

다중지점 가진 효과를 고려한 부유식 교량의 지진응답 해석

Dynamic Analysis of Floating Bridge Subject to Earthquake Load Considering Multi-Support Excitation

권 장 섭* 백 인 열** 장 승 필***
Kwon, Jang Sub Paik, In Yeol Chang, Sung Pil

국문요약

다중지점 지진입력에 대한 부유식 교량의 동적응답해석을 수행하였다. 이 연구에서 사용한 부유식 교량은 수직방향으로는 이산 폰툰에 의해 지지되고 수평방향으로는 프리텐션 케이블에 의해 지지된다. 부유식 교량의 상부구조는 공간뼈대요소와 탄성현수케이블요소를 이용하여 모델링하였고, 폰툰의 부가질량 및 부가감쇠는 경계요소를 이용하여 구하였다. 동수력 계수의 주파수 의존성을 고려하기 위해서 시간지연함수를 사용하여 해석을 수행하였다. 다중지점 지진입력은 교량의 양단과 케이블 앵커에서 도입하였고 응답의 시간이력을 동시가진 시와 비교하였다. 해석결과로부터 케이블 장력 등은 동시가진 시보다 다중지점 지진입력 시에서 더 큰 응답을 보임을 알 수 있다.

주요어 : 부유식 교량, 동적 응답, 시간지연함수, 다중지점 지진입력

ABSTRACT

Dynamic response analysis is conducted for a floating bridge subjected to multiple support earthquake excitation. The floating bridge used in this study is supported by discrete floating pontoons and horizontal pretension cables supported at both ends of the bridge. The bridge is modeled with finite elements and the hydrodynamic added mass and added damping due to the surrounding fluid around pontoons are obtained using boundary elements. During the analysis the concept of retardation function is utilized to consider the frequency dependency of the hydrodynamic coefficients. Multiple support excitation is introduced at both ends of the bridge and the time history response is compared to that of a simultaneous excitation. The results show that the multiple support excitation yields larger values in some responses, for example in cable tensions, than the simultaneous excitation.

Key words : floating bridge, dynamic response, retardation function, multiple support earthquake excitation

1. 서 론

부유식 교량은 기존 장대교량에 비하여 깊은 수심, 연약한 지반, 지진이 잦은 지역 등에서 유리하며, 시공 기간이 짧고 건설 과정에서 환경 손실이 적다는 장점을 갖는 구조형식이다. 부유식 교량의 형식으로는 이산 폰툰형과 연속 폰툰형이 있다. 폰툰이 서로 떨어져 있는 이산 폰툰형 부유식 교량으로는 횡방향 아치형으로 수면에 접해 있어 주위 자연경관과 잘 조화된 노르웨이의 Bergsöysund 교량(Solland et al.⁽¹⁾)이 대표적이며, 폰툰이 연속된 연속 폰툰형 부유식 교량으로는 미국 시애틀의 워싱턴호를 가로지르며 하루 10만대 이상의 차량이 통과하는 Lacey Murrow 교량(Lwin⁽²⁾)이 유명하다.

부유식 교량에 대한 기존의 연구들에서 보면, 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⁽³⁾). 백인열 등⁽⁴⁾은 시간영역 해석 시 동수력 계수의 주파수 의존

성을 고려하기 위하여 시간지연함수를 사용하여 부유식 교량의 파랑하중 응답해석을 수행하였다.

이 연구에서는 부유식 교량에 작용하는 중요한 하중의 하나인 지진하중에 대하여 동수력 계수의 주파수 의존성을 고려한 시간영역해석을 수행하였다. 해석 예로는 그림 1과 같은 부유식교량 예(Hammarstrom et al.⁽⁵⁾)를 선택하여, 유체의 효과를 고려한 교량의 자유진동 모드를 구하고, 1979년 미국에서 계측된 지진을 입력지진으로 하여 지진하중 응답 해석을 수행하였다. 지진하중 해석에는 다중지점 가진효과도 고려하였으며, 이 때 김호경 등⁽⁶⁾의 연구에서와 같이 지진파가 한 지점에서 거리가 떨어진 다른 지점으로 형상변화 없이 이동한다고 가정하였다.

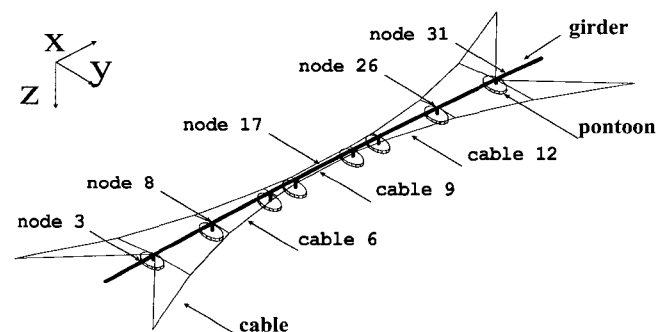


그림 1 횡방향 케이블로 지지된 이산 폰툰형 부유식 교량 모델

* 정희원 · 서울대학교 지진공학연구센터, 전임연구원(대표지자 : jskwon71@snu.ac.kr)

** 정희원 · 경원대학교 토목환경공학과, 부교수

*** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 1. 6 / 심사종료일 : 2004. 3. 8)

2. 부유식 교량의 유한요소 모델링

이산 폰툰형 부유식 교량의 상부 구조체는 3차원 뼈대요소와 탄성 현수선 케이블요소로 모델링하고 하부 폰툰의 부력변화는 스프링으로 모델링한다.

교량을 모델링하기 위해 사용한 3차원 뼈대요소는 그림 2와 같이 부재의 단면이 비대칭인 경우도 해석할 수 있도록 단면중심 C와 전단중심 S를 구분하여 정의하고, 부재축에 따른 길이 방향으로의 단면의 크기가 일정하게 가정된 요소이다(현대건설⁷⁾. 이 요소의 접선강도행렬 K_T 는 부재탄성강도행렬 K_E 와 부재기하강도행렬 K_G 을 이용하여 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$K_T = K_E + K_G \quad (1)$$

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

이 연구에서 사용한 케이블 요소는 그림 3과 같은 형상의 탄성현수선 요소이다(장승필과 박정일⁸⁾. 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.

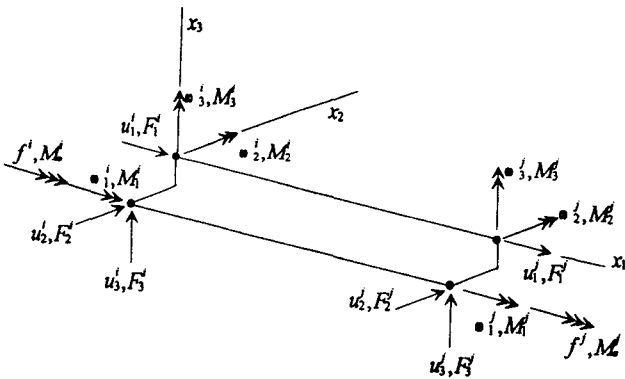


그림 2 뼈대요소의 변위 및 단면력 정의

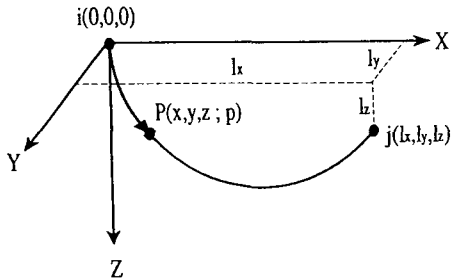


그림 3 탄성현수선 요소의 형상

3. 폰툰의 동수역학 계수 산정

부유식 교량의 폰툰과 같이 크기가 큰 부유체에 작용하는

파력과 운동에 의한 부가질량과 조파 감쇠력의 계산은 주로 선형 포텐셜 이론으로 다룬다(Beauchamp⁹⁾; Luft¹⁰⁾. 그림 4에 폰툰에 대한 기준 좌표계와 자유도 및 경계를 나타내었다. 유체를 비점성, 비압축성으로 흐름은 비회전성으로 가정하면 식 (2)와 같은 속도 포텐셜 함수 ϕ 가 존재한다(Newman¹¹⁾; Van Oortmerssen¹²⁾.

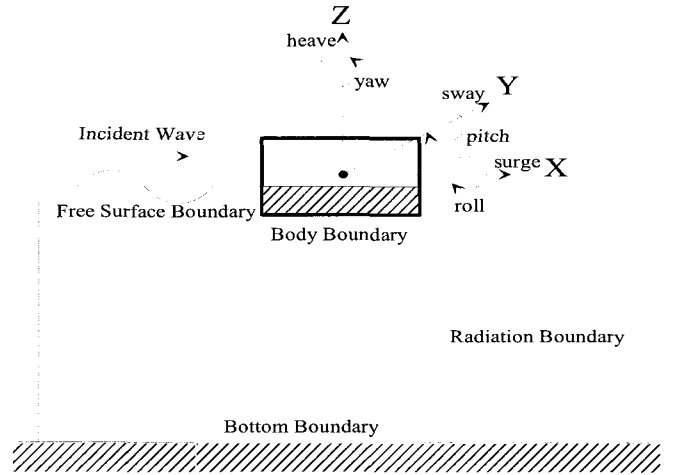


그림 4 폰툰의 좌표계

$$\phi = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} = -i\omega e^{-i\omega t} \sum_{j=1}^7 \phi_j \xi_j \quad (2)$$

이 식에서, $i = \sqrt{-1}$, ω 는 주파수, ϕ_j ($j=1, \dots, 6$)는 폰툰의 j 방향 운동에 대한 방사 포텐셜이고, 이 중 ϕ_0 와 ϕ_7 은 각각 입사파와 회절파의 속도 포텐셜이며, ξ_j 는 폰툰의 j 방향 운동의 진폭이다. 이 중 ϕ_0 와 ϕ_7 은 각각 입사파(incident wave)와 회절파(diffraction wave)의 속도 포텐셜이며, ξ_j 는 폰툰의 j 방향 운동의 진폭이다. 속도 포텐셜은 다음과 같은 라플라스 식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi = 0 \quad (3)$$

일반적으로 폰툰의 크기에 비하여 파고와 폰툰의 운동의 크기가 작다고 가정할 경우 수면과 잠긴 면에서의 경계 조건을 선형화하면 아래와 같이 자유수면 경계조건식, 해저면 경계조건식, 폰툰의 잠긴 표면조건식, 그리고 파가 폰툰 바깥으로 전파해 나아간다는 방사조건식이 얻어진다.

$$\begin{cases} -\omega^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, & \text{at } z = d - c \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, & \text{at } z = -c \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial t}, & \text{at body boundary} \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} - ik\phi \right) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, g 는 중력가속도, d 는 수심, c 는 원점에서 해저면까지의 거리, n 는 잠긴 면에 수직인 벡터, w 는 수면아래 잠긴 면에서의 변위, R 은 원점으로부터의 수평 방사거리,

k 는 파 번호이다.

위의 식 (3)과 식 (4)로 주어진 선형 경계치 문제를 이 연구에서는 3차원 고차경계요소법을 이용하여 해석한다(Chang et al.⁽¹³⁾).

경계요소법으로부터 포텐셜 함수 ϕ 를 구하고 나면 폰톤의 운동과 관련된 방사포텐셜 항 ($j=1, 2, \dots, 6$) 으로부터 다음과 같이 부가질량계수와 감쇠계수를 얻게 된다.

$$a_{kj} = -\rho Re \left[\int_{S_w} \phi_j n_k dS \right] \quad (5)$$

$$b_{kj} = -\rho \omega Im \left[\int_{S_w} \phi_j n_k dS \right] \quad (6)$$

여기서, $Re[\]$ 는 실수성분, $Im[\]$ 는 허수성분을 나타내고, a_{kj} 는 부가질량계수로서 가속도와 위상각이 같고, b_{kj} 는 감쇠계수로서 속도와 위상각이 같다.

4. 부유식 교량의 운동방정식

4.1 지점운동에 의한 운동방정식

일반적인 교량의 자유도를 지점운동을 직접 받는 부분과 그렇지 않는 부분으로 나누면 운동방정식은 다음과 같다(김호경과 서정인⁽⁶⁾).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{FF} & \mathbf{M}_{FR} \\ \mathbf{M}_{RF} & \mathbf{M}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_F \\ \dot{\mathbf{U}}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{FF} & \mathbf{C}_{FR} \\ \mathbf{C}_{RF} & \mathbf{C}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_F \\ \dot{\mathbf{U}}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{FF} & \mathbf{K}_{FR} \\ \mathbf{K}_{RF} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_F \\ \mathbf{U}_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_F \\ \mathbf{F}_R \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 아래 첨자 R은 지반운동의 작용점인 지점의 자유도를 나타내고, 아래 첨자 F는 교량의 다른 모든 자유도를 나타낸다.

교량의 자유경계 성분 만에 대한 식을 구하기 위하여, 지점의 운동 이외에는 가해지는 하중이 없으며, 관성 항에 비해 감쇠를 무시할 만하다는 가정을 이용하여 운동방정식을 재정리하면 그 결과는 다음과 같다(현대건설⁽⁷⁾).

$$\mathbf{M}_{FF} \ddot{\mathbf{U}}_F^d + \mathbf{C}_{FF} \dot{\mathbf{U}}_F^d + \mathbf{K}_{FF} \mathbf{U}_F^d = (\mathbf{M}_{FF} \mathbf{K}_{FF}^{-1} \mathbf{K}_{FR} - \mathbf{M}_{FR}) \ddot{\mathbf{U}}_R^s \quad (8)$$

여기서, 위첨자 s 는 지점운동을 나타내는 가상정적변위(pseudo-static displacement)이고, 위첨자 d 는 이로 인하여 발생하는 동역학적 변위 성분을 나타낸다. 따라서 $\ddot{\mathbf{U}}_R^s$ 는 지점운동을 나타내는 지반가속도이며 \mathbf{U}_F^d , $\dot{\mathbf{U}}_F^d$, $\ddot{\mathbf{U}}_F^d$ 는 이로 인한 교량의 동적 변위, 속도 및 가속도이다.

4.2 동수력계수의 주파수 의존성 고려

폰톤의 동수력계수인 부가질량계수와 감쇠계수는 주파수에 따라 변하는 값이다. 이 연구에서는 주파수 의존 부가질량

로부터 주파수 의존 성분을 제거한 독립적인 부가질량과 주파수 의존 감쇠계수를 푸리에 변환시켜 얻은 시간지연함수를 이용하여 폰톤에 작용하는 유체력을 산정하였다(Cummins⁽¹⁴⁾). 폰톤의 운동에 대하여 부가질량에 의한 관성력과 시간지연함수와 폰톤의 운동속도를 회전적분하여 얻은 유체력을 고려하면 이산 폰톤형 부유식 교량의 운동방정식은 다음과 같다.

$$([\mathbf{M}] + [\mathbf{m}]) \{ \ddot{\mathbf{U}} \} + [\mathbf{C}] \{ \dot{\mathbf{U}} \} + \int_0^t [h(t-\tau)] \{ \dot{\mathbf{U}}(\tau) \} d\tau + ([\mathbf{K}] + [\mathbf{r}]) \{ \mathbf{U} \} = \{ \mathbf{F} \} \quad (9)$$

$$h_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (10)$$

$$m_{ki} = a_{ki}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty h_{kj}(t) \sin \omega t dt \quad (11)$$

여기서, $\{ \mathbf{U} \}$, $\{ \dot{\mathbf{U}} \}$, $\{ \ddot{\mathbf{U}} \}$ 는 각각 교량의 변위, 속도, 가속도벡터, $\{ \dot{\mathbf{U}}_p \}$ 는 폰톤의 속도벡터, $[\mathbf{M}]$ 는 교량의 질량행렬, $[\mathbf{m}]$, m_{ki} 는 주파수에 무관한 독립적인 부가질량행렬, $[\mathbf{C}]$ 는 교량의 감쇠행렬, $[h]$, h_{kj} 는 시간지연함수행렬, $[\mathbf{K}]$ 는 교량의 강도행렬, $[\mathbf{r}]$ 은 폰톤의 유체정역학적 복원력행렬을 나타낸다.

4.3 부유식 교량의 지점운동에 의한 운동방정식

일반적인 교량의 지점운동에 대한 운동방정식인 식 (7)과 부유식 교량의 폰톤이 운동함에 따라서 발생하는 주파수의존 부가질량과 조파 감쇠력을 고려한 식 (9)를 종합하면 부유식 교량의 지점운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{FF} + \mathbf{M}_a & \mathbf{M}_{FR} \\ \mathbf{M}_{RF} & \mathbf{M}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_F \\ \dot{\mathbf{U}}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{FF} & \mathbf{C}_{FR} \\ \mathbf{C}_{RF} & \mathbf{C}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_F \\ \dot{\mathbf{U}}_R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \dot{\mathbf{U}}_F(\tau) d\tau \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{FF} + \mathbf{r} & \mathbf{K}_{FR} \\ \mathbf{K}_{RF} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_F \\ \mathbf{U}_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_F \\ \mathbf{F}_R \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (8)에서와 같이 자유 경계 성분만을 변수로 정리하면 다음과 같은 운동방정식을 얻게 된다.

$$(\mathbf{M}_{FF} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{U}}_F^d + \mathbf{C}_{FF} \dot{\mathbf{U}}_F^d + (\mathbf{K}_{FF} + \mathbf{R}) \mathbf{U}_F^d + \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \dot{\mathbf{U}}_F^d(\tau) d\tau = \{ (\mathbf{M}_{FF} + \mathbf{M}_a) \mathbf{K}_{FF}^{-1} \mathbf{K}_{FR} - \mathbf{M}_{FR} \} \ddot{\mathbf{U}}_R^s - \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \dot{\mathbf{U}}_F^s(\tau) d\tau \quad (13)$$

5. 예제

5.1 부유식 교량의 제원

대상 교량은 그림 1과 같이 케이블에 의해서 수평방향으로

지지되고, 폰톤의 부력에 의해서 수직방향으로 지지되는 구조형식이다. 백인열 등⁽⁴⁾의 연구에서와 같은 제원의 부유식 교량을 사용하였으며 부유식 교량의 상부구조는 56개의 뼈대요소와 38개의 탄성현수선 요소로 모델링 하였다.

5.2 부유식 교량의 자유진동 해석

부유식 교량의 동적 특성을 알아보기 위하여 예제 교량에 대해서 자유진동해석을 수행하였다. 교량 상부구조가 케이블과 뼈대구조로 이루어지므로 현수교의 자유진동해석(장승필과 김호경⁽¹⁵⁾)과 유사하나, 부유식 교량의 경우는 폰톤의 운동에 의해서 주위 유체로부터 발생하는 부가질량과 폰톤의 부력에 의해서 발생하는 강도를 추가로 고려해 주어야 한다.

자유진동 해석 결과 부유식 교량의 고유진동수는 표 1에 나타내었으며, 이 중 처음 4개의 고유모드 형상을 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 점선으로 표시된 원래의 형상을 기준으로 하였을 때 첫 번째 수평모드만이 같은 방향으로의 변위 형상을 보여주고 다른 모드들은 양방향의 변위 형상을 보여준다. 따라서, 지진하중이 교량 길이에 걸쳐 같은 방향으로 작용한다면 다른 모드보다 첫 번째 모드 성분의 증폭 여부에 특히 주의를 하여야 한다.

표 1 예제 교량의 자유진동 해석 결과

모드 번호	고유진동수(rad/sec)	고유주기(sec)	모드 형상
1	0.588	10.7	수평
2	0.960	6.55	수평
3	1.19	5.28	수직
4	1.20	5.23	수직
5	1.21	5.21	수직
6	1.25	5.01	수직
7	1.31	4.81	비틀
8	1.43	4.41	수직

5.3 부유식 교량의 지진하중 응답 해석

해석에서 사용한 입력지진으로는 1979년 El-Centro 지진 기록 중 가속도가 가장 큰 Array No.5를 사용하였다. 그림 6에 입력지진의 3직각방향 가속도와 변위이력을 나타내었는데, 지진의 크기는 6.6(M_L)로서 수정머켈리 진도(MM) VIII에 해당된다.

해석을 수행한 후 교량의 주된 응답 값인 변위, 휨모멘트 및 케이블 장력에 대하여 동시가진 시와 다중지점 가진 시의 결과를 비교하여 그림 7부터 그림 11에 도시하였다.

먼저 교량의 변위응답에 대하여, 시간에 따른 변화를 그림 7에 도시하였는데, 여기에서는 교량의 세군데 위치, 즉, 교량

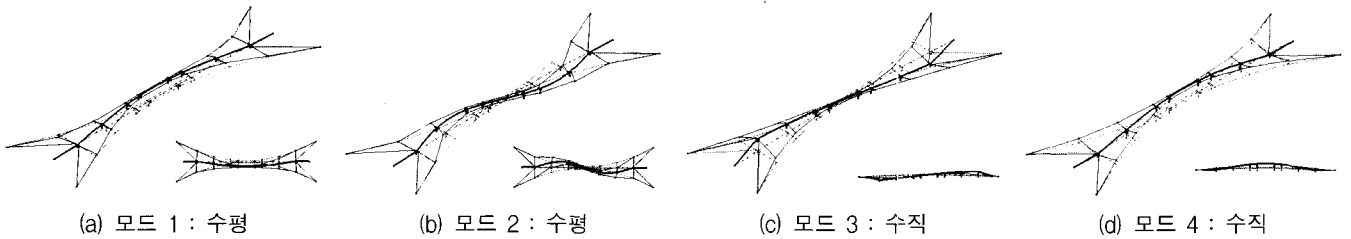


그림 5 예제 교량의 자유진동 모드

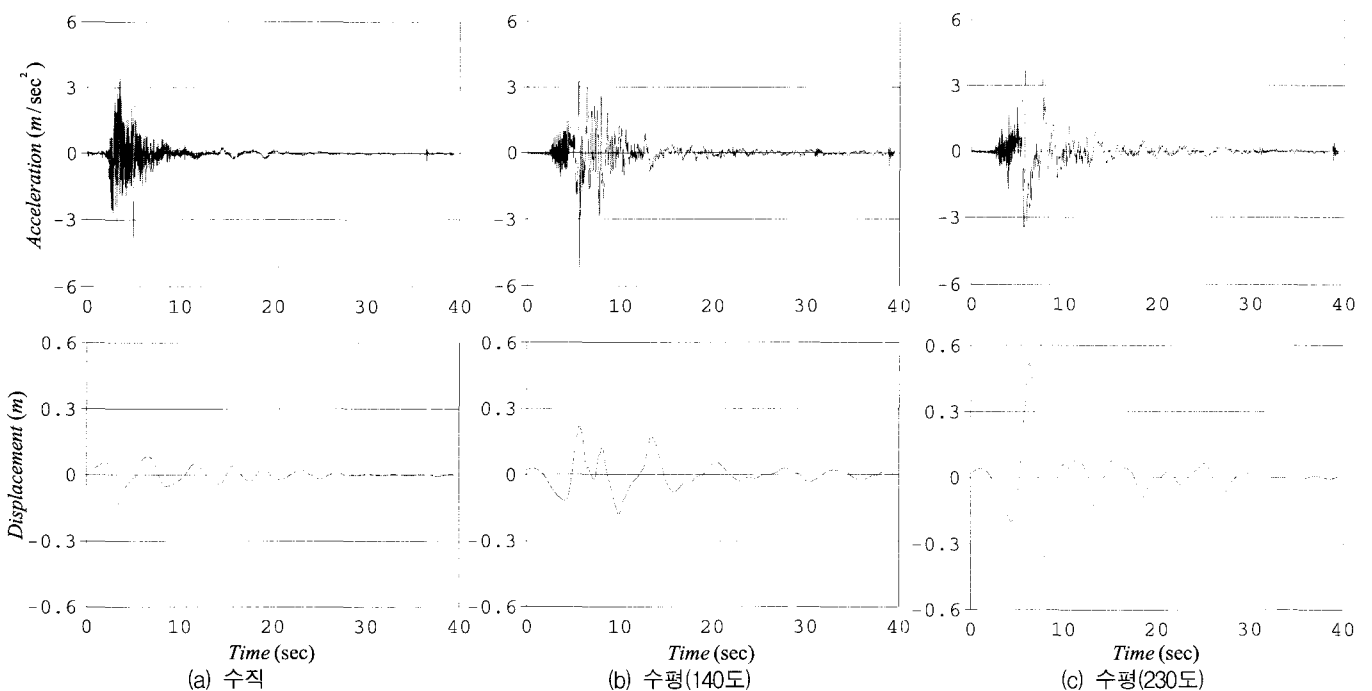


그림 6 입력지진(상단 : 가속도 이력, 하단 : 변위 이력)

진입부인 절점 3, 교량 1/4부분인 절점 8, 교량 중앙인 절점 17에서 수평방향과 수직방향에 대하여 동시가진 시와 다중지점 가진 시에 대한 결과를 각각 비교하였다. 이 그림에서 보면, 수평변위는 동시가진 시가 다중지점 가진 시보다 대체로 큰 응답이 발생하였고, 수직변위의 경우는 다중지점 가진 시에 더 큰 응답이 발생하였다.

그림 8에는 입력지진 가속도와 교량 중앙점 변위를 비교하여 수평방향(y방향)과 수직방향(z방향)에 대한 주파수영역 성분을 도시하였다. 그림 8(a)의 수평방향 교량변위의 경우에 입력 지진 가속도의 주파수 영역에서 벗어난 0.6rad/sec 근처에서 피크 응답성분을 나타내었는데, 이것은 부유식 교량의 첫 번째 고유 모드인 수평방향 모드의 고유진동수와 일치한다. 따라서, 교량의 수평방향 변위응답은 교량의 고유진동으로 발생하는 천이응답이 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그리고 입력 지진 가속도가 피크 성분을 갖는 주파수에서 2번째와 3번째 피크 응답성분을 보인다. 그림 8(b)의 수직방향 변위 응답의 경우는 교량의 수직방향 모드의 고유진동수와 일치하는 1.2rad/sec 근처에서 피크 응답성분을 나

타내었으며, 입력 지진 가속도 성분이 있는 다른 주파수대에서는 응답이 거의 발생하지 않았다.

그림 9에는 교량의 다섯 점에 대한 최대 변위 값을 도시하여 동시가진 시와 다중지점 가진 시의 효과를 비교하였다. 수평방향의 경우는 동시가진 시의 최대 값들이 대체로 크게 나타나며, 수직방향의 경우는 반대로 다중지점 가진 시에 최대 값들이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 10에는 교량단면의 휨모멘트에 대한 다중지점 가진에 의한 효과를 비교하여 도시하였다. z방향에 대한 휨모멘트의 최대 값은 교량 전 길이에 걸쳐 동시가진의 경우가 더 큰 값을 주었으며, y방향 모멘트의 최대 값은 위치에 따라 동시가진의 경우가 크기도 하고 다중지점 가진의 경우가 크기도 하였다. 특히 교량 중앙점의 위치에서는 다중지점 가진의 경우가 더 큰 값을 주고 있다.

그림 11에는 케이블 6번, 9번 및 12번(c6, c9, c12) 장력을 도시하였는데, 그림 11(a)에는 케이블 장력의 최대 및 최소 값을 도시하였고, 그림 11(b)에는 케이블 장력의 변화량을 도시하였다. 이 그림에서 보는 것과 같이 케이블 장력의 변

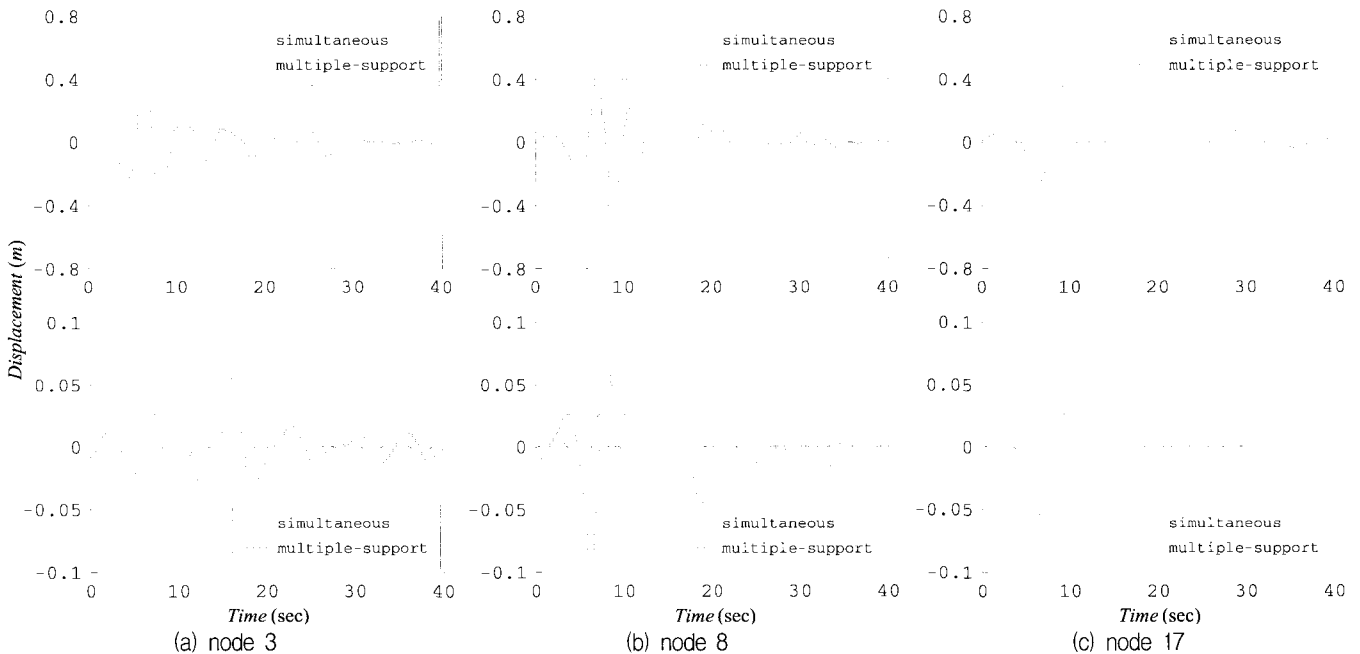


그림 7 변위 응답(상단 : 수평변위, 하단 : 수직변위, 다중지지 : 전단파속도 1200m/sec)

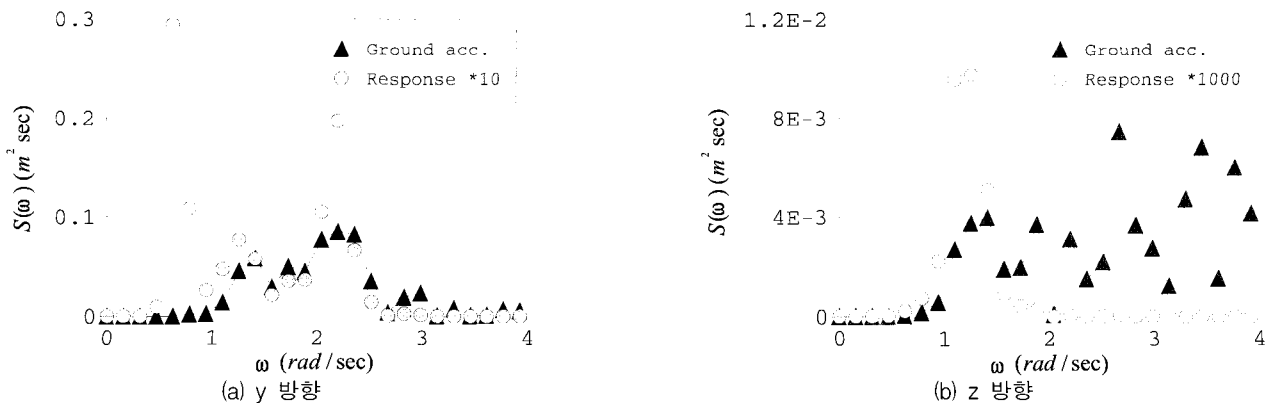


그림 8 입력 지진 가속도 스펙트럼과 교량 중앙부의 변위 응답 스펙트럼

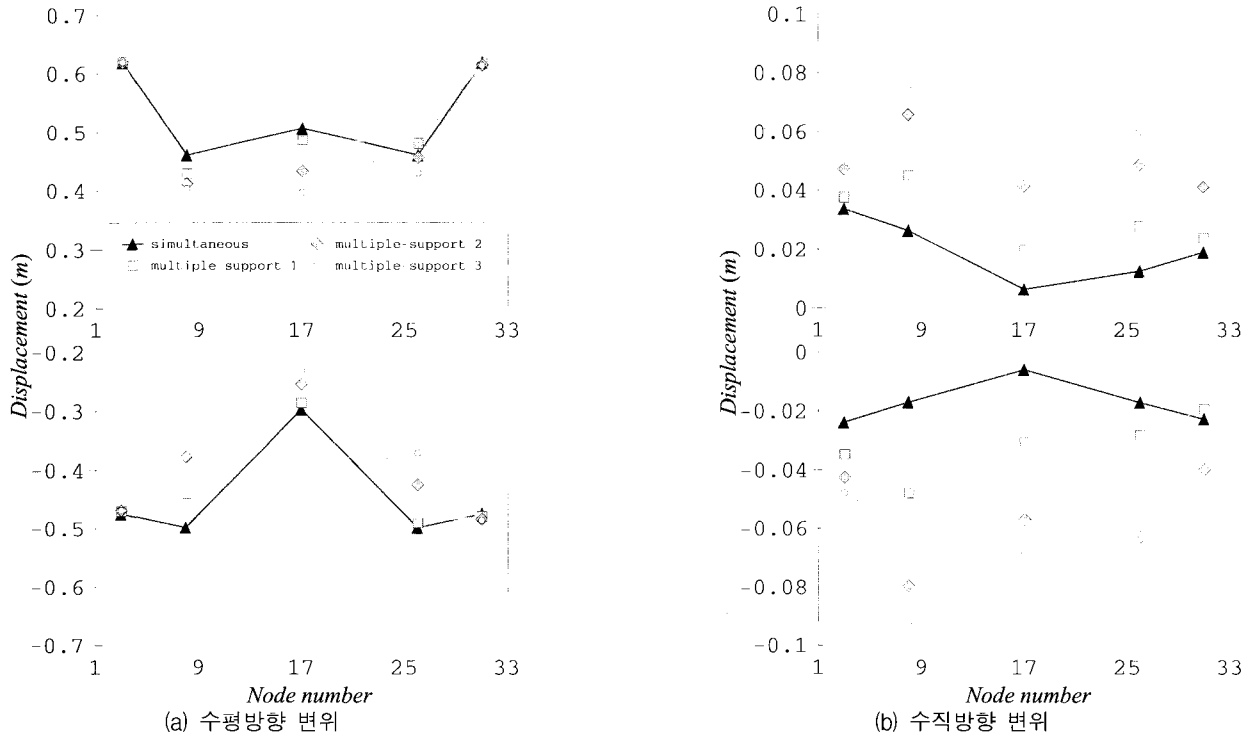


그림 9 변위의 다중지지 효과(상단 : 최대값, 하단 : 최소값, 다중지지1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200m/sec)

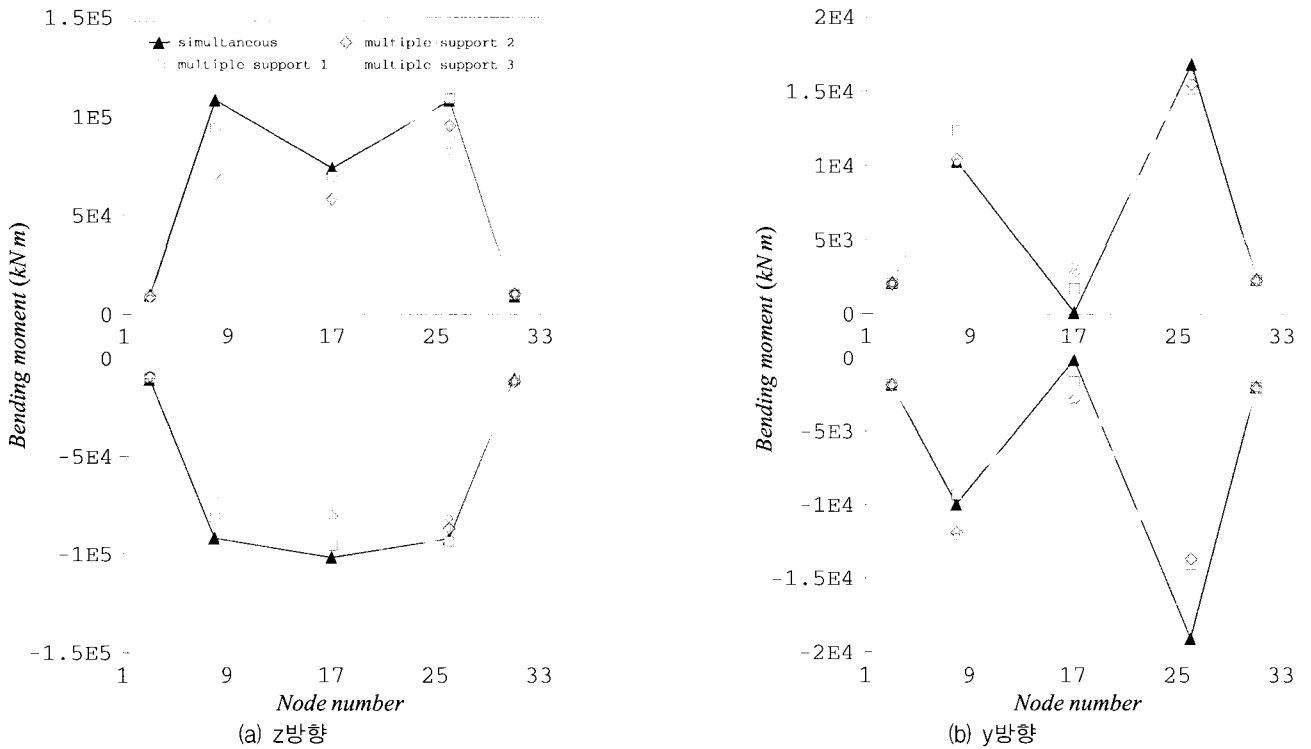


그림 10 휨모멘트의 다중지지 효과(상단 : 최대값, 하단 : 최소값, 다중지지1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200m/sec)

화량은 다중지점 가진의 경우가 동시가진의 경우보다 명백하게 더 큰 값을 주고 있다. 이는 케이블 장력이 교량 절점의 상대적인 변위에 크게 영향을 받을 수 있는데, 대개 양측 케이블의 경계조건이 고정이므로, 양측 지반의 동시가진 움직임에 대하여는 교량 양측 변위가 같은 방향이므로 상대변위가 발생하지 않으나, 다중지점 가진의 경우 양측지반에 다른 지반변위가 가해지면 상대변위가 발생하므로 케이블 장력의 최대 값이 더 커지게 된다.

6. 결 론

다중지점 지진입력에 대한 이산 폰툰형 부유식 교량의 동적 응답 해석을 시간영역에서 수행하였다. 부유식 교량의 상부구조는 공간뼈대요소와 탄성현수선 요소를 이용하여 모델링하였다. 폰툰의 동수력 계수는 3차원 유체장해석을 통하여 산정하였고, 동수력 계수의 주파수 의존성을 고려하기 위하여 시간지연함수를 사용하였다. 연구에서 사용한 부유식

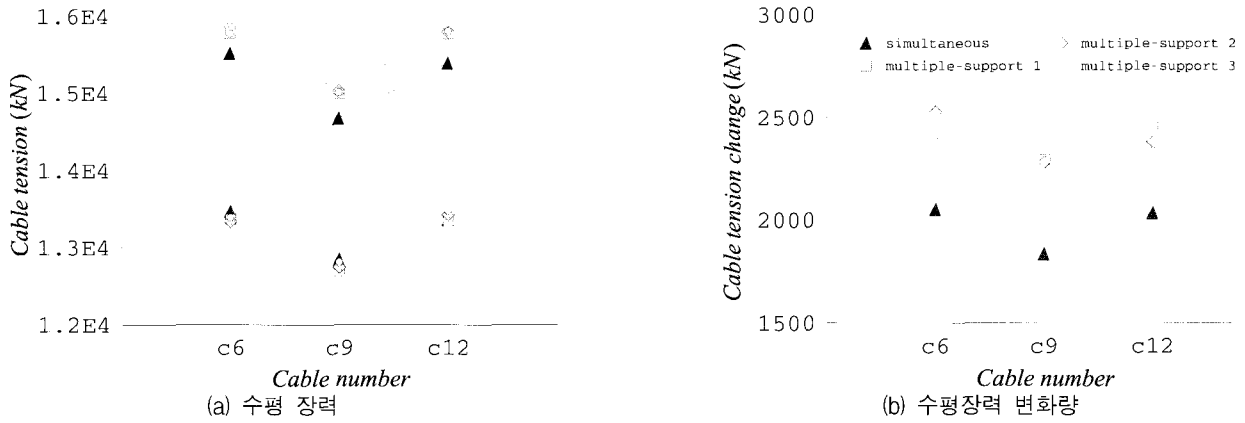


그림 11 케이블 장력의 다중지지 효과(다중지지 1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200m/sec)

교량은 첫 번째 고유주기가 10.7초로서 일반적인 교량에 비하여 비교적 장주기의 특성을 가지고 있어 천이응답이 비교적 오래 지속되며, 특히 부유식 교량의 지진하중에 대한 응답을 구하는 경우 최대 응답성분 중 천이응답이 차지하는 비중이 상당히 중요하다고 판단되므로 정상상태의 응답성분만을 구할 수 있는 주파수영역해석 보다는 시간영역해석이 바람직한 것으로 생각된다.

동시가진 시와 다중지지점 가진 시의 해석 값을 비교한 결과, 동시가진 시에 대한 교량의 응답 값들이 대개 크게 나왔으나, 케이블 장력, 교량의 수직변위 및 교량 중앙의 y축 휨 모멘트와 같은 경우는 다중지지점 가진 시에 그 값이 더 크게 나왔다. 따라서 교량의 설계시 지진력에 대한 최대 단면력 등을 구하고자 하는 경우 동시가진과 다중지지점 가진의 경우를 모두 고려하여 비교할 필요가 있다.

이 연구에서는 지진파의 형상변화를 고려하지 않은 다중지지점 지진입력의 효과를 동시가진 시와 비교하여 보았으며, 추후 연구과제로서 지반운동에 대한 부유식 교량의 보다 엄밀한 해석을 위하여 지반-구조물 상호작용과 지반특성에 따른 지진파의 형상변화를 고려한 다중지지점 지진 해석을 수행할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문의 일부는 서울대학교 지진공학연구센터의 지원 하에 수행된 연구 결과로서, 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- Solland, G., Haugland, S., and Gustavsen J. H., "The Bergsoysund Floating Bridge," Norway, *Structural Engineering International*, 1993. 3, pp. 142-144.
- Lwin, M. M., "The Lacey V. Murrow Floating Bridge," USA, *Structural Engineering International*, 1993. 3, pp. 145-148.
- 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.
- 백인열, 권장섭, 이원표, 장승필, "이산 폰툰형 부유식 교량의 동적 해석", 대한토목학회, 제22권, 제2-A호, 2002, pp. 327-336.
- Hammarstrom, L. and Forsvall, A., "GVA Pontoon Bridge Concept," *Second Symposium on Strait Crossings*, Trondheim, Norway, 1990, pp. 497-502.
- 김호경, 서정인, "다중지지된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 45-58.
- 현대건설 기술연구소, "현수교의 시공 단계 해석 시스템 개발", 93STR09, 1994.
- 장승필, 박정일, "비선형 케이블 유한요소해석에 관한 연구", 한국해양·해양공학회지, 제1권, 제1호, 1989, pp. 93-101.
- Beauchamp, C. and Brocard, D., "Dynamic Response of Floating Bridge to Wave Forces," *ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures*, Atlanta, Ga., 1981.
- Luft, R., "Analysis of Floating Bridges," *The Hood Canal Bridge, ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures*, Atlanta, Ga., 1981.
- Newman, J. N., *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, 1986.
- Van Oortmerssen, G., "The motions of a moored ship in waves," NSMB Publication No. 510, Netherlands Ship Model Basin, 1976.
- 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.
- Cummins, W. E., "The impulse response function and ship motions," David Taylor Model Basin, Report 1661, Washington D.C., 1962.
- 장승필, 김호경, "현수교의 자유진동해석", 한국강구조학회 학술발표회논문집, 1991.