

# 지진하중을 받는 해중터널의 유탄성 거동에 관한 수치해석적 연구

## Hydroelastic analysis of submerged floating tunnels under seismic loads

김정호\* · 서승일\*\* · 사공명\*\*\* · 이필승†  
**Jeong-Ho Kim, Sung Il Seo, Myung Sagong, Phill-Seung Lee**

### 1. 서 론

해중터널(submerged floating tunnel; SFT)은 단면에 비해 그 길이가 매우 긴 구조적 특성으로 인해 구조체의 연성 및 파랑(wave)과 해류(current)의 상호작용 해석이 필수적이다. 또한 지진 시 앵커와 계류선을 통하여 전달되는 지진파에 대한 영향도 고려해야 한다. 하지만 기존의 많은 연구는 강체로 가정하여 해중터널을 해석하거나(1), 계류선의 거동에 초점을 맞춘 제한적인 해석(2), 또는 소형의 터널 구조물 거동 해석을 수행하여(3) 구조물의 거시적 응답을 제대로 고려할 수 없었다.

본 연구에서는 지진하중 작용 시 유체-구조 상호작용(fluid-structure interaction)을 고려한 수중터널의 3차원 유탄성 해석 기법을 개발(4)하였다. 지진하중에 의한 유체-구조 상호작용은 모리슨(Morison)식을 선형화하여 고려하였으며, 수중터널의 시간영역에서의 유탄성 해석을(5) 수행하였다. 터널은 연속체 역학 기반의 3차원 보 요소(continuum mechanics based 3-D beam element)를(6) 이용하여 모델링 하였으며, 임의의 터널 제원 및 환경조건을 설정하여 지진파의 종류와 진행방향에 따른 동적 거동 특성을 비교 분석 하였다.

### 2. 수중터널 내진해석의 수행 절차

#### 2.1 운동방정식

수중터널의 내진해석을 위한 수학적 모델 유도를 위하여 본 연구에서는 강체로 가정된 평평한 해저지

반과 이에 대하여 평행한 평면방향으로 지반운동이 전파되며, 유체의 흐름이 없는 조건으로 가정하였다.

계류선은 자중보다 부력이 큰 터널을 일정 깊이에 설치하기 위한 지지조건으로 항상 직선상태를 유지하는 것으로 가정하였다. 내진해석을 위한 운동 방정식 유도를 위하여 모리슨식의 선형화를 통해 외부 유체의 상호작용 효과를 고려하였으며, 최종 식은 다음과 같다.

$$[\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{added}] \ddot{\mathbf{U}}_s(t) + [\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_w(t)] \dot{\mathbf{U}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s(t) = -[\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{added}] \ddot{\mathbf{U}}_g(t) - \mathbf{R}_{drag}(t)$$

이 때,  $\mathbf{M}_s$ ,  $\mathbf{C}_s$ ,  $\mathbf{K}_s$ 는 각각 해중터널의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며,  $\mathbf{M}_{added}$ ,  $\mathbf{C}_w$ ,  $\mathbf{R}_{drag}$ 는 각각 유체효과로 인한 부가질량행렬, 감쇠행렬, 항력벡터를 의미한다. 변위벡터  $\mathbf{U}$ 에 대하여 아래첨자  $s$ 는 해중터널의 상대변위를 의미하며,  $g$ 는 지반변위이다.

해중터널의 유탄성 해석 모델은 그림 1과 같다. 여기서  $H$ 와  $h$ 는 각각 전체 수심과 해수면으로부터 해중터널 설치위치까지의 거리를 의미하며,  $u_f$ 와  $u$ 는 각각 해중터널의 수평 절대변위와 지반변위에 따른 상대변위를 의미한다. 유체의 변위를 의미하는  $u_f$ 는 앞서 기술된 가정조건에 의해 0이 된다.

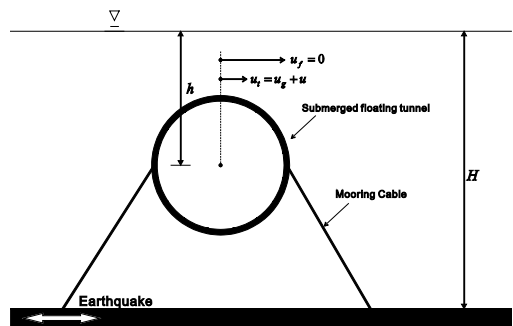


Figure 1 Hydroelastic model of SFT

† 정회원, 한국과학기술원 해양시스템공학전공  
 E-mail : phillseung@kaist.edu  
 Tel : 042-350-1512, Fax : 042-350-1510

\* 한국과학기술원 해양시스템공학전공

\*\* 한국철도기술연구원 신교통연구본부

\*\*\* 한국철도기술연구원 신교통연구본부

## 2.2 수치해석 모델

수치해석을 수행하기 위하여 터널은 연속체 역학 기반의 3차원 보 요소를 이용하여 터널을 모델링 하였으며 계류선은 트러스 요소를 이용하여 모델링 하였다. 연속체 역학 기반의 보 요소는 단면적, 관성모멘트 등 빔의 단면계수들의 사전 계산이 불필요하고 터널 길이방향의 곡률 고려가 가능하며 기하학적 비선형성 또는 재료의 비선형성을 고려한 해석으로의 확장이 용이하다. 또한 다양한 단면 형상에 대한 모델링이 가능한 장점을 이용하여 터널 단면을 구성하는 유한요소의 이산화를 그림 2에 도식화 하였다. 감쇠효과는 레일리 감쇠로 가정하여 5%의 감쇠비(damping ratio)를 적용하였다. 시간영역 해석을 위하여 대표적인 시간적분 기법인 뉴마크 기법(Newmark method)을 적용하였다.

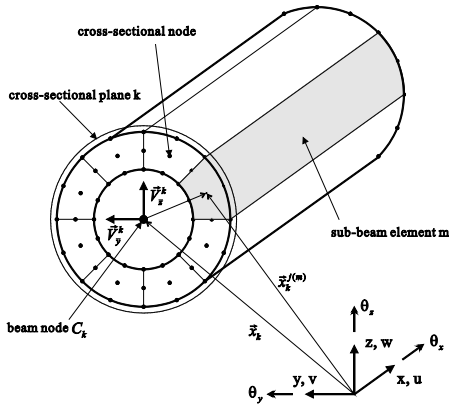


Figure 2 Continuum mechanics based beam finite element with a sectional discretization for SFT

## 2.3 내진해석

### (1) 입력지진

해중터널의 내진해석을 위하여 단일주파수의 인공 지진파와 대표적인 실제 지진기록인 El Centro와 Kobe 지진파를 선정하였다. 극한하중 조건에서 해석 결과를 확인하기 위하여 전체 구조물에 대하여 균등한 지진이 입력되는 조건으로 해석을 수행하였다. 입력지진의 특성은 표 1과 같다.

Table 1 Characteristics of selected ground motions

Earthquakes	PGA (g)	Dominant frequencies (Hz)
Harmonic	0.300	0.25
El Centro	0.313	0.83-2.30
Kobe	0.599	0.97-2.50

### (2) 해석 대상 해중터널

해중터널은 총 길이 10km의 직선노선, 외경 16m, 내경 13m로 기존 연구사례에서 다루지 않은 가장 큰 형식의 모델을 결정하였다. 수심은 120m이며, 해중터널의 중심은 해수면으로부터 40m 깊이에 위치한다. 계류선은 100m 간격으로 터널 좌우에 해저 지반과 60도의 각도로 설치되며 직경은 0.12m로 선정하였다. 터널과 계류선의 탄성계수는 각각 31GPa, 200GPa로 가정하고 터널 양단의 모든 자유도를 구속하여 해석을 수행하였다.

### (3) 해석결과

10km 해중터널의 내진해석 결과 각 지진입력에 따른 터널 중앙부의 수평변위응답을 그림 3과 같이 나타내었다. 이 때  $\theta$ 는 지진의 입사각을 의미하며 터널의 길이방향 축을 기준으로 0 deg.부터 단면방향인 90 deg.까지 총 4가지 입사각을 고려하였다. 10km 모델의 경우 실제 지진에 대하여 최대 변위가 20~30cm 정도로 터널의 경간에 비해 매우 작음을 확인하였다.

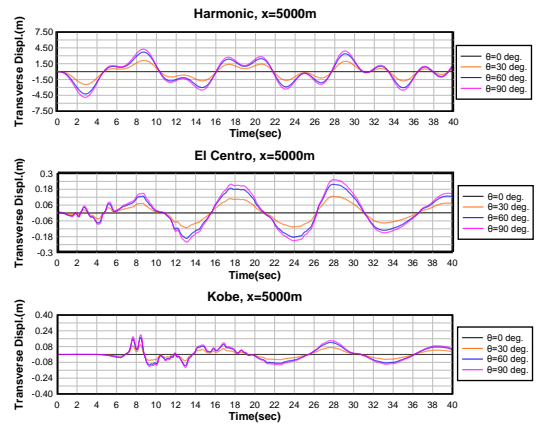


Figure 3 Displacement response time history for three ground motions

## 3. 결론

본 연구를 통하여 유체의 흐름이 없는 조건에서의 수중터널 내진해석을 위한 수치해석 기법을 개발하고 선행 연구사례에서 수행하지 못한 거시적 모델에 대하여 이를 적용하여 해석을 수행하였다. 각 지진입력에 따른 터널의 길이방향 및 단면방향의 변위, 속도, 가속도 최대응답을 표 2에 정리하였다.

터널의 동적 거동 응답의 분포를 통해 육지와 연결되는 터널의 양단 부근에서 가장 큰 응답의 변화가 발생하는 것으로 확인되었으며 이에 대하여 철도 교량의 궤도 안전성에 대한 검토를 통해 해중터널의 상세 설계 및 구체화가 실현 될 것으로 기대된다.

**Table 2** Maximum responses for the three ground motions

Ground motion		Max. Displ. (m)	Max. Vel. (m/s)	Max. Acc. (m/s <sup>2</sup> )
Harmonic	Longitudinal	6.1026	8.1931	11.5330
	Transverse	5.7402	5.3754	6.3287
El Centro	Longitudinal	0.2168	0.4698	4.7125
	Transverse	0.2897	0.4402	4.5995
Kobe	Longitudinal	0.3346	1.1305	7.9926
	Transverse	0.2608	1.0996	7.9510

## 후 기

본 연구는 2013년도 한국철도기술연구원(과제 코드: PK13005B-1)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참 고 문 헌

(1) Remseth, S., Leira, B. J., Okstad, K. M., Mathisen, K. M., Haukås, T., 1999, Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels, *Computers & Structures*, Vol. 72, Issues 4-5, pp. 659-685.

(2) Martinelli, L., Barbella, G., Feriani, A., 2011, A numerical procedure for simulating the multi-support seismic response of submerged floating tunnels anchored by cables, *Engineering Structures*, Vol. 33, Issue 10, pp. 2850-2860.

(3) Ge, F., Lu, W., Wu, X., Hong, Y., 2010, Fluid-structure interaction of submerged floating tunnel, *Procedia Engineering*, Vol. 4, pp. 263-271.

(4) Kim, J.H., 2012, Numerical method for seismic analysis of submerged floating tunnels, Master's thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea, 84 pages.

(5) Kim, K.T., Lee, P.S., Park, K.C., 2013, A direct coupling method for 3D hydroelastic analysis of floating structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 96, Issue 13, pp. 842-866.

(6) Yoon, K.H., Lee, Y.G., Lee, P.S., 2012, A continuum mechanics based 3-D beam finite element with warping displacements and its modeling capabilities, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 43, Issue 4, pp. 411-437.

(7) Yoon, K.H., Lee, P.S., 2014, Modeling the warping displacement fields for discontinuously varying arbitrary cross-section beams, *Computers and Structures*, Vol. 131, pp. 56-69.