

튜브형 수중교량의 열차-교량 상호작용해석을 통한 공진현상 분석 Resonance assessment of dynamic interaction analysis for submerged floating tunnel

곽종원*, 민동주**, 김문영†

Jong-Won Kwark*, Dong-Ju Min**, Moon-Young Kim†

Abstract This study intends to develop an algorithm for the dynamic interaction analysis of submerged floating tunnel and vehicles. A tension leg submerged floating tunnel is selected and modeled by the commercial FEM program ABAQUS to investigate its modal characteristics and conduct the dynamic interaction analysis. 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 moves along the submerged floating tunnel. From the result, the resonance phenomenon is observed under specific conditions and so countermeasures are required to cancel out the resonance phenomenon.

Keywords : Submerged floating tunnel, Resonance, Interaction analysis, KTX

초 록 이 연구에서는 튜브형 수중교량을 통과하는 열차시스템의 구조물-차량 상호작용 해석법을 개발하고, 동적거동특성을 조사하고자 한다. 유체의 영향을 고려하기 위하여 부가 질량개념을 도입하고, 또한 수중교량의 진동모우드 중첩법에 기초한 차량-교량구조물의 동적 상호작용해석방법을 적용한다. 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수중교량을 모델링하여 진동모우드를 추출하였으며, KTX차량 주행시의 동적 상호작용해석을 실시하여 수중교량 및 열차의 동적 거동을 파악한다. 수중교량과 같이 저주파의 특성이 지배적인 교량에서는 저속에서 공진에 의한 응답값의 확대를 관찰할 수 있었으며, 부력에 의한 솟음이 열차와의 상호작용을 통해 교량 및 차량에 공진을 유발하므로 이에 대한 대비가 필요한 것으로 판단된다.

주요어 : 수중교량, 공진, 상호작용해석, KTX

1. 서 론

수중터널은 유체에 잠겨있는 구조물이라는 특성상 외부환경이 대기상태가 아닌 수중이라는 점, 그리고 부력이 항상 재하되어 있다는 점에서 일반적인 구조물과는 거동 특성이 확연히 틀리다. 그러므로 구조물의 실용성 및 구조적 안전성을 확보하기 위하여 다양한 각도에서의 해석이 요구되며, 국내외로 관련연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 본 연구에서는 건설기술평가원의 “수중교량 핵심 요소의 설계 시제품 개발” 연구의 일환으로 Tension leg형태 [4]의 수중교량에 초점을 맞추었다.

† 교신저자: 성균관대학교 건축토목공학부 (kmye@skku.edu)

* 한국건설기술연구원

** 성균관대학교 건설환경시스템공학과

또한 수중교량에 관한 다양한 연구 중 구조물-차량-유체 상호작용 해석에 초점을 맞추어 동적 거동 해석을 위한 해석 알고리즘을 개발하여 교량 및 열차의 동적 응답을 분석하는데 그 목적이 있다. 우선 대상 수중 구조물의 형태 및 제원에 대해 기술하고, 유체의 영향을 고려하기 위하여 부가질량 개념의 도입과, 수중교량의 진동모우드 중첩법에 기초한 차량-교량구조물의 동적 상호작용해석방법을 적용한다. 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수중교량을 모델링하여 진동모우드를 추출하였으며, KTX차량 주행시의 동적 상호작용해석을 실시하여 수중교량 및 열차의 동적 거동을 파악한다. 또한 공진유발 상태에서의 시간이력응답을 비교함으로써 수중교량 및 열차의 동적 확대 현상을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 대상 수중 교량

대상 수중교량은 Tension leg 형태의 구조물로서 일본의 Funka만 연결구조물 중 2번과 3번 환기탑 구간 7km에 대해 검토하며, 수면 하 30m에 위치해 있으며, 단면 형상은 Fig. 1과 같다. 또한 대상 수중교량은 부력이 자중보다 큰 ($B > W$) 경우에 해당하는 Tension leg 형태의 구조물이 되어 100m구간마다 케이블에 의해 지지되는 교량 형식이다.

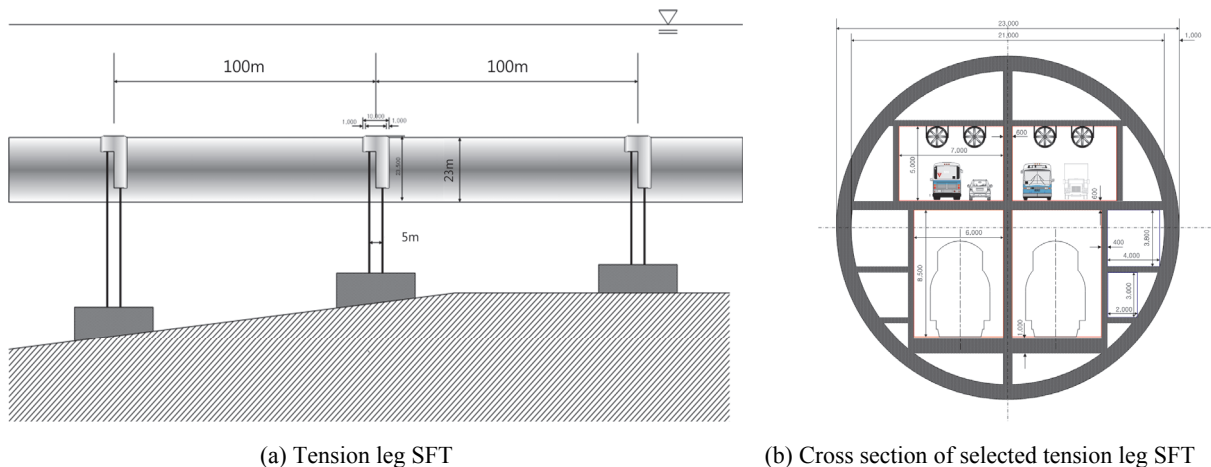


Fig. 1 Selected SFT model

2.2 부가질량

유체에 잠겨있는 구조물의 거동 및 구조물에 미치는 하중을 계산하는데 있어서 대표적으로 Morison 등[5-7]에 의해 계산식이 제안되었으며, 수중에 위치한 구조물은 유체동역학적 질량에 의한 부가적인 질량이 구조물에 추가되게 된다. 이를 부가질량이라 하며 이번 연구 모델링에서는 부가질량을 고려하기 위하여, 식(1)을 이용한 역계산을 통하여 부가질량을 구하고, 수중교량의 단위길이당 질량에 추가하여 해석을 실시한다. Morison식에서 관성력에 관련된 항을 사용하여, 관성계수 $C_m = 2$ 로 가정하여 계산한다.

$$C_m \rho_m \frac{\pi D^2}{4} dz = \rho_{added} A' \quad (1)$$

2.3 모우드중첩법을 이용한 교량 운동방정식

교량구조체 만의 유한요소모델에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{d}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{d}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{d}_b = \mathbf{F}_b \delta(x - x_i) \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b, \mathbf{K}_b, \mathbf{d}_b, \mathbf{F}_b$ 는 각각 $N \times N$ 질량행렬, 감쇠행렬, 강도행렬, 절점변위벡터, 교량에 가해지는 하중벡터이고, N 은 교량모델의 총자유도 수를 표시한다. 모드중첩법에서는 식(2)에서 보는 바와 같이 질량 및 강도행렬을 이용하여 자유진동해석을 수행하여 고유진동수와 진동 모드형상을 식(3)으로부터 구할 필요가 있다.

$$\mathbf{K}_b \mathbf{d}_b = \omega^2 \mathbf{M}_b \mathbf{d}_b \quad (3)$$

이때 교량의 변위 \mathbf{d}_b 을 일반화된 \mathbf{q}_n 좌표 와 모드 형상인 ϕ_n 의 곱의 합으로 나타내고, 모드형상의 직교성을 이용하여 정리하면 식(4)와 (5)와 같다.

$$\mathbf{d}_b(x, t) = \sum_{n=1}^{nMode} \phi_n(x) \mathbf{q}_n(t) \quad (4)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{\mathbf{q}}_n(t) + \omega_n^2 \mathbf{q}_n(t) = \phi_n^T \mathbf{F}_b \quad (5)$$

2.4 KTX열차

열차-교량 상호작용 해석을 위하여 적용된 차량은 Fig. 2 와 같이KTX열차를 적용하였으며, 전체 20 량 차량으로 구성된 동력차 38 자유도 시스템, 동력객차 23 자유도 시스템, 그리고 객차 24 자유도 시스템에 대한 운동, 위치, 그리고 감쇠에너지에 대해 각각 구성한다. 각 차량이 가지는 질량 및 관성모멘트로부터 운동에너지를 구성하고 현가장치의 상대적인 운동변위량에 따라 위치에너지 및 감쇠에너지를 구성한다. 최종적으로 구해진 에너지 식으로부터 식(6)과 같은 Lagrangian식을 이용하여 차량의 행렬운동방정식을 정립한다[8-9].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{p}_k} \right) - \frac{\partial(T-V)}{\partial p_k} + \frac{\partial D}{\partial \dot{p}_k} = 0 \quad (6)$$

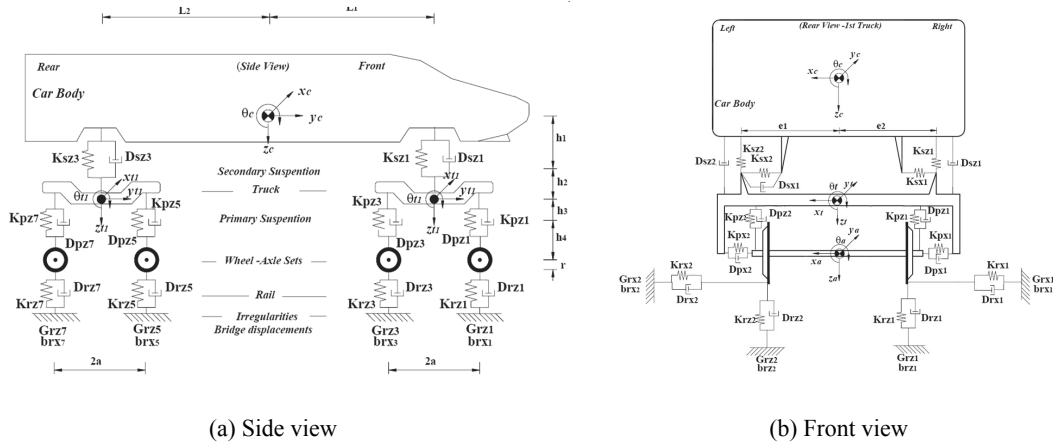


Fig. 2 KTX model

2.5 해석결과

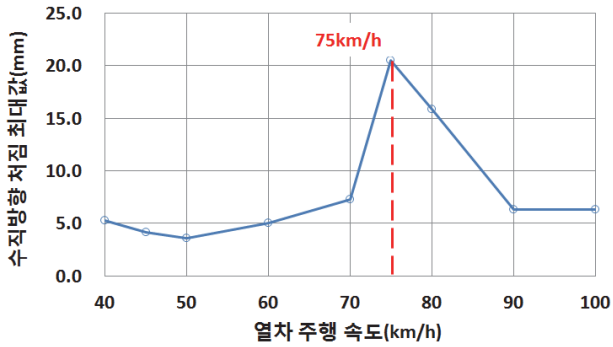
본 연구의 동적 시스템에 대한 수치적분 방법으로 Newmark- β 적분법을 적용하였으며, 매개변수 α, β 는 각각 0.5 와 0.25 를 사용한다. 다음으로 레일 조도를 포함한 열차 속도별 수중교량의 동적거동 및 공진현상을 살펴보기 위하여 열차의 속도를 10km/h 간격으로 500km/h까지 주행 시키며 수직방향 및 수평방향 응답의 최대값을 도출하였다. 여기서 열차의 속도는 일정하다고 가정하며, 미국 FRA에 규정된 궤도불규칙성에 대한 지수스펙트럼 밀도함수를 이용하여 좌, 우레일의 수직방향과 수평방향 레일조도를 각각 생성하였다.

2.5.1 타격하중 주기와 교량 주기 일치에 의한 공진

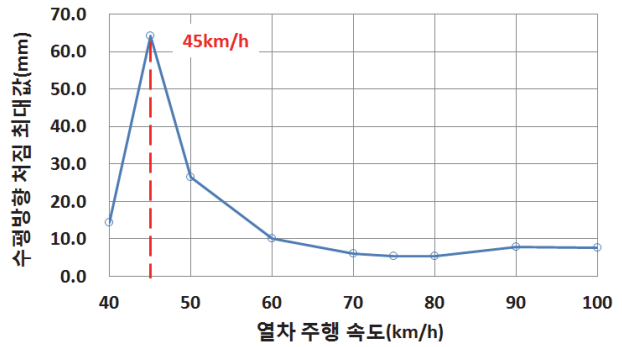
교량의 공진 조건으로 열차의 유효타격거리가 일정할 경우 이와 관련하여 타격하중의 주기가 교량의 고유주기와 일치할 때 교량에 공진현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 연구에 적용된 KTX열차의 유효타격거리는 18.7m이며, 고유치 해석에 의해 계산된 수중교량의 첫번째 고유진동수는 1.1222Hz이다. 이로부터 공진유발 속도를 계산하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical : } V_{cr} &= S_{eff} \times f_1 = 18.7 \times 1.1222 \times 3.6 = 75.5 \text{ km / h} \\
 \text{Lateral : } V_{cr} &= S_{eff} \times f_1 = 18.7 \times 0.6489 \times 3.6 = 43.7 \text{ km / h}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

식에 의하면 각각 수직방향 응답의 경우 75.5km/h, 수평방향 응답의 경우 43.7km/h로 나타난다. 계산 결과는 Fig. 3 에서 관찰되는 최대값을 유발하는 열차속도와 유사하므로 열차와 교량의 공진에 의해 증대되었다고 말할 수 있다. 즉, 대상 수중교량과 같이 저주파의 특성이 지배적인 교량에서는 비교적 저속에서 공진에 의한 응답값의 확대를 관찰할 수 있다.



(a) Vertical displacement at center of bridge



(b) Lateral displacement at center of bridge

Fig. 3 Maximum value in case of increasing train speed

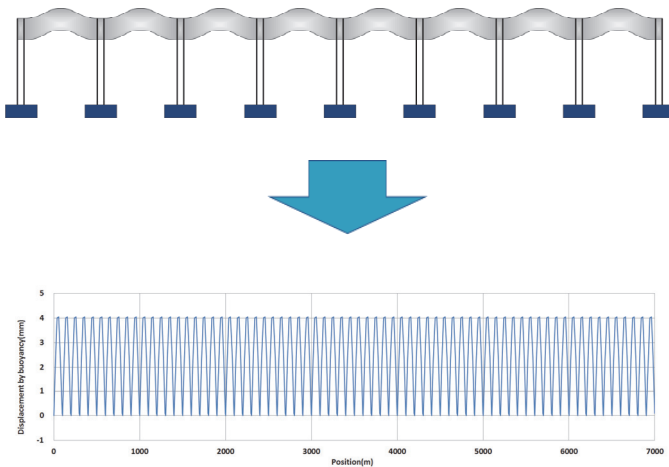


Fig. 4 Displacement with buoyancy

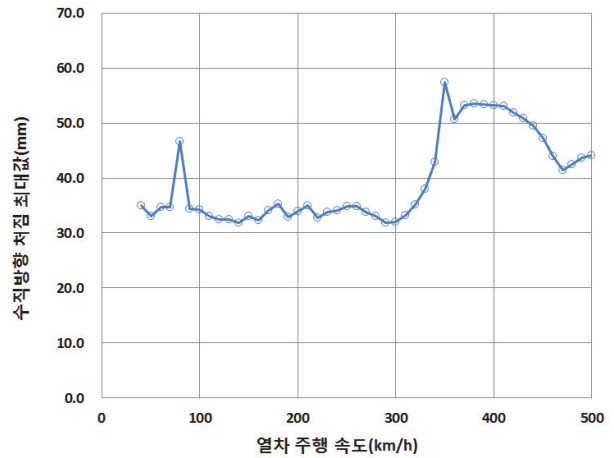


Fig. 5 Maximum value with buoyancy

2.5.2 외부조건 주기에 의한 공진

일반적으로 고정하중을 받는 수중교량의 경우는 지상에 가설되는 교량과 반대로 부력에 의해 그림 4 에 보는 바와 같이 위로 솟는 정적처짐이 발생할 수 있다. 이러한 부력에 의한 초기솟음이 동적상호작용에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 초기솟음을 전 구간에 걸쳐서 발생한 노면조도로 간주하고 상호작용해석을 실시한다.

외부 조건에 의한 공진은 Xia 등[10]에 의해 제시된 외부 조건에 의한 공진유발속도 식(8)로부터 판단할 수 있다.

$$V_{cr} = 3.6 \times f_{bn} \times L_s = 3.6 \times 1.1222 \times 100 = 404.0 \text{ km/h} \quad (8)$$

그림 Fig. 5 에서 보듯이 수직방향 처짐의 경우 350 - 400km/h 사이의 값이 크게 증가한 결과를 보이고 있다. 이는 앞서 계산된 외부 조건에 의한 공진 유발속도와 근사한 값으로,

외부조건에 의해 수중교량의 공진현상을 관찰할 수 있다. 즉, 수중교량 시공 시에 부력에 의한 솟음의 영향을 상쇄하기 위하여 지상교량의 Camber와 같은 개념을 반대로 도입할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문은 튜브형 수중교량을 대상으로, 동적거동 해석을 위한 구조물-차량-유체 상호작용 해석에 그 목적이 있다. 유체의 영향을 고려하기 위하여 부가질량개념을 도입하고, 또한 수중교량의 진동모우드 중첩법에 기초한 차량-교량구조물의 동적 상호작용해석방법을 적용하였다. 상용프로그램을 이용하여 수중교량을 모델링하여 진동모우드를 추출하였으며, KTX차량 주행시의 동적 상호작용해석을 실시하여 수중교량 및 열차의 동적 거동을 파악하였다. 해석결과 수중교량과 같이 저주파의 특성이 지배적인 교량에서는 저속에서 공진에 의한 응답값의 확대를 관찰할 수 있었으며, 부력에 의한 솟음이 열차와의 상호작용을 통해 교량 및 차량에 공진을 유발하므로 Camber와 같은 개념을 반대로 도입하여 이에 대한 대비가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] W.P. Park, S.H. Han, M.H. Oh, T.H. Han, J.H. Ko (2012) Technical Trend on Submerged Floating Tunnel, *Korean Society of Civil Engineers*, pp. 23~29.
- [2] M. Shahmardani, J. Mirzapour, Ch. Gheytratmand, S. Tariverdilo (2012) Moving load analysis of submerged floating tunnels, *International Journal of Engineering*, 25, pp. 17-24.
- [3] Shuangyin Zhang, Lei Wang, Youshi Hong (2010) Structural analysis and safety assessment of submerged floating tunnel prototype in Qiandao Lake, *Procedia Engineering*, 4, pp. 179-187.
- [4] H. Østlid (2010) When is SFT competitive, *Procedia Engineering*, 4, pp. 3-11.
- [5] 손충열 (1995) 해양구조물 공학, 미래내.
- [6] Luca Martinellia, Gianluca Barbellaa, Anna Ferianib (2010) Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input, *Procedia Engineering*, 4, pp. 311~318.
- [7] S. K. Chakrabarti (1987) Hydrodynamics of offshore structure, Computational Mechanics.
- [8] 김성일 (2000) 고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석, 박사학위 논문, 서울대학교.
- [9] 박흥석 (1998), “개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구”, 박사학위 논문, 연세대학교.
- [10] H. Xia, N. Zhang, W.W. Guo (2006) Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system, *Journal of Sound and Vibration*, 297, pp.810-822