

# 반지하구조물 내진설계를 위한 지반거동

Input Ground Motion for the Seismic Analysis of Embedded Structures

김 용 석\*  
Kim, Yong Seok

## 요 약

최근 구조물과 지반간의 상호작용이 원자력 발전시설, 해상구조물, 기계기초등에 대한 내진설계시 매우 중요하다는 것이 일반화되고 있다. 그러나 지금까지 구조물 내진설계시 이러한 구조물이나 지반의 특성이 무시됐었다. 내진설계상 구조물 밑에 있는 지반에 의한 세가지 주된 영향은 Soil Amplification, Kinematic Interaction과 Inertial Interaction이다. 이 논문에서는 반지하구조물 내진설계시 필요한 지반거동을 Soil Amplification과 Kinematic Interaction을 고려하여 구하였다며, 1971년 San Fernando 지진 기록으로부터 그 특성을 실제적으로 입증하였다.

## Abstract

The Structure-Soil Interaction(SSI) is recognized to be important in the seismic analysis of nuclear power plants, offshore structures, machine foundations and etc. Seismic analyses of structures were, however, performed neglecting the characteristics of the structure and the properties of the underlying soil in the past. The main three effects of the underlying soil are soil amplification, kinematic interaction and inertial interaction in the seismic analysis. In this study, the input ground motion for the seismic analysis of the embedded structures was determined considering soil amplification and kinematic interaction, and its characteristic were also practically verified analyzing the data of the 1971 San Fernando Earthquake.

## 1. 서론

최근에 구조물의 동적해석에서 구조물과 지반의 상호작용(Structure-Soil Interaction: SSI)에 대한 인식이 높아가고 있으며, 앞으로 우리나라에서도 구조물의 내진설계가 요구되고 있기 때문에 SSI에 대한 관심은 더욱 고조되고 있다. 특히 원자력 발전시설, 해상구조물, 기계기초 및 대

형 탱크기초등 중요시설의 내진설계를 위해서는 구조물과 지반사이의 복잡한 Interaction을 보다 정확하게 이해해야만 한다. 최근까지도 구조물의 동적해석을 구조물 특성이나 지반 상태를 무시한채 구조물이 견고한 기초위에 세워진 것처럼 가정하고 수행하였으나 지난 수년간의 연구결과에 따르면 구조물의 동적거동이 SSI에 크

\* 정회원, (주)대우엔지ニア링, 공학박사

□ 이논문에 대한 토론은 1989년 3월31일까지 본학회에 보내주시면, 그결과를 1989년 9월호에 게재하겠습니다.

게 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 미국 ATC에서도 구조물의 내진설계를 위한 전단력 계산시 토질상태에 따라 서로 다른 횡적계수를 사용하도록 권하고 있다.

구조물의 내진설계에서 지반이 구조물의 거동에 미치는 주된 세가지 영향으로는 Soil에 의한 지진파의 증폭(Soil Amplification), 구조물의 기초의 형상과 지진파의 종류에 따라 생기는 Kinematic Interaction 및 구조물의 관성때문에 유발되는 Inertial Interaction이 있다. 이 세가지 영향중 지반조간과 구조물 거동이 상호 영향을 미치는 Kinematic Interaction과 Inertial Interaction을 일컬어 SSI라고 한다.

- Soil Amplification이란 구조물이 세워지지 않은 상태에서 지표면에서의 지반 거동이 지반의 성질에 따라 Bedrock에서의 지반거동과 그 크기 및 주파수내용을 달리하는 것을 말한다.

- Kinematic Interaction이란 구조물이 세워지지 않은 상태에서 Rigid한 기초저면(Fig.1 B점)에서의 지반거동과 지표면(Fig.1 C점)에서의 지반거동이 차이를 보이는 것을 말한다. 그 주된 차이는 Fig.1에서 보는 것처럼 고주파성분의 운동이 제거되는 것인데 수평진동의 경우에는 회전운동도 발생한다. Kinematic Interaction은 반지하구조물에서는 매우 중요하지만 지표면상에 위치한 구조물에서는 표면파를 고려하지 않을 경우에는 그 영향이 크지 않으므로 내진설계시 대개 무시된다. SSI연구에서 대개 지진파가 연직방향으로 전파되는 것으로 가정하는데, 기초밑

에 놓인 지반층이 상대적으로 견고한 지반층이나 암반위에 있을 때 표토층에서의 지진파의 전달속도가 상대적으로 작아지기 때문이다.

- Inertial Interaction이란 구조물이 세워진 후, 구조물의 관성력(Inertia Force)에 의해 기초저면에서 수직축력, 전단력 및 전도모멘트가 발생하여 기초저면에서의 운동이 영향을 받는 것을 말한다. (Fig.2) 특히 높이가 낮고 Stiff한 구조물이 연약한 지반위에 놓여 있을 때 Inertial Interaction에 의한 영향이 크다.

반지하구조물의 경우에 Soil Amplification, Kinematic Interaction과 Inertial Interaction 영향을 부연하면, Fig.3에서 A점과 B점의 지반거동이 Soil Amplification 현상때문에 다르며 (Fig.4), Rigid한 기초저면 C점에서의 지반거동이 Kinematic Interaction 때문에 점A나 점B에서 지반거동과 다르고 (Fig.9), 구조물이 세워진 후 구조물저면 D점에서 구조물의 거동이 Intertial Interaction 때문에 영향을 받는다.

SSI를 고려한 구조물의 내진설계는 Direct Approach와 Substructure Approach가 있는데, Substructure Approach를 이용할 경우에는 Structure-Soil Interaction을 보다 개념적으로 이해할 수 있고 그 결과를 보다 용이하게 살펴볼 수 있는 장점이 있지만 해석상 기초저면에서의 지반거동을 알아야 하는 복잡함도 있다. 본 논문에서는 Substructure Approach에 의한 반지하구조물(Embedded Structure)의 내진설계를 위해서 Soil Amplification 및 Kinematic Interaction 영향을 고려한 구조물

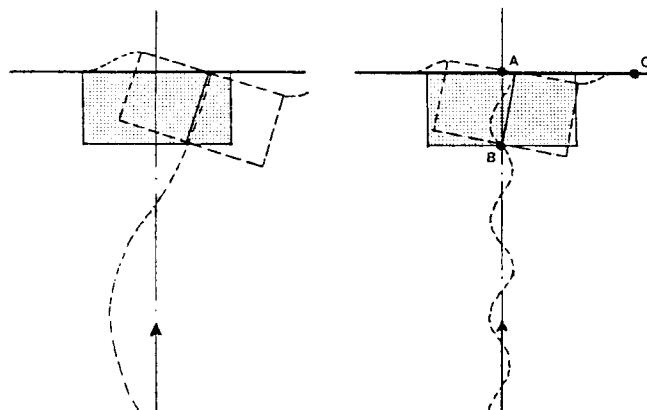


Fig. 1. Kinematic Interaction

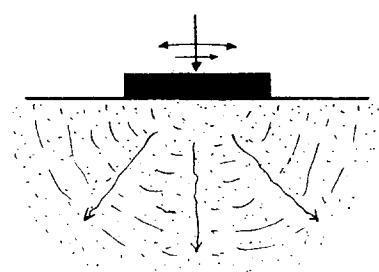


Fig. 2. Inertial Interaction

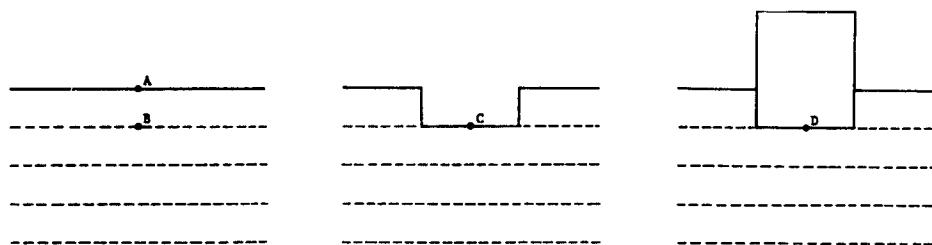


Fig. 3. Control Points

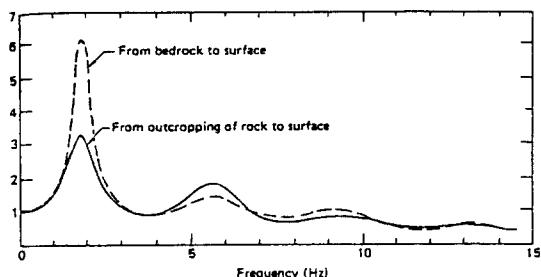


Fig. 4. Soil Amplification Functions

기초저면에서의 지반거동을 Deconvolution Process를 거치지 않고 직접 구할 수 있는 실용해법에 대해 알아 보았다. Deconvolution Process란 지표면에서 기록된 지반거동으로부터 지표면에서 어떤 깊이에 있는 Soil층에서의 지반거동을 추정하는 과정인데, Fig.5에서 보는 것처럼 고주파영역에서의 Amplitude가 발산하여 실제보다 Conservative 한 결과를 발생시킨다. 기초저면에서의 지반거동을 직접 구하는 실용해법은 Elsabee와 Morray(1977)에 의해 제안된 것인데, 기초저면에서 지반의 수평 및 회전거동을 지표면상의 수평거동에 대한 Transfer Function으로 나타낸 것으로 Fig.6에서처럼 표현하였다. 여기서  $f_0$ 는 기

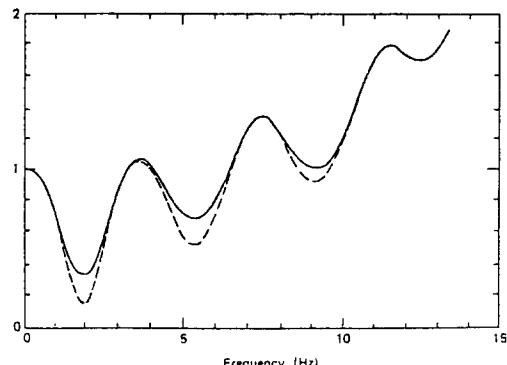


Fig. 5. Deconvolution Processed Functions

초저면까지 깊이가 E, Shear Wave 속도가  $C_s$ 인 지층의 고유주기로  $f_0 = C_s / 4E$ 이다.

그러나, 이 약산식은 통상 원자력 발전소설계에서 적용되는 Embedment Ratio(기초반경에 대한 기초저면까지 깊이의 비:  $E/R$ )가 대략 0.5~1.0인 경우를 기준으로 제안된 것인데, 본 연구에서는 Embedment Ratio가 이 범위를 벗어난 경우도 고려하여 이 식에 대한 일반식을 제안했으며, 1971년 발생한 San Ferando 지진기록을 이용 기초지반거동을 분석함으로써 이 식에 대한 타당성을 살펴보았다.

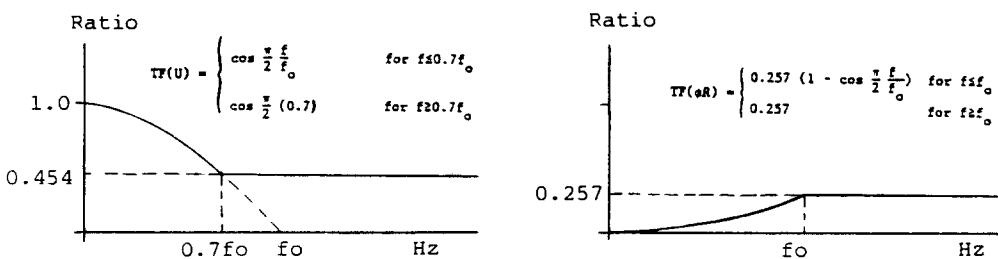


Fig. 6. Transfer Function of Swaying and Rocking Motion

## 2. System Modelling

SSI해석시 기초와 지반을 Modelling하는데 고려해야 하는 몇가지 문제점으로 2-D 또는 3-D Model의 선택, Bottom Boundary(Bedrock)위치 결정, Lateral Boundary의 종류와 위치결정, 유한요소 Mesh 크기결정등으로 들 수 있다.(Fig.7)

System Modelling시 2-D(Pseudo 3-D 포함) 또는 3-D Model의 선택은 System과 해석종류에 따라 달라지는데, 수직방향 진동해석시에는 Pseudo 3-D와 3-D Model에서 똑같은 결과를 얻을 수 있지만, 수평방향 진동해석시에는 두 Model사이에 차이를 보이며 3-D Model이 더 정확한 결과를 보여준다. 그러나 실제적으로 대개의 경우 지층이 유한하다고 가정할 수 있으며, Soil Damping이 깊이에 따라 증가하기 때문에 수평방향 해석시에도 Pseudo 3-D와 3-D 해석결과 차이는 10-20% 정도인 것으로 알려져 있다. 또한 Pseudo 3-D Modelling시 임의의 형상을 가진 기초를 통상 동일한 면적이나 회전모멘트 강성을 가진 원형기초로 Modelling하여 SSI 해석은 하는데 기초의 장면길이가 단변길이의 4배이하이면 해석결과에 커다란 영향이 없는 것으로 알려져 있다.

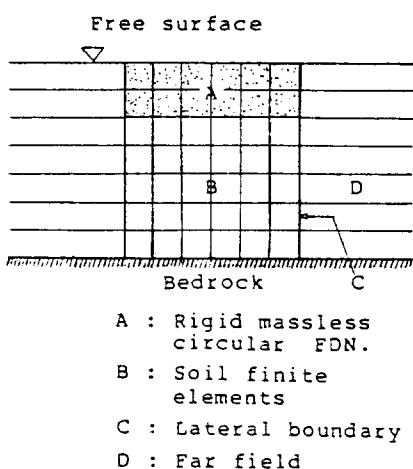


Fig. 7. Substructure Model

지반의 Bottom Boundary위치는 지반이 층을 이루고 있는 경우에는 지층간의 상대적 강성차

이가 현저하게(대략 10배 정도) 생기는 지층 사이에 선정하는 것이 실제적이고 합리적이지만, 지반강성이 각 층에서 균일하고 깊이따라 서서히 변하는 경우에는 Bottom Boundary위치결정이 어려우며 Half Space를 고려해야 하는 경우도 있다. 그러나 각 지층에서 5-10% 정도의 Damping이 예상될 때에는 Bottom Boundary를 기초반경의 2-4배보다 깊은 위치에 선정하면 Fig.8에서 보는 것처럼 약간의 변화는 있지만 평균적으로 Half Space결과를 잘 재현할 수 있다.

Far Field(Fig.7)를 대체하기 위한 Lateral Boundary에는 Viscouse Lateral Boundary와 Consistent Lateral Boundary가 있는데, Viscouse Boundary는 Structure-Soil System의 고유주파수가 지층의 고유주파수보다 클때에는 기초가장자리로 부터 기초반경의 5-10배(지반 내부 Damping에 따라 변하지만) 위치에 선정하는 것이 적합하며, Consistent Boundary는 선형해석 경우에는 기초 가장자리에, 비선형해석 경우에는 기초반경의 10-20배거리에 선정하면 타당하다.

Viscouse Boundary는 주파수에 따라 변하기 때문에 주파수 영역 해석에서는 Consistant Boundary를 사용한다.

유한요소법에 의한 Modelling 시 또 다른 문제점으로 유한요소 Mesh크기에 따라 SSI해석결과가 큰 차이를 보이는 것인데, Mesh크기는 대개 관심이 있는 가장 큰 Frequency파장의 1/6-1/8정도로 하면 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 기초에서 멀어짐에 따라 점차 증가할 수 있지만, Mesh크기가 너무 커지면 고주파영역에서 해석결과가 불규칙하게 변하기 때문에 유의해야 한다. 특히 Bottom Boundary와 Lateral Boundary가 기초에서 상당한 거리 떨어져야 할때에는 Mesh크기 결정에 매우 신중하여야 하며 Parametric Study를 통하여 얻고자하는 결과에 대한 영향을 미리 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Substructure Method에서 필수적인 기초저면에서의 입력지반거동을 구하기 위해서 Pseudo 3-D Model을 이용하여 Fig.7에서처럼 System을 원형기초, 기초주위 지층및 어느정도 깊이에 존재하는 암반층(또는 상대적으로

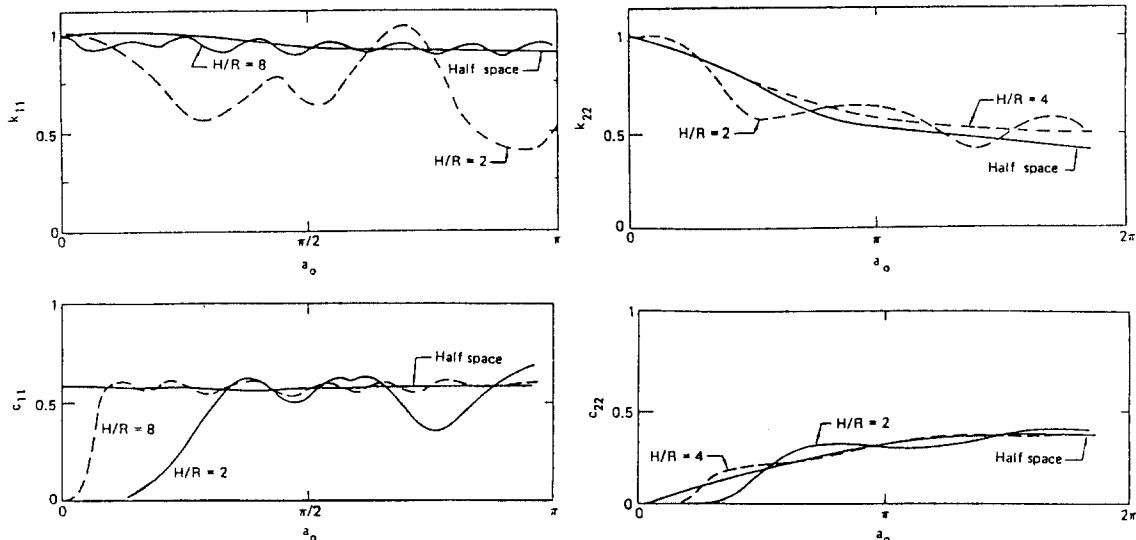


Fig. 8. Comparision of Solutions of Half Space and Finite Layer  
( $K_{11}, C_{11}$ ;  $K_{22}, C_{22}$ : 지반동적강성계수의 Real 및 Imag. Part)

단단한 지층)으로 구분하고, 기초주위의 지층은 다시 원형기초(A)밑의 원통형 지층(B)과 원통형 중심부분을 제외한 지층(D)으로 구분했으며, 또 원통형 기초주위의 지층은 깊이 방향으로 유한요소 층으로 분할하고, 원형기초와 기초밑 지층은 중심방향(Radial Direction)으로 세분하여 환형(Annulus) 유한요소로 모델화하였다. 층모델화한 Far Field(D)는 Analytical Method에 의해 구한 Consistant Lateral Boundary Matrix로 대체하였다. Boundary는 선형해석인 점을 고려하여 기초가장자리에 위치시켰다.

원형기초는 질량이 없고 지반에 비해 강성이 매우 크며, 암반층위 Soil Property는 선형이고 균질한 것으로 가정하였으며, Poisson비는 0.33, 지반의 내부 Hysteretic Damping은 0.05로 가정하였다.

기초저면에서의 지반거동에 대한 동적해석은 주파수영역(Frequency Domain)에서 수행하였으며, 각 주파수에서 지반의 수평방향거동과 회전방향거동을 구하였다. 기초의 강성이 지반에 비해 매우 크기 때문에 기초저면에서 수평방향변위는 실제적으로 거의 일정하며 수직방향변위는 중심축에서부터 선형으로 변하면서 기초가장자리에서 최대가 된다. 기초의 Rocking Motion은

기초가장자리에서의 수직변위를 기초반경으로 Normalizing함으로써 구하였으며, Kinematic Interaction을 고려한 기초의 수평및 Rocking Impedance Function은 기초저면가장자리에 단위수평및 수직변위를 가하여 구하였다.

### 3. FEM에 의한 지반거동분석

반지하구조물 기초저면에서의 지반거동과 기초의 Impedance Function을 구하기 위해 앞에서 논술한 Substructure Approach와 유한요소법을 이용하여 주파수영역 해석을 실시하였다. 경계조건으로는 중심축에서 수직변위가 구속되었으며, 지층 Bottom에서 수평방향으로 단위변위가 허용되었다. Stiffness Matrix는 유한요소법에 의해 중심축에서부터 기초가장자리로 Column에 따라 결합하면서 소거하여 Far Field에서 구해진 Lateral Boundary Matrix와 결합하여 기초가장자리에서 구하였다. 원통형중심부의 Stiffness Matrix와 Lateral Boundary Matrix를 각각  $S_b$ ,  $S_l$ 이라 하고 Lateral Boundary에서의 변위벡터를  $V_b$ , Bottom Boundary 수평변위에 의한 Far Field의 Lateral Boundary에서의 변위와 절점력을  $V_o, P_o$ 라 하면 Lateral Boundary에서의 평행방정식은 다음과 같다.

$$(Sb+Sl) \cdot Vb = Sl \cdot Vo + Po$$

위 방정식에서 지표면상의 수평지반거동에 대한 기초저면에서 지반의 Swaying 및 Rocking Motion Transfer Function을 구할 수 있으며 (Fig.9), Kinematic Interaction을 고려한 기초의 Dynamic Stiffness도 구할 수 있다. 기초저면 지반거동 T.F.과 기초의 Dynamic Stiffness에 대한 Poisson 비와 Soil Damping 값이 미치는 영향을 살펴보기 위해 Parametric Study를 실시하였다. Fig.10은 Embedment와 지층의 깊이가 기초반경의 0.5, 2배이고, Soil Damping 값이 0.05, Shear Wave 속도가 1.0이며, Poisson비가 0.33, 0.4, 0.49로 변할 때 Swaying과 Rocking Motion의 T.F.을 보여주는데, Poisson비가 해석결과에 매우 작은 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.11은 같은 System에서 Poisson비가 0.33이고, Soil Damping 값이 0.02, 0.05, 0.1, 0.15로 변할 때 Soil Damping 값이 Swaying과 Rocking Motion에 미치는 영향을 보여주는데, Soil Damping 값에 관계없이 그 형상이 비슷하나 Soil Damping 값이 증가함에 따라 고주파 범위에서 T.F.이 주파수에 무관하게 되는 것을 알 수 있으며, 특히 전체적인 T.F.의 감소효과가 줄어드는 것을 알 수 있다.

반지하구조물에서 Embedment Ratio(E/R)가 기초저면에서 지반의 Swaying과 Rocking Motion T.F.에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Embedment Depth가 E로 일정한 두 종류의 System에 대하여 기초반경 R과 지층 깊이 H를 변화시키면서 Parametric Study를 실시하였다. 지층의 Property는 Shear Wave 속도 1.0, Poisson비 0.33, Soil Damping 값 0.05로 가정하였으며, Parametric Study는 먼저 H/R비가 2로 일정한 System에 대해 H와 R을 동시에 변화시켰으며, 두번째 경우는 H가 일정하게 2인 System에서 기초반경 R만 변화시켰다. 지반거동해석은 주파수영역에서 실시하였으며, Swaying Motion과 Rocking Motion의 T.F.은 E/R비 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 1.75, 2.0에 따라 무차원 Frequency( $a_0 = \Omega \cdot R / C_s$ )함수로 표시하고 그 결과를 다음식에 Least Squares Fitting

$$TF(U) = \begin{cases} \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_0} & \text{for } f \leq \alpha \cdot f_0 \\ \cos \frac{\pi}{2} \cdot \alpha & \text{for } f \geq \alpha \cdot f_0 \end{cases}$$

$$TF(\phi R) = \begin{cases} \beta \left( 1 - \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_0} \right) & \text{for } f \leq f_0 \\ \beta & \text{for } f \geq f_0 \end{cases}$$

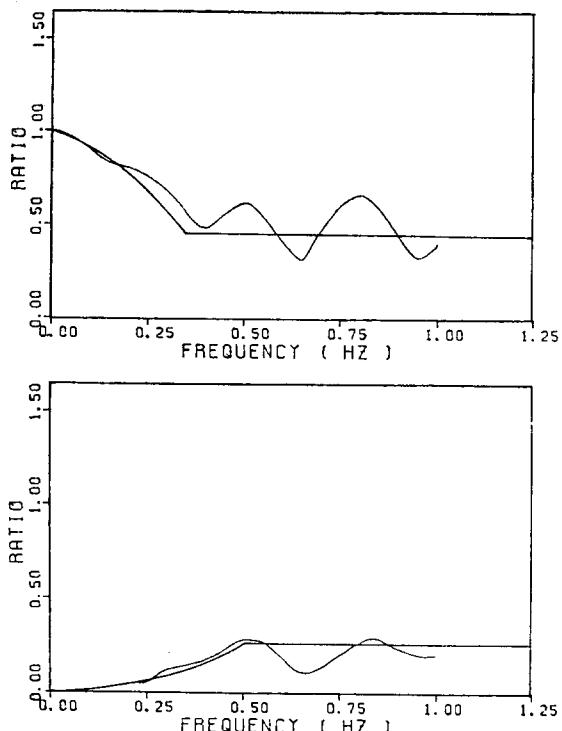


Fig. 9. T. F. of Swaying Motion (Top)  
and Rocking Motion (Bottom)

하여 Fig.12에 나타낸 것처럼 각 E/R비에 대한 최적  $\alpha$ ,  $\beta$ 값을 결정하였다.

Fig.12에 나타난 결과를 보면, E/R비가 1.0이상인 경우에  $\alpha$ ,  $\beta$ 값이 거의 일정하게 각각 0.76, 0.36으로 Swaying Motion은 대략 63% 감소하고, Rocking Motion은 36%쯤 증가하는 것으로 알 수 있다. Embed된 기초에 대해 Elsabee와 Morray가 제시했던  $\alpha$ ,  $\beta$ 값 0.7과 0.257은 E/R비가 0.5에서 1.0사이에 있는 경우에는 적절한 값이겠지만 E/R비가 0.5보다 작은 경우에는 Swaying Motion의 T.F.이 훨씬 적게 감소하여 Elsabee-Morray가 제시한  $\alpha$ ,  $\beta$ 값을 사용할 경우 Unconservative 한 결과를 가져올 수도 있기 때문에 Rocking Motion을 포함한 SS I해석이 필요하게 된다.

위에서 제시한 Swaying과 Rocking Motion의

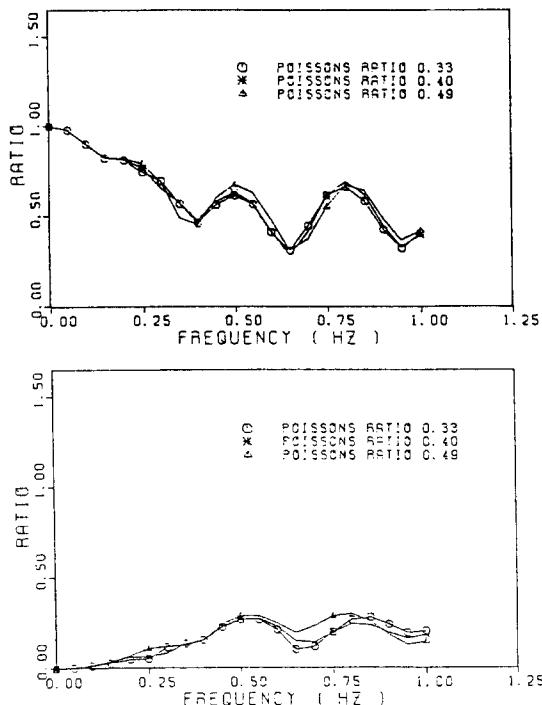


Fig. 10. Poisson's Ratio Effect on the T.F. of Swaying and Rocking Motions

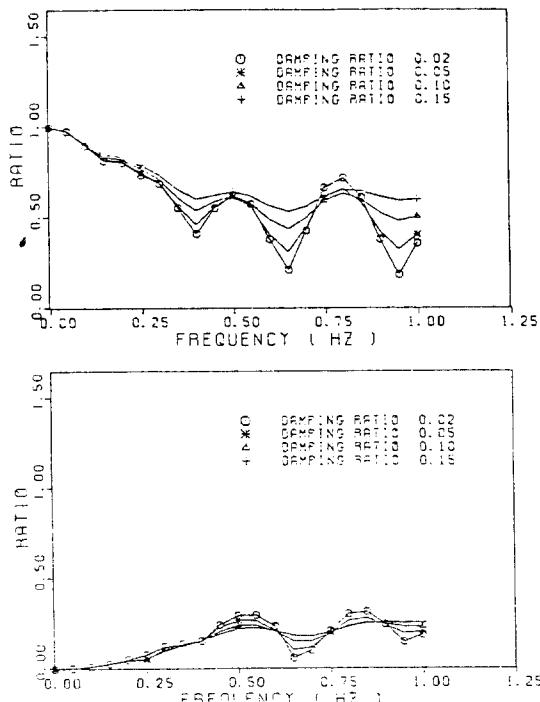


Fig. 11. Damping Ratio Effect on the T.F. of Swaying Motions

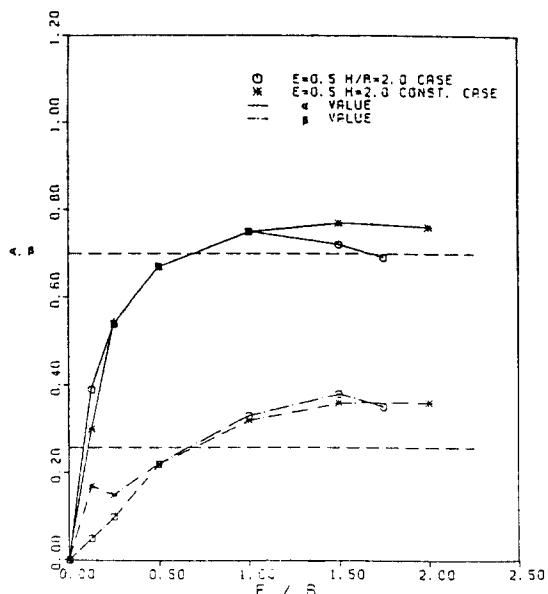


Fig. 12. Least Squares Fitted  $\alpha$  and  $\beta$  vs.  $E/R$

T.F.은 약산식으로 실제 T.F.은 이 평균적 의미의 약산식을 따라 Oscillation하며, 특히 Embedment 비가 작은 경우에 더 심한 굴곡을 보이는데 지층의 고유주기에서는 계곡이 기초 및 지층의 고유주기에서는 정점이 생긴다.(Fig.9) 또 이 약산식은 Swaying과 Rocking Motion에 대한 Amplitude를 나타낸 것으로 실제 T.F.은 주파수에 따라 변하는 Complex Function이기 때문에 SSI해석시 Swaying과 Rocking Motion의 위상도 동시에 고려해야만 한다. 그렇지만 이에 제시한 약산식은 기초 저면에서 지반거동을 전반적으로 이해하는데 좋은 도움을 준다.

#### 4. 기초저면 지반거동에 대한 실례분석

실제적으로 구조물 기초저면에서 지반거동을 정확히 파악하기는 어려운 일이며, 지진시에 기초저면에서의 지반거동을 기록한다 할지라도 Interaction 영향이 배제된 구조물이 없는 상태에서의 지반거동에 대한 실험적 자료를 구하기 힘들기 때문에 통상 건물의 지하실에서 기록한 자료를 많이 이용한다. 본 연구에서는 1971년 California San Fernando에서 발생한 지진을 Los Angeles

표 1. Building Properties

(unit : ft)

Site	Bldg.	Number of Stories	Embed-ment	Foundation		Location
				Direction	Size	
A	A	12 / 1	10	N00E	257	3470 Wilshire Blvd
				S90W	111	
	B	9	0	S00W	138	3407 W. 6th Street
				N90E	156	
B	C	12 / 1	10	N11E	150	15250 Ventura Blvd
				N79W	65	
	D	14	0	S12W	135	14724 Ventura Blvd.
				N78W	165	

표 2. Soil Properties

(unit : ft-lb)

Site	Thickness of Soil Layer	Unit Weight	Shear Wave Velocity	Poisson's Ratio	Damping Ratio
A	10	120	1100	0.4	0.02
	15		1100		0.025
	65		1250		0.03
	110		2100		0.04
B	5	120	700	0.4	0.025
	5		680		0.033
	10		650		0.043
	60		1020		0.048
	30		1250		0.04
	40		1600		0.04
	50		2000		0.04

에 위치한 네 건물 지하실에서 기록한 자료를 이용하여 기초저면에서의 지반거동분석을 실시하였다. 지진기록은 0.07Hz에서 25Hz사이에서 Bandpass Filtering을 했으며, 기계와 Base에 대한 수정을 거쳐 0.02초 간격으로 Digitization했다. 두 개 건물 A, B는 진양에서 40km쯤 떨어진 L.A. Wilshire Blvd.와 West 6th St.에 각각 근접해 있는데, 건물A는 34m × 78m 크기의 12층 R.C. 건물로 3m 깊이의 지하실에 있는 건물이고, 건물B는 47.6m × 42m 크기의 지하실이 없는 9층 철골건물인데, 두 건물 모두 N-S 방향으로 배

치되어 있다. 다른 건물 C, D는 모두 진양에서 38km쯤 떨어진 L.A. Venture Blvd.에 위치한 R. C. 건물들인데, 건물 C는 3m 깊이의 지하실이 있는 20m × 46m 크기의 12층 건물로 건물장면이 N11E 방향으로 배치되어 있으며, 건물 D는 지하실이 없는 50m × 41m 크기의 14층 건물로 세워졌으며, 건물 D는 Pile 기초위에 세워졌는데, 실제 기초저면에서의 지반거동에 Pile의 영향이 어느정도 있지만 전체적인 지반거동 흐름을 파악하는데는 커다란 영향이 없다. 건물이 세워진 지역의 지반은 표2에 나타난 것처럼 대략 60m 깊이의 지층으로, 이루어졌는데, 건물 A, B가 세워진 지역(Site A)은 Shear Wave 속도가 330-630m / sec, Poisson비가 0.4, Damping Ratio가 0.02-0.04이며, 건물 C, D가 있는 지역(Site B)은 Shear Wave 속도가 210-600m / sec, Poisson비가 0.4, Damping Ratio가 0.025-0.04이였다.

그런데 Site A에서의 지반은 27m 깊이에서, Site B의 경우는 6m 깊이에서 Shear wave 속도가 급격히 변하는 것을 알 수 있다.

반지하구조물 기초에 대한 Kinematic Interaction 영향 평가를 위해서 Inertial Interaction을 무시하고, 먼저 건물 A와 C의 지하에서 기록한 기초거동에 대한 Fourier Transfer Function을 건물 B와 D 1층에서 기록한 기초거동 F.T.F.로 매 주파수마다 각각 나누어서 새로운 Transfer Function을 얻었다. 여기서 얻어진 T.F.들은 그 기본경향을 판단하기 어려울 정도로 매우 큰 굴곡을 보이기 때문에 T.F.의 전체적인 면적이 변하지 않게 평균치 방법으로 T.F.을 곡선화 하였다.

Fig.13-16은 Site A, B에서의 N-S 방향과 E-W방향 수평거동에 대한 T.F.을 보여주는데 평균치방법에 의한 T.F.은 매 0.4HZ마다 자료를 곡선화 하였으며, 수정된 Elsabee-Murray식에 의한 T.F.은 Embed된 층의 고유주기를 Site A는 27.5Hz로 Site B는 17.5Hz로 하여 Least Squares Fitting하여 구하였다. 실험적으로 얻은 Swaying Motion에 대한 T.F.은 이론적인 연구 결과처럼 고주파 영역에서 Amplitude 감소현상을 뚜렷하게 보여 주며, 기초 단면방향 T.F.에서 더 현저한 감소를 보이는 것도 전술한 것처럼 E/R비가

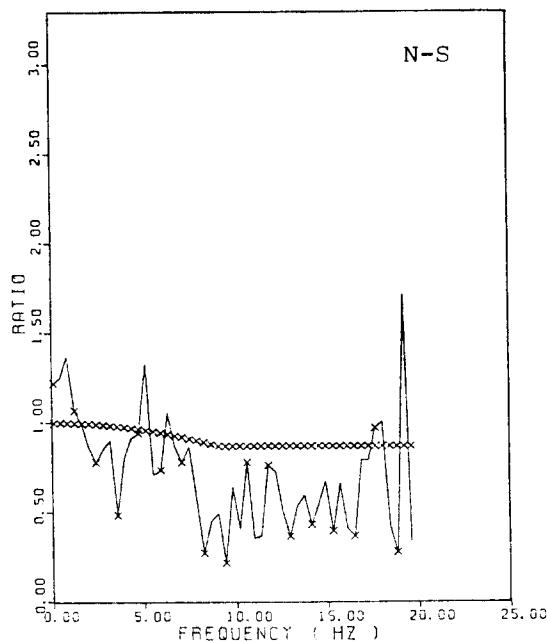


Fig. 13. T.F. of Swaying Motion W.R.T.  
F.S. (N-S) 3470 Wilshire Blvd.

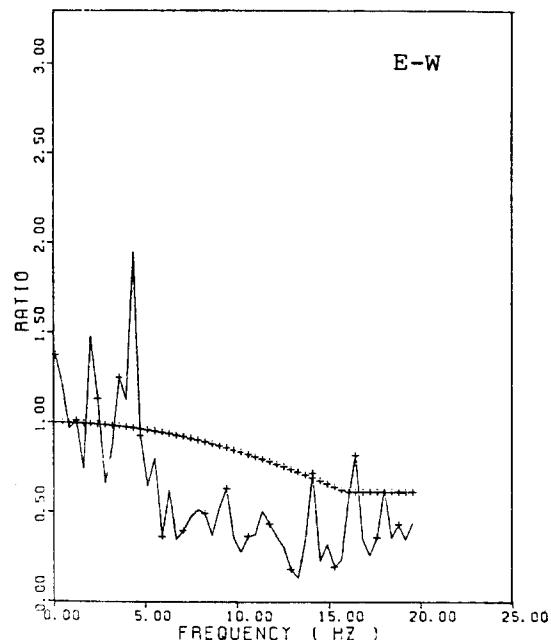


Fig. 14. T.F. of Swaying Motion W.R.T.  
F.S. (E-W) 3470 Wilshire Blvd.

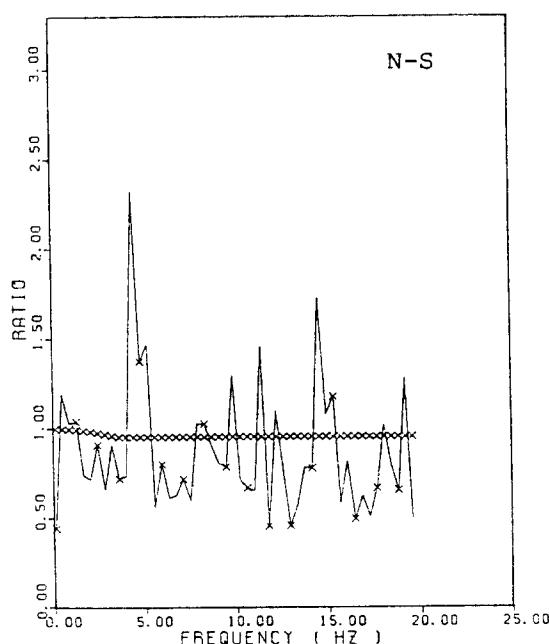


Fig. 15. T.F. of Swaying Motion W.R.T.  
F.S. (N-S) 15250 Ventura Blvd.

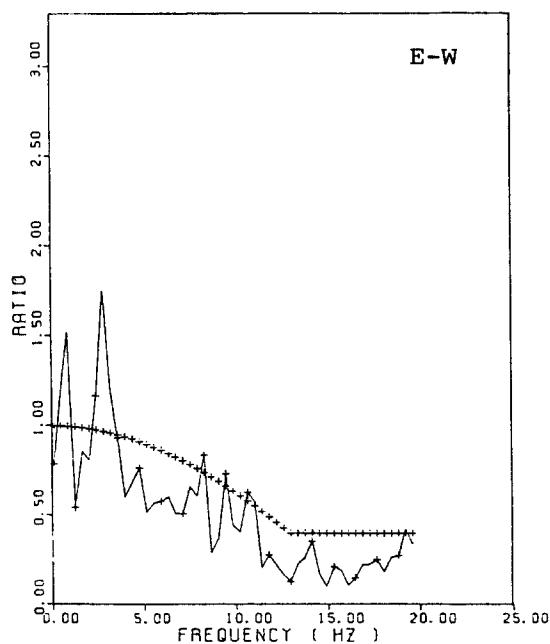


Fig. 16. T.F. of Swaying Motion W.R.T.  
F.S. (E-W) 15250 Ventura Blvd.

크기 때문으로 판단된다. 여기서 실험적으로 구한 T.F. 형상과 Least Squares Fitting에 의해 구한 T.F. 형상이 약간의 차이를 보이고 있는데, Embed된 층의 고유주기를 더 작게 가정함으로써 전체적으로 더 잘 일치시킬 수는 있었지만, 전체적인 Fitting 오차는 크게 변하지 않았다.

## 5. 결론

이 논문에서는 최근까지 반지하구조물의 내진설계시 문제시되었던 지반거동의 작용점 선정 및 기초저면에서의 지반거동에 대해 Soil Amplification과 Kinematic Interaction 영향을 고려하여 살펴보았다. 내진설계시 Substructure Method에 의한 해석을 실시할 경우 기초에 작용하는 지반거동은 지표면이나 기초위치의 Free Field상의 지반거동이 아니라 Kinematic Interaction 해석에 의해 얻어진 기초저면에서의 지반거동이 되어야 하며, 반지하구조물의 경우에는 수평방향의 지반거동 뿐만 아니라 Rocking에 의한 지반거동도 동시에 고려해야만 한다. 반지하구조물에 작용하는 기초저면에서 지반거동 특성은 지표면상의 Free Field 지반거동에 대한 T.F.에서 보았듯이 고주파영역에서 수평방향 지반거동 감소와 Rocking Motion의 증가인데, 실제적인 지진기록에서도 비록 여

러가지 불확실성 때문에 이론적인 기대치 보다 더 많은 수평방향 지반거동의 감소를 보였지만, 이러한 현상을 볼 수 있었다. 결론적으로 반지하구조물의 내진설계시 Conservative하면서도 경제적인 설계를 위해서는 동적해석에 필요한 기초저면에의 지반거동을 Kinematic Interaction 영향을 고려해서, 보다 정확하게 구해야 한다.

## 참 고 문 헌

1. Elsabee, F. And Morray, J. P., "Dynamic Behavior Of Embedded Foundations," Research Report R77-33, Dept. Of Civil Engineering, M.I.T., 1977.
2. H. Bolton Seed And I.M. Idriss, "Ground Motions And Soil Liquefaction During Earthquakes," Earthquake Engineering Research Institute., 1982.
3. J.M. Roessel, "Seismic Safety Margins Research Program(Phase I): A Review Of Soil-Structure Interaction," Lawrence Livermore Lab., 1980.
4. Kim, Yong-Seok, "Effect Of Embedment On Seismic Motions Of Buildings," M.S. Thesis, The University Of Texas at Austin, 1984.
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Engineering Characterization Of Ground Motion," NDREG / CR 3805 Vol.5, 1986.

(접수일자 1988. 9. 7)