

## 지반-구조물 상호작용해석시 동적지반특성의 평가 및 적용

Evaluation and Application of Dynamic Soil Properties for SSI Analysis

이 명 재\* · 신 종 호\*\* · 전 준 수\*\*\*  
Lee, Myung Jae · Shin, Jong Ho · Chon, Chun Su

### Abstract

This study examines the characteristics of soil behavior which includes many uncertainties in seismic design, evaluates the dynamic soil properties and studies the soil-structure interaction to generalize the applicability and economy of the available sites.

An example analysis is performed for soil-structure system response assuming a containment structure built on site which includes soil layers using both elastic halfspace analysis and FEM analysis against the seismic loads from the actual design. This exercise is performed as a part of the safety analysis and economic assessment of the nuclear power plant built on soils. It includes the preparation of computer program capable of incorporating large nonlinearity in the analysis, reasonable evaluation procedures to determine input soil data.

Nonlinear FEM analysis of Seed and Idriss model is found suitable for the accurate analysis of dynamic response of soils. Linear FEM analysis using dynamic soil properties at strain level obtained by one-dimensional seismic response, and elastic half-space analysis using dynamic soil properties at strain level under static loads are recommended to evaluate the dynamic soil properties.

### 요 지

본 연구는 내진설계시 많은 불확실성을 내포하는 지반의 거동특성을 규명하고, 적용대상지반의 확충 및 경제성 제고를 위하여 토사지반의 동적지반특성 평가 및 지반-구조물 거동 특성을 고찰하였다.

예제해석은 토사지반에 원전 containment 구조물이 설치된 경우를 가상하여 지진하중에 대한 지반-구조물 시스템의 거동을 반무한체해석과 유한요소해석으로 분석하였다. 이는 토사지반에 원전이 건설될 경우에 고려해야 할 안정성 및 경제성 분석의 일환으로 수행되었으며, 토사지반의 큰 비선형거동을 정확하게 해석에 반영하기 위한 해석 software와 지반입력 data의 합리적인 평가방안 등을 예제해석을 통하여 분석하였다.

\*정회원 · (주)대우엔지니어링 기술연구소 대리  
\*\*정회원 · 서울시 한강관리 사업소 시설과 계장  
\*\*\*정회원 · (주)대우엔지니어링 기술연구소 전무

예제해석결과를 종합해 볼 때 토사지반의 동적거동의 정확한 분석을 위하여 비선형 유한요소해석은 Seed & Idriss 모델이, 선형 유한요소해석은 지진하중에 대한 1차원 지반거동시 변형율에서의 동적지반 특성을 이용한 방법이, 반무한체해석은 정적하중시 변형율에서의 동적지반특성을 이용한 방법이 가장 합리적으로 동적지반특성을 평가하는 것으로 추천할 수 있다.

## 1. 서 론

원전이나 고층건물, 해양구조물, 댐과 같은 대형 구조물은 지진하중에 대한 거동을 보다 정확하게 해석하기 위해 지반-구조물 상호작용을 고려해야 하나, 지반의 3차원성과 무한성, 비균질성, 비선형성 등으로 인해 지반-구조물 상호작용의 정확한 해석은 매우 어렵다. 따라서 해석의 정확도를 높이기 위해서는 깊이에 따른 지반특성 변화, 지반의 비선형성 및 에너지 소산특성을 효과적으로 처리할 수 있어야 한다.

지반-구조물 상호작용해석에서 구조물의 강성 및 질량은 재료의 물리적 특성으로부터 비교적 쉽게 구하고 구조물의 감쇠는 강성과 질량행렬로 정의되는 시스템 특성으로부터 근사적으로 결정해야 하나, 기존의 여러가지 방법이 제안되어 있고 또한 지반에 비해 상대적으로 감쇠량이 적으므로 실제적으로 구조물의 강성, 질량과 감쇠특성을 정의하는 것은 지반보다 훨씬 정확한 수준에 있다. 그러나 지반의 강성과 감쇠는 수학적 표현방법, 풀이방법, 강성 및 감쇠크기의 적절한 산정 등에 어려움이 따른다. 특히, 지반-구조물 상호작용 해석의 경우에 전체 시스템의 coupling 효과 및 풀이방법에 따른 제한, 감쇠의 수학적 표현 등이 고려되어야 하며, 더불어 지반의 비선형성으로 인한 강성과 감쇠의 변화량을 산정하여야 한다. 이와 같이, 지반-구조물 상호작용 해석시 동적지반특성의 적용은 수학적 표현방법과 정량적인 강성 및 감쇠비의 산정이 어려우므로 동적지반특성의 타당한 공학적 평가가 요구된다.

본 연구에서는 토사와 암반을 포함하는 지반과 여기에 설치된 원전 containment 구조물의 지진하중에 대한 상호작용해석 예제를 통하여 동적지반특성이 지반-구조물 시스템의 동적거동에 미치는 영향분석을 실시하고 이를 바탕으로 동적지반특성을 지반-구조물 상호작용해석에 적합한 입력 data로 변환시키는 과정 및 실제 해석과정을 정립한다.

## 2. 동적지반특성의 평가

### 2.1 동적지반특성의 평가

동적지반특성의 평가는 “지반의 동적거동을 정의 하는데 필요한 지반의 동역학적 성질을 조사하여 동적거동해석의 입력치로 변화시키는 과정”이다. 동적거동해석의 입력치는 해석 scheme에 따른 수학적 표현방식에 합당해야 할 뿐만 아니라 지반거동을 정확하게 나타낼 수 있는 값이어야 하는데, 비선형해석에서는 변형율의 함수인 동적전단계수, 감쇠비로 동적지반특성의 비선형을 표현하고 탄성 해석인 경우는 지반전체의 동적지반특성을 하나의 대표상수로 나타내야 한다. 이와 같이 동적지반특성을 평가한다는 것은 시험자료로부터 해석의 입력치 결정이라는 단순한 차원을 넘어 해석을 염두해 두고 필요한 입력치를 미리 고려하여 지반조건 설정, 시험방법의 선택, 시험실시, 시험결과 분석, 해석의 입력치로의 변환에 이르는 대상부지의 동적거동특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 값을 결정하는 일관성 있는 합리적인 공학적 판단과정 전부를 의미한다.

본 고에서는 지반이상화 과정, 지반의 동적전단계수, 지반감쇠 등이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향을 parameter study를 통하여 분석하며, 그림 1에 본 연구의 예제해석에 이용되는 지반-구조물 상호작용해석의 흐름도를 나타내었다. 지반의 동적응력-변형모델은 Seed-Idriss, Hardin-Drnevich 柴田-Soelarno, Bi-Linear 관계식 등 4개의 비선형 모델과 미소변형율에서의 동적지반특성, 지반내 응력상태를 고려한 동적지반특성을 이용한 2개의 선형모델로 각각 표현되며, 각 동적응력-변형모델을 지반-구조물 상호작용해석에 적용하여 그 결과를 비교, 검토한다. 지반-구조물 시스템의 동적거동은 유한요소해석과 반무한체해석을 이용한다. 유한요소해석은 지진하중시 지반의 유효전단변형율에 따라 각 단계마다 등가선형해석을 통하여 수행되므로 변형율에 따른 동적전단계수

와 감쇠비의 해석에의 적용과정을 고찰한다. 반무한 체해석은 최대 동적전단계수를 이용한 경우, 정적하중 상태에서 구한 지반변형을 혹은 1차원 파전파 이론으로 산정한 지반 유효 전단변형률에 따라 대표 동적전단계수를 구하는 경우의 해석결과를 비교고찰하여 적절한 impedance 산정방법을 검토한다.

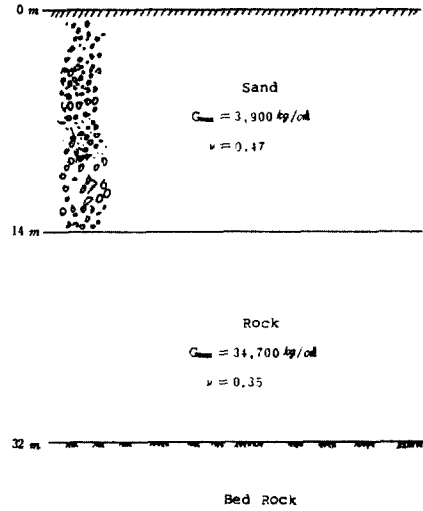


그림 2 해석에 적용을 위한 지반 이상화

따라서, 대표시험부지는 0~14m의 토사구간을 4개의 비선형모델로 14~32m의 암반구간을 1개의 비선형모델로 표현하는 4가지 경우로 지반이 모델링되었다. 여기서 모델링에 포함되지 않는 32m 이하의 지반은 기저암반 (bedrock) 으로 표현되며 해석시에는 강제로 고려한다.

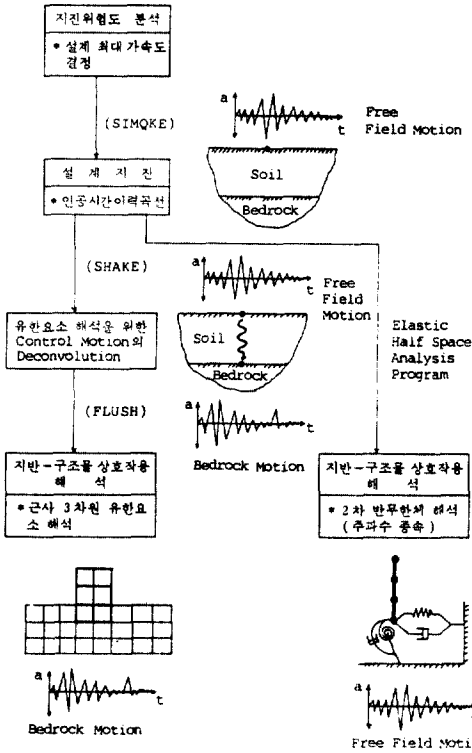


그림 1. 지반-구조물 상호작용해석의 흐름도

### 2.2 변형률에 따른 동적지반특성

예제해석에 적용할 지반은 그림 2에 나타낸 바와 같이 토사와 암반을 포함하며, 0~14m에 걸쳐 분포하는 토사는 최대 동적전단계수가 3,900kg/cm<sup>2</sup>, 포아슨비가 0.47이며, 동적지반특성의 변형률에 따른 변화특성은 그림 3에 보인바와 같이 4개의 비선형 모델로 표현하였다. 14~32m에 걸쳐 분포하는 암반은 최대 동적전단계수가 34,700kg/cm<sup>2</sup>, 포아슨비가 0.35이다. 일반적으로 암반은 미소변형률에서의 동적지반특성을 이용한 선형해석을 수행하나, 여기서는 Seed-Idriss (1970)가 제안한 암반의 동적지반특성 곡선 그림4를 이용하였다.

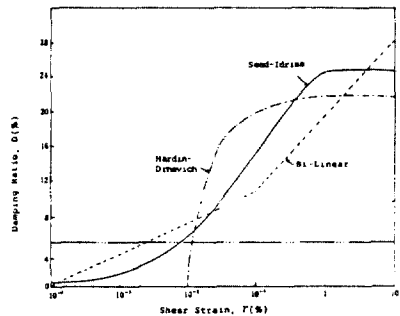
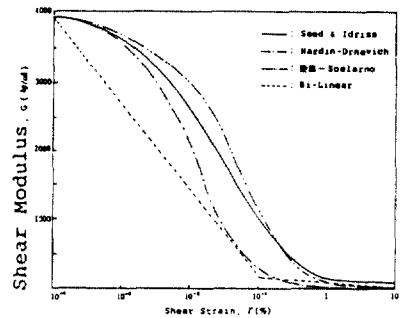


그림 3. 토사(0~14m)의 동적지반특성

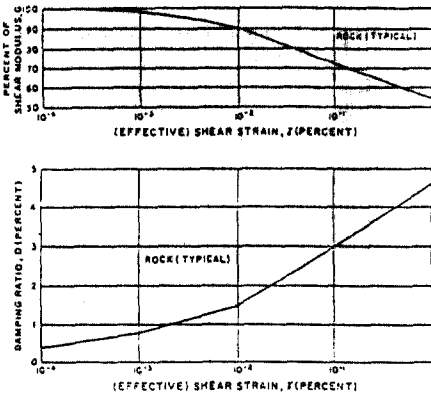


그림 4. 암반(14~32m)의 동적지반특성

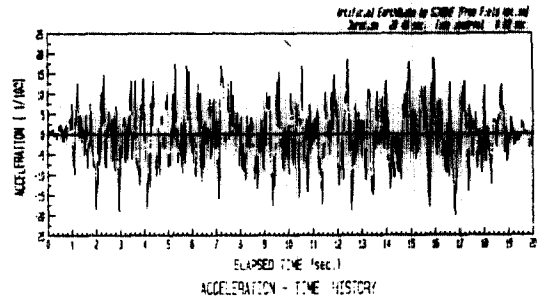


그림 5. 설계 가속도시간이력곡선 (Ground Acceleration)

### 3. 지반의 동적거동

#### 3.1 입력운동의 결정

예제해석에 사용된 수평입력운동은 국내원전의 내진 1급 구조물의 설계응답스펙트럼에 사용된 바 있는 여러지진을 지반과 무관하게 통계처리하여 만든 US Reg. Guide 1. 60의 "Design response spectra for seismic design of nuclear power plants"로 설계최대가속도는 0.2g이다. 또, 입력운동을 시간이력으로 변환시키기 위해서 인공지진과 발생기법을 이용하여 그림 5에 나타낸 설계 가속도시간이력을 선정하였으며 지속시간은 20sec이다. 이 설계가속도시간이력이 free field motion으로 반무한체해석의 수평입력운동에 이용되며, 이 이력곡선을 응답스펙트럼으로 변환한 것이 그림 6이다.

유한요소해석의 입력운동은 1차원 파전파 지반해석을 이용하여 free field motion을 기저암반의 bedrock motion으로 deconvolution하여 구한다. 여기서는 0~14m의 토사와 14~32m의 암반으로 구성된 지반이 각각 Seed-Idriss곡선을 이용한 비선형 모델로 표현되었으며 이때 지표에 free field motion을 가하여 32m의 기저암반에서 구한 bedrock motion을 유한요소해석의 수평입력운동으로 사용한다.

#### 3.2 동적지반거동 분석

지반은 0~14m의 토사구간을 Seed-Idriss, Hardin-Drnevich, 柴田-Soelarno, Bi-Liner 등 4개의 비선형 모델, 14~32m의 암반구간을 Seed-Idriss를 이용한 비선형 모델로 표현한 총 4가지의 비선형모델로 지반을 이상화하였고, 미소변

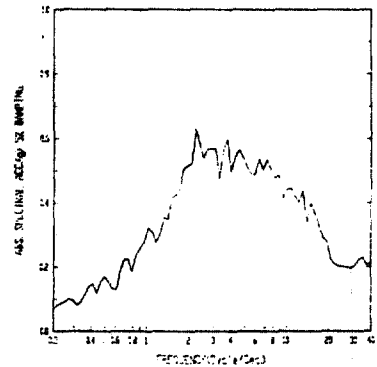


그림 6. 입력운동의 응답스펙트럼(5%감쇠)-Free Field Motion

형율에서의 동적거동특성을 이용한 선형모델로 지반을 이상화한 경우를 포함하여 모두 5가지의 지반모델링을 대상으로 지반의 동적거동해석을 수행한다. 앞에서 구한 free field motion을 지표에 가하여, 1차원 파전파 이론에 근거한 기저암반에서의 bedrock motion을 산정하고, 이때 지반의 응력상태 전단변형율, 동적전단계수, 감쇠비 등을 그림 7에 수록했다.

비선형성이 큰 0~14m 구간의 토사의 동적거동은 지진하중시 깊이에 따라 전단응력이 커지며 이로 인해 전단변형율이 깊이에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그림 7에 나타낸 것과 같이 0~14m의 토사를 하나의 모델로 표현했을 때 미소변형율에서의 동적지반특성은 동일하지만 지진하중으로 인한 전단변형율에 따라 각 비선형모델의 동적지반특성이 변화하며, 전단변형율이 증가함에 따라 동적전단계수는 감소, 감쇠비는 증가한다. 또한, 전단변형

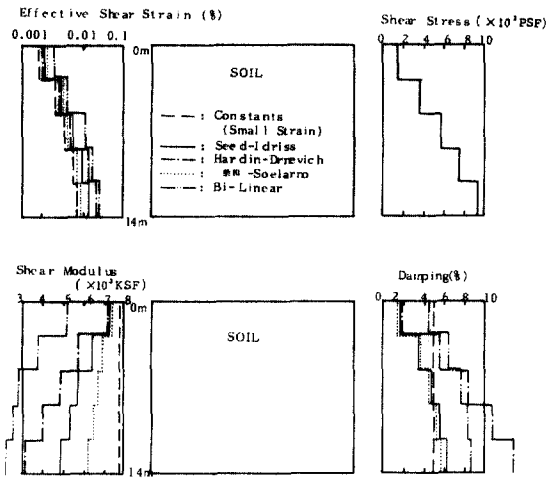


그림 7. 지진하중시 지반거동 및 동적지반특성

율이 커질수록 각 모델의 동적지반특성의 차이가 커져 동적전단계수는 Bi-Linear 모델이 최하치를 보이며, 감쇠비는 Hardin-Drnevich 모델이 최고치를 나타낸다.

#### 4. 지반-구조물 상호작용해석

##### 4.1 운동방정식

본 예제해석은 주파수영역에서 uncoupled된 선형방정식을 풀이하므로 주파수 종속특성을 해석에 반영할 수 있고, 반복해석인 등가선형해석으로 비선형성을 해석에 반영한다.

##### (1) 유한요소해석

유한요소해석에서의 지반감쇠는 지반의 재료감쇠로 고려하며 재료감쇠 후에도 남은 손실 에너지는 경계에서 발산감쇠로 처리한다. 주파수 영역의 해석인 경우에 재료감쇠는 복소강성행렬의 허수부로, 발산감쇠는 경계조건으로 고려하며, 지반-구조물 시스템에 지진하중이 가해졌을때 운동방정식은 아래와 같이 구성한다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K^*]\{U\} = -\{m\}\ddot{Y} - \{V\} + \{F\} - \{T\}$$

여기서,

$[M]$  = 시스템의 질량행렬

$[K^*]$  = 시스템의 복소 강성행렬

$\{\ddot{U}\}$  = 상대 가속도의 행벡터

$\{U\}$  = 상대 변위의 행벡터

$\{m\}\ddot{Y}$  = 지진하중

$\{Y\}$  = 지반 가속도의 행벡터

$\{m\}$  = 지진방향과 절점의 같은 방향 자유도만

$[M]$ 과 같고 나머지가 zero인 질량행렬

$\{V\}$  = 점성경계(viscous boundary)에 작용하는 힘

$\{F\}$  = 각 slice의 끝에 작용하는 힘

$\{T\}$  = Transmitting boundary에 작용하는 힘

복소강성행렬  $[K^*] \approx K[1 + i2\beta]$ 의 허수부는 재료감쇠로서  $\beta$ 는 지반의 감쇠비를 대입하게 되는데 앞절에서 구한 변형율에 따라 대응하는 감쇠비를 대입하여 변형율 증가에 따라 감쇠의 증가특성을 고려하게 된다.

##### (2) 반무한체해석

반무한체해석은 지반을 spring과 dashpot으로 모델링하여 동적거동특성을 표현하는 방법으로, 질량없는 원형강체판이 지반을 spring과 dashpot으로 표현한 시스템에 놓여 있을때 수평 및 회전 조화응답은 coupled 효과를 무시하고 수평 및 회전 변위를 독립으로 가정하면 아래식으로 산정된다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_1 + ia_0c_1)K_x & 0 \\ 0 & (k_2 + ia_0c_2)K\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix}$$

여기서,

$$K_x = \frac{8Gr_0}{2-\nu}, \quad a_0 = \text{무차원 주파수계수} = \frac{\omega r_0}{V_s}$$

$$K\phi = \frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}, \quad k_1 \text{ \& } k_2 = \text{강성계수}$$

$G$  = 지반의 동적전단계수,  $C_1$  &  $C_2$  = 감쇠계수

$r_0$  = 기초반경

$\nu$  = 지반의 Poisson비

##### 4.2 지반-구조물 모델링

본 응용연구의 예제구조물은 원자력 발전소 containment로, 구조물특성, 매입효과, 기초현상, 해석방법상의 차이 등을 가급적 줄이고 동적지반특성의 영향성을 평가하기 위하여 반무한체해석과 유한요소해석의 구조물을 동일한 집중질량모델로 모형화했다. 해석구조물은 그림 8(a)에 나타난 높이 68.67m, 기초반경 23m의 원자력발전소 격납용기 구조물로서 그림 8(b)에 나타난 바와 같이 구조물은 외부 containment를 7절점, 내부구조물을 4절점 2차원 stick모델로, 지반은 수평 및 회전방향의 impedance로 각각 모델링하였다.

유한요소해석의 경우에 구조물은 반무한체해석과 동일하고 지반은 0~14m의 토사, 14~32m의

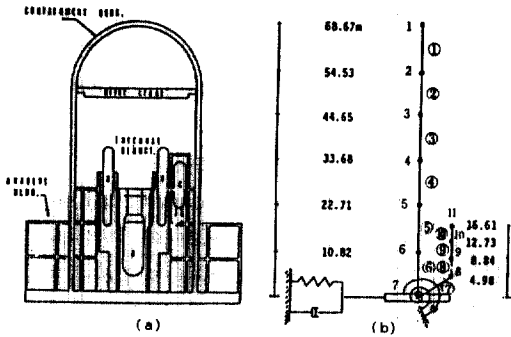


그림 8. 원전 격납구조물의 단면 및 모델링

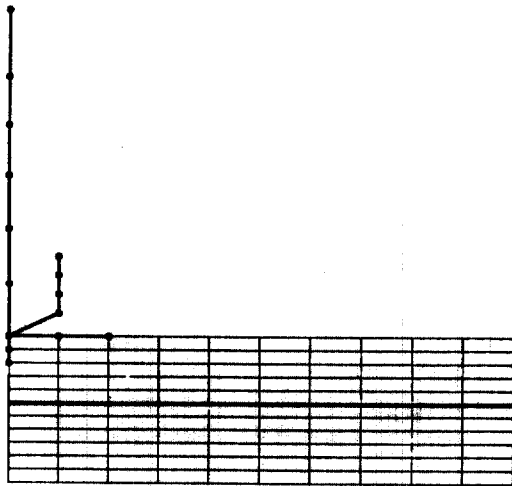


그림 9. 지반-구조물 시스템 유한요소 모델링

압반으로 구성된 상태로 지반-구조물 시스템을 모델링했다. 그림 9에 나타난 바와같이 지반은 구조물 직경이 3배정도 폭을 포함하도록 모델링하였고, 지반은 각각 높은 2.9m, 폭 11.6m인 110개의 평면요소로 모형화하였다.

(1) 반무한체해석

반무한체해석은 능적지반특성이 SSI 해석에 미치는 영향을 평가하고 동적지반특성의 합리적인 평가 및 적절한 impedance 산정방법을 제시하기 위하여 표 1에 나타난 바와같이 동적전단계수와 감쇠비 산정에 따른 불확실성 및 영향요인 등의 평가, 정적하중으로 인한 지반의 전단변형율을 고려한 동적지반특성의 타당성등을 SSI 해석의 고려대상으로 한다.

Impedance 산정시 적절한 동적전단계수의 적용을 위하여, 미소변형율에서의 동적전단계수를 설계

치로 이용하는 경우(모델 A), 원전구조물의 내진해석규준인 ASCE standard (1986)에서 제안한 SSI 해석의 불확실성을 해석에 고려하는 방법(모델 B, C), 정적하중 상태의 지반변형율에서의 동적지반특성을 이용하여 impedance를 산정하는 경우(모델 H) 등을 해석 case로 한다. 지반감쇠특성의 SSI 해석에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지반의 재료감쇠의 변화(모델 A, 모델 D, 모델 E, 모델 F, 모델 G)에 따른 지반-구조물 시스템의 거동차이를 분석한다. 지반의 impedance는 Richart(1970)에 수록된 원형기초의 impedance식을 이용하고, 주파수종속특성은 앞 절에 수록한 강성계수 및 감쇠계수로 고려한다.

표 1. 반무한체해석의 지반모델링

방	법	모델이름	동적전단계수	재료감쇠비
동적전단계수의 불확실성 고려	모델 A		$G_{max}$	5%
	모델 B		$G_{max}(1+C_v)^*$	5%
	모델 C		$G_{max}/(1+C_v)^*$	5%
지반감쇠의 영향성	모델 D		$G_{max}$	0%
	모델 E		$G_{max}$	10%
	모델 F		$G_{max}$	15%
	모델 G		$G_{max}$	20%
정적하중상태의 변형율에 따른 동적지반특성	모델 H		$G^*$	5%

(주) \*: SSI해석의 불확실성을 고려하기 위해 불확실성계수를 고려하여 동적지반특성 산정 (ASCE Standard, 1986),  
 $\rightarrow \frac{X}{1+C_v}(1+C_v)$ , 여기서  $C_v=0.5$ .

\*\* : 정적하중상태의 지반변형율을 고려하여  $G=2000\text{kg/cm}^2$ 를 적용.

(2) 유한요소해석

유한요소해석에서는 동적지반특성의 SSI 해석에의 구현과정 및 동적지반특성이 SSI 해석에 미치는 영향을 평가하고 적절한 선형 및 비선형 동적지반특성 산정방법을 제시하기 위하여 4개의 비선형모델과 3개의 선형모델로 지반을 모델링하여 SSI 해석을 수행한다. 지진하중시 지반의 비선형거동을 SSI 해석에 적절히 고려하기 위하여 변형율의 함수로 표현된 동적전단계수 및 감쇠비를 SSI 해석의 지반 동적응력-변형모델로 적용한다.

표 2에 나타난 바와 같이 토사는 Seed-Idriss 모델(모델 1), Hardin-Drnevich 모델(모델 2), 柴田-Soelarno 모델(모델 3)과 Bi-Linear 모델(모델 4)로 지반의 비선형성을 해석에 구현하고 암반은 Seed-Idriss 모델로 비선형성을 고려한다. 지반의 비선형거동을 해석에 적절히 고려하고 해석을 간략화하기 위하여 동적지반특성을 근사적인 단일상수로 나타내는 등가선형해석은 미소변형율에서 동적지반특성을 이용한 선형모델(모델 5), 구조물이 설치되었을 때 정적하중으로 인한 지반변형율에서의 동적지반특성을 이용한 선형모델(모델 6), 지표에서의 free field motion 을 기저암반의 bedrock motion으로 deconvolution 하는 1차원 동적지반거동해석으로 구한 지반변형율에서의 동적지반특성을 이용한 선형모델(모델 7) 등으로 구성한다.

표 2 유한요소해석의 지반모델링

종 류	모델이름	지 반 모 델 링	
		토사(0-14m)	암반(14-32m)
비선형모델	모델1	Seed-Idriss	Seed-Idriss
	모델2	Hardin-Drnevich	"
	모델3	柴田-Soelarno	"
	모델4	Bi-Linear	"
선형모델	모델5	미소변형율에서의 동적지반특성	미소변형율에서의 동적지반특성
	모델6	정적하중으로 인한 변형율에서의 동적지반특성	정적하중으로 인한 변형율에서의 동적지반특성
	모델7	1차원 동적지반거동해석으로 구한 변형율에서의 동적지반특성	1차원 동적지반거동해석으로 구한 변형율에서의 동적지반특성

#### 4.3 해석결과와의 비교·검토

##### (1) 동적지반특성 평가에 따른 영향

동적지반특성이 지반-구조물 시스템의 동적거동에 미치는 영향을 검토하고, 적절한 공학적 평가가정을 제시하기 위하여 앞절의 대표시험 및 평가과정에서 산정한 4개의 비선형 모델 및 3개의 선형 모델을 각각 해석에 적용하고 그 결과를 비교·검토한다. 그림 10은 유한요소해석을 이용한 4개의 비선형모델의 해석결과로, 모델 1, 3은 응답의 주파수 성분이 비슷하고 모델 2, 4의 응답은 상대적으로

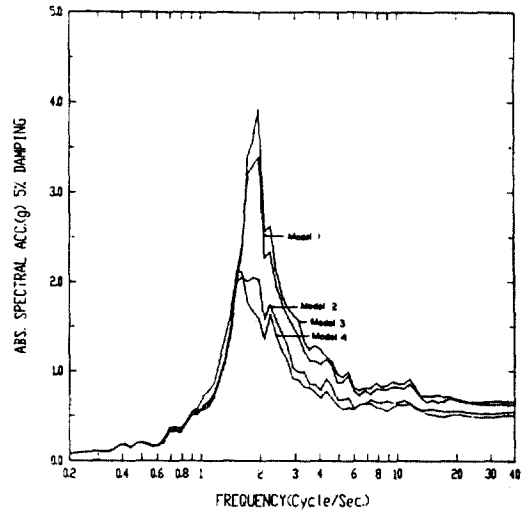


그림 10. 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델1, 2, 3, 4)

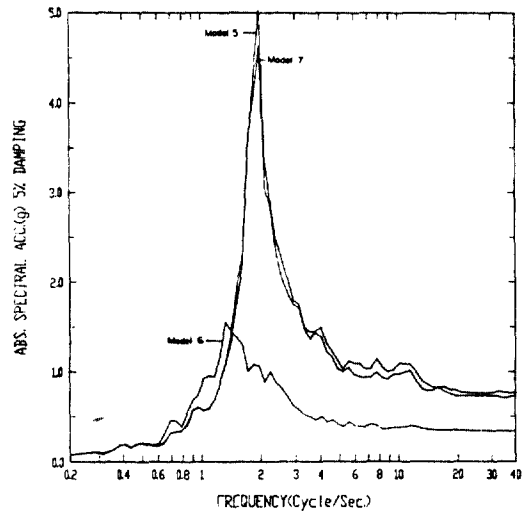


그림 11. 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 5, 6, 7)

로 저주파수에 최대응답이 위치한다. 또한, 응답의 크기는 모델 3이 가장 크고, 모델 4가 가장 적다. 그러므로, Seed-Idriss곡선으로 동적지반 특성의 비선형성을 해석에 적용하는 경우가 Hardin-Drnevich, 柴田-Soelarno, Bi-Linear의 해석결과와의 중간값 정도의 경향을 보이며, Bi-Linear 모델이 상대적으로 가장 낮은 동적응답특성을 보인다.

그림 11은 유한요소해석을 이용한 3개의 선형모델의 해석결과로 모델 5는 응답이 크고, 상대적으로

로 최대응답이 고주파수에 위치하나, 모델 6은 응답이 작고 최대응답이 상대적으로 저주파수에 위치한다. 모델 5는 미소변형률에서의 동적지반특성을 해석에 적용한 경우이고, 모델 6은 정적변형률에서의 동적지반특성을 해석에 적용한 경우로서 동적지반특성의 평가에 따라 해석에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

반무한체해석에서는 SSI의 불확실성을 고려하기 위하여 동적전단계수의 크기를 변형시켜 해석에 적용하였으며, 그림 12에 보인 바와 같이 동적전단계

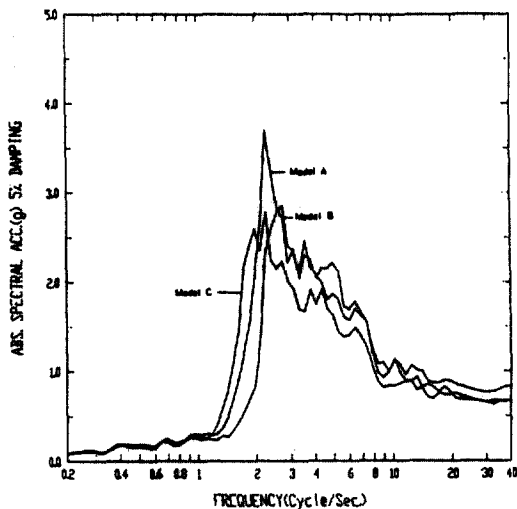


그림 12 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 A, B, C)

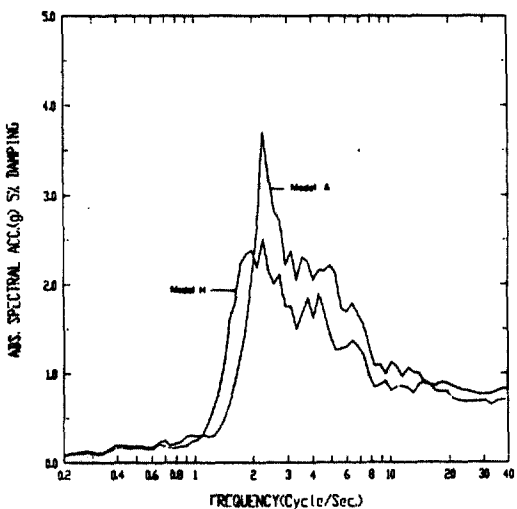


그림 13 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 A, H)

수가 작아질수록 최대응답이 저주파수쪽으로 이동한다. 그림 13은 미소변형률에서의 동적지반특성과 정적하중 상태의 변형률에서의 동적지반특성을 이용하여 각각 해석에 적용한 경우로, 일반적으로 정적하중상태의 변형률이 지진시 지반변형률과 상관성은 없으나 미소변형률보다는 정적하중상태의 변형률이 지진변형률에 근사하므로 실제지반의 용력조건을 좀 더 유사화한다.

(2) 지반조건에 따른 영향

지반의 재료감쇠가 해석에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 해석 scheme 및 감쇠의 수학적 표현 방법에 대한 평가가 선행되어야 하지만 본 예제해석에 이용한 유한요소해석의 비선형모델은 동적전단계수와 감쇠비가 동시에 한 모델에 적용되므로 감쇠만의 영향을 분석하기 어렵다. 그러므로, 여기서는 같은 해석 scheme을 이용한 반무한체해석 결과로부터 지반의 재료감쇠가 해석에 미치는 영향을 분석한다. 그림 14는 지반의 재료감쇠 변화에 따른 구조물 top의 응답스펙트럼으로 재료감쇠의 증가에 따른 주파수특성의 변화없이 응답의 크기만 감소한다.

(3) 선형/비선형 해석

유한요소해석에서의 경우에 지반의 비선형성을 고려한 비선형모델과 여러가지 평가 방법에 의한 등가선형모델의 해석결과를 비교하여, 타당한 동적지반특성의 평가 및 합리적인 대표치 산정과정은

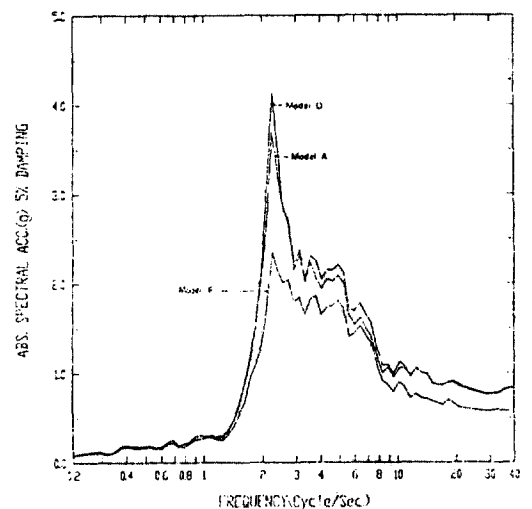


그림 14 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 A, D, F)



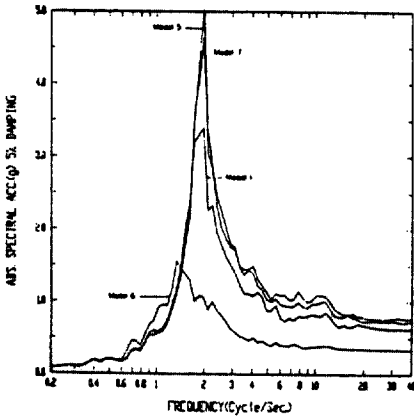


그림 15. 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 1, 5, 6, 7)

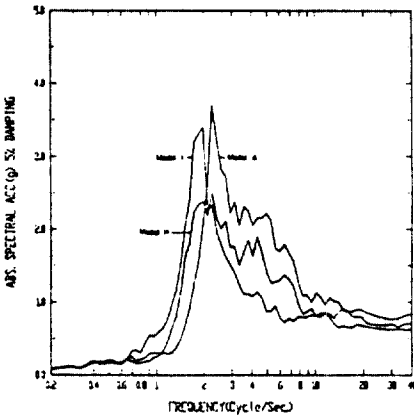


그림 16. 구조물 Top의 응답스펙트럼(모델 1, A, H)

추정한다. 그림 15는 Seed-Idriss 비선형모델(모델 1)과 평가방법에 따라 다른 동적지반특성을 이용한 3개의 선형모델(모델 5, 6, 7)의 해석결과를 나타냈다. 지반의 비선형거동을 근사화한 선형해석은 방법에 따라 다르나, 비선형거동과 상당한 차이가 있고 실제적으로 적절한 등가선형 대표치를 산정하는 것은 상당히 많은 공학적 판단을 요구한다. 그림 16은 유한요소해석의 비선형모델(모델 1)과 반무한체해석의 모델 A, H를 비교한 것으로, 모델 A는 미소변형율에서의 동적지반특성, 모델 H는 정적하중상태의 변형율에서의 동적지반특성을 대표치로 사용한 것이다. 정적하중상태의 변형율에서의 동적지반특성을 이용한 반무한체 해석결과가 비선형 유한요소해석결과에 좀 더 근접한다.

## 5. 결 론

SSI 해석시 지반입력자료의 주된 고려사항은 지반변형율에 따른 동적지반특성 평가로써, 반무한체 해석은 미소변형율과 적정하중상태의 변형율을 근거로 동적전단계수를 결정하는 방법, 지반의 재료감쇠 특성이 미치는 영향을 평가대상으로 하였다. 유한요소해석은 4개의 비선형 구성방정식으로 지반을 모델링한 경우와 변형율에 따라 동적지반특성을 선택한 선형해석의 경우를 택해 동적지반특성이 SSI 해석에 미치는 영향을 분석했으며, 다음과 같은 결론이 유도되었다.

(1) 반무한체해석 결과는 비선형 유한요소해석 결과에 비해 상대적으로 고주파수에서 최대응답이 발생하며, 미소변형율에서의 동적지반특성을 이용한 방법보다 정적하중시 변형율에서의 동적지반특성을 이용한 방법이 유한요소해석 결과에 접근한다. 또 지반의 재료감쇠가 증가하면 응답특성의 변화없이 응답크기만 감소한다.

(2) 유한요소해석에서 지반의 비선형 구성방정식은 평가과정에서 구한 4가지 응력-변형모델로 해석에 적용하였는데, 이 중 Seed-Idriss모델을 이용한 해석의 응답특성 및 크기는 4가지 비선형 모델중 중간정도의 값을 나타냈다. 이 모델은 비선형 구성방정식에 필요한 parameter도 결정하기 쉽고, 가장 널리 이용되고 있는 모델이므로 토사지반의 비선형 동적거동해석에 적용하고자 할 때 가장 추천할 만한 방법이다. 한편 柴田-Soelarno 모델도 비슷한 결과를 나타냈다.

(3) 선형 구성방정식을 이용한 유한요소해석결과와 비선형 해석 결과와 응답크기에서 차이를 보이며, 응답특성은 비슷하다. 이 중에서 지진하중시 1차원 지반거동해석에서 구한 지반변형율에서의 동적지반특성을 이용한 방법이 비선형해석 결과에 가장 근접한다.

(4) SSI 해석에 중요한 영향을 미치는 요소는 지반강성과 구조물의 강성비, 구조물의 세장비, 지반과 구조물의 질량비, 지반의 포아슨비, 지반과 구조물의 재료감쇠, 토사깊이와 기초직경비 등이나, 본 연구에서는 지반특성이 해석에 미치는 영향만을 평가대상으로 하였으므로, 토사지반에 설치된 지반-구조물 시스템의 정확한 동적거동해석을 위해서는

상기 요인을 모두 고려한 parameter study가 동반되어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)대우엔지니어링과 한국전력공사의 공동연구과제인 “동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구” 결과의 일부이며 연구에 협조를 아끼지 않으신 한국전력공사 토건연구실의 최종범 실장, 이광주 부장, 이종립 과장께 심심한 사의를 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. ASCE Standard, “Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures”, ASCE, New York, USA., 1986.
2. Idriss, I.M., Kausel, E., Kennedy, R.P., Lysmer, J., Agrawal, P.K., Seed, H.B., Hadjian, A.H. and Whitman, R.V., “Analyses for Soil-Structure Interaction Effects for Nuclear Power Plants”, Report by the Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction of the Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of ASCE, Technical Publications, ASCE, New York, USA., 1979.
3. Idriss, I.M. and Seed, H.B., “Seismic Response of Horizontal Soil Layers,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol, 94, SM4, July 1968, pp. 1003-1031.
4. Kausel, E., and Roesset, J.M., “Dynamic Stiffness of Circular Foundations,” *Jour. of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol 101, No, EM 6, Dec. 1975, pp. 771-785.
5. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C-F., and Seed, H. B., “FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems,” *Earthquake Engineering Reserch Center*, Uneversity of California, Berkeley, Report No, EERC 75-30, November 1975.
6. Richart, F.E., Jr. Hall, J.R., Jr. and Woods, R.D., “Vibrations of Soils and Foundations”, Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J., 1970, 414 pp.
7. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., “SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response analysis of Horizontally Layered Sites,” *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72-12, 1972.
8. Tsai, N.C., “Modal Damping for Soil-Structure Interaction,” *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. EM 2, 1974.
9. 한국전력공사, “원자력 발전소 표준화 설계를 위한 조사용역” 1987. 8.
10. 한국전력공사, “동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구”, 1989. 2.

(接受 : 1990. 2. 27)