

튜브형 수중교량의 교량-차량 동적상호작용 해석방법

Dynamic interaction analysis of submerged floating tunnel and vehicle

김 문 영† · 곽 중 원* · 민 동 주**

Kim, Moon-Young, Kwark, Jong-Won and Min, Dong-Ju

Key Words : Submerged floating tunnel, mode superposition, added mass, tension leg, dynamic interaction

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop the algorithm for dynamic interaction analysis of submerged floating tunnel and vehicles. The dynamic behavior characteristic of submerged floating tunnel is certainly different with general structures, because the submerged floating tunnel is floating in the middle of water, and subjected to constant buoyance. Therefore the analyses in various aspects should be carried out to secure structural stability and practicality of structures.

To conduct the dynamic interaction analysis, the structure is modeled by commercial FEM program ABAQUS to investigate modal characteristic. Also the added mass concept is applied to represent the inertial force by a fluid, and then dynamic interaction analyses are conducted with superposition method when the KTX is moving along the submerged floating tunnel. And the time histories are presented for vertical and lateral displacement at the center of the tunnel.

1. 서 론

기 호 설 명

- v : 유체의 수평속도
- $\partial v / \partial t$: 유체의 수평가속도
- C_m : 관성 계수
- C_a : 저항계수
- ρ_{added} : 관성력에 의해 추가되는 부가 단위질량
- ρ_w : 유체의 밀도
- D : Floating tunnel의 외경
- A' : Floating tunnel의 단면적
- M_b : 교량의 질량 행렬
- K_b : 교량의 강도 행렬
- C_b : 교량의 댐핑 행렬
- d_b : 교량의 절점 변위벡터

일반적으로 섬과 섬, 혹은 대륙 간을 연결하는 구조물로는 수면위의 교량이 보편화된 형태이나, 최근에 들어서 수중교량에 대한 관심이 급증하면서 다양한 연구와 실용화를 앞당길 수 있는 많은 공법들이 개발되고 있는 실정이다. 이러한 연구의 일환으로 부력에 의해 물속에 부유하거나(수중터널), 육상에서 제작한 각 구조물을 가라앉혀 물속에서 연결시켜 해저면 위에 건설되는 침매터널, 해저면 아래에 건설하여 교통용으로 이용하는 해저터널 등이 있다.

수중터널은 수중에 떠있다는 점과 외부환경이 공기중이 아닌 수중이라는 점, 그리고 부력이 항상 채하되어 있다는 점에서 일반적인 구조물과는 거동 특성이 확연히 틀리다. 그러므로 구조물의 실용성 및 구조적 안전성을 확보하기 위하여 다양한 각도에서의 해석이 요구된다. Tension leg를 지지하는 기초 및 지반에 대한 해석, 지진해석, 파랑 및 조류에 의한 구조물 상호작용 해석, 충동에 의한 파괴 거동해석, 연결부 및 앵커 해석, 방수 및 배수 등 다양한

† 교신저자; 성균관대학교 사회환경 시스템공학과
E-mail : kmye@skku.edu
Tel : 031-290-7514, Fax : 031-290-7540
* 한국 건설기술 연구원
** 성균관대학교 건설환경 시스템공학과

해석과 연구가 진행되고 있는 실정이다. ⁽¹⁾

국외에서 수중터널에 대한 연구는 더욱 활발하게 이루어지고 있다. 수중터널(SFT)관련 특허가 처음으로 노르웨이에서 승인(1923 & 1947)되었으며, 이를 바탕으로 노르웨이는 수중터널 project에 대한 지역으로 서부해안의 HØgsfjord를 선정하여 활발한 연구를 진행하였다. 이는 Lauvvik와 Oanes를 있는 project로써 길이 1400m, 최대 수심은 155m이다. 또한 이탈리아에서 Sicily의 mainland와 island를 가로지르는 messina 해협에 수중터널의 타당성에 대한 연구가 있었다. 이 지역은 Messina bridge가 건설될 지역으로도 유명한 곳이다. 타당성 분석결과 교량 건설로 선정되었지만 일반적인 교량의 대안으로써 수중 터널에 대한 수준 높은 연구가 진행된 바 있다. 또한 일본에서는 총 3개 구역에 대한 수중터널 건설계획을 가지고 연구를 진행하였는데 대표적으로 Sapporo와 Honshu북부 지역을 있는 Northern Japan Exchange Axis 프로젝트가 진행된 바 있다.

본 연구에서는 건설기술평가원의 “수중교량 핵심 요소의 설계 시제품 개발” 연구의 일환으로 수중교량에 초점을 맞추었으며, 수중교량에 관한 다양한 연구 중 동적거동 해석을 위한 구조물-차량-유체 상호작용 해석에 초점을 맞추어 효과적이고 비교적 간단한 해석 알고리즘을 개발하는데 그 목적이 있다. 우선 대상 수중 구조물의 형태 및 체원에 대해 기술하고, 구조물-유체의 상호작용을 묘사하기 위하여 added mass 개념의 도입하고 ⁽²⁾, 모드 중첩법을 이용한 차량-교량구조물의 동적 상호작용해석방법을 간략히 기술한다. 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수중교량을 모델링 하였으며, 고유치 해석을 통하여 얻은 고유진동수와 모드 형상을 이용하여 KTX차량 주행시의 동적 상호작용해석을 실시하여 수중교량의 수직방향 및 수평방향의 동적 거동을 파악하였다.

2. 수중터널 형식 및 대상 수중교량

수중 터널의 형태는 부력과 자중의 관계에 따라 크게 4가지로 분류할 수 있다. 그림1의 첫 번째 그림과 같이 부력이 자중보다 큰 경우(B>W)에는 Tension leg 형태의 구조물이 되고, 부력이 자중보

다 작은 경우(B<W)에는 Pontoons 형식이나 Column support 형태의 구조물이 된다. 부력과 자중이 같은 경우에는 지지케이블이나 기둥이 없는 자유형 구조물이 건설될 수 있다. 일반적으로 해중터널 설계시에 가장 많이 고려되는 형태는 Tension leg 형태의 구조물이다. ⁽³⁾

이러한 Tension leg 형태 수중터널의 장점으로는 수심이 깊고 횡단거리가 긴 경우에는 Tension leg 형태 수중터널이 타형식에 비해 경제성을 확보할 수 있으며, 또한 수면아래에 건설됨으로 해상교통의 방해가 적고 해상기상 상황에 따른 교통제한이 거의 없다는 장점을 가지고 있다.

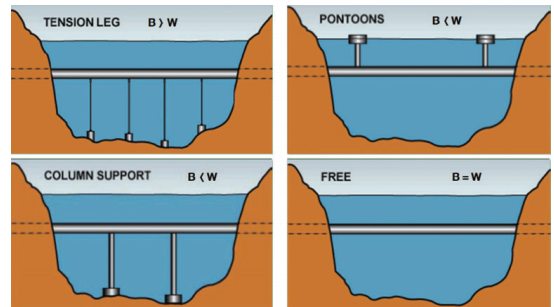


Figure 1. Submerged floating tunnel with different four types

대상 수중교량은 Tension leg 형태의 구조물로써 일본의 Funka만 연결구조물 중 2번과 3번 환기탑 구간 7km에 대해 검토하며, 수면 하 30m에 위치해 있으며, 단면 형상은 그림2와 같다.

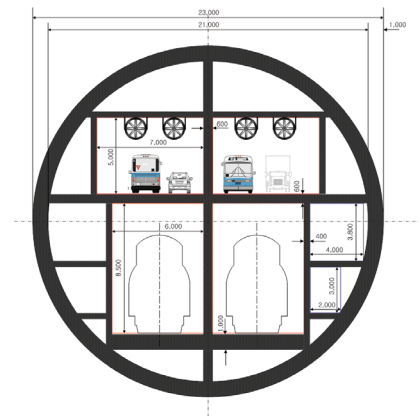


Figure 2. Cross section of submerged floating tunnel

또한 대상 수중교량은 부력이 자중보다 큰 (B>W) 경우에 해당하는 Tension leg 형태의 구조물이 되어, 그림3과 같이 100m구간마다 케이블에 의해 지지되는 교량 형식이다.

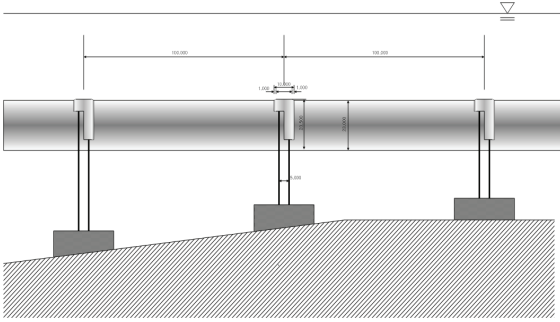


Figure 3. Modeling section for submerged floating tunnel

3. 유체-구조물-차량 상호작용 해석

3.1 수중 구조물-유체 상호작용

유체에 잠겨있는 구조물의 거동 및 구조물에 미치는 하중을 계산하는데 있어서 대표적으로 Morison 등에 의해 계산식이 제안되었으며^{(4),(5),(6)}, 수중에 위치한 구조물은 유체동역학적 질량에 의한 부가적인 질량이 구조물에 추가되게 된다. 이를 added mass라 하며 이번 연구 모델링에서는 added mass를 고려하기 위하여, 식(1)을 이용한 역계산을 통하여 부가질량을 구하고, 수중교량의 단위질량에 추가하여 해석을 실시하였다. Morison Eq.에서 관성력에 관련된 항을 사용하여, 관성계수 $C_m = 2$, 유체의 가속도는 $\frac{\partial u}{\partial t} = 1$ 로 가정하여 계산하였다.

$$C_m \rho_w \frac{\pi D^2}{4} dz \frac{\partial u}{\partial t} = \rho_{added} A' \quad (1)$$

여기서 v 와 $\partial v / \partial t$ 는 유체의 수평 속도와 가속도이며, $C_m = 1 + C_a$ 는 관성 계수, 그리고 C_a 는 저항 계수, ρ_{added} 는 관성력에 의해 추가되는 부가 단위질량을 나타낸다.

3.2 수중 구조물-차량 상호작용

교량의 고유진동수와 진동 모드를 통한 모드 중첩법을 적용하여 교량의 처짐을 표현하였으며 이를 통해 교량의 운동방정식을 유도 하였다. 외부 하중이 고려된 교량의 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

$$M_b \ddot{d}_b + C_b \dot{d}_b + K_b d_b = F_b \delta(x - x_i) \quad (2)$$

여기서 M_b , K_b , d_b 는 각각 $N \times N$ 질량 및 강도 행렬 그리고 절점변위벡터이고, N 은 교량모델의 총 자유도 수를 표시한다. 또한 (\cdot) 는 시간에 대한 미분을 의미한다. x_i 는 하중이 작용하는 위치를 나타낸다. 이때 교량의 연직변위 $d_b(x, t)$ 을 일반화된 좌표 $q_n(t)$ 과 모드 형상인 $\phi_n(x)$ 의 곱의 합으로 나타내면 다음식과 같다.

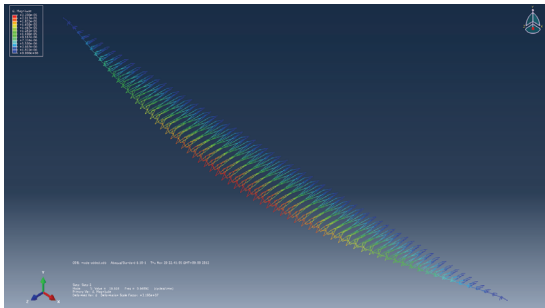
$$d_b(x, t) = \sum_{n=1}^{N_{mode}} \phi_n(x) q_n(t) \quad (3)$$

3.3 ABAQUS프로그램을 이용한 모델링

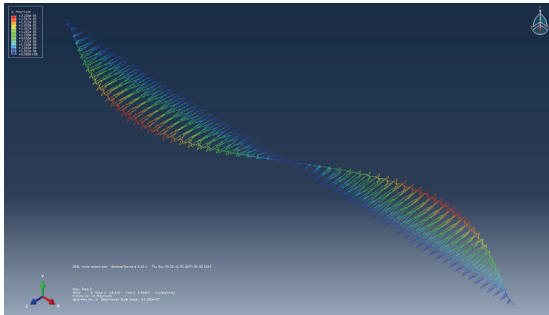
수중교량에 대한 해석과 모드 형상을 얻기 위하여 수치해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모델링을 실시한다. 전체 모델링 구간은 7km이며, 100m 구간마다 케이블로 지지되어 있다. 또한 앞서 구한 유효부력을 전 구간에 도입하였으며, 양단 단순지지 조건으로 모델링 하였다. 고유치 해석을 통하여 얻은 고유진동수와 모드 형상은 표 1과 그림 4와 같다.

Table 1. Natural frequency for lateral and verticl direction

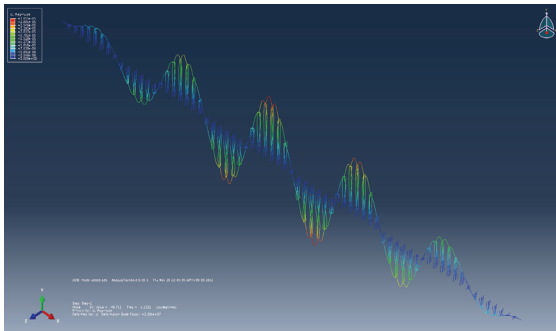
Mode direction	Natural frequency (cycles/sec)
1st lateral mode	0.64892
2nd lateral mode	0.64915
3rd lateral mode	0.64953
1st vertical mode	1.1222
2nd vertical mode	1.1222
3rd vertical mode	1.1223



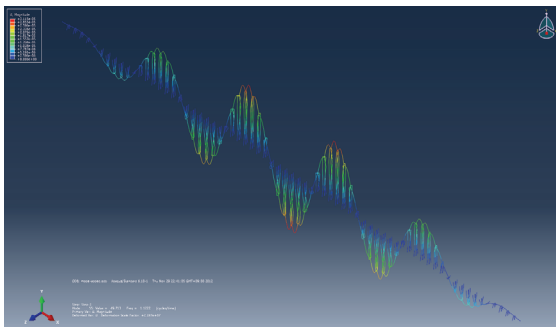
(a) 1st lateral direction mode shape



(b) 2st lateral direction mode shape



(c) 1st vertical direction mode shape



(d) 2nd vertical direction mode shape

Figure 4. Mode shape for submerged floating tunnel

4. 해석결과

ABAQUS프로그램에서 구한 모드 형상을 통하여 모드 중첩법을 이용하여 KTX열차⁽⁸⁾가 수중교량 주행시 수중교량의 전체구간의 가운데와 전체 구간의 중앙에서 50m떨어진 지점에서의 수직 처짐과 수평 처짐의 시간이력 결과를 제시한다. 차량 위치별로 수중교량의 가운데 수직처짐과 수평처짐을 각각 제시하기 위해 다음과 같은 조건하에 해석을 실시한다.

- 고려된 모드수 : 총 5개
(수평방향 모드 2개, 수직방향 모드 3개)
- 주행 거리 : 10km
(총 7km 수중교량 주행 후 3km 추가 주행)
- 차량 속도 : 300km/h

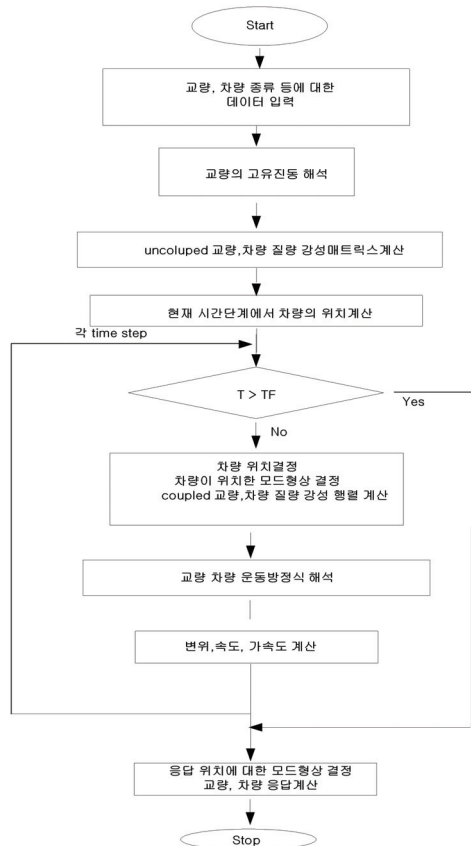
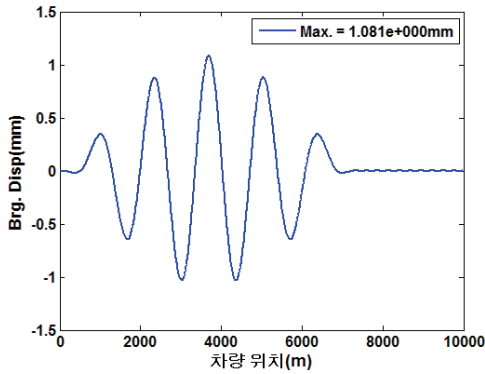
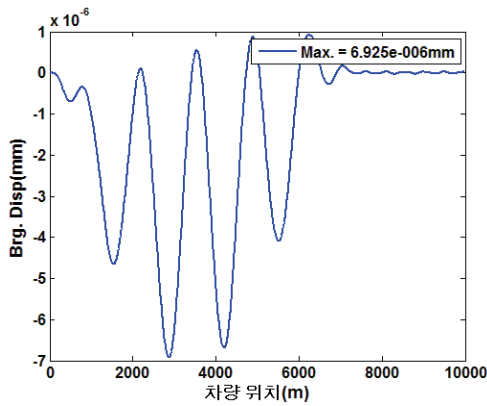


Figure 4. Flow chart for dynamic analysis



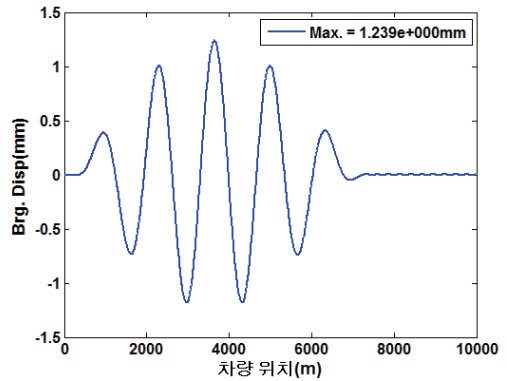
(a) Vertical displacement



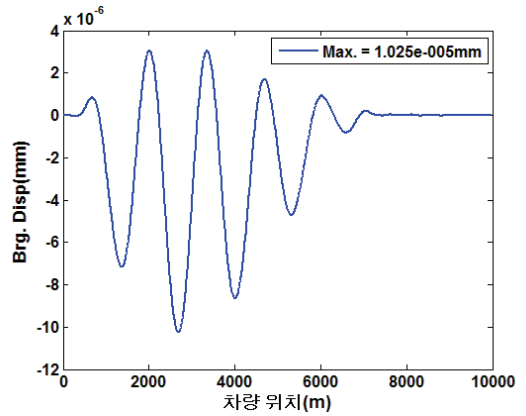
(b) Lateral displacement

Figure 5. Time history of displacement at center of tunnel

위 결과로부터 KTX차량이 수중교량 주행시 수직 방향 처짐의 최대값은 1.081mm, 수평방향 처짐의 최대값은 6.925×10^{-6} mm으로 나타나고 있다. 위의 결과는 전체 수중교량 구간의 정 중앙에서의 수평 및 수직 처짐을 나타낸 것이다. 하지만 정중앙점은 2개의 케이블로 지지되는 구간의 사이이다. 이는 처짐이 줄어드는 역할을 하게 되므로 전체 구간의 중앙에서 50m떨어진 케이블 지지 사이의 중앙에서 처짐값이 더 커질 것으로 예상된다. 즉, 3.5km에서 50m아래의 3.45km위치에서의 결과를 재해석한다.



(a) Vertical displacement



(b) Lateral displacement

Figure 6. Displacement from 50m away at center of tunnel

수중교량의 3.45km위치에서의 수직방향 처짐의 최대값은 1.239mm, 수평방향 처짐의 최대값은 1.025×10^{-5} mm으로 나타나고 있다. 앞선 3.5km 위치에서의 결과와 비교해 볼 때, 각각 수직방향으로는 약 1.146배, 수평방향으로는 1.48배 증가된 수치를 보여주고 있다. 그러므로 수직방향 및 수평방향을 최대 처짐 지점은 중앙점 3.5km가 아닌 3.45km위치에서 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

수중교량의 동적거동 해석을 위한 구조물-차량-유체 상호작용 해석 기법을 제시하였다. 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수중교량을 모델링하였으며, 그 결과로 수중교량의 정적인 거동과 모드 특성을 파악하였다. 또한 구조물-유체의 상호작용을 묘사하기 위하여 added mass 개념의 도입과 부력이 작용하는 상태에서 고유치 해석을 실시한 후, 교량의 고유진동수와 모드 형상을 이용하여 모드 중첩법을 통하여 수직방향 및 수평방향 거동해석을 파악해 보았다. 해석 결과로부터 수중교량의 중앙점인 3.5km에서보다 50m떨어진 3.45km위치에서의 수직 처짐과 수평 처짐이 더 크게 나타나고 있었다. 이로부터 중앙점보다 50m떨어진 케이블 지점 사이의 중앙 위치가 주요 관심위치라고 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Park, W. P, Han, S. H., Oh, M. H., Han, T. H., Ko, J. H, 2012, Technical Trend on Submerged Floating Tunnel, Korean Society of Civil Engineers, pp. 23~29.
- (2) FEHRL report, 1996, Analysis of the submerged floating tunnel concept, Transport research laboratory crwthorne.
- (3) H. Østlid, 2010, When is SFT competitive, Procedia Engineering, 4, pp. 3-11.
- (4) 손충열, 1995, “해양구조물 공학”, 미래내.
- (5) Luca Martinellia, Gianluca Barbellaa, Anna Ferianib, 2010, "Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input", Procedia Engineering, Volume 4, pp. 311-318.
- (6) S. K. Chakrabarti, 1987, "Hydrodynamics of offshore structure", Computational Mechanics.
- (7) Kwon, S. D., 1988, Effectiveness of TMDs for Control of Traffic Induced Bridge Vibrations, Korean Society of Civil Engineers, pp. 457~467.
- (8) 박홍석, 1998, 개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구.