

# 지반 접속부 설계에 따른 수중터널의 동적 거동 특성에 대한 수치해석적 연구

강석준<sup>1</sup> · 박주현<sup>2</sup> · 조계춘<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>비회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

## Numerical Analysis for Dynamic Behavioral Characteristics of Submerged Floating Tunnel according to Shore Connection Designs

Seok-Jun Kang<sup>1</sup> · Joohyun Park<sup>2</sup> · Gye-Chun Cho<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil and Civil and Environmental Engineering, KAIST

\*Corresponding Author : Gye-Chun Cho, gyechun@kaist.edu

### Abstract

Submerged floating tunnels must be connected to the ground to connect continents. The displacement imbalance at the shore connection between the underground bored tunnel and submerged floating tunnel can cause stress concentration, accompanying a fracture at the shore connection. The elastic joint has been proposed as a method to relieve the stress concentration, however, the effect of the elastic joints on the dynamic behavior should be evaluated. In this study, the submerged floating tunnel and shore connection under dynamic load conditions were simulated through numerical analysis using a numerical model verified through a small-scaled physical model test. The resonant frequency was considered as a dynamic behavioral characteristic of the tunnel under the impact load, and it was confirmed that the stiffness of the elastic joint and the resonant frequency exhibit a power function relationship. When the shore connection is designed with a soft joint, the resonant frequency of the tunnel is reduced, which not only increases the risk of resonance in the marine environment where a dynamic load of low frequency is applied, but also greatly increases the maximum velocity of tunnel when resonance occurs.

**Keywords:** Submerged floating tunnel, Shore connection, Elastic joint, Dynamic stability, Resonant frequency

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
25(1)27-41(2023)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.1.027>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received January 5, 2023

Revised January 25, 2023

Accepted January 27, 2023



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

수중터널은 내륙 간 연결을 위해 지반에 접속되어야 한다. 지반 접속부에 연결된 지중터널과 수중터널이 보이는 변위 불균형은 응력 집중을 야기할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 방법으로 탄성 조인트를 활용할 경우에는 정적 하중 조건에서 지반 접속부의 응력 집중은 해소시킬 수 있음이 선행 연구에서 확인되었다. 그러나, 지속적으로 거동하는 수중터널의 구속조건을 고려했을 때 지반 접속부의 동적 거동과 안정성에 탄성 조인트의 활용이 미치는 영향이 검토되어야 한다. 본 연구에서는 동적 하중 조건의 수중터널 및 지반 접속부를 수치해석적 방법을 통해 모사하였으며, 동일 상황을 모사한 축소 모형시험을 통해 수치해석 모델을 검증하였다. 다양한 물성의 탄성 조인트가 설치될 경우에 대한 수치해석적 모사를 통해 탄성 조인트 강성에 따른 수중터널의 고유진동수 변화와 공진 거동을 분석하였다. 그 결과, 조인트의 강성과 고유진동수가 역함수 관계를 가짐이 확인되었다. 낮은 강성의 조인트로 지반 접속부가 설계될 경우, 수중터널의 고유진동수는 감소하여 낮은 진동수의 동하중이 가해지는 해양 환경에서 공진의 위험이 증가할 뿐만 아니라 공진 발생 시 최대 속도가 크게 증가하였다. 그러므로, 수중터널 지반 접속부의 응력 집중 해소와 공진 방지를 동시에 고려하여 지반 접속부를 설계해야 할 것으로 판단된다.

**주요어:** 수중터널, 지반 접속부, 탄성조인트, 동적안정성, 고유진동수

## 1. 서 론

바다나 강으로 인해 단절된 내륙 간 이동을 위해서는 특별한 교통수단 또는 교량 및 터널과 같은 경로의 활용이 필요하다. 해수면 위로 경로를 제공하는 대표적인 방법으로 항공기, 선박, 교량 등의 방법이 있으나, 이러한 방법들은 기상조건이나 내륙 간 거리에 의해 이동 가능성이 크게 변화한다는 한계를 가진다. 이 방법들에 대한 대안으로서 해저면에 터널 모듈을 침설시켜 경로를 제공하는 침매터널과 해저면 하부에 시공되는 해저터널이 제안되어 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나, 이러한 유형의 터널들은 시공성 및 경제성 측면에서 해저면의 심도에 큰 제약을 받기 때문에 깊은 심도의 해저면이 위치한 지역에 적용되기 어렵다는 한계가 있다(Jiang et al., 2018). 해당 한계를 극복할 수 있는 수단으로서 수중터널(Submerged floating tunnels, SFT)이 제안되었다(Grant, 1986). 수중터널은 해수면에 위치하여 부력을 제공하는 구조체인 폰툰(pontoon) 또는 해저면에 설치되어 수중터널을 고정시키는 계류선(mooring line)을 통해 의도된 수심에 부유된 채로 운영되는 방식의 터널로, 수면 위의 기상 상황이나 파도의 영향을 적게 받는다는 이점을 가지기 때문에 활발히 연구되고 있다(Haukås and Remseth, 1997). 수중터널은 조류 및 파랑 하중으로 인해 동하중 조건에 놓이는데, 지반 내부에 위치하는 터널에 비해 낮은 구속조건에 놓이기 때문에 변위를 완벽히 제한하기보다 약간의 동적 거동을 허용하도록 설계된다(Long et al., 2009). 이러한 수중터널이 내륙 간 경로를 제공하기 위해서는 터널이 수중에서 지반으로 접속되어야 하기 때문에 수중터널의 지반 접속부에서는 지중터널과 수중터널이 연결되어야 한다(Xiao and Huang, 2010). 지반에 의해 구속되는 지중터널과 그것에 비해 상대적으로 자유롭게 거동하는 수중터널은 동하중 조건에서 큰 수준의 변위 불균형을 보이며, 그로 인해 지반 접속부에서 응력의 집중이 발생할 위험이 존재하기 때문에 수중터널 설계 시

지반 접촉부의 안정성이 필수적으로 고려되어야 한다(Kang et al., 2020). 지속적인 동적 거동을 보이는 수중터널의 안정성 고려 시에는 정적 하중 조건에서 응력 집중에 대한 검토뿐만 아니라 동적 거동 특성 평가를 통한 공진 발생 여부에 대한 검토가 필요하다.

수중터널 설계에 관한 선행 연구들은 주로 수중에 침설된 터널의 동적 거동에 초점을 맞추어 다양한 수중터널 설계 인자들의 영향에 따른 수중터널의 동적 응답에 관해 분석해왔다(Mazzolani et al., 2007; Martinelli et al., 2010; NPRA, 2016). 수중터널을 특정 심도의 수중에 부유할 수 있도록 하는 다양한 계류 방법들이 제안되었으며(Jakobsen, 2010), 계류 방법에 따른 동적 응답의 변화가 분석되었다(Jin et al., 2020). 적절한 동적 안정성을 확보할 수 있는 수중터널의 설계를 위해서는 터널의 구조적 인자의 동적 거동에 대한 영향도를 분석하거나(Youshi and Fei, 2010), 동하중의 특성에 따른 터널의 거동 특성을 검토하며(Cifuentes et al., 2015), 수중터널의 부력대 중량비에 따른 수중터널의 동적 안정성에 대해 평가하는(Jin and Kim, 2017) 연구들이 수행되어왔다. Jin and Kim (2021)과 같이 수중터널에 대한 수치해석적 연구를 수행한 선행 연구들은 수중터널의 동적 거동에 대한 주요 설계변수의 영향을 평가하기 위해 수중터널의 최대 변위 및 모드 분석에 따른 모드 형상과 고유진동수를 평가하였다. 그러나, 대부분의 선행 연구들은 수중터널의 지반 접촉부를 고려하지 않은 채 지반이 위치할 수중터널의 양쪽 끝을 고정단으로 가정하였으며, 지반 접촉부에서 발생할 수 있는 응력 집중이나 지반 및 접촉부 설계로 결정되는 수중터널 끝단의 구속조건의 변화는 고려하지 않았다.

일부의 선행 연구는 수중터널 지반 접촉부를 간소화된 형태로 모사하여 그 효과를 분석하였다. Xiao and Huang (2010)은 지반 접촉부를 수중터널의 경계조건으로서 고려하여 수중터널에 지진하중을 가하는 수치해석적 모사를 통해 수중터널의 양쪽 끝단이 고정단일 경우에서 지진에 의한 수중터널의 동적 응답이 극대화됨을 확인하였으나, 지반이나 지중터널을 모사하지 않았다. Kang et al. (2020)은 지반 및 지중터널에 대한 모사를 포함하여 수중터널의 지반 접촉부를 모사하였으며, 두 터널의 변위 불균형으로 인한 응력 집중 발생과 탄성 조인트를 통한 응력 집중의 해소를 확인하였으나, 정적 하중 조건에서의 응력 집중만을 관찰하였기 때문에 수중터널의 동적 안정성에 대한 고려가 부족하다.

따라서, 본 연구에서는 동하중 조건에서 수중터널 지반 접촉부의 탄성 조인트를 설치할 때 수중터널의 동적 거동 특성을 평가하기 위한 수치해석적 연구를 수행하였다. 수중터널 지반 접촉부의 수치해석적 모사를 위해 절벽 형태의 지반에 위치하는 지중터널과 수중터널의 경계면 및 두 터널을 연결하는 탄성 조인트가 간소화된 형태로 가정되었다. 수중터널의 동적 거동 특성을 평가하기 위한 지표로서 1차 모드의 고유진동수가 고려되었으며, 고유진동수의 도출을 위해 수중터널에 충격하중이 가해짐에 따라 터널의 자유진동을 관찰하였다. 간소화된 수중터널 지반 접촉부의 수치해석 모델은 동일 상황을 모사하는 축소모형시험을 통해 검증되었다. 수치해석 모델을 이용하여 두 터널을 연결하는 지반 접촉부의 설계로서 고려된 링 형태의 탄성 조인트가 수중터널의 동적 거동 특성에 미치는 영향이 분석되었다. 동적 하중 조건에서 수중터널 및 지반 접촉부의 안정성에 대한 탄성 조인트 설계 방법의 영향을 이해하기 위해 고정단의 지반 접촉부가 아닌 다양한 강성의 탄성 조인트가 고려된 지반 접촉부 설계에 따른 수중터널의 동적 거동 특성을 비교하였다.

## 2. 수중터널 지반 접속부 고려 조건

본 연구에는 수중터널 지반 접속부 설계에 초점을 맞추기 위해 지반 접속부의 지반 및 구조물들의 형상을 Fig. 1과 같이 단순화하였다. 수중터널과 지중터널은 절벽 형태의 지반에서 연결되며, 해저면에 설치되어 수중터널을 안정적으로 지지할 수 있다고 보고된(Jin and Kim, 2018) 계류선 타입의 수중터널이 고려되었다. 자중보다 큰 부력을 가지는 수중터널은 지반 접속부와 계류선에 의해 61.5 m 심도에 위치되는 상황이 모사되었다. 계류선으로 인해 구분되는 수중터널 모듈들은 서로 다른 동적 거동 특성을 보이기 때문에(Jin and Kim, 2018) 50 m 길이의 단일 수중터널 모듈만이 고려되었으며 단일 수중터널 모듈은 한쪽 끝에서 지반 접속부와, 나머지 한 쪽에서는 수직 방향의 변위를 제한하는 계류선과 연결된다. 수중터널의 동적 거동 특성과 지반 접속부의 설계 간 관계를 명확히 파악하기 위해서 해저면의 변위와 계류선의 변형은 무시하였다.

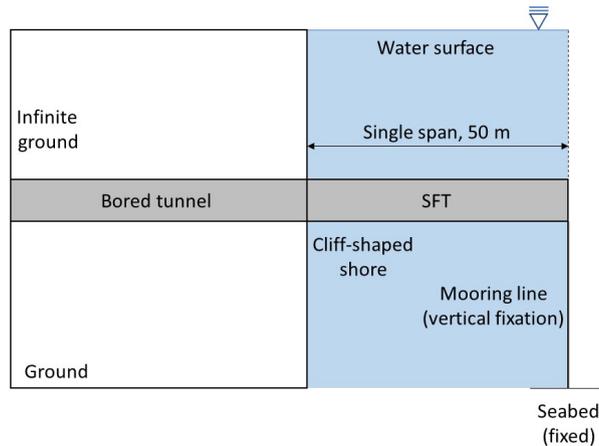


Fig. 1. Simplified condition of the shore connection of submerged floating tunnel

## 3. 수치해석 방법

지반 및 지중터널에 연결된 수중터널의 동적 거동 특성 평가를 위하여 충격 하중 재하 후의 자유 진동을 관찰하는 동적 해석이 수행되었다. 3차원 수치 모델은 Itasca 사의 상용 소프트웨어 FLAC 3D (ver. 5.0)를 이용하여 조성되었다. 수중터널이 위치한 상황과 자유진동을 유도하기 위한 충격하중은 Jin and Kim (2017)에서 모사한 수중터널의 수치 모델과 해석 결과에서 관찰된 수중터널 작용 동하중의 크기를 기반으로 설정되었다. 평가하고자 하는 지반 접속부의 설계 조건은 지중터널과 수중터널의 탄성 조인트 및 지반의 강성으로 설정하였다.

### 3.1 수치해석 모델

수치해석 모델은 단일 모듈의 수중터널, 지반 접속부, 지중터널, 그리고 지반을 모사한다(Fig. 2). 수치 모델을

구성하는 요소의 최대 길이는 동하중의 요소 간 전달을 명확히 모사할 수 있도록 식 (1)의 조건을 만족하는 0.5 m 로 설정하였다(Kuhlemeyer and Lysmer, 1973).

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \tag{1}$$

여기서,  $\Delta l$ 는 수치 모델의 요소 크기를,  $\lambda$ 는 입력 동하중의 최대 진동수를 나타낸다. 지반을 나타내는 수치 모델을 반무한한 지반으로서 모사하기 위해 정적 해석과 동적 해석에서 지반의 경계조건을 다르게 적용하였다. 정적 해석 시 반무한 지반 모사를 위해서는 지반의 경계를 해석 시 주요하게 관찰하고자 하는 수중터널 지반 접촉부로부터 충분히 멀리 위치시킨 채로 지반면의 연직 방향으로의 변위를 고정하는 방식으로 경계조건을 설정하였다. 정적 해석을 통한 지반 및 터널의 응력 상태 모사 이후 동적 해석 수행 시에는 점성 경계 조건을 통해 파동이 반사되지 않고 흡수되도록 하였다. 점성 경계 조건에서는 경계면에 법선 및 전단 방향으로 댐퍼 요소를 설치하며, 식 (2) 및 (3)에 나타나는 견인력을 통해 경계면에서 동하중이 소실되도록 한다(Lysmer and Kuhlemeyer, 1969).

$$t_n = -\rho C_p v_n \tag{2}$$

$$t_s = -\rho C_s v_s \tag{3}$$

여기서,  $t_n$ 과  $t_s$ 는 각각 연직방향 및 전단방향 견인력을,  $v_n$ 과  $v_s$ 는 경계면에 위치한 수치 요소의 연직방향 및 전단 방향 속도를 나타내며,  $\rho$ 는 요소의 밀도, 그리고  $C_p$ 와  $C_s$ 는 각각 p파 및 s파 속도를 의미한다. 본 연구에서는 수중터널에서 발생하여 지반 접촉부를 통해 지반까지 전달되는 파동이 적절히 반영될 수 있도록 해양 경계면을 제외한 모든 지반 경계면에 점성 경계를 적용하였다.

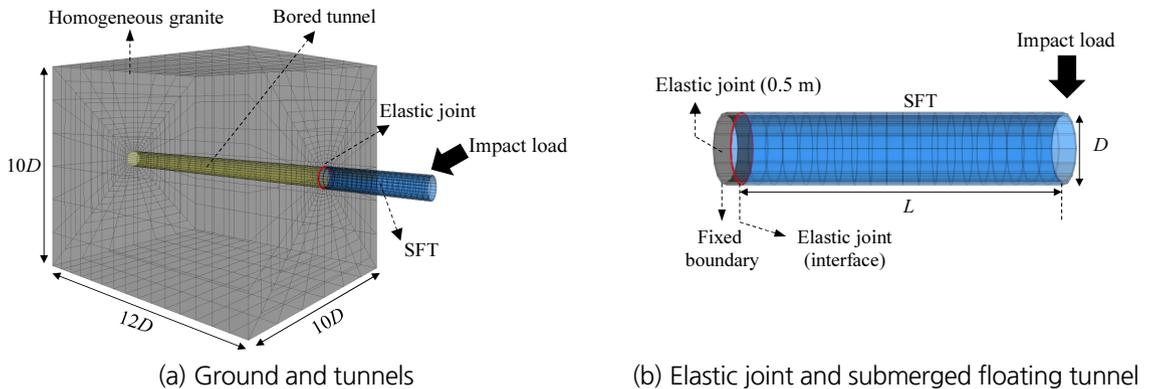


Fig. 2. Numerical model for the submerged floating tunnel and shore connection

수치해석 모델에서 지반은 균일한 화강암으로 모사되었다. 지반의 탄소성 거동을 반영하기 위해 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여 지반을 조성하였다. 지중터널과 수중터널을 연결하는 탄성 조인트는 그 강성의 효과를 명확히 파악하기 위해 선형 탄성 모델을 이용하여 구성하였으며, 지반 및 터널을 모사하기 위해 가정된 형상 및 물성은 Table 1과 Table 2와 같이 일반적인 화강암 및 콘크리트 터널의 재료적 특성을 갖는 것으로 가정하였다. 23 m의 동일한 직경을 갖는 수중터널과 지중터널은 0.5 m 길이의 링 조인트를 통해 연결되며, 링 조인트와 각 터널 간 연결은 인터페이스 모델을 통해 강체를 이용해 체결된다. 따라서 각 터널과 링 조인트의 파단이나 상대적인 변위는 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

**Table 1.** Input properties of the ground model

Type	Input value
Rock type	Granite
Constitutive model	Mohr-Coulomb
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,700
Elastic modulus (GPa)	40
Shear modulus (GPa)	16
Bulk modulus (GPa)	26.7
Friction angle (°)	39
Cohesion (MPa)	10
Tensile strength (MPa)	16

**Table 2.** Assumptions for the numerical simulation of tunnel structures

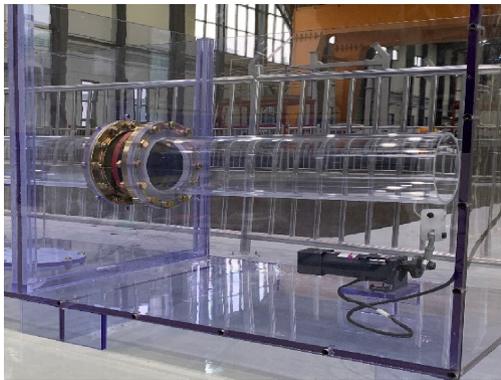
Type	Assumption
Tunnel material	Concrete
Constitutive model	Linear elastic
Tunnel diameter (m)	23
Elastic modulus (GPa)	30
Material density (kg/m <sup>3</sup> )	3,000
Tunnel segment thickness (m)	1.0
Tunnel segment length (m)	50

### 3.2 축소모형시험을 통한 수치해석 모델 검증

수치 모델을 통해 모사한 지반 및 터널 구조물은 일반적인 수치해석적 연구에서 확인할 수 있는 일반적인 모델 구성 방법을 통해 모사될 수 있으나, 지중터널과 수중터널을 연결하는 탄성 조인트의 모사와 탄성 조인트와 각 터널 간 경계는 수중터널의 동적 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 예상될 뿐만 아니라 모사 방법이 선행 연구들을 통해

파악되기에 어려움이 있다. 따라서, 수치해석 결과에서 탄성 조인트의 설치에 따른 수중터널의 동적 거동 특성 변화를 명확히 평가하기 위해서는 접합 형태의 인터페이스로 터널과 탄성 조인트 간 연결을 모사한 수치 모델의 검증 과정이 필요하다. 본 연구에서는 간소화된 수중터널 지반 접촉부 상황(Fig. 1)을 모사하는 축소 모형 시험을 통해 수치 모델을 검증하고자 하였다.

축소 모형 시험은 Fig. 3과 같이 지반에 대한 모사를 배제하고 탄성 조인트와 수중터널 모형의 동적 거동을 파악하는 것을 목적으로 설계되었다. 탄성 조인트는 에틸렌 프로필렌 강화고무를 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 제작되었으며, 고무에 연결된 금속 브라켓을 이용하여 터널 모형과 볼트 체결되었다. 수중터널은 아크릴을 이용한 원통형 관으로 모사되었다. 수중터널 모형 외부에서 작용하는 충격 하중에 대한 동적 응답 측정 시스템은 PCB piezotronics사의 전자 해머 및 가속도계와 KEYSIGHT사의 오실로스코프를 이용하여 구성되었다. 오차의 최소화를 위해 터널 전반에 세 개의 가속도계를 설치하고, 외부에 전자 해머를 통해 충격 하중을 발생시킨 후의 터널의 자유진동을 가속도계를 이용하여 측정하였다.



(a) Acrylic model simulating the tunnel module



(b) Reinforced rubber joint

Fig. 3. Physical model for the scaled situation of shore connection

가속도계를 통해 측정된 터널의 동적 응답은 시간 영역으로 측정되었으며, 고속 푸리에 변환 알고리즘을 통해 진동수 영역으로 변환되어 가장 큰 크기를 가지는 진동수를 터널 모형의 고유진동수로서 도출하였다. 그 결과, 에틸렌 프로필렌 강화고무를 이용해 수중터널을 지반에 접속시키는 경우, 아크릴 터널 모형의 고유진동수는 약 38 Hz임이 확인되었다.

축소 모형 시험의 상황을 전절에서 소개된 수치 모델에 에틸렌 프로필렌 고무 조인트 및 아크릴 터널 모형의 형상 및 물성(Table 3)을 입력함으로써 동일하게 모사하였다. 전자 해머에서 습득된 충격 하중의 시간 이력 데이터를 수치 모델에 외부 동하중으로 입력함으로써 수치해석적 방법으로 아크릴 터널 모형의 자유진동이 모사되었다. 축소 모형 시험 절차와 동일하게, 터널 가속도의 시간 영역 결과를 고속 푸리에 변환을 통해 진동수 영역으로 변환한 결과, 고유진동수가 약 36.5 Hz인 것으로 나타났다. 본 연구에서 소개된 수치 모델은 축소 모형 시험과 매우

유사한 공진 진동수를 도출하므로 수중터널의 지반 접촉부에 설치되는 탄성 조인트의 수치 모델 내 반영이 적절함을 검증할 수 있다. 그러므로, 수치 모델에서 각 터널과 탄성 조인트는 상대변위 발생이 없는 접합 연결로 모사되며, 양측의 접합 사이에 다양한 강성을 가지는 탄성 조인트가 설치되는 상황들을 통해 지반 접촉부의 설계 변화가 평가될 수 있다.

**Table 3.** Properties of the small-scaled model

Type	Value
Density of acrylic (MPa)	1,200
Elastic modulus of acrylic (GPa)	3.0
Poisson's ratio of acrylic	0.35
Density of rubber (kg/m <sup>3</sup> )	960
Elastic modulus of rubber (MPa)	5.0
Tensile strength of rubber (MPa)	11.0
Poisson's ratio of rubber	0.45

### 3.3 해석 조건

수중터널과 지반 접촉부는 해양 및 지반공학적 환경 요소들의 영향을 받는다. 해양 환경을 고려하기 위해 수중터널 외벽에 작용하는 정수압, 수중터널 구조체에 작용하는 부력, 그리고 자유진동을 모사할 수 있는 충격 하중 형태의 동하중을 모사하였다. 수중터널이 위치하는 해양 환경적 요소들은 선행 연구(Jin and Kim, 2017)를 기반으로 수중터널 수심 약 60 m, 부력대 중량비 1.3, 정수압 620 kPa 조건에 위치한다고 가정되었다. 동일 선행 연구에 따르면, 해당 환경 조건에서 수중터널에 작용하는 동하중은 26 MN의 최대 진폭과 2 Hz의 최대 진동수를 가지는 하중으로 간소화될 수 있다. 따라서, 본 연구에서 수중터널의 자유진동을 야기하기 위한 충격하중은 26 MN의 크기를 가지며, 2 Hz 이하의 진동수 영역이 포함되는 동하중이 발생하도록 설정되었다. 지중터널의 지반공학적 환경조건을 고려하기 위해 지반-터널 간 상호작용을 수치 모델에 모사하였다. 지중터널과 지반의 경계면 특성을 기반으로 지반-터널 상호작용을 적용하였으며, Itasca (2013)에서 제공하는 경계면 결합 강성( $k_{coupling}$ )은 식 (4)와 같이 정의될 수 있다.

$$k_{coupling} = \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] \quad (4)$$

여기서,  $K$ ,  $G$ , 그리고  $\Delta z_{min}$ 은 각각 경계면에 위치하는 지반의 체적 탄성 계수, 전단 계수, 그리고 경계면에 인접한 지반 요소의 최소 길이를 의미한다.

본 연구에서는 지반 접속부의 설계에 따른 수중터널의 동적 거동 특성 변화를 분석하기 위하여 앞서 소개된 구조 및 환경 조건을 유지한 채 탄성 조인트의 강성과 지반의 강성을 변화시켜가며 매개변수 분석을 수행하였다. 매개변수 분석을 위해 수행되는 수치해석 사례들 내 변경되는 탄성 조인트의 강성은 1, 2, 4, 8, 16, 32 MPa로 설정하였으며, 지반의 강성은 포아송비를 유지한 채 탄성계수를 변화시키며 고려되었으며, 각 사례에서 지반의 탄성계수는 4, 8, 12, 16, 20 GPa로 설정하였다. 각각의 지반 강성 조건에서 탄성 조인트의 강성 변화를 모사함으로써 수중터널 동적 거동에 대한 탄성 조인트 강성의 효과가 지반 조건 차이에 따라 변화하는 양상을 분석하고자 하였다.

본 연구에서 분석하고자 하는 수중터널의 동적 거동 특성을 도출하기 위해서 수치 모델의 조성 및 초기 응력조건 모사, 충격하중 재하, 동적 응답 도출, 그리고 시간 영역 결과의 변환 과정이 수행되었다. Fig. 2에 나타나는 수치 모델에 각 해석 사례에서 관찰하고자 하는 지반 및 탄성 조인트 강성을 적용한 뒤, 정적 평형 상태를 모사함으로써 동하중 작용 이전의 수중터널 지반 접속부 응력 분포를 조성하였다. 정적 평형 상태에서 충격 하중이 가해진 뒤, 시간 영역에서 수중터널 모델의 수직방향 속도가 관찰되었다. 수중터널 진동수의 최소값을 0.1 Hz로 가정하여 10초 동안의 응답이 수집되었으며, 해당 결과를 고속 푸리에 변환을 통해 진동수 영역으로 환산함으로써 고유진동수가 도출되었다. 간소화된 수중터널과 탄성 조인트는 방사방향으로 균일한 형상 및 물성을 가지도록 설계되었기 때문에 수직방향과 수평방향의 동적 거동 특성이 동일하다. 따라서, 본 연구에서는 가장 큰 동적 거동이 발생할 것으로 예상되는 수중터널의 횡방향 진동만을 고려하였다. 또한, 모드 분석을 통한 동적 거동 분석 방법과 다르게 충격하중에 따른 고유진동수를 도출하는 방법을 활용함으로써 여러 모드 형상과 그에 상응하는 고유진동수를 검토하기보다 가장 큰 에너지로 진동하는 성분의 고유진동수를 파악하는 것에 집중하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

본 절에서는 수중터널의 자유진동을 모사함으로써 고유진동수로 대표되는 동적 거동 특성을 파악하고, 지반 접속부의 설계 변수로서 탄성 조인트와 지반의 강성을 변화시키며 따른 고유진동수의 변화를 분석하기 위한 해석 결과에 대해 기술하였다. 탄성 조인트 및 지반의 강성은 본 해석의 매개변수로 설정되었으며, 각 해석 사례에서 변수가 되는 탄성 조인트 강성 또는 지반 강성을 제외한 타 특성들은 동일하게 적용되었다.

### 4.1 탄성 조인트 강성의 효과

탄성 조인트의 강성을 변화시키며 수중터널 횡방향 자유진동에 대해 측정하고, 그것을 바탕으로 횡방향의 고유진동수를 파악한 결과, 설치되는 탄성 조인트의 강성이 증가함에 따라 고유진동수가 증가하며, 조인트 강성이 클수록 그 증가폭이 감소함을 확인하였다(Fig. 4). 여섯 가지 조인트 강성에 대한 해석 결과를 바탕으로 조인트 강성과 고유진동수 간 관계를 유추한 결과, 고유진동수는 탄성 조인트 강성을 밑으로 하며 고정된 지수를 가지는 거듭제곱 형태의 멱함수로 표현될 수 있다. 멱함수의 계수는 매우 낮은 강성을 가지는 탄성 조인트 설치 시 수중터널의 고유진동수를 나타내므로, 자유단 조건에서의 고유진동수임을 추론할 수 있다. 멱함수의 지수는 탄성 조인

트의 강성 변화로 인한 고유진동수의 변화 정도를 나타내며, 이는 수중터널의 구조적인 특성에 따라 변화할 것으로 예상된다. Kang et al. (2020)에서 관찰되었던 지반 접촉부에서 발생하는 응력 집중은 낮은 강성의 탄성 조인트를 설치함으로써 해소될 수 있다. 동적 거동 특성을 고려했을 때, 응력 집중 해소를 위한 낮은 강성의 조인트 활용은 수중터널의 고유진동수를 감소시키는 효과를 보인다.

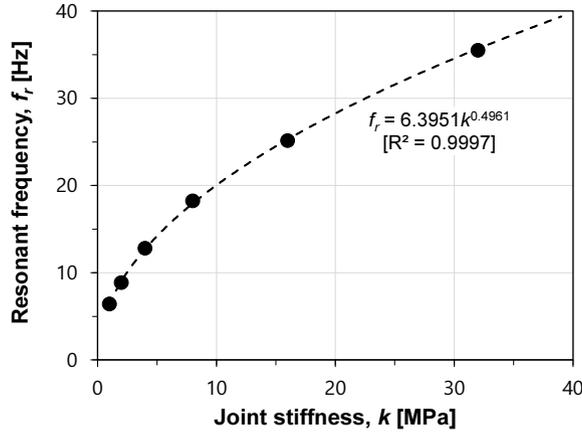


Fig. 4. Relationship between the resonant frequency and joint stiffness

#### 4.2 지반 강성의 효과

수치해석적 방법으로 모사된 지반 모델은 지반 접촉부에서 지중터널을 구속하는 탄성체로서 작용하며, 이는 수중터널의 거동을 끝단에서 제한하는 경계조건의 역할을 한다. 그러므로, 지반의 탄성계수의 변화에 따라 수중터널의 동적 거동 특성이 변화하는 양상이 관찰되었다. 지반 강성에 따른 수중터널의 고유진동수 변화는 탄성

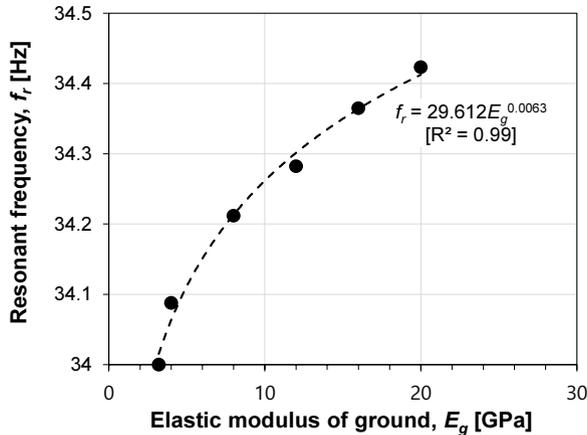


Fig. 5. Effect of the ground elastic modulus on the resonant frequency

조인트의 강성을 변화시킨 경우와 유사하게 나타났다(Fig. 5). 지반 강성과 수중터널의 고유진동수 또한 멱함수 관계를 보였으나, 탄성 조인트 변화에 따른 고유진동수의 변동 폭에 비해 지반 강성에 따른 고유진동수 변화가 적었다. 이에 따라 지반 강성과 고유진동수의 멱함수 형태의 관계에서 매우 작은 지수 값이 확인되었다.

각 지반 강성에 대해 여섯 가지의 조인트 강성들을 적용시켜 해석을 수행한 결과, 조인트 강성에 따른 고유진동수의 변화 양상은 유지되었으나, 높은 지반 강성의 경우에서 전반적인 고유진동수의 분포가 증가되는 것이 확인되었다(Fig. 6). 이 결과는 수중터널 지반 접속부에서 지반과 탄성 조인트가 직렬로 연결되어 두 가지 스프링의 결합된 강성으로 작용하는 경우와 상응하는 양상을 보인다. 이론적 및 수치해석적 선행 연구들은 터널과 지반의 상호작용을 간단히 모사하기 위해 지반과 터널의 상호작용을 연직 및 전단방향의 스프링으로 모사한 바 있는데 (Sae-Long et al., 2021), 지반 접속부를 해당 개념으로 표현하면 지반을 나타내는 스프링과 탄성 조인트를 나타내는 스프링이 직렬 연결되는 것으로 표현될 수 있다. 그러므로, 수중터널의 동적 거동 특성을 조절하기 위한 지반 접속부 설계에 있어서 지반의 강성과 탄성 조인트의 강성이 동시에 고려되어야 할 것으로 판단된다.

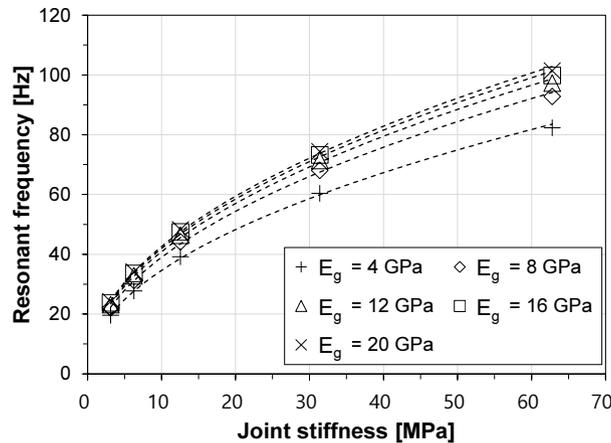


Fig. 6. Relationships between the resonant frequency and joint stiffness with various ground stiffnesses

#### 4.3 지반 접속부 설계 변화에 따른 공진 거동 비교

수중터널의 동적 거동 특성은 지반 접속부에서 지반의 강성 및 탄성 조인트의 강성에 따라 크게 변화할 수 있음이 이전 절에 기술된 결과를 통해 확인되었다. 본 절에서는 서로 다른 강성의 조인트 설치로 인해 다양한 고유진동수를 가지는 수중터널에 다양한 진동수의 동하중이 작용할 경우의 수중터널 동적 응답에 대해 관찰한 결과가 도시되었다. 수중터널의 고유진동수와 유사한 진동수의 동하중이 작용하는 경우, 공진으로 인해 동적 거동이 증폭되면서 수중터널 및 지반 접속부의 파괴 위험이 증가한다. 다양한 탄성 조인트 조건에서 공진 발생으로 인한 수중터널 변위의 증폭 정도를 비교하고자 각각 0.48, 0.96, 1.2, 2.41, 그리고 9.16 Hz의 고유진동수를 가지는 수중터널 수치 모델을 구성하였으며, 상대적으로 낮은 진동수의 파랑하중 및 열차에 의한 교통하중을 포함하는 진동

수 영역의 동하중 모사를 위해 각각 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz의 단일 진동수를 가지는 정현파 형태의 동하중을 수중터널 끝단에 작용시켰을 때 동적 응답을 관찰하였다.

수치해석 결과, 각 해석 모델에 조성된 수중터널의 고유진동수에 가까운 진동수를 가지는 동하중이 작용되는 경우에서 수중터널의 동적 거동이 크게 증폭되는 것이 확인되었다(Fig. 7). 공진이 발생하지 않을 때 수중터널의 속도는 모든 고유진동수의 경우에서 유사하게 나타났으나, 낮은 강성의 탄성 조인트가 설치된 경우에는 공진으로 인한 거동의 증폭이 크게 발생함이 확인되었다.

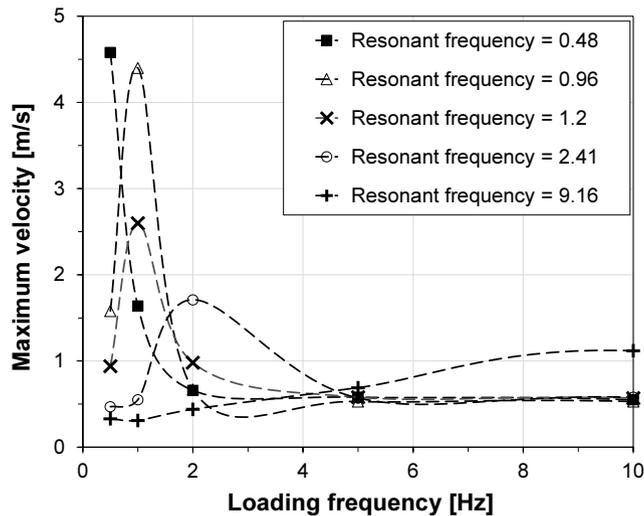


Fig. 7. Maximum velocity of the submerged floating tunnels with various joint designs when the frequency of dynamic load acting on the tunnel changes

정적 하중 조건에서 지반 접촉부에 발생하는 응력 집중은 낮은 강성의 탄성 조인트를 활용함으로써 해결될 수 있음이 확인되었으나(Kang et al., 2020), 본 연구에서 도출된 동적 거동 특성에 따르면 낮은 강성의 조인트 활용 시 고유진동수가 낮아지면서 공진 발생 시 수중터널 거동의 증폭이 증가한다. 해양 환경 조건에서 수중터널에 작용할 하중의 진동수 대역이 매우 낮은 영역에 분포하는 것을 고려했을 때, 낮은 강성의 탄성 조인트는 고유진동수를 감소시켜 공진 발생의 위험성을 증가시키고 동시에 공진 발생 시 피해의 증가를 야기할 수 있다. 그러므로, 응력 집중 해소를 위한 탄성 조인트의 활용 시, 지반 및 수중터널의 특성을 고려하여 설계하는 탄성 조인트의 강성을 적용한 고유진동수 분석을 통해 수중터널 지반 접촉부 시공 환경에서 공진의 발생 위험을 판단하는 과정이 선행되어야 한다. 수중터널 시공 현장 및 터널의 설계가 결정된 상황에서 응력 집중을 최소화함과 동시에 고유진동수를 외부 동하중의 진동수와 근접하지 않도록 설정할 수 있는 강성의 탄성 조인트를 산정하는 것이 지반 접촉부 설계에 있어서 수중터널의 동적 안정성을 향상시킬 수 있는 방법이라 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수중터널의 동적 거동 특성으로서 간주되는 고유진동수가 지반 접속부의 설계에 따라 변화하는 양상을 파악하기 위한 수치해석적 연구가 수행되었다. 지반 접속부에서 발생하는 응력 집중을 해소시킬 수 있는 방법으로 제안된 낮은 강성의 탄성 조인트의 활용이 수중터널의 동적 거동에 미치는 영향이 검토되었으며, 다양한 강성의 지반 및 탄성 조인트를 모사한 수치해석 결과들을 진동수 영역으로 변환시켜 도출된 고유진동수를 비교하였다. 수치해석적 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 수중터널 지반 접속부의 탄성 조인트에 대한 수치해석 및 실험적 모사에서 도출된 고유진동수가 유사하다는 점을 통해 탄성 조인트를 접합 형태의 인터페이스와 선형 탄성 모델로 구성하는 방법이 실제 상황을 적절히 모사함을 검증하였다.
2. 수중터널의 고유진동수와 탄성 조인트의 강성은 멱함수 관계를 가지며, 해당 관계식은 자유단 상태에서의 고유진동수 및 수중터널의 구조적 특성이 각각 계수와 지수에 반영될 것으로 예상된다.
3. 지반의 강성의 변화는 탄성 조인트의 강성 변화 시와 마찬가지로 수중터널의 고유진동수와 멱함수 관계를 가지나, 지수의 크기가 작아 고유진동수 변화의 폭이 적은 것으로 나타났다. 이는 탄성 조인트의 강성이 지반에 비해 매우 낮기 때문으로 예상되며, 이러한 특징은 두 가지 탄성체가 직렬 형태로 연결되었기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.
4. 수중터널의 지반 접속부를 낮은 강성의 탄성 조인트로 설계할 경우, 지반 접속부에 발생하는 응력 집중은 일부 해소될 수 있으나, 공진에 대한 위험성 및 공진 발생 시 증폭되는 변위의 크기가 증가함이 확인되었다. 그러므로, 탄성 조인트를 이용한 지반 접속부 설계 시에는 응력 집중을 감소시키고 동시에 공진에 대한 동적 안정성을 고려하여 적정 수준의 강성을 가지도록 설계하여야 한다.
5. 본 연구는 수치해석적 방법을 통해 수중터널 지반 접속부의 탄성 조인트가 수중터널의 고유진동수에 미치는 영향을 평가하고 두 인자 간 관계를 도출하였으나, 그 관계에 대한 심도 깊은 분석이 부족하다는 한계를 가진다. 그러므로, 추후 연구에서는 지반 접속부 설계에 따른 수중터널의 고유진동수의 변화에 대해 이론적 방법으로 접근하고, 다양한 설계인자를 대상으로 하는 매개변수연구를 통해 상세한 관계식 도출이 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2017R1A5A1014883)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 저자 기여도

강석준은 연구 설계, 데이터 분석 및 원고 작성을 하였고, 박주현은 데이터 수집을 하였고, 조계춘은 연구 설계 및 원고 검토를 하였다.

## References

1. Cifuentes, C., Kim, S., Kim, M.H., 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.
2. Grant, A.B. (1986), "A submerged floating tunnel solution to a crossing for the Strait of Messina", *Proceedings of the Symposium on Strait Crossings*, Stavanger, Norway, pp. 365.
3. Haukås, T., Remseth, S. (1997), "Global dynamic analysis of floating submerged tunnels", *Proceedings of the 10th Nordic Seminar on Computational Mechanics*, October 24-25, Tallinn, Estonia.
4. Itasca (2013), *FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Online Manual, Itasca Consulting Group, U.S. Minneapolis, pp. 175-180.
5. Jakobsen, B. (2010), "Design of the submerged floating tunnel operating under various conditions", *Procedia Engineering*, Vol. 4, pp. 71-79.
6. Jiang, B., Liang, B., Wu, S. (2018), "Feasibility study on the submerged floating tunnel in Qiongzhou strait, China", *Polish Maritime Research*, Vol. 2, pp. 4-11.
7. Jin, C., Kim, M.H. (2017), "Dynamic and structural responses of a submerged floating tunnel under extreme wave conditions", *Ocean Systems Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 413-433.
8. Jin, C., Kim, M.H. (2021), "The effect of key design parameters on the global performance of submerged floating tunnel under target wave and earthquake excitations", *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 128, No. 1, pp. 315-337.
9. Jin, C., Kim, M.H. (2018), "Time-domain hydro-elastic analysis of a SFT (submerged floating tunnel) with mooring lines under extreme wave and seismic excitations", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 12, 2386.
10. Jin, R., Gou, Y., Geng, B., Zhang, H., Liu, Y. (2020), "Coupled dynamic analysis for wave action on a tension leg-type submerged floating tunnel in time domain", *Ocean Engineering*, Vol. 212, 107600.
11. Kang, S.J., Kim, J.T., Cho, G.C. (2020), "Preliminary study on the ground behavior at shore connection of submerged floating tunnel using numerical analysis", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 133-142.
12. Kuhlemeyer, R.L., Lysmer, J. (1973), "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 99, No. 5, pp. 421-427.
13. Long, X., Ge, F., Wang, L., Hong, Y. (2009), "Effects of fundamental structure parameters on dynamic responses of submerged floating tunnel under hydrodynamic loads", *Acta Mechacica Sinica*, Vol. 25, pp. 335-344.
14. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of the Engineering*

Mechanics Division, Vol. 95. No. 4, pp. 859-877.

15. Martinelli, L., Barbella, G., Feriani, A. (2010), "Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input", *Procedia Engineering*, Vol. 4, pp. 311-318.
16. Mazzolani, F.M., Landolfo, R., Faggiano, B., Esposito, M. (2007), "A submerged floating tunnel (Archimedes bridge) prototype in the Qiandao lake (PR of China): research development and basic design", *Costruzioni Metalliche*, Vol. 5, pp. 45-63.
17. NPRA (2016), Bjørnafjord submerged floating tube bridge: K3/K4 technical report, in: Søreide, T.H. (ed.), *Norwegian Public Roads Administration*, pp. 121-199.
18. Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Hansapinyo, C., Prachasaree, W., Rungamornrat, J., Kwon, M. (2021), "Non-linear flexibility-based beam element on Winkler-Pasternak foundation", *Geomechics and Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 371-388.
19. Xiao, J., Huang, G. (2010), "Transverse earthquake response and design analysis of submerged floating tunnels with various shore connections", *Procedia Engineering*, Vol. 4, pp. 233-242.
20. Youshi, H., Fei, G. (2010), "Dynamic response and structural integrity of submerged floating tunnel", *Procedia Engineering*, Vol. 4, pp. 35-50.