

# 지반의 비균질성을 고려한 교량의 동적 거동 분석

## Seismic Response Analysis of Bridge Considering Spatial Heterogeneity of Ground



이 장 석\*

\*현대건설기술개발원 토목구조팀 공학박사

### 1. 서론

지진에 의한 지반 운동은 지형 변화나 지반 물성 변화와 같은 지반의 공간적 비균질성의 영향으로 진폭과 주파수 성분이 변화하며, 연약지반이나 분지형 지반에서는 지반 운동의 증폭이 발생하기도 한다. 1985년 9월 19일에 발생한 멕시코 지진은 지반운동 증폭의 한 예로, 진앙 부근에서는 피해가 작았으나 멕시코시티에서는 큰 피해가 발생하였고 특히 호수지역에서 심하였는데, 이는 멕시코시티가 호수를 매립하면서 확장되어온 도시라 지반이 다른 도시에 비하여 연약한 것이 원인이었고, 호수지역의 경우 깊은 연약점토층으로 구성되어 상대적으로 더 큰 지반운동의 증폭이 발생하였기 때문이다.

장대교량의 경우 부지가 교량 길이 방향으로 긴 관계로 지반의 공간적 비균질성에 의한 부지효과의 영향을 크게 받는다. 기반암에서 지표면으로 갈수록 지반이 연약한 경우, 기반암 운동은 지표면에 도달하면 저주파수 영역에서 증폭된 진폭을 가지게 되고, 이는 장대 교량과 같은 장주기 구조물에 위협이 될 수 있다.<sup>1)</sup> 또한 지반의 고유주기와 교량의 주요 고유주기가 일치할 경우 공진이 발생하여 부재력의 증폭이 크게 나타날 수 있다.<sup>2)</sup> 이 연구에서는 지반의 강도 변화가 교량의 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다. 지반의 2차원 자유장 해석을 수행하여 부지효과가 지반 운동의 진폭과 주파수 성분에 미치는 영향을 알아보

고 이를 입력지반운동으로 하여 교량의 지진응답을 구하였다.

### 2. 교량의 지진응답 해석기법

비균질 지반 위 다중 기초 교량의 지반-구조물상호 작용을 고려한 지진응답 해석을 위하여 현대건설 기술연구소가 개발한 HYUNSSI<sup>3)</sup>를 사용하였다. HYUNSSI는 3차원 직교좌표계에서 3차원 유한요소와 초유한 요소(hyperelement)<sup>4)</sup>, 스트립 초유한 요소(strip hyperelement)<sup>3),5)</sup>를 사용하여 지형과 물성이 변화하는 비균질 지반을 3차원으로 모델링하고,

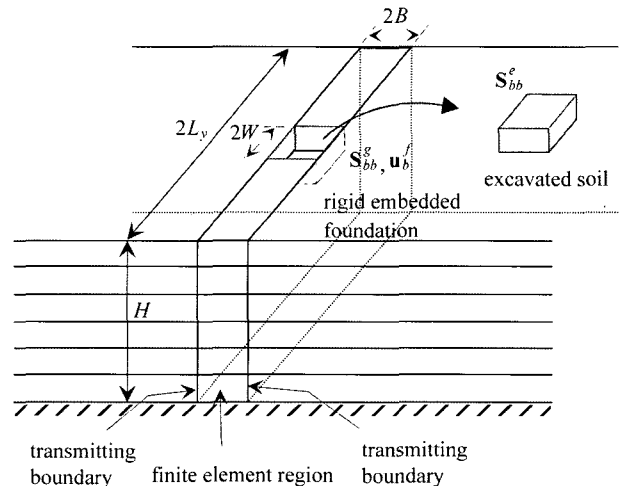
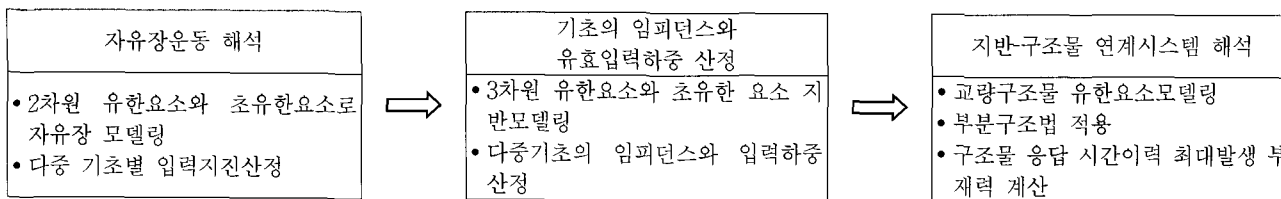


그림 1 물린 강체기초의 하이브리드 모델

표 1 비균질지반에서 SSI를 고려한 교량의 지진응답 해석 절차



지반-구조물 시스템의 지진응답을 해석할 수 있는 프로그램이다. 하이브리드 해석법(Hybrid Method)를 사용하여 기초를 포함한 근역 지반은 유한요소로, 무한영역으로의 파전파는 초유한 요소를 이용한 전달경계로, 기초 간 지반 영역내의 파전파는 스트립 초유한 요소로 모델링하며 이를 그림 1에 나타내었다. 지반-구조물 시스템의 지진응답 해석은 부분구조법을 사용하며, 지반과 구조물을 독립적으로 모델링한 후 기초에서의 임피던스와 유효입력하중으로 연계시켜 해석한다.

HYUNSSI의 기능과 특징은 다음과 같으며, HYUNSSI를 이용한 교량의 지진응답 해석절차는 표 1에 정리하였다.

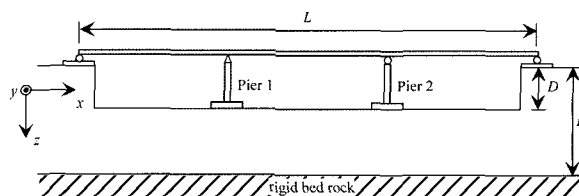
- 초유한 요소, 스트립 초유한 요소, 유한요소를 사용한 하이브리드 해석법으로 3차원지반 모델링
- 지형변화와 물성 변화가 있는 비균질 지반 모델링
- 분지형 지반, 단층파쇄대가 있는 지반에서 지반 운동의 공간적 변화 해석 가능
- 기초간 상호작용 해석
- 기초의 임피던스와 유효입력하중 산정
- 부분구조법을 사용하여 다중입력과 SSI를 고려한 교량의 지진응답해석 수행

### 3. 교량과 지반의 모델링

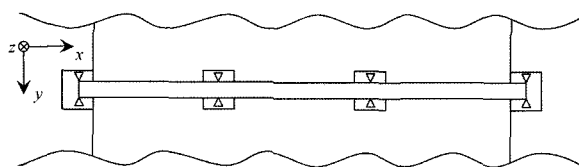
#### 3.1 교량의 모델링

대상 교량은 그림 2와 같이 공간적으로 비균질한 지반에 위치한 3경간 교량이다.

$D/L=1/15$ 이고 상판의 폭을  $B$ 라 할 때  $B/L=1/10$ 이다. 교량 상판 아래 빈 공간의 체적  $V=BLD$ 이며, 지반의 밀도(mass density)가  $\rho$ 일 때 이 공간을 차지하는 지반의 질량  $M=\rho BLD$ 이다. 이 때 상판의 총 질량은  $\bar{M}=\alpha M=\alpha\rho BLD$ 으로 한다. 상판의 단위 길이당 질량  $\bar{m}=\bar{M}/L$ 이고, 상판의 밀도를  $\rho_c$ 라 하면 상판의 단면적  $A_u=\bar{m}/\rho_c$ 이다. 교각 단면의 교축 직각 방향 폭  $h_c=2/3B$ , 교축 방향 폭  $b_c=1/8h_c$ 로 하였고 단면적  $A_c=b_ch_c$ 이다.  $L=120$ ,



(a) 측면도

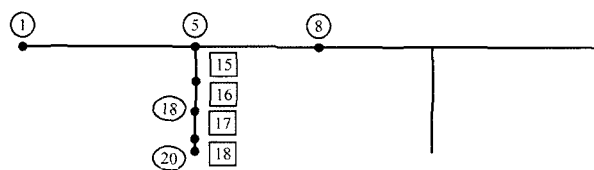


(b) 평면도

그림 2 공간적으로 비균질한 지반 위에 놓인 3경간 교량



(a) 교량의 3차원 모델링



(b) 절점 및 요소번호

그림 3 교량의 3차원 모델링과 절점 및 요소 번호

$a=0.02$ ,  $\rho=2.0$ ,  $\rho_c=0.25$  탄성계수  $E_c=2.5 \times 10^6$ 으로 하였다.

상판과 교각, 교대는 그림 3(a)와 같이 3차원 뼈대(frame) 요소를 이용하여 모델링한다. 그림 3(b)는 해석 결과를 보일 절점과 요소 번호를 나타낸 것이다. 그림 2(a)의 상판과 교각, 교대의 연결 조건에 나와 있듯이 교축 방향 지진력은 교각 1이 모두 지지하며, 교축 직각 방향 지진력은 그림 2(b)와 같이 두 교대와 교각에 의하여 지지된다. 교각의 기초와 교대는 표면기초의 형태로 지반과 연계시켜 지반-구조물 상호 작용 효과를 고려한다.

### 3.2 지반과 기초의 모델링

종방향으로 지형 변화가 있는 비균질한 지반의 모델링은 그림 4와 같다. 기초부터 기반암까지 횡방향으로  $2L_y$ 의 길이를 가지는 영역은 3차원 유한요소로 모델링하고, 이 유한요소 영역 사이의 지반은 3차원 스트립 초유한요소를 이용하여 모델링한다. 3차원 초유한 요소를 이용한 전달경계를 부착하여 무한 영역으로의 파전파를 모델링한다. 교각의 교대는 그림 4의 강체 표면기초 ①, ④에서 지반과 접하며, 교각 1, 2는 각각 ②, ③의 강체 표면 기초에서 지반과 연계된다. 기초의 크기는  $2B \times 2W$ 이며  $B = 1/2\bar{B}$ ,  $W/B = 2$ 로 하였고  $L_y/W = 12$ 이다.

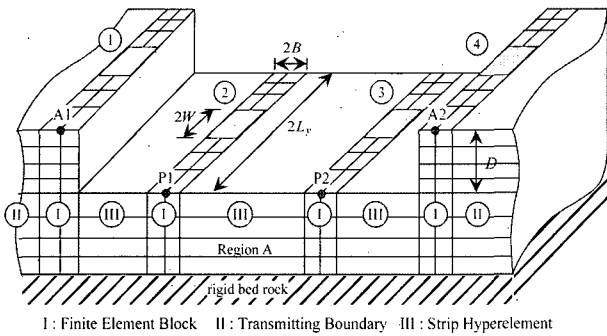


그림 4 공간적으로 비균질한 지반과 기초의 모델링

### 4. 2차원 자유장 운동 해석

지반의 공간적 비균질성이 지반 운동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2차원 자유장 운동 해석을 수행한다. 지반 물성 변화의 영향을 알아보기 위하여 지반의 전단파 속도  $V_s$ 를 변화시키면서 교대와 교각 기초의 위치인 그림 4의 A1, P1에서의 종방향과 횡방향 지반 운동을 구하였다.

#### 4.1 입력 지반 운동

원역 노두암의 통제운동으로는 1940년 El Centro 지진 기록과 그림 5의 표준 설계응답스펙트럼에서 생성한 인공 가속도 시간이력을 사용하였다. 지진 구역은 I로 하였고, 지진 계수  $C_a = 0.1$ ,  $C_v = 0.1$ 인 암반 지반(지반 종류 I)와  $C_a = 0.16$ ,  $C_v = 0.23$ 인 단단한 토사 지반(지반 종류 III)의 두 지반에 대하여 SIMQKE<sup>(6)</sup>를 사용하여 인공가속도 시간이력을 생성하였다. 세 가지 입력지반운동의 가속도 시간이력과 가속도 응답스펙트럼을 그림 6, 7, 8에 각각 나타내었다.

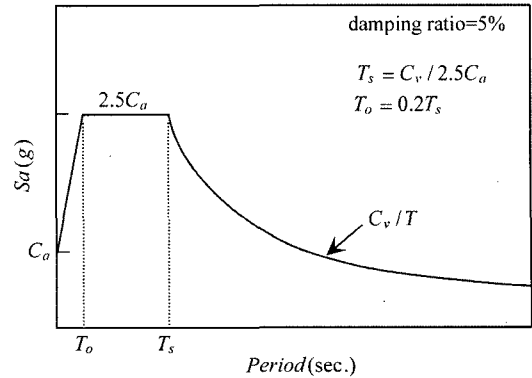
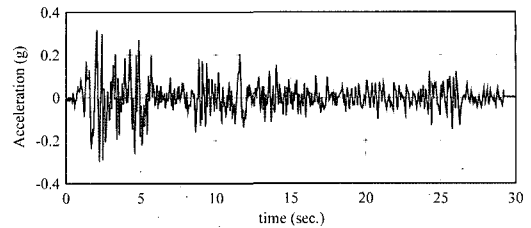
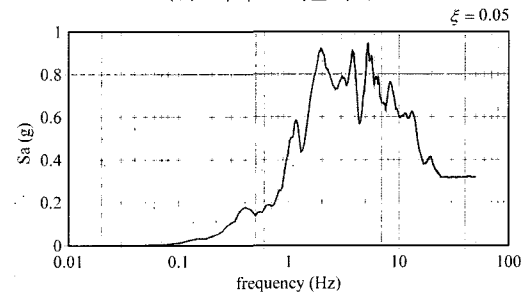


그림 5 표준 설계응답스펙트럼

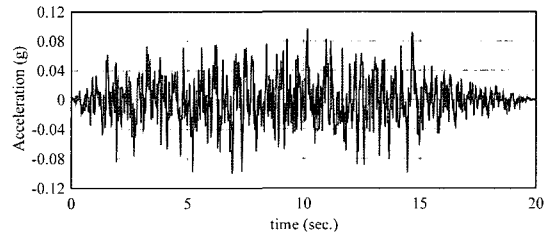


(a) 가속도 시간이력

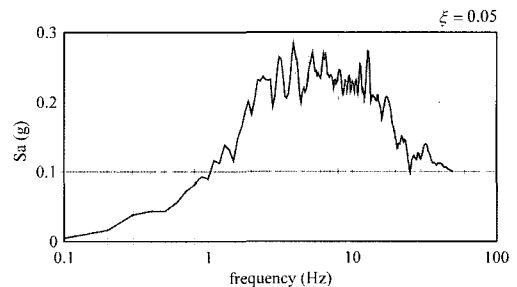


(b) 가속도 응답스펙트럼

그림 6 El Centro 지진 기록의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼

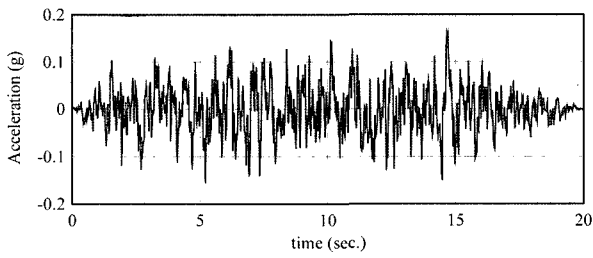


(a) 가속도 시간이력

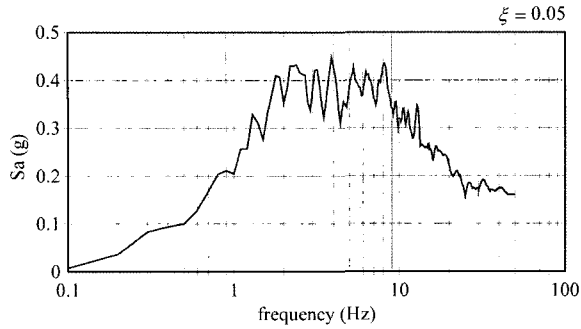


(b) 가속도 응답스펙트럼

그림 7 인공가속도 시간이력과 응답스펙트럼 (지반종류 I)



(a) 가속도 시간이력



(b) 가속도 응답스펙트럼

그림 8 인공가속도 시간이력과 응답스펙트럼 (지반종류 III)

#### 4.2 H/D=2인 지반의 해석

H/D=2인 지반에서 전단파 속도가 다른 GM1, GM2, GM3 세 모델의 자유장 운동해석을 하였다. 지반 모델 GM1의 전단파 속도는 기준으로 정한 전단파속도  $V_S^{ref}$ 인 경우이고, GM2는  $2V_S^{ref}$ , GM3는  $4V_S^{ref}$ 의 전단파 속도를 가지는 경우이다. 각 지반 모델의 전단파 속도와 지반의 첫번째 고유진동수인 컷오프 진동수(cut-off frequency)  $f_c$ 를 정리하여 표 2에 나타냈다. 감쇠비는 5%이다.

입력지반 운동이 El Centro 지진일 때, El Centro 지진 기록의 가속도 응답스펙트럼에 대한 GM1, GM2, GM3의 그림 4에 보인 A1, P1 위치에서의 가속도 응답스펙트럼의 비를 구하여 종방향, 횡방향에 대하여 각각 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림에서 각 지반 모델 별 가속도 응답스펙트럼의 증폭비는 주파수  $f$ 를 각각  $f_c^1 =, f_c^2 =, f_c^3$ 로 나눈 무차원 진동수  $\tilde{f}$ 에 대하여 나타내었고,  $\tilde{f}_1 = f/f_c^1$ ,  $\tilde{f}_2 = f/f_c^2$ ,  $\tilde{f}_3 = f/f_c^3$ 이다. 그림 9는 A1, P1에서 종방향 응

표 2 H/D=2인 지반 모델

지반 모델	H/D	Shear wave velocity ( $V_S$ )	cut-off frequency ( $f_c = V_S/4H$ )
GM1	2	$V_S^{ref}$	$f_c^1 = V_S^{ref}/8D$
GM2	2	$2V_S^{ref}$	$f_c^2 = 2V_c^1 = 2V_S^{ref}/8D$
GM3	2	$4V_S^{ref}$	$f_c^3 = 4V_c^1 = 4V_S^{ref}/8D$

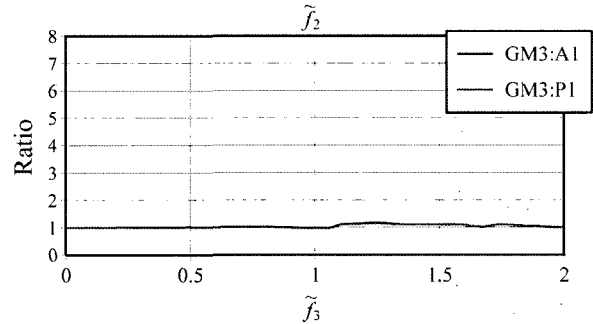
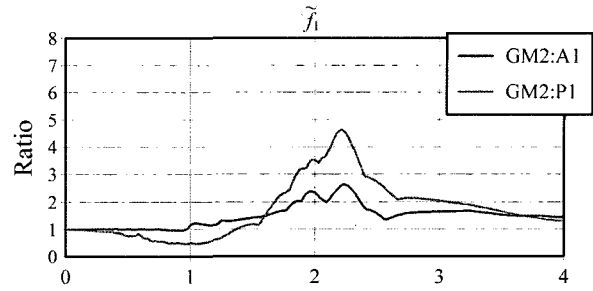
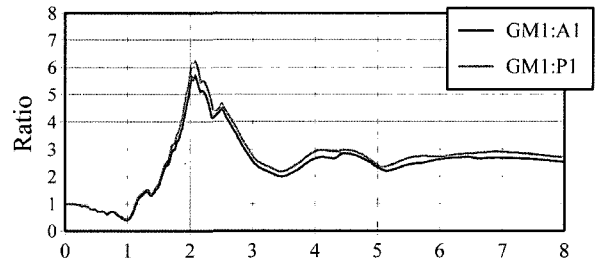


그림 9 H/D=2인 지반에서 종방향 가속도 응답스펙트럼의 증폭비

표 3 H/D=2인 지반에서 지반운동 PGA의 증폭비

지반 모델	A1 종방향	P1 종방향	A1 횡방향	P1 횡방향
GM1	2.533	2.708	2.914	2.885
GM2	1.438	1.012	1.012	1.347
GM3	1.012	1.008	0.972	0.975

답의 증폭을 나타낸 것으로  $\tilde{f} > 1$ 인 주파수 영역에서 응답의 증폭이 일어나는 것을 볼 수 있다. 지반의 강도가 커질수록 증폭의 크기는 작아져서 GM3의 경우에는 증폭이 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 10은 A1, P1에서 횡방향 응답의 증폭을 나타낸 것으로 종방향과 같이  $\tilde{f} > 1$ 인 주파수 영역에서 응답의 증폭을 보여 주며, 지반의 강도가 커질수록 증폭의 크기는 작아져서 GM3의 경우에는 증폭이 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

GM1, GM2, GM3 모델에서 구한 가속도 응답의 PGA (peak ground acceleration)와 입력 지진으로 사용한 El Centro 지진 기록의 PGA간의 비를 각 지점과 지반 운동의 방향에 대해서 정리하여 표 3에 나타냈다. 지반 비균질성의 영향에 의한 PGA의 증가를 보여주며, 지반의 강도가 커짐에 따라 PGA는 입력 지진의 PGA로 근접하는 것

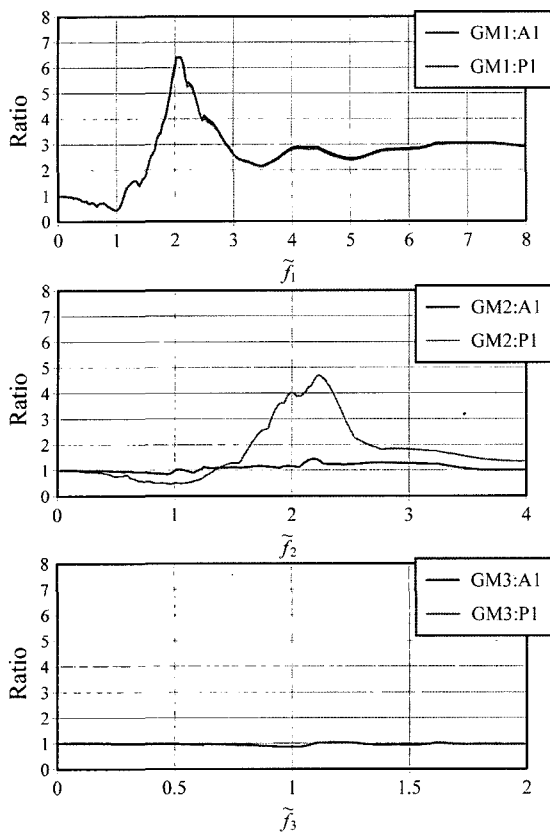


그림 10  $H/D=2$  인 지반에서 횡방향 가속도 응답스펙트럼의 증폭비

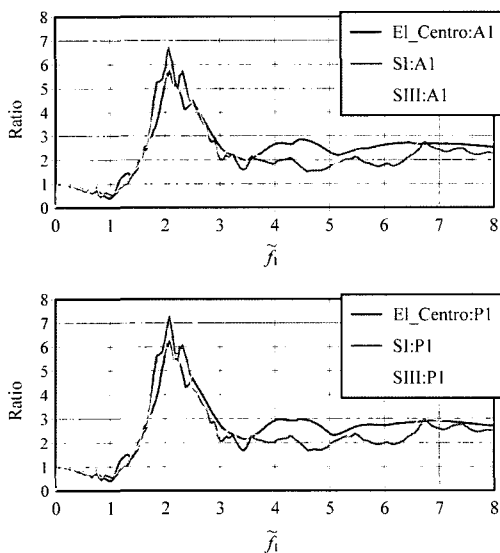


그림 11 입력지반운동에 따른 종방향 가속도 응답스펙트럼의 증폭비

을 알 수 있다. 이상의 해석 결과는 암반과 같이 강도가 큰 지반에서는 지형 변화가 지반 운동에 미치는 영향이 작다는 것을 나타낸다.

그림 11과 그림 12는 GM1 모델에서 El Centro 지진기록, 인공가속도 시간이력을 입력 지진으로 하여 지반의

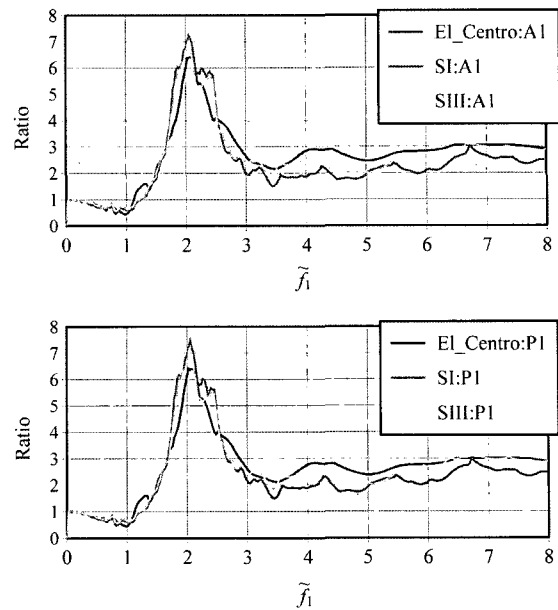


그림 12 입력지반운동에 따른 횡방향 가속도 응답스펙트럼의 증폭비

A1, P1 위치에서의 가속도 응답스펙트럼의 증폭비를 비교한 것이다. 그림에서 'SI'는 지반 종류 I인 지반의 인공가속도 시간이력 입력시, 'SIII'는 지반 종류 III인 지반의 인공가속도 시간이력 입력시의 증폭비를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 입력 지반 운동에 따른 지반 운동의 증폭은 주파수에 따라 유사한 경향을 보이며,  $\tilde{f} < 3$ 인 영역에서 차이는 더욱 작은 것을 볼 수 있다. 이는 지형이 비균질한 지반에서 지반운동의 증폭은 지반의 비균질성에 의하여 좌우되고, 입력 지반 운동의 차이는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다.

### 5. 교량의 지진 응답해석

그림 2 교량 모델의 지진 응답 해석을 수행하였다. 지반은  $H/D=2$ , 전단파 속도는  $V_s^{ref}, f_c = f_c^1 = V_s^{ref}/8D$ 이며, 이 지반의 2차원 자유장 해석 결과는 그림 9와 그림 10에 나타나 있다. 지반의 비균질성과 지반-구조물 상호작용이 교량의 지진 응답에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음 세 가지 해석을 수행하였다. 첫 번째 해석(M1)은 고정기초 교량의 해석으로 원역 통제운동을 고정기초에 입력하여 지진 응답을 구하였다. 두 번째 해석(M2)에서는 2차원 자유장 해석을 통해 구한 교각, 교대 위치에서 지반의 지진 응답을 고정기초에 입력하여 교량의 지진 응답을 구하였다. 세 번째 해석(M3)에서는 지반을 등가의 선형스프링 계수로 모델링 한 후 이 선형스프링을 교각, 교대와 지반의 연결부에 부착하여 지반-구조물 상호작용을 고

표 4 교량의 지진 응답 해석 모델

해석 모델	입력지반운동	경계 조건
M1	원역 통제운동	고정기초
M2	2차원 자유장 운동	고정기초
M3	2차원 자유장 운동	지반스프링 : 임피던스
M4	3차원 입력 자유장 운동	3차원 초유한요소

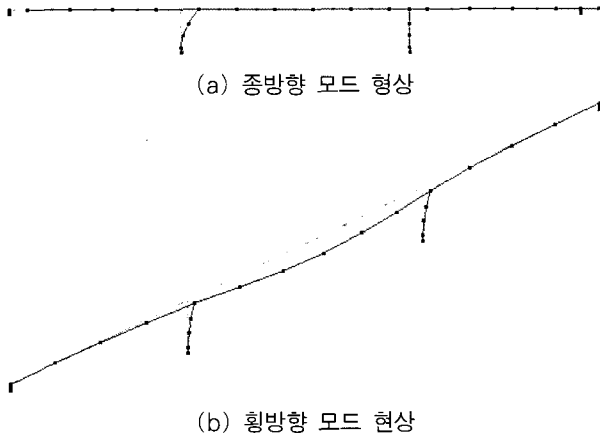


그림 13 고정기초 교량의 모드형상

표 5 SSI 고려시 교량의 고유진동수의 변화

해석 모델	$f_N^L/f_c^1$ (종방향)	$f_N^T/f_c^1$ (횡방향)
고정기초	0.194	2.108
3차원 SSI	0.192	1.845
감소율 (%)	1.03	12.47

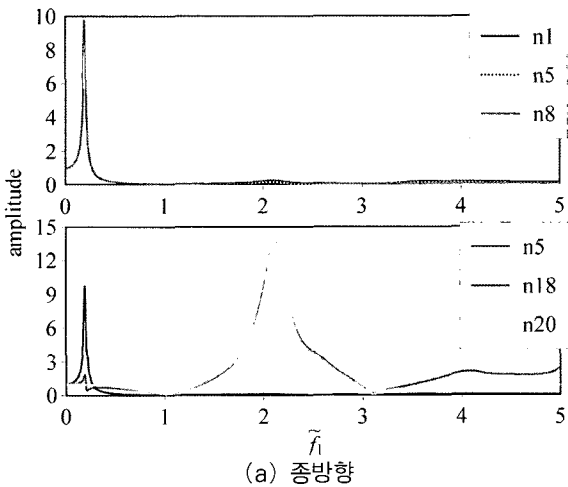
려한 해석을 하였다. 3차원 초유한 요소를 이용하여 기초를 포함한 지반을 모델링하여 강제 기초의 임피던스를 구한 후, 교량의 종방향, 횡방향 고유주기에 해당하는 임피던스를 구하여 이를 선형 스프링 계수로 사용하였다. 입력 지반 운동은 M2와 같다. 네 번째 해석(M4)에서는 3차원 초유한 요소를 이용한 지진응답 해석기법을 사용하여 교량의 지진 응답을 해석하였다. 네 가지 해석 모델을 정리하여 표 4에 나타내었다.

고정기초 교량의 첫번째 종방향, 횡방향 모드 형상을 그림 13에 나타내었다. 종방향 고유진동수  $f_N^L$ , 횡방향 고유진동수  $f_N^T$ 와 지반의 컷오프 진동수  $f_c^1$ 의 비는 각각  $f_N^L/f_c^1 = 0.194$ ,  $f_N^T/f_c^1 = 2.108$ 이다.

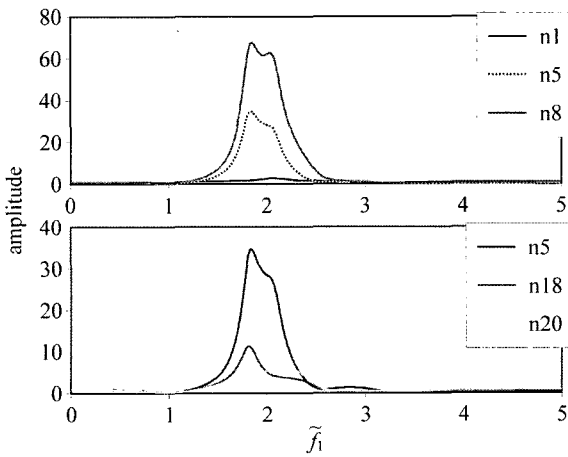
M4 해석을 통해 구한 상판과 교각 절점에서의 종방향, 횡방향 가속도 전달함수를 무차원 진동수  $\tilde{f} = f/f_c^1$ 에 대하여 그림 14에 나타내었다. 전달함수로부터 구한 지반과 연계된 교량의 첫번째 종방향 고유진동수와  $f_c^1$ 의 비  $f_N^L/f_c^1$ 는 0.192이고, 횡방향 고유진동수의 경우에는  $f_N^T/f_c^1$ 는 1.845이다. 이를 고정기초 교량의 고유진동수와 비교하여 표 5에 나타냈다. 표를 보면 지반-구조물 상호 작용의 효과로 고유진동수가 작아졌고 이 효과는 종방향에서는 미미하고 횡방향 고유진동수에서 크다는 것을 알 수 있다.

해석 M1, M2, M3, M4에서 그림 3(b)에 나타낸 교각 1에 해당하는 15, 16, 17번 요소에서 발생하는 최대 전단력을 계산한 후, M2, M3, M4 에서 구한 최대값과 M1에서 구한 최대값 사이의 비를 그림 15, 16에 나타냈다. 그림 15의 종방향 해석 결과를 보면, 지반 비균질성이 고려된 입력 지진에 의한 최대 전단력의 증폭은 일어나지 않았음을 알 수 있다. 이는 그림 9의 GM1 교각1 위치에서 종방향 가속도 응답스펙트럼 증폭비에서 볼 수 있듯이  $\tilde{f} < 1.0$ 인 주파수 영역에서 통제운동에 의한 응답 스펙트럼이 지반 비균질성의 영향을 고려한 응답스펙트럼보다 크고, 표 5와 같이 교량의 종방향 고유진동수와  $f_c^1$ 의 비  $f_N^L/f_c^1$ 는 0.194, 0.192로 1.0 보다 작은 영역에 있기 때문이다. M2와 M3의 결과를 비교해 보면 지반-구조물 상호 작용의 영향은 작다는 것을 알 수 있다.

그림 16의 횡방향 해석 결과를 보면, M2, M3, M4 모델에서 최대 전단력의 증폭이 일어난 것을 알 수 있다. 고정



(a) 종방향



(b) 횡방향

그림 14 교량의 가속도 전달함수

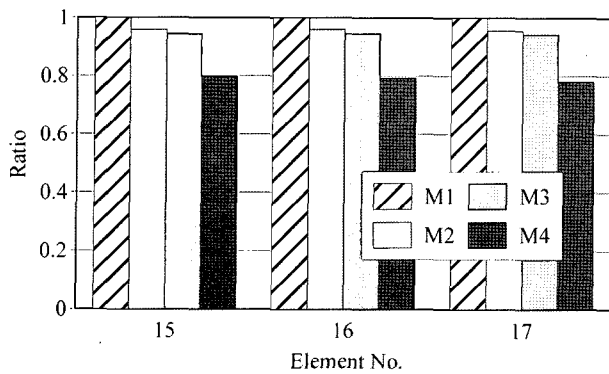


그림 15 종방향 운동에 의해 발생한 교각의 최대 전단력비

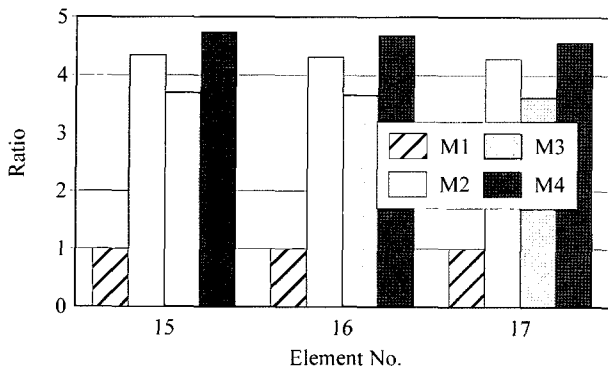


그림 16 횡방향 운동에 의해 발생한 교각의 최대 전단력비

기초 교량과 SSI를 고려한 교량의 고유진동수와  $f_c^1$ 의 비  $f_M^1/f_c^1$ 는 표 5에 나타난 것처럼 각각 2.108, 1.845이며, 그림 10에 나타난 GM1에서 교각과 교대에서의 횡방향 가속도 응답 스펙트럼의 증폭비를 보면 이 위치에서 응답의 증폭이 일어나는 것을 볼 수 있다. M2, M3의 결과를 비교하면 종방향 응답에 비해 지반-구조물 상호 작용의 영향은 크게 나타났으나, 부지효과에 의한 응답의 증폭에 비하면 그 효과는 작다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

부지효과와 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 자유장운동 해석과 3경간 교량의 지진응답 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 부지효과를 고려한 지반 운동의 가속도 응답 스펙트럼을 보면 지반의 컷오프 진동수보다 큰 주파수 영역에서 응답이 증폭이 발생한다.
- 암반과 같이 강도가 큰 지반에서는 지형변화가 지반 운동에 미치는 영향은 작다.
- 지반운동의 증폭은 입력지반운동의 특성보다는 지반의 비균질성에 의한 영향이 더 크며 이로부터 교량 부

재력의 증가도 지반 비균질성의 영향이 더 큼을 예상할 수 있다.

- 일반적인 3경간 교량에서 부재력의 증가는 종방향 보다는 횡방향 지반 운동시 더욱 현저하며 이는 교량의 횡방향 고유진동수가 지반의 컷오프 진동수보다 커서 지반 운동의 증폭이 일어나는 주파수 영역에 있기 때문이다.
- 지반의 공간적 비균질성이 교량의 지진 응답에 미치는 영향은 지반-구조물 상호 작용의 영향보다 크다.

이 연구에서는 주로 지반 매질 물성 변화에 의한 부지효과에 대한 연구가 이루어졌으며, 앞으로 지형변화가 지반 운동과 교량 지진응답에 미치는 영향에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다. HYUNSSI는 앞으로 건설될 초장대 교량 설계시에 지반의 공간적 비균질성을 고려한 동적 지진 응답해석에 유용하게 활용될 수 있다고 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Kornkasem, W., Nam, S. I., Foutch, A. A., Ghaboussi, J., and Aschheim, M. A. (2000). Seismic Analysis of a Truss-arch Bridge Crossing the Mississippi River, *12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*.
2. Zembaty, Z., and Rutenberg, A. (1998). On the Sensitivity of Bridge Seismic Response with Local Soil Amplification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 1095-1099.
3. 현대건설주식회사 기술연구소 (1996). 특수구조물에서의 내진설계를 위한 SSI 해석기법 개발, 연구기관:서울대학교 공학연구소.
4. Kim, J. K., Koh, H. M., Kwon, K. J., and Yi, J. S. (2000). 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.
5. 이장석. (2001). 비균질 지반에서의 동적 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 3차원 스트립 초유한 요소, 박사학위논문, 서울대학교.
6. Gasparini, D. A., and Vanmarcke, E. H. (1976). SIMQKE, Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, MIT 