-410.
- Won, D.H., and Kim, S. (2017) Dynamic Instability of Submerged Floating Tunnels due to Tendon Slack, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 29, No.6, pp.401-410 (in Korean).
- [13] Kim, S., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2016) Ultimate Behavior of Steel Cable-Stayed Bridges: I. Rational Ultimate Analysis Method, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.601-624.
- [14] Kim, S., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2016) Ultimate Behavior of Steel Cable-Stayed Bridges: II. Parametric Study, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.625-636.
- [15] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2017) *Abaqus Analysis User's Manual*, Ver. 6.17, DSS, USA.

요 약 : 깊은 수심을 갖는 해역에 적용이 효과적인 부유식 교량은 구조적 특성에 따라 파도, 조류, 바람 등과 같은 환경적 하중에 지배적인 영향을 받는다. 특히 부유식 주탑을 갖는 케이블지교량은 작용하는 환경하중에 의해 유발되는 부유식 주탑의 동적 거동이 케이블과 거더를 가진시키는 등 부유식 구조물과 일반적인 케이블지교구조물의 거동이 복합적으로 나타난다. 본 연구에서는 유체동역학 해석기법을 통해 부유식 주탑을 갖는 케이블지교량의 동적 거동특성을 분석한다. 규칙파랑에 대한 본 구조형식이 나타내는 유체동역학적 거동 특성을 규명하고, 작용하는 파랑의 주기와 파고, 긴장재 강성 및 긴장재배치각도가 본 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다.

핵심용어 : 부유식 교량, 부유식 주탑, 계류선, 긴장재, 유체동역학해석
