

## 지반-말뚝-구조물 상호작용을 고려한

### 교량구조물의 지진해석

## Seismic Analysis of Bridges

## Accounting for Soil-Pile-Structure Interaction

김문겸\*

Kim, Moon Kyun

임윤묵\*\*

Lim, Yun Mook

조경환\*\*\*

Cho, Kyung Hwan

김지순\*\*\*\*

Kim, Ji Sun

---

### ABSTRACT

In this study, a numerical method for soil-pile-structure interaction problems in multi-layered half-plane is developed. The total soil-pile-structure interaction system is divided into two parts namely, nonlinear structure part and linear soil-pile interaction parts. In the structure field, the general finite element method is introduced to solve the dynamic equation of motion for the structure. In the soil-pile structure interaction part, physical model consisting of lumped parameter, which is frequency dependent coefficient and determined by rigorous analysis method is introduced. Using proposed analysis procedure, the nonlinear behavior of structure considering soil-structure interaction can be efficiently determined in time domain and the analysis cost is dramatically reduced.

---

### 1. 서론

교통하중, 발파하중, 및 지진 등과 같은 외부 진동하중에 의해 발생된 탄성파는 지반과 같은 다층구조계를 통하여 지상 및 지하구조물 등에 도달하게 된다. 이러한 탄성파로 인해 발생하는 대상 구조물의 진동은 구조물의 독립적 거동으로 나타나는 것이 아니라 지반과 구조물 기초의 접촉면을 통해 상호 영향을 미치게 되어 그 양상이 복잡하게 된다. 그러므로 구조물과 지반으로 이루어진 구조계의 보다 실질적인 동적 거동의 파악을 위해서는 구조물과 지반의 상호작용 효과가 고려된 동적 해석이 실시되어야 한다. 지반과 구조물의 상호작용계를 구성하는 주요 요소인 지반과

---

\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수  
\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부, 부교수  
\*\*\* 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사후연구원  
\*\*\*\* 연세대학교 사회환경시스템공학부, 석사과정

구조물의 동적응답을 산정하는 기법은 이미 많은 연구자들에 의해 해석적, 수치적으로 연구되어 왔다. 구조물의 경우 비선형 거동까지 구현할 수 있는 수치해석모형이 개발되었으며 유한요소법을 이용할 경우 구조물은 유한한 자유도를 가진 물리적 모형으로 모형화되어 구조물의 동적 해석에 사용되는 다양하고 효율적인 컴퓨터 프로그램과 결합될 수 있다. 반면, 반무한 지반의 모형화는 상대적으로 지반의 변형과 무한영역으로의 에너지 방사와 같은 여러 가지 문제점으로 인해 경계요소법, 무한요소법, 전달경계법 및 thin layer method와 같이 3차원 탄성동역학에 근거한 엄밀한 해석법이 이용된다. 이러한 엄밀해법은 대부분 주파수영역에서 해석이 수행되므로 비선형 해석 및 중첩해석이 어려우며 3차원 해석의 경우 인적·시간적 비용이 많이 소요되므로 필요한 매개변수 해석을 실행하고 대안적인 설계방법을 연구하는 데 어려움이 있다. 특히, 지진응답을 감소시키기 위해 비선형 거동 특성을 가지는 교좌장치가 사용된 교량의 경우 이러한 구조물의 비선형형성이 커지게 되며 지반의 보강을 위해 말뚝기초가 사용되는 경우 지반-말뚝 접촉면에서 발생하는 미끄러짐 현상, 분리현상으로 인해 이러한 어려움은 더욱 증대된다.

본 연구에서는 지반-말뚝 상호작용계를 spring, dashpot 그리고 mass를 가진 단순한 물리적 모델로 모형화하고 모델의 주파수 독립적인 변수들은 기존의 엄밀해석법을 통해 산정한다. 이를 비선형 구조해석 모형과 연계하고 상용 유한요소 해석프로그램을 사용하여 시간영역에서 지반-말뚝-구조물 상호작용 해석을 수행하고자 한다. 이러한 순차적 해석을 통해 시간영역 해석방법을 통해서만 접근할 수 있는 구조물의 비선형성을 지반-구조물 상호작용 해석에서 효과적으로 고려할 수 있다.

## 2. 지반 집중변수 모델에 의한 지반-구조물 상호작용 해석

### (1) 내진설계 조건 및 지반물성치 결정

해석대상 구조물의 중요도, 위치 등에 따라 내진설계 상위개념상의 내진선능목표를 설정하고 이를 만족하도록 최대지반가속도 수준 등의 내진설계 조건을 결정한다. 또한 지반의 영향을 고려한 SSI 해석의 특성상 각 지층별 동적물성치(탄성과속도, 동포아송비, 밀도 등)를 결정한다.

### (2) 지반부의 Impedance 해석 및 유효지진하중 산정

집중변수 모델로 모형화하기 위해 지반-말뚝 상호작용계의 Impedance계수를 산정하고 지반-구조물 상호작용의 영향이 고려된 유효지진하중을 산정하기 위해 입력지진에 대한 지진파 전파해석을 수행한다. 지반-말뚝 영역의 지진해석을 위해 반무한 영역을 포함하는 원역은 경계요소로 모형화하고 근역 및 파일은 유한요소로 모형화하여 연계하는 해석기법을 개발하였으며 이를 이용하여 지반-말뚝 영역의 지반층상효과를 고려한 Impedance 해석을 수행하고 해석결과로부터 지반의 집중변수 모델을 구성하기 위한 강성과 감쇠계수를 산정한다. 이를 바탕으로 입력지진에 대한 지진파 전파해석을 수행하여 Impedance 해석결과와 결합된 형태의 유효지진하중을 산정한다.

### (3) Physical model 에 의한 교량의 지진응답해석

결정된 지반의 집중변수 모델과 교량의 유한요소 모델을 결합하여 지반-구조물 상호작용계의 해석모형을 완성하고 앞에서 산정된 유효지진하중을 적용하여 교량받침의 비선형성을 고려한 시

간이력해석을 수행하므로써 최종적으로 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 교량의 지진응답을 산정한다. 각 교각 위치별 부재력을 산정하고 변위시간이력을 검토하여 교량 구조물의 내진성능을 파악한다.

### 3. 지반-파일 상호작용 해석을 통한 집중변수 모델의 산정

#### 3.1 경계요소에 의한 반무한 지반의 모형화

다층 반무한 평면에서의 동적 기본해는 다음과 같다(김문겸 등, 1998, Kim, Moon Kyum et., 2000).

$$\bar{u}_{qr}(\omega, x, z, z_s) = \frac{C_n}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [k^n e^{(-kz' - ikx')}] dk \quad q, r = x, z \quad (1)$$

여기서,  $C_n$  은 파동수  $k$  에 독립적인 상수이고  $z^*$  및  $x^*$  는 각각 수진점과 가진점간의 수직 거리 및 수평거리이다.

변위성분 및 응력성분은 최종적으로 식 (2)와 같이 점근해가 변위의 동적해와 일치하는 구간까지 수치적분을 수행하고 그 이상의 구간에 대해서는 점근해의 이론적분값을 이용할 수 있다.

$$u_{pq}^l(\omega, x, z, z_s) = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{-a}^{+a} \{ (D_{nq}^j) e^{-ikx'} \} dk + \int_{-a}^{-\infty} \{ (\bar{D}_{nq}^j) e^{-ikx'} \} dk + \int_{+a}^{+\infty} \{ (\bar{D}_{nq}^j) e^{-ikx'} \} dk \right] \quad p, q = x, z \quad (2)$$

점근식의 피적분항은 지수적으로 감쇠하는  $e^{-k(z-ix)}$  의 항을 포함하고, 깊이  $z$  의 함수이며, 파동수가 증가함에 따라 발산하는 항을 포함하지 않으므로 점근식에 대해 무한 Fourier 적분을 수행하면 식 (7)과 같은 형태의 적분식이 되고 각각의 무한적분 이론해를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2\pi} \int [(\bar{D}_q^j) e^{-ikx'}] dk = \frac{A}{2\pi} \int [k^n e^{(-kz' - ikx')}] dk \quad (3)$$

여기서,  $A$  는 파동수  $k$  에 독립적인 상수이다.

식 (4)는 영역  $\Omega$ , 경계  $\Gamma$  로 이루어진 다층반무한 구조계에서  $\Omega$  영역 내 임의의 한 점  $F$  에서의 응력 평형방정식을 응력텐서  $\sigma_{kj}$ , 물체력  $b_k$  와 변위  $u_k$  를 이용하여 나타낸 것이며, 가상일의 원리에 의해서 적분방정식을 형성하면, 식 (5)와 같은 체적적분방정식이 구해진다.

$$\sigma_{kj,j} + \rho b_k - \rho \ddot{u}_k = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} \sigma_{kj,j} u_k^* d\Omega + \int_{\Omega} \rho b_k u_k^* d\Omega - \int_{\Omega} \rho \ddot{u}_k u_k^* d\Omega = 0 \quad (5)$$

여기서,  $u_k^*$  는 영역  $\Omega$  에서 정의되는 응력  $\sigma_k^*$  와 물체력  $b_k^*$  하의 가상의 단위 동하중에 의한 변위이다. 만약 물체력이 고려되지 않는 경우, 특이점의 영향을 고려한 구조계의 직접 경계적분 방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며 경계요소를 도입하여 이산화한 후 표면력의 불연속을 고려하여 절점을 조정하면 다음 식 (7)과 같고 이를 통해 반무한 영역의 동적응답을 산정할 수 있다.

$$c_{lk} u_l + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{lk}^* p_k d\Gamma + \int_{\Omega} u_{lk}^* \rho x_k d\Omega \quad (6)$$

$$[H^{BE}]\{u^{BE}\} = [G^{BE}]\{p^{BE}\} \quad (7)$$

여기서,  $c_{lk}$ 는 경계면의 기하학적 형상에 의해서 결정되는 상수이고,  $p_k$ 와  $p_{lk}^*$ 는 각각 실제 하중과 가상의 단위동하중에 의한 경계면  $\Gamma$ 에서의 표면력이며,  $x_k$ 는 물체력을 나타낸다.

### 3.2 지반-말뚝-구조물 상호작용계의 구성

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용계에 축 하중을 받는 보 요소를 도입하므로써 그림 1과 같이 지반-말뚝-구조물계를 모형화 하였다. 그림 1(a)와 같이 원지반은 경계요소에 의하여 모형화 하였으며 근지반은 유한요소에 의한 평면 변형률 요소로 모형화 하였다. 또한 구조물도 유한요소에 의한 평면변형률 요소로 모형화 하였으며 구조물과 지반 사이에는 축 하중을 받는 보 요소를 사용하여 지반-말뚝-구조물의 상호작용계를 모형화 하였다.

그림에서 보는 바와 같이 유한요소 해석에 있어서 구조물 요소와 지반요소는 각 요소의 절점당  $x, y$  두 개의 자유도를 갖는 반면 축 하중을 받는 보 요소로 모형화한 말뚝 요소는 각 절점당  $x, y, \theta$ 의 3개의 자유도를 갖는다. 따라서 전체 계에서는 말뚝 요소를 도입하기 전의 전체 행렬 크기  $N$ 에 말뚝 요소가 도입함으로써 말뚝요소의 총 절점의 개수  $n$ 이 추가되어 전체 행렬의 크기는  $N + n$ 이 된다. 또한 말뚝이 지반에 묻혀있기 때문에 지반과 말뚝 사이에서 회전각  $\theta$ 에 대한 별도의 구속조건은 고려가 되지 않지만 구조물과 말뚝의 공유점에서는 말뚝의 회전각  $\theta$ 에 구속조건을 주어서 구조물과 말뚝이 직각으로 작용하도록 한다.

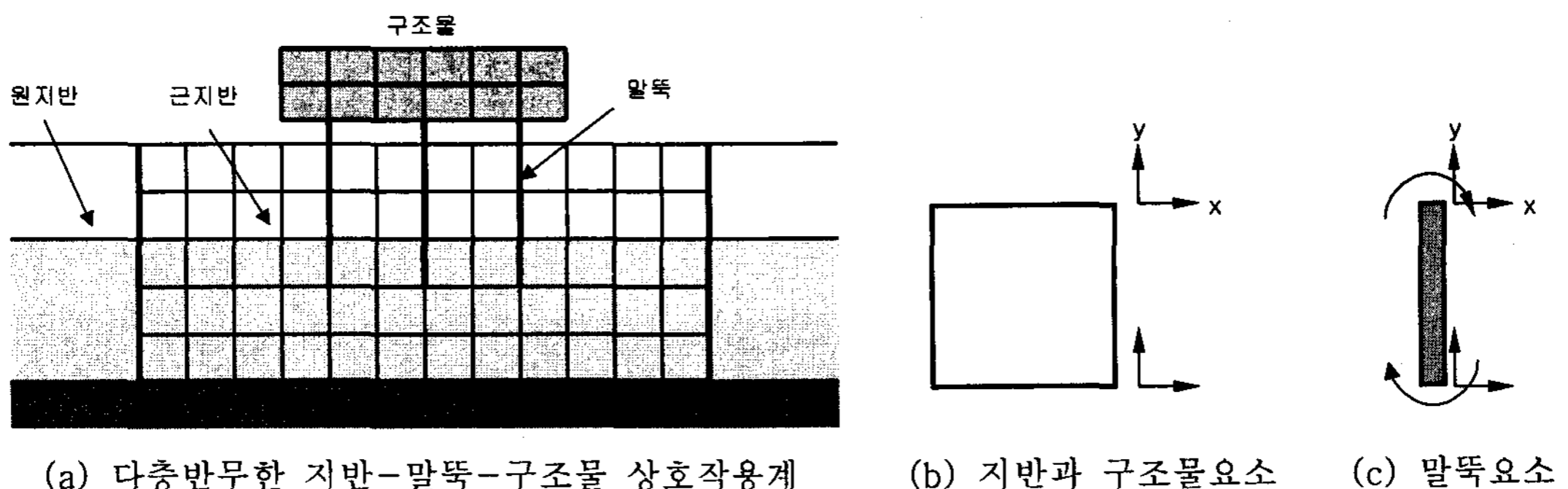


그림 1 전체 상호작용계와 각 요소

### 3.3 해석기법의 검증

단말뚝의 횡방향 동적 상호작용에 대한 검증을 하기 위하여 Novak 과 Grigg(1976)의 실험 결과 및 이론해를 본 연구의 수치해석 결과와 비교하였다. 층상지반의 물성은 표 1에 나타난 바와 같다. 그림 2에서는 Novak 의 실험값과 이론값의 결과와 본 연구에 의한 해석값을 나타내었고 각 결과값들을 실험값과 비교하여 표 2에 정리하였다. 해석결과 실제 실험보다 공진주파수가 과대 평가 됨을 알 수 있다. 또한 진폭도 실험값이 44.19 인 반면 본 연구에서는 40.81 로서 실험값보다 적게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 본 연구의 결과는 Novak 에 의한 이론값보다 실

험값에 더 잘 맞는 결과이며 실험값과 약간의 차이가 발생하는 것은 공진주파수의 경우 주로 구조물의 강성도와 관성질량에 의해 영향을 받으므로 실험의 강성도가 본 연구에서 수치해석에 의한 강성도보다 작은 값을 가짐에 의한 것으로 판단이 된다.

표 1 검증대상 지반의 물성 (단말뚝, 횡방향)

지반 종류	깊이 (m)	전단파속도 (m/s)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	포아송비	감쇠비
실트질 모래	0 - 2.2	175	1,790	142,203.2	0.3	0.025
자갈	2.2 -	185	1,860	165,512.1	0.3	0.025

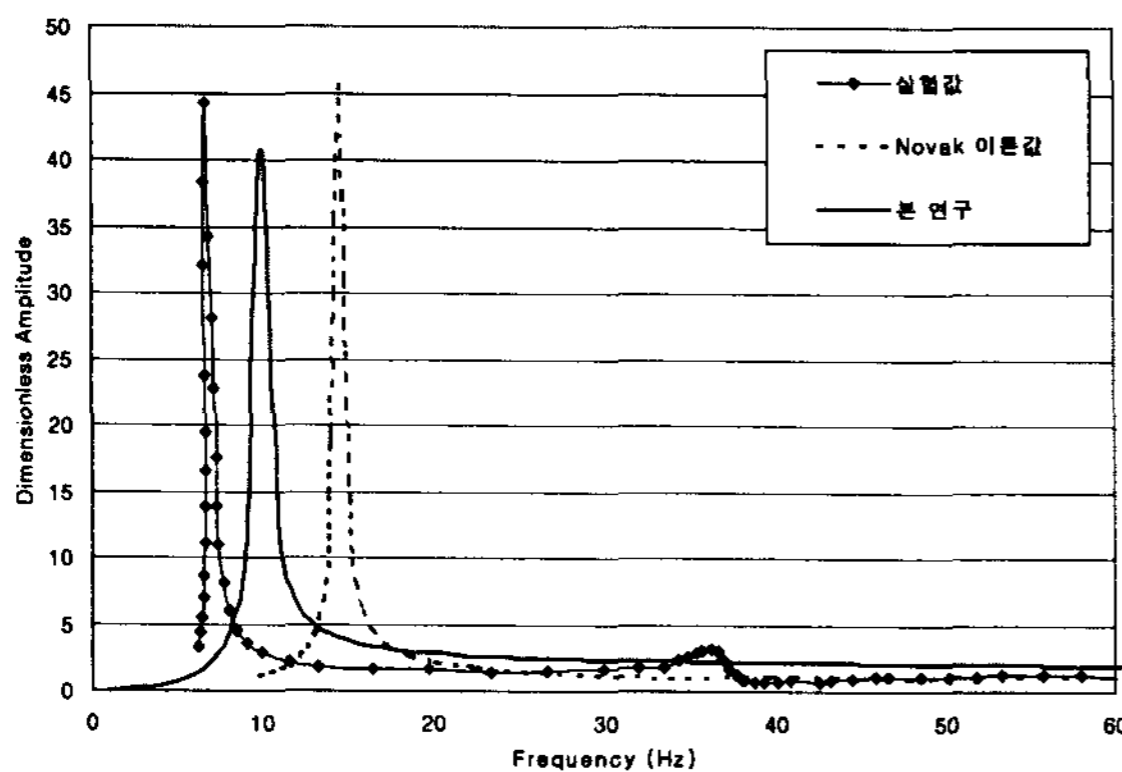


그림 2 해석결과 (단말뚝, 횡방향)

표 2 해석결과 비교 (단말뚝, 횡방향)

	공진 주파수 (Hz)	오차 (%)	무차원 진폭	오차 (%)
실험값	6.7	0	44.19	0
Novak의 이론값	14.5	117.6	45.67	3.4
본 연구	10.0	49.9	40.81	7.6

#### 4. 교량구조물의 해석결과

##### 4.1 해석대상 및 해석절차

본 연구에서는 국내에서 실제 건설되고 있는 교량인 신천교에 대해서 집중변수 모델에 의한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하고 그 결과를 기존의 지진응답해석과 비교하였다. 과업대상구조물인 신천교는 6개의 교각과 2개의 교대로 이루어진 7경간 연속교로서 전형적인 교량의 형태를 가지고 있으나 하부지반의 조건이 불량하여 말뚝기초로 지반을 보강하였으며 이러한 연약지반이 지진 시 구조물의 거동에 영향을 미칠 것으로 판단되어 비선형 응답특성을 가지는 교좌장치를 도입하였다. 따라서, 연약지반 및 말뚝기초의 영향을 고려한 지반-말뚝-구조물 상호작용의 효과를 파악하고 교량의 비선형 특성을 고려한 지진해석을 수행하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 상용프로그램인 PROSHAKE를 사용하여 자유장 지반에서의 지진증폭 효과 및 등가 비선형 물성치를 산정하였다. 다음으로 경계요소-유한요소 연계에 의한 지반-말뚝-구조물 상호작용 해석 프로그램을 이용하여 지반-말뚝 상호작용계의 Impedance 해석을 수행하여 지반의 집중질량 모델의 강성 및 감쇠계수를 산정하였다. 또한 입력지진하중에 대한 지진해석을 수행하여 교량에 작용하는 지반-구조물 상호작용력이 고려된 유효지진하중을 산정하였다. 최종적으로 집중질량 모델을 교각 하부에 스프링-댐퍼 요소를 사용하여 모형화하고 산정된 유효지진하중을 입력하중으로 하여 상용프로그램인 SAP2000을 이용해 교량의 지진해석을 수행하였다. 다음

그림 3은 해석대상 교량의 유한요소 모형을 나타낸 것이다.

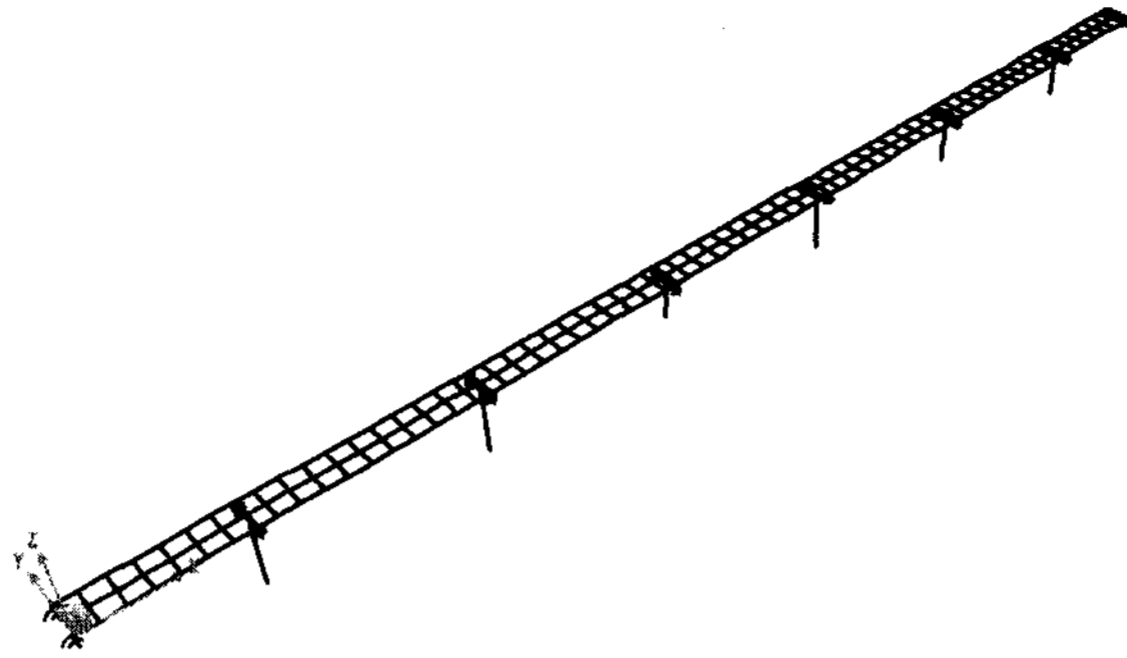


그림 3 신천교의 구조해석 모형

#### 4.2 지반-말뚝 상호작용 해석에 의한 집중변수 모델 산정

지반-말뚝 상호작용해석을 수행하여 지반의 Impedance를 산정하고 지진응답에 의한 유효지진 하중을 산정하기 위하여 신천교의 6개 교각(P1~P6) 위치의 지반-구조물 시스템을 모형화하였으며 각 지점의 지반특성을 고려하여 해석을 수행하였다. 그림 4는 해석대상인 6개의 교각 중 P6 교각의 지반-파일 상호작용 시스템이며 그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 길이에 따라 근역과 원역을 구분하고 경계요소와 유한요소를 조합하여 전체시스템을 모형화하였다. 지반과 기초 및 상부구조물은 모두 평면변형률 요소로 모형화하였으며 말뚝은 보요소를 이용하여 모형화하였다. 그림 5와 6은 수평방향 및 수직방향 Impedance 해석 결과이며 이를 이용하여 지반의 집중변수 모델의 계수를 산정하였다.

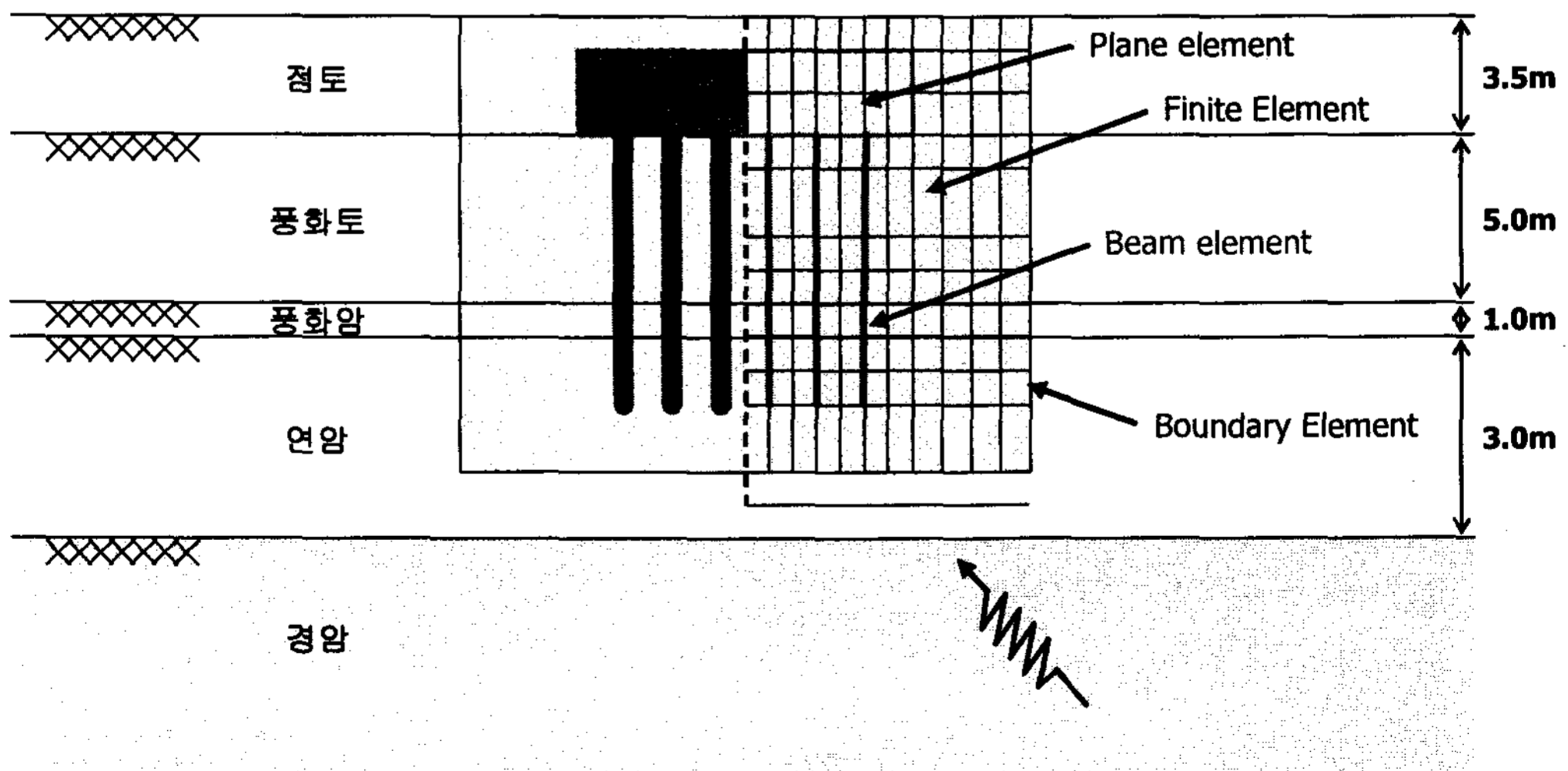
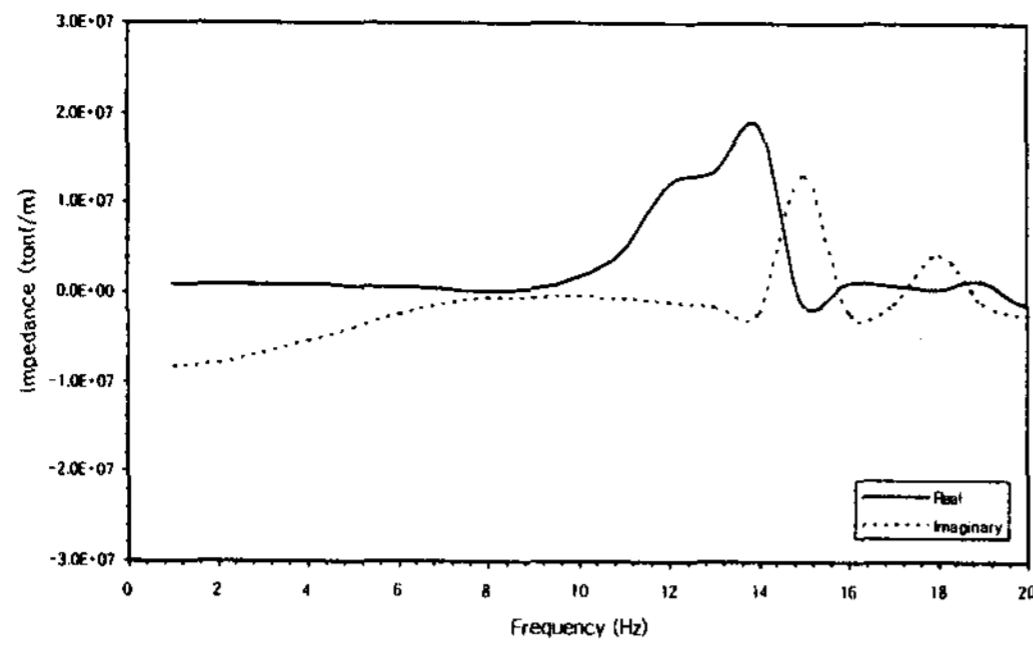
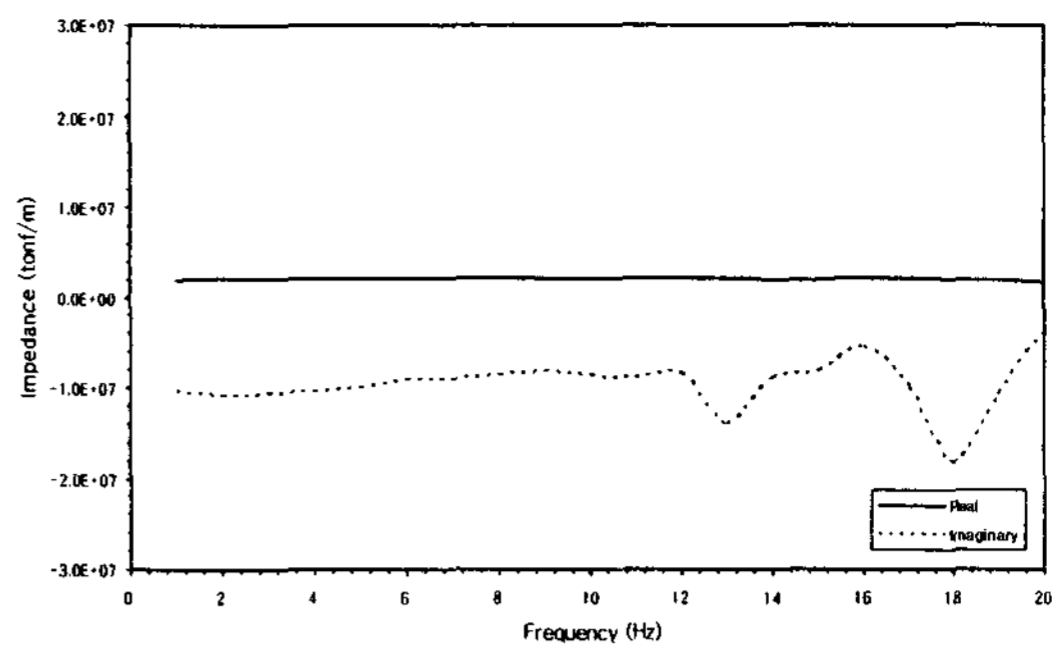


그림 4 신천교 교각(P6)의 지반-파일 상호작용계



(a) 수평방향 Impedance 함수



(b) 수직방향 Impedance 함수

그림 5 신천교 P6 교각의 Impedance 해석 결과

### 4.3 교량의 지진응답해석 결과

앞에서 각 교각별로 산정된 집중변수 모델의 계수들을 사용하여 지반의 영향을 스프링과 댐퍼로 고려하므로써 상용프로그램인 SAP2000을 이용하여 지반-말뚝-구조물의 상호작용을 고려한 교량의 지진해석을 수행하였다. 지반-구조물 상호작용의 효과를 보다 명확하게 비교하기 위하여 교각 기초부를 고정단으로 하여 수행한 결과와 등가강성 스프링으로 모델링 한 결과, SSI를 고려한 해석결과를 비교하였으며, 해석결과는 다음 표 3 ~ 표 4에 나타내었다. 해석결과로부터 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 정밀 지진해석 결과 P1 교각의 기둥하부 전단력이 단순모형 결과에 비해 최대 12.9% 증가하였으며 휨모멘트는 9.89% 까지 증가하는 것으로 나타난 반면 P2 - P6 교각에서는 대부분 10% - 20% 정도 단면력이 감소하는 것으로 나타났다. 전반적인 부재력의 증감을 평가해 볼 때, 일부구간에서 기둥하부 전단력과 휨모멘트가 다소 증가하는 결과가 나타났으나 대부분의 부재들은 충분한 안전성을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3 교각 단면 전단력 검토결과

	교축방향(Vx)				교축직각방향(Vy)			
	고정단	SPRING	SSI	비교(%)	고정단	SPRING	SSI	비교(%)
P1	111.74	125.65	141.85	12.89	112.31	120.18	116.63	-2.95
P2	111.67	125.61	131.65	4.81	127.81	129.44	129.78	0.26
P3	124.42	124.73	99.26	-20.42	132.15	137.78	119.96	-12.93
P4	112.92	121.89	124.72	2.32	145.99	144.43	115.01	-20.37
P5	128.40	125.22	112.42	-10.22	119.21	120.61	126.26	4.68
P6	123.97	135.71	122.11	-10.22	121.25	113.93	99.20	-12.93

표 4 교각 단면 모멘트 검토결과

	교축방향(My)				교축직각방향(Mx)			
	고정단	SPRING	SSI	비교(%)	고정단	SPRING	SSI	비교(%)
P1	1,432.27	1,591.93	1,749.48	9.89	1,554.57	1,528.47	1,126.92	-26.27
P2	1,462.00	1,587.71	1,641.01	3.36	1,810.94	1,878.52	1,344.58	-28.42
P3	828.92	786.25	616.08	-21.64	1,445.18	1,513.92	1,361.06	-10.10
P4	1,377.32	1,442.65	1,447.20	0.32	1,946.56	1,944.83	1,416.79	-27.15
P5	1,232.24	1,150.77	1,003.77	-12.77	1,492.57	1,473.28	1,215.20	-17.52
P6	1,099.30	1,132.85	956.99	-15.52	1,115.22	1,138.00	898.13	-21.08

### 5. 결론

일반적으로 구조물의 수치해석 기법이 비선형, 동적 분야에서 매우 심도있게 진행된 반면 반무한 지반의 경우 주파수 종속적인 특성과 반무한 영역의 처리로 인해 그 적용성이 높지 못한 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 동적 지반의 영향을 집중변수 모델로 고려하고 모델에 사용되는 특성계수들을 기존의 정밀 해석기법으로 산정한 후 구조물의 유한요소 모형화와 직접 연계하여 일반 구조해석 문제로 지반-구조물 상호작용의 영향을 산정하는 해석기법을 통해 현재 시공 중인 교량의 지진해석을 수행하였다. 이러한 해석절차를 도입할 경우 해석시간을 크게 단축할 수 있을 뿐만 아니라 구조해석의 주된 관심사인 구조물의 응답을 비선형 특성까지 고려해서 산정할 수 있었다. 추후 집중변수 모델에 의한 해석결과와 기존의 해석결과를 비교하여 그 타당성을 검토하는 연구를 추가로 수행하고자 한다.

### 참고 문헌

1. Kim, Moon Kyum., Lim, Yun Mook, and Rhee, Jong Woo, "Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements," *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 6, pp. 670-680, 2000.
2. Novak, M and Grigg, R.F., "Dynamic experiments with small pile foundations," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, No. 4. 372-385, 1976
3. Novak, M., Sheta, M., El Hifnawy, L., El-Marsafawi, H., and Ramadan, O. "DYNA3 - a computer program for calculation of foundation response to dynamic loads," *Report No. GEOP 90-02*, Geotech. Res. Ctr., The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 1990.
4. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure-Interaction*, Prentice-Hall, 1985.
5. Wolf, J.P., *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*, Prentice-Hall, 1994.