

# 부분구조법에 의한 지반-구조물상호작용시스템의 지진응답 매개변수 연구

## Parametric Study on Earthquake Responses of Soil-structure Interaction System by Substructure Method

박 형 기\*      조 양 회\*\*  
Park, Hyung Ghee    Joe, Yang Hee

### 국문요약

동적 지반-구조물해석과정에는 수많은 불확실성 요소가 내재되어 있다. 이러한 요소는 입력운동의 정의, 지반-구조물시스템의 모델작성, 해석기법 등에 포함된다. 이 논문은 점탄성 층상지반상의 원자로건물의 지진응답에 대한 매개변수해석을 수행한 결과를 제시한 것이다. 많은 매개변수 중에 입력운동의 정의위치, 구조물의 묻힘정도, 상부토층의 두께와 지반의 강성을 선택하여 지진응답에 미치는 영향을 중점적으로 이 연구에서 다루었다. 해석방법은 진동수에 무관한 지반임피던스를 사용하는 부분구조법인 시간영역에서의 모드중첩법이다. 지반-구조물시스템의 모드감쇠값은 각 모드에 대해 변형에너지에 대한 소멸에너지의 비를 구하여 결정되었다. 이 연구결과로부터 부분구조법에 의한 지반-구조물상호작용해석법의 실용적 이용에 참고할 수 있는 지진응답에 미치는 각 파라메터의 민감도가 제시되었다.

**주요어** : 동적 지반-구조물상호작용, 매개변수해석, 시간이력해석

### ABSTRACT

In the dynamic soil-structure interaction(SSI) analysis, numerous uncertain parameters are involved. They include the uncertainties in the definition of input motions, modeling of soil-structure interaction systems, analysis techniques, etc. This paper presents the results of parametric studies of the seismic responses of a reactor containment structure built on the viscoelastic layered soil. Among the numerous parameters, this study concentrates on the effects of definition point of the input motion, embedment of structure to the base soil, thickness of the top soil layer, and rigidity of the base soil. The substructure method using frequency independent impedances is adopted. The method is based on the mode superposition method in time domain using the composite modal damping values of the SSI system computed from the ratio of dissipated energy to the strain energy for each mode. From the study results, the sensitivity of each parameter on the earthquake responses has been suggested for the practical application of the substructure method of SSI analysis.

**Key words** : dynamic soil-structure interaction, parametric study, time domain analysis

## 1. 서      론

지반-구조물상호작용해석은 원전과 같은 주요 시설물의 내진설계 과정에서 가장 중요하면서도 가장 많은 불확실성을 내포하고 있는 과정이다.

따라서 현재까지 이를 위한 다양한 해석방법 및 전산프로그램이 개발되어 있긴 하지만, 어느 방법도 제한사항 없이 모든 조건하에서 공학적으로 타당한 해석결과를 줄 수 있는 방법을 찾기는 어렵다.

이 연구에서 제시된 집중파라메터모델을 사용하는 부분구조해석법을 이용한 지반-구조물

\* 정회원 · 인천대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원 · 인천대학교 토목공학과 부교수

상호작용해석 방법은 이론적 합리성이 검증되었을 뿐만 아니라, 대만 Hualien에서 수행된 대형내진시험모델의 시험 및 실제 지진 계측 결과를 통하여 그 해석결과에 대한 신뢰성도 확인된 바있다.<sup>(1)</sup> 그럼에도 불구하고 제시된 방법의 적용상 전술한 불확실성으로 인하여 시스템 및 입력운동의 형태에 무관하게 일반적으로 적용 가능한 방법이라고 할 수는 없다. 또 특정한 인자의 변화가 해석결과에 미치는 영향도 또다른 상관인자와의 관계에 따라 달라질 수 있다. 이 연구에서는 지반-구조물상호작용해석 과정에서 해석결과에 비교적 큰 영향을 주는 인자들을 대상으로, 그 인자의 변화가 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위한 다양한 매개변수해석을 수행하였다. 해석방법으로서는 집중파라미터모델을 이용하는 부분구조법을 사용하였으며, 고려 대상 인자로서는 입력운동의 정의위치, 지반의 강성, 구조물의 문힘깊이, 지반의 층상특성 등을 대상으로 하였다.

## 2. 집중파라미터모델을 사용한 부분구조법

### 2.1 부지응답해석

부지응답해석은 지반과 기초의 접촉면에서의 운동학적 경계조건, 지반구성 특성 및 전달매체인 지반의 동적거동 특성을 고려하여 전파하는 지진파에 대한 지반응답을 구하는 것으로서, 해석시 지반의 비선형 역학적성질이 고려된다. 지표면 상에 구조물의 기초가 있고, 수직으로 전달되는 평면파를 가정한다면 지반의 응답은 자유장운동과 동일하다.

이 연구에서는 수평층상지반에 수직으로 전달되는 일련의 파를 가정하고, 1차원 파전달이론으로 지진파에 대한 지반응답을 구하였다.<sup>(2),(3)</sup> 균일 등방성재료로 이루어진 선형 점탄성체인 표층 내를 전달파가 수직으로 전파하는 경우에 Kelvin-Voigt 모델을 사용하면 1

차원 파전달 방정식은

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (1)$$

로 표현된다.

여기서  $u$  = 전단파가 전파되면서 발생하는 지반의 수평변위,

$\rho$  = 전달매체인 지반재료의 밀도,

$G$  = 전단탄성계수,

$\eta$  = 점성계수

이다.

조화함수형 전단파라면, 식 (1)은 반무한체 위에  $N$ 개의 수평 토층으로 구성된 지반내의 모든 층에 대하여도 확장 적용될 수 있다.

응력-변형도곡선에 보인 지반재료의 비선형성을 곡선의 원점과 히스테리시스루프상의 점을 잇는 선분의 기울기로 정의하는 동전단탄성계수와 히스테리시스루프 내부면적으로부터 구하는 재료감쇠를 전단변형도의 함수로 표현하여 지반의 지진응답해석에 고려한다.

부지응답해석 결과로부터 얻어지는 지진시의 지반 강성과 기초위치에서의 지반응답은 후속되는 상호작용해석의 입력으로 사용하게 된다.

### 2.2 지반임피던스

지반-구조물상호작용해석에 사용되는 지반 모델은 탄성스프링과 댐퍼로써 나타내며, 먼저 진동수에 종속하는 지반임피던스함수를 구한 다음 지반-구조물시스템의 첫번째 고유진동수에 대응하는 지반스프링상수와 감쇠계수를 시행착오법으로 구한다.

수평 층상 연속체상의 표면기초의 진동수에 종속하는 지반임피던스함수는 Green함수를 이용하면

$$\{u(x_0)\} \exp i\omega t = [G(\omega)] \{p(x_0)\} \exp i\omega t \quad (2)$$

로 정의될 수 있다.<sup>(4),(5)</sup> Green함수  $[G(\omega)]$ 는 층상 연속체의 표면상의 한 지점  $\{x_0\}$ 의 변위

$\{u(x_0)\}$ 와 다른 한 지점  $\{x_s\}$ 에서 작용하는 집중하중  $\{p(x_s)\}$ 의 관계를 나타내는 함수로서, 가진진동수  $\omega$ , 하중 작용점과 변위 계산점 간의 상대위치  $\{x_0 - x_s\}$ , 전단탄성계수  $G$ , 반무한체의 전단파의 압축-인장파의 속도비의 함수이며 기초 매트 크기나 형상에 무관하다.

구조물의 문힘효과는 Tseng<sup>(6)</sup>이 제시한 문힘효과 반영계수를 사용하여 표면기초의 지반임피던스함수를 보정함으로써 고려된다. 즉,

$$k_i^* = k_{ii} [1 + (\alpha_{ii} - 1) \frac{G_1}{G_2} f] \quad (3)$$

$$c_{ii}^* = c_{ii} [1 + (\beta_{ii} - 1) \frac{G_1}{G_2} f]$$

여기서,

$k_{ii}, c_{ii}$  = 표면기초의 진동수에 종속하는 임피던스함수

$G_1, G_2$  = 문힌 구조물 측면 지반의 전단탄성계수와 저면 지반의 전단탄성계수

$f$  = 구조물과 주변 지반과의 접촉상태에 따른 임피던스 수정계수

$\alpha_{ii}, \beta_{ii}$  = 문힘비와 무차원 진동수로 나타낸 문힘효과 반영계수

이다.

### 2.3 동적해석

총자유도수가  $n$ 인 지반-구조물시스템의 3차원 집중파라미터모델에 대한 운동방정식은

$$[M] \{\ddot{u}(t)\} + [C] \{\dot{u}(t)\} + [K] \{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서,  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 지반-구조물시스템의 질량행렬, 감쇠행렬과 강도행렬이다.  $\{F(t)\}$ 는  $-\ddot{u}_g(t) [M][1]$ 가 되며, 이때  $[1]$ 은 지진입력을 나타내는 1과 0으로 이루어지는 하중벡터이다.  $\{u\}$ 는 자유장운동에 대한 상대변위벡터로서 지반가속도  $\ddot{u}_g(t)$

를 받는 구조물의 응답이다.

식 (4)의 해는 모드중첩법으로 구해지며 이때 모드별 응답은 CQC<sup>(10)</sup>방법으로 합성되었다. 모드중첩법에서 사용되는 지반-구조물시스템의 등가모드감쇠비는 Roesset<sup>(7)</sup>이 제시한 식 (5)와 같은 에너지비율법으로 결정된다.

$$\beta_{ieq} = \frac{\sum_i (D_i + \beta_i \frac{\omega_i}{\omega_j}) E_{sij}}{\sum_j E_{sij}} \quad (5)$$

여기서,

$\beta_{ieq}$  =  $i$ 번째 진동모드의 등가모드감쇠비

$D_j, \beta_j$  = 각각  $j$ 번째 스프링의 재료감쇠비 및 발산감쇠비(radiational damping)

$E_{sij}$  =  $i$ 번째 진동모드에 의한  $j$ 번째 스프링의 최대 변형에너지

$\omega_i, \omega_j$  = 각각  $i$ 번째와  $j$ 번째 진동모드의 고유진동수

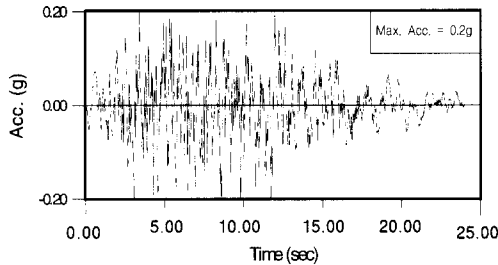
이다.

## 3. 사용된 입력운동과 대상 구조물

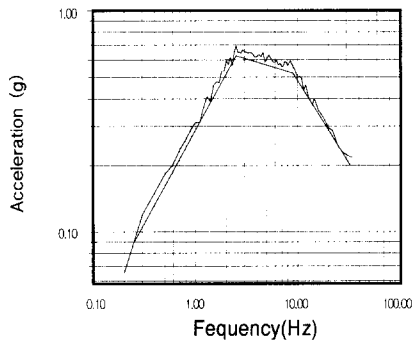
### 3.1 입력운동

동일한 지반-구조물상호작용시스템의 지진 해석 결과도 입력운동의 특성에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 입력운동 특성에 따른 영향을 배제하기 위해서는 충분한 수의 입력운동에 대한 반복해석을 수행한 다음 그 결과들을 합리적인 방법으로 통계처리할 필요가 있다. 이 연구에서는 동일한 동적특성을 갖는 서로 다른 다섯 개의 인공 지진시간이력을 해석용 입력으로 선택하였다. 여기서, 실제 계측된 강진기록은 특정 진동수 구간에서 나타나는 과도한 첨두값이 여타 인자들의 영향을 흡수, 희석시키는 경향을 갖기 때문에 이 매개변수해석을 위한 입력운동에는 포함시키지 않았다. 인공지진은 미국의 원전설계용 표준응답스펙트럼<sup>(8)</sup>에 부합되도록 작성되었으며, 이를 위하여 전산프로그램 SIMQKE<sup>(9)</sup>를 사용하였다.

작성된 인공 가속도시간이력의 지속시간은 24초이고, 시간간격( $\Delta t$ )은 0.005초로 하였으며, 대상 시스템의 효율적인 응답거동을 나타낼 수 있도록 최대지반가속도를 0.2g로 정규화시켜 이를 지표면운동으로 정의하였다. 이때 지진운동의 시간구간에 따른 형상을 정의하기 위한 포괄함수는 각 지역의 지진특성 및 강도에 따라 정의될 수 있는데, 이 연구에서는 일반 원전부지에서 가장 보편적으로 채택되고있는 “복합형(compound) 포락함수”를 사용하였다.<sup>(9)</sup> 그림 1은 해석에 사용된 대표적인 인공지진의 시간이력과 응답스펙트럼을 도시한 그림이다.



(a) 인공지진의 시간이력곡선



(b) 인공지진의 응답스펙트럼

그림 1 입력운동으로 사용된 대표적인 인공지진의 시간이력곡선과 응답스펙트럼

### 3.2 대상구조물

지반-구조물상호작용에 의한 영향의 정도는 지반과 구조물의 상대적인 강도특성에 따라 결정된다.

즉, 상부구조물의 강성이 클수록 또 폭-높이비가 클수록 더 큰 상호작용 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 이러한 점을 고려하여 상대적으로 큰 상호작용 효과를 줄 것으로 예상되며, 또 실제 설계, 시공된 적이있는 전형적인 원자로발전소의 원자로건물을 해석 대상 구조물로 선택하였다.

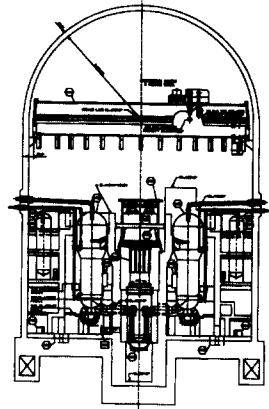
선택된 원자로건물은 원통형 벽체와 반구형 돔으로 된 프리스트레스트콘크리트구조로 되어 있으며, 그 내부에는 철근콘크리트로 된 각종 차폐벽 및 지지구조물들이 배치되어 있다. 벽체의 반경은 24.0m이고, 벽체 및 돔의 총 높이는 91.5m이다. 또 건물의 기초는 두께 3.6m의 철근콘크리트 슬래브로 되어 있다. 그림 2(a)는 해석 대상 원자로건물의 단면도 및 해석모형을 보인것이다. 건설재료로 사용된 콘크리트는 탄성계수,  $E_c = 2.98 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ , 단위중량,  $W_c = 2.64 \text{ t/m}^3$ , 포아송비,  $\nu = 0.17$ 의 값을 가지며, 입력지진의 최대가속도 크기가 0.2g인 점을 감안하여 재료감쇠비는 5%로 가정하여 사용하였다.

이와같은 상부구조물은 해석을 위해서 그림 2(b)에 보인바와 같이 18개의 요소로 구성된 집중질량모델로 이상화되었다. 해석 대상 구조물의 고유치해석을 고정지반으로하여 수행한 결과에 의하면 수평방향 주진동수는 4.5Hz로서 원자로건물은 비교적 강성이 큰 구조물임을 알 수 있다.

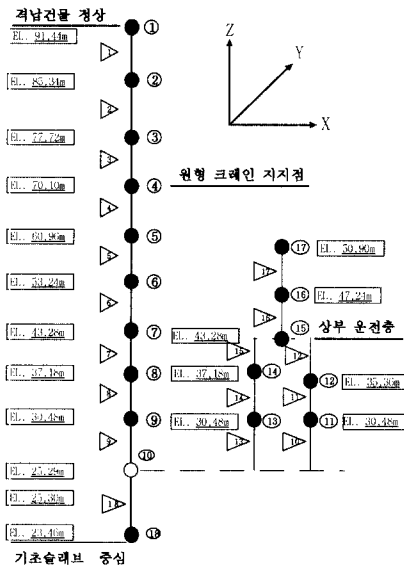
### 4. 매개변수의 선택

전술한 바와같이 지반-구조물상호작용해석 결과에 영향을 미치는 인자는 입력운동의 정의위치, 상부구조물, 지반, 해석방법 등 전 분야에 걸쳐 실로 다양하다고 할 수 있다. 이 연구에서는 이들 인자중에서 해석결과에 상대적으로 큰 영향을 미치고, 또 실무에서 항상 주요 고려대상이 되는 인자인 입력운동의 정의위치, 지반의 강성특성(전단강성), 구조물의 묻힘깊이, 지반의 층상특성(상부토층의 두께)를

해석대상 인자로 선택하였다. 표 1은 그림 3에 보인 바와 같은 지반-구조물상호작용시스템에 대하여 매개변수의 종류 및 해석모델의 내용을 요약한 것이다.



(a) 단면도



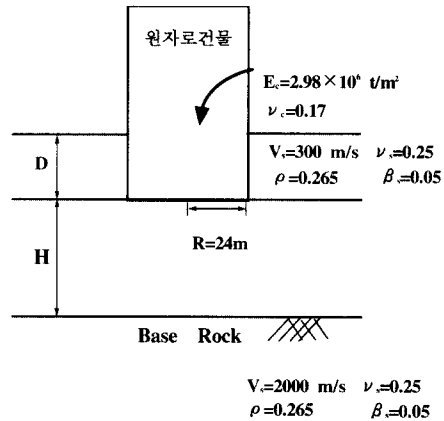
(b) 해석대상 구조물의 집중질량-보요소모델

그림 2 해석 대상 구조물인 원전 원자로건물의 단면도

표 1 각 매개변수의 변화에 따른 해석모델 종류

매개변수		모델 종류				
종 류	특 성	기초 저면	지표면	-	-	-
압력운동의 정의위치	정의위치					
	전단파 속도 $V_s$ (m/sec)	500	700	1000	1300	$\infty$ (고정 지반)
	재료감쇠비 (%)	5	4	3	2	-
상부토층의 강성	지반분류	사질토	암	암	암	-
구조물의 문힘깊이(D)	D/R	0	0.5	1.0	1.5	-
상부토층의 두께(H)	H/R	0.5	1.0	2.0	3.0	6.0

- 주 : 1. 약자 및 부호의 내용은그림 3 참조
- 2. 두 번째 기둥에 표시된 값들을 기본모델로 선택하였으며, 매개변수 해석시 해석대상 인자를 제외한 다른 인자들의 값은 특별한 언급이 없는 한 기본모델의 값들을 선택하였다.



범례

$R$ = 기초반경	$\nu_s$ = 토층의 포아송비
$V_s$ = 토층의 전단파속도	$\nu_c$ = 구조물의 포아송비
$D$ = 기초의 문힘깊이	$E_c$ = 구조물의 탄성계수
$H$ = 상부토층의 두께	
$\rho$ = 흙의 밀도	
$\beta_s$ = 토층의 재료감쇠비	

그림 3 매개변수 해석을 위한 지반-구조물상호작용 시스템

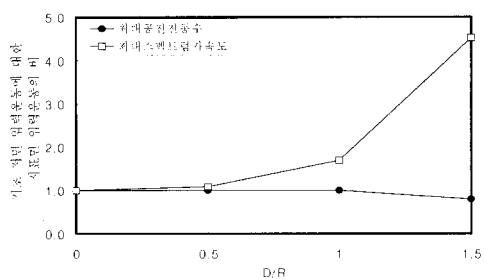
입력운동은 당연히 기초 저면위치에서 정의 되는 변화된 지진운동을 사용하여 하지만 실무에서는 주로 지표면의 운동을 그대로 사용하고 있는 점을 고려하여 이들 두가지 경우를 비교 대상으로 선택하였다. 지반의 강성특성의 변화를 고려하기 위해서는 상부토층의 전단파속도( $V_s$ )가 각각 500m/sec, 700m/sec, 1000m/sec, 1300m/sec인 네가지 지반조건을 선택하였으며, 이들 지반에 대한 재료감쇠비는 각각 5%, 4%, 3%, 2%로 가정하였다. 이중  $V_s$ 가 500m/sec인 경우는 사질토로 나머지 경우는 모두 암반으로 가정하여, 이들 지반들에 대한 비선형 동적특성은 참고문헌2에서 제시한 값을 사용하였다. 또 지반의 단위중량은  $2.6t/m^3$ , 포아송비는 0.25를 일괄적으로 동일하게 가정하였다. 구조물의 지진응답에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 구조물의 문힘깊이는 실제업무에서 발생가능한 네가지 경우인 문힘깊이가 구조물 기초반경의 0.5배( $D/R=0.5$ ), 1.0배( $D/R=1.0$ ), 1.5배( $D/R=1.5$ )와 지표면 기초를 각각 비교 대상 모델 종류로 선택하였다. 또, 지반층상은 2개층 즉 기반암 상층에 한 개의 지반층이 존재하며, 상층의 두께를 인자로 선택하여 기초반경에 대한 층상두께비( $H/R$ )가 각각 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 6.0인 다섯가지 경우와 반무한체의 경우인  $H/R=\infty$ 를 선정하였다.

## 5. 매개변수별 영향 분석

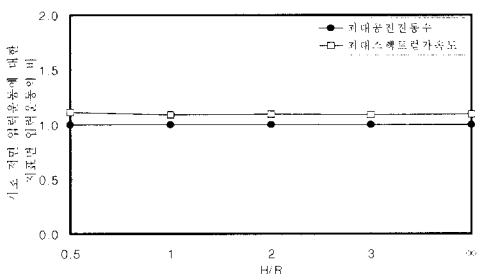
### 5.1 입력운동의 정의위치에 의한 영향

입력운동의 정의위치에 따른 영향을 관찰하기 위하여 지표면 입력운동과 기초저면 입력운동을 사용하여 지반-구조물상호작용해석을 수행하였다. 기초 저면 입력운동을 결정하기 위하여 지표면에서 정의된 가속도시간이력을 1차원 파전달이론에 근거하여 작성된 M-SHAKE<sup>(3)</sup>를 사용하여 각 모델별로 부지응답해석을 수행하였다. 그림 4는 인공지진1을 지표면과 기초저면에서 입력시킨경우에 대한

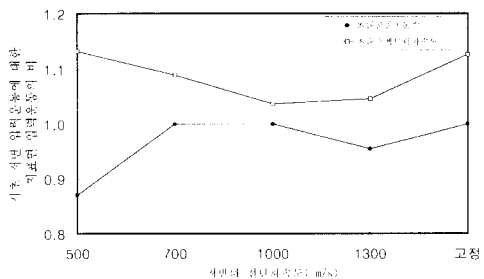
해석결과를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이, 지표면 입력과 기초저면에서의 입력을 사용한 해석결과와 차이를 비교하여 보면, 입력운동의 정의위치가 최대공진진동수에 미치는 영향은 전혀 없거나 있는 경우에도 무시할 수 있는 정도이다. 그러나 구조물 응답은 예외없이 지표면 입력운동이 기초저면에서의 입력운동보다 큰값을 주며, 경우에 따라서는 그 정도가 너무 크기 때문에, 지표면운동을 사용할 경우 비경제적인 설계 결과를 줄 수도 있음에 유의해야 한다.



(a) 문힘깊이비별



(b) 상부토층의 두께별



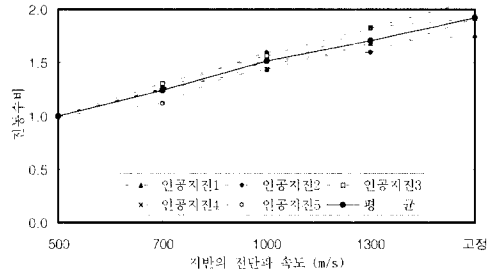
(c) 지반강성별

그림 4 입력운동의 정의위치에 따른 응답 비교

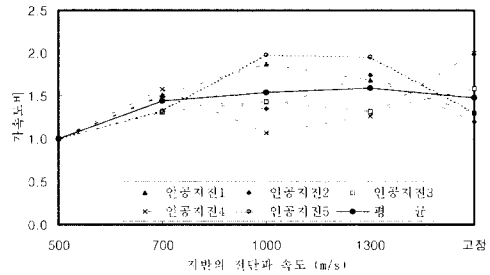
### 5.2 지반강성의 영향

지반강성의 영향을 분석하기 위하여 상부토층의 전단파속도가 500m/s, 700m/s, 1000m/s, 1300m/s인 네 종류의 서로 다른 모델에 대하여 각각 5개 입력운동을 작용시켜 해석을 수행하여 그 응답을 상호 비교하였다. 물론 이때 전단파속도를 제외한 다른 인자들은 표 1의 두 번째(음영으로 표시된) 기둥의 값들을 사용하였다. 또 구조물의 묻힘깊이와 상부토층의 두께를 달리한 두 개의 서로 다른 모델에 대해서도 동일한 해석을 수행함으로써 지반강성에 의한 응답의 보편적인 경향을 확인하고자 하였다. 그림 5는 상부토층의 두께가 매우 두꺼운 지반의 표면에 기초를 가지는 경우 ( $D/R=0.0$ ,  $H/R=6.0$ )의 해석 결과중 격납건물 정상에서의 응답중 최대공진진동수비와 최대스펙트럼가속도비를 지반의 전단파속도별로 나타낸 것이다.

해석결과로부터 지반강성이 증가할수록 지반-원자로건물시스템의 최대공진진동수 및 최대스펙트럼가속도가 동시에 증가하는 경향을 확인하였으며, 이는 지반강성 증가에 따라 시스템 진동수가 증가하는 반면에 감쇠값은 감소하기 때문에 발생하는 일반적인 현상으로서 예상한 바와 같았다. 그러나 최대스펙트럼가속도의 경우는 최대공진진동수와는 달리 입력운동 및 모델종류에 따라 그 응답의 평균값 및 분산도가 현저한 차이를 보였다. 특히 상부토층의 두께가 얇을 경우( $H/R=1.0$ )에는 지반 전단파속도의 변화에도 불구하고 최대스펙트럼가속도 응답의 변화가 거의 없거나 오히려 감소하는 경우(예 : 기본모델)도 있을 수 있으므로, 해석결과와 응용시 특히 유의할 필요가 있다.



(a) 최대공진진동수비

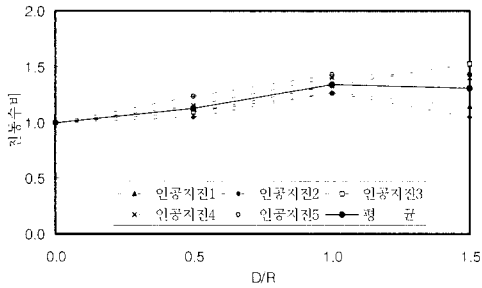


(b) 최대스펙트럼가속도비

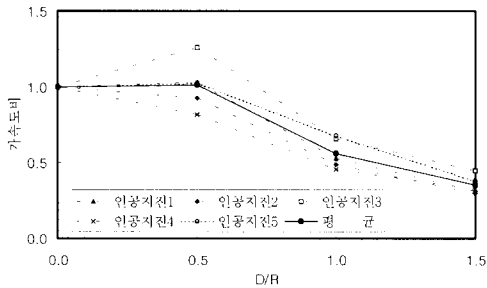
그림 5 지반강성에 따른 격납건물 정상에서의 응답 비교 ( $D/R=0.0$ ,  $H/R=6.0$ )

### 5.3 구조물 묻힘의 영향

구조물의 묻힘에 의한 영향을 분석하기 위하여, 표면기초( $D/R=0$ )와 원자로건물의 묻힘깊이가 건물기초 반경(24m)의 0.5배( $D/R=0.5$ ), 1.0배( $D/R=1.0$ ), 1.5배( $D/R=1.5$ )인 네 가지의 서로 다른 경우를 선정하고, 구조물의 묻힘깊이를 제외한 다른 인자들은 표 1의 두 번째 기둥의 값을 사용하여 해석하고, 그 해석결과를 상호 비교하였다. 또한 상부토층 두께를 달리한 두 개의 다른 모델에 대해서도 동일한 해석이 수행되었다. 그림 6은 기초 하부의 토층두께 ( $H/R=6.0$ )를 제외한 다른 인자들은 표 1의 두 번째 기둥의 값을 사용한 경우에 대하여 각 입력운동별로 격납건물 정상에서의 최대공진진동수와 최대스펙트럼가속도를 기초 묻힘비에 따라 비교하여 나타낸 것이다.



(a) 최대공진진동수비



(b) 최대스펙트럼가속도비

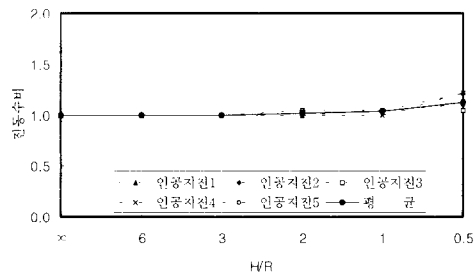
그림 6 묻힘깊이의 변화에 따른 모델별 격납건물 정상에서의 응답 비교 (H/R=6.0)

해석결과에서 묻힘깊이가 커질수록 격납건물 정상의 응답은 감소하고, 최대공진진동수는 증가하는 일반적인 경향을 확인하였다. 이러한 현상은 구조물이 묻힌 경우, 구조물 측면지반(backfill)으로 인하여 시스템의 강성 및 감쇠가 동시에 증가하기 때문에 발생하는 현상으로서 예상했던 바와 일치하는 경향이다. 격납건물의 가속도응답은 표면기초 구조물에 비해 매입깊이가 기초반경의 0.5배인 경우 약 10%, 매입깊이가 기초반경의 1.5배인 경우는 최고 60%까지 감소되는 현상을 보이고 있다. 그러므로 실제 설계시 매입깊이가 응답에 미치는 영향을 필히 고려해야 할 것으로 판단된다. 이 경우에도 지반강성의 영향 고찰에서와 마찬가지로 상부토층의 두께가 얇은 경우(기본모델)에는 일반적인 경향과 약간 다른 경향을 보이고 있음을 발견할 수 있다. 묻힘깊이가 내부구조물의 응답 중 최대공진진동수에 미치는 영향도 격납건물 정상의 응답과 유사한 경향을

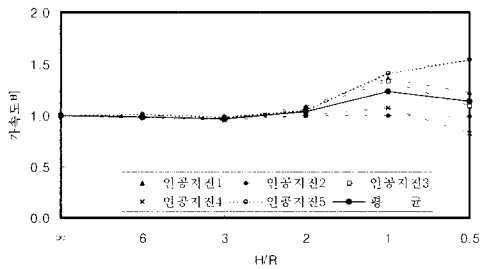
보이고 있다.

### 5.4 지반구성 특성의 영향

층상형태의 지반이 지진응답에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 상부토층의 깊이가 건물기초 반경(24m)의 0.5배(H/R=0.5), 1.0배(H/R=1.0), 2.0배(H/R=2.0), 3.0배(H/R=3.0), 6.0배(H/R=6.0)인 모델 및 반무한탄성체(H/R=∞)모델의 6가지 서로 다른 토층모델을 선정하고, 상부토층의 두께를 제외한 다른 인자들은 표 1의 두 번째 기둥의 값을 사용하여 해석하고, 그 해석결과를 상호 비교하였다. 또 추가적으로 상부토층의 강성을 달리한 다른 두 개의 모델에 대해서도 동일한 해석을 수행하였다. 그림 7은 표 1의 두 번째 기둥의 값을 사용한 모델에 대하여 각 입력운동별로 얻은 격납건물 정상에서의 최대공진진동수와 최대스펙트럼가속도를 지반층상비에 따라 비교하여 나타낸 것이다.



(a) 최대공진진동수비



(b) 최대스펙트럼가속도비

그림 7 지반 층상두께의 변화에 따른 격납건물 정상 응답 비교 (기본모델)



이들 해석결과를 분석해 보면, 층상두께가 감소할수록 최대공진진동수 및 최대스펙트럼 가속도는 동시에 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 층상두께가 두꺼워질수록 시스템의 강성은 감소하는 반면에 감쇠는 증가하기 때문에 기인하는 현상으로서 이는 예상했던 바와 같은 경향이다. 그러나 층상두께 변화에 따른 응답변화의 정도가 최대 10%내외로 그 정도가 크지 않으므로 실제 공학적인 측면에서의 의미는 다른 인자에 비하여 크지 않다고 할 수 있다. 또 기초 하부 토층의 두께가 기초 반경의 3배 이상이 되면 반무한체와 유사한 응답을 보인다.

이는 기초 하부 층상 두께가 기초반경의 3배 이상이 되면 지반을 반무한체로 모델링할 수 있음을 시사하고 있다. 한편, 내부구조물의 응답은 지반층상의 두께의 변화에 거의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 지반-구조물상호작용의 해석 결과에 민감한 영향을 줄 수 있는 불확실성을 내포하는 변수들을 대상으로 전단파속도가 500m/s 이상인 지반에 건설되는 원자로건물에 대하여 다양한 매개변수해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 부정확한 방법으로 계산된 기초위치에서의 지반운동보다는 오히려 지표면운동을 사용하는 것이 설계측면에서는 보다 바람직하다고 할 수 있다. 이때, 지표면운동을 사용하게 되면 안전측의 결과를 주게 되지만, 경우에 따라서는 과도한 안전 여유치를 줄 수 있음에 유의해야 할 필요가 있다.
- (2) 지반강성이 증가할수록 응답의 최대공진진동수 및 최대스펙트럼가속도가 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 내진설계를 위한 해석시는 지반강성을 큰 쪽으로 예측할 경우 안전측의 해석결과를 얻을 수 있다. 일

반적으로 부지조사 및 시험결과 얻어지는 지반특성은 실제보다 과대평가 되는 경향이 있으므로, 이 값을 직접 사용하여 모델링하는 경우 안전측의 결과를 얻을 수 있음을 시사하고 있다. 그러나 상부토층의 두께가 얇을 경우에는 이와같은 현상의 일관성이 낮아지므로 해석결과 이용에 주의할 필요가 있다.

- (3) 구조물의 문힘깊이가 커질수록 구조물의 최대스펙트럼가속도응답은 감소하게 된다. 따라서 해석모델 작성시 구조물의 문힘을 무시하게 되면 안전측의 응답을 얻을 수 있다고 할 수 있다. 그러나, 문힘깊이가 기초반경의 1.0배를 초과할 경우에는 과도한 비경제적 해석결과를 줄 수 있음에 유의해야 한다.
- (4) 지반이 층상으로 되어 있을 경우, 층상두께가 증가할수록 구조물의 최대스펙트럼가속도는 감소하게 된다. 따라서 상부토층의 두께를 가능한 한 얇게 모델링할 경우 안전측의 해석결과를 얻을 수 있다. 또, 토층 두께가 기초반경의 3배 이상이 되면 반무한체인 경우와 응답에 있어서 큰 차이를 보이지 않으므로, 반무한체로 모델링해도 무방하다.

## 감사의 글

이 연구는 한국원자력안전기술원과 1996년도 인천대학교 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 저자들은 이에 대한 감사의 뜻을 밝히는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. 박형기, 조양희, "부분구조법에 의한 지반-구조물시스템 내진해석 모델링방법 연구", 한국원자력안전기술원, KINS/HR-172, 1997.
2. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., *SHAKE- Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally*

- Layered Sites*, EERC 72-12, Univ. of California, Berkeley, 1972.
3. 박형기, "층상지반내 수직이동 수평지진파의 해석", 인천대학교, 공업개발연구소 연구논문집, 제 10집, 제 1권, 1995.
  4. Apsel, R.J., "Dynamic Green's Functions for Layered Media and Application to Boundary-Value Problems," Ph.D. Thesis, Univ. of California, Sandiego, 1979.
  5. Wong, H.L., and Luco, J.E., *Soil-Structure Interaction : A Linear Continuum Mechanics Approach(CLASSI)*, Univ. of Southern California, 1980.
  6. Tseng, W.S., and Takayanagi, T., *Validation of Soil-Structure Interaction Models Using In-Plant Test Data from Japan*, EPRI NP-5739, 1988.
  7. Roesset, J.M. et. al., "Modal analysis for structures with foundation interaction," *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 99, No. ST3, 1973.
  8. U.S. Atomic Energy Commission, Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants," Rev.1, 1973.
  9. Vanmarcke, E.H., and Gasparini, D.A., *Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, MIT, Publication No. R76-4, 1976.
  10. Wilson, E.L., Kiureghian, A.D., and Bayo, E.P., "A replacement for the SRSS method in seismic analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, No.2 1981.