

# 다지지점 지진입력에 대한 현수교의 지반-구조물 상호작용해석 Soil-Structure Interaction Analysis of Suspension Bridge for Multiple-Support Seismic Input

김재민<sup>1)</sup>            이명규<sup>2)</sup>            신용우<sup>3)</sup>  
Kim, Jae-Min      Lee, Myung-Gyu      Shin, Yong-Woo

---

## ABSTRACT

Member actions of long-span suspension bridge due to multiple-support motion are generally larger than those for synchronous support motion frequently employed in aseismic design of a conventional structure. In this study, all the sources of the asynchronous support motion are considered including the loss of coherence and the soil-structure interaction as well as the time delay due to wave propagation of seismic waves. The substructure technique analyzing total soil-foundation-structure system as a superposition of two sub-structures including soil-foundation system and structure itself is employed for the seismic response analysis of the suspension bridge. Finally, an application example is presented to demonstrate applicability of the proposed methodology.

---

## 1. 서 론

현수교는 오늘날 현존하는 구조형식 중 가장 긴 경간장을 가질 수 있는 교량형식으로서, 세계 최장경간 교량의 대부분을 현수교가 차지하고 있다.<sup>(1)</sup> 현수교의 지진하중에 대한 동적응답 해석 법에는 일반적으로 지반운동을 다지지점에 균등하게 입력하는 균등입력해석법과 파동전달효과와 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 다지지점입력해석법이 있으며, 이에 대한 연구는 최근까지 활발하게 진행되어 왔다.<sup>(2)-(6)</sup> 이들 연구에서 지진파의 지점간 파동전달효과, 동일한 지진파형의 지점간 시간차효과, 지진입력의 위상차가 장대교량의 내진설계에서 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 지진파형의 지점간 시간차를 시간영역 해석법을 통해 지진파의 교축 방향 전달속도가 2000 m/sec 일 때 부재력이 균등입력해석에 비해 두 배 정도 커지는 것으로 보고 되고 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용 효과와 지진파의 파동전달효과를 모두 고려하여 해석하였으며, 이를 균등입력해석법에 의한 결과와 비교하였다.

---

1) 정회원 · 여수대학교 건설환경공학부, 조교수

2) 정회원 · (주)한국유지관리, 사원

3) 정회원 · (주)유신코퍼레이션, 차장

## 2. 현수교의 지진응답해석법

본 연구에서는 현수교의 지진응답해석을 부분구조법을 적용하여 그림 1과 같이 지지점을 제외한 주탑 및 상부구조물의 변위가 "0"인 파동산란문제와, 기초에 입사하는 지진이 주탑 하단에 작용하는 하중으로 치환된 파동방사문제의 중첩으로 나타내어 해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup> 본 해석방법의 전체적인 해석단계를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

그림 1b에서  $[S_{bb}^{(2)}(\omega)]$ 와  $[S_{bb}^{(3)}(\omega)]$ 는 각각 2번 지지점과 3번 지지점에서 케이슨 상부 무질량 강판(rigid massless disk)의 임피던스함수로서 그림 2의 STEP 3에 도시한 것처럼 주탑과 상부구조물이 없는 상태에서 지반-구조물 상호작용과 유체-구조물 상호작용을 고려하여 구한다. 이 임피던스함수는 주파수종속적인 특성이 있으므로 그림 1b의 문제를 정확하게 해석하기 위해서는 주파수영역해법을 적용해야 하지만, 본 연구에서는 실용적인 측면에서 SAP2000/Nonlinear<sup>(7)</sup>와 같은 범용구조해석 프로그램을 사용하기 위하여 현수교의 동적거동을 지배하는 주요 주파수범위(본 연구에서는 0~5 Hz)에서 다음과 같이 주파수와 무관한 강성계수, 질량, 감쇠계수로 근사하였다.

$$[S_{bb}^{(j)}(\omega)] \approx [\Delta K_{bb}^{(j)}] + i\omega[\Delta C_{bb}^{(j)}] - \omega^2[\Delta M_{bb}^{(j)}], \quad j=2,3 \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 원주파수이고  $i = \sqrt{-1}$  이며,  $[\Delta K_{bb}^{(j)}]$ ,  $[\Delta C_{bb}^{(j)}]$ ,  $[\Delta M_{bb}^{(j)}]$ 는 각각 지지점 j의 케이슨 상부 무질량 원형강판의 거동에 대한 강성행렬, 감쇠행렬, 질량행렬로서 철근콘크리트 케이슨 구조물의 영향은 물론 지반과 유체의 영향이 포함된 것이다.

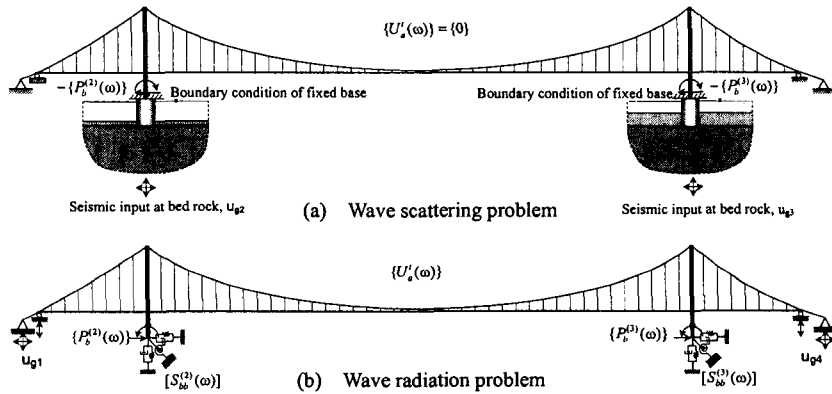


그림 1. 부분구조법에 의한 현수교의 지진응답해석법

그리고 그림 1a에 나타낸 주파수영역 유효지진하중  $\{P_b^{(j)}(\omega)\}$ 는 케이슨의 임피던스함수  $\{S_{bb}^{(j)}(\omega)\}$ 와 그림 2의 STEP 4에서 구한 케이슨의 산란응답  $\{U_b^{sc(j)}(\omega)\}$ 를 곱하여 다음과 같이 구한다:  $\{P_b^{(j)}(\omega)\} = [S_{bb}^{(j)}(\omega)]\{U_b^{sc(j)}(\omega)\}$ , ( $j=2,3$ ). 주파수영역에서 구한 유효지진하중  $\{P_b^{(j)}(\omega)\}$ 를 Fourier 역변환하여 시간영역으로 변환한 다음, 이를 그림 2에서 STEP 5의 전체구조물 지진응답해석에서 시간영역 유효지진하중  $\{p_b^{(j)}(t)\}$ 로 2번과 3번 지지점에 작용된다. 따라서, 그림 2에서 STEP 5의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ag} \\ M_{ba} & M_{bb} + \Delta M_{bb} & 0 \\ M_{ga} & 0 & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a^i(t) \\ u_b^i(t) \\ u_g^i(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ag} \\ C_{ba} & C_{bb} + \Delta C_{bb} & 0 \\ C_{ga} & 0 & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_a^i(t) \\ \dot{u}_b^i(t) \\ \dot{u}_g^i(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} & K_{ag} \\ K_{ba} & K_{bb} + \Delta K_{bb} & 0 \\ K_{ga} & 0 & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a^i(t) \\ u_b^i(t) \\ u_g^i(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_b(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 상첨자 “t”는 지진 발생전 정지상태에 대한 변위인 절대응답(total displacement)을 의미하고, 하첨자 “a”와 “b”는 각각 구조물의 자유도와 케이슨 상단 원형강관의 자유도를 나타내며, 하첨자 “g”는 그림 1b에서 좌우측 지지점의 자유도를 나타낸다.

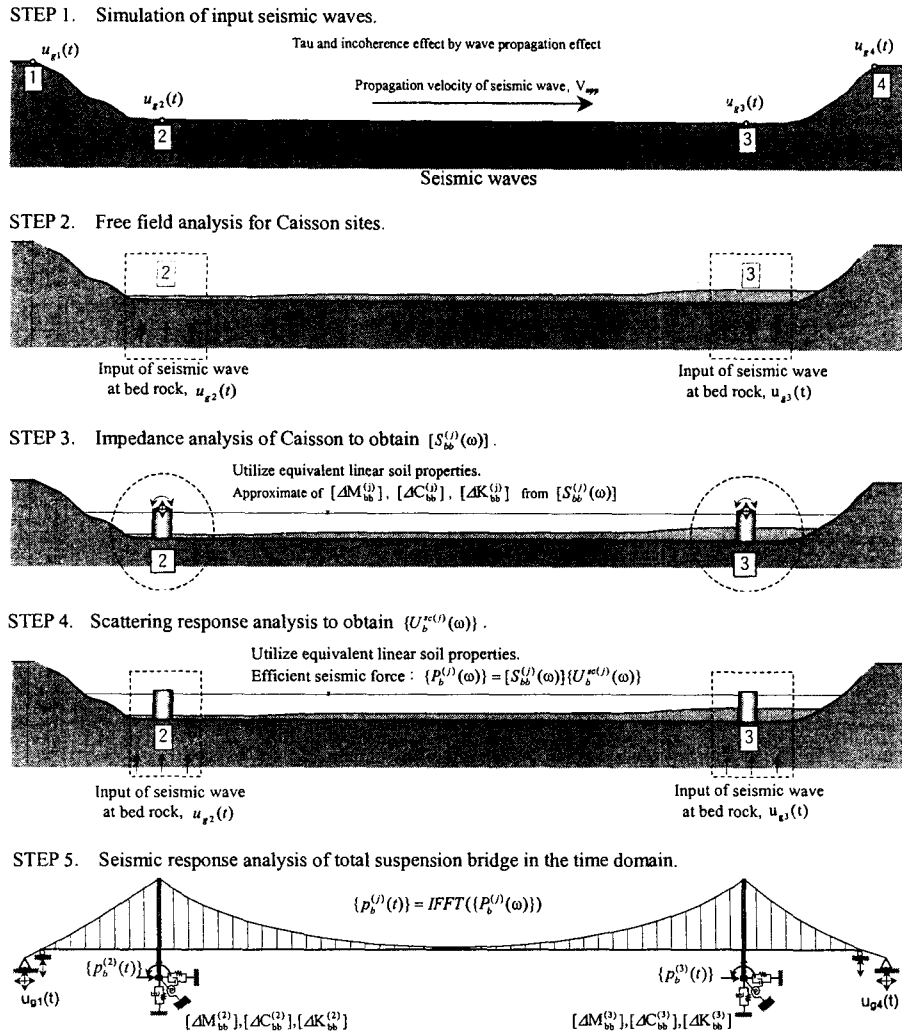


그림 2. 본 연구에서 제안하는 현수교의 지진응답해석 절차

### 3. 응용 사례

#### 3.1 대상 구조물

본 연구에서 사용한 대상 구조물은 그림 3a와 같이 중앙경간이 750m, 측경간이 175m로서 총 연장이 1130m이며, 보강형이 연속보로 설계된 타정식 현수교이다. 해석대상 현수교의 케이슨은 지름

과 높이가 각각 24m와 28m인 우물통기초이며, 내부는 수중콘크리트와 해수로 채워져 있다. 그림 3b에는 2번 지지점과 3번 지지점에서의 케이슨 단면과 지반조건을 도시하였으며, 그림 3c에는 케이슨의 동적해석을 위한 해석모델을 도시하였다. 케이슨 부지의 지반물성치는 참고문헌 6을 참고하였다.

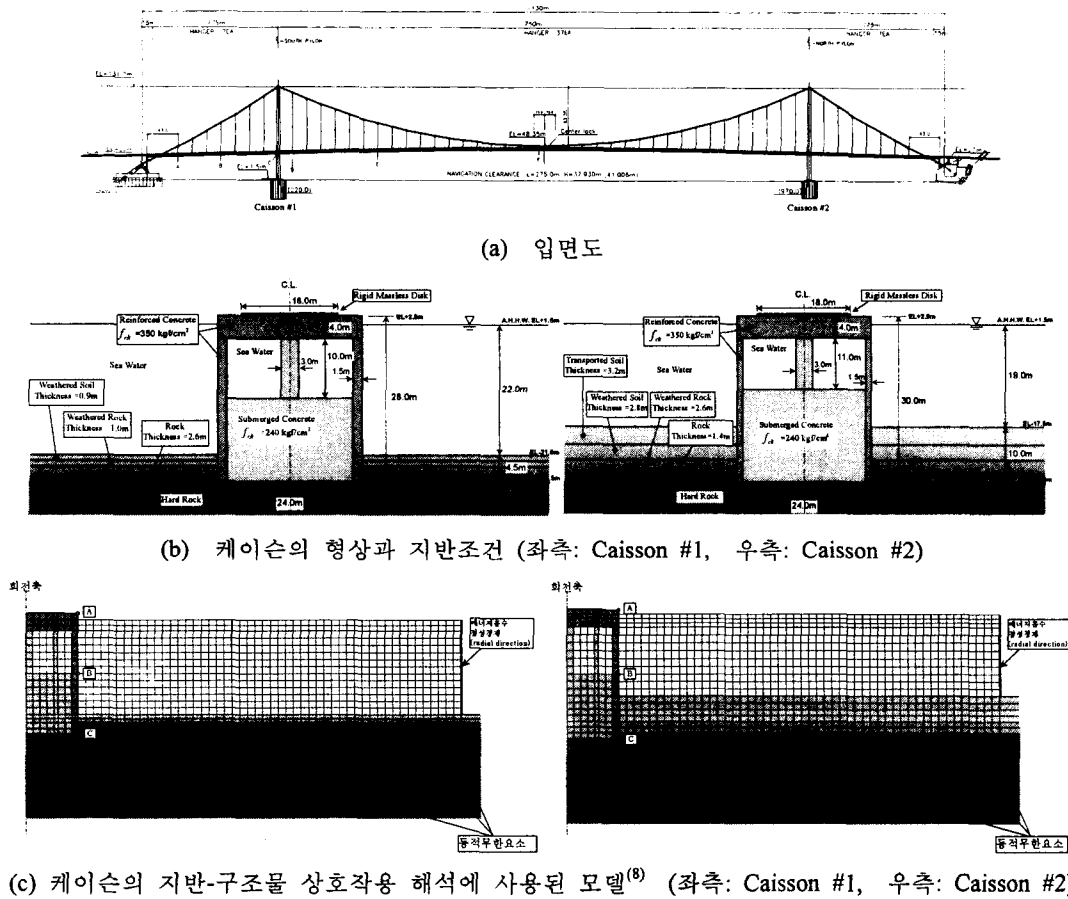


그림 3. 예제 현수교 구조물과 케이슨 기초의 제원

### 3.2 입력지진파의 시간이력 시뮬레이션

지진파의 파동전달에 의한 지지점 입력의 시간차를 고려하기 위하여 교축방향(X-축) 지진파의 전달속도( $V_{app}$ )를 1,500 m/sec으로 가정하였으며, 해석대상인 현수교의 가설위치에서 기반암은 국내 내진설계기준<sup>(9)</sup>에 따르면 경암으로 분류되며, 지진구역 I, 내진특등급을 적용할 경우 최대지반가속도는 0.154g가 된다. 따라서 기반암노두에서 수평방향 설계가속도응답스펙트럼은 그림 4와 같다.

현수교 지지점 위치의 기반암노두에서 입력지진의 시간이력을 작성하기 위하여 Deodatis 방법<sup>(10)</sup>에 따라 개발된 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서는 20개의 독립적인 인공지진을 작성하고 이에 대한 지진응답을 평균하여 설계에 사용하도록 하였다. 그림 4는 이와 같은 방법으로 작성한 인공지진의 한 예를 도시한 것이다.

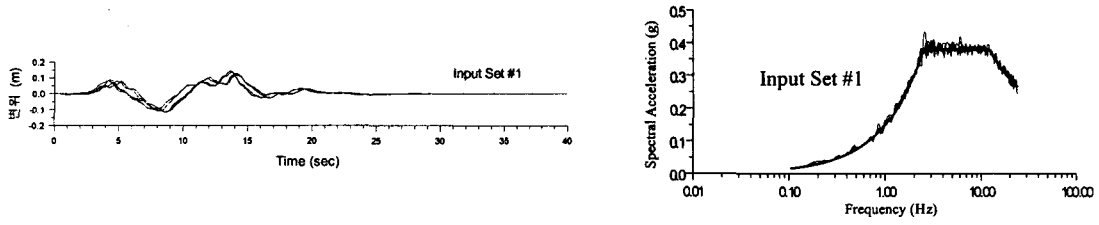


그림 4. 기반암 노두에 입력된 지반변위의 예

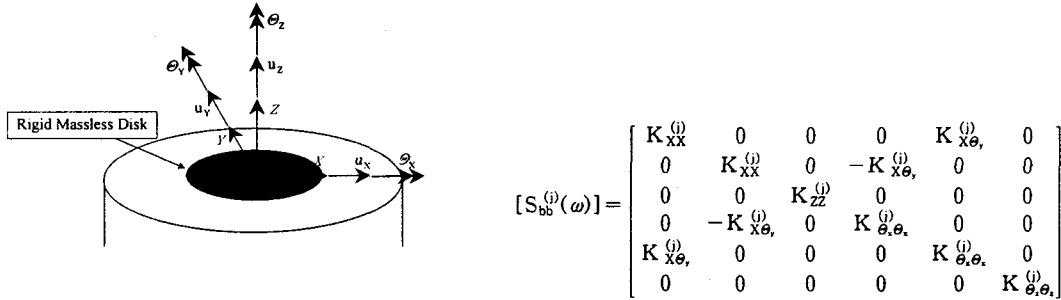


그림 5. 케이슨 상단에서 무질량 원형강판의 자유도 성분과 임피던스함수행렬의 구성

### 3.3 케이슨의 지반-구조물 상호작용해석

주탑이 설치되는 케이슨 상단의 지지점  $j$ 에서 무질량 원형강판의 하중-변위 관계는 주파수영역에서 다음과 같이 정의된다.

$$\{F_b^{(j)}(\omega)\} = [S_{bb}^{(j)}(\omega)]\{U_b^{(j)}(\omega)\}, \quad j=2,3. \quad (3)$$

여기서  $\{F_b^{(j)}(\omega)\}$ 와  $\{U_b^{(j)}(\omega)\}$ 는 각각 그림 5에 나타난 원형강판의 하중과 변위벡터로서 다음과 같다:  $\{F_b^{(j)}\} = \{F_x^{(j)}, F_y^{(j)}, F_z^{(j)}, M_x^{(j)}, M_y^{(j)}, M_z^{(j)}\}^T$ ,  $\{U_b^{(j)}\} = \{U_x^{(j)}, U_y^{(j)}, U_z^{(j)}, \theta_x^{(j)}, \theta_y^{(j)}, \theta_z^{(j)}\}^T$ . 식 (3)에서 임피던스함수  $[S_{bb}^{(j)}(\omega)]$ 는 그림 5와 같이 다섯 개의 독립적인 계수로 나타난다.

케이슨의 임피던스함수와 지진에 의한 산란응답을 구하기 위하여 KIESSI-A3D 프로그램<sup>(8)</sup>을 사용하였다. 임피던스해석과 산란응답해석에서 지반의 물성치는 자유장해석 프로그램인 SHAKE91에서 구한 등가선형 지반정수를 사용하여 지반의 비선형성을 근사적으로 고려하였다. 그리고 해석에서 해수(sea water)의 물성치는 20℃를 기준으로 하여 다음 값을 사용하였다: 체적탄성계수(bulk modulus) =  $2.315 \times 10^6$  kPa, 단위중량 = 1.03 tonf/m<sup>3</sup>.

2번 지지점의 케이슨 #1과 3번 지지점의 케이슨 #2에 대해 각각 구한 임피던스행렬  $[S_{bb}^{(2)}(\omega)]$ 와  $[S_{bb}^{(3)}(\omega)]$  계수의 주파수에 따른 변동특성은 그림 6a와 같다. 그리고 이로부터 식 (1)과 같이 근사하기 위하여 구한 케이슨 기초의 근사적인 질량 및 강성계수를 정하였다. 이 근사적인 값들은 주파수가 "0"일 때 값과  $10\pi$  (즉, 5 Hz)일 때 값을 기준으로 구하였다.

한편, 감쇠계수는 다음과 같이 Rayleigh 감쇠로 가정하여 정하였다:  $\Delta C_{ij} = \alpha \Delta M_{ij} + \beta \Delta K_{ij}$ . 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$  값은 예제 현수교에서 가장 중요한 주파수대역인 0.1 Hz 에서 3 Hz 범위를 기준으로

결정하였다. 그리고 수직성분( $U_z$ )과 비틀성분( $\Theta_z$ )에 대한 이력감쇠비를 임피던스함수의 0~3 Hz 주파수범위에서 추정된 결과, 각각 4.85%와 4.95%로 산정되었다. 본 해석에서는 보수적인 해석결과를 도출하기 위하여 모든 성분에 대해 4.5%를 적용하였으며, 전체 구조물의 감쇠비 2%를 제외한 케이슨의 순수한 감쇠비는 2.5%이다. 위와 같은 계수값( $\omega_1=0.2\pi$ ,  $\omega_2=6\pi$ ,  $\xi=0.025$ )으로부터  $\alpha$ 와  $\beta$  값을 각각 0.03039와 0.00256으로 정하였다.

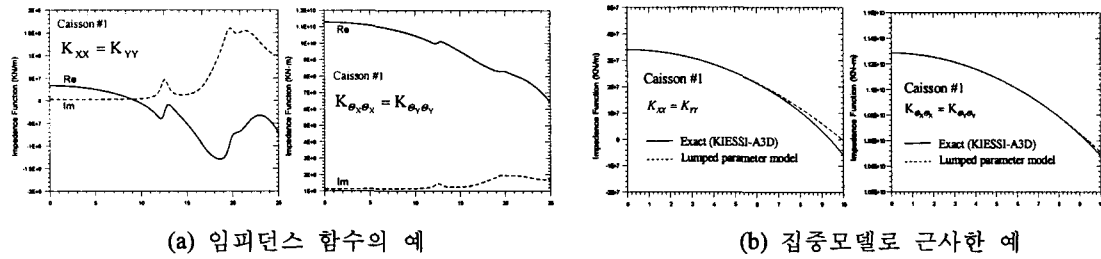


그림 6. 케이스 #1에 대한 임피던스함수와 집중모델로 근사한 예

KIESSI-A3D 프로그램을 이용하여 케이슨의 지진응답해석을 수행하였으며, 그림 2의 STEP 4에서 구한 케이슨 상단에서 산란응답  $\{U_b^{sc(i)}(\omega)\}$ 는 전달함수  $\{H_{U_b^{sc(i)}}(\omega)\}$ 와 기반암노두의 지진입력 변위  $U_{gi}(\omega)$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉,  $\{U_b^{sc(i)}(\omega)\} = \{H_{U_b^{sc(i)}}(\omega)\} U_{gi}(\omega)$ .

케이슨 상단에서 산란응답은 그림 5에서 비틀각 ( $\Theta_z$ )을 제외한 수평변위 ( $u_x, u_y$ ), 회전각 ( $\Theta_x, \Theta_y$ ), 수직변위 ( $u_z$ )를 포함한 총 5개의 자유도 성분이다. 이들 응답의 전달함수에 그림 2a에 나타낸 케이슨 #1과 케이슨 #2 기반암 노두의 입력  $u_{g2}(t)$ 와  $u_{g3}(t)$ 의 Fourier 변환값을 곱하여 주파수응답  $\{U_b^{sc(i)}(\omega)\}$ 를 구한 다음, 이를 시간영역으로 변환하여 산란응답을 구한다.

그림 1에 정의한 케이슨 상단에서 유효지진하중  $\{P_b^{(j)}(\omega)\}$ 는 다음과 같이 케이슨의 임피던스함수와 산란응답의 곱으로 나타난다. 즉,  $\{P_b^{(j)}(\omega)\} = [S_{bb}^{(j)}(\omega)]\{U_b^{sc(i)}(\omega)\}$ . 따라서 이 식은 다음과 같이 정리할 수 있다:  $\{P_b^{(j)}(\omega)\} = \{H_{P_b^{(j)}}(\omega)\} U_{gi}(\omega)$ . 여기서 지지점 j의 케이슨 상단에 작용되는 유효지진하중의 기반암노두 지진입력에 대한 전달함수로서 다음과 같이 표현된다:  $\{H_{P_b^{(j)}}(\omega)\} = [S_{bb}^{(j)}(\omega)]\{H_{U_b^{sc(i)}}(\omega)\}$ .

### 3.4 전체 교량의 지진응답해석

본 연구에서는 해석구조물인 현수교의 주탑과 주케이בל, 행거 및 거더를 그림 7과 같이 SAP2000/Nonlinear의 3차원 Frame 요소를 사용하여 모델링하였다. 케이בל과 주탑에서 사하중에 의한 장력 및 압축력에 의한 기하학적 강성을 고려하였으며, 주탑 #1과 주탑 #2에는 그림 6과 같이 구한 강성계수, 질량, 감쇠계수를 각각 스프링, 집중질량, Damper 요소로 모델링하였다.

지진응답해석은 교축방향 수평성분(X-방향)과 수직성분(Z-방향)에 대해 수행하였으며, 수직지진은 수평지진의 1/3 크기로 하였다. 방향별 지진응답의 조합은 SRSS 방법을 사용하였으며 이들 결과는 균등변위입력에 의한 해석결과와 비교하여 표 1에 정리하였다.

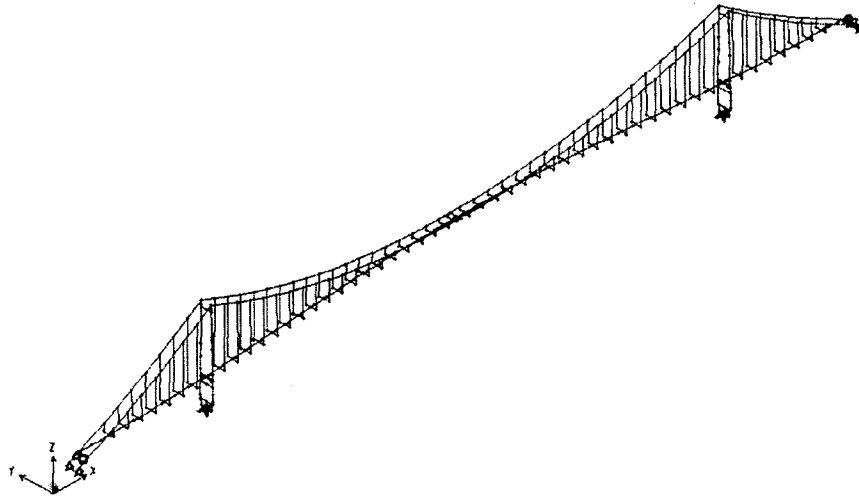


그림 7. 예제 현수교의 SAP2000 해석모델

표 1. 예제 현수교의 지지응답해석 결과

Location	Bending moment, $M_{yy}$ (tonf-m)				Compression force (tonf)			
	without WPE* and SSI** (A)		with WPE* and SSI** (B)		without WPE* and SSI** (A)		with WPE* and SSI** (B)	
	X, Z†	SRSS	X, Z†	SRSS(B/A)	X, Z†	SRSS	X, Z†	SRSS(B/A)
P1	1118.9,	1130.7	3515.1,	1405.1	316.4,	326.5	306.5,	383.5
	163.2		494.8		(1.24)		80.7	
P3	3192.8,	3202.5	4685.8,	4877.8	344.0,	511.3	340.7,	984.2
	249.2		1355.2		(1.52)		378.3	
P4	8165.7,	8175.5	8191.4,	8502.5	352.1,	614.4	339.7,	1197.8
	401.0		2279.0		(1.04)		503.5	

Location	Tension of main cable (tonf)				Location	Bending moment of stiffening girder, $M_{yy}$ (tonf-m)			
	without WPE* and SSI** (A)		with WPE* and SSI** (B)			without WPE* and SSI** (A)		with WPE* and SSI** (B)	
	X, Z†	SRSS	X, Z†	SRSS(B/A)		X, Z†	SRSS	X, Z†	SRSS(B/A)
C1	357.4,	363.6	349.7,	402.3	G1	963.2,	1006.5	1010.3,	1225.5
	67.0		233.1			(1.16)		292.0	
C2	302.4,	310.0	299.8,	363.9	G2	709.4,	762.6	919.5,	1166.7
	68.1		206.3			(1.17)		279.9	
C3	268.8,	276.2	294.2,	352.0	G3	1572.3,	1619.6	1334.4,	1757.7
	63.7		193.2			(1.27)		388.7	

\* ≡ wave propagation effect

\*\* ≡ soil-structure interaction

† ≡ X and Z denote respectively seismic input in X-axis and Z-axis

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기반암 노두에 입력되는 지진파의 파동전달효과와 상관성저하특성을 고려하고, 현수교 주탑의 케이슨에서 발생하는 지반-구조물 상호작용 및 유체-구조물 상호작용을 고려한 현수교의 지진응답해석을 수행하였다. 지진입력은 기반암 노두에서 변위시간이력으로 적용하였으며, 전체 현수교구조물을 두 개의 부분구조로 나누어 해석하는 부분구조법을 적용하였다. 예제 현수교에 대한 지진응답해석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지지점에 균등한 지진입력을 입력하여 현수교의 내진설계를 수행하는 것은 안전하지 않다.
2. 지진파의 전달효과만 고려하고 케이슨과 지반의 영향을 무시할 경우, 모든 영향을 고려한 해석에 비해 최대부재력이 작게 평가될 수 있다. 따라서 현수교의 내진설계시 케이슨과 지반의 강성을 무시하고 지진파의 전달효과만을 고려한 다지지점해석을 수행할 때에도 상당한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Ito, M., Fujino, Y., Miyata, T., and Narita, N., "Cable-Stayed Bridges", Elsevier, 1991.
2. Baron, F., Arikan, M., and Hamati, E., "The Effect of Seismic Disturbances on the Golden Gate Bridge", Report No. EERC 76-31, EERC, 1976, U. of Cal., Berkeley, CA, USA.
3. 현창현, "현수교의 풍하중과 지진하중에 대한 추계론적 거동해석", 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 1989. 2.
4. 김호경, 서정인, "다중지지된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 45-58.
5. Dumanoglu, A.A., Brownjohn, J.M.W., and Severn, R.T., "Seismic analysis of the Faith Sultan Mehmet (Second Bosphorus) suspension bridge", Earthq. Eng. & Struct. Dyn., Vol. 21, 1992, pp. 881-906.
6. 이명규, "현수교의 다지지점 지진입력에 대한 지반-구조물 상호작용 해석", 석사학위논문, 여수대학교 건설환경공학부, 2003. 2.
7. Computers & Structures, Inc., "SAP2000/Nonlinear User's Manual - Version 7.0", 1998.
8. Kim, J-M., Jang, S-H., and Yun, C-B., "Fluid-structure-soil interaction analysis of cylindrical liquid storage tanks subjected to horizontal earthquake loading", Structural Engineering and Mechanics, Vol.13, No.6, 2002, pp. 615-638.
9. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원, "내진설계기준연구 (II)", 제1권, 건설교통부, 1997.
10. Deodatis, G., "Non-stationary stochastic vector process : Seismic ground motion applications", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 11, 1996, pp. 149-168.