

**열차주행에 의한 고속철도 교량의 진동이
인접 교량에 미치는 영향에 관한 연구**
**A Study on the Effects of a High-Speed Railway Bridge
Vibration induced by Moving Train on the Adjacent Bridge**

김성일*
Kim, Sung-Il

이장석**
Yi, Jang-Seok

ABSTRACT

A study on the effects of a high-speed railway bridge vibration induced by moving train on the nearby bridge is performed. Longitudinal and lateral accelerations of slabs and piers which are calculated from moving load analysis of a high-speed railway bridge can be used as input ground motions for the adjacent bridge. Dynamic responses of the adjacent bridge considering soil-structure interaction effects are analyzed by sub-structure method. Analysis procedure is made of free field analysis, calculation of impedance and effective input load and soil-structure system analysis.

1. 서론

이 연구에서는 고속열차(KTX) 주행에 의한 교량의 진동이 인접한 교량에 미치는 영향을 평가하였다. 지진이 아닌 구조물 외부의 진동원, 즉 고속열차 하중에 의한 교량의 진동이 지반매질을 통하여 전파되어 인접 교량의 진동을 일으킬 수 있다. 고속철도 교량에 대한 열차주행 동적해석을 통하여 상판 및 교각에 발생하는 교축 및 교축 직각방향 가속도를 계산하고 이를 입력하중으로 이용하여 인접 교량 구조물의 진동 영향을 분석한다. 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 인접 교량의 진동해석을 위하여 부분구조법을 사용하였다. 하이브리드(Hybrid) 방법으로 지반을 3차원으로 모델링하여 교량 기초의 임피던스와 지반진동에 의한 유효입력하중을 구한 후 이를 교량에 적용하여 진동응답을 산정하였다.

2. 고속열차 주행에 의한 교량 이동하중해석

고속열차(KTX)하중에 의한 고속철도 교량의 진동이 근접해 있는 교량에 미치는 영향을 지반-구조물 상호작용해석을 통하여 고찰하기 위한 사전단계로 고속철도 교량의 주행열차하중에 대한 이동하중 해석을 수행하였다.

고속열차 주행 시 고속철도교량의 상판 및 교각에 발생하는 교축방향 및 교축직각방향 가속도

* 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

** 현대건설 기술개발원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

를 계산하고 이를 외부 진동원으로 하여 인접 대상교량의 동적응답을 계산한다. 교량 설계 시 주행차량의 동하중에 의한 효과를 고려하기 위한 도로교 표준시방서 또는 철도교 설계기준 상의 충격계수는 단순히 지간길이만의 함수로 주어져있다. 그러나 실제 교량은 교량과 차량의 동적특성, 노면의 기하학적 특성, 차량의 주행조건 등에 의해 매우 복잡한 거동을 하게 된다. 이러한 효과들은 교량의 동적응답을 증가시킬 수 있다. 이에 따라 이 연구에서는 주행차량에 의해 유발되는 실질적인 동하중 효과를 유한요소법에 기초한 동적해석을 통하여 평가하고자 한다. 일정한 주행 속도로 움직이는 차량 때문에 생기는 교량의 수직 진동에 관한 연구는 1950년대부터 지금까지 많이 이루어졌으나, 일정한 속도뿐만 아니라 제동이나 가속에 의한 일정하지 않은 속도를 가진 차량에 의한 교량의 수직방향 진동에 관한 해석은 최근 이루어지고 있다. 본 과업에서의 경우, 교측방향 하중인 열차의 제동하중을 고려할 경우 교측 및 교측직각방향 가속도 응답의 변화에 영향을 줄 것으로 사료되어 실제 KTX열차의 제동함수를 사용하여 해석을 수행하였다^[1,2].

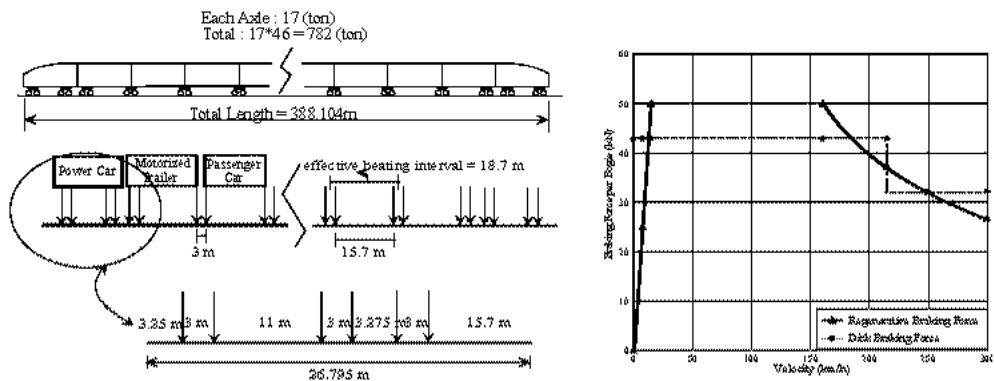


그림 1. 적용된 고속열차(KTX)의 하중선도 및 제동함수

본 연구에서는 고속철도교량을 상판 및 교각에 대하여 3차원 뼈대요소를 적용하였고 교량받침에 대하여 이동단은 스프링요소로, 힌지단은 end-release moment 요소를 이용하여 모사하였다. 다음과 같은 교량의 운동방정식을 풀어 주행열차하중에 대한 고속철도교량의 동적응답을 계산할 수 있다^[1].

$$[M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C_B]\{\dot{u}_B\} + [K_B]\{u_B\} = \{F\} \quad (1)$$

3. 지반의 영향을 고려한 구조물의 진동응답 해석

구조물의 지진 응답과 구조물에 인접한 지반 매질의 운동이 서로 상호작용하는 현상을 지반-구조물 상호작용이라 하며 이 효과를 고려한 구조물의 진동응답 해석을 하기 위해서는 구조물-지반 연계시스템의 모델링이 필요하다.

표 1-1 지반의 영향을 고려한 구조물 동적응답 해석순서

<u>자유장 운동해석</u> ·2차원 지반모델링 ·기초별 입력지진 산정	<u>기초의 임피던스와 유효입력하중 산정</u> ·3차원 지반모델링 ·강체기초의 임피던스와 입력하중	<u>지반-구조물 시스템 해석</u> ·구조물 유한요소 모델링 ·부분구조법 ·구조물응답 시간이력
---	---	--

이 연구에서는 그림 2와 같이 구조물 기초 인근 지반은 3차원 유한요소로 모델링하고, 3차원 초유한요소를 이용하여 무한 영역 지반의 동적강성을 구하여 전체 지반을 모델링하는 하이브리드 방법을 사용한다. 구조물과 지반은 기초를 통하여 연계되므로 지반 모델에서 기초의 임피던스와 유효입력하중을 구하고 이를 구조물에 적용하는 부분구조법으로 지반-구조물 연계시스템의 동적 응답을 구한다^[3,4,5]. 주요 해석순서는 표 1과 같다.

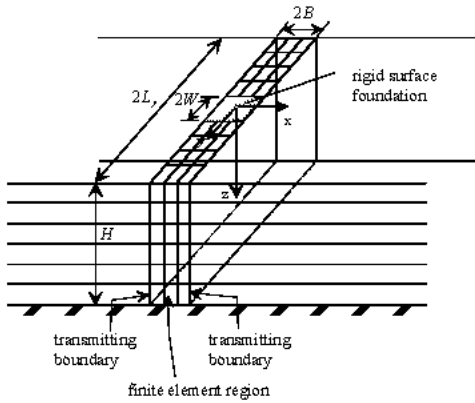


그림 2. 3차원 전달경계 초유한요소의 적용

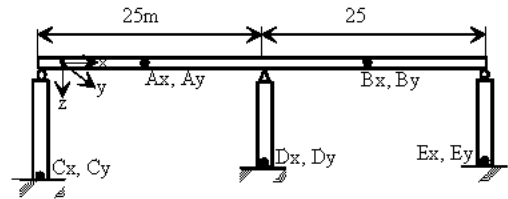


그림 3. 가속도 응답을 계산 위치

4. 열차주행에 의한 고속철도교량의 진동이 인접 교량에 미치는 영향 분석

4.1 열차주행에 의한 고속철도교량의 동적응답

일반적인 2경간 연속 PSC 박스거더 고속철도 교량에 대하여 주행속도를 50km/hr에서 350km/hr까지 50km/hr씩 증가시키며 주행 열차하중에 의한 동적응답을 고찰하였다. 주행열차는 KTX 20량 편성(2PC+2MT+16IT)에 대하여 이동집중하중으로 고려하였다. 한편, 교량 상판 및 교각에서 응답을 얻고자하는 가속도 위치는 그림 3과 같다.

그림 4는 각 속도별 교축방향 가속도와 교축직각방향 가속도의 최대값을 나타내며, 그림 5는 각 점에서 250km/h, 350km/h 주행에 의한 교축방향 및 교축직각방향 가속도의 시간이력 곡선을 나타낸다. 그림 6은 350km/h 등속운동과 350km/h로 주행하던 고속열차가 교량시점 5m 부근부터 제동을 시작하였을 경우의 점 A와 점 D에서의 교축방향 가속도의 시간이력 곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 등속운동에 비하여 제동운동 시 교축방향 가속도 응답이 증가함을 알 수 있다. 그러나 본 예제의 경우 최대 가속도 응답이 약 0.12g로 비교적 매우 안정적인 동적응답을 나타내는 교량임을 알 수 있다. 이와 같이 KTX 고속열차의 등속 및 제동을 고려한 이동하중 해석에 의해 얻어진 고속철도 교량의 상판 및 교각의 교축방향 및 교축직각방향 가속도 응답은 근접한 대상교량의 지반-구조물 상호작용해석의 입력하중으로 사용하게 된다.

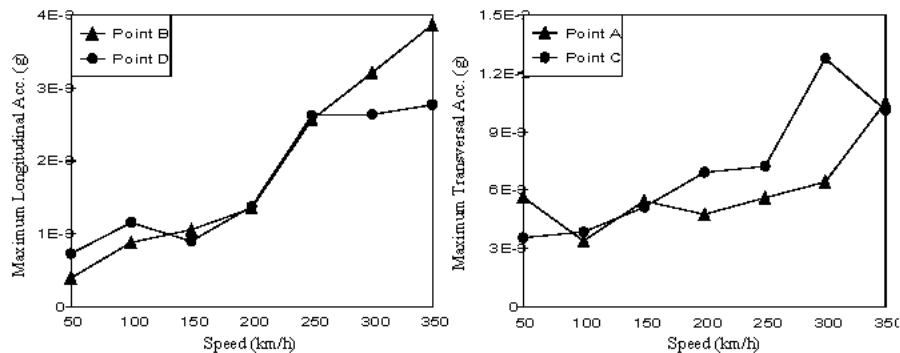


그림 4. 속도변화에 따른 고속철도 교량의 최대 가속도 응답의 변화

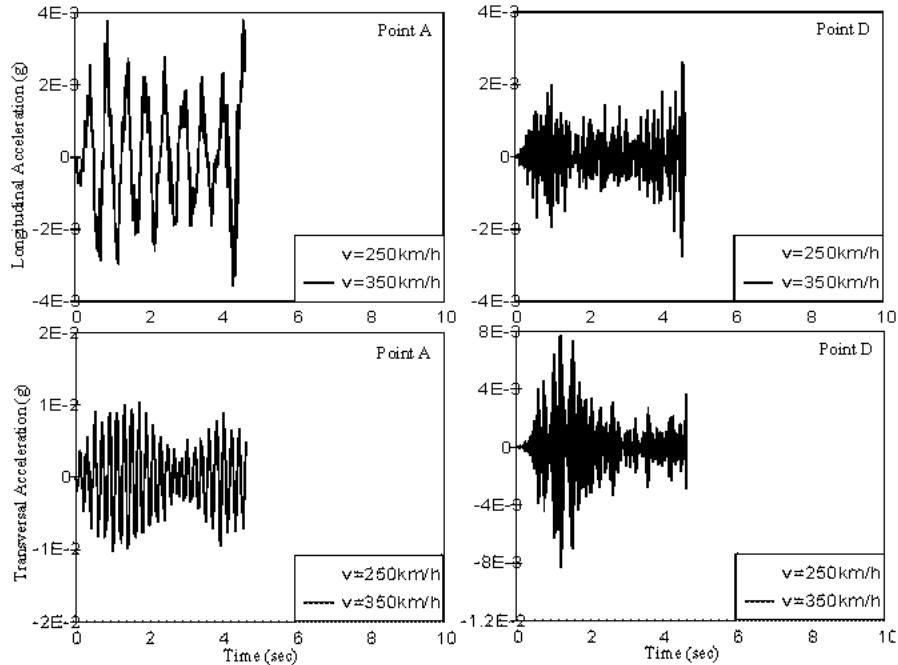


그림 5. 열차 등속운동에 의한 교축방향 및 교축직각방향 가속도 시간이력곡선

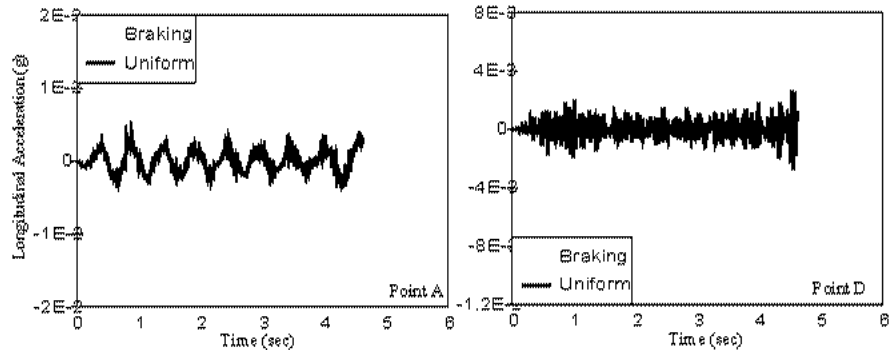


그림 6. 등속운동과 제동운동에 의한 교축방향 가속도 시간이력곡선

4.2 인접 대상교량의 진동응답 분석

첫 번째 모드 형상은 상판과 D점이 위치한 교각의 교축방향 거동을 나타내고 고유진동수는 0.2086Hz이다. 교량의 종방향 거동은 첫 번째 모드가 지배적이고 D점 교각만 종방향 운동에 저항하므로, D점이 위치한 교각을 3차원 뼈대요소로 모델링하고 상판과 D점 교각의 질량을 집중하중으로 작용시킨 그림 7과 같은 집중 질량 모델을 구성하여 대상교량의 교축방향 거동 해석에 사용한다. 지반의 밀도 $\rho = 2.5g/cm^3$, 전단파속도 $V_s = 1100m/sec$, 포와송비 $\nu = 0.25$, 감쇠비 $\beta = 0.01$ 이다. 기초는 강체기초로 $B = 5.0m$, $W = 7.0m$ 인 직사각형 기초이고 $H/B = 8$, $L/B = 24$ 이다.

고속철도 교량의 이동하중 해석으로 구한 교각 D점에서의 진동가속도를 지반의 가속도 입력으로 하여 인접 교량의 진동 응답 해석을 수행하였다. 지반-구조물 연계시스템 모델로부터 구한 구조물 각 지점의 교축방향 지반 진동 가속도의 전달함수는 그림 7과 같다.

그림에서 첫 번째 첨두에서 구한 지반-구조물 연계시스템의 고유진동수는 0.2075Hz로, 고정기반 구조물의 고유진동수 0.2086Hz와 비교하면 지반-구조물 상호작용의 영향으로 고유진동수가 감소한 것을 알 수 있으나 그 크기는 매우 작다. 이는 지반의 강성이 커서 지반-구조물 상호작용의 효과가 미

미하기 때문이다. 첫 번째 고유진동수에서의 첨두값은 N1이 가장 크나 고주파수 영역으로 가면 N4, N6에서의 전달함수가 더 크다.

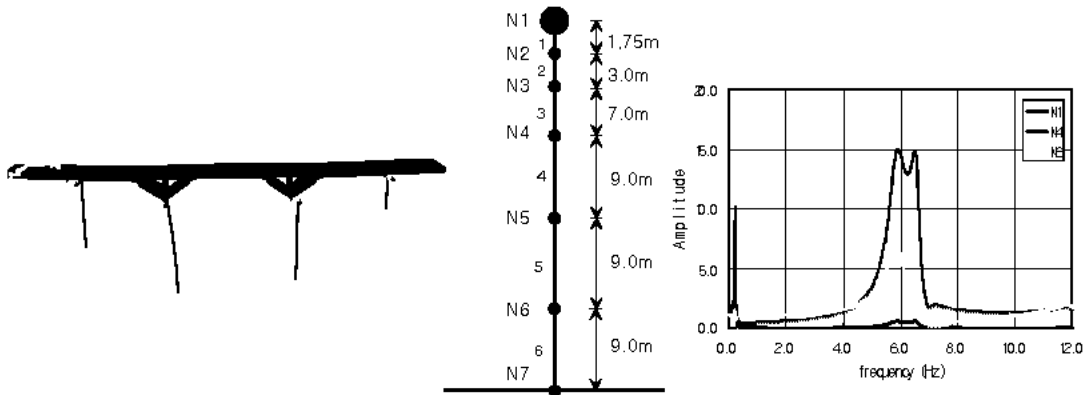


그림 7. 대상교량의 모델링 및 집중하중 모델의 전달함수

그림 10은 고속철도 교량의 진동에 의해 인접교량 D점 교각에 발생하는 최대 전단력으로 교축방향 진동의 경우 주행속도가 증가하면 전단력도 증가하며 주행속도가 300km/hr일 때 최대전단력이 가장 크다. 교축직각방향 진동에 의한 전단력의 경우 주행속도가 200km/hr일 때의 전단력이 가장 크다. 교축직각방향 진동에 의해 발생한 전단력이 교축방향 진동에 의한 전단력보다 크며 이는 그림 8의 진동 가속도 응답스펙트럼에서 볼 수 있는 경향과 같다. 그림 11은 제동하중을 고려한 고속철도 교량의 진동에 의해 인접 교량에 발생하는 최대 전단력으로 제동하중을 고려한 진동에 의해 더 큰 전단력이 발생하는 것을 알 수 있으며 제동위치가 5m일 때의 전단력이 가장 크다. 그림 10, 11에서 전단력의 최대값은 제동 위치가 5m인 교축직각 방향 진동에 의해 발생하며 이 경우 각 요소의 전단력을 합한 바 탕 전단력은 53.7kN이다.

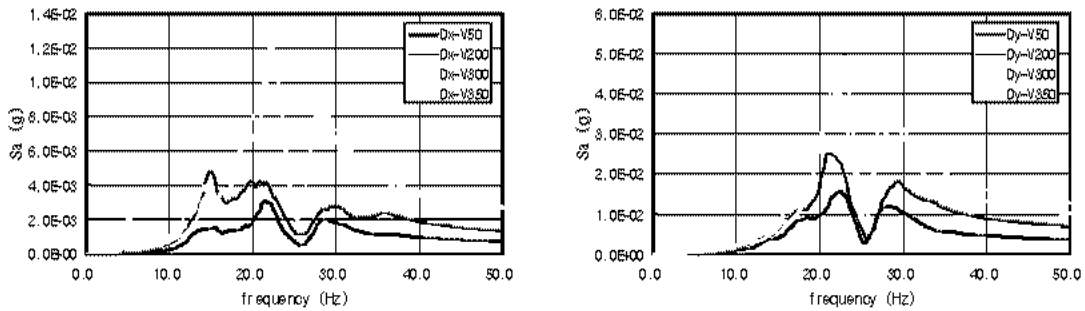


그림 8. 주행속도에 따른 D점의 교축 및 교축직각방향 가속도 응답스펙트럼

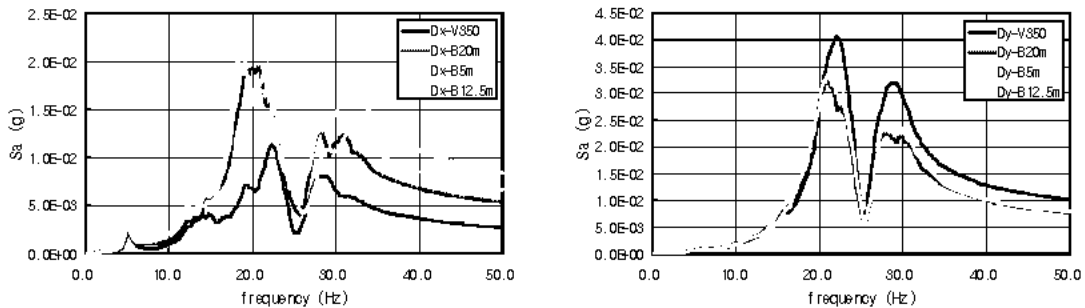


그림 9. 제동하중 고려시 D점의 교축 및 교축직각방향 가속도 응답스펙트럼

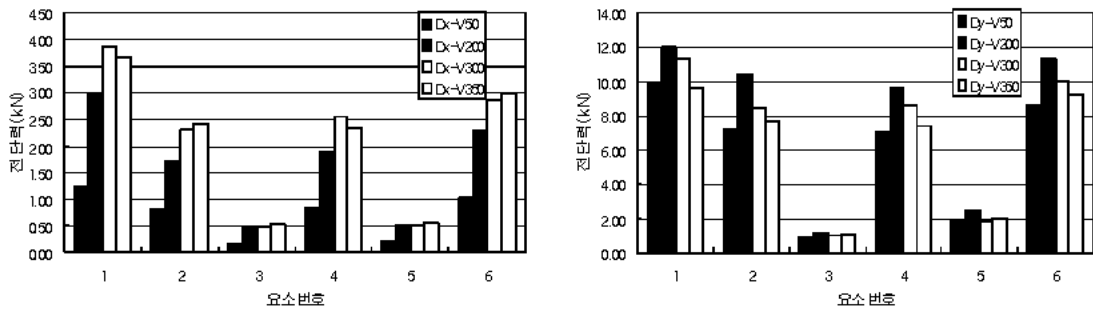


그림 10. 대상교량 D점 교각에 발생하는 교축 및 교축 직각방향 최대전단력 (등속운동)

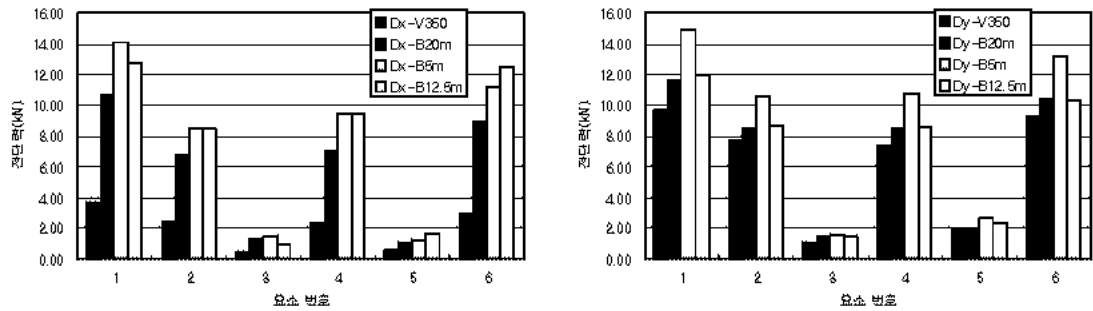


그림 11. 대상교량 D점 교각에 발생하는 교축 및 교축 직각방향 최대전단력 (제동운동)

5. 결론

이동하중 해석을 통해 구한 고속열차 주행 시 고속철도 교량 상판 및 교각에 발생하는 교축방향 및 교축직각방향 가속도를 입력지반으로 하여 인접 교량의 응답을 해석한 결과, 고속열차의 이동으로 발생하는 진동에 의해 인접 교량에 발생하는 부재력은 비교적 작게 발생함을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 결과는 본 연구에서 적용한 교량의 주행열차하중에 대한 가속도 응답이 매우 안정적인 결과에 따른 것으로, 고속철도교량이 아닌 기존 철도교량의 경우 이보다 큰 응답을 나타낼 수 있으며, 주행면 불규칙성 등 보다 불리한 조건에서 더욱 큰 응답을 도출할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 김성일, "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석", 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
2. 한국건설기술연구원, "고속전철교량/터널구조 및 유지관리 시스템 개발 (교량부분)", 1999.10
3. 현대건설주식회사 기술연구소, "특수구조물에서의 내진설계를 위한 SSI 해석기법 개발", 연구기관:서울대학교 공학연구소, 1996.
4. Kim, J. K., Koh, H. M., Kwon, K. J., and Yi, J. S., "A Three-dimensional Transmitting boundary formulated in Cartesian Co-ordinate System for the Dynamics of Non-axisymmetric Foundations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 1527-1546., 2000.
5. 이장석, "비균질 지반에서의 동적 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 3차원 스트립 초유한 요소", 박사학위논문, 서울대학교, 2001.