

# 해중터널의 운동특성 및 계류선의 피로설계를 위한 전체계 해석 Global Performance Analysis for Motional Characteristics Investigation of Submerged Floating Tunnels and Fatigue Design of Mooring Systems

김승준<sup>\*†</sup>, 원덕희<sup>\*\*</sup>

Seungjun Kim<sup>\*†</sup>, Deokhee Won<sup>\*\*</sup>

**Abstract** This research presents the methodology of global performance analysis to investigate the serviceability of the submerged floating tunnels (SFTs) and fatigue design of mooring lines. A SFT moored at the specific underwater location is continuously affected by waves and currents. Especially waves induce the dynamic behavior of the submerged floating structure. To be used as the transportation system for land connection, it is very important that the motion of SFTs should be effectively controlled with securing sufficient structural safety. This research suggests the rational global performance analysis methodology of the SFTs for investigating their dynamic characteristics. By the suggested analysis method, the dynamic behavior of the floating tunnel and fatigue performance of the mooring lines are studied.

**Keywords** : Submerged floating tunnel, Hydrodynamics, Global performance analysis, Mooring, Fatigue

**초 록** 본 연구는 유체-구조 동역학 해석기법을 통한 해중터널의 사용성 및 계류선의 피로설계를 위한 전체계 해석기법을 다룬다. 해중터널은 일정 수심 이하에 계류된 구조형식을 갖추는데, 본 구조물이 놓이는 환경적 특성에 따라 조류와 파랑에 직접적인 영향을 받고, 특히 파랑은 본 부유식 구조물의 동적 거동을 지속적으로 유도한다. 해중터널이 바다를 건너는 열차 및 차량의 교통수단으로 사용되려면 주요 구조물의 안정성 확보 뿐 만 아니라 파랑 등의 환경하중에 의한 운동성이 효과적으로 제어되어야 한다. 본 연구에서는 해중터널이 받는 주요한 설계 환경하중에 대한 동적 거동에 대한 명확한 해석기법에 대해 제안한다. 본 해석기법을 통해 불규칙 파랑에 대한 해중터널 함체의 운동특성 및 계류선의 피로손상특성이 연구된다.

**주요어** : 해중터널, 유체동역학해석, 전체계해석, 계류선, 피로

## 1. 서 론

해중 터널은 바다 및 큰 강을 건너는 새로운 교통시설물로서, 일정 수심 이하에 계류시스템에 의해 그 위치가 제어된다. 즉 해중 터널은 크게 터널 본체와 계류시스템으로 구분 할 수 있고, 해중 터널의 구조 특성 상 터널과 계류선 간의 상호작용은 매우 민감하게 나타난다.

† 교신저자: 대전대학교 공과대학 건설안전방재공학과(skim@dju.kr)

\* 대전대학교 공과대학 건설안전방재공학과 \*\* 한국해양과학기술원 연안방재연구센터

해중 터널은 구조물이 놓이는 환경적 특성에 따라 파랑 및 조류의 영향을 직접적으로 받고, 이러한 하중 성분은 해중 터널의 주요 부재 설계에 지배적인 역할을 하게 된다. 즉, 해중 터널을 이루는 주요 구조 부재의 합리적인 설계를 위해서는 설계 환경 하중조건 하에서 해중 터널의 운동특성과 주요 부재에 발생하는 내력 및 응력에 대한 명확한 해석이 수행되어야 한다. 이러한 목적에 따라, 본 연구는 환경하중을 지배적으로 받는 해중 터널의 동적 거동 특성 및 해중 터널의 위치 제어를 위한 계류선의 피로 성능 평가를 위한 전체계 해석에 대해 다룬다. 또한 해중 터널을 지지하는 주요 구조부재인 계류선의 피로설계를 위한 피로손상도 평가기법에 대해 다루고, 계류선 배치 특성에 따른 해중 터널의 주요 동적 거동 및 계류선 피로성능 특성에 대해 분석한다.

## 2. 부유식 해중 터널의 전체계 해석을 위한 이론 및 유사 구조물의 피로설계기준

### 2.1 Slender rods의 유체-구조 동역학 해석 이론

해중 터널을 구성하는 주요 구조 부재인 터널 본체와 계류선은 모두 slender rod로 가정할 수 있다. 이에 따라 Garrett [1]의 slender rods 동역학이론을 적용할 수 있다.

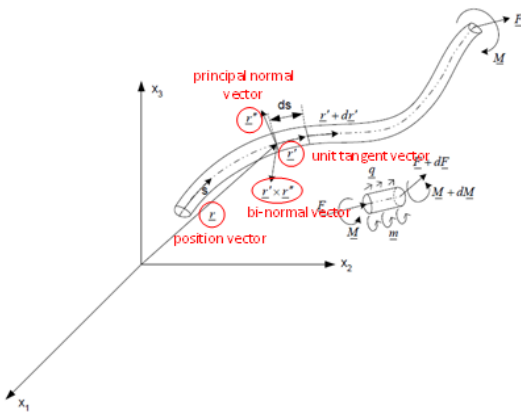


Fig. 1 Configuration of the slender rods [1]

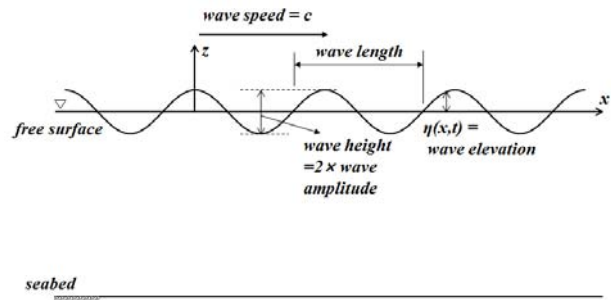


Fig. 2 General definition of a linear wave [2]

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

$$\lambda = T - Bk^2 \quad (2)$$

$$(\vec{r}' \cdot \vec{r}' - 1)/2 = T/A_t E \approx \lambda/A_t E \quad (3)$$

여기서,  $B$ =bending stiffness,  $T$ =tensile force,  $k$ =local curvature,  $m$ =mass per unit length,  $q$ =distributed force on the rod per unit length,  $\lambda$ =Lagrnge multiplier,  $E$ =elastic modulus,  $A_t$ =effective sectional area

식 (1)에서 수중 slender rod가 받는 단위 길이당 하중  $q$ 는 단위 길이당 자중 및 정/ 동적 유체력으로 구분할 수 있고, 동적 유체력은 Morison equation을 통해 slender rods의 관성력, 부가 질량에 의한 관성력 그리고 유체에 의한 항력 성분을 모두 고려할 수 있다.

$$q_n = C_I \rho A_t \dot{v}_n + 0.5 C_D \rho D |v_{nr}| v_{nr} + C_M \rho A_t \ddot{v}_n \quad (4)$$

여기서,  $C_I$ ,  $C_D$  and  $C_M$  =inertia, drag, and added mass coefficient, respectively,  $\dot{v}_n$ ,  $v_{nr}$ , and  $\ddot{v}_n$ =normal fluid acceleration, normal relative velocity, and normal structural acceleration, respectively,  $\rho$  and  $D$ =fluid density and outer diameter of the rod

파력에 의한 동적 유체력 계산 시 특정 파랑에 의한 slender rods와 접하는 물입자의 속도 및 가속도 성분을 고려해야 한다. 이는 Fig. 2의 wave potential 이론에 입각하여 고려가 가능하다. 즉, 식 (5)와 같은 선형 파랑이 작용할 때 수면 하 임의의 위치 (x,z)에서의 물 입자의 속도는 수식 (6), (7)과 같고, 이를 시간에 따라 적분한 것이 가속도가 된다.

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

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

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

실제 해역에 작용하는 불규칙 파랑을 수치적으로 모사하기 위해 본 연구에서는 식 (8)과 같은 JONSWAP wave spectrum을 이용하였다.

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

여기서,  $f_m = 1/T_p$ ,  $T_p$ =peak period,  $H_s$ =significant wave height

$\alpha$ =spectral energy parameter,  $b = \exp(-1/2\sigma^{-2}[f/f_m - 1]^2)$ .

$\sigma = \sigma_1$  for  $f \leq f_m$ ,  $\sigma_2$  for  $f > f_m$ .  $\gamma$ =shape factor,

## 2.2 유사구조물의 피로설계기준 (Tension Leg Platform의 텐던 부재)

아직까지 해중 터널의 실제 시공 사례가 존재하지 않기 때문에, 해중 터널 전용 설계 기준 또한 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 인장력을 받는 해중 터널의 계류선의 피로 설계를 위해 해중 터널과 유사한 구조 특성을 갖는 구조물의 설계기준을 참고하였다. 해중 터널과 유사한 구조 상태를 갖는 Tension Leg Platform (TLP)의 Hull은 부력이 자중보다 크도록 설계되기 때문에 부상하려는 성질에 대해 강관으로 구성된 텐던 (Tendon) 부재가 이를 지지하게 된다. API(American Petroleum Institute) 2T [3]는 텐던의 강도 및 피로설계기준을 제시하고 있는데, 이 중 텐던의 피로설계기준은 크게 A. 단기 피로 검토와 B. 장기 피로 검토 항목으로 나뉜다. 단기 피로 검토조항은 100년 이상 재현 주기를 갖는 환경하중이 36-48시간 지속될 때, 이 하중에 의해 발생하는 누적 피로손상지수가 0.01 이하가 되도록 한다. 또한, 장기 피로 검토조항은 플랫폼의 설계 사용수명보다 10배 이상의 피로수명을 갖도록 한다.

### 3. 수치해석을 통한 파랑 중 해중 터널의 전체계 해석

#### 3.1 불규칙 파랑 중 해중 터널의 동적 거동 특성

본 연구에서는 2장에서 언급한 유체-구조 동역학 이론을 바탕으로 범용 동적구조해석 프로그램을 통해 파랑 중 해중 터널의 전체계 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용하는 해석기법의 신뢰도는 Kim et al. [2]의 해석적 연구에서 한국해양과학기술의 규칙 파랑 중 해중 터널 단위 모델의 동적 거동 실험연구[4]와의 직접비교검증을 통해 입증되었으므로 본 논문에서는 이를 생략한다.

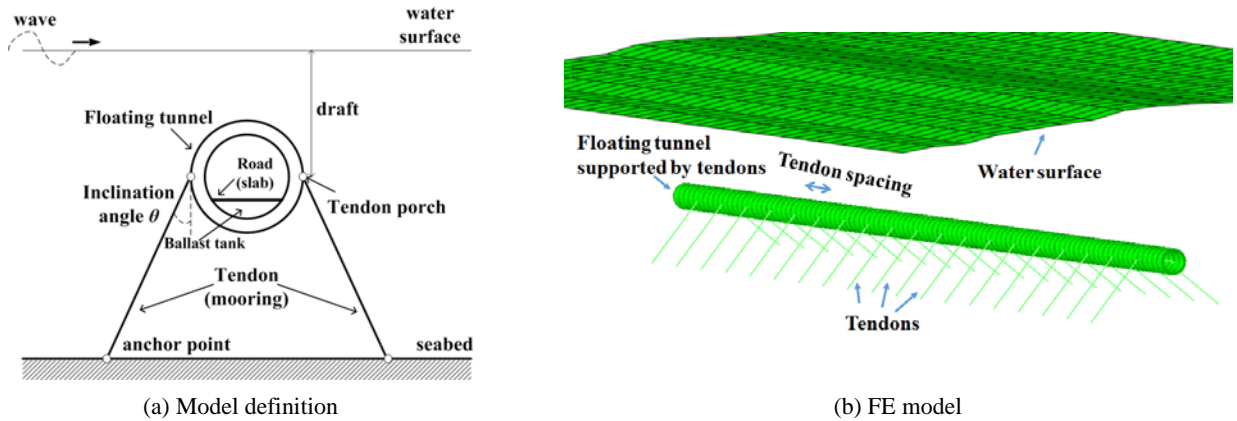
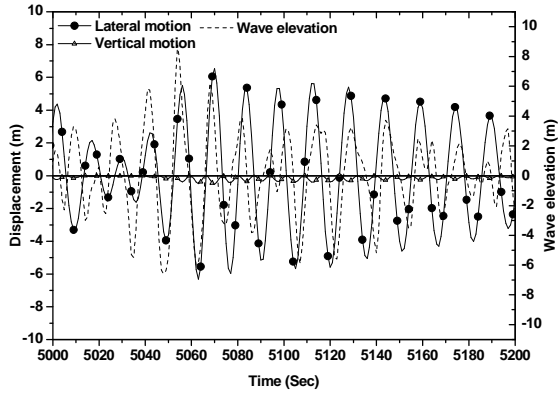


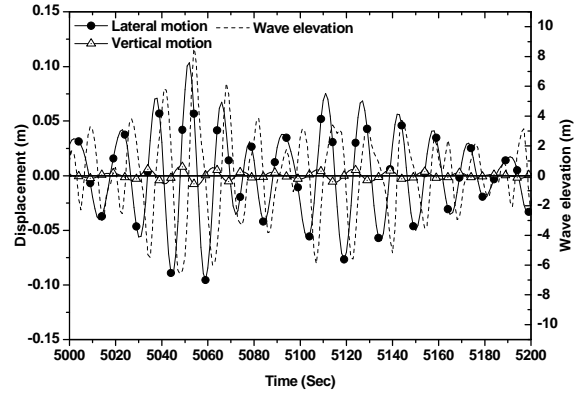
Fig. 3 Studied SFT conceptual model [5]

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 길이 1.0 km의 해중 터널의 동적 거동 및 계류선 피로손상특성을 다룬다. 튜브의 직경은 19.4m, 단면 2차 모멘트 및 단면적은 각각 2243.0m<sup>4</sup>, 81.8m<sup>2</sup>이며 탄성계수는 17.0GPa, 단위길이 당 무게는 259.5 tonf/m이다. 계류선은 외경 0.533 m, 두께 0.04m의 X70 grade 강관 텐던을 적용하였고, 텐던의 배치간격은 25.0m, 기울임각은 30°~60°의 범위로 고려하였다. 본 해석연구에서는 터널 및 계류선 모두 항력계수 및 부가질량 계수를 각각 1.2, 1.0을 적용하였다. 대상해역의 평균 수심 150.0m, 홀수는 110.0m이고, 본 해석에 고려한 불규칙 파랑은 유의파고 ( $H_s$ ) 11.32m, 첨두주기 ( $T_p$ ) 15.1초의 JONSWAP wave spectrum을 통해 고려하였다. 이러한 조건을 고려한 시간이력 유체-구조 동역학 해석은 ABAQUS AQUA (V6.13)를 통해 수행하였고, 고려한 불규칙 파랑에 대한 3시간의 시간이력해석을 수행하였다.

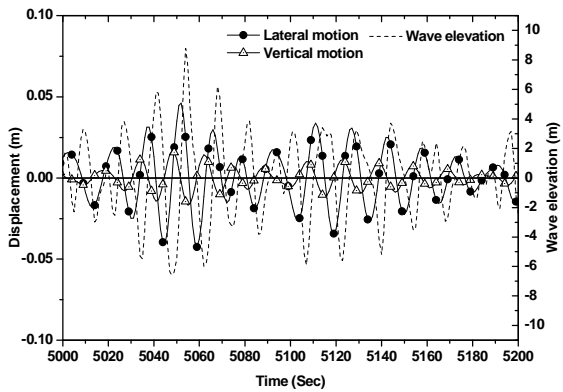
해중 터널의 전체계 해석 결과, 텐던의 기울임각에 따라 터널의 수직 및 수평운동이 민감하게 변화하였다. 기울임이 커질수록 텐던에 의한 수평 방향 강성이 증대되어 터널의 수평운동은 효과적으로 감소하지만, 반대로 수직 방향 강성이 감소함에 따라 터널의 수직운동은 오히려 증가한다. 텐던의 긴장력 변화에 의한 동적 수직응력은 터널의 수직 및 수평운동 모두에 영향을 받는다. 즉, 텐던의 기울임각은 1차적으로 터널의 운동특성에 영향을 미치게 되는데, 이것은 결과적으로 텐던 단면에 발생하는 동적 응력에 영향을 미치게 된다. 텐던의 피로 설계 시에는 텐던 단면에 수직방향으로 작용하는 동적 응력의 변동범위 및 평균이 피로손상에 직접적인 영향을 미치므로 터널의 수직 및 수평방향 동적 운동의 효과적인 제어와 계류선에 발생하는 동적응력의 감소를 모두 만족하는 최적의 계류선 배치 형태에 대한 연구가 필요하다.



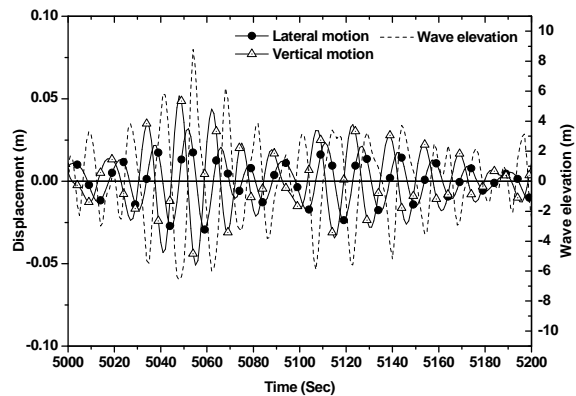
(a) tendon inclination=0°



(b) tendon inclination=30°



(c) tendon inclination=45°



(d) tendon inclination=60°

Fig. 4 Time-series tunnel motion due to the irregular wave with  $H_s=11.32\text{m}$ ,  $T_p=15.1\text{sec}$

### 3.2 불규칙 파랑 중 계류선의 단기피로손상

불규칙 파랑에 대한 해중 터널의 전체계 해석을 통해 계류선 단면에 발생하는 시간이력 동적응력을 얻을 수 있고, 이는 Rainflow counting 을 통해 동적응력의 개별 응력범위 (stress range) 및 반복횟수 (cycle)을 정리할 수 있으며, 이를 S-N 곡선과 함께 Miner's Rule을 이용하여 피로손상지수를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 DNV RP C203의 S-N 곡선 중 F 곡선[6]을 적용하여 단기피로손상특성을 분석하였다.

분석 결과, 고려한 모든 해석 경우에 대해서 API 2T의 단기피로손상도 기준을 만족하는 것으로 평가되었고, 특히 계류선의 초기 기울임각이 45° 일 때 피로손상지수가 최소가 되는 것으로 나타났다.

Table 1 Short-term fatigue damage of the tendon due to the harsh irregular wave for 48 hours

| Initial inclination angle (deg) | 30      | 45      | 60      |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| Short-term fatigue damage index | 1.7E-03 | 5.1E-05 | 9.4E-04 |

## 4. 결 론

본 논문에서는 유체-구조 동역학 해석 이론을 바탕으로 한 합리적인 해중 터널의 전체계 해석기법에 대하여 다루었다. 본 해석 기법을 통해 기울임각이 있는 텐던으로 계류된 해중 터널에 극심한 불규칙 파랑이 작용할 때의 터널의 운동 및 계류선의 피로손상 특성에 대해 분석하였다. 본 연구 결과, 계류선의 기울임각은 터널의 운동성능 및 피로손상에 직접적인 영향을 미치는 주요한 설계인자인 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2016R1D1A1A02937083)

## 참고문헌

- [1] D.L. Garrett (1981) Dynamic analysis of slender rods, *Journal of Energy Resources Technology*, 104(4), pp. 302-306.
- [2] S. Kim, W.S. Park, D.H. Won (2016) Hydrodynamic analysis of submerged floating tunnel structures by finite element analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 36(6), pp. 955-967.
- [3] American Petroleum Institute (2005) *Planning, designing, and constructing tension leg platforms (API 2T)*, API Publishing Services, Washington DC, USA
- [4] 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*, 33(5), pp. 1887-1895.
- [5] S. Kim, D.H. Won (2017) Investigation of fatigue damage of the mooring lines for submerged floating tunnels under irregular waves, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 29(1), pp. 49-60.
- [6] Det Norske Veritas (2011) *Fatigue design of offshore steel structures (DNV-RP-C203)*, DNV, Oslo, Norway