



불규칙 파랑 중 해중 터널 계류선의 단기 피로 손상 분석

김승준¹ · 원덕희^{2*}

¹조교수/공학박사, 대전대학교, 건설안전방재공학과, ²선임연구원/공학박사, 한국해양과학기술원, 연안방재연구센터

Investigation of Fatigue Damage of the Mooring Lines for Submerged Floating Tunnels Under Irregular Waves

Kim, Seungjun¹, Won, Deok Hee^{2*}

¹Assistant Professor/Ph.D., Dept of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea
²Senior Research scientist/Ph.D., Coastal Development & Ocean Energy Research Division Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, 15627, Korea

Abstract - As well as the strength check, fatigue life check is also mainly required for designing mooring lines of the floating structures. In general, forces which induce dynamic structural response significantly affect to fatigue design of the mooring lines. So, waves are mainly considered as the governing loading for fatigue design of the mooring lines. In this study, characteristics of the fatigue damage of the mooring lines for submerged floating tunnels (SFT) under irregular waves are investigated. For this study time domain hydrodynamic analysis is used to obtain motion of the tunnel and tension and stresses of the mooring lines under the specific environmental conditions. Also, the Rainflow-counting method, the Palmgren-Miner's rule, and S-N curves for floating offshore structures presented by DNV recommendation is applied to calculate the fatigue damage due to the fluctuating stresses. Referring to the design practice of the tendon pipes for TLP (tension-leg platform), which is very similar structural system to SFT, it is assumed that a 100 year return period wave attacks the SFT systems during 48 hours and the fatigue damages due to the environmental loading are calculated. Following the analysis sequence, the effects of the tunnel draft, spacing and initial inclination angle of the mooring lines on the fatigue damage under the specific environmental loadings are investigated.

Keywords - Submerged floating tunnels, Mooring lines, Fatigue, Hydrodynamic analysis, Irregular waves

1. 서론

수중 해중 터널은 호수나 강, 바다를 건너는 새로운 교통 수단으로써, 수중 안정성 확보를 위해 계류선(Mooring lines) 또는 부력재(Buoy) 등이 요구된다^{[1],[2]}. 해중 터널의 구조는 크게 수중 부유식 함체와 이를 지지하는 계류 시스템으로 구분할 수 있는데, 함체 및 계류 시스템 모두 육상에서 미리 건

조하여 대상 해역에서 조립에 의한 전체 구조물 건설이 가능하다. 특히 해상장대교량과 같이 무수히 많은 해상교각 시공 및 해저터널과 같은 해저지반굴착 작업이 필요 없어 기존의 해상 및 해저교통구조물 건설에 비해 긴 공기가 요구되지 않는 장점이 있다.

해중 터널의 개념은 노르웨이 및 일본, 중국 등에서 이미 몇 십년 전에 제안되었으나 아직까지는 실제 건설 사례가 없다고 알려져 있다^{[2],[3]}. 이는 무엇보다도 다양한 환경 하중 및 차량 하중 등의 변동 하중을 받을 때 부유식 해중 터널 단면 및 계류선이 받는 내력과 응력, 터널의 운동 및 고유 진동 특성, 계류선의 좌굴 가능성 및 피로 성능, 해저지반 앵커지점에서의 반력 등을 명확히 분석할 수 있어야 비로소 실질적인 설계 및 시공이 가능하다^[2].

그동안 파랑, 조류, 지진 및 쓰나미 등의 주요한 해양환경

Note.-Discussion open until August 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 7, 2016; revised October 24, 2016; approved on October 24, 2016.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-6339 Fax. +82-31-408-5820

E-mail. thekeyone@kiost.ac.kr

하중에 의해 부유식 해중 터널의 동적 거동에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다^{[4],[5],[6]}. 그러나 이러한 연구에서는 해중 터널의 운동 특성 및 축력, 전단력, 휨모멘트 등의 단면력 그리고 계류선의 축력 변화 등 구조물의 반응까지 면밀히 분석하지는 못하였다. 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science and Technology, KIOST)에서는 1/100 상사율을 적용하여 단순 모델의 규칙 파랑(regular wave) 하에서의 합체 운동 및 합체가 받는 수압, 계류선 장력 변화 특성을 실험적으로 연구하였다^[7]. Kim *et al.* (2016)^[2]은 ABAQUS-AQUA를 활용하여 부유식 해중 터널의 규칙 및 불규칙 파랑에 대한 시간영역 유체-구조동역학 해석기법에 대해 연구하였다.

해중 터널의 안전한 운영을 위해서는 무엇보다도 지속적으로 작용하는 환경 하중에 대한 터널 합체의 운동 제어가 필수이고, 이것은 합리적인 계류시스템의 설계를 통해 가능하다. 자중보다 부력이 크도록 설계된 해중 터널의 운동은 긴 장력을 받는 계류선을 통해 일정한 위치에 계류시킬 수 있는데, 계류선의 설계는 강도 및 피로 수명 검토를 통해 수행되어야 한다. 부유식 해양 구조물의 계류선 설계에 있어서 강도 설계라 함은, 주어진 환경 하중에 대해 발생하는 최대 응력이 재료의 강도 이하가 되도록 하는 것을 의미하고, 피로 수명 검토는 본 구조물의 설계 수명 내에 피로 파괴의 발생 여부를 검토하는 것을 의미한다. 즉, 부유식 해중 터널에 있어서 합리적인 계류선의 설계라 함은 A, 최대 응력이 재료의 강도 이하가 되고, B, 구조물의 설계 수명 내에서 피로 파괴가 발생하지 않도록 하는 것을 말한다.

본 논문은 부유식 해중 터널의 계류선의 피로 손상 특성에 대한 해석적 연구를 다룬다. 본 연구에서는 부유식 해중 터널과 거동양상이 매우 유사한 인장각플랫폼(Tension Leg Platform, TLP)의 텐던(Tendon)을 주요 계류 시스템으로 고려하였다. 극심한 환경하중이 전체 시스템에 작용할 때, 작용하는 환경하중 및 부유식 합체의 운동에 의해 유발되는 계류선의 시간 이력 응력에 의해 계류선 단면에 발생하는 피로 손상을 추정하는데, 해중 터널 합체의 흘수(draft), 계류선 배치 간격 및 초기 기울임각도의 변화에 따라 동일한 환경하중에 대해 발생하는 피로 손상도를 비교분석하여 다양한 초기 설계 인자가 계류선 피로 손상도에 미치는 영향을 분석한다.

2. 해중터널의 유체-구조동역학 해석 및 피로 손상 평가 기법

Fig. 1과 같이 해중 터널의 계류 형식은 터널의 무게와 부력 간의 관계를 이용하여 크게 둘로 구분할 수 있는데, 부력이 자중보다 크게 설계할 경우 터널의 부상에 대해 저항하는 구조체로 텐던 또는 계류 체인(Mooring chains) 등을 계류 시스템으로 고려할 수 있다. 또한 Fig. 1(b)와 같이 자중이 부력보다 크도록 설계하고자 한다면 터널의 침몰에 대해 저항하는 구조체로 부력체(Buoy module)를 사용하고 부력체와 터널을 텐던 또는 체인 등의 인장 부재로 연결하여 정해진 위치에 계류시킬 수 있다.

일반적인 육상 구조물과 달리 부유식 해양 구조물은 바람(wind), 파랑(wave), 조류(current) 등 지속적으로 변화하는 환경하중에 민감한 운동특성을 보이는데, 부유식 해중 터널 역시 파랑 및 조류에 의해 수직 및 수평 운동이 발생하고, 과도한 운동은 구조물의 구조 거동 측면뿐만 아니라 사용성 측면에서도 반드시 제어가 필요하다. Fig. 1(a)와 같은 시스템에서는 계류선에 기울임각을 도입하여 수평방향에 대한 저항성을 향상시킬 수 있지만 Fig. 1(b)와 같은 경우, 부력체의 수평 운동을 제어하거나, 터널에 카테나리 타입의 계류선이나 추력체(Thruster) 등 추가적인 수평 방향 계류체를 도입할 필요가 있다.

앞서 언급한대로 해중 터널은 지속적으로 환경하중을 받는데, 이러한 환경하중 중 특히 파랑은 명확한 동적 특성을 보이는데, 파랑의 주기와 파고에 따라 해중 터널의 동적 거동은 매우 민감하게 반응한다. 또한 파랑에 의한 터널의 동적 거동에 의해 터널을 지지하는 계류선 역시 동적 구조 반응을 보이고, 이러한 동적 반응은 계류선 주요 단면에 발생하는 최대 응력의 증가뿐만 아니라 피로 손상 역시 야기한다. 이에 따라 일반적인 부유식 구조물의 계류선 설계에 있어서

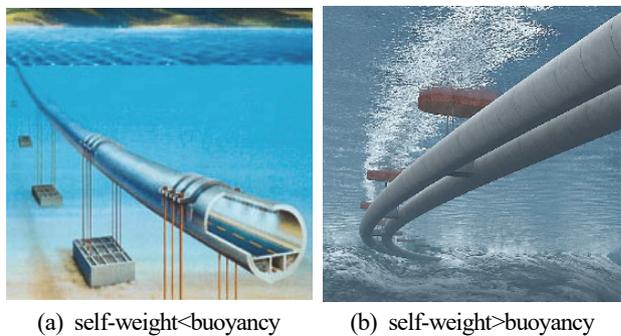


Fig. 1. Submerged floating tunnel^[2]

는 환경 하중에 의해 유발되는 동적 응력을 고려한 강도 설계 뿐만 아니라 장기/단기 피로 손상에 대한 검토도 반드시 하도록 되어 있다^{[8],[9],[10],[11],[12]}.

부유식 해중 터널의 계류선의 강도 및 피로 검토는 결과적으로 특정한 환경 하중에 의해 유발되는 동적 응력의 분석에서부터 시작한다. 이를 위해서는 먼저 환경 하중에 대한 부유식 해중 터널-계류선의 유체-구조 동역학 해석이 수행되어야 한다. 또한, 본 해석을 통해 얻은 시간 이력 응력은 ASTM의 Rainflow 집계법 및 Palmgren-Miner의 법칙을 활용하여 피로 손상도 추정에 바로 적용할 수 있다.

2.1 유체-구조 동역학 해석 이론

해중 터널의 시간 이력 유체-구조 동역학 해석에 근간한 전체계 해석(Global performance analysis)은 Fig.2의 Garrett (1982)^[13]의 slender rod 이론을 통해 수립한 지배 미분방정식을 기본으로 하여 수행이 가능하다.

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

- 여기서, $r(s,t)$ =slender rod의 위치 벡터
- B =휨 강성(bending stiffness)
- T =인장력(tensile force)
- k =곡률(local curvature)
- m =단위 길이 당 질량(mass per unit length)

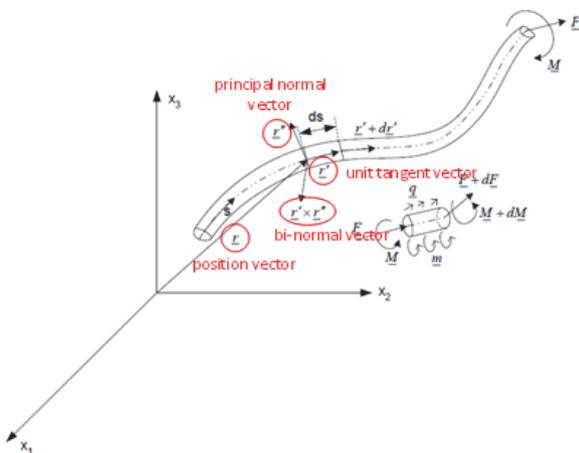


Fig. 2. General configuration of slender rods

- \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_e =유효 단면적(effective sectional area)

본 지배 방정식에서 수중 실린더 구조물이 받는 파력 및 조력은 모리슨 방정식 (Morison equation)을 통해 고려할 수 있다.

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

- 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)

여기에 실린더 부재의 자중과 수중에서 받는 부력 그리고 평형수 무게(ballast weight) 등의 정적 하중 성분을 추가하면 파랑 및 조류에 의한 유체력을 포함한 부유식 해중 터널이

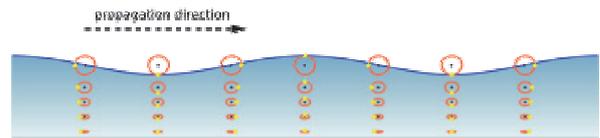


Fig. 3. Orbital motion under linear wave^[2]

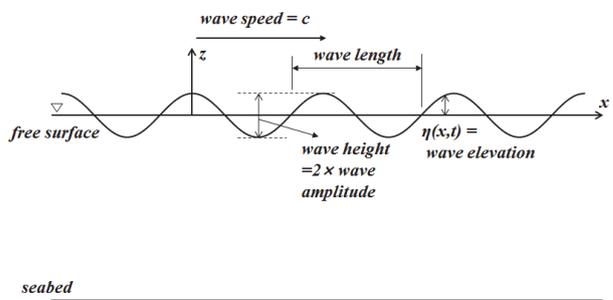


Fig. 4. Linear wave^[2]

받는 외력 항을 모두 구성할 수 있다.

파랑에 의한 유체력은 기본적으로 시간에 따라 속도 및 방향이 지속적으로 변화하는 성분으로 고려하기 때문에 Fig. 3, 4와 같이 시간에 따라 변화하는 물 입자의 속도 및 가속도를 식 (2)의 관성력 항 및 항력 항 모두에 적용하게 된다. 이를 위해서는 파랑에 의한 유체 입자의 속도 및 가속도를 정의해야 한다. 규칙 파랑의 경우 일반적으로 Airy 파 이론을 통해 고려할 수 있다. Airy 파 이론에서는 파랑의 포텐셜 이론(wave potential theory)에 의해 진행 파랑(propagating wave)을 고려하는데, cos 함수로 자유수면 임의위치의 파고를 가정하고, 포텐셜 이론과 경계조건 등을 활용하여 유체장 내 임의의 위치에서 파랑에 의한 유체 입자 운동을 정의한다.

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

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

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

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

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

여기서, $\eta(x,t)$ =시간 t, 수평좌표 x 지점에서의 자유수면의 높이(surface elevation), k =파 수(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

실제 해역에서의 파랑은 불규칙한 특성을 보이므로 일반적인 해양 구조물의 설계 및 해석에 있어서는 반드시 불규칙 파랑에 대한 동적 해석을 수행한다. 불규칙 파랑은 파 스펙트럼(wave spectrum)을 통해 고려가 가능하다. 구조물이 놓일 해역의 파랑에 대한 설계 스펙트럼을 먼저 정의하고, 이와 등가의 무수히 많은 규칙 파랑을 생성, 이를 중첩하여 불규칙 파랑을 정의할 수 있다. 식 (8)은 부유식 해양 구조물에 가장 많이 적용

되는 스펙트럼 중 하나인 JONSWAP 스펙트럼을 나타낸다.

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

여기서, g : 중력가속도

α =spectral energy parameter

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

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

γ =형상계수, $f_m = 1/T_p$

T_p =첨두 주기 (peak period)

H_s =유의 파고 (significant wave height)

2.2 계류선의 단기 피로 손상 분석

동적 환경 하중에 의해 계류선 단면에 유발된 동적 응력은 피로 손상을 야기한다. 해양 구조물의 설계 시 계류선의 피로 수명 검토는 A. 장기 피로 분석과 B. 단기 피로 분석을 통해 검토하게 된다. 강한 인장상태의 계류선 중, 강관으로 구성된 텐던에 대한 API 2T의 피로 설계 기준에 의거한 단기 피로 분석이라 함은 극심한 환경 하중(100년 이상의 재현주기 파랑 조건 등)이 구조물에 36~48 시간 지속될 때 계류선 단면에 발생하는 피로 손상도를 검토하는 것을 의미하고, 통상적으로 이 값은 0.01을 넘지 않도록 설계해야 한다^[9].

해중 터널 계류선의 단기 피로 손상도는 동적 응력의 평가-평균 응력 보정-교번응력범위 및 반복횟수분석-피로손상추정의 순으로 평가가 가능하다. 먼저, 특정 환경 하중에 대한 해중 터널의 전체계 해석을 수행하여 피로 손상을 검토하고자 하는 계류선 단면에서의 시간이력 응력을 얻는다. 이후 피로손상에 대한 교번 응력의 평균응력이 미치는 영향을 고려하기 위해 평균 응력 보정(Mean stress correction)을 수행하여 시간이력응력을 보정한다. 여러 보정 모델이 있으나, 강재에 적합하다고 알려진 Gerber의 응력모델을 본 연구에서는 적용한다^{[14],[15]}.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1.0 \quad (9)$$

여기서, σ_a =교번응력,

σ_c =보정응력,

σ_m =교번응력의 평균응력,

σ_u =재료의 인장강도

이후, Rainflow 집계법을 통해 시간이력 응력에서 교반응력 범위(fluctuating stress range)와 반복횟수(cycles)를 추출한다. Rainflow 집계법^[16]은 시간이력응력을 받는 구조물의 피로손상 추정을 위해 불규칙 특성을 나타내는 응력 신호에서 각 반복응력 범위 및 크기와 이 반복응력이 재하되는 횟수를 추출하는 기본적인 방법이다^{[16],[17]}. 이후 Palmgren-Miner의 법칙을 통해 식 (10)와 같이 피로 손상 지수를 계산할 수 있다.

$$D_{short-term} = \sum_i^n \frac{n_i}{N_i} \quad (10)$$

여기서, $D_{short-term}$ = 단기피로손상지수

n_i = 교반응력범위 $\Delta\sigma_i$ 의 반복횟수(cycles)

N_i = 교반응력범위 $\Delta\sigma_i$ 가 피로파괴를 야기하는 데 필요한 반복재하횟수

n = 고려하는 교반응력범위 갯수

식 (10)의 개별 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 가 피로파괴를 야기하는 데 필요한 반복재하횟수 N_i 는 S-N 곡선을 통해 계산이 가능하다.

$$N_i = C(\Delta\sigma_i)^{-m} \quad (11)$$

여기서, C, m = 실험을 통해 얻은 개별적 상수

식 (11)은 부재의 피로 실험을 근거로 한 일반적인 S-N 곡선을 나타낸다. 해양 구조물 설계에 주로 적용되는 선급기준인 ABS, DNV 기준 등에서 모재 및 용접부에 대한 S-N 곡선을 제시하고 있고, 본 연구에서는 DNV의 해양구조물 피로 설계 권장도서인 DNV-RP-C203^[12]을 참고한다.

또한, 대다수 해양구조물 설계도서에서는 용접부의 피로검토 시 응력집중계수(Stress Concentration Factor)를 반드시 고려하도록 규정한다. 해중 터널과 유사한 거동을 보이는 부유식 해양 플랫폼인 TLP의 텐던이나 라이저, 해저파이프 등은 Butt 용접을 통해 일정 길이의 세그먼트 결합이 이루어지므로, 본 연구에서도 부재의 형상 특성을 고려하여 응력집중계수를 피로 손상 추정에 적용한다. 강관의 용접부 응력집중계수는 DNV-RP-C203^[12]을 따라 산정 가능하다. 본 논문에서는 그 절차를 따라서 각 해석모델 별 SCF를 산정하였고, 이는 1.17~1.25의 범위로 계산되었다. 절차에 대한 소개는 본 논문에서는 생략한다.

3. 해중 터널의 전체계 해석 기반 계류선 (텐던형식) 단기 피로 손상 특성 분석

3.1 해석개요

본 연구에서는 1.0km 길이를 갖는 해중터널 모델에 대해 다루고 상세 제원은 Table 1과 같다. Fig. 5와 같이 해중 터널의 길이 방향으로 일정 간격을 두고 해저 지반에 고정된 강관으로 구성된 계류선이 함체에 부착되어 해중 터널의 정/동적 거동을 제어한다. 강관식 계류선은 Fig. 6(a)와 같은 단순한 단면을 갖는데, Fig. 6(b)와 같은 TLP 해양 플랫폼나 부유식 해상 풍력타워 등 TLP 형식에 일반적으로 적용되는 계류시스템이다. 이는 보통 텐던으로 불리고, 텐던은 구조형식 상 텐던 자체의 부력이 상당하여 깊은 수심의 해역에 적용될 경우, 텐던 자체의 무게에 의한 압축력의 저감에 용이한 장점이 있고 제작도 매우 단순하다. 해중 터널 모델의 양단은 고정단으로 가정하였는데, 그 이유는 Fig. 7과 같이 특정 길이 간격으로 해상 자켓(Offshore Jarket) 타입의 고정형 타워 플랫폼(Fixed tower platform)이 해중 터널의 중간 고정형 지지구조의 역할을 한다고 가정하였고, 본 해석연구

Table 1. Considered geometric and environmental conditions for the case study

Parameters	Values
1. Environmental conditions	
Water depth (h, m)	150.0
Wave period (T, sec)	15.1
Wave height (m)	11.32
2. For tunnel	
Outer diameter (m)	19.4
Sectional area (m ²)	81.785
Moment of inertia (m ⁴)	2243.077
Length (m)	1,000
Elastic modulus (GPa)	17.0
Weight per unit length (tonf/m)	259.461
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0
3. Tendon	
Outer diameter (m)	0.5334
Wall thickness (m)	0.04
Specific weight (tonf/m ³)	7.85
Elastic modulus (GPa)	210.0
Minimum yield stress (MPa)	482.6 (API X70 grade)
Minimum ultimate stress (MPa)	565.4 (API X70 grade)
Drag/added mass coefficient	1.2/1.0

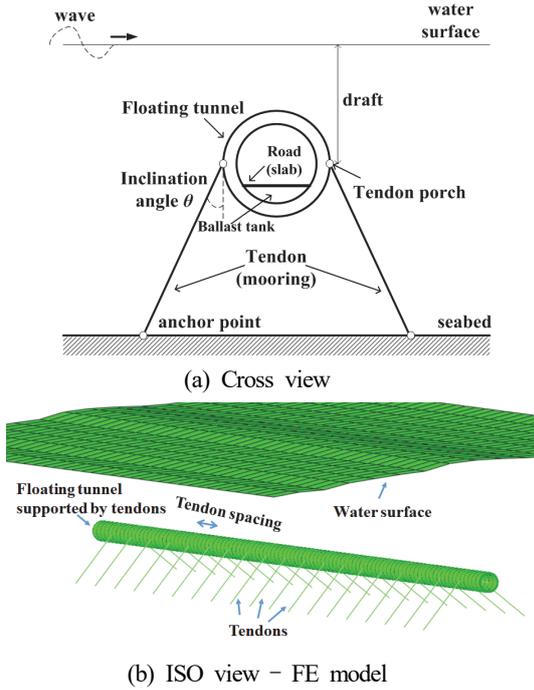


Fig. 5. Considered submerged floating tunnels

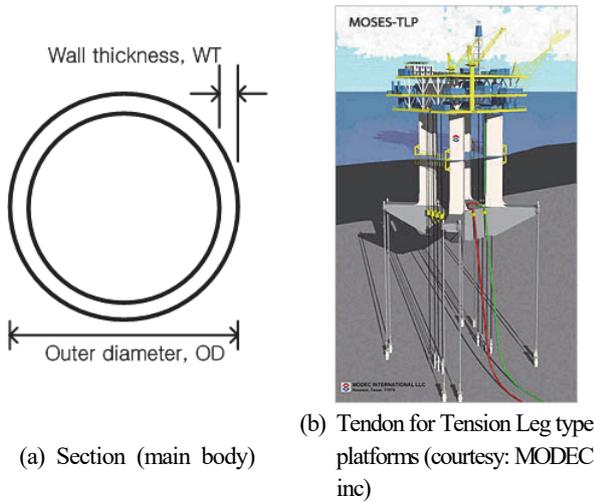


Fig. 6. Considered mooring line (tendon pipes)

에서는 고정형 자켓의 강성이 매우 크다고 가정, 해중 터널 모델의 양단은 이 자켓에 의해 고정단 지지조건을 갖는다고 가정하였다.

본 연구에서는 수심 150.0m의 균일하고 편평한 해저지반을 갖는 해역을 고려하였고, 단기 피로 손상 분석을 위해 고려한 100년 재현 주기 파랑조건은 유의 파고 11.32m, 첨두 주기 15.1초 인데, 이는 제주해역의 부유식 파력-해상풍력 복합 발전플랜트 설계를 위해 적용된 극한조건인 파랑조건

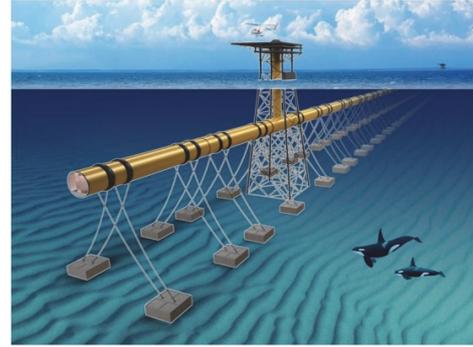


Fig. 7. Jacket station for submerged floating tunnels (KIOST, conceptual model)

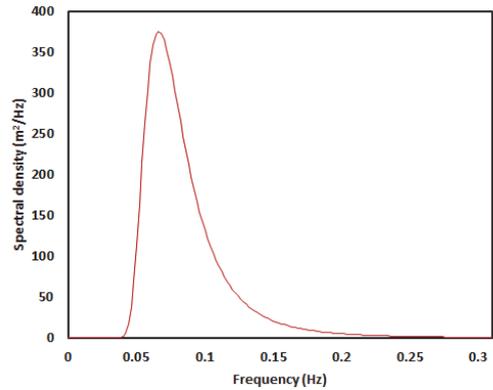


Fig. 8. Applied wave spectrum (JONSWAP spectrum with $H_s = 11.32m$, $T_p = 15.1sec$, $\gamma = 3.3$)

이다^[18]. 파랑의 작용방향은 극심한 조건을 고려하기 위해 해중 터널의 직각방향으로 입사하는 것으로 가정하였다. 파랑 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였고 스펙트럼 형상계수 γ 는 3.3을 적용하였다^[18]. 시간영역해석에서 불규칙 파랑을 고려하는 방법에 있어서 본 연구에서는 일정 수의 규칙파랑을 중첩 재하하는 기법을 적용하였다. 즉, 주어진 유의 파고 및 첨두 주기 및 스펙트럼 형상계수를 식 (8)을 통해 Fig. 8과 같이 정의하고, 이 스펙트럼과 에너지 등가를 이루는 유한한 개수의 규칙파랑요소(components)를 난수로 고려된 개별의 위상과 함께 구성한 후(Fig. 9(a)), 이를 중첩하여 해석상의 전체 파랑을 정의한다. 이를 통해 불규칙 파랑을 동적 해석에 외력의 항으로써 적용가능하다. 이러한 중첩 기법을 통해 구현된 유의파고 11.32m, 첨두 주기 15.1초의 JONSWAP 불규칙 파랑에서 표면 원점에서의 시간이력 파고는 Fig. 9(b)와 같다.

위와 같은 불규칙 파랑에 대한 해중 터널의 유체-구조 동역학 해석은 ABAQUS-AQUA(Simulia 2013)를 활용하여

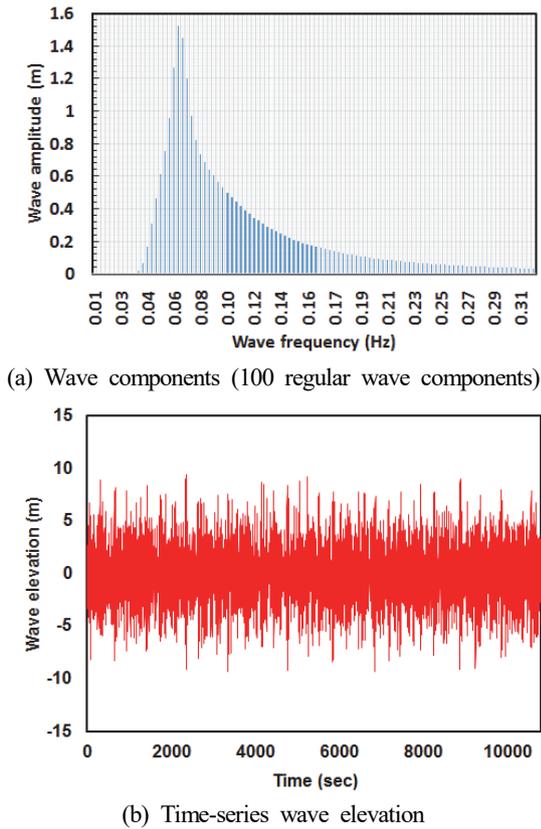


Fig. 9. Applied wave model

수행되었다. Fig. 5(b)와 같이 해중 터널을 이루는 주요 구조부재는 모두 선요소로 모델링하였는데, 함체는 2절점 6자유도 보요소(B32) 그리고 계류선은 2절점 3자유도 트러스요소(T3D2)를 이용하였다. 함체와 각 계류선은 Multi-point constraint(MPC) 옵션을 통해 힌지 결합조건이 정의되었고, 계류선의 최하단은 해저지반에 힌지 구속되었다고 가정하였다. 또한 함체 및 계류선이 받는 파랑하중은 Morison 식을 통해 계산되도록 정의 하였다. 즉, ABAQUS Standard에서는 구조 부재 기하 및 재료물성, 경계조건, 정적 하중, 정/동적 해석조건을 정의하고 ABAQUS AQUA에서는 수심 150.0m의 해역과 함께 Fig. 8과 9의 불규칙 파랑모델을 정의하고 이에 대한 수중 부재가 받는 동적 파랑 하중을 동해석 실행 중 지속적으로 계산하도록 하였다. 동적 해석은 총 3시간에 대해 0.1초 시간 간격으로 수행되었는데, 초반 200초는 ramp-up 구간을 두어 총 11,000 초에 대해 시간이력동적해석을 수행하였다.

본 연구에서는 해중 터널의 운동, 계류선에 발생하는 내력 및 응력 그리고 피로 손상도에 미치는 영향인자로 A. 해중터널의 흘수(draft), B. 계류선의 배치 간격(spacing), C.

Table 2. Considered parameters and their range

Draft (m)	Spacing (m)	Inclination angle (deg)
90.0	25.0	30, 45, 60
	50.0	30, 45, 60
110.0	25.0	30, 45, 60
	50.0	30, 45, 60

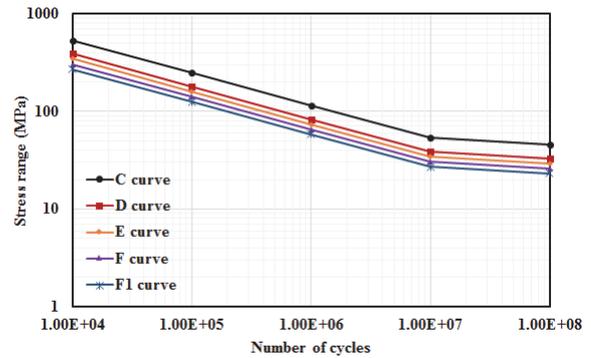


Fig. 10 S-N curves (S-N curves in seawater with cathodic protection presented by DNV-RP-C203)

계류선의 초기 기울임각(inclination angle)로 설정하고 이를 Table 2와 같은 범위에 대해 고려하였다.

Fig. 10은 DNV RP C203에서 제시하는 S-N 곡선(DNV 2011)을 나타내는데, 본 연구에서는 Butt 접합된 강관 파이프 계류선이 설계된다고 가정하여 용접단면을 취약단면으로 가정, F 곡선을 피로손상도 계산에 적용하였다.

3.2 해석결과

3.2.1 터널의 운동 특성

Fig. 11은 앞 절 에서 언급한 파랑이 해중 터널의 직각방향으로 작용할 때 터널의 수평 및 수직방향 변위를 파랑의 파고 변화와 함께 나타낸다. 먼저, 터널의 수직 위치 변화는 파고 변화와 함께 나타난다. Fig. 11(a) 및 Kim *et al.* (2016)^[2]에서 분석한 수직한 계류선을 갖는 해중 터널의 경우, 터널의 수직 위치의 최저는 터널의 수평 위치가 극값을 보일 때 터널의 셋-다운(Set-down) 효과에 의해 나타난 것과 달리 Fig. 11(b)~(d)의 초기 기울임각을 갖는 계류선이 적용된 경우 터널 수직 위치는 파고 변화에 따라 변화하는데, 최대 파고 시 최소가 되고, 최소 파고 시 최대가 된다. 이는 계류선에 의한 수평 저항성이 존재할 경우, 터널의 수직 운동은 계

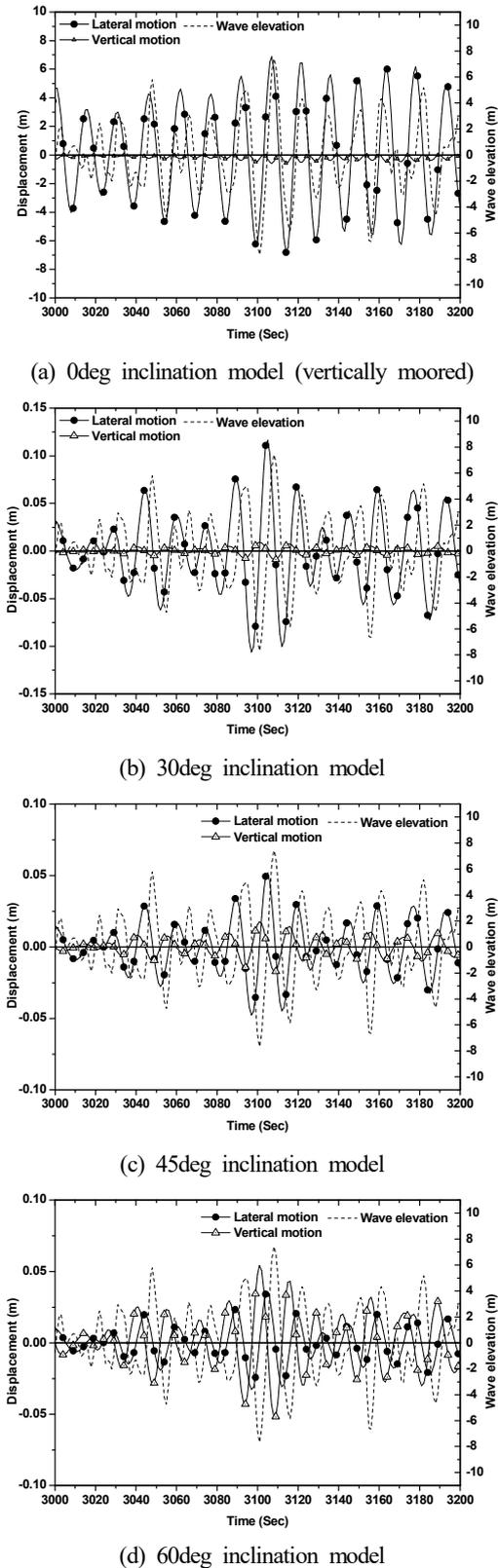


Fig. 11. Time-series tunnel motion for 3,000~3,200sec period (110.0m draft, 50.0m tendon spacing models)

류선의 수평 운동에 의한 셋-다운 효과 보다는 파고 자체의 운동 특성에 의해 민감하게 나타남을 알 수 있다. 또한 계류선의 초기 기울임각에 따라 터널의 수평 및 수직 운동이 민감하게 변화한다. 먼저, 기울임각이 0인 경우 (수직 텐던 설치), 동일한 파랑에 대해 해중 터널은 교통 시설로의 적용이 불가능 수준의 수평 변위(-7.93~8.03m)를 나타낸다. 이때 해중 터널의 최대 수평 속도 및 가속도는 3.43m/s, 1.77m/sec²이다. 터널의 수평 운동은 계류선의 초기 기울임각을 도입하며 매우 효과적으로 감소시킬 수 있다는 것이 Fig. 11을 통해 입증된다. 이러한 거동 특성 하에서, 기울임각이 증가함에 따라 추가적인 수평 변위 감소를 유도할 수 있으나, 터널의 수직 변위는 오히려 증가하여 60°모델에서는 수직 변위가 수평변위보다 더 크게 나타남이 확인되었다. 이러한 경향은 Fig. 12~15에 더욱 명확히 나타난다.

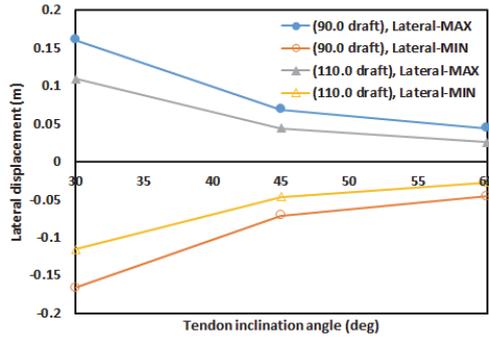
Fig. 12는 25.0m 간격으로 계류선이 배치된 해중 터널 모델에서 흘수 및 계류선 기울임각이 해중 터널의 운동에 미치는 영향을 최대 및 최소 변위값의 비교로 표현하고, Fig. 13은 흘수가 110.0m인 모델에서 계류선 배치 간격 및 기울임각의 영향을 나타낸다. 먼저, Fig. 12(a)와 Fig. 13(a)에서 잘 나타난 대로 계류선의 기울임각은 수평 방향 변위 감소에 직접적인 영향을 미친다. 이는 계류선 기울임각 증가는 계류선에 의한 수평 방향 강성을 증대시킴에 따른 것이다. 또한 계류선 기울임각 증가에 대해 수직방향 변위는 오히려 증가하는데, 이는 수평 방향 거동과 반대로 계류선 기울임각 증가에 따른 수직 방향 강성 감소에 따른 것이다. 이러한 경향은 Fig. 12(b)와 Fig. 13(b)에 명확하게 드러난다.

해중 터널의 흘수가 증가함에 따라 수직 및 수평 방향 운동은 감소하는데, 이는 흘수가 증가할수록 수중 구조물이 받는 파력이 감소함에 따른 현상이고 이는 Fig. 12에 잘 나타나 있다.

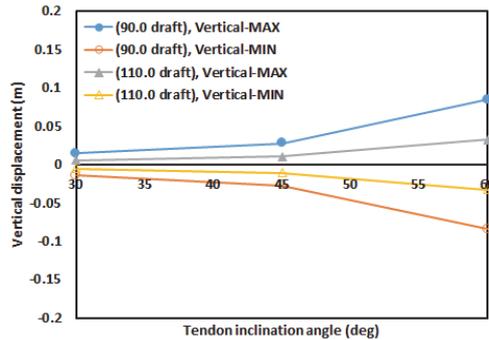
Fig. 13과 같이, 계류선 배치 간격 감소에 따른 강성 증대 효과는 터널의 운동의 감소에 직접적인 영향을 미친다.

3.2.2 계류선 피로 손상도 검토

Fig. 16은 다양한 기하학적 특성이 계류선 축응력에 미치는 영향을 나타낸다. 먼저, 해중 터널의 흘수가 클수록 구조물이 받는 파력의 감소로 인해 계류선의 응력 역시 감소함을 알 수 있다. 또한 계류선의 배치 간격이 클수록 한 기의 계류선이 받는 응력이 증가하는데, 특히 계류선의 초기 응력(initial stress), 평균 응력 그리고 변동 응력의 범위가 모두 증가함을

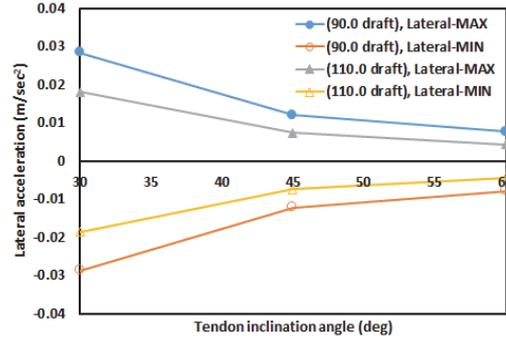


(a) Lateral motion

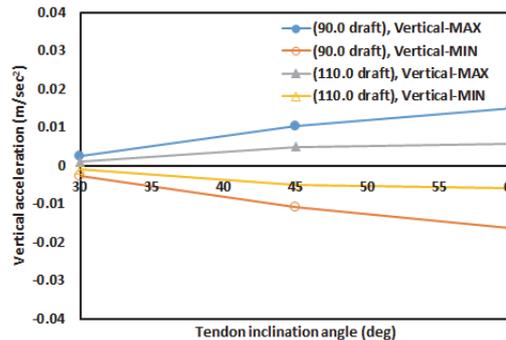


(b) Vertical motion

Fig. 12. Maximum and minimum displacement of the SFT with 25.0m tendon spacing

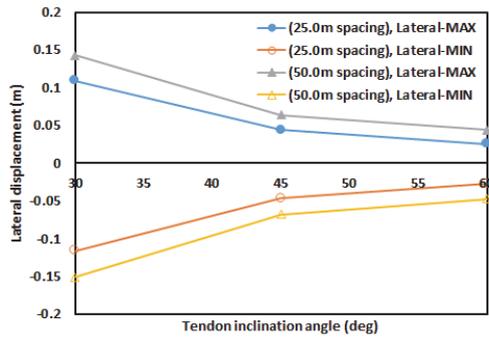


(a) Lateral motion

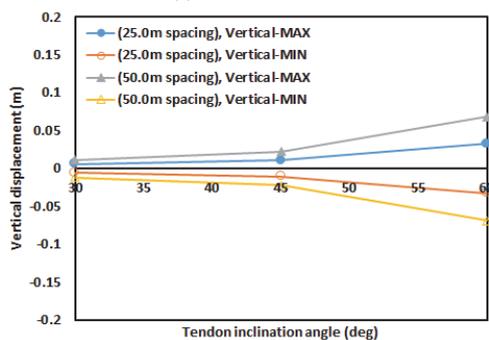


(b) Vertical motion

Fig. 14. Maximum and minimum acceleration of the SFT with 25.0m tendon spacing

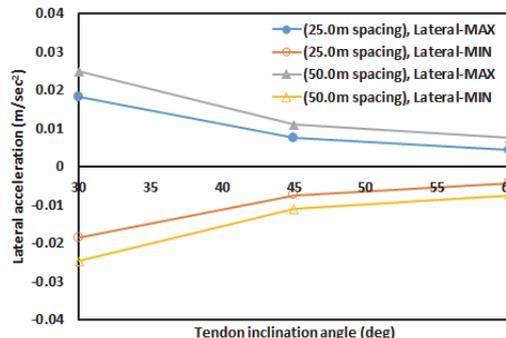


(a) Lateral motion

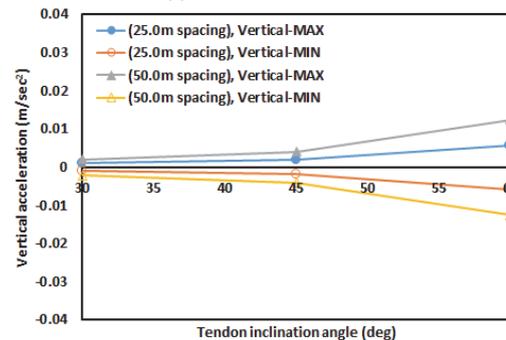


(b) Vertical motion

Fig. 13. Maximum and minimum displacement of the SFT with 110.0draft

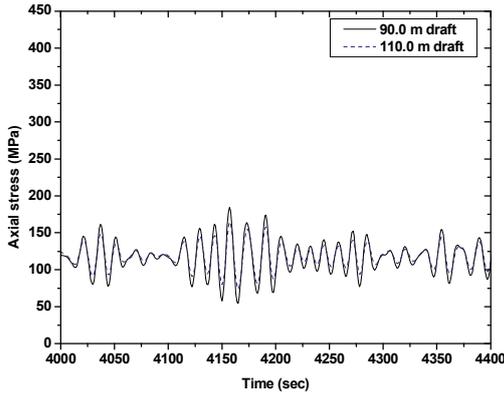


(a) Lateral motion

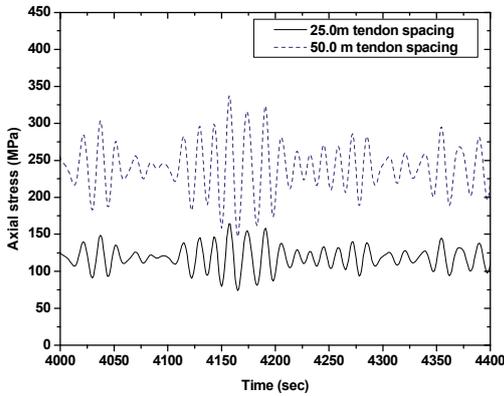


(b) Vertical motion

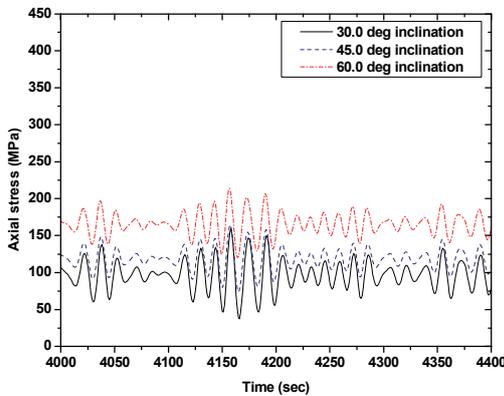
Fig. 15. Maximum and minimum displacement of the SFT with 110.0draft



(a) Draft VS tendon stress (tendon spacing=25.0m, inclination=45.0 deg)



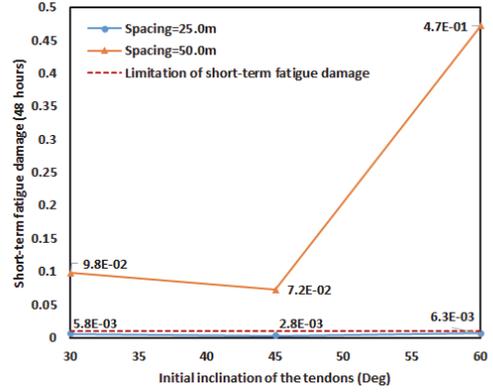
(b) Tendon spacing VS tendon stress (tunnel draft=110.0m, inclination=45.0deg)



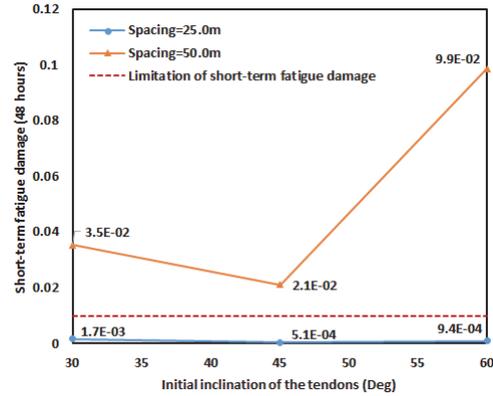
(c) Tendon inclination angle VS tendon stress (tunnel draft = 110.0m, tendon spacing=25.0m)

Fig. 16. Tendon stress comparison

알 수 있다. 계류선의 기울임각 증가 역시 초기 응력과 평균응력 증가를 야기한다. 그러나 변동 응력 범위에 있어서는 기울임각이 45도일 때 가장 작고 30도일 때 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 계류선 장력 변화는 함체의 수평 및 수직 운동 모두에 영향을 받는데, 앞 절에서 분석된대로 계류선 기울임각의



(a) 90.0m draft model

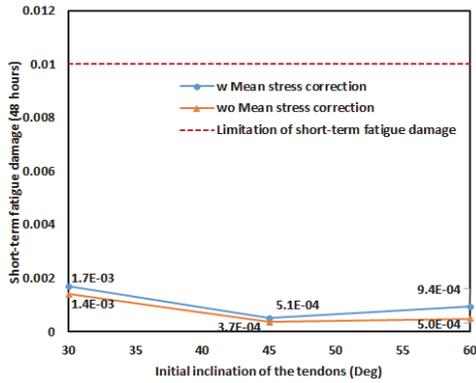


(b) 110.0m draft model

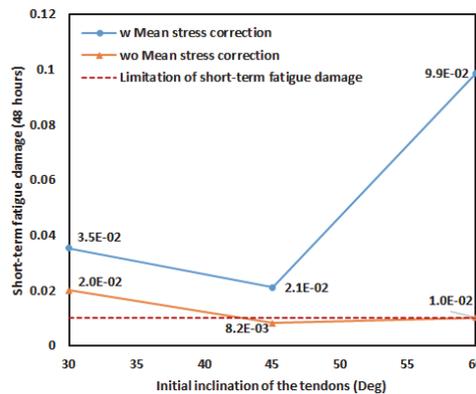
Fig. 17. Short-term fatigue damage (limitation of short-term fatigue damage=0.01)

증가는 함체의 수평운동은 감소시키지만 수직운동은 오히려 증가시킴에 따라 이것이 동시에 영향을 미친데 따른 것이다.

Fig. 17은 계류선의 시간이력응력 결과를 토대로 48시간 동안 누적되는 피로 손상도를 나타낸다. 먼저 함체의 흘수가 큰 모델에서 피로 손상도가 작게 추정되는데, 이는 Fig. 16(a)와 같이 흘수가 증가할수록 동일한 수준의 평균 응력 하에서 변동 응력 범위가 감소됨에 따른 것이다. 또한 계류선 간격이 작을수록 피로 손상지수가 감소하는데, 특히 API 2T의 TLP 텐던 설계 기준에서 제시하는 48시간 동안의 단기 피로 손상지수 조건에 대해 25.0m 배치간격 모델은 모두 이 기준을 만족하나 50.0m 배치간격 모델의 경우 이를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 마지막으로 계류선의 초기 기울임각도가 45도인 경우 계류선 피로손상도가 가장 작았는데, 이는 앞서 언급한 대로 기울임각에 따른 함체의 수평 및 수직운동이 서로 상이한 경향을 나타내는 데에서 기인한다. 여기에 더하여 계류선 배치각도가 증가함에 따라 계류선의 초기응력 및 평균응력이 Fig. 16(c)와 같이 증가하는데, 이는 피로 손상



(a) 25m spacing model



(b) 50.0m spacing model

Fig. 18. Effect of the mean stress on the fatigue damage (110.0m draft)

에 있어서 평균응력효과 증대를 야기한다. 이에 따라 배치각도가 60도인 경우 피로 손상도가 급격히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 18과 같이 피로손상도에 대한 평균응력효과는 계류선 배치 간격 및 기울임각에 따라 명확하게 나타나는데, 특히 초기 응력이 크게 유발되는 경우 더욱 크게 나타난다.

계류선의 단기 피로 손상도는 홀수와 계류선의 배치간격 및 초기 기울임각에 매우 민감하게 나타난다. 교통 시설물로 사용될 해중 터널의 설계에 있어서 터널 운동의 제어는 사용성 측면에서 강하게 요구될 것이므로 본 논문에서 고려한 기하학적 인자들에 대한 계류선의 피로 수명 변화 추이를 고려하여 적합한 계류선 설계가 수행되어야 한다.

4. 결론

본 논문은 부유식 해중 터널 계류선의 단기 피로 손상 특성을 분석하였고 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 홀수가 증가할수록 수중 구조물이 받는 파력의 감소효과

를 기대할 수 있고, 이에 따라 해중 터널의 변위, 속도, 가속도 그리고 계류선의 응력 모두 감소하여 동일한 환경조건 하에서 피로손상을 감소시킬 수 있다.

- (2) 계류선 배치 간격이 줄수록 동일한 환경조건 하에서 계류시스템에 의한 수직 및 수평 방향 강성 증대로 해중 터널의 운동이 감소하고 계류선 한 기가 받는 응력 역시 동시에 감소하여 계류선의 피로손상 역시 감소한다. 그러나 배치 간격이 줄수록 계류선을 지지하는 해저 기초의 요구 개수 역시 증가하여 해중 터널이 갖는 장점이 상쇄될 여지가 있어 실제 구조물 설계 시에는 배치 간격의 최적 설계가 요구된다.
- (3) 계류선의 초기 기울임각이 증가할수록 해중 터널의 수평 운동은 감소하나 오히려 수직 운동이 증가한다. 이에 따라 계류선의 응력도 민감하게 반응하는데, 본 해석 연구에서 고려된 모델에서는 45도의 기울임각을 갖을 때 계류선의 변동 응력이 최소가 되어 피로 손상 역시 최소가 되었다. 기울임각의 추가적인 증가는 해중 터널의 수직 운동 증가뿐만 아니라 계류선의 초기 응력 및 평균 응력 증가를 초래하여 피로 손상의 평균 응력효과를 고려할 경우, 급격한 피로손상도 증가를 초래한다. 즉, 계류선 배치 간격과 함께 기울임각 역시 최적설계가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 국토교통 기술촉진사업을 통하여 수행된 연구임(16CTAP-C114946-01).

참고문헌(References)

- [1] Di Pilato, M., Perotti, F., and Fogazzi, P. (2008) 3D Dynamic Response of Submerged Floating Tunnels Under Seismic and Hydrodynamic Excitation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.30, No.1, pp.268-281.
- [2] 김승준, 박우선, 원택희(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 the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.36, No.6, pp.955-967 (in

- Korean).
- [3] Østlid, H. (2010) When is SFT Competitive? *Procedia Engineering*, Elsevier, 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 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, Japan, pp.27-32.
- [5] Remseth, S., Leira, B.J., Okstad, K.M., Mathisen, K.M., and Haukås, T. (1999) Dynamic Response and Fluid/Structure Interaction of Submerged Floating Tunnels, *Computers and Structures*, Elsevier, Vol.72, pp.659-685.
- [6] Dong, M.-S., Miao, G.-P., Yong, L.-C., Niu, Z.-R., Pang, H.-P., and Hou, C.-Q. (2012) Effect of Escape Device for Submerged Floating Tunnel (SFT) on Hydrodynamic Loads Applied to SFT, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Elsevier, Vol.24, No.4, pp.609-616.
- [7] 오상호, 박우선, 장세철, 김동현(2013) 규칙파 실험에 의한 수중터널의 거동 및 동수역학적 특성 고찰, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제33권, 제5호, pp.1887-1895.
- 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 (in Korean).
- [8] American Petroleum Institute (2005) *Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures* (API RP 2SK), USA.
- [9] American Petroleum Institute (2010) *Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms* (API RP 2T), USA.
- [10] Det Norske Veritas (2010) *Position Mooring* (DNV-OS-E301), Norway.
- [11] Det Norske Veritas (2008) *Offshore Mooring Chain* (DNV-OS-E302), Norway.
- [12] Det Norske Veritas (2011) *Fatigue Design of Offshore Steel Structures* (DNV-RP-C203), Norway.
- [13] Garrett, D.L. (1982) Dynamic Analysis of Slender Rods, *Journal of Energy Resource Technology*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.104, No.4, pp.302-306.
- [14] Lawson, L., Chen, E.Y., and Meshii, M. (1999) Near-threshold Fatigue: A Review, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.21(Suppl 1), pp.S15-S34.
- [15] Yang, H.Z., and Li, H.J. (2011) Sensitivity Analysis of Fatigue Life Prediction for Deepwater Steel Lazy Wave Catenary Risers, *Science China Technological Sciences*, Science China Press, Vol.54, No.7, pp.1881-1887.
- [16] American Society for Testing and Materials (2005) *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis* (ASTM E1049), USA.
- [17] 박진은, 경갑수, 안용모, 권순철(2011) 실험데이터 분석을 통한 지역난방 열배관의 피로안전성 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.569-579.
- Park, J.E., Kyung, K.S., An, Y.M., and Kwon, S.C. (2011) Fatigue Evaluation of District Heat Pipes Based on the Measured Data, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.5, pp.569-579 (in Korean).
- [18] 손정민, 신승호, 홍기용(2015) 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템의 등가설계파 기법 적용에 관한 연구, 한국해양환경·에너지학회지, 한국해양환경·에너지학회, 제18권, 제3호, pp.135-142.
- Sohn, 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 (in Korean).

요 약 : 부유식 구조물의 계류선의 설계는 강도뿐만 아니라 피로수명 측면에서도 검토가 반드시 요구된다. 일반적으로 계류선의 피로 설계에는 동적 응력을 야기하는 하중이 지배적인 영향을 미치게 된다. 즉, 파랑이 주요 설계 하중으로 고려가 된다. 본 연구에서는 불규칙 파랑에 대한 해중 터널 계류선의 피로 손상 특성에 대해 분석한다. 시간 이력 유체-구조 동역학 해석을 통해 특정 환경 하중에 대한 해중 터널의 동적 운동 및 계류선에 발생하는 장력과 응력을 계산하고, Rainflow 집계법 및 Palmgren-Miner의 법칙 그리고 DNV 기준에서 제시하는 해양구조물 설계를 위한 S-N 곡선을 고려하여 단기 피로 손상을 추정한다. 해중 터널의 계류 형식과 유사한 계류 형식을 갖는 인장각 플랫폼의 텐던 설계를 참고하여 100년 재현 주기 파랑이 48시간 지속되는 조건을 가정하여 이 환경 하중에 의한 피로 손상도를 추정한다. 본 해석 절차를 따르며, 함체의 홀수와 계류선의 간격 및 초기 기울임 각도가 피로 손상도에 미치는 영향을 분석한다.

핵심용어 : 해중 터널, 계류선, 피로, 유체-구조동역학해석, 불규칙 파랑
