p-version 무한요소를 적용한 지반-구조물 상호작용해석의 계산속도 향상

임재성¹ · 손일민¹ · 김재민^{1*} · 서춘교²

¹전남대학교 해양토목공학과, ²한국전력기술(주)

A Speed-Up in Computing Time for SSI Analysis by p-version Infinite Elements

Jae-Sung Lim¹, Il-Min Son¹, Jae-Min Kim^{1*} and Choon-Gyo Seo²

¹Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, 59626, Korea

²KEPCO E&C, Gim-Chon, 39660, Korea

Abstract

In this study, we focused on a speed-up of KIESSI-3D program, which is based on FE-IE techniques, by introducing a p-version dynamic infinite element method. In order to evaluate performance of the KIESSI-3D, numerical analyses for eight real-scale SSI problems are carried out. We considered three types of KIESSI-3D numerical models whose radii of near-field soil region(r_0) are 1.2, 1.5, and 3.0 times of basemat radius of structure(R). In addition, SSI analyses using the SASSI2010 program are carried out used for comparison of accuracy and runtime against those of the KIESSI-3D. Numerical results show that the KIESSI-3D model of $r_0 = 1.2R$ is enough to give accurate solution. In view of the computing speed, the new KIESSI-3D was up to 25 times faster than the old KIESSI-3D.

Keywords : soil-structure interaction, p-version infinite element, seismic analysis, SASSI2010, KIESSI-3D

1. 서론

토목/건축 분야에서 건고한 암반이 아닌 지반에 건설된 구조물의 지진응답을 정확하게 평가하기 위해서는 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI)의 영향을 고려하여야 한다. 하지만 SSI 해석은 해석모델이 커질 경우 해석 시간이 크게 증가하는 애로점을 가지고 있다. 예를 들어서, 실규모 대형 SSI 해석 문제(이 논문 3장의 예제 E08 참조)를 SSI 전용 프로그램인 SASSI2010을 이용하고 해석모델의 상호작용절점 개수가 약 12,000개인 예제를 최신 워크스테이션(8-core CPU, 3.4GHz, 192GB RAM)을 이용하고 30개 진동수 이산점(frequency point)에 대해 지진응답 해석을 수행할 때, 총 해석시간이 약 3일(SASSI2010 기준) 정도 소요되어 비경제적이다. 따라서 해석시간은 대형 3차원

구조물의 SSI 해석을 다루는 실무분야에서 중요한 고려사항이고 해결해야 할 주요 이슈이다.

3차원 SSI 문제의 해석을 위한 연구는 유한-무한요소법(Zhao and Valliappan, 1993; Seo *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2010), 경계요소법(Beskos, 1997), PML(Basu and Chopra, 2003; 2004), PMDL(Lee *et al.*, 2016) 등이 다양하게 개발되어 왔다. 하지만, 현재 국내외 실무에서는 SASSI 프로그램의 고속솔버 버전인 SASSI2010, ACS SASSI, MTR/SASSI가 주로 이용되고 있다(Bechtel National Inc., 2011; Ghioceel Predictive Technologies, Inc., 2016; MTR/SASSI, 2015). 이들 프로그램은 유연체적법(flexible volume method)과 진동수영역 복소응답해석법을 사용하며, 미국 U.C. Berkeley의 Lysmer 교수 연구팀에 의해 1980년대 초에 최초로 개발된 3차원 SSI 해석 프로그램인 SASSI에

* Corresponding author:

Tel: +82-61-659-7245; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr
Received August 23 2016; Revised September 3 2016;
Accepted September 5 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

근거하고 있다(Lysmer *et al.*, 1981).

한편, 국내 연구팀에 의해 지난 20여년 동안 유한-무한 요소법을 적용한 SSI 해석기법이 연구되었다(Yang and Yun, 1992; Yun *et al.*, 1995; 2000; 2007; Seo *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2010). 이 연구를 기반으로 하여 3차원 문제의 진동수영역 SSI 해석을 수행할 수 있는 KIESSI-3D 프로그램이 개발되었다(Seo and Kim, 2012; Kim *et al.*, 2012).

무한요소에 대한 연구는 Ungless(1973)에 의해 시작 되었고, 1980년대에 2차원 및 축대칭 SSI 문제에 적용을 위한 연구(Medina and Penzien, 1982; Medina and Taylor, 1983; Chow and Smith, 1981)가 이루어졌으며, 1990년대 이후에 3차원 문제로 확장되었다(Zhao and Valliappan, 1993; Seo *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2010). 유한-무한요소법에서는 구조물과 근역지반(near-field soil)을 유한요소로 이산화하며, 원역지반(far-field soil)을 평행층 상지반(horizontally layered soil)으로 가정한 후 파동전달 특성을 잘 묘사할 수 있는 동적무한요소(dynamic infinite element)로 모형화한다. 동적무한요소의 계수행렬(질량, 강성, 감쇠)은 유한요소와 같이 대칭행렬이고, 유한요소의 계수 행렬과 조립하여 전체 행렬식 $[S]\{u\}=\{f\}$ 를 구성할 경우, 동적강성행렬 $[S]$ 는 희소행렬(sparse matrix) 특성을 갖는다. 따라서 유한-무한요소법에서는 PARDISO와 같은 희소솔버(sparse solver)를 적용하여 행렬식의 해를 고속으로 구할 수 있다(Seo and Kim, 2012; Kim *et al.*, 2012). 최근 저자들은 동적무한요소를 위한 p-version 형상함수와 수치적분법을 개발하여 기존 KIESSI-3D 프로그램에 장착하였다(Kim *et al.*, 2016). 이에 따라 KIESSI-3D 해석을 위한 근역지반의 모델링범위가 기존에는 기초반경(R)의 최소 2배 이상(3배 권장)이었으나 p-version 동적무한요소를 사용할 경우 1.2R 까지 줄일 수 있었다.

이 논문에서는 p-version 동적무한요소에 적용된 형상 함수의 핵심적인 개념에 대해 소개하였다. 그리고 말뚝기초 LNG 저장탱크 문제와 같이 플랜트/원전 분야의 8개 SSI 해석 예제를 구성하고, p-version 동적무한요소를 적용한 KIESSI-3D 프로그램과 고속솔버를 장착한 SASSI2010 프로그램을 이용하여 지진응답해석을 수행하였다. 두 프로그램으로 구한 구조물의 전달함수를 비교하여 해의 정확성을 살펴보았으며, 두 프로그램에 의한 해석시간의 차이를 비교하였다.

2. KIESSI-3D 프로그램의 동적무한요소 개선

2.1 원통형좌표계에서 모드 해

원통형좌표계 (r, θ, z) 에서 동적하중에 대한 탄성체의 진동수영역 변위함수벡터 $\mathbf{u}(r, \theta, z, \omega)$ 는 다음과 같이 원주 방향 Fourier 급수로 전개하여 나타낼 수 있다(Tzong and Penzien, 1983; Liou, 1989; Yun *et al.*, 1995).

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} [\Theta_n(\theta)] \mathbf{u}_n(r, z, \omega) + \sum_{n=0}^{\infty} [\hat{\Theta}_n(\theta)] \hat{\mathbf{u}}_n(r, z, \omega) \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, \omega) = \langle u_r(r, \theta, z, \omega), u_\theta(r, \theta, z, \omega), u_z(r, \theta, z, \omega) \rangle^T \quad (2a)$$

$$\mathbf{u}_n(r, z, \omega) = \langle u_{rn}(r, z, \omega), u_{\theta n}(r, z, \omega), u_{zn}(r, z, \omega) \rangle^T \quad (2b)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_n(r, z, \omega) = \langle \hat{u}_{rn}(r, z, \omega), \hat{u}_{\theta n}(r, z, \omega), \hat{u}_{zn}(r, z, \omega) \rangle^T \quad (2c)$$

$$[\Theta_n(\theta)] = \text{diag}(\cos n\theta, \sin n\theta, \cos n\theta) \quad (2d)$$

$$[\hat{\Theta}_n(\theta)] = \text{diag}(\sin n\theta, -\cos n\theta, \sin n\theta) \quad (2e)$$

; $\mathbf{u}_n(r, z, \omega)$ 와 $\hat{\mathbf{u}}_n(r, z, \omega)$ 는 각각 $\theta=0$ 평면에 대칭인 변위 성분과 비대칭 변위성분: $u_r, u_{rn}, \hat{u}_{rn}$ 은 반경방향 변위함수; $u_\theta, u_{\theta n}, \hat{u}_{\theta n}$ 는 원주방향 변위함수; $u_z, u_{zn}, \hat{u}_{zn}$ 는 수직방향 변위함수이다. 수식 전개 편의를 위해 이후 수식에서는 식 (1)과 식 (2)에서 아래첨자 n 을 생략하겠다. 즉,

$$\mathbf{u}_n(r, z, \omega), \hat{\mathbf{u}}_n(r, z, \omega) \rightarrow \mathbf{u}(r, z, \omega) \quad (3)$$

평행층상반무한 원역지반에서 변위 해는 다음과 같이 물체 파성분과 표면파성분의 중첩으로 나타난다(Richart *et al.*, 1970; Karasudhi, 1991).

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \mathbf{u}_{bw}(\mathbf{x}, \omega) + \mathbf{u}_{sw}(\mathbf{x}, \omega) \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{u}_{bw}(\mathbf{x}, \omega)$ =물체파성분이며 $\mathbf{u}_{sw}(\mathbf{x}, \omega)$ =표면파성분이다.

표면파성분의 변위함수벡터 $\mathbf{u}_{sw}(r, z, \omega)$ 는 분산해석(dispersion analysis)을 통해 표면파의 파수(wavenumber)가 구해진 경우, 다음과 같은 모드중첩으로 나타낼 수 있다(Tzong and Penzien, 1983; Liou, 1989).

$$\mathbf{u}_{sw}^{(\ell)}(r, z, \omega) = \sum_{m=1}^{N_{sw}(\omega)} [\Phi_m^{(\ell)}(r, z, \omega)] \mathbf{a}_m^{(\ell)}(\omega), \ell = 1, 2, \dots, N_{HL} \quad (5a)$$

$$\mathbf{u}_{sw}^{(h)}(r, z, \omega) = \sum_{m=1}^{N_{sw}(\omega)} [\Phi_m^{(h)}(r, z, \omega)] \mathbf{a}_m^{(h)}(\omega) \quad (5b)$$

여기서,

$$[\Phi_m^{(\ell)}(r, z, \omega)] = \mathbf{H}_m(r, \omega) \mathbf{Q}_m^{(\ell)}(\omega) [e_m^{(\ell)}(z, \omega)] \quad (6a)$$

$$[\Phi_m^{(h)}(r, z, \omega)] = \mathbf{H}_m(r, \omega) \mathbf{Q}_m^{(h)}(\omega) [e_m^{(h)}(z, \omega)] \quad (6b)$$

$$[\mathbf{H}_m(r, \omega)] = \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{n-1}^{(2)}(k_m r) & 0 & 0 \\ 0 & H_n^{(2)}(k_m r) & 0 \\ 0 & 0 & H_{n+1}^{(2)}(k_m r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (8a)$$

$$[e_m^{(\ell)}(z, \omega)] = \text{diag}(e^{-\lambda_{pm}|z|}, e^{\lambda_{pm}|z|}, e^{-\lambda_{sm}|z|}, e^{\lambda_{sm}|z|}, e^{-\lambda_{sm}|z|}, e^{\lambda_{sm}|z|}) \quad (8b)$$

$$[e_m^{(h)}(z, \omega)] = \text{diag}(e^{-\lambda_{pm}|z|}, e^{-\lambda_{sm}|z|}, e^{-\lambda_{sm}|z|}) \quad (8b)$$

$$\lambda_{pm} = \sqrt{(k_m)^2 - (\omega/V_{pl})^2}, \quad \lambda_{sm} = \sqrt{(k_m)^2 - (\omega/V_{sl})^2} \quad (9)$$

여기서, $N_{sw}(\omega)$ = 표면파의 개수; N_{HL} = 평행층상 수평층의 개수; $H_n^{(2)}(k_m r)$ 은 n -차 제2종(second kind) Hankel 함수; V_{sl} 과 V_{pl} 은 각각 지층의 S-파와 P-파 속도; $\mathbf{a}_m^{(\ell)}(\omega)$ 과 $\mathbf{a}_m^{(h)}(\omega)$ 은 수평층과 반무한층에서 응답의 진폭벡터; $\mathbf{Q}_m^{(\ell)}(\omega)$ 와 $\mathbf{Q}_m^{(h)}(\omega)$ 는 k_m 과 λ_{pm} , λ_{sm} 로 이루어진 계수행렬; k_m 은 m -번째 표면파 파수로서 원역지반의 층상지반조건과 지표면에서 응력이 영(0)이라는 조건을 적용한 고유치해석을 통해 구한다(Liou, 1989).

2.2 Hankel 함수의 급수 표현

Hankel 함수는 다음과 같은 이항전개(binomial expansion)를 통하여 $1/kr$ 의 무한급수 형태로 나타낼 수 있다(Kornenev, 2002).

$$H_n^{(2)}(kr) = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-i(kr - n\pi/2 - \pi/4)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(n, m)}{(2ikr)^m} \quad (10)$$

여기서,

$$(n, m) = \frac{\Gamma(n+m+1/2)}{m! \Gamma(n-m+1/2)} \quad (11)$$

$\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이다. 식 (10)에서 첫 번째 항만 취하면 다음과 같이 $kr \rightarrow \infty$ 일 때 근사식(asymptotic representation)이 된다.

$$H_n^{(2)}(kr) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-i(kr - n\pi/2 - \pi/4)} \quad (12)$$

식 (12)의 근사식은 기존 동적무한요소의 파동함수를 유도하는데 널리 사용되어 왔다(Medina and Penzien, 1982; Medina and Taylor, 1983; Yang and Yun, 1992; Zhao

and Valliappan, 1993; Yun *et al.*, 1995; Seo *et al.*, 2007).

이제 식 (12)를 식 (5)에 대입하면 $r-z$ 평면에서 표면파성분의 변위함수벡터 $\mathbf{u}_{sw}(r, z, \omega)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_{sw}(r, z, \omega) = \sum_{m=1}^{N_{sw}(\omega)} \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \{ \psi_{m\ell}(z, \omega) \} \frac{1}{(k_m r)^\ell} \right) \sqrt{\frac{1}{k_m r}} e^{-ik_m r} \quad (13)$$

여기서, $\{ \psi_{m\ell}(z, \omega) \}$ 는 표면파성분 변위함수의 수직방향 진폭벡터이다.

한편, 물체파에 의한 변위함수는 무한대 방향으로 구형(spherical) 파면(wave front)을 가지며 다음과 같은 spherical Hankel 함수 $h_n^{(2)}(k\bar{R})$ 로 정의된다.

$$h_n^{(2)}(k\bar{R}) = \frac{1}{\sqrt{k\bar{R}}} H_n^{(2)}(k\bar{R}) \quad (14)$$

여기서, $\bar{R} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 이다. 그리고 이 연구에서 고려하는 수평층상지반의 수평층에서 z 좌표값은 유한하므로 수평층에서 물체파의 해는 $h_n^{(2)}(kr)$, ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$)로 근사할 수 있다(Yun *et al.*, 1995). 따라서 식 (14)와 식 (13)을 참고하면 수평층에서 물체파성분의 변위함수벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_{bw}(r, z, \omega) = \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \{ \varphi_{m\ell}^{(s)}(z, \omega) \} \frac{1}{(k_s r)^\ell} \right) \frac{1}{k_s r} e^{-ik_s r} + \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \{ \varphi_{m\ell}^{(p)}(z, \omega) \} \frac{1}{(k_p r)^\ell} \right) \frac{1}{k_p r} e^{-ik_p r} \quad (15)$$

여기서, $\{ \varphi_{m\ell}^{(s)}(z, \omega) \}$ 와 $\{ \varphi_{m\ell}^{(p)}(z, \omega) \}$ 는 각각 S-파와 P-파 변위함수 성분의 수직방향 진폭벡터이다.

2.3 KIESSI-3D 프로그램의 동적무한요소 변위형상함수

KIESSI-3D에서 원역지반은 Fig. 1과 같이 HIE(horizontal infinite element), VIE(vertical infinite element), CIE(corner infinite element)를 사용하여 모델링한다.

동적무한요소의 좌표계 r 과 z 를 다음과 같이 사상함수(mapping function)로 나타낼 수 있다.

Fig. 1 Modeling of 3D soil-structure interaction system by KIESSI-3D program using FE-IE techniques

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = r_0(1 + \xi), \quad \xi \in [0, \infty) \quad (16)$$

$$z = -z_0(1 + \zeta), \quad \zeta \in [0, \infty)$$

여기서, r_0 는 원점에서 수평무한요소(HIE)까지 수평거리, z_0 는 원점에서 수직무한요소(VIE)까지 수직거리, ξ 와 ζ 는 0에서 ∞ 까지 범위를 갖는 자연좌표계(natural coordinate)이다.

2.3.1 기존 KIESSI-3D의 동적무한요소 변위형상함수

기존 KIESSI-3D에서 동적무한요소의 파동함수는 식 (17)과 같이 Hankel 함수를 첫 번째 항으로 근사하여 유도되었다. 이 근사식은 $k_y r$ 이 매우 클 때 성립하게 된다.

$$H_n^{(2)}(k_m r) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi k_m r}} e^{-i(k_m r - n\pi/2 - \pi/4)}, \quad k_m r \rightarrow \infty \quad (17)$$

이 식에서 $1/\sqrt{k_m r}$ 을 지수함수로 근사하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{k_m r}} \sim e^{-\alpha \xi} \quad (18)$$

결과적으로 Hankel 함수는 식 (19)와 같이 1개의 파동 함수로 근사할 수 있다.

$$H_n^{(2)}(k_m r) \approx a_0 f_m^{(0)}(\xi) \quad (19)$$

여기서,

$$f_m^{(0)}(\xi) = e^{-(\alpha + ik_m r_0)\xi} \quad (20)$$

따라서 기존 KIESSI-3D 동적무한요소의 변위근사를 위한 파동함수는 다음과 같은 함수공간(function space)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{W}_0^{(\text{H})}(\mathbf{N}_{\text{hj}}) \equiv \quad (21\text{a})$$

$$\left\{ e^{-(\alpha_s + ik_s r_{0j})\xi}, e^{-(\alpha_p + ik_p r_{0j})\xi}, \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{hj}-2} \right\}$$

$$\mathbf{W}_0^{(v)}(\mathbf{N}_{vj}) \equiv \quad (21b)$$

$$\left\{ e^{-(\alpha_s + i k_s z_0) \zeta}, e^{-(\alpha_p + i k_p z_0) \zeta}, \right. \\ \left. \left\{ e^{-z_0 \sqrt{(k_m)^2 - (k_s)^2} \zeta}, e^{-z_0 \sqrt{(k_m)^2 - (k_p)^2} \zeta} \right\}_{m=1}^{N_{vj}-2} \right\}$$

여기서, N_{hj} = 절점 j 에서 수평과동함수의 개수, N_{vj} = 절점 j 에서 수직과동함수의 개수; r_{0j} 는 무한요소 절점 j 의 반경 좌표이다.

그리고 기존 KIESSI-3D 동적무한요소에서는 식 (18)의 기하감쇠지수 α 값으로 물체파성분에 대해 0.75, 표면파성분에 대해 0.25를 사용하였다(Yang and Yun, 1992; Yun *et al.*, 1995, 2007; Ryu *et al.*, 2010). 이 α 값을 적용하면 저진동수 응답을 정확하게 얻을 수 있다(Kim *et al.*, 2016). 이와 같은 기하감쇠모형을 **D0**로 명명하였다. 즉,

$$\mathbf{D0} \equiv \{\alpha_s = 0.75, \alpha_p = 0.75, \alpha_R = 0.25\} \quad (22)$$

2.3.2 개선된 KIESSI-3D의 p-version 동적무한요소 변위형상함수

p-version 동적무한요소의 파동함수로 식 (17)과 같은 첫째 항뿐만 아니라 $1/k_m r$ 급수의 고차항도 사용한다.

$$H_n^{(2)}(k_m r) = \quad (23)$$

$$\sqrt{\frac{2}{\pi k_m r}} e^{-i(k_m r - n\pi/2 - \pi/4)} (b_0 + b_1 \frac{1}{k_m r} + b_2 \frac{1}{(k_m r)^2} + \dots)$$

이 근사식에서도 $1/\sqrt{k_m r}$ 을 식 (18)과 같이 지수함수로 근사하였다. 결과적으로 파동함수는 절점 j 에서 식 (24)와 같이 exponential 함수와 $1/(1+\xi)$ 의 다항식으로 표현할 수 있다.

$$H_n^{(2)}(k_m r) \approx a_0 f_{mj}^{(0)}(\xi) + a_1 f_{mj}^{(1)}(\xi) + \dots + a_{p-1} f_{mj}^{(p-1)}(\xi) \quad (24)$$

여기서,

$$f_{m_i}^{(0)}(\xi) = e^{-(\alpha + ik_m r_{0j})\xi} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} f_{mj}^{(1)}(\xi) &= \frac{1}{1+\xi} e^{-(\alpha + ik_m r_{0j})\xi} \\ &\vdots \\ f_{mj}^{(p-1)}(\xi) &= \frac{1}{(1+\xi)^{p-1}} e^{-(\alpha + ik_m r_{0j})\xi} \end{aligned}$$

여기서, r_{0j} 는 절점 j 의 원주거리이다. 위와 같이 근사함으로써 $k_m r_{0j}$ 이 크지 않을 때도 파동함수가 이론적인 Hankel 함수를 잘 근사할 수 있다.

지반을 수평층상반무한 지반으로 가정할 때 수평층의 거동을 지배하는 성분은 Rayleigh-파와 같은 표면파이다. 따라서 변위형상함수로 다음과 같은 표면파성분에 대한 p-version 형식의 수평파동함수공간 $\mathbf{W}_1^{(H)}$ 를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1^{(H)}(N_{hj}) &= \left\{ \left\{ \frac{1}{(1+\xi)^{\ell-1}} \right\}_{\ell=1}^{N_{cyc}} \otimes \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \right\} \quad (26) \\ &= \left\{ \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \frac{1}{1+\xi} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \dots, \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{(1+\xi)^{N_{cyc}-1}} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \right\} \end{aligned}$$

여기서, $\otimes$ 는 tensor 곱 연산자(Bachman and Narici, 1988); $N_{cyc} = N_{hj}/N_{sw} + 1$ 로서 표면파 성분에 대해 다항식 감쇠함수의 최대 개수; N_{sw} = 해석을 수행하는 진동수에서 존재하는 표면파의 개수이다.

또한, 동적무한요소에서 수평변위함수로 파동함수공간 $\mathbf{W}_1^{(H)}$ 에 S-파 성분을 추가한 $\mathbf{W}_2^{(H)}$ 를 생각할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_2^{(H)}(N_{hj}) &\quad (27) \\ &\equiv \left\{ e^{-(\alpha_s + ik_s r_{0j})\xi}, \left\{ \left\{ \frac{1}{(1+\xi)^{\ell-1}} \right\}_{\ell=1}^{N_{cyc}} \otimes \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \right\} \right\} \\ &= \left\{ \begin{aligned} &e^{-(\alpha_s + ik_s r_{0j})\xi}, \\ &\left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \frac{1}{1+\xi} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \dots, \\ &\frac{1}{(1+\xi)^{N_{cyc}-1}} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

여기서, $N_{cyc} = (N_{hj} - 1)/N_{sw} + 1$ 이다.

그리고 $\mathbf{W}_1^{(H)}$ 에 S-파와 P-파 성분을 모두 추가한 식 (28)과 같은 $\mathbf{W}_3^{(H)}$ 을 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj}) &\quad (28) \\ &\equiv \left\{ \left\{ \left\{ \frac{1}{(1+\xi)^{\ell-1}} \right\}_{\ell=1}^{N_{cyc}} \otimes \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \right\}, \right. \\ &\quad \left. \left\{ e^{-(\alpha_s + ik_s r_{0j})\xi}, e^{-(\alpha_p + ik_p r_{0j})\xi} \right\} \right\} \end{aligned}$$

$$= \left\{ \left\{ e^{-(\alpha_s + ik_s r_{0j})\xi}, e^{-(\alpha_p + ik_p r_{0j})\xi} \right\}, \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \frac{1}{1+\xi} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}}, \dots, \frac{1}{(1+\xi)^{N_{cyc}-1}} \left\{ e^{-(\alpha_R + ik_m r_{0j})\xi} \right\}_{m=1}^{N_{sw}} \right\}$$

여기서, $N_{cyc} = (N_{hj} - 2)/N_{sw} + 1$ 이다.

마지막으로 수평층에서는 표면파 성분이 지배적이고 반무한층에서는 물체파성분이 중요하다는 사실(Richart *et al.*, 1970; Chow and Smith, 1981; Liou, 1989)에 착안하여, 수평층에서는 물체파를 고려하지 않는 $\mathbf{W}_1^{(H)}(N_{hj})$ 을 사용하고 반무한층의 수평방향 파동은 물체파가 포함된 $\mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj})$ 을 사용한 **W4** 함수공간을 구성하였다.

동적무한요소의 형태별(HIE, VIE, CIE)로 적용되는 파동함수를 Table 1에 정리하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 총 4개 종류의 p-version 파동함수공간(**W1**, **W2**, **W3**, **W4**)을 고려할 수 있다(Fig. 2 참조).

Table 1 Types of infinite elements depending on wave functions

IE type	HIE	VIE	CIE	Remarks
W1	$\mathbf{W}_1^{(H)}(N_{hj})$	$\mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	$\mathbf{W}_1^{(H)}(N_{hj}) \otimes \mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	
W2	$\mathbf{W}_2^{(H)}(N_{hj})$	$\mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	$\mathbf{W}_2^{(H)}(N_{hj}) \otimes \mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	
W3	$\mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj})$	$\mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	$\mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj}) \otimes \mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	
W4	$\mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj})$	$\mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$	$\mathbf{W}_3^{(H)}(N_{hj}) \otimes \mathbf{W}_0^{(V)}(N_{vj})$

Fig. 2 Horizontal wave functions of proposed p-version infinite element(**W1**, **W2**, **W3**, and **W4**) in comparison with **W0**.

이 연구에서는 기존의 연구결과와 몇 가지 수치시험을 통해 기존 기하감쇠모델인 **D0**이외에 다음과 같은 세 가지 형태의 기하감쇠모델을 고려하였다.

- **D1**: 식 (24)의 **D0**에서 수치적인 안정성을 높이기 위해 α_r 을 0.50 보다 큰 0.60으로 정하고 $\alpha_p \neq \alpha_s$ 가 되도록 α_p 를 α_R 과 α_s 의 중간 값인 0.675으로 조정한 기하감쇠 모델이다.

- **D2**: Medina 등(Medina and Penzien, 1982; Medina and Taylor, 1983)에 의해 제안된 기하감쇠모델로서 모든 계수($\alpha_s, \alpha_p, \alpha_R$)가 진동수 종속이다.
- **D3**: **D2**모델이 저진동수영역에서 Gauss-Laguerre 적분법의 효과적인 적용을 위한 조건인 $\alpha \geq 0.125$ 을 보장하기 위해 **D2**모델에서 α_R 의 최솟값으로 **D1**모델과 동일한 0.25를 적용하였다. 이 모델은 영 진동수(zero frequency) 부근에서는 **D1**모델과 유사한 거동을 보인다는 점을 제외하고는 **D2**모델과 동일하다.

$$\mathbf{D1} \equiv \{\alpha_s = 0.75, \alpha_p = 0.675, \alpha_R = 0.60\} \quad (29a)$$

$$\mathbf{D2} \equiv \{\alpha_s = \text{Re}(k_s r_{0j}), \alpha_p = \text{Re}(k_p r_{0j}), \alpha_R = \text{Re}(k_m r_{0j})\} \quad (29b)$$

$$\mathbf{D3} \equiv \left\{ \begin{array}{l} \alpha_s = \max\left(\frac{0.75}{2.4}, \text{Re}(k_s r_{0j})\right), \\ \alpha_p = \max\left(\frac{0.675}{2.4}, \text{Re}(k_p r_{0j})\right), \\ \alpha_R = \max\left(\frac{0.60}{2.4}, \text{Re}(k_m r_{0j})\right) \end{array} \right\} \quad (29c)$$

여기서, 유의할 사항은 **D1**과 **D2**는 공간적인 감쇠 특성이 다르다는 점이다. 파동함수의 공간감쇠비(spatial attenuation ratio) ζ_g 를 $\zeta_g = \frac{\alpha}{k r_0}$ 로 정의하면, **D1**모델의 경우 S-파에 대한 감쇠비 ζ_{gs} 는 $\zeta_{gs} = \frac{\alpha_s}{k_s r_0} = \frac{1}{\omega} \frac{\alpha_s c_s}{r_0}$ 이므로 저진동수영역에서 공간감쇠가 큰 반면 진동수가 증가함에 따라 감쇠비가 기하급수적으로 감소한다. 반면 **D2**모델의 공간감쇠비는 $\zeta_{gs} = \frac{\alpha_s}{k_s r_0} = \frac{k_s r_0}{k_s r_0} = 1$ 이므로 모든 진동수영역에서 일정한 감쇠비를 가진다. 따라서 **D2**모델은 고진동수영역에서 수치적인 안정성이 **D1**모델에 비해 우수하다. **D2**모델은 저진동수영역에서 **D1**모델을 사용하고 고진동수영역에서 **D2**모델을 사용한 하이브리드 모델로서 모든 진동수영역에서 성능이 우수하였다.

Table 1에 정리한 4개의 파동함수공간(**W1**, **W2**, **W3**, **W4**)과 3개 기하감쇠모델(**D1**, **D2**, **D3**)을 조합하면 총 12개 다른 형태의 p-version 파동함수공간(**W1D1**, **W1D2**, **W1D3**,

W2D1, **W2D2**, **W2D3**, **W3D1**, **W3D2**, **W3D3**, **W4D1**, **W4D2**, **W4D3**)을 구성할 수 있다.

12개 형태의 p-version 동적무한요소의 성능을 수치적으로 평가한 결과, **W4D3** 동적무한요소는 기존의 동적무한요소에 비해 해의 정확도와 안정성이 뛰어날 뿐만 아니라 근역지반의 모델링범위를 대폭 줄이더라도 매우 우수한 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2016). 그리고 수평방향 파동함수의 개수 N_{hj} 와 수평방향 파동함수의 개수 N_{vj} 는 4를 사용하면 충분한 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2016). 다음 장에 제시한 KIESSI-3D의 수치예제는 모두 $N_{hj} = N_{vj} = 4$ 인 **W4D3** 동적무한요소를 사용하여 얻은 결과이다.

3. SASSI2010의 지진응답 및 계산속도와 비교

이 연구에서는 p-version 동적무한요소를 적용한 KIESSI-3D 프로그램을 이용하여 지진응답해석을 수행하였으며, SASSI2010 프로그램에 의한 해석결과와 비교하였다. 이를 위하여 Table 2와 같은 8개 예제를 마련하였다. 이 예제 문제들은 실무에서 발생할 수 있는 SSI 문제를 대표할 수 있다. 이 예제의 KIESSI-3D 및 SASSI2010 해석모델은 Fig. 3~Fig. 10과 같다. 이 해석모델을 작성할 때, 유한요소 체눈(mesh)의 크기(h)는 SSI 해석에서 요구되는 파동전달 조건인 식 (30)이 만족되도록 하였다.

$$h \leq \frac{1}{5} \frac{V_{s1}}{f_{\max}} \quad (30)$$

여기서, V_{s1} 는 자유장지반의 표층 전단파속도이며, $f_{\max}$ 는 해석에서 고려하는 최대진동수(Hz)이다. 그리고 SASSI2010 해석모델에서 굴착지반과 구조물의 체눈은 KIESSI-3D 해석 모델과 동일하다. 지면관계상 각 예제문제의 세부 재료물 성치는 생략하였으며 세부 정보는 Kim 등(2016)에 제시되어 있다.

Table 2 Example problems for SSI analyses to earthquake load

ID	Problem description	Total number of nodes of KIESSI-3D model			Total number of interaction nodes of SASSI2010 model
		3.0R	1.5R	1.2R	
E01	Square mat on ground surface	112,754	31,154	18,754	529
E02	Embedded square foundation	134,982	36,614	21,302	5,625
E03	NPP structure in SASSI manual	39,809	16,769	12,161	1,218
E04	Hualien LSST structure	31,150	13,959	11,871	2,347
E05	SMART NPP structure	126,918	42,692	18,972	2,661
E06	APR1400 NPP structure	85,174	28,676	23,788	2,196
E07	LNG storage tank on mat foundation	75,661	22,349	15,821	545
E08	Pile-supported LNG storage tank	45,803	22,649	19,589	12,625

Fig. 3 SSI problem E01: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 4 SSI problem E02: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 5 SSI problem E03: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 6 SSI problem E04: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 7 SSI problem E05: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 8 SSI problem E06: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 9 SSI problem E07: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 10 SSI problem E08: (a) problem description, (b) KIESSI-3D model, (c) SASSI2010 excavated soil model, and (d) SASSI2010 structure model

Fig. 11 Transfer functions for horizontal response at the top of structure for the 8 examples to vertically incident SV-wave

Table 3 Specifications of PC used in analysis

CPU	Intel Xeon E5-2687W (8 cores)
No. of Processors	2
Processor Clock Speed	3.40GHz
RAM	192GB
Operating System	Windows 7(64bit)

수치 계산은 Table 3과 같은 제원의 워크스테이션을 이용하여 수행하였다. KIESSI-3D의 행렬식 솔버는 Intel MKL에 내장되어 있는 PARDISO 직접희소솔버(direct sparse solver)이다. 그리고 SASSI2010 프로그램도 병렬처리 행렬식 솔버를 사용하는 것으로 파악되었으며, 윈도우의 작업관리자를 통해 확인한 결과, 8개의 코어를 동시에 사용하는 것으로 나타났다. 따라서 KIESSI-3D 해석에서도 병렬처리를 위해 사용한 코어의 개수를 8개로 설정하여 동일한 조건에서 해석속도를 비교할 수 있도록 하였다.

SASSI2010과 KIESSI-3D 프로그램으로 구한 예제 문제의 전달함수를 비교하여 Fig. 11에 정리하였다. 이때 KIESSI-3D의 응답은 근역지반의 모델링범위(기초반경(R)의 1.2배, 1.5배, 3.0배)에 따라 계산하였다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이, p-version 동적무한요소를 적용한 KIESSI-3D 프로그램을 사용할 경우 지반의 모델링범위가 기초반경의 1.2배만 되더라도 매우 정확한 지진응답해석 결과를 얻을 수 있다.

그리고 SASSI2010과 KIESSI-3D 프로그램에 의한 예제 문제의 해석시간을 Table 4에 비교하였다. 두 프로그램의 이론적 기법이 다르기 때문에 문제에 따라 해석속도의 편차가 크게 나타날 수 있다. 일반적으로 SASSI2010 해석 계산 속도는 지표면 및 매입부분 지반을 모델링하는 상호작용 절점의 개수에 반비례한다. 따라서 예제 E01 또는 E07과 같이 지표면에 설치된 얇은 기초인 경우 상대적으로 SASSI2010의 해석속도가 빠르며, 예제 E03 또는 E08과 같이 구조물이 지반에 매입된 부분이 많은 문제에서 SASSI2010의 해석속도가 기하급수적으로 느려진다. 반면, 유한요소법을 근간으로

한 KIESSI-3D의 계산시간은 총 절점의 개수에 비례하며 구조물의 매입여부와는 관계가 없었다.

4. 결 론

이 연구에서는 p-version 동적무한요소의 변위형상함수로 사용된 파동함수의 유도과정을 기술하였다. 그리고 이에 기반한 동적무한요소를 KIESSI-3D 프로그램에 장착하고, 실무에서 발생할 수 있는 8가지 SSI 문제에 대하여 지진하중에 대한 구조물 응답의 전달함수를 계산하였으며, p-version 동적무한요소로 인한 해석속도 향상에 대해 고찰하였다. 해석결과와 정확성 및 해석속도를 SASSI2010 해석 결과와 비교하였다. 비교 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) p-version 동적무한요소를 사용함으로써 KIESSI-3D 해석모델의 근역지반 모델링영역을 기초반경의 3.0배에서 1.2배로 줄일 수 있었다. 이 덕분에 KIESSI-3D 프로그램의 해석속도를 기존 버전에 비해 3.4배~25.6배 높일 수 있었다.
- (2) KIESSI-3D 프로그램에 의해 구한 구조물의 응답은 SASSI2010과 거의 동일하였다. 그리고 해석속도 측면에서는, 얇은기초인 경우 KIESSI-3D는 SASSI2010 프로그램에 비해 2.5배 느린 반면, 문힌기초 또는 깊은 기초인 경우 KIESSI-3D는 SASSI2010에 비해 6.5배~2913배 빠른 것으로 나타났다. 따라서 KIESSI-3D는 문힌기초와 깊은기초 구조물의 SSI 해석에 매우 효과적으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원 창의도전연구(14CTAP-C077514-01)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

Table 4 Comparison of runtime per one frequency point* (unit in minutes)

ID	SASSI2010 (8 cores)	KIESSI-3D (8 cores)			SASSI2010 / KIESSI-3D(1.2R)	KIESSI-3D (3.0R/1.2R)	Foundation Type
		3.0R	1.5R	1.2R			
E01	0.06	1.672 (0.04)	0.283 (0.21)	0.143 (0.42)	0.4	11.7	Shallow
E02	14.75	2.356 (6.3)	0.314 (47.0)	0.164 (89.9)	89.9	14.4	Embedded
E03	0.39	0.273 (1.4)	0.083 (4.7)	0.060 (6.5)	6.5	4.6	Embedded
E04	3.83	0.108 (35.5)	0.037 (103.5)	0.032 (119.7)	119.7	3.4	Embedded
E05	7.02	2.174 (3.2)	0.284 (24.7)	0.085 (82.6)	82.6	25.6	Embedded
E06	1.32	0.935 (1.4)	0.220 (6.0)	0.175 (7.5)	7.5	5.3	Embedded
E07	0.07	0.695 (0.1)	0.163 (0.4)	0.115 (0.6)	0.6	6.0	Shallow
E08	151.5	0.218 (695.0)	0.070 (2164.4)	0.052 (2913.7)	2913.7	4.2	Deep (Pile)

*Values in parenthesis are runtime ratios of SASSI2010 to KIESSI-3D.

References

- Bachman, G., Narici, L. (1988) Functional Analysis, 2nd edition, Dover Publications.
- Basu, U., Chopra, A.K. (2003) Perfectly Matched Layers for Time-Harmonic Elastodynamics of Unbounded Domains: Theory and Finite-element Implementation, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 192, pp.1337~1375.
- Basu, U., Chopra, A.K. (2004) Perfectly Matched Layers for Transient Elastodynamics of Unbounded Domains, *Int. J. Num. Methods Eng.*, 59, pp.1039~1074.
- Bechtel National Inc. (2011) User's Manual for SASSI2010, Version 1.0, November
- Beskos, D.E. (1997) Boundary Element Methods in Dynamic Analysis: Part II (1986-1996), *Applied Mechanics Review*, 50, pp.149~197.
- Chow, Y.K., Smith, I.M. (1981) Static and Periodic Infinite Solid Elements, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 17, pp.503~526.
- Ghiocel Predictive Technologies, Inc. (2016) User Manual for ACS SASSI - An Advanced Computational Software for 3D Dynamic Analysis Including Soil-Structure Interaction, Version 3.0.
- Karasudhi, P. (1991) Foundation of Solid Mechanics, Kluwer Academic Publishers.
- Kim, J.M. et al. (2016) Development of World-Class Fundamental Technologies for Nonlinear Fluid-Structure-Soil Interaction Analysis by developing p-version Dynamic Infinite Elements and Performing Sloshing Shaking Table Tests, Research Report, No. 14CTAP-C077514-01, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.
- Kim, J.M., Lee, E.H., Chung, K.Y., Seo, C.G. (2012) Applicability of KIESSI-3D Program for Soil-Structure Interaction Analysis, Proc. KSCE Conference.
- Kornenev, B.G. (2002) Bessel Functions and their Applications, page 126, Chapman & Hall / CRC.
- Lee, J.H., Kim, J.K., Kim, J.H. (2016) Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Soil-Structure Interaction System Subjected to a Three-Dimensional Ground Motion, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(4), pp.317~325.
- Liou, G.S. (1989) Analytical Solutions for Soil-Structure Interaction in Layered Media, *Earth. Eng. Str. Dyn.*, 18, pp.667~686.
- Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S., Ostadan, F. (1981) SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction, Report No. UCB/GT/81-02, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Medina, F., Penzien, J. (1982) Infinite Elements for Elastodynamics, *Earth. Eng. Str. Dyn.*, 10, pp.699~709.
- Medina, F., Taylor, R.L. (1983) Finite Element Techniques for Problems of Unbounded Domains, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 19, pp.1209~1226.
- MTR/SASSI (2015) System for Analysis of Soil-Structure Interaction - User's Manual, MTR & Associates, Lafayette, CA.
- PARDISO, www.pardiso-project.org.
- Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. (1970) Vibrations of Soils and Foundations, Prentice Hall, Inc.
- Ryu, J.S., Seo, C.G., Kim, J.M., Yun, C.B. (2010) Seismic Response Analysis of Soil-Structure Interactive System using a Coupled Three-dimensional FE-IE Method, *Nuclear Eng. & Design*, 240, pp.1949~1966.
- Seo, C.G., Kim, J.M. (2012) KIESSI Program for 3-D Soil-Structure Interaction Analysis, *Computational Structural Engineering*, COSEIK, 25(3), pp.77~83.
- Seo, C.G., Yun, C.B., Kim, J.M. (2007) Three-dimensional Frequency Dependent Infinite Elements for Soil-Structure Interaction, *Eng. Str.*, 29, pp.3106~3120.
- Tzong, T.J., Penzien, J. (1983) Hybrid Modelling of Soil-Structure Interaction in Layered Media, Report No. UCB/EERC-83/22, *Earthquake Eng. Research Center*, UCB, CA, USA.
- Ungless, R.F. (1973). An Infinite Element. M.S. thesis, University of British Columbia.
- Yang, S.C., Yun, C.B. (1992) Axisymmetric Infinite Elements for Soil-Structure Interaction Analysis, *Eng. Str.*, 14, pp.361~370.
- Yun, C.B., Chang, S.H., Seo, C.G., Kim, J.M. (2007) Dynamic Infinite Elements for Soil-Structure Interaction Analysis in a Layered Soil Medium, *Int. J. Struct. Stability and Dyn.*, 7(4), pp.693~713.
- Yun, C.B., Kim, D.K., Kim, J.M. (2000) Analytical Frequency-Dependent Infinite Elements for Soil-Structure Interaction Analysis in Two-dimensional

Medium, *Eng. Str.*, 22, pp.258~271.

Yun, C.B., Kim, J.M., Hyun, C.H. (1995) Axisymmetric Elastodynamic Infinite Elements for Multi-layered Half-space, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 38, pp.3723~3743.

Zhao, C., Valliappan, S. (1993) A Dynamic Infinite Element for Three-dimensional Infinite-domain Wave Problems, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 36, pp.2567~2580.

요 지

이 연구에서는 p-version 동적무한요소법을 도입함으로써 FE-IE 기법에 기반한 KIESSI-3D 프로그램의 속도향상에 역점을 두었다. KIESSI-3D의 성능을 평가하기 위해 8가지 실규모 SSI 문제에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 근역지반 모델의 반경(r_o)이 구조물기초 반경(R)의 1.2배, 1.5배, 3.0배인 KIESSI-3D 해석모델을 고려하였다. 또한 SASSI2010 프로그램을 이용한 SSI 해석을 수행하였으며, 이 결과를 KIESI-3D에 의한 결과와 정확성 및 계산속도를 비교하였다. 수치해석 결과, 인 KIESI-3D 모델을 사용하면 정확한 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 계산속도 측면을 보면, 새로운 KIESSI-3D의 해석속도는 기존 KIESSI-3D에 비해 최대 25배 빠른 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지반-구조물 상호작용, p-version 무한요소, 지진해석, SASSI2010, KIESSI-3D