

이산폰툰형 부유식교량의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of a Floating Bridge with Discrete Pontoons

권 장 섭*
Kwon, Jang-Sub

국문요약

이산폰툰형 부유식교량의 시간영역 지진응답해석을 지진파의 공간분포를 고려하여 수행하였다. 지반운동의 공간변화는 파의 통과 영향, 엇걸성 영향 및 국부 지반 영향을 반영하는 결맞음 함수 모델로 고려하였다. 부유식교량의 상부구조는 공간뿔대요소와 탄성현수케이블요소를 이용하여 모델링 하였고, FHWA 가이드 라인의 스프링모델을 사용하여 교대의 지반 구조물 상호작용에 대한 영향을 고려하였으며, 경계요소법으로 산정한 폰툰 동수력계수의 주파수 의존성을 고려하기 위해서 시간지연함수를 사용하였다. 지반운동의 공간변화를 고려한 다중지점 지진입력을 교량의 양단에 도입하였고 응답의 시간이력을 동시 가진 시와 비교 하였다. 장주기의 동적특성을 갖는 이산폰툰형 부유식교량의 지진응답 해석에서 지반운동의 공간분포를 고려할 경우에 주목할만한 응답의 증폭이 나타날 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 부유식교량, 지반운동의 공간분포, 파의 통과 영향, 엇걸성 영향, 국부지반 영향

ABSTRACT

Dynamic response analysis in time domain is conducted for floating bridges with discrete pontoons subject to spatial variation of ground motions. The spatial variation of ground motions is considered with the coherency function model which represents wave passage, incoherence and local site effects. The superstructure of the bridge is represented by space frame and elastic catenary cable elements, the abutment is modeled with the spring element of FHWA guideline for considering soil structure interaction and the concept of retardation function is utilized to consider the frequency dependency of the hydrodynamic coefficients which are obtained by boundary element method. Multiple support excitations considering the spatial variation of ground motions is introduced at both ends of the bridge and the time history response is compared to that of a simultaneous excitation. The noticeable amplification of the response can be shown when the spatial variation of ground motions is incorporated in the analysis of floating bridges.

Key words : floating bridge, spatial variation of ground motion, wave passage effect, incoherence effect, local site effect

1. 서 론

부유식교량은 해안지역이나 항만시설의 접속도로 등에서 기존의 장대교량에 비해 수심이 깊고 지반이 연약한 경우 경제적으로 유리하며, 시공 기간이 짧고, 시공 시 환경보존의 측면에서 장점을 살린 교량 형식이다. 부유식 교량의 대부분은 경제성을 확보하기 위해 중 장기간을 갖는 교량이 되며, 폰툰이 수상에 유연하게 지지되어 있어 모든 방향에 대한 운동이 가능하기 때문에 동적해석 시에는 이에 대한 고려가 필요하다.

부유식교량에 대한 기존의 연구들에서는 파랑하중 산정을 위한 계수와 유체의 부가질량계수 및 감쇠계수가 주파수 의존성이 있으므로 주로 주파수영역해석이 행해졌다. 시간영역 해석이 수행된 경우에는 계수들의 주파수 의존성을 고려하지 않고 일정한 값을 사용하여 단순화하였다(Hartz⁽¹⁾). 백인열 등⁽²⁾과 권장섭 등⁽³⁾은 시간영역 해석 시 동수력계수의 주파수 의존성을 고려하기 위하여 시간지연함수를 사용하여 이산폰툰형 부유식교량의 파랑하

중 및 지진하중에 대한 응답해석을 각각 수행한 바 있다.

실용적인 내진해석 및 설계에서는 다중지점에 의한 영향을 지진파가 한 지점에서 다른 지점으로 형상변화 없이 이동한다는 가정을 이용한다(현창현⁽⁴⁾, 김호경 등⁽⁵⁾). 이러한 가정을 적용한 권장섭 등⁽³⁾의 연구에서는 이산폰툰형 부유식교량을 동일 지진입력으로 가진하는 경우와 비교하여 형상변화 없는 지면 지진입력으로 가진하는 경우에 주목할 만한 응답의 차이를 나타내지는 않았다. 반면, 중 장기간 교량의 지진하중 응답해석에 있어서 지반운동의 공간분포를 고려하면 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

실제 현수교와 아치교에 대한 지진응답해석을 수행한 Hari-chandran et al.⁽⁶⁾의 연구에서는 동일입력 가지는 단경간의 아치교에서는 타당하였으나, 장기간의 현수교에는 지반운동의 공간분포를 고려하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. Fogazzi et al.⁽⁷⁾의 연구에서는 유체 구조물 상호작용 및 지반 구조물 상호작용을 고려하여 해저에 고정된 부유식터널의 지진응답해석을 수행하였고, 장주기의 동적 특성을 가지며 다수의 앵커에 의해 지지되는 부유식터널의 경우에는 다중지지효과에 의한 영향이 크게 나타남을 밝혔다. Zanardo et al.⁽⁸⁾는 지진격리장치를 가진 다경간

* 정회원·특허청 건설기술심사담당관실, 심사관(대표서자 : triad5@paran.com)
본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 2. 17 / 심사종료일 : 2005. 3. 5)

단순지지교량의 지진응답과 관련된 파운딩현상에 대한 연구를 수행하였으며, 동일 지진입력에 비하여 지반운동의 공간분포를 고려하는 경우에 교량의 응답이 증폭됨을 지적하였다. 김재민 등⁽⁹⁾은 현수교의 지진응답에 영향을 미치는 인자에 대하여 고찰하였고, 지반-구조물 상호작용 및 지진파의 공간분포가 현수교의 지진응답에 매우 중요한 영향을 미치는 것을 밝혔다.

이 연구의 목적은 지반운동의 공간분포를 고려한 지진 하중에 대한 이산폰툰형 부유식교량의 거동 특성을 알아보는 것이다. 연구에 사용한 인공지진파는 파의 통과 영향(Wave passage effect), 엇결성 영향(Incoherence effect) 및 국부 지반 영향(Local site effect)을 고려하는 결맞음 함수 모델(Coherency function model)을 이용하여 생성하였고, 지반-구조물 상호작용을 고려하기 위해서 FHWA 가이드라인에 제시된 기초 스프링모델을 적용하여 부유식 교량의 시간영역 지진응답해석을 수행하였다.

2. 지반운동의 공간변화

2.1 도입

교량의 내진 설계 또는 해석 시에 사용되는 실용적인 가정은 모든 지점에서의 지진입력이 같다는 것이다. 그러나, 부유식교량과 같은 중·장기간의 교량에서는 지진파가 작용하는 교대나 앵커부에서의 실제 입력이 같지 않으며, 이것은 지반의 조건이나 파의 전파효과 등에 의해 지진파의 왜곡 정도가 다르게 나타나기 때문이다. 이에 대한 영향은 인접한 위치에서 실제로 관측된 지진의 가속도 표(Accelogram)를 분석 수정하여 해당 구조물에 사용할 수 있는 적절한 모델을 만들어 고려할 수 있다.

지반운동의 공간분포에 영향을 주는 요인은 파의 통과 영향, 엇결성 영향 및 국부 지반 영향으로 설명된다(Harichandran⁽¹⁰⁾, 그림 1). 파의 통과 영향에 의해 지진파는 서로 다른 지점에 서로 다른 시간에 도착하게 된다. 엇결성에 의한 영향은 불규칙적이고 불균일하게 산란된 파와 다른 경로의 산란파의 중첩에 의해 파의 형태가 왜곡되는 것을 말한다. 국부적 지반 영향은 각 지점에서의 국부적인 지반 상태의 차이로 원본파의 진폭과 주기가 바뀌게 되는 것을 말한다.

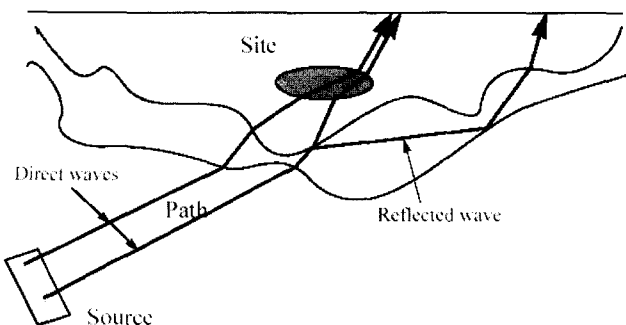


그림 1 지진파의 전파와 산란(Harichandran⁽¹⁰⁾)

2.2 결맞음 함수 모델

지반운동의 공간분포에 의한 영향을 반영하기 위한 간단한 방법은 지진관측 자료(Seismograph array)를 활용하는 것이다. 지진이 자주 관측되는 지역에서 다양한 지반 상태를 고려하여 세 지점 이상에서 관측된 자료를 바탕으로 지진관측 자료를 만들 수 있다. 현재 SMART-1 array 나 El Centro differential array 등의 자료가 활용되고 있다. 이러한 자료를 바탕으로 지진파의 추계학적 및 공간적 특성을 반영한 여러 수치 모델이 제시되어 있으며, 이 모델을 결맞음 함수라 한다.

지진파의 전파에 따른 파의 통과 영향, 엇결성 영향 및 국부지반 영향은 결맞음 함수에 의해 결정된다. 이 연구에서는 Harichandran and Vanmarcke⁽¹¹⁾의 모델을 사용하였다.

$$\gamma_{ij}(i\omega) = \left[A \exp\left\{-\frac{2d_{ij}^L}{\alpha\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right\} + (1-A) \exp\left\{-\frac{2d_{ij}^L}{\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right\} \right] \times \exp\left\{i\omega \frac{d_{ij}^L}{v_{app}}\right\} \quad (1)$$

여기서, v_{app} 는 겉보기 전단파 속도(Apparent shear wave velocity), d_{ij}^L 는 파의 이동방향에 대해 i, j 지점 벡터의 투영된 거리, A 와 α 는 상수, $\theta(\omega)$ 는 요동(Fluctuation)의 공간적 크기를 나타낸다.

식 (1)에서 첫 번째 항은 엇결성 영향을 나타내며, 두 번째 항은 파의 통과 영향과 국부지반 영향을 나타낸다. A, α 및 $\theta(\omega)$ 와 같은 상수들은 실제 관측된 지반 운동 자료를 바탕으로 최소자승법에 의해 결정 되는데, 이 연구에서는 SMART-1 event #20의 자료를 사용하여 결정된 상수들을 사용하였다.

$$A = 0.736, \quad \alpha = 0.147, \quad \theta(\omega) = 3300 \left[1 + \left(\frac{\omega}{1.5\pi} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

2.3 인공지진파의 생성

2.3.1 일반적인 생성 과정

공간적으로 상관관계(Correlation)가 있는 지반운동 계열을 생성하기 위해서 우선 지진의 지반운동을 평균값이 0인 정상 랜덤 과정(Stationary random process)으로 가정하며 이때, 교차 결맞음 함수(Cross coherency function)와 파워 스펙트럼 밀도 함수가 주어져야 한다(Hao et al.⁽¹²⁾).

지반 운동의 시계열(time series)은 각 지점에 대해 동일한 스펙트럼 밀도 함수 $S_0(\omega)$ 을 갖는다고 가정할 수 있다. 이것은 진원이 지점간 거리에 비해 해당 지점에서 멀리 떨어진 경우에 적절하다. 교차 스펙트럼 밀도 함수 $S_{ij}(i\omega)$ 은 $S_0(\omega)$ 와 결맞음 함수 $\gamma_{ij}(i\omega)$ 의 곱으로 표현된다.

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} \gamma_{11}(\omega) & \gamma_{12}(i\omega) & \dots & \gamma_{1n}(i\omega) \\ \gamma_{21}(i\omega) & \gamma_{22}(\omega) & \dots & \gamma_{2n}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{n1}(i\omega) & \gamma_{n2}(i\omega) & \dots & \gamma_{nn}(\omega) \end{bmatrix} S_0(\omega) \quad (3)$$

여기서, $-\omega_N \leq \omega \leq \omega_N$, ω_N 은 나이퀴스트 주파수, 아래첨자 n 은 지점 수이다.

식 (3)에서 $S(\omega)$ 는 에르미트 양정치(Hermitian positive definite)이며, 하삼각행렬 $L(i\omega)$ 과 이것의 에르미트 행렬 $L^H(i\omega)$ 의 복소곱으로 분해하여 표현될 수 있다.

$$S(\omega) = L(i\omega)L^H(i\omega)S_0(\omega) \quad (4)$$

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} l_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ l_{21}(\omega) & l_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1}(\omega) & l_{n2}(\omega) & \dots & l_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, l_{ij} 는 Cholesky법에 의해 계산된다. 생성된 시계열 u_i 다음과 같이 표현된다.

$$u_i = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^N A_{mn}(\omega_n) \cdot \cos\{\omega_n t + \beta_{im}(\omega_n) + \phi_{mn}(\omega_n)\} \quad (6)$$

여기서, $\phi_{mn}(\omega_n)$ 은 0부터 2π 의 범위에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 위상각이고, 진폭 $A_{ij}(\omega_n)$ 와 위상각 $\beta_{ij}(\omega_n)$ 은 $u_{in}(t)$ 와 $u_{jn}(t)$ 의 시간평균으로부터 식 (3)를 만족하고, 다음의 관계를 갖도록 결정된다.

$$A_{ij}(\omega) = 2\sqrt{S_0(\omega)\Delta\omega} |l_{ij}(i\omega)| \quad (7a)$$

$$\beta_{ij}(\omega) = \tan^{-1}(\text{Im}[l_{ij}(i\omega)]/\text{Re}[l_{ij}(i\omega)]) \quad (7b)$$

여기서, $0 \leq \omega \leq \omega_n$ 이다.

이렇게 얻어진 평균값이 0인 정상 과정의 결과는 시간 강도 함수(Time intensity function)와의 곱에 의해 비정상 특성을 갖게 되며, 이것은 서로 상관된 n 개의 성분을 갖는 지진 가속도이다. 지진 변위는 얻어진 지진 가속도를 주파수 영역에서 적분하여 구할 수 있다.

2.3.2 설계응답 스펙트럼에 부합하는 가속도

설계 응답 스펙트럼에 부합하는 인공 지진파를 생성하기 위해서는 목표 설계 스펙트럼이 주어져야 하며 그림 2의 절차를 따른다.

비정상 특성을 갖는 임의의 지진파를 생성하는 경우에는 파 강도 함수(Wave intensity function)를 고려하여야 한다. 주로 지수 형태로 나타내며 여기서는 식 (8)을 적용하였다.

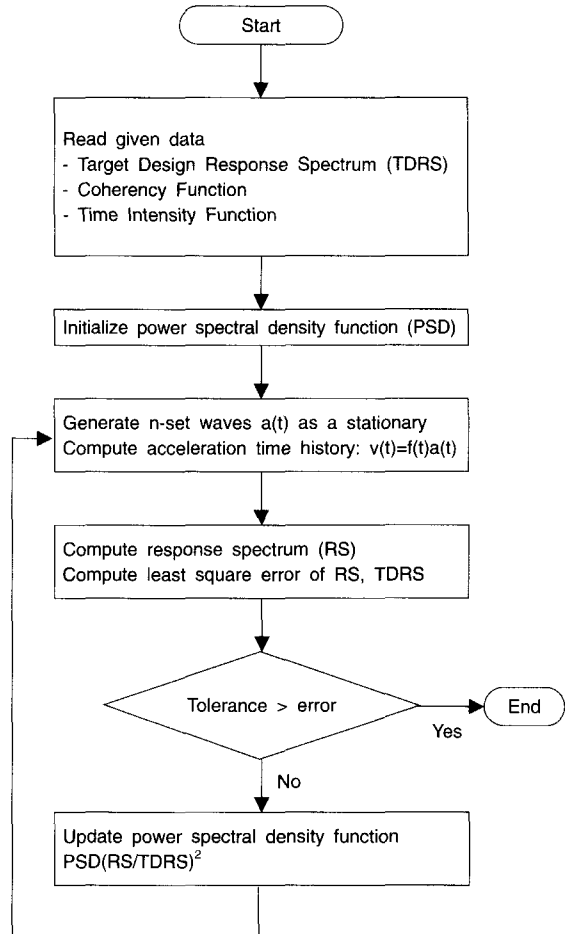


그림 2 응답스펙트럼에 부합하는 가속도를 위한 비정상 랜덤 과정

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_1)^\eta & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \exp\{-(t-t_1)/(t_{max}-t_1) \times \ln v\} & t_2 \leq t \leq t_{max} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $t_1 = 2, t_2 = 9, \eta = 2, 1/(t_{max} - t_1) \times \ln v = 0.4$ 로 가정하였다.

2.3.3 설계응답 스펙트럼

이 연구에서는 3방향 동시 가진 상태의 지진하중을 고려하기 위하여 Mohraz⁽¹³⁾에 의해 제시된 설계응답 스펙트럼을 사용하였다. Mohraz는 16개의 지진으로부터 총 162개의 지진파에 대해 연구하여 설계 응답 스펙트럼을 제시하였다. 그는 지반을 4개로 분류하고, 각각에 대해 수평성분 지진파 중 더 큰 것, 수평성분 지진파 중 작은 것, 수직방향 지진파로 구분되는 3방향의 지진파로 구분하였다. 지반의 분류는 다음과 같다.

- (1) 암반 지반(Rock)
- (2) 30ft이내가 충적토(Alluvium)인 암반 지반
- (3) 200ft이내까지 충적토인 암반 지반
- (4) 충적토 지반

이 연구에서는 지반을 단단한 지반(Firm soil)과 중간 정도 지반(Medium soil)으로 나누고, Mohraz의 지반 분류(Soil category)에서 각각 (1) 암반 지반과 (2) 30ft 까지 충적토인 암반 지반인 조건을 각각 적용하였다.

2.3.4 지반운동의 상관관계

생성된 각각의 지반 운동 집합의 변수 특성은 교차 상관계수와 지연 결맞음(Lagged coherency)으로 표현될 수 있다. 교차 상관계수는 시간영역에서 공간분포의 척도로서 주어지며 상관관계의 일치로부터 유도되는 무차원 변수이다.

$$\rho_{ij}(\tau) = \frac{R_{ij}(\tau)}{\sqrt{R_{ii}(0)}\sqrt{R_{jj}(0)}} \quad (9)$$

여기서, $R_{ii}(t)$, $R_{jj}(t)$ 는 각각 i , j 지점에서의 자기 상관 함수이며, $\tau = d_{ij}^L / v_{app}$ 이다. $R_{ij}(t)$ 는 두 시계열 에서의 교차 상관 함수이다.

$$R_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} x_i(t)x_j(t+\tau)dt, \quad 0 \leq t \leq T \quad (10)$$

주파수 영역에서 대응되는 관계는 지연 결맞음으로 표현된다.

$$|\gamma_{ij}(i\omega)| = \left| \frac{S_{ij}(i\omega)}{\sqrt{S_{ii}(\omega)}\sqrt{S_{jj}(\omega)}} \right| \quad (11)$$

여기서, S_{ij} 는 시간영역에서의 교차 파워 스펙트럼 밀도 함수이며, 식 (12)로 정의 된다.

$$S_{ij}(i\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \left[\int_{-T/2}^{T/2} x_i(t)e^{-i\omega t} dt \times \int_{-T/2}^{T/2} x_j(t)e^{i\omega t} dt \right] \quad (12)$$

교차 상관계수와 지연 결맞음은 두 신호의 상관 정도를 나타내는 지표이며, 절대값은 0과 1사이 값을 갖는다. 1인 경우는 완전히 상관된 경우이며, 0인 경우는 무상관된 경우이다. 여기서는 교차 상관계수에 의해 생성된 두 지진 입력의 상관관계를 나타내었다.

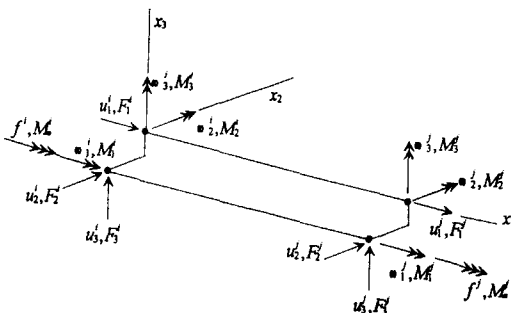


그림 3 뼈대요소의 변위 및 단면력 정의

3. 부유식교량의 모델링

3.1 부유식교량 상부구조의 유한요소 모델링

이산폰툰형 부유식교량의 상부 구조계는 3차원 뼈대요소와 탄성 현수선 케이블요소로 모델링하고 하부 폰툰의 부력변화는 집중 스프링으로 모델링한다.

교량 거더를 모델링하기 위하여 사용한 3차원 뼈대요소는 그림 3과 같이 부재의 단면이 비대칭인 경우도 해석할 수 있도록 단면중심 C와 전단중심 S를 구분하여 정의하고, 부재축에 따른 길이 방향으로의 단면의 크기가 일정하게 가정된 요소이다(현대건설⁽¹⁴⁾). 이 요소의 접선 강도행렬 K_T 는 부재탄성강도행렬 K_E 와 부재기하강도행렬 K_G 을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$K_T = K_E + K_G \quad (13)$$

분포 질량행렬은 운동에너지의 1차 변분을 단면 도심에서의 변위로 표시하고 이 변위와 부재 절점 변위와의 관계를 이용하여 적분함으로써 구한다.

이 연구에서 사용한 케이블 요소는 그림 4와 같은 형상의 탄성현수선 요소이다(장승필과 박정일⁽¹⁵⁾). 케이블 요소의 강도행렬은 자중을 받는 탄성현수선 요소의 비선형 미분방정식의 정해를 사용하여 구성한다. 케이블 절점력에 관한 비선형 적합방정식의 미분으로 유연도 행렬을 얻어낸 후 이로부터 강도행렬을 구한다. 질량 행렬은 유한요소 형상함수를 이용하여 구한 분포질량을 사용한다.

3.2 폰툰의 동수역학 계수 선정

부유식교량의 폰툰과 같이 크기가 큰 부유체에 작용하는 파력과 운동에 대한 동수 역학적 문제는 주로 선형 포텐셜 이론으로 다룬다. 그림 5에 폰툰에 대한 기준 좌표계와 자유도 및 경계를 나타내었다. 파고와 폰툰의 운동의 크기가 폰툰의 크기에 비하여 작다고 가정할 경우 수면과 잠긴 면에서의 경계 조건이 선형화 될 수 있고 유체를 비점성, 비압축성으로 흐름은 비회전성으로 가정하면 식 (14)와 같은 속도 포텐셜 함수가 존재한다(Newman⁽¹⁶⁾).

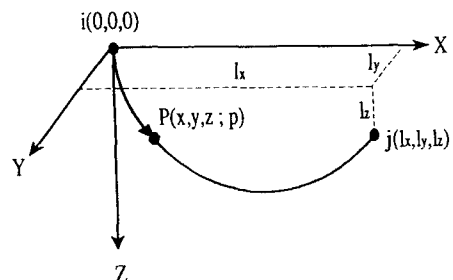


그림 4 탄성현수선 요소의 형상

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} = -i\omega \sum_{j=0}^7 \phi_j \zeta_j \quad (14)$$

$$\nabla^2 \phi_j = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi_j = 0 \quad (15)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$, ω 는 주파수, ϕ_j 는 폰툰의 j 방향 운동에 대한 방사 포텐셜이고, 이 중 ϕ_0 와 ϕ_7 은 각각 입사파와 회절파의 속도 포텐셜이며, ζ_j 는 폰툰의 j 방향 운동의 진폭이다.

또한 선형화된 자유수면 경계조건, 해저면과 폰툰의 잠긴 면에서의 경계조건 그리고 폰툰으로부터 먼 거리에서 빠져나가는 파를 규정하는 유일성 조건을 만족해야 한다.

위의 식 (15)와 경계조건으로 주어진 선형경계치 문제를 이 연구에서는 고차경계요소법을 이용하여 해석한다 (Chang et al.⁽¹⁷⁾). 이 연구에서 사용한 고차경계요소는 기하형상함수와 포텐셜 분포형상함수가 같은 등매개변수 8절점 사각형 요소와 6절점 삼각형 요소이다.

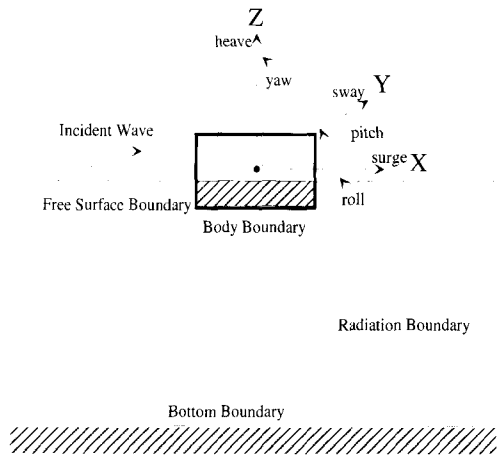


그림 5 폰툰의 좌표계

3.3 부유식교량 교대의 스프링 강성 산정

일반적으로 널리 사용되는 일체식 교대를 부유식교량에 적용하였다. 이때, 지반-구조물 상호작용을 고려하기 위해서는 FHWA⁽¹⁸⁾에서 제시한 교대와 기초의 집중화된 스프링 모델을 사용하였으며, 기초 스프링의 상관성분, 방사 감쇠 및 부가질량에 의한 영향은 고려하지 않았다.

교대벽체-뒷채움재의 강성은 단순화된 교대에서 집중 스프링으로 모델링할 수 있다. 병진운동과 회전운동에 대한 교축방향 압력분포로부터 교대벽체-뒷채움재 스프링모델의 강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_s = 0.425E_s B \quad (16a)$$

$$K_r = 0.072E_s B H^2 \quad (16b)$$

여기서, K_s 는 병진운동강성, K_r 은 회전운동강성, H 는

교대벽의 높이, E_s 는 지반의 탄성계수, B 는 교대벽의 폭이다.

계산된 병진과 회전스프링을 교대기초로 이동할 때에는 강성행렬이 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{bmatrix} K_s & h_1 K_s \\ h_1 K_s & h_1^2 K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ M_b \end{bmatrix} \quad (17)$$

교대가 기초를 포함하는 경우에는 기초를 따로 고려한 후, 다시 벽체구조와 합쳐진 행렬식을 구성하게 된다.

일반적인 사각형 기초의 강성은 원형기초의 강성에 수정계수를 곱하여 계산한다.

$$K_{ij}^R = \alpha \cdot \beta \cdot K_{ij} \quad (18)$$

여기서, K_{ij} 는 등가원형기초에서의 강성, α 는 사각형기초 수정계수, β 는 기초근입깊이 수정계수이다.

균질 반무한 지반에 놓인 원형기초의 스프링강성은 다음과 같다.

$$K_{11} = K_{22} = \frac{8GR}{2-v}, \quad K_{33} = \frac{4GR}{1-v} \quad (19a)$$

$$K_{44} = K_{55} = \frac{8GR^3}{3(1-v)}, \quad K_{66} = \frac{16GR^3}{3} \quad (19b)$$

여기서, G 는 전단계수, v 는 반탄성면의 프와송비, 병진운동 수정계수 $R = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$, K_{44} , K_{55} , K_{66} 에 대한 회

전운동 수정계수 $R = \left[\frac{16BL^3}{3\pi} \right]^{1/4}$, $R = \left[\frac{16LB^3}{3\pi} \right]^{1/4}$, $R = \left[\frac{4BL \cdot (4B^2 + 4L^2)}{6\pi} \right]^{1/4}$ 이다.

4. 지점운동에 의한 부유식교량의 운동방정식

부유식교량의 폰툰이 운동함에 따라서 발생하는 주파수의존 부가질량과 조파감쇠력을 고려하여 교량의 자유도를 지점운동을 직접 받는 부분과 그렇지 않는 부분으로 나누면 이산폰툰형 부유식교량의 운동 방정식은 다음과 같은 행렬식으로 표현될 수 있다.⁽³⁾

$$\begin{bmatrix} M_{FF} + m_a & M_{FR} \\ M_{RF} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_F \\ \ddot{U}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{FF} & C_{FR} \\ C_{RF} & C_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_F \\ \dot{U}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t [h(t-\tau)] \{ \dot{U}_{RF}(\tau) \} d\tau \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} + K_B & K_{FR} \\ K_{RF} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_F \\ U_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_F \\ F_R \end{bmatrix} \quad (20a)$$

$$m_{ij}(t) = a_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} h_{ij}(\omega) \sin[\omega t] d\omega \quad (20b)$$

$$h_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos[\omega t] d\omega \quad (20c)$$

여기서, $\begin{Bmatrix} \ddot{U}_F \\ \dot{U}_F \\ U_F \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \ddot{U}_R \\ \dot{U}_R \\ U_R \end{Bmatrix}$ 는 각각 교량의 가속도, 속도, 변위벡터, $\{M_{FF}(\tau)\}$ 는 폰툰의 속도벡터, $\begin{bmatrix} M_{FF} & M_{FR} \\ M_{RF} & M_{RR} \end{bmatrix}$ 는 교량의 질량행렬, $\{m_a\}$, $m_{ij}(t)$ 는 주파수에 무관한 부가질량행렬, $\begin{bmatrix} C_{FF} & C_{FR} \\ C_{RF} & C_{RR} \end{bmatrix}$ 는 교량의 감쇠행렬, $[h(t-\tau)]$, $h_{ij}(t)$ 는 시간지연함수행렬, $a_{ij}(\omega)$ 는 폰툰의 부가질량 행렬, $b_{ij}(t)$ 는 폰툰의 초과감쇠 행렬, $\begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FR} \\ K_{RF} & K_{RR} \end{bmatrix}$ 는 교량의 강도행렬, K_B 는 폰툰의 유체정역학적 복원력행렬, 아래 첨자 R은 지반 운동의 작용점에 대응되는 자유도(구속 경계)를 나타내고, 아래 첨자 F는 교량의 다른 모든 자유도에 대응되며(자유 경계), 지점을 제외하고는 가해진 하중이 없다면 하중 벡터 $\begin{Bmatrix} F_F \\ F_R \end{Bmatrix}$ 는 영벡터가 된다.

이 때 자유-자유 경계의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$(M_{FF} + m_a)\ddot{U}_F + C_{FF}\dot{U}_F + \int_0^t [h(t-\tau)]\dot{U}_F(\tau)d\tau + (K_{FF} + K_B)U_F = -M_{FR}\ddot{U}_R - C_{FR}\dot{U}_R - K_{FR}U_R \quad (21)$$

어떤 시간의 총 변위를 가상 정적 변위(Pseudo-static displacement)와 지점의 동역학적 변위로 나누면, 총 변위 $\begin{Bmatrix} U_F \\ U_R \end{Bmatrix}$ 는 주어진 시간 t에서의 가상 정적 변위 $\begin{Bmatrix} U_F^s \\ U_R^s \end{Bmatrix}$ 와 가상 정적 변위에 의해 생기는 동역학적 변위 $\begin{Bmatrix} U_F^d \\ U_R^d \end{Bmatrix}$ 항으로 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} U_F \\ U_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_F^s \\ U_R^s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} U_F^d \\ U_R^d \end{Bmatrix} \quad (22)$$

여기서, U_R^d 는 동역학적 지점 운동을 의미하며 영벡터가 된다.

식 (22)에 의해 자유-자유 경계에 대한 운동 방정식은 관성항의 효과에 비해 감쇠 효과가 무시할 만하다는 가정에 의하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(M_{FF} + M_a)\ddot{U}_F^d + C_{FF}\dot{U}_F^d + (K_{FF} + K_B)U_F^d + \int_0^t [h(t-\tau)]\{\ddot{U}_F^d(\tau) + \dot{U}_F^d(\tau)\}d\tau = (M_{FF} + M_a)\ddot{U}_F^s - M_{FR}\ddot{U}_R^s \quad (23)$$

5. 예 제

5.1 도 입

이 연구에 예제로서 사용한 교량은 여수-고흥간 연륙·연도교(이하 BR-09교⁽¹⁹⁾)와 GVA 부유식교량(이하 GVA교)으로서 두 교량 모두 이산폰툰형 부유식교량이며, GVA교에 대해서는 파랑하중과 지진하중에 대한 동적 거동에 관한 연구가 수행된 바 있다(백인열 등⁽²⁾, 권장섭 등⁽³⁾).

이 연구에서는 폰툰에 대한 유체의 영향을 포함하며, 교대를 회전 및 병진 스프링으로 모델링하고, 지반운동의 공간분포를 고려하여 생성된 인공지진파가 작용하는 경우에 대한 부유식교량의 시간영역 지진응답 해석을 수행하였다. 그리고, BR-09교의 수평방향 변위응답에 대하여 지반-구조물 상호작용, 지반운동의 공간변화, 지반의 종류 및 전단파 속도의 영향을 알아보려고 하였으며, 추가로 GVA교의 수평방향 변위 및 단면력에 대하여서는 지반운동의 공간변화의 영향을 중심으로 권장섭 등⁽³⁾의 연구와 비교하여 조사하였다. BR-09교는 양 교대부분에 공간변화를 고려한 지진 하중을 입력으로 하며, GVA교는 양 교대와 케이블 앵커부를 포함하여 총 6개의 지점에 각각 공간변화를 고려한 지진하중이 작용하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 지진 가속도와 변위는 Mohraz⁽¹³⁾의 설계 스펙트럼을 기준으로 3방향에 대하여 생성하여 3방향으로 동시 가진 시켰으며 이때, 지반의 종류, 표면 전단파의 속도 및 지진파의 최대가속도 등의 변수들에 대한 해석 사례의 분류를 표 1에 나타내었다.

표 1 해석 사례의 분류

변	수	분 류
최대-지반 가속도		- 0.11g(BR 09교) - 0.3g(GVA교)
지반-구조물 상호작용(동일한 지반운동, 중간정도 지반, 전단파속도 1000m/s)		- No SSI - SSI
지반운동의 공간변화에 대한 영향(지반-구조물 상호작용, 중간정도 지반, 전단파속도 1000m/s)		- Uniform Ground Motion - Spatially Varying Ground Motion
지반형태에 대한 영향(공간변화 고려한 지반운동, 지반-구조물 상호작용, 전단파속도 1000m/s)		- Firm Soil: rock - Medium Soil: 30ft alluvium
전단파 속도에 대한 영향(공간변화 고려한 지반운동, 지반-구조물 상호작용, 중간정도 지반)		- 2500 m/s - 1000 m/s

5.2 예제 1: BR 09교

BR-09교는 여수와 고흥을 연결하는 연륙·연도교 중에서 둔병도와 낭도를 잇는 총연장 630m의 이산폰툰형 부유식교량으로 예비 설계되었다. 콘크리트로 된 6개의 독

립된 폰툰에 의해 수면 상에 지지되며, 상부구조는 연속교 형식이며, 낭도와 연결되는 부분은 아치 트러스교로 설계되었고, 별도의 계류장치가 없이 횡방향의 외력은 상부구조로 수직방향의 외력은 폰툰에 의해 지지하게 되며, 둔병도와 연결된 부분은 곡선부로 설계된 비대칭형상의 교량이다. 해석에 사용된 계원은 유신코포레이션 보고서⁽¹⁹⁾를 참고하였고, 보고서에 기재되지 않은 값들은 추정하여 사용하였다(표 2). 그림 6에서의 지점 1 및 2에 각각 상관관계가 있는 지진입력이 작용하는 경우에 대해 시간영역 해석을 수행하여, 지반 구조물 상호작용, 지반운동의 공간변화, 지반의 종류 및 전단파 속도의 영향을 알아보고자 하였다.

표 2 단면의 치수 및 단면상수

구분	단면치수(m)	A(m ²)	Ixx(m ⁴)	Iyy(m ⁴)	Izz(m ⁴)
Girder	23.0×2.5	1.428	4.815	1.709	45.767
Pier	2.9×5.0	14.80	27.268	10.806	30.833
Pontoon	43.0×20.0	797.98	81197.71	22141.00	96811.00
Arch rib	1.5×2.0	0.140	0.103	0.089	0.058

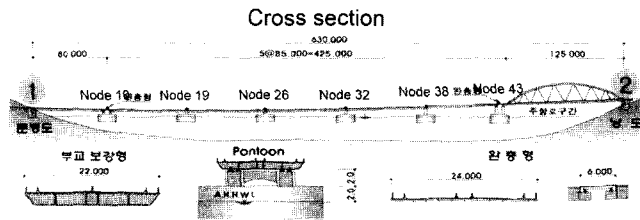


그림 6 여수-고흥 간 연속연도교(BR 09) 측면도 및 단면도

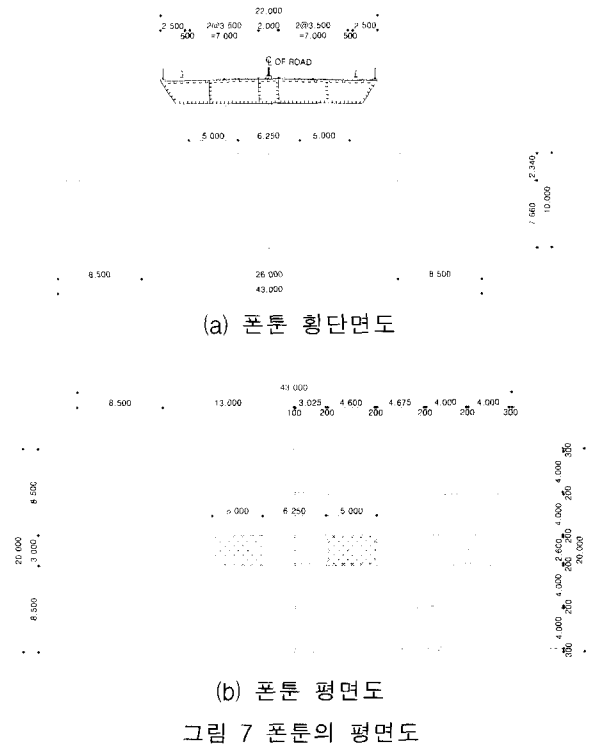


그림 7 폰툰의 평면도

5.2.1 자유진동해석

BR 09교는 폰툰의 운동에 의해서 주위 유체로부터 발생하는 부가질량의 영향으로 일반적인 교량에 비하여 상당히 장주기의 동적특성을 나타내었다.(표 3) 폰툰에 의해 지지되는 거더 구간에서는 수평방향에 대한 구속이 없기 때문에 진동형상은 1차 모드에서는 수평모드가 나타났으며, 2

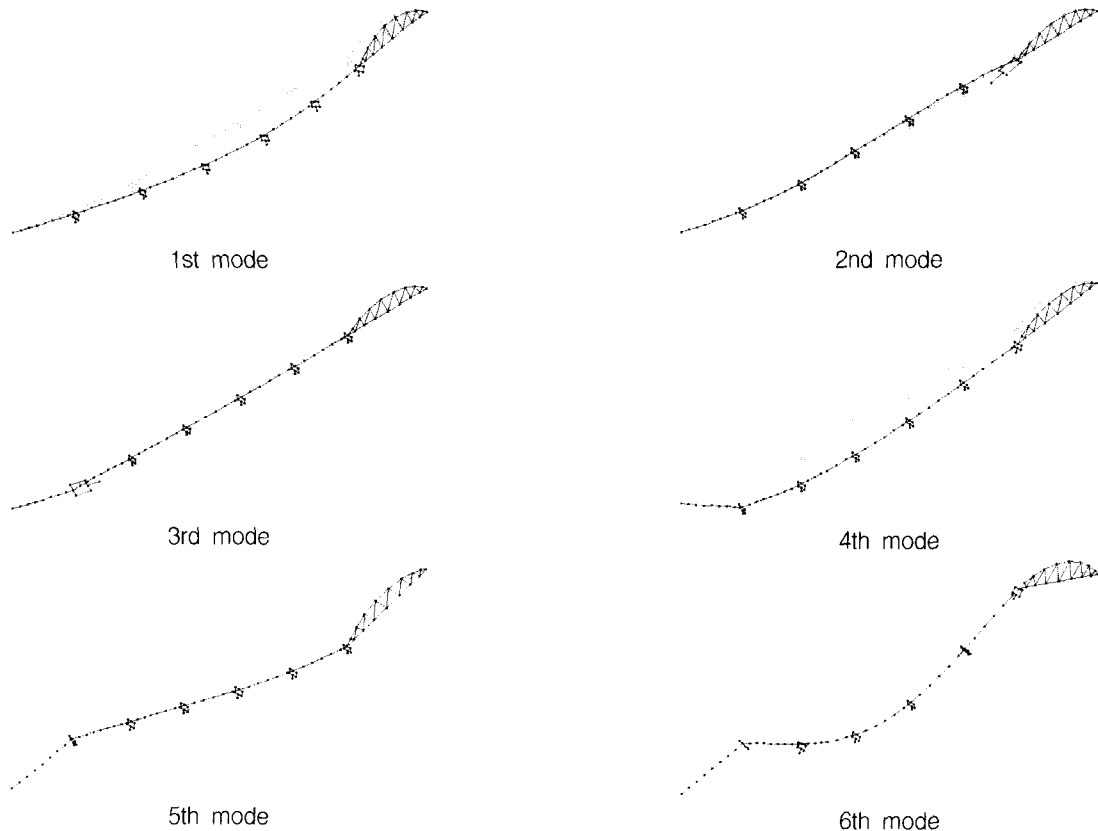


그림 8 모드 형상

차 이상의 모드에서는 수직모드가 주로 나타났다.(그림 8)

표 3 고유진동수 및 고유주기

모드	주파수(Hz)	주기(sec)	모드형상
1	0.101	9.888	수평
2	0.104	9.629	수직
3	0.106	9.436	수직
4	0.122	8.172	수직
5	0.123	8.134	수직
6	0.126	7.957	수직
7	0.139	7.183	수직
8	0.159	6.283	수평

5.2.2 시간영역해석

두 지점간의 거리가 630m 정도로 떨어진 두 지점에 작용하는 최대지반가속도가 0.11g인 인공지진파를 생성하여 해석에 사용하였다. 표 4와 같이 각 방향 별로 투영거리가 다르므로 각 방향마다 지진파를 생성하였다. 생성된 파의 상관계수는 표 5와 같다.

표 4 지점 1과 2의 거리

거리(m)	투영거리(m)		
	X 방향	Y 방향	Z 방향
627	620	29	0

표 5 지진파 1과 2의 상관계수(중간정도 지반, 전단파 속도 1000m/s)

지진파 방향		
X 방향	Y 방향	Z 방향
0.094	0.133	0.073

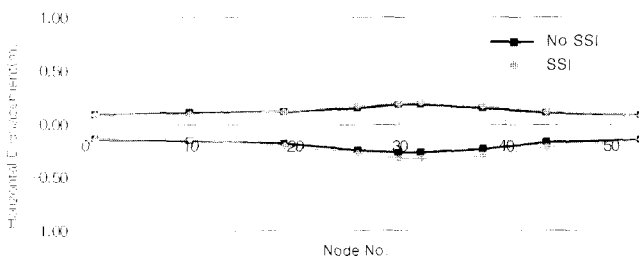


그림 9 거더의 수평변위(지반 구조물 상호작용에 대한 영향)

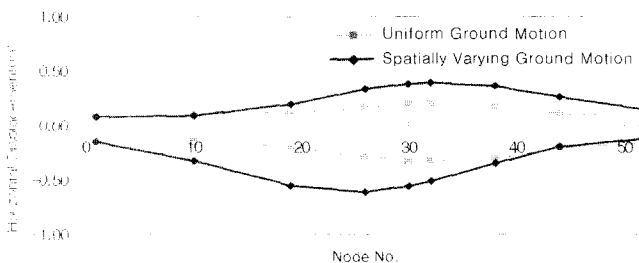


그림 11 거더의 수평변위(지반운동의 공간변화에 대한 영향)

그림 9와 그림 10에 i) 동일한 지반운동, ii) 중간정도 지반 및 iii) 전단파속도 1000m/s인 경우, 지반 구조물 상호작용에 대한 영향을 알아보았다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 BR 09교의 수평 변위는 교량 전체 길이에 걸쳐 지반 구조물 상호작용을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 약 10%정도 더 크게 발생하였고, 그림 10의 BR 09교 중앙점 변위이력에서도 확인할 수 있었다.

그림 11과 그림 12에 i) 지반 구조물 상호작용, ii) 중간정도 지반 및 iii) 전단파속도 1000m/s인 경우, 지반운동의 공간변화에 대한 영향을 알아보았다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 BR 09교의 횡방향 변위는 지반운동의 공간변화를 고려한 경우 그렇지 않은 경우보다 약 80%정도까지 더 크게 발생하였고, 그림 12의 BR 09교 중앙점 변위이력에서도 확인할 수 있었다. 서로 다른 지점에 입력되는 지반운동의 공간변화에 따른 상관계수가 작을수록 구조물의 응답이 크게 나타남을 부록의 1자유도계를 통해서 다시 확인할 수 있었다.

그림 13과 그림 14에 i) 공간변화 고려한 지반운동, ii) 지반 구조물 상호작용, 및 iii) 전단파속도 1000m/s인 경우, 지반형태에 대한 영향을 알아보았다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 BR 09교의 횡방향 변위는 중간정도 지반에서 단단한 지반의 경우보다 약 50%정도 더 크게 발생하였고, 그림 14에서 BR 09교의 중앙점 변위이력에서 역시 확인할 수 있었다. 그림 15에는 단단한 지반과 중간정도 지반에서 입력지진파와 부유식교량 중앙점 변위응답의 파워스펙트럼을 나타내었다. 이것은 지반형태가 중간정도 지반일 때가 단단한 지반일 때 보다 입력지진파의 1Hz이하의 저주파수 성분이 증가하고 교량의 첫 번째 고유진동수에 해당하는 0.1Hz 근처의 성분도 증가하게 되어 응답이 증폭되는 것으로 생각된다.

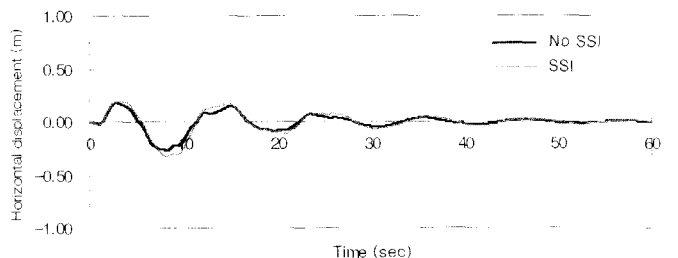


그림 10 교량 중심에서의 수평변위 이력(지반 구조물 상호작용에 대한 영향)

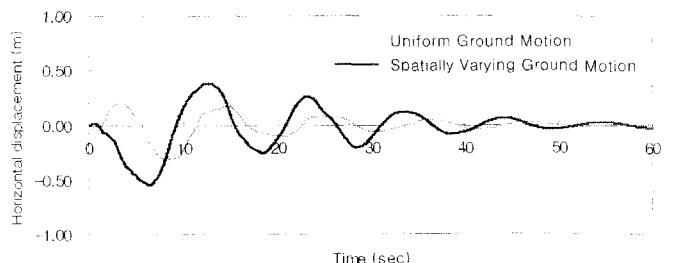


그림 12 교량 중심에서의 수평변위 이력(지반운동의 공간변화에 대한 영향)

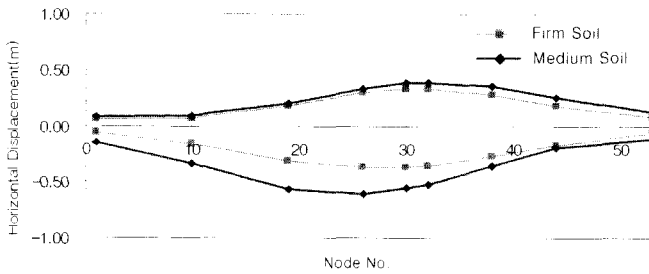


그림 13 거더의 수평변위(지반형태에 대한 영향)

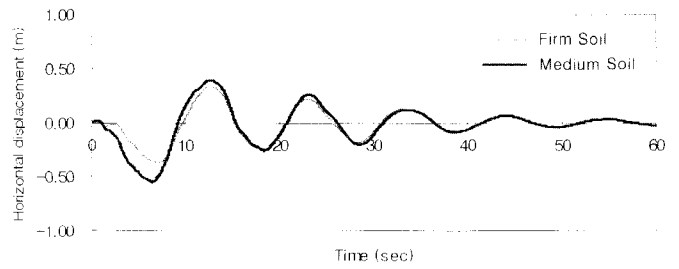
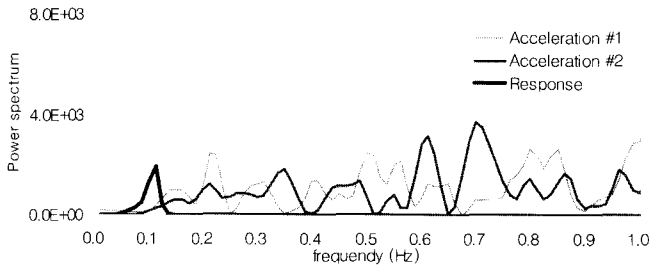
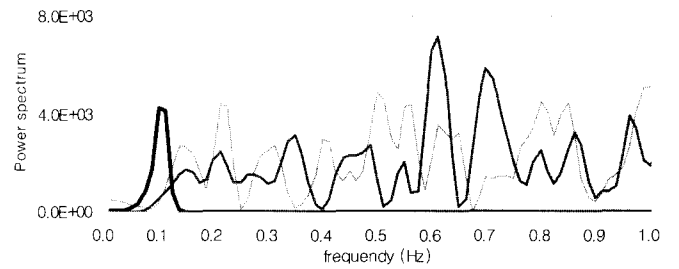


그림 14 교량 중심에서의 수평변위 이력(지반형태에 대한 영향)



(a) 단단한 지반



(b) 중간정도 지반

그림 15 입력 지진 가속도 스펙트럼과 교량 중앙부의 변위 응답 스펙트럼(지반형태에 대한 영향)

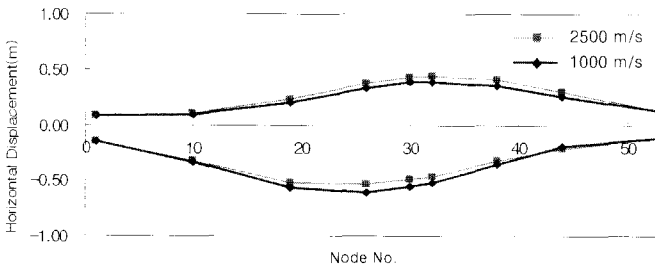


그림 16 거더의 수평변위(전단파 속도에 대한 영향)

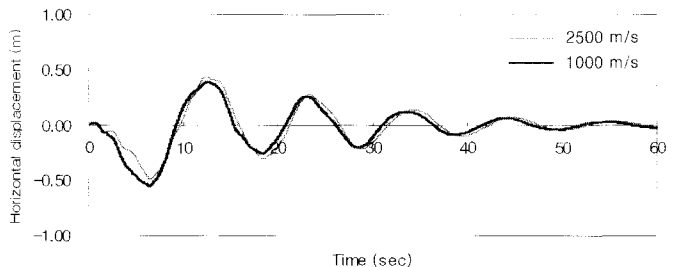


그림 17 교량 중앙부에서의 수평변위 이력(전단파 속도에 대한 영향)

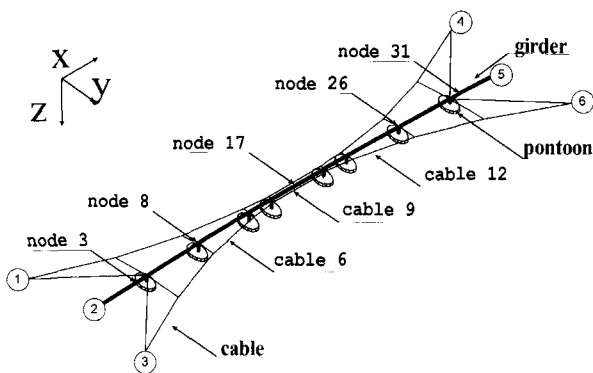


그림 18 GVA 부유식교량

그림 16과 그림 17에 i) 공간변화 고려한 지반운동, ii) 지반 구조물 상호작용, 및 iii) 중간정도 지반인 경우, 전단파 속도에 대한 영향을 알아보았다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 BR 09교의 수평변위는 전단파 속도에 대하여 의미있는 영향은 나타나지 않았고, 그림 17에서 BR 교의 중앙점 변위이력에서도 확인할 수 있었다.

5.3 예제 2: GVA교

GVA교는 제안한 포물선 형태의 프리텐션 케이블로

수평 지지되고 폰툰의 부력에 의해 수직 지지되는 구조 형식이다. 그림 18에서의 교대 2 및 5와 케이블 앵커 1, 3, 4, 및 6에 해당하는 지점에 각각 상관관계가 있는 지진입력이 작용하는 경우에 대해 시간영역 해석을 수행하였으며, 권장섭 등⁽³⁾의 연구와 비교하여 수평변위 및 단면력에 대한 지반운동의 공간변화의 영향을 알아보았다.

5.3.1 자유진동해석

GVA교의 동적 특성을 알아보기 위하여 자유진동해석을 수행하였다. 부유식교량의 고유진동수는 표 6에 나타내었다.(권장섭 등⁽³⁾) 일반적인 교량에 비하여 부유식교량은 폰툰의 운동에 의해서 주위 유체로부터 발생하는 부가질량의 영향으로 고유주기가 약10초에 이르는 장주기의 동적특성을 나타내었다. 진동형상은 1차와 2차 모드에서는 수평모드가 나타났으며, 3차 이상의 모드에서는 수직모드가 주로 나타났다. 따라서, 지진하중이 교량 길이에 걸쳐 같은 방향으로 작용한다면 다른 모드보다 첫 번째 모드 성분의 증폭 여부에 특히 주의를 하여야 한다.

표 6 고유진동수 및 고유주기

모드 번호	고유진동수(Hz)	고유주기(sec)	모드 형상
1	0.0936	10.7	수평
2	0.153	6.55	수평
3	0.189	5.28	수직
4	0.191	5.23	수직
5	0.193	5.21	수직
6	0.199	5.01	수직
7	0.208	4.81	비틀
8	0.228	4.41	수직

5.3.2 시간영역해석

입력지점 사이의 거리는 표 7과 같고 최대가속도가 0.3g 인 인공지진파를 생성하여 해석에 사용하였다. 각 방향 별로 투영거리가 다르므로 각 방향마다 지진파를 생성하였다. 생성된 파의 상관계수는 표 8과 같다.

표 7 입력지점 사이의 거리

	거리 (m)	투영거리(m)		
		X 방향	Y 방향	Z 방향
지점 1 - 지점 2	136.02	47.5	136	2.175
지점 1 - 지점 3	272	0	272	0
지점 1 - 지점 4	950	950	0	0
지점 1 - 지점 5	959.69	902.5	136	2.175
지점 1 - 지점 6	988.17	950	272	0

표 8 지진파 사이의 상관계수

	지진파 방향		
	X 방향	Y 방향	Z 방향
지진파 1 - 지진파 2	0.386	0.349	0.496
지진파 1 - 지진파 3	0.309	0.232	0.309
지진파 1 - 지진파 4	0.069	0.158	0.136
지진파 1 - 지진파 5	0.007	0.150	0.130
지진파 1 - 지진파 6	0.039	0.122	0.114

그림 19와 그림 20에 i) 지반 구조물 상호작용, ii) 중간 정도 지반 및 iii) 전단파속도 1000m/s인 경우, 지반운동의 공간변화에 대한 영향을 알아보았다. 그림 19에서 볼 수 있듯이 GVA교의 횡방향 변위는 지반운동의 공간변화를 고려한 경우 그렇지 않은 경우보다 약 70%정도 더 크게 발생하였고, 그림 20에서 GVA교의 중앙점 변위이력에서 역시 확인할 수 있었다. 그림 21에는 횡방향 단면력을 나타내었는데, 지반운동의 공간변화를 고려한 경우 전단력은 약 70%정도 그리고 모멘트는 약 120%정도 더 크게 발생하였다. 지진입력의 공간변화에 따른 상관계수가 작을 수록 구조물의 응답이 크게 나타남을 부록에서 확인할 수 있는 바, 지진하중에 대한 부유식교량의 설계 시에 지반운동의 공간변화를 고려한 해석이 필요하다고 사료된다.

6. 결 론

이 연구에서는 지반운동의 공간변화를 고려한 이산폰튼형 부유식교량의 시간영역 지진응답 해석을 수행하였다. 지진하중의 공간적 특성에 영향을 주는 파의 통과 영향, 엇결성 영향, 국부 지반 영향을 고려할 수 있는 결맞음함수를 이용하여 인공지진파를 생성하였다. 부유식교량의 상부구조는 공간뼈대요소와 탄성현수선요소를 이용하여 모델링하였고, 기초는 FHWA에서 제안한 스프링 모델을 적용하여 동적 지반 구조물 상호작용을 고려하였다.

이산폰튼형 부유식교량의 지진응답 중 가장 큰 응답을 보이는 수평방향 변위에 대한 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다:

- (1) 지반운동의 공간변화를 고려한 지진입력의 경우에 동일한 지진입력의 경우보다 주목할 만하게 큰 지진응답이 발생하였다. 즉, 서로 다른 지점에 입력되는 지

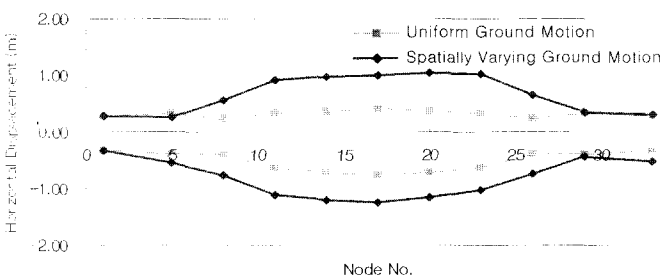


그림 19 거더의 수평변위(지반운동의 공간변화에 대한 영향)

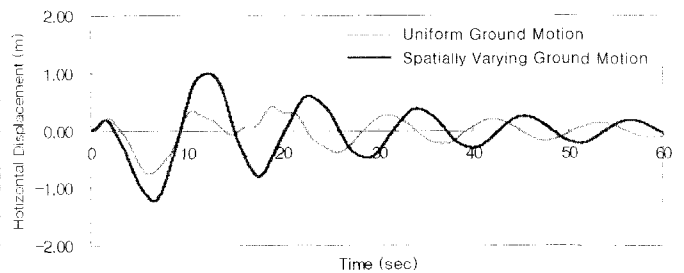
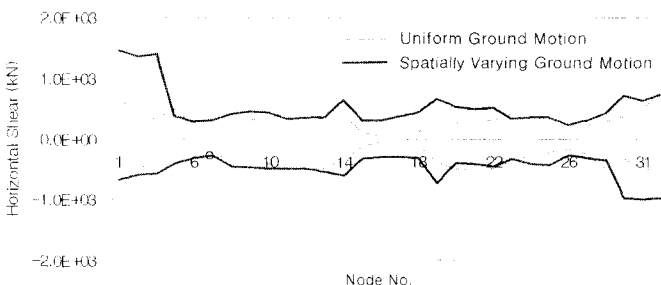
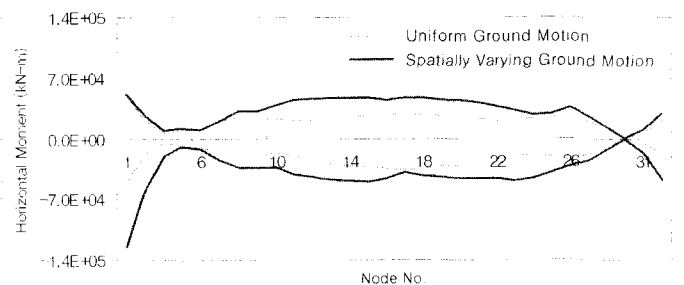


그림 20 교량 중앙부에서의 수평변위 이력(지반운동의 공간변화에 대한 영향)



(a) 수평방향 전단력



(b) 수평방향 모멘트

그림 21 거더의 부재력(지반운동의 공간변화에 대한 영향)

반운동의 상관계수가 작을수록 부유식교량의 지진응답이 크게 나타나는 것으로 생각되며, 부록에서 입력지반운동의 가진 주파수에 비하여 저주파수의 고유진동수를 갖는 1자유도계에 대한 해석결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 따라서, 고유주기가 10초에 이르는 장주기 특성을 갖는 이산폰툰형 부유식교량의 지진응답해석에서는 지반운동의 공간분포를 고려한 해석이 필수적인 것으로 생각된다.

- (2) 지반형태가 단단한 지반에 비하여 중간정도 지반의 경우가 입력지반운동에서 저주파수 성분이 차지하는 비중이 증가하게 되고 부유식교량의 첫 번째 고유진동수에 해당하는 0.1Hz 근처의 성분도 증가하게 되어 부유식교량의 응답이 50% 정도 증폭되는 결과를 나타내었다. 지반에 따라 입력지진의 주파수 성분의 분포가 변화되어 해석대상 부유식교량의 고유진동수와 가까운 주파수성분이 증가되는 경우가 발생할 수 있으므로, 부유식교량의 지진응답해석에는 실제적인 지반형태에 대한 지진입력의 영향을 고려할 필요가 있다.
- (3) 지반 구조물 상호작용이 고려된 경우에 부유식교량의 최대 응답이 10% 정도 증가하여 나타났다. 이 연구에서는 지반을 간단하게 근사적인 스프링으로 모델링하였고 다양한 지반과 기초에 대하여 부유식교량의 지진응답해석을 수행하지 않았으므로, 지반 구조물 상호작용을 고려한 좀 더 심화된 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

(주)유신코퍼레이션의 자료 협조에 감사드립니다.

참고 문헌

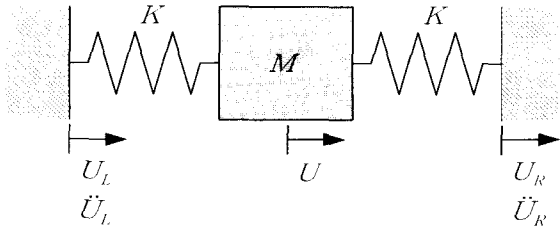
1. Hartz, B. J., "Dynamic Response of the Hood Canal Floating Bridge," *ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures*, Atlanta, Ga., 1981, pp. 16 28.
2. 백인열, 권장섭, 이원표, 장승필, "이산 폰툰형 부유식교량의 동적 해석", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2 A호, 2002, pp. 327 336.
3. 권장섭, 백인열, 장승필, "다중지점 가진 효과를 고려한 부유식 교량의 지진응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제8권 제2호, 2004, PP. 27 33.
4. 현창현, "현수교의 풍하중과 지진하중에 대한 추계론적 거동해석", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989.
5. 김호경, 서정인, "다중지점된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 45 58.
6. Harichandran, R. S., Hawwari, A. and Sweidan, B. N., "Response of Long Span Bridges to Spa-

- tially Varying Ground Motion," *Journal of Structural Eng.*, ASCE, Vol.122, No.5, 1996, pp. 476 484.
7. Fogazzi, P. and Perotti, F., "The dynamic response of seabed anchored floating tunnels under seismic excitation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, 2000, pp. 273 295.
8. Zanardo, G., Hao, H. and Modena, C., "Seismic response of multi span simply supported bridges to a spatially varying earthquake ground motion," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, 2002, pp. 1325 1345.
9. 김재민, 이명규, 신용우, "다지점 지진입력에 대한 현수교의 지반 구조물 상호작용해석", 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 2003, pp. 182 189.
10. Harichandran, R. S., "Spatial variation of earthquake ground motion: what is it, how do we model it, and what are its engineering implications?," Michigan State Univ., 1999.
11. Harichandran, R. S. and Vanmarcke, E. H., "Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 112, No. 2, 1986, pp. 154 174.
12. Hao, H., Oliviera, C. S. and Penzien, J., "Multiple station ground motion processing and simulation based on SMART1 array data," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 111, 1989, pp. 293 310.
13. Mohraz, B., "A study of earthquake response spectra for different geological conditions," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 66(3), 1976, pp. 915 935.
14. 현대건설 기술연구소, 현수교의 시공 단계 해석 시스템 개발, 93STR09, 1994.
15. 장승필, 박정일, "비선형 케이블 유한요소에 관한 연구", 한국해양 해양공학회지, 제1권, 제1호, 1989, pp. 93 101.
16. Newman, J. N., *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, 1986.
17. Chang, S. P., Park, J. I. and Kim, J. K., "A Dynamic Analysis of Tension Leg Platform using the General Curved Boundary Element," *Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco USA, Vol. 1, 1992, pp. 228 234.
18. Federal Highway Administration, *Seismic design of highway bridge foundations vol. II: design procedures and guidelines*, Report no. FHWA/RD 86/102, 1986.

19. 유신코퍼레이션, 여수-고흥간 연륙-연도교 형식선정
건설기술국제현상공모 설계설명서, 2002.

부 록

지반운동의 공간변화를 고려한 지진입력의 경우에 동일한 지진입력의 경우보다 주목할 만하게 큰 지진응답이 발생하였다. 그 이유를 알아보기 위하여 1자유도계에 대한 지진응답해석을 수행하였다. (부록그림 1)



부록그림 1 지진입력에 의한 1자유도 시스템의 응답

1자유도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{U} + 2KU = K(U_L + U_R) \tag{A1}$$

여기서, $U(t)$ 는 고정좌표계에 대한 변위응답, 지반운동 $U_L(t) = \cos(\omega t)$, 지반운동 $U_R(t) = \cos(\omega t + \phi)$, 초기변위 $U(0) = 0$, 초기가속도 $\ddot{U}(0) = 0$ 이다.

미분방정식 식 (A1)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$U(t) = [-(\omega_n/\omega)\sin\phi\sin\omega_n t + (\omega_n/\omega)^2\{1 + \cos(\omega t + \phi)\}\cos(\omega_n t) - (\omega_n/\omega)^2\{\cos(\omega t) + \cos(\omega t + \phi)\}]/[2\{1 - (\omega_n/\omega)^2\}] \tag{A2}$$

여기서, 고유진동수 $\omega_n = \sqrt{2K/MP}$ 이다.

입력지진의 진동수에 비하여 구조물의 고유진동수가 상당히 작아서 $\omega_n/\omega \ll 1$ 이라 간주할 수 있다면 변위응답 $U(t)$ 는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$U(t) \approx -\{(\omega_n/\omega)\sin\phi\sin\omega_n t\}/2 \tag{A3}$$

$U(t)$ 는 고유주파수 ω_n 로 진동하게 되며, 지진입력의 위상차 ϕ 의 함수임을 확인할 수 있다.

본문의 식 (10)에 의하면 2개의 지진입력 $U_L(t) = \cos(\omega t)$ 과 $U_R(t) = \cos(\omega t + \phi)$ 의 상관계수는 다음과 같다.

$$\rho_{ij}(0) = \cos\phi \tag{A4}$$

식 (A3)은 식 (A4)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(t) \approx -\{(\omega_n/\omega)\sqrt{(1 - \rho_{ij}^2)}\sin\omega_n t\}/2 \tag{A5}$$

따라서, 서로 다른 두 지점에 입력되는 지진파의 상관계수가 작을수록 지진응답의 크기가 크게 나타남을 알 수 있다.