

# 긴장재 느슨해짐에 따른 해중 터널의 동적 불안정 거동

원덕희<sup>1</sup> · 김승준<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>선임연구원, 한국해양과학기술원, 연안방재연구센터, <sup>2</sup>조교수, 대전대학교, 건설안전방재공학과

## Dynamic Instability of Submerged Floating Tunnels due to Tendon Slack

Won, Deok Hee<sup>1</sup>, Kim, Seungjun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Scientist Researcher, Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, 15627, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

**Abstract** - This study deals with dynamic instability of a tendon moored submerged floating tunnel (SFT) due to tendon slack. In general, environmental loadings such as wave and current govern SFT design. Especially, the wave force, whose amplitude and direction continuously change, directly induces the dynamic behavior of the SFT. The motion of the floating tube, induced by the wave force, leads dynamic response of the attached tendons and the dynamic change of internal forces of the tendons significantly affects to the fatigue design as well as the structural strength design. When the severe motion of the SFT occurs due to significant waves, tendons might lose their tension and slack so that the floating tube can be transiently instable. In this study, the characteristics of dynamic instability of the SFT due to tendon slack are investigated performing hydrodynamic analysis. In addition, the effects of draft, buoyancy-weight ratio, and tendon inclination on tendon slack and dynamic instability behavior are analytically investigated.

**Keywords** - Submerged floating tunnel, Mooring, Tendon, Hydrodynamic analysis, Dynamic instability

### 1. 서론

넓은 폭원을 갖는 강이나 깊은 수심을 갖는 바다를 건너는 교통 시설물로 새롭게 제안된 해중 터널(Submerged Floating Tunnel, SFT)은 종래의 교통 시설물인 해상 교량 및 해저 터널과 같이 무수히 많은 해상 교각 건설 및 해저 굴착 공사가 불필요하고, 해중 터널을 이루는 주요 구조체인 부유식 터널(floating tunnel)과 계류 구조물 모두 육상에서 사전 제작이 가능하기 때문에 공사기간 및 공사비용의 혁신적인 절감을 기대할 수 있다<sup>[1],[2],[3]</sup>. 이에 따라 노르웨이와 같이 협만이 발달하거나 일본과 같이 큰 섬으로 구성된 국가들을 중

심으로 해중 터널 개념이 지속적으로 제안되어 왔고, 아직까지 실제 건설 사례는 전 세계적으로 없지만, 최근 노르웨이 교통국(Norwegian Public Roads Administration)에서 자국 신설 고속도로 노선에 해중 터널 실 투입 계획을 발표하는 등 해중 터널의 실제 건설 사례를 앞두고 있다.

앞서 언급한 대로 해중 터널은 크게 부유 터널과 위치 제어를 위한 계류 구조물로 구분 할 수 있는데, 해중 터널의 부력과 자중의 비율에 따라 계류 형식이 결정된다. 즉, 터널의 부력보다 자중이 크도록 설계할 경우 부력재(buoy)를 터널에 연결하고, 자중보다 부력이 크도록 설계할 경우 해저 지반에 고정된 계류선(Mooring) 또는 긴장재(Tendon)를 터널에 부착하여 터널의 부상(Rising)을 방지하는 방식을 통해 수면 이하 일정 깊이에 계류시킨다. 해중 터널은 일반 육상 구조물과 달리 지속적으로 변동하는 환경 하중을 받는데, 이 중 구조물의 동적 거동을 직접적으로 유발하는 파랑(waves)은 설계를 지배하는 주요 하중으로 알려져 있다. 이에 따라 여러 연구자들에 의해 파랑에 의한 해중 터널의 동적 거동에 대한 해석 및 실험연구가 수행되어 왔다<sup>[1],[2],[4],[5],[6],[7],[8],[9]</sup>.

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 1, 2017; revised October 11, 2017; approved on October 11, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. skim@dju.kr

본 연구에서는 긴장재로 계류된 해중 터널의 동적 불안정 거동에 대해 다룬다. 자중보다 부력이 더 크도록 설계된 해중 터널에서 부력과 자중의 차이는 긴장재의 초기 장력(initial tension)을 결정하고, 이후 터널에 동적 하중이 작용하면 터널에 운동이 발생하여 긴장재 장력 변화가 야기된다. 이 때 구조물에 발생하는 동적 응답이 과하면 긴장재의 장력이 크게 증가하거나 크게 감소하여 긴장력을 모두 소실할 수 있다. 특히 긴장재의 긴장력이 모두 소실되거나 초기 장력을 초과하는 수준의 압축력이 작용할 경우 긴장재가 느슨해지거나 (slack) 순간적 압축력에 의한 동적 좌굴(dynamic buckling)이 발생하는 등 결과적으로 긴장재에 의한 터널의 강성이 일시적으로 사라지는 단선 상태가 되어 구조물에 불규칙적 거동이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 파랑 중 긴장재 장력 소실에 의한 해중 터널의 동적 불안정 거동에 대해 해석적으로 접근하였다. 시간이력 유체-구조동역학 해석을 통해 특정 파랑에 대한 동적 불안정 거동 시 터널의 운동 및 계류선 장력 변화 특성에 대해 면밀히 검토하였고, 해중 터널의 주요 기하학적 설계인자들이 동적 불안정 거동에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

## 2. 파랑 중 해중 터널의 유체-구조동역학 해석

### 2.1 수중 선요소의 지배미분 방정식 및 유체력

자중, 부력, 조류와 같은 정적 하중 및 파랑에 의한 동적 하중을 받는 해중 터널 합체 및 계류선의 지배미분방정식은 Garrett의 Slender rod 이론<sup>[10]</sup> 을 통해 구성 할 수 있다.

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

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),  $\lambda$ =라그랑지 곱수(Lagrange multiplier),  $E$ =탄성 계수(Young's modulus),  $A_t$ =유효 단면적(effective sectional area)

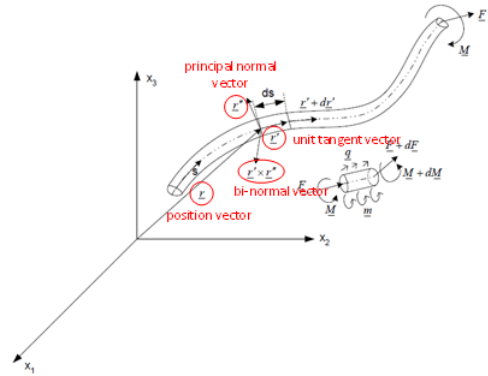


Fig. 1. General definition of submerged slender rods

Fig. 1 및 식 (1)에서 수중 선요소가 받는 하중은 단위 길이 당 분포하중벡터로 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.

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

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

### 2.2 파랑 정의 - 규칙파(regular waves)

해중 터널에 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 자유 수면 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.

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

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

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

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

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

여기서,  $\eta(x,t)$ =시간  $t$ , 수평좌표  $x$  지점에서의 자유수면의 높이(surface elevation),  $k$ =파 수(wave number),  $\omega$ =파의 각 주파수(angular wave frequency),  $g$ =중력가속도(gravity acceleration),  $\Phi$ =Airy 파의 속도 포텐셜(wave velocity potential),  $u_x, u_z$ = $x, z$  방향에 대한 물 입자의 속도

### 3. 해중 터널 주요 설계 인자에 따른 부유 튜브 운동 및 긴장재 장력 변동 특성

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 길이 300.0m, 직경 19.4m의 해중 터널 단위 모델(unit model)의 규칙 파랑에 대한 유체 동역학적 거동 특성을 해석적으로 분석하였다. 본 해석 연구에서는 구조물의 주요 기하학적 설계인자인 해중 터널의 흘수(draft), 부력-자중비(Buoyancy-Weight Ratio, BWR), 긴장재 기울임(tendon inclination)에 대한 매개변수연구를 통해 주요 기하학적 특성이 파랑 중 해중 터널의 동적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 고려한 해석 모델의 기하학적 변수의 범위와 환경 조건은 Table 1과 같다.

본 해석 연구는 ABAQUS V6.17을 통해 수행되었다. Fig. 2(b)와 같이 터널 및 긴장재는 3차원 보요소 및 트러스요소를 사용하여 모사하였고, 긴장재에는 “No compression” 옵션을 부여하여 압축력에 의한 긴장재 좌굴효과를 배제하였다. 터널과 긴장재는 Fig. 2(a)와 같이 긴장재 연결위치를 고려하여 MPC(Multi-Point Constraint) 옵션을 통해 연결 조건을 부여하였다. 모든 긴장재 최하단부는 해저터널에 고정되어 있다고 가정하여 힌지조건을 경계조건으로 부여하였다. 해중 터널이 받는 유체력은 ABAQUS-AQUA를 통해 정의하였다. ABAQUS-AQUA는 특정 수심을 갖는 유체장 및

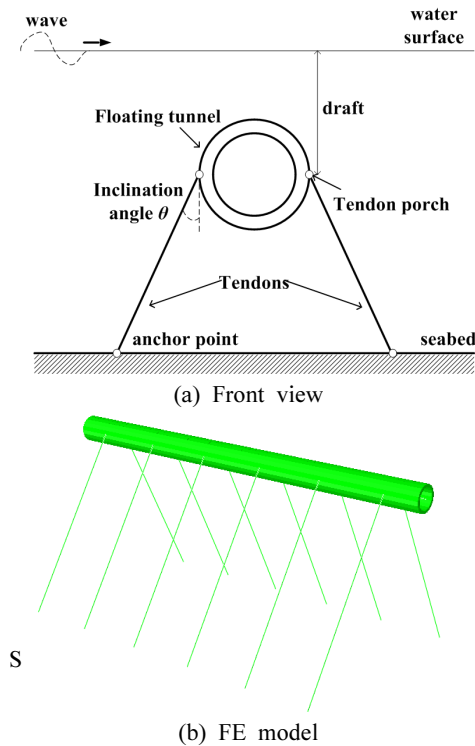


Fig. 2. General configuration of the SFT model

Table 1. Environmental conditions and main particular of the considered SFT models

Parameters	Values
<b>1. Environmental conditions</b>	
Water depth (h, m)	150.0
Wave period (T, sec)	10.0
Wave steepness	0.013, 0.027 0.040, 0.053
<b>2. For tunnel</b>	
Outer diameter (m)	19.4
Wall thickness (m)	2.0
Moment of inertia (m <sup>4</sup> )	2243.077
BWR	1.2~1.5
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0
Draft (m)	25.0, 50.0
<b>3. Hollow section tendon</b>	
Outer diameter/thickness (m)	0.533/0.04
Elastic modulus (GPa)	210.0
Minimum yield stress (MPa)	482.6 (API X70)
Minimum ultimate stress (MPa)	565.4 (API X70)
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0
Tendon inclination angle	0, 30°, 45°
Tether spacing	50.0m

파랑에 대해 파 포텐셜 이론에 입각하여 정의할 수 있는데, 이를 통해 Table 1에 제시된 특정 주기 및 최대파고를 갖는 Airy 규칙파랑에 대한 시간이력 유체-구조동역학 해석을 수행할 수 있다. 해석은 두 단계 해석(2-step analysis)으로 진행되는데, 구조물이 받는 정적 하중(구조물의 자중 및 부력)에 대한 해석(first step) 이후 파랑에 의한 동적 해석(second step, Implicit dynamic analysis)의 순으로 수행되었다. 1단계 해석 시 고려된 정적 하중에 의해 발생하는 긴장재의 초기 장력 검토 및 2단계 동적 해석 단계 시 장력의 평균 장력 검토를 통해 정적 하중 재하의 적합성을 검토하였다. 규칙파랑에 의한 시간이력해석은 총 600.0초(0~200.0초: ramp-up 구간)에 대해 수행되어 구조물의 동적 응답을 분석하였다.

### 3.1 파고의 영향

Fig. 3은 해중 터널에 작용하는 파고에 따른 터널의 운동 특성에 대해 수직방향 및 수평방향(파랑 진행방향)에 대한 동적 변위의 직접비교를 통해 나타낸다. 본 그림에 잘 나타난 대로 기본적으로 규칙파랑이 작용할 때 해중터널의 수직 및 수평방향 동적변위 역시 작용하는 규칙파랑과 동일한 주기를 갖고 규칙적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

본 그림에 잘 나타난 바와 같이, 파고는 대상 해역에 작용하는 진행파의 크기를 나타내는 척도가 된다. 식 (6), (7)과 같이 파랑에 의해 발생하는 자유수면 이하 물입자의 속도와 이를 미분하여 표현 가능한 가속도는 모두 파고에 비례한다. 즉, 자유수면 이하 물체에 작용하는 유체력은 결과적으로 파고의 크기에 비례하고, 이에 따라 터널의 수직 및 수평방향 운동은 Fig. 3과 4와 같이 파고의 직접적인 영향을 받게 된다.

터널의 운동은 긴장재 장력 변화를 직접적으로 유발하는 성분으로, 터널의 운동특성은 파고에 직접적인 영향을 받기 때문에 결과적으로 파고는 Fig. 4와 같이 긴장재 장력 변화 역시 유도하게 된다. 긴장재가 수직 배치된 경우 터널의 운동 성분 중 수직방향 운동이 긴장재 장력변화에 지배적인 영향을 미치는 반면, 긴장재에 초기 기울임이 있는 경우 터널의 수평방향 운동 역시 긴장재 장력변화에 영향을 미치는 것이 본 해석 결과에 잘 나타난다. 또한 Fig. 5와 같이 파고 변화는 터널의 운동 및 긴장재 장력의 평균(mean value)에는 큰 영향을 미치지 않고 동적 성분에 대해 지배적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

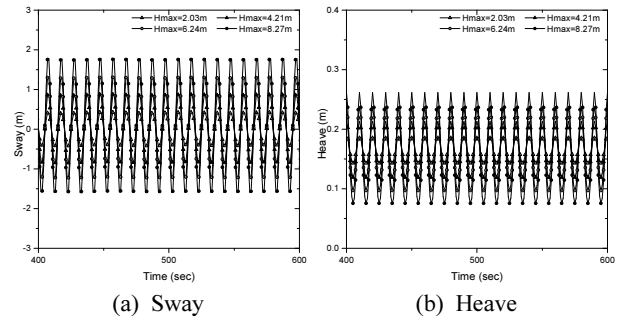


Fig. 3. Motion of the SFT moored by vertical tendons (BWR=1.3, draft=25.0m)

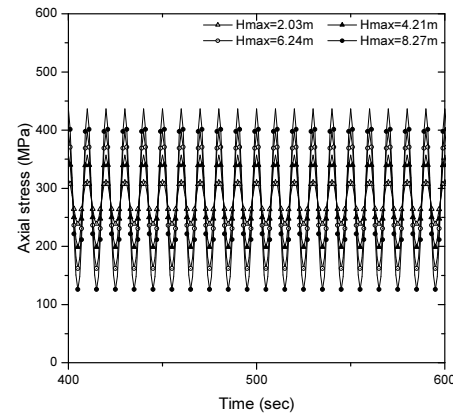


Fig. 4. Axial stress of the tendons of the SFT moored by vertical tendons (BWR=1.3, draft=25.0m)

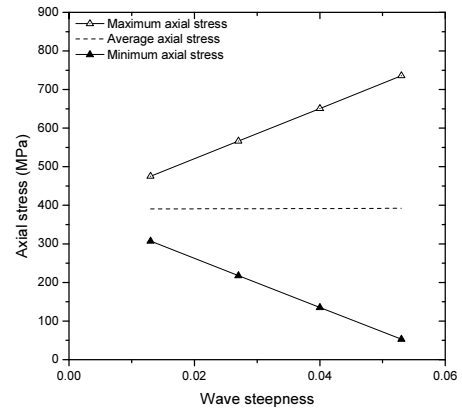
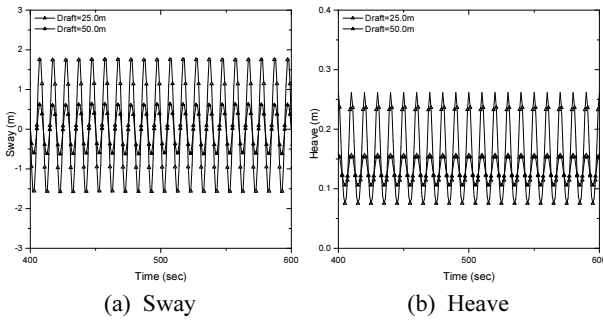


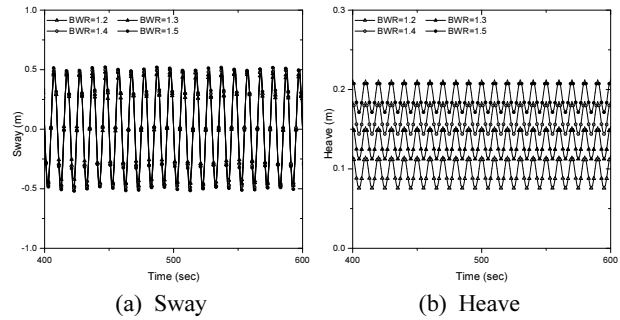
Fig. 5. Effect of the wave height on the tendon response (BWR=1.3, draft=25.0m)

### 3.2 흘수의 영향

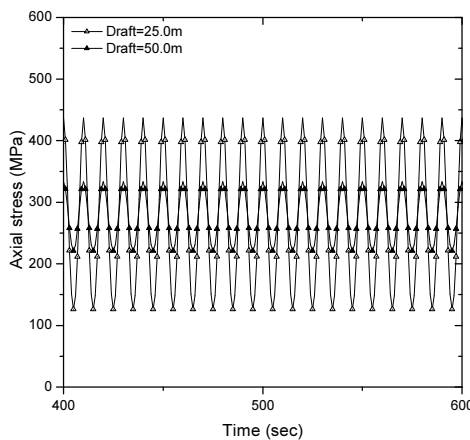
파랑에 의한 유체 입자는 궤도(orbital) 운동을 하는데, 자유수면으로부터 수직방향으로 먼 위치의 물 입자일수록 파랑에 의한 운동크기가 작아진다. 이는 자유수면으로부터 수직방향으로 먼 위치의 물체일수록 파랑에 의한 영향을 덜 받는



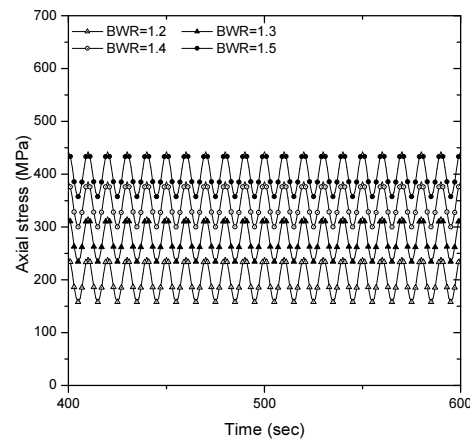
**Fig. 6.** Effect of the draft on the motion of the SFT under the regular wave (BWR=1.3, vertically moored SFT, Hmax=8.27m)



**Fig. 8.** Effect of BWR on the motion of the SFT under the regular wave (Draft=50.0m, vertically moored SFT, Hmax=8.27m)



**Fig. 7.** Effect of the draft on the tendon stress under the regular wave (BWR=1.3, vertically moored SFT, Hmax=8.27m)



**Fig. 9.** Effect of BWR on the tendon stress under the regular wave (Draft=50.0m, vertically moored SFT, Hmax=8.27m)

다는 것을 의미한다. 이러한 물리적 원리에 따라 Figs. 6, 7 과 같이 흘수가 클수록 파랑에 의한 터널의 운동 및 긴장재 장력변화가 뚜렷이 감소하는데, 특히 흘수는 터널 운동 및 긴장재 장력의 평균값에는 큰 영향을 미치지 않고 동적 응답에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 3.3 부력-자중 비율의 영향

본 연구에서는 동일직경을 갖는 터널을 다루므로 검토하는 모든 터널의 부력은 동일하다. 즉, BWR의 차이는 본 연구에서는 터널의 질량 및 긴장재의 초기 장력(initial tension)의 차이를 의미한다.

Figs. 8 및 9와 같이 BWR의 변화는 구조물의 정적 응답 및 동적 응답에 모두 영향을 미치나 본 연구범위에서는 주로 정적 응답에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 구조물 질량의 차이는 기본적으로 동적 거동이 발생할 때 구조물 가속도 방향의 반대방향으로 작용하는 관성력 차이를 의미하고 이에 따라

동일 외력 작용 시 질량의 차이는 구조물의 동적 응답에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 본 연구범위에서는 고려 질량감소(부력-자중비 증가)에 의한 터널 동적 변위 증가 보다는 질량증가에 의한 부력-자중 차이 증가에 따른 수직방향의 초기 변위증가 효과(정적반응)가 지배적으로 나타났다. 특히 BWR이 증가할수록 터널의 초기 상방향 수직력이 증가함에 따라 긴장재의 초기 장력이 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

### 3.4 긴장재 기울임의 영향

긴장재의 기울임에 따라 긴장재에 의한 수직 및 수평방향 강성이 변화한다. 일반적인 TLP 는 기울임이 없는 수직 긴장재를 적용하기 때문에 파랑 및 조류에 의한 플랫폼의 수평 방향 운동을 일정 수준 허용한다. 그러나 교통시스템으로서의 해중 터널은 수직 방향 뿐만 아니라 수평 방향 운동도 제어되어야 하고, 이에 따라 수평 방향에 대한 초기 강성 도입의 목적으로 긴장재의 기울임 도입이 필요하다.

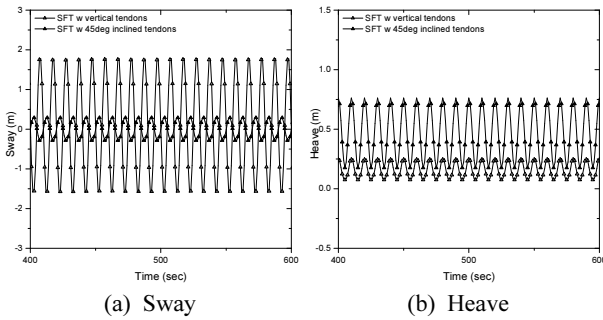


Fig. 10. Effect of tendon inclination on the motion of the SFT under the regular wave (Draft=25.0m, BWR=1.3, Hmax=8.27m)

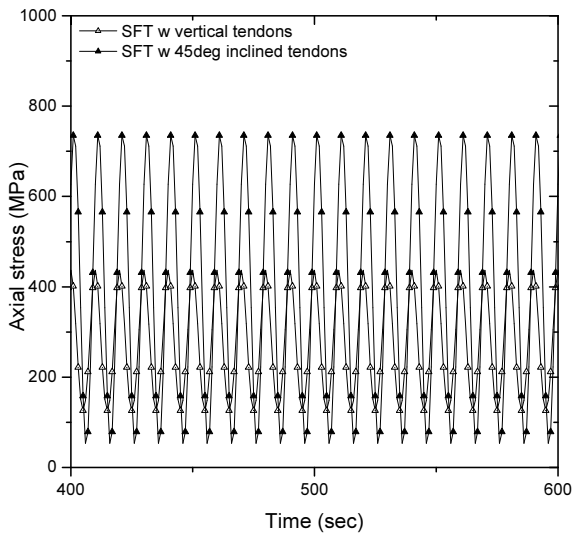


Fig. 11. Effect of tendon inclination on the tendon stress under the regular wave (Draft=25.0m, BWR=1.3, Hmax=8.27m)

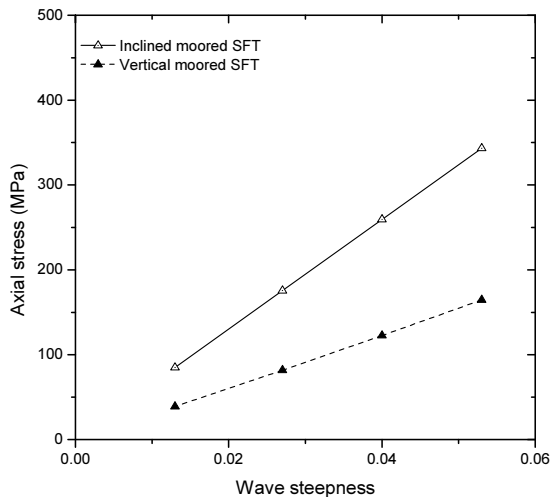


Fig. 12. Effect of the tendon inclination on the maximum stress of the tendons

Fig. 10과 같이 기울어진 긴장재의 도입 시 터널의 수평방향 운동이 억제되는 것을 알 수 있고, 이와 함께 수평 방향 운동은 오히려 증가하는 것을 알 수 있다 이는 긴장재 기울임에 따라 긴장재에 의한 터널의 초기 수평 방향 강성은 증가하나 수직 방향 강성은 오히려 감소하는 데서 비롯된다.

Figs. 11과 12는 긴장재의 기울임이 긴장재 장력변화에 미치는 영향을 나타내는데, 수평 방향 운동 제어효과가 증가하는 만큼 장력 변화 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 해중 터널 긴장재의 기울임 설계는 터널의 사용성과 함께 긴장재 장력검토에 의한 구조안전성평가를 함께 하여 최적의 긴장재 기울임 결정이 필요하다.

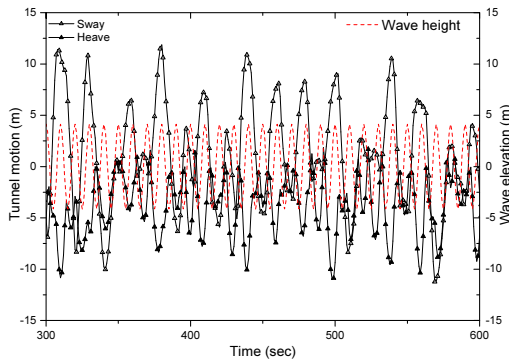
#### 4. 해석을 통한 긴장재 느슨해짐 및 해중 터널 동적 불안정거동 특성 분석

##### 4.1 긴장재 느슨해짐 발생 및 이에 따른 부유 튜브 동적 거동

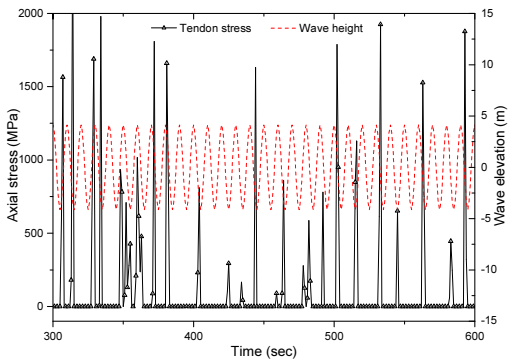
Fig. 13(a)는 파랑 중 해중 터널의 동적 불안정 거동 시 터널의 운동을 나타낸다. 안정상태에서 규칙파랑에 대해 일정 크기 및 주기의 응답을 보인 반면, 동적 불안정 거동 시 불규칙하고 극심한 응답이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 13(b)와 같이 터널의 동적 불안정 거동 구간에서 긴장재의 장력 변화 역시 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있고, 특히 장력의 크기가 극심하게 변동하는 것이 본 해석결과 드러났다. 터널의 운동 및 계류선 장력 변화를 시간영역에서 비교한 결과, 터널의 동적 불안정 거동은 긴장재의 장력이 모두 소실될 때 발생한다. 터널의 하방향 수직 운동에 의해 긴장재 장력이 순간적으로 0에 도달할 경우 터널 운동에 대한 강성이 일시적으로 모두 소실되어 터널에 급격한 하방향 변위가 발생한다. 이후 파랑에 의한 유체력 방향이 변화하고 터널의 부력과 자중의 차이에 의한 정적 하중에 의해 터널에는 상방향력이 다시 작용하여 긴장재는 다시 수직방향의 유효력이 작용하는데, 유효장력이 0인 상태에서 터널의 수직방향 운동에 의한 긴장력이 다시 도입될 때 나타나는 일시적인 (transient) 반응이 급격한 긴장력 증가를 야기한다. 이러한 거동이 규칙파랑이 작용할 때 반복적으로 나타나게 된다. 즉, 규칙파랑이 작용함에도 불구하고 규칙파랑에 의해 긴장재 장력 소실에 의한 느슨해짐이 발생할 경우, 본 해석연구에서 나타난 터널의 동적 불안정거동이 발생할 수 있고, 이는 터널의

운동 뿐 만 아니라 긴장재의 긴장력 변동은 매우 극심하고 불규칙적으로 나타나 터널의 사용성 문제 뿐 만 아니라 긴장재의 강도 및 피로설계에도 매우 큰 부담으로 작용하게 된다.

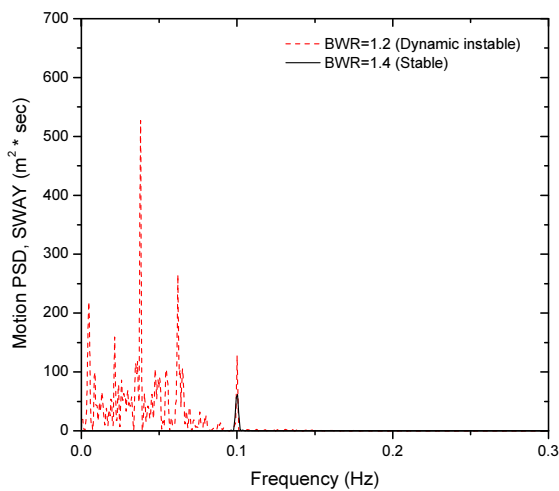


(a) Tunnel motion



(b) Axial stress of the tendon

**Fig. 13.** Structural response of the SFT in dynamic instability state (Draft=25.0m, BWR=1.2, Hmax=8.27m, Tendon inclination=30°)



**Fig. 14.** Comparison of the SFT motion in frequency domain (Draft=25.0m, BWR=1.2, Hmax=8.27m, Tendon inclination=30°)

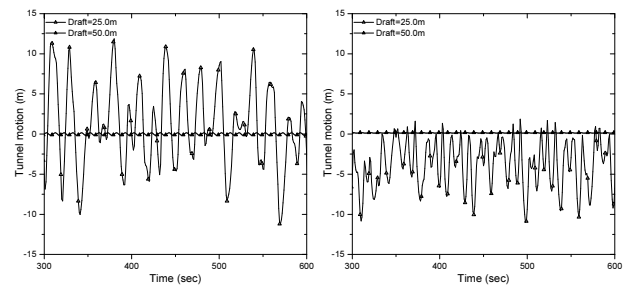
즉 설계 파랑에 대한 해중 터널의 동적 불안정발생 여부의 검토가 매우 중요하다는 것이 본 해석을 통해 입증되었다.

#### 4.2 Case study 1: 흘수의 영향 분석

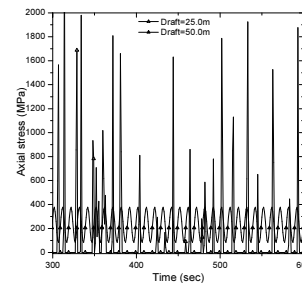
3장에서 분석된 바와 같이 자유 수면으로부터 수직방향으로 멀리 계류될수록 파랑에 대한 구조물의 동적 응답은 현저히 감소한다. Fig. 15와 같이 동일한 BWR 및 긴장재 기울임을 갖는 해중 터널이 동일한 파랑의 영향을 받을 때 더 깊은 흘수가 고려될수록 파랑에 의한 터널의 운동 및 긴장재 장력 변화량이 감소하여 긴장재는 0 이상의 긴장력을 유지하게 되고 이에 따라 동적 불안정성은 발생하지 않는 것이 본 해석 연구결과 나타났다.

#### 4.3 Case study 2: 부력-자중 비(BWR) 영향 분석

부력-자중비가 클수록 힘의 평형의 원리에 따라 긴장재는 더 큰 초기 장력이 요구된다. 따라서 동일한 파랑에 대한 긴장재 최소장력 역시 증가하게 되어 긴장재 장력의 완전 소실에 의한 터널의 동적 불안정 거동 역시 발생하기 어렵다. 이는 Fig. 16의 BWR에 따른 터널의 운동 및 긴장재 장력 변화에 잘 나타나는데, 결과적으로 BWR 증가에 따른 초기 장력이 파랑에 의한 긴장재 장력 변화량보다 큰 경우 긴장재의 장

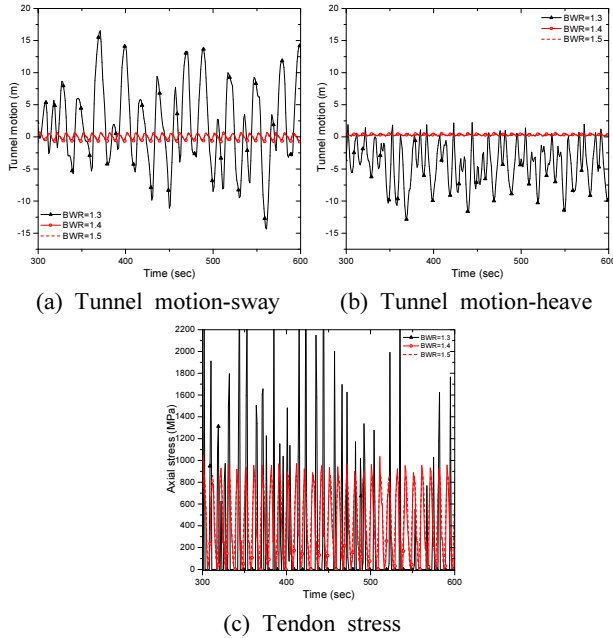


(a) Tunnel motion-sway (b) Tunnel motion-heave



(c) Tendon stress

**Fig. 15.** Effect of the draft on the structural response of the SFT under the regular wave (BWR=1.2, Hmax=8.27m, Tendon inclination=30°)



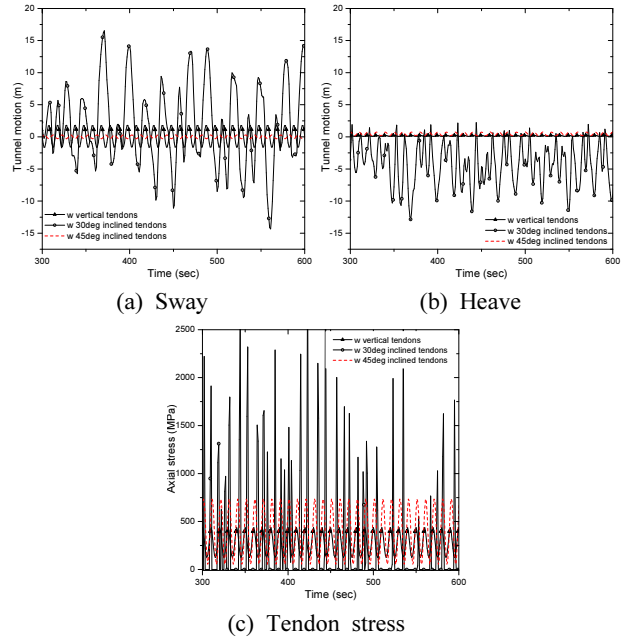
**Fig. 16.** Effect of the draft on the structural response of the SFT under the regular wave (Draft=25.0m, Hmax=8.27m, Tendon inclination=30°)

력이 0보다 크므로 터널의 동적 불안정 거동이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

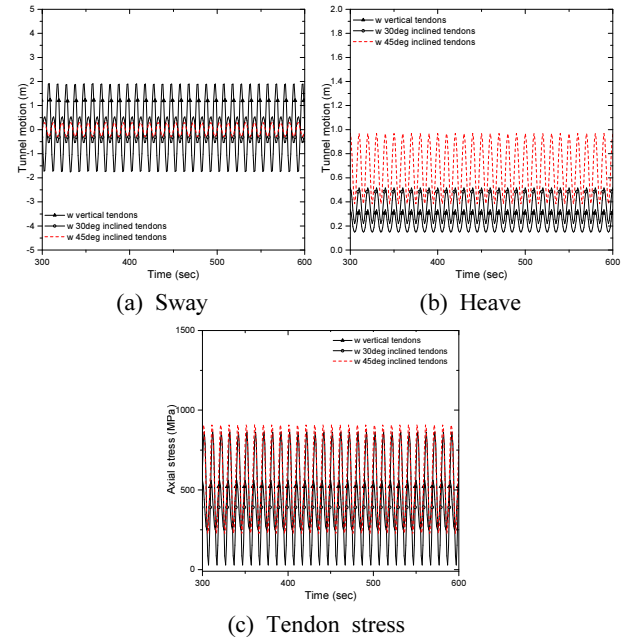
그러나 긴장재 초기 장력이 클수록 유사 수준의 동적 응답이 발생할 때, 최대 장력 역시 증가하여 재료의 항복응력을 초과하는 수직 응력이 긴장재 단면에 발생할 수 있다. 즉, BWR은 긴장재의 최소 장력 뿐 만 아니라 최대 장력의 한계를 고려하여 결정되어야 하고, BWR이 구조물의 정적 반응에 보다 큰 영향을 미치는 만큼, BWR 조절에 의한 정적 반응의 감소 뿐 만 아니라 동적 반응 감소 방안을 함께 고려하여 기하학적 설계 인자를 결정해야 한다.

#### 4.4 Case study 3: 긴장재 기울임 영향 분석

3장의 해석연구결과와 같이 긴장재 기울임은 터널의 수평 방향 강성 도입을 통해 운동 제어에 매우 효과적이지만 수직 방향 강성 저하에 따른 초기 요구 장력의 증가와 함께 터널 운동에 의해 유발되는 긴장재 장력 변화량이 증가할 수 있다. Figs. 17~19는 BWR 및 흘수가 일정할 때 긴장재 기울임에 따른 해중 터널의 운동 및 긴장재 장력변화특성을 직접 비교하고, 특히 Fig. 17은 긴장재 기울임이 터널 동적 불안정 거동 발생에 미치는 영향을 잘 나타내고 있다. 긴장재 기울임이 클수록 터널의 수평운동 제어성능이 향상되므로 교통시설물



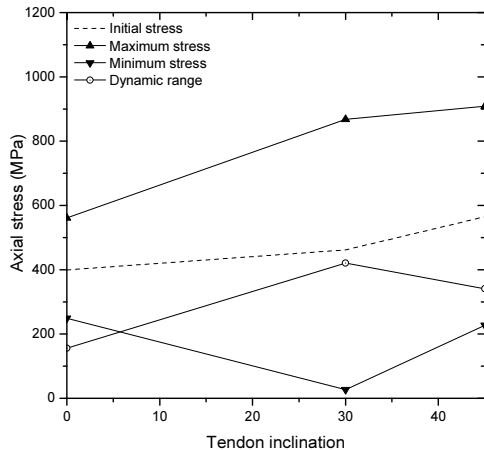
**Fig. 17.** Effect of the tendon inclination on the structural response of the SFT under the regular wave (Draft=25.0m, BWR=1.3, Hmax=8.27m)



**Fig. 18.** Effect of the tendon inclination on the structural response of the SFT under the regular wave (Draft=25.0m, BWR=1.5, Hmax=8.27m)

로서의 해중 터널의 사용성 측면에서는 효과적이지만 동일 환경조건 하에서 긴장재 장력 변동성 증가에 따라 긴장재 장력 완전 소실에 의한 느슨해짐 및 이로 인한 터널의 동적 불





**Fig. 19.** Effect of tendon inclination angle on the tendon stresses under the regular wave (Draft=25.0m, BWR=1.5, Hmax=8.27m)

안정 거동이 야기될 수 있다는 것이 본 해석결과 나타났다. 이처럼 해중 터널의 동적 거동에 대해서 터널의 흘수, 부력-자중비 및 긴장재 기울임 등 주요 설계 인자가 모두 구조물의 정동적 구조 반응에 대해 직접적인 영향을 미치는 것이 해석적으로 규명되었다. 교통시설물로서 해중 터널의 안전한 운영을 위해서는 무엇보다도 설계 환경 조건 하에서 터널의 운동이 적절히 제어되고 본 구조물을 이루는 모든 주요 부재가 충분한 안전율을 확보해야 한다. 본 구조물의 근본적인 구조 특성 상 긴장재는 일정 수준 이상의 장력이 유지되어야 한다. 특히 본 해석 연구에서 나타난 것처럼 긴장력을 모두 잃는 경우 긴장재에 의해 도입되는 강성이 일시적으로 소실되어 부유 터널은 극심하고 불규칙적인 동적 거동이 나타난다. 이를 방지하기 위해서는 해중 터널이 받게 되는 환경 하중을 명확히 산정하고, 이 환경 하중 하에서 긴장재가 받는 최대 긴장력에 의한 단면에 발생하는 응력이 충분한 안전율을 확보하며 항복 응력 이내로 제어되면서 최소 장력은 0이상을 유지해야 한다. API RP 2T<sup>[12]</sup>는 TLP(Tension Leg Platform)를 위한 긴장재의 느슨해짐 및 좌굴 방지를 위해 10,000년 재현주기 환경조건 하에서도 최소 긴장력이 10 MT 이상이 되도록 규정하고 있는데, 이를 고려하여 해중 터널의 지속적인 연구를 통해 적절한 최소 긴장력 규정을 개발할 필요가 있다.

### 5. 결론

본 연구는 유체-구조 동역학 해석기법을 통해 긴장재로

계류된 해중 터널의 동적 불안정 거동에 대해 규명하였다. 터널의 동적 거동을 유발하는 파랑 작용 시 긴장재가 장력을 모두 소실할 경우 긴장재에 의해 도입되는 강성의 일시적 소실에 의해 규칙 파랑이 작용함에도 불구하고 부유식 터널은 급격하고 불규칙한 구조 반응이 나타난다. 이를 방지하기 위해서 해중 터널이 받는 환경 하중 하에서 긴장재의 느슨해짐이나 좌굴이 발생해서는 안된다.

해중 터널의 동적 불안정성을 야기할 수 있는 긴장재 장력 변화에 대해 터널의 흘수, 부력-자중비, 긴장재 기울임 등 해중 터널의 주요 기하학적 설계인자는 정, 동적 영향을 직접적으로 미치는 것이 본 연구를 통해 증명되었다. 해중 터널이 받는 설계 환경 하중 하에서 해중 터널의 구조 안전성 및 사용성 확보의 측면에서 긴장재의 적정 장력 유지가 매우 중요하며, 이를 위한 구조물의 기본 설계 등 사전 검토 시 본 연구에서 분석한 주요 설계 인자에 대한 면밀한 해석 연구가 필수적인 것이 본 연구를 통해 드러났다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (과제번호 17CTAP-C133500-01) 에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌(References)

[1] 김승준, 박우선, 원덕희(2016) 유한요소해석을 통한 해중 터널의 유체동역학 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제36권, 제6호, pp.955-967.  
 Kim, S., Park, W.S., and Won, D.H. (2016) Hydrodynamic Analysis of Submerged Floating Tunnel Structures by Finite Element Analysis, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.36, No.6, pp.955-967 (in Korean).  
 [2] 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).
- [3] Østlid, H. (2010) When is SFT competitive?, Dynamic Response and Structural Integrity of Submerged Floating Tunnel Due to Hydrodynamic Load and Accidental Load, *Procedia Engineering, First International Symposium on Archimedes Bridge (ISAB-2010)*, Vol.4, pp.3-11.
  - [4] Kunisu, H. Mizuno, S., Mizuno, Y., and Saeki, H. (1994) Study on Submerged Floating Tunnel Characteristics Under the Wave Condition, *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. ISOPE-I-94-096.
  - [5] Remseth, S., Leira, B. J., Okstad, K. M., and Mathisen, K. M. (1999) Dynamic Response and Fluid / Structure Interaction of Submerged Floating Tunnels, *Computures and Structures*, Vol.72, pp.659-685.
  - [6] Hong, Y. and Ge, F. (2010) Dynamic Response and Structural Integrity of Submerged Floating Tunnel Due to Hydrodynamic Load and Accidental Load, *Procedia Engineering, First International Symposium on Archimedes Bridge (ISAB-2010)* Vol.4, pp.35-50.
  - [7] Lu, W., Ge, F., Wang, L., Wu, X., and Hong, Y. (2011) On the Slack Phenomena and Snap Force in Tethers of Submerged Floating Tunnels Under Wave Conditions, *Marine Structures*, Vol.24, No.4, pp.358-376.
  - [8] Oh, S. H., Park, W. S., Jang, S.C., and Kim, D.H. (2013) Investigation on the Behavioral and Hydrodynamic Characteristics of Submerged Floating Tunnel based on Regular Wave Experiments, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.33, No.5, pp.1887-1895.
  - [9] 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*, Vol.5, No.2, pp.109-123.
  - [10] Garrett, D.L. (1981) Dynamic Analysis of Slender Rods, *Journal of Energy Resources Technology*, ASME, Vol.104, No.4, pp.302-306.
  - [11] Simulia Inc. (2017) ABAQUS User Manual V6.17.
  - [12] American Petroleum Institute (2010) Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms (API RP 2T), *API Publising services*, Washington DC, USA.

---

**요 약 :** 본 연구에서는 긴장재로 계류된 해중 터널에서 긴장재의 느슨해짐에 따른 동적 불안정 거동에 대해 다룬다. 해중 터널의 설계는 파랑 및 조류 등 유체력에 의해 지배받는다. 특히 시간에 따라 지속적으로 크기 및 작용방향이 변하는 파랑은 해중 터널의 동적 거동을 직접적으로 야기하게 되는데, 파랑에 의한 부유 튜브의 운동은 계류선 내력의 동적 변동을 유발하게 되고, 이 힘의 변화는 계류선의 강도 설계 뿐 만 아니라 피로 설계에도 직접적인 영향을 미친다. 파랑에 의한 터널의 운동이 극심할 경우, 계류선의 장력은 모두 소실될 수 있는데, 이 때 계류선이 느슨해짐에 따라 일시적으로 부유 터널의 운동에 대한 저항성이 사라져 동적 불안정 거동이 유발 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 유체-구조동역학 해석기법을 통해 해중 터널 긴장재의 느슨해짐 발생 시 부유 튜브의 동적 불안정 거동에 대해 분석하였다. 특히 해중 터널의 중요 설계 인자인 흘수, 부력-자중 비율(Buoyancy-Weight Ratio, BWR), 긴장재 기울임이 동적 불안정 거동에 미치는 영향에 대해 해석적으로 분석하였다.

**핵심용어 :** 해중터널, 계류선, 긴장재, 유체-구조동역학해석, 동적 불안정성

---