

깊은 직접기초의 지반-구조물 상호작용 평가

Estimation of Kinematic Soil-Structure Interaction for Deeply Embedded Foundations

김 승 현¹ Kim, Seunghyun

Abstract

Earthquake strong motion recordings from two deeply embedded sites with instrumented structures and free-field accelerographs are used to evaluate variations between foundation-level and free-field ground motions. The foundation/free-field ground motion variations are quantified in terms of frequency-dependent transmissibility function amplitude, $|H|$. Comparisons are then performed with an analytical model for the assumed conditions of a rigid base slab and a vertically propagating, coherent incident wave. The limiting assumptions of the model are not strictly satisfactory for actual structures, and the results of the analysis reflect not only incoherence effects, but also possible foundation flexibility and wave inclination effects. Nonetheless, the simple analytical model is in an acceptable agreement with the empirical analysis and appears to be applicable in practice.

요 지

본 연구에서는 먼저 지표면을 비롯하여 구조물 곳곳에 가속도계가 설치된 깊은 직접기초 구조물 2개를 선정하였다. 이어서 구조물에 기록된 실지진 데이터를 사용하여 주파수 영역에서 Transmissibility 함수를 사용하는 기법으로 기초 위치에서와 자유지표면에서의 지반운동 사이의 차이를 산정하였고 실지진기록을 사용하여 산정된 이 변환함수를 기존의 간편식과 비교하여 검증하였다. 비록 강성 기초저면, 연직으로 전파되는 지반운동을 가정하는 간편식의 전제조건은 실제 조건과 차이가 있지만, 그럼에도 불구하고 실지진기록으로부터 산정된 변환함수와 매우 양호한 유사성을 보여주므로 간편식을 설계실무에서 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Deeply embedded foundation, Ground motion, Soil-structure interaction

1. 서 론

일반적으로 내진설계에서는 기초저면의 운동을 자유지표면의 지반운동과 동일하게 적용하고 있다. 여기서, 자유지표면이란 상부구조물이 없는 상태에서 기초와 지반의 경계면을 뜻한다. 그러나, 실제 기초저면의 운동은 지반-구조물 상호작용에 의하여 자유지표면 운동과 차이를 가지게 되는데 이 차이는 두 가지 단계로 평

가할 수 있다. 첫 번째 단계는 기초 입력운동, FIM (Foundation Input Motion, 상부구조물의 질량이 없는 상태에서의 기초저면 운동) 계산이다. 자유지표면 운동과 기초 입력운동의 차이는 운동학적 상호작용(Kinematic Interaction)에 의해 발생하고 이는 기초 입력운동과 자유지표면 운동의 비로 나타내는 변환함수(Transfer function)에 의해 정량화할 수 있다. 두 번째 단계는 상부구조물 진동으로 기초에 전해지는 전단력과 모멘트에 의

¹ 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 과장, 공학박사 (Member, Manager, Samsung Corporation, Ph.D., seunghyun70.kim@samsung.com)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하여 추가적으로 발생하는 기초부의 상대변위와 회전을 평가하는 것이다. 이를 관성 상호작용이라고 하고 임피던스 함수(Impedance function)에 의하여 정량화된다.

직접기초의 경우, 기초 입력운동과 자유지표면 운동의 차이는 우선 관성 상호작용에 의하여 발생한다. 진동하는 상부구조물에 의하여 발생하는 관성력은 기초부에 전단력과 모멘트를 발생시켜 추가적인 변위를 가져온다. 이러한 관성력 효과는 일반적으로 연성기초의 고유주기(상부구조물과 기초의 연성을 고려하는 고유주기) 부근에 집중되므로 이 외 주파수 영역에서는 주로 운동학적 상호작용의 영향이 지배적이라고 할 수 있을 것이다.

또한, 기초 입력운동은 기초저면 평균(Base slab averaging) 효과에 의해 자유지표면 운동과 차이를 보이게 된다. 기초저면 평균 효과란 경사지거나 incoherent한 파가 기초면에서 평균화되어 지는 현상인데 여기서 incoherent한 파는 다른 물리적 특성을 지닌 매질을 통과하거나 확장 진원상 다른 위치에서 생성되어 종점의 대상구간에서 일관되지 않은 특성을 보여주는 파이다. 기초 입력운동은 수평(translational)과 회전(rotational) 성분이 있는데 수평방향 성분은 주로 자유지표면 운동에 비해 감소하게 되고, 회전성분은 torsion과 rocking 같이 기초를 따라 경사지거나 incoherent한 파가 전달될 때 발생한다. 기존의 연구에서는 여러 가지 조건하에서 기초저면 평균효과를 산정하였는데, 다운홀 어레이 연구(Silva 1986; Chang et al. 1990; Elgarnal et al. 1995)에서 대부분의 에너지는 연직방향으로 전파하는 전단파에 집중함을 규명한 이후로 실무적인 차원에서 가장 적절하게 사용할 수 있는 것은 연직으로 전파되는 incoherent한 파의 기초저면 평균효과 연구라 할 수 있다[원형기초: Luco and Mita(1987); Veletsos and Prasad(1989), 사각형기초: Luco and Wong(1986); Veletsos et al.(1997)].

또 다른 주요원인으로 근입효과(Embedment effect)를 들 수 있다. Elsabee and Moray(1977)와 Day(1978)는 연직으로 전파되는 coherent 파에 대한 기초저면 운동과 자유지표면 운동의 변환함수를 계산하였다. 이 경우 기초저면 평균효과는 발생하지 않지만 근입효과에 의하여 기초의 추가변위가 발생하게 된다. 대부분의 현대구조물은 지하층을 가지고 있어 그 중요성이 더욱 부각되고 있는데, 깊은 직접기초의 경우(Kim 2001; $e/r > 0.5$, 여기서 e =근입깊이, r =등가 기초반지름= $\sqrt{A/\pi}$, A =기초저면적)에 가장 중요한 고려대상이 된다.

본 연구에서는 깊은 직접기초의 지반-구조물 상호작용을 이론적으로 고찰하고, 실지진 기록을 사용하여 실무에서 적용가능한 간편식에 대한 검증은 수행하도록 한다. 이와 같은 검증 작업을 통하여 다른 형태의 구조물과 비교할 때 지반-구조물 상호작용의 영향이 중요한 깊은 직접기초 구조물의 동적 거동에 대한 이해를 돕고 또한 설계에 적용함으로써 내진 설계 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 관성 상호작용

Chopra and Gutierrez(1974)는 진동하는 상부구조물의 관성력에 의한 기초부의 영향을 평가하기 위하여 Compliant-base(주위 지반에 대하여 상대적으로 변위를 가지는 기초)의 다자유도계(Multidegree-of-freedom system) 구조물 거동해석을 수행하였다. 이 연구에서는 균질 반무한 지반위에 위치하는 원형 강성기초에 제안된 임피던스 함수(Veletsos and Verbic, 1973)를 가상의 전단벽 구조물(Chopra, 2000)에 적용하여 지반운동 차이에 대한 관성 상호작용의 영향을 알아보았다. 이 구조물의 제2와 제3모드 고유주파수는 각각 제1모드 고유주파수의 2.7배와 3.7배인 것으로 계산되었다.

Fixed-base(주위 지반과 동일하게 거동하는 기초)상태에서 제1모드 고유주파수를 변화시킴으로써 구조물의 다양한 형상을 가정할 수 있으므로 여러 가지 변수에 대한 구조물의 예민도를 평가하였다(김승현, 2001). 그림 1에서는 수평방향 자유지표면 변위(\bar{u}_g ; 여기서 $-$ 는 Fourier 진폭을 의미한다)에 대한 기초 총변위(\bar{u}_{ft})의 비를 정규화된 주파수(f/\tilde{f}_1 ; 여기서, \tilde{f}_1 =compliant-base 제1모드 고유주파수) 영역에서 도시하는데, 이 때 기초에 대한 지반의 강성비($1/\sigma = h/V_s T$; 여기서, h =구조물의 유효높이 $\approx 0.7 \times$ 총높이, V_s =지반의 전단파 속도, T =구조물의 fixed-base상태 제1모드 고유주기) 변화에 의한 영향을 함께 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 관성 상호작용 영향은 제1모드 고유주파수 부근에 집중되어 있고 $1/\sigma$ 가 커질수록 그 영향도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 관성 상호작용에 대하여 $1/\sigma$ 가 중요한 영향을 가진다는 기존의 연구결과(Veletsos and Nair, 1975)와도 일치하는 결과이다.

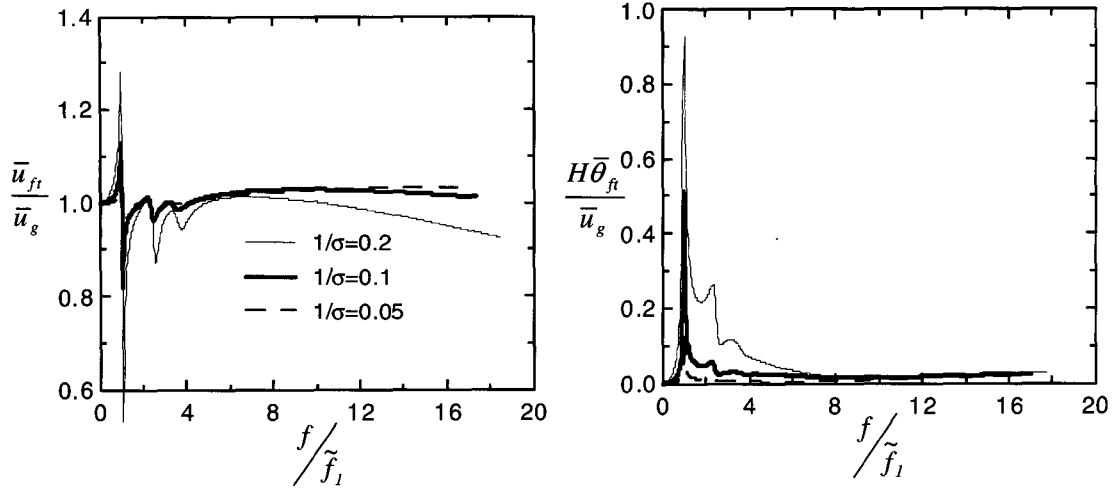


그림 1. 관성 상호작용의 영향분석

2.2 근입 효과

Coherent 파가 연직 방향으로 기초에 전파될 때 근입 기초는 수평방향 성분의 감소와 회전성분(rocking) 발생을 경험하게 된다. 이 때, rocking은 근입 기초 양 측벽부의 불균등 전단 변형에 의하여 발생한다. Elsabee & Morray(1977)와 Day(1978)는 상기의 조건에서 기초저면 운동과 자유지표면 운동을 연관하는 변환함수를 도출하였다. Day(1978)는 반무한 균질 지반내 근입된 원형 강성기초의 거동에 대한 유한요소해석을 수행하였고, Elsabee & Morray(1977)는 기반암 위에 유한 두께를 가지는 점탄성 지반내 원형 강성기초에 대한 해석을 수행하였다. 그림 2에서는 이와 같은 반무한 균질 지반과 유한 두께의 점탄성 지반내 기초의 변환함수를 근입비(e/r) 0.5와 1.0에 대하여 도시하였다. 근입비 2.0의 경우는 반무한 균질지반에 대하여만 계산되었다. 그림에서 보듯이 두 함수의 주요한 차이는 고주파 영역에서 유한 두께 점탄성 지반의 변환함수가 중요하게 있다.

그림 2에는 또한 Elsabee & Morray(1977)가 제안한 아래의 근사식도 함께 보여지고 있다.

$$\text{Translation: } |H_u(\omega)| = \begin{cases} \cos\left(\frac{e}{r}a_0\right) & a_0 \leq 0.7 \cdot \bar{a}_0 \\ 0.453 & a_0 > 0.7 \cdot \bar{a}_0 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\text{Rocking: } |H_\theta(\omega)| = \begin{cases} \frac{0.257}{r} \left(1 - \cos\left(\frac{e}{r}a_0\right)\right) & a_0 \leq \bar{a}_0 \\ \frac{0.257}{r} & a_0 > \bar{a}_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

여기서, $\bar{a}_0 = (\pi/2)/(e/r)$ 이다. Elsabee & Morray(1977)

는 전단파속도 (V_s)가 근입깊이 내에서 평균화 되었을 때 비균질 지반에서도 상기의 식을 적용할 수 있다고 언급했다. 또한 Mita & Luco(1989)는 사각형 기초에도 면적과 2차 관성 모멘트를 적절하게 변환시켜서 원형기초로 변환하여 적용할 수 있는 것을 보여주었다.

3. 해석 방법

특정 시스템에 있어서 입력치를 $x(t)$, 출력치를 $y(t)$ 라고 할 때, 그 시스템의 변환함수는 $x(t)$ 의 Fourier변환에 대한 $y(t)$ 의 Fourier변환의 비 ($=\bar{y}(t)/\bar{x}(t)$)로 표현된다. 그러나, 실지진 기록을 대상으로 하는 경우에는 $x(t)$ 가 매우 임의적이므로 $x(t)$ 의 Fourier변환치가 존재하지 않을 수도 있으며 이 때에는 변환함수 또한 정의되지 않는다. 이러한 이유로 Fourier변환을 사용하는 변환함수 대신에 어떠한 경우에도 존재하는 파워 스펙트럼 밀도 함수 (Power spectral density function; S_{xx} , S_{yy})와 크로스 스펙트럼 밀도 함수(S_{xy})를 사용하는 Transmissibility function이 종종 사용된다(Pandit, 1991; Johansson, 1993). Transmissibility function에는 다음의 세 가지가 있다.

$$\begin{aligned} H_1(i\omega) &= S_{xy}(\omega)/S_{xx}(\omega) \\ H_2(i\omega) &= S_{yy}(\omega)/S_{xy}(\omega) \\ |H_3(i\omega)| &= \sqrt{S_{yy}(\omega)/S_{xx}(\omega)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서 $\omega =$ 각진동수, 그리고 $i = \sqrt{-1}$. 처음 두 개의 $H(i\omega)$ 는 이론적으로 같아야 하지만, 실제로는 데이터 노이즈, 입력치와 출력치간의 비탄성관계 등으로 인하여 일치하지 않는다. Fenves and DesRoches(1994)에 의하

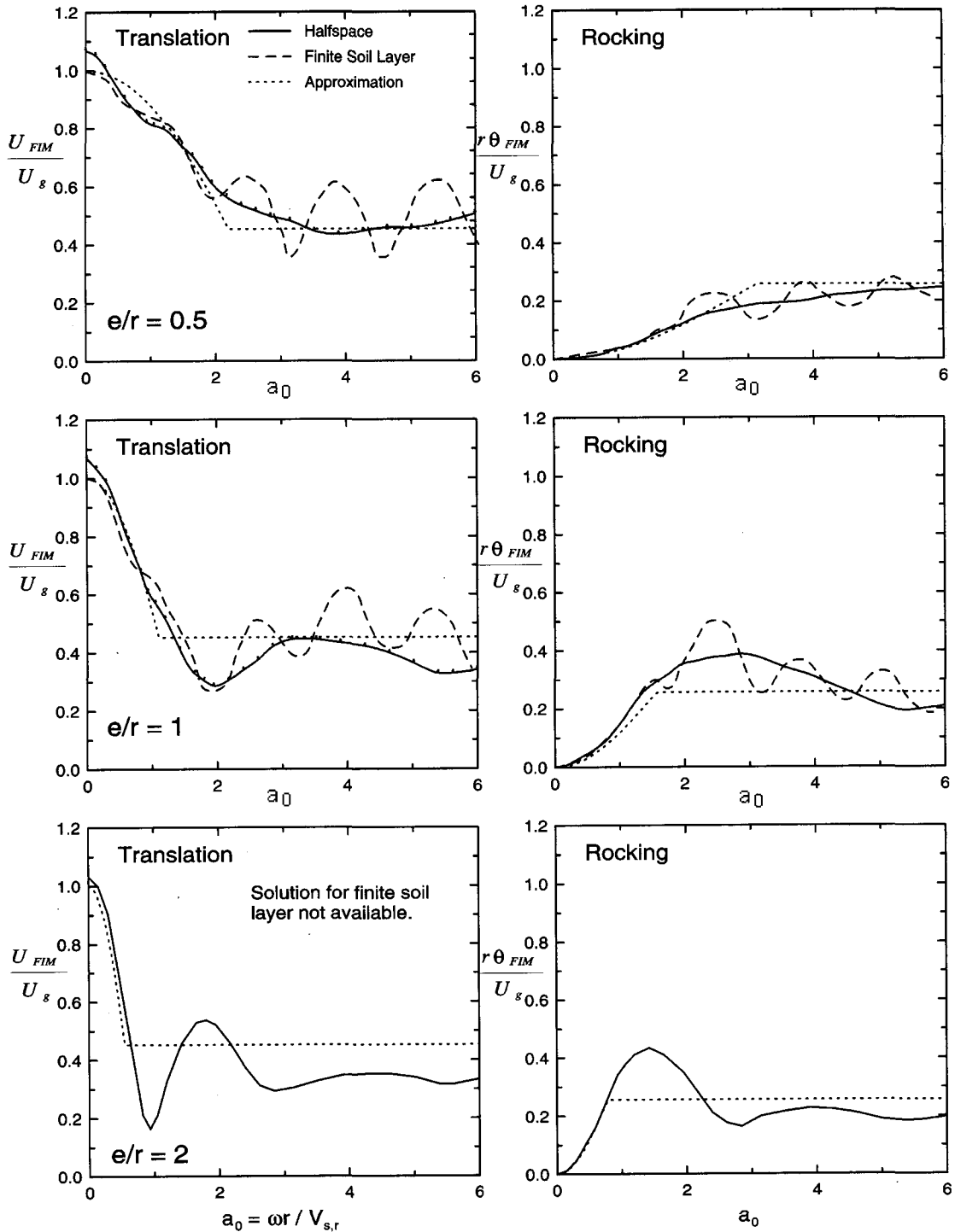


그림 2. 반무한 균질 지반과 유한 두께의 점탄성 지반내 기초의 변환함수 비교

면 $H_1(i\omega)$ 는 출력치 노이즈에, $H_2(i\omega)$ 는 입력치 노이즈에 덜 민감한 것이 일반적이며 $H_3(i\omega)$ 의 크기는 $H_1(i\omega)$ 과 $H_2(i\omega)$ 의 사이라고 한다. 이러한 노이즈와 비탄성 속성을 가지는 Transmissibility function의 적합성을 확인하는 방법으로 아래의 식에 표현되어 있는 코히런스 함수를 이용한다(Pandit 1991; Johansson 1993).

$$\gamma^2(i\omega) = \frac{H_1(i\omega)}{H_2(i\omega)} = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (2.4)$$

코히런스 함수가 1에 가까우면 노이즈가 매우 적고 입력치와 출력치간에 거의 탄성관계가 성립함을 의미한다. 1보다 적은 코히런스 값은 실제로 매우 일반적으로 이는 $H_2(i\omega)$ 의 크기가 $H_1(i\omega)$ 의 크기를 초과함을 의미한

다. 본 연구에서는 Transmissibility function의 중간값인 $H_3(i\omega)$ 을 사용하기로 한다. 이 때 주목할 점은 파워 스펙트럼 밀도 함수를 사용한 transmissibility function은 Fourier변환을 사용한 변환 함수와 비교할 때 다소 평탄한 모양을 보이지만 실제로 큰 차이가 없다는 것이다 ($\sqrt{S_{xx}/S_{yy}} \approx \bar{u}_{xx}/\bar{u}_{yy}$).

Transmissibility function에 사용된 스펙트럼 밀도 함수는 periodogram에 의해 완곡해 진다(Oppenheim and Schaffer 1989). Periodogram은 변환함수 산정과 관련된 임의성을 감소하기 위해 스펙트럼을 완곡하게 하는 평균화 작업(Averaging) 도구이다. 이 때 데이터는 시간 영역에서 겹침을 가지는 일정한 크기의 구간으로 분할되고, 각 구간에 대하여 Fourier변환을 계산한다. Periodogram은 모든 구간의 Fourier 변환값의 제곱에 대한 평균인데 분할 구간의 수가 증가할수록 결과는 더욱 완곡하게 표현되지만 주파수 해상도(Frequency resolution)는 감소하게 된다(Pandit 1991). 따라서 적절한 수의 분할 구간이 요구되는데 본 연구에서는 4개의 겹침없이 동일한 길이를 갖는 창을 사용하였다. 또한 각 구간에 대하여 Tapering window를 도입했는데 이는 겹침에 의한 각 구간의 통계적 의존성을 감소하고 스펙트럼 최대 진폭을 크게 할 때 발생하는 spectral leakage를 막기 위함이다(Krauss et al. 1994). 본 연구에서는 Factor 15.7의 Kaiser window(Fenves and

DesRoches 1994)가 이와 같은 목적으로 사용되었다.

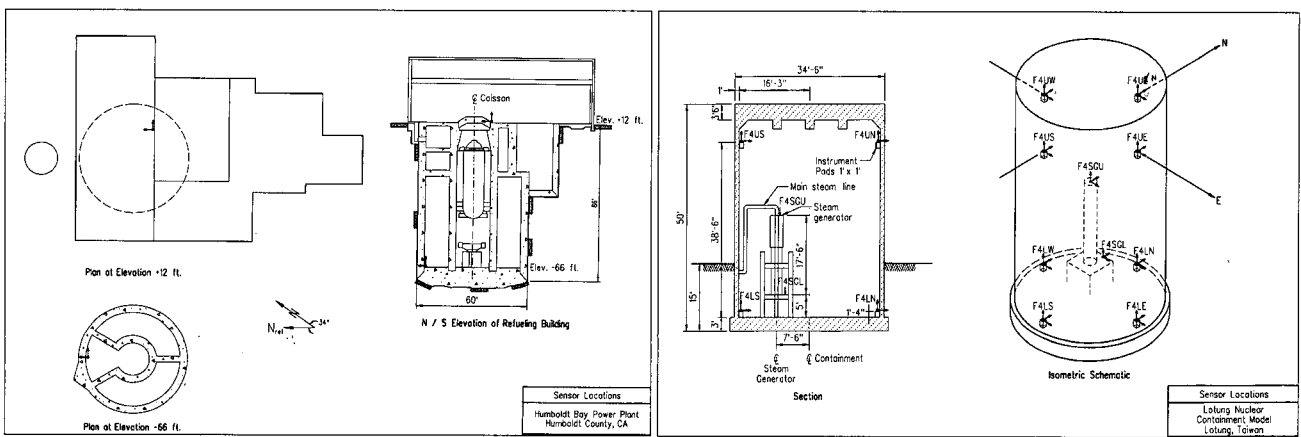
4. 해석 결과

4.1 현장 설명

미국 서부에 존재하는 58개 건물의 실지진 자료(Stewart and Stewart 1997) 중 본 연구의 목적에 부합하는 2개의 사이트를 선별하였다. 두 개의 현장 (Site03과 Site46)은 깊은 원형 직접기초로써(Site03 $e/r=2.9$; Site46 $e/r=0.9$; 여기서 e =근입 깊이, r =기초의 등가 반지름) 상기 절에 설명된 해석을 수행할 요건을 갖추고 있지만, Site46 만이 rocking effect 해석이 가능한 데이터를 보유하고 있다. 각 사이트에 대한 세부 내용은 아래의 표와 그림을 참조한다.

4.2 이론식 검증

두 개의 사이트에 대한 Transmissibility function amplitude, $H_3(i\omega)$ 는 그림 4에서 이론식(Elsabee and Morray 1977)과 비교하여 도시하였다(그림에서 굵은 실선은 이론식이며 실선은 $H_3(i\omega)$ 이다). 그림에서 보는 바와 같이 수평성분 (translational mode)에서 두 함수는 동서(EW)



[Site03]

[Site46]

그림 3. 사용현장 단면 / 가속도계 위치도

표 1. Site 개요

Site	구조물	기초 형식	근입 깊이(m)	기초 반지름 (m)	발생 지진 [PGA(g)]
Site03: Hum-boldt Bay Power Plant	콘크리트 케이스	Footing	26.2	9.1	1975 Ferndale [0.25] 1992 Petrolia [0.27]
Site46: Lotung 1/4-scale Con-ainment Model, Taiwan	격납고 모형	Mat	4.6	5.3	1986 LSST07 [0.21]

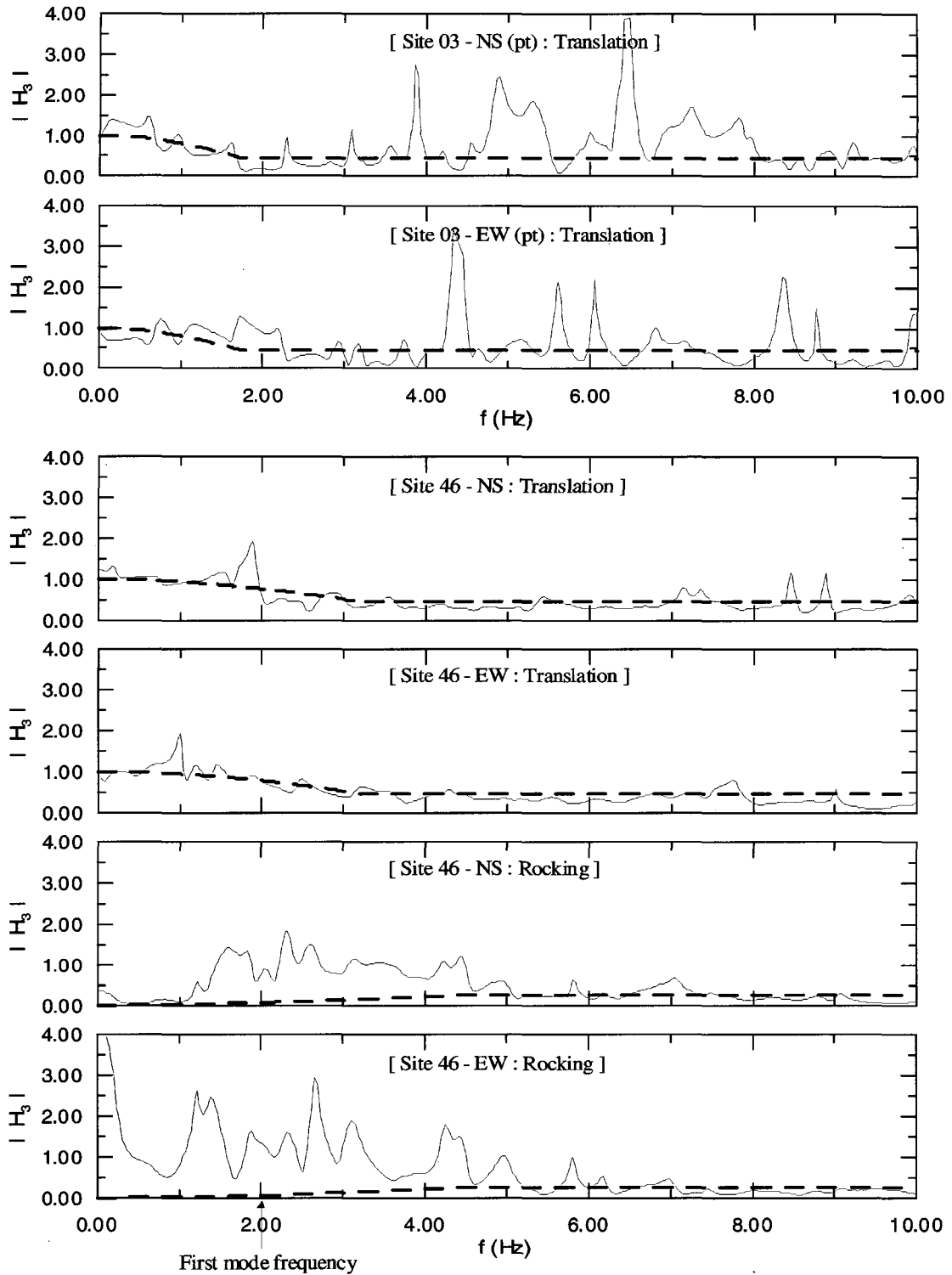


그림 4. 두 개의 깊은 직접기초 사이트(Site03, Site46)에 대한 Transmissibility Function과 이론식(Elsabee and Morray 1977)의 비교 결과

방향과 남북(NS) 방향성분에 대하여 모두 매우 우수한 일치성을 보여주고 있다. 반면 회전성분(rotational mode)에서 Site46의 해석결과(Site03은 데이터 부족으로 해석 미실시)는 대체적으로 양호하지만 저주파 영역에서 큰 차이를 보여주고 있다. 이는 관성 상호작용에 의해 도입

된 rocking의 영향이 매우 큼을 의미하고 있다 (Site46 공진 주파수 $\approx 2\text{Hz}$). 결론적으로 깊은 직접기초의 운동학적 상호작용을 산정하는 이론식(Elsabee and Morray, 1977)은 실제 지진기록에 의하여 검증되었다고 할 수 있으며, 실무에 직접 적용할 수 있는 수준이다.

5. 결론

근입깊이가 깊은($c/r > 0.5$) 직접 기초를 가지는 구조물의 경우, 자유 지표면 운동(Free-Field Motion)과 기초 입력운동(FIM)의 차이는 주로 상부 구조물이 진동시 기초에 전달하는 관성력(관성 상호작용)과 기초부의 근입 효과에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 실지진 기록을 사용하여 기초 입력운동과 자유 지표면 운동의 비를 계산하고 이를 기존의 이론식(Elsabee and Morray 1977)과 비교하였다. 그 결과 수평성분에서는 계산치와 이론식의 차이가 거의 없으며 관성력의 영향을 많이 받는 회전성분(rocking)에서는 공진주기 영역을 제외하고 이론식과 계산치가 양호하게 일치함을 알 수 있었다.

그러므로, 지하 저장고나 격납고 형태의 깊은 직접기초를 가지는 구조물에서는 본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 기초부 운동을 간편하게 산정할 수 있다고 할 수 있다.

참고 문헌

1. 김승현 (2001), *Calibration of Simple Models for Seismic Soil-Structure Interaction from Field Performance Data*, 박사학위논문, University of California at Los Angeles.
2. Chang, C.Y., Mok, C.M., Power, M.S., Tang, Y.K., Tang, A.T., and Stepp, J.C. (1990), "Equivalent linear and nonlinear ground response analyses at Lotung seismic experiment site", *Proc. 4th U.S. National Conference on Earthquake Engrg.*, 1, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Calif., 327-336.
3. Chopra, A.K. (2000), *Dynamics of Structures*, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
4. Chopra, A.K., Gutierrez, J.A. (1974), "Earthquake Analysis of Multistory Buildings Including Foundation Interaction", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (3), 65-67.
5. Day, S.M. (1978), "Seismic response of embedded foundations," *Proc. ASCE Convention*, Chicago, IL, October, Preprint No. 3450.
6. Elgamal, A.W., Zeghal, M., Tang, H.T., and Stepp, J.C. (1995), "Lotung downhole array. I: Evaluation of site dynamic properties", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 121(4), 350-362.
7. Elsabee, F. and Morray, J.P. (1977), "Dynamic behavior of embedded foundation", *Rpt. No. R77-33*, Dept. of Civil Engrg., Massachusetts Inst. Technology.
8. Fenves, G.L. and Desroches, R. (1994), "Response of the northwest connector in the Landers and Big Bear Earthquakes", *Rpt. No. UCB/EERC-94/12*, Earthquake Engrg. Research Ctr., Univ. of California, Berkeley.
9. Johansson, R. (1993), *System Modeling and Identification*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
10. Krauss, T.P., Shure, L., and Little, J.N. (1994), *Signal Processing Toolbox, Users Guide*, The Math Works, Inc., Natick, Mass.
11. Luco, J.E. and Wong, H.L. (1986), "Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion", *J. Earthquake Engrg. Struct. Dynamics*, 14(6), 891-908.
12. Luco, J.E. and Mita, A. (1987), "Response of circular foundation to spatially random ground motions", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 113(1), 1-15.
13. Mita, A. and Luco, J.E. (1989), "Dynamic response of a square foundation embedded in an elastic halfspace", *J. Soil Dynamics and Earthquake Engrg.*, 8(2), 54-67.
14. Oppenheim, A.V. and Schaffer, R.W. (1989), *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
15. Pandit, S.M. (1991), *Modal and Spectrum Analysis*, John Wiley, New York, NY.
16. Silva, W. (1986), "Soil response to earthquake ground motion", *Rpt. No. RP2556-07*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
17. Stewart, J.P., and Stewart, A.F. (1997), "Analysis of soil-structure interaction effects on building response from earthquake strong motion recordings at 58 sites", *Rpt. No. UCB/EERC 97/01*, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif., 742.
18. Veletsos, A.S. and Verbic, B. (1973), "Vibration of viscoelastic foundations", *J. Earthquake Engrg. Struct. Dynamics*, 2(1), 87-102.
19. Veletsos, A.S. and Nair V.V. (1975), "Seismic interaction of structures on hysteretic foundations", *J. Struct. Engrg., ASCE* 101(1), 109-129.
20. Veletsos, A.S. and Prasad, A.M. (1989), "Seismic interaction of structures and soils: Stochastic approach", *J. Struct. Engrg., ASCE*, 115(4), 935-956.
21. Veletsos, A.S. and Prasad, A.M. and Wu, W.H. (1997), "Transfer functions for rigid rectangular foundations", *J. Earthquake Engrg. Struct. Dynamics*, 26(1), 5-17.

(접수일자 2006. 4. 4, 심사완료일 2006. 4. 20)