



## 1. 머리말

원자력발전소 격납구조물, 고층빌딩, 장대교량, 댐 등과 같은 대형 토목구조물의 진동특성은 구조물 자체의 동특성 이외에도 구조물을 지지하는 지반의 영향으로 많이 변할 수 있다. 이와 같이 구조물의 진동특성이 주변 지반에 따라 변하는 효과를 지반-구조물 상호작용(soil-structure Interaction, SSI)이라고 한다. 지반-구조물 상호작용의 영향은 특히 질량이 큰 구조물이 상대적으로 강성이 작은 지반에 위치한 경우 그 영향이 크게 나타난다.<sup>(1)</sup> 종래의 구조동력학 이론에서 지반의 영향을 무시하여 왔다. 그러나 지반-구조물 상호작용의 영향으로 구조물의 응답이 증폭되기도 하고 감소되기도 하여 문제에 따라 다른 특성을 나타내고 있다. 이 같은 특성을 반영하여 최근에는 보다 안전하면서도 보다 경제적인 설계를 위해서 지반-구조물 상호작용을 고려하는 사례가 늘고 있다. 지반-구조물 상호작용은 진동기계의 기초를 설계하는데 오래 전부터 고려되어 왔다. 아울러 생활수준의 향상으로 환경문제가 점차 중요하게 됨에 따라, 건설하중 또는 교통하중 등에 의한 환경진동문제를 분석하여 방진대책을 수립하는데도 활용되고 있다. 최근에는 지하구조물의 내진설계, 구조물의 보수보강을

\* E-mail : jm4kim@yosu.ac.kr

위한 정밀해석의 수단으로도 이용되고 있다.

지반-구조물 상호작용의 영향은 일반적으로 상호작용력의 역학적 특성에 따라 관성상호작용(inertial interaction)과 운동상호작용(kinematic interaction)으로 구분한다. 전자는 동적 상호작용이라고 할 수 있으며 후자는 준정적 상호작용이라고 할 수 있다. 지반-구조물 상호작용에 의하여 구조물의 고유진동수 감소하게 되며 감쇠능력은 증가하게 된다. 그러나 이와 같은 상호작용의 정확한 해석은 지반의 반무한성, 지반을 통해 구조물로 전달되는 하중의 복잡성, 비선형성(구조물과 지반의 접면에서 경계조건, 구조물 및 지반의 비선형성) 등을 동시에 고려해야 한다. 따라서 이를 위해서는 구조동력학, 파동전파이론, 지반동력학, 유한요소해석, 비선형해석 등 다양한 방면의 학제적 지식이 요구되므로, 실무에서는 지반-구조물 상호작용해석을 어렵게 인식하고 있으며 이의 영향을 무시하는 경우가 많은 것이 현실이다.

이 기사에서는 지반-구조물 상호작용의 영향, 해석방법, 응용 사례 등에 대해 간단히 소개하여 지반-구조물 상호작용 해석에 대한 이해를 돕고자 한다.

## 2. 해석이론 및 관련 S/W

### 2.1. 지반-구조물 상호작용의 영향

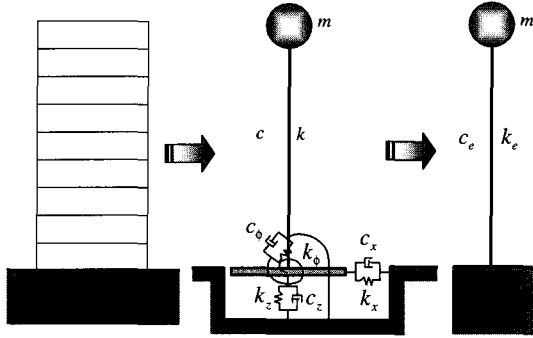


그림 1 지반-구조물 상호작용 집중모델

이 절에서는 지반-구조물 상호작용의 효과에 대한 이해를 돕기 위하여 그림 1과 같은 단자유도 지반-구조물 집중모델의 동적거동에 대해 설명하였다.

그림 1에서 구조물 자체의 동특성이  $m$ (질량),  $c$ (감쇠),  $k$ (강성)이고 지반-구조물 상호작용을 고려한 SSI 모델의 경우 동특성을  $m$ ,  $c_e$ ,  $k_e$ 로 나타낼 때, 지반의 부가질량을 무시하면 수평진동의 등가고유진동수( $\omega_e$ )와 감쇠비( $\xi_e$ )는 다음과 같이 된다.<sup>(1)</sup>

$$\omega_e = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_x^2 + \omega_\phi^2} \quad (1)$$

$$\xi_e \approx \left(\frac{\omega_e}{\omega_0}\right)^2 \xi_0 + \left(\frac{\omega_x}{\omega_0}\right)^2 \xi_x + \left(\frac{\omega_\phi}{\omega_0}\right)^2 \xi_\phi + \left\{1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_0}\right)^2\right\} \xi_g \quad (2)$$

여기서  $\omega_0$ 는 바닥이 고정된 구조물의 고유진동수( $=k/m$ ),  $\omega_x$ 는 수평강체운동의 고유진동수( $=k_k/m$ ),  $\omega_\phi$ 는 회전강체운동(rocking)의 고유진동수( $=k_\phi/mh^2$ )이다. 그리고 식 (2)에서 감쇠비는 각각  $\xi_0 = c\omega_0/2k$ ,  $\xi_x = c_x\omega_x/2k_x$ ,  $\xi_\phi = c_\phi\omega_\phi/2k_\phi$ 이며  $\xi_g$ 는 지반 자체의 재료감쇠비이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 SSI 모델의 고유진동

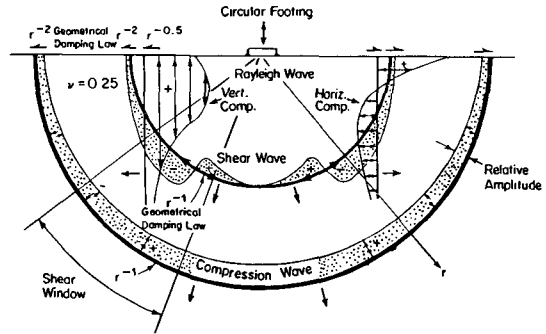


그림 2 원형기초 진동에 의한 탄성과 전파

수는 SSI를 고려하지 않은 경우에 비해 감소하며 감쇠비는 증가한다. 이 같은 고유진동수 변화는 작용되는 하중의 주파수성분에 따라 구조응답을 크게 할 수도 있고 작게 할 수도 있으며, 감쇠비 증가는 구조응답을 작게 한다. 따라서 SSI를 고려한 응답은 그렇지 않은 경우에 비해 항상 크거나 항상 작다고 할 수 없으며, 지반-구조물의 특성과 작용되는 하중의 주파수특성에 따라 다르게 나타내 되는 것이다.

그림 1의 해석모델은 근사적인 것으로서 엄밀한 의미에서는 그림 1에서 지반의 영향을 나타내는 강성계수와 감쇠계수가 주파수종속성을 가진다. 이 같은 주파수 종속성은 그림 2와 같이 기초를 통해 지반으로 전달되는 진동에너지가 반무한 지반영역으로 탄성파형태로 전달되는 데 중요한 역할을 하는, 표면파(rayleigh-파 또는 love-파)가 주파수에 따라 속도가 달라지는 dispersion 특성이 있기 때문이다. 따라서 dispersion 특성이 뚜렷한 층상지반에서 주파수 종속성이 더욱 뚜렷하게 나타난다.

## 2.2 지반-구조물 상호작용 해석 방법

지반을 통한 탄성파전달의 주파수 종속성을 엄밀하게 고려하기 위하여 개발된 대표적인 방법은 다음과 같다.

- 임피던스방법<sup>(2)</sup>
- 전달경계요소법/박층요소법<sup>(3)</sup>

- 동적무한요소법<sup>(4, 5)</sup>
- 주파수영역 경계요소법<sup>(6, 7)</sup>

이와 같은 해석법에서는 지반의 영향을 대부분 주파수중속인 강성으로 표현하므로 지반-구조물 상호작용해석을 Fourier 변환기법을 이용한 주파수영역에서 수행한다.

주파수영역해법은 비선형성을 고려할 수 없으므로 보다 지반-구조물의 비선형해석을 수행하기 위하여, 여러가지 시간영역해법이 개발되었으며 대표적인 기법은 다음과 같다.

- 주파수중속 동적강성을 이용한 방법<sup>(8)</sup>
- 시간영역 경계요소법<sup>(9)</sup>
- 복합법<sup>(10)</sup>

위에 기술한 해법기법 이외에도 그림 3과 같이 직접법에 의한 근사해법이 실무에서 많이 사용되고 있다. 이 방법은 유한요소를 이용하여 구조물과 지반의 일부를 모델링하고 유한요소로 모델링한 지반의 외부경계에 점성감쇠(viscous damper) 또는 질량-감쇠-스프링을 설치하는 기법이다.

### 2.3 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램

지반-구조물 상호작용해석을 위하여 지난 30여년간 개발된 지반-구조물 상호작용해석용 프로그램은 매우 다양하다.<sup>(11)</sup> 이들 프로그램을 개발된 국가별로 간단히 소개하면 다음과 같다.

미국의 경우를 살펴보면, 70년대 중반에 구조물

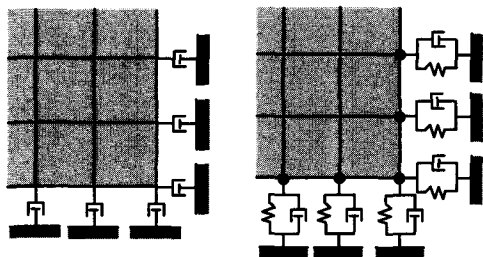


그림 3 실용적인 근사해석법

과 근역지반(near-field soil)을 유한요소로 모델링하고 원역지반(far-field soil)을 2차원 전달경계요소와 점성경계를 사용하여 표현하는 super FLUSH 프로그램이 있으며, 축대칭 전달경계요소를 이용하여 3차원 매입지반에 대한 임피던스를 구성하고 구조물과 지반을 입체요소로 모델링하는 SASSI 프로그램이 있다. FLUSH와 SASSI는 국내외에서 원자력발전소의 내진설계에 가장 많이 이용되는 프로그램이다. 이 외에도 경계요소법과 유사한 이론에 따라 기초의 임피던스를 구하고 이를 구조물 모델과 결합하여 해석을 수행하는 CLASSI 프로그램도 있다.

일본의 경우를 살펴보면, 지반의 원역을 근사적인 임피던스로 모델링하는 축대칭해석 프로그램 HASSI가 있다.

국내에서도 90년대 초반부터 개발되기 시작한 축대칭해석 프로그램 KIESSI가 사용되어 있다.<sup>(11, 12)</sup>

이외에도 여기서 언급되지 않은 국내외에서 개발된 프로그램이 다수 있다. 그리고 위에서 언급된 프로그램도 대부분 source program이 공개되어 있기 때문에 사용자에게 필요에 따라 다양하게 수정되어 사용되고 있다.

다양한 해석 프로그램이 있다는 것은 사용자 입장에서 보면 선택의 폭이 넓다는 장점도 되지만, 수학적 배경이 상이한 해석기술들이 동시에 사용되기 때문에 선택의 어려움과 함께 해석결과와의 일관성에 대한 의구심을 일으킬 소지가 있다. 이 같은 문제인식에서 80년대 후반과 90년대에 걸쳐 한국, 일본, 대만, 미국, 프랑스 5개국에서 20개 이상의 기관이 참여하여 대만의 Lotung과 Hualien에 원자력발전소 격납구조물의 1/4 축소모형을 건설하고 강제진동시험과 지진계측을 실시한 다음, 각 참여기관에서 사용하는 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램을 검증하고 서로 비교하여 각 프로그램의 적용기준을 마련하는 국제공동연구가 수행

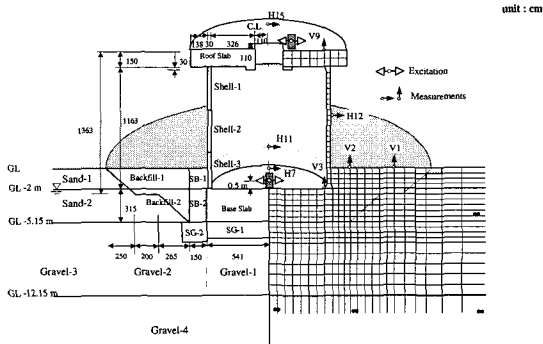
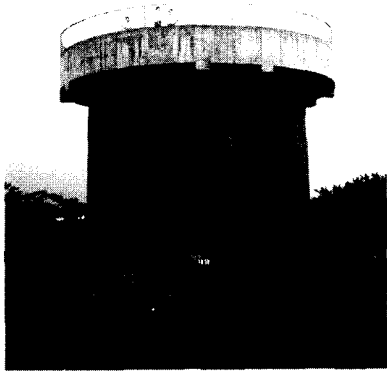


그림 4 대만 Hualien의 대형내진시험모델

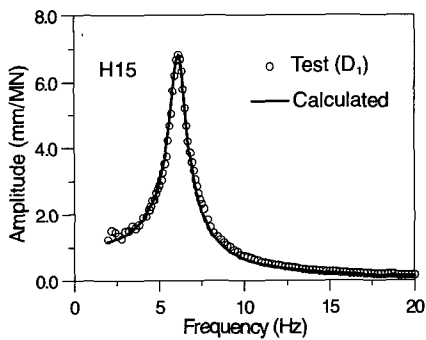


그림 5 Hualien시험모델의 계측치와 해석치

된 바 있다.<sup>(11)</sup>

그림 4는 Hualien 시험모델의 사진과 KIESSI 해석모델이며 그림 5는 해석결과와 시험결과 비교이다.<sup>(12, 13)</sup>

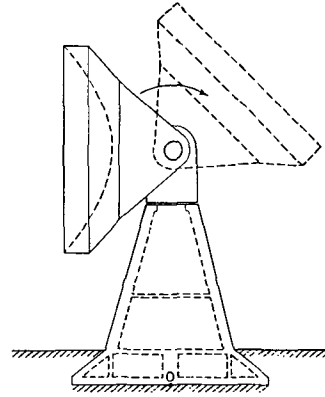


그림 6 레이더의 진동기초

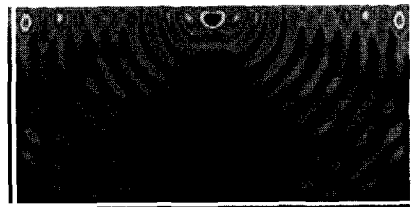


그림 7 말뚝항타에 의한 탄성과 전파 모사

### 3. 응용 분야

#### 3.1 진동기초설계

그림 6과 같이 기계 또는 구조물의 진동에 대한 합리적인 기초설계를 위하여 지반-구조물 상호작용 해석기술이 응용되고 있다.

#### 3.2 건설진동 및 교통진동의 환경영향평가

도시의 인구집중화와 함께 생활수준 향상으로 건설 및 교통수단의 운영과정에서 발생하는 환경진동에 대한 민원이 증가하고 있다. 이에 따라 진동영향평가를 미리 수행하여 진동수준을 예측하고 방진대책을 세우는 일이 점차 중요해지고 있다. 아울러 정밀제품을 생산하는 생산시설의 방진시공을 위해서도 지반-구조물의 진동해석이 중요하다고 할 수 있다. 그림 7과 8은 각각 범용 유한요소 해석 S/W와 SSI 해석용 S/W를 이용한 말뚝항

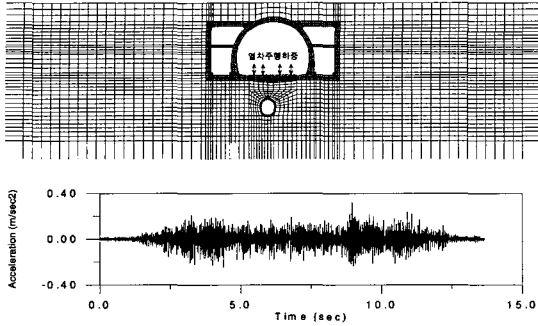


그림 8 지하철주행에 의한 통신구 진동해석

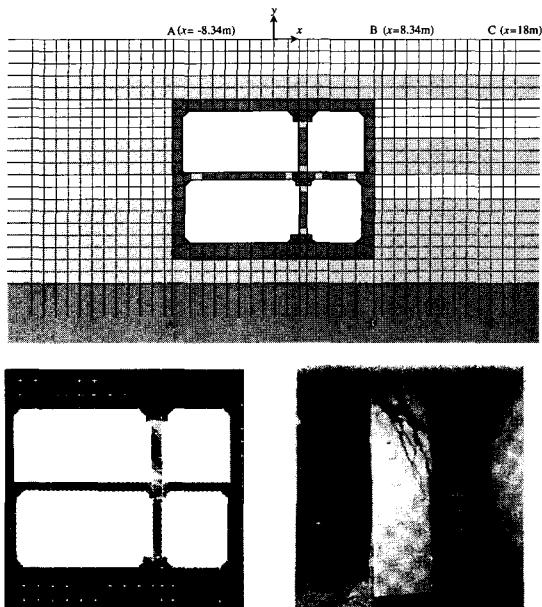


그림 9 지하철역사의 비선형해석 및 피해

타사 건설진동해석<sup>(14)</sup>과 지하철주행에 따른 열차 진동해석 사례이다.

### 3.3 내진설계

지반-구조물 상호작용해석을 위한 해석기술은 대부분 구조물의 내진설계를 위하여 개발되었다. 따라서 구조물의 내진설계에 응용되는 사례는 대단히 많다고 할 수 있다.<sup>(7, 11, 12, 14, 15, 16)</sup>

그림 9는 지하철역사의 비선형해석 결과로서

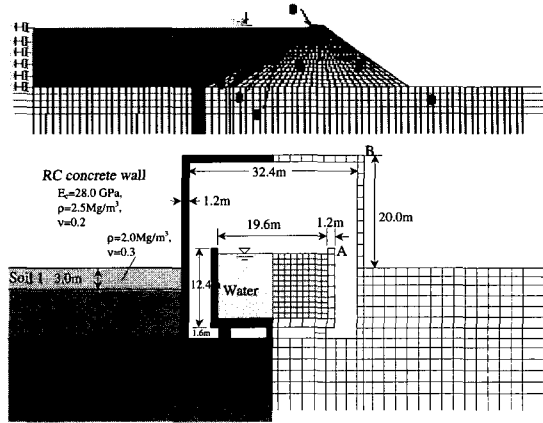


그림 10 2차원 유체-구조물-지반계의 해석

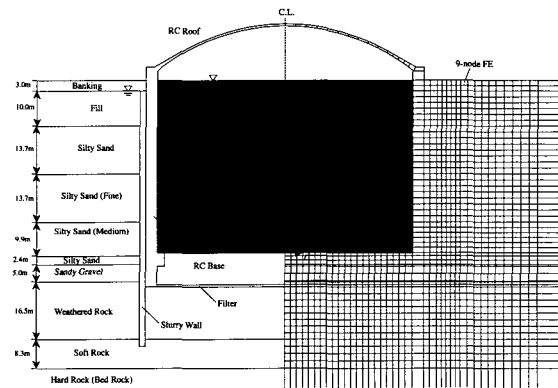


그림 11 LNG 저장탱크의 해석 사례



그림 12 지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량의 지진응답해석

1995년 발생한 일본 고베지진에 의한 실제 피해를 수치적으로 모사한 사례이다. 그림 10은 2차원 유체-구조물-지반 상호작용해석 사례로서 사력담과 사용후핵연료 중간저장시설에 대한 것이다. 그리고 그림 11은 철근콘크리트 LNG 저장구조물의 지진응답해석 사례이다.

마지막으로 그림 12는 장대교량의 지진응답해석

시 지반-구조물 상호작용을 고려한 사례이다.

#### 4. 맺음말

이 기사에서는 지반-구조물 상호작용해석에 사용되는 이론과 프로그램에 대해 간단히 소개하고 응용사례를 살펴보았다. 필자는 지반-구조물 상호작용 해석기술이 설계자와 사용자를 모두 만족시킬 수 있는 기술로 정착되기를 희망하면서 기사를 마무리하고자 한다.

#### 참고 문헌

- (1) Wolf, J. P., 1985, Dynamic Soil-structure Interaction Analysis, Prentice-Hall, Inc.
- (2) Apsel, T. J. and Luco, J. E., 1987, "Impedance Functions for Foundations Embedded in a Layered Medium: an Integral Equation Approach", Earthq. Eng. and Struct. Dyn., 15.
- (3) 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", Earthq. Eng. & Struct. Dyn., 29.
- (4) Yang, S. C. and Yun, C. B., 1992, "Axi-symmetric Infinite Elements for Soil-structure interaction analysis", Eng. Struct., 14.
- (5) Yun, C. B., Kim, J. M., and Hyun, C. H., 1995, "Axisymmetric Elastodynamic Infinite Elements for Multi-layered Half-space", Int' l J. Numer. Methods Eng., 38.
- (6) Kim, M. K., Lim, Y. M. and Rhee, J. W., 2000, Dynamic Analysis of Layered Half Planes by Coupled Finite and Boundary Elements", Eng. Struct., 22.
- (7) 김문겸, 임윤목, 김민규, 이종우, 2001, "다층 반무한 기본해를 이용한 자유장응답해석", 한국지진공학회논문집, 제 5 권.
- (8) Kim, D. K. and Yun, C. B., 2000, "Time Domain Soil-structure Interaction Analysis in Two Dimensional Medium Based on Analytical Frequency Dependent Infinite Elements", Int'l J. Numer. Meth. Eng.
- (9) Karabalis, D. L. and Beskos, D. E., 1984, "Dynamic Response of 3-D Rigid Surface Foundations by Time-domain Boundary Element Method", Earthq. Eng. & Struct. Dyn., 12.
- (10) Bernal, D. and Youssef, A., 1998, "A Hybrid Time Frequency Domain Formulation for Non-linear Soil-structure Interaction", Earthq. Eng. & Struct. Dyn., 27.
- (11) 한국원자력안전기술원, 1995, 원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발, 연구보고서 KINS/GR-099.
- (12) 윤정방, 김재민, 박경래, 최준성(1998), "유한요소 및 무한요소를 사용한 수직입사 지진파에 의한 축대칭 지반-구조물계의 진동해석", 대한토목학회논문집.
- (13) Yun, C. B., Choi, J. S. and Kim, J. M., 1999, "Identification of the Hualien Soil-structure Interaction System", Soil Dyn. & Earthq. Eng., 18 (No. 6).
- (14) 이종세, 임정진, 2002, "말뚝항타시 발생하는 응력파의 전파특성에 관한 수치해석적 연구", 2002년 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집.
- (15) 박형기, 조양희, 2001, "교량의 지진응답해석을 위한 말뚝기초의 등가 선형 강도행렬", 한국지진공학회논문집, 제 5 권.
- (16) 김용석, 2002, 지반의 비선형성을 고려한 암반지반에 의한 구조물의 수평방향 탄성거동, 한국지진공학회논문집, 제 6 권.