

지하철운행 하중에 대한 인접 구조물의 진동해석 Dynamic Analysis of Building Structures for Subway Transit Loading

윤정방* 이동근** 정진상*** 김두기****
Yun, Chung-Bang Lee, Dong-Guen Jeong, Jin-Sang Kim, Doo-Kie

ABSTRACT

An efficient dynamic analysis method is developed for building structures subjected to ground borne loadings. The soil medium is modeled using the finite elements and infinite elements. Then, the dynamic stiffness of the soil medium is calculated at the interfacial nodes between the soil and the building foundation. The equivalent subway loading at the interfacial nodes are obtained from the wave propagation analysis of the subway loading through the soil medium. The dynamic response of the building is computed using the mode superposition method equipped with gauss-seidel iteration technique. The analysis is carried out by the frequency domain and the time domain methods.

1. 서론

지하철의 운행으로 인한 지하에서의 진동이 복잡한 경로를 통해 지상에까지 전파되면서 지하철로에 가까운 구조물에 소음과 진동을 유발하여 구조적인 측면이나 환경적인 측면에서 문제를 제기하였다. 이러한 문제를 해결하고자 하는 진동저감대책을 적절히 사용하기 위해서는 지하철운행에 의한 구조물의 진동을 적절하게 해석할 수 있는 수치해석 기법이 필요하다. 일반적으로 사용할 수 있는 수치해석 방법은 지반을 수평, 연직, 회전자유도(3 자유도: 2 차원)로 모델하여 해석하는 부분구조법과 지반과 구조물 전체를 모형화하여 해석하는 직접법이 있다. 부분구조법은 각 자유도에 대한 동적강성을 해석적으로 구하기 때문에 기초부의 기하적 형상이 복잡하거나 지반의 물성치가 위치에 따라 일정하지 않을 경우에는 적절한 지반의 동적강성행렬을 구할 수 없게되는 문제점이 있다. 직접법은 구조물 뿐만아니라 방대한 지반영역을 모형화하여 동시에 해석을 해야 하기 때문에 매우 많은 양의 자유도가 사용되고 이로인해 기억장소와 해석시간의 증가라는 문제가 발생된다. 이러한 이유로 지하철운행에 의한 인접 구조물의 진동해석에 있어서 복잡한 지반조건을 고려할 수 있으면서 해석시간을 줄일 수 있는 진동해석 방법에 대해 연구하였다.

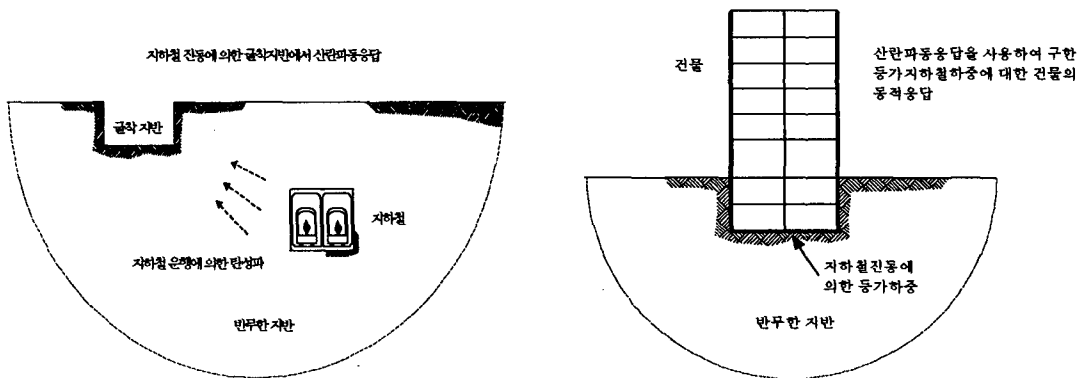
- * 한국과학기술원 토목공학과, 교수
- ** 성균관대학교 건축공학과, 교수
- *** 한국과학기술원 토목공학과, 석사과정
- **** 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

본 논문에서는 지반영역의 복잡한 조건들을 고려할 수 있도록 유한요소와 무한요소를 사용하여 지반을 모형화하고, 전체지반의 동적강성을 구조물 기초부와외의 경계면 자유도로 응축시켜 얻은 동적강성을 사용한 효율적인 해석 방법을 제안하였다.

2. 지반-구조물 상호작용을 고려한 지하철진동의 해석법

지하에서 발생하는 탄성파에 의한 구조물의 진동해석 방법에는 지반, 구조물 및 진동원을 유한요소법으로 동시에 모형화하고 이를 하나의 복합계로 간주하여 해석하는 직접법과 진동원에 의한 구조물 기초부에서의 응답을 일차적으로 산정한 후 이를 지반-구조물 시스템의 입력하중으로 하여 구조물의 응답을 해석하는 방법이 있다. 두가지 방법중 첫번째 방법이 이론적으로 더 정확한 방법이지만, 넓은 지반영역과 구조물의 세부형상을 동시에 모형화하여 해석하려면 해석상의 자유도가 매우 많아져서 비경제적인 해석이 되므로 본 연구에서는 그림 1과 같이 지반의 동적강성과 탄성파 해석을 통하여 구한 구조물 경계면에서의 등가지하철하중을 사용하는 구조물의 진동 해석기법에 대하여 연구하였다.

지반-구조물 상호작용을 고려한 해석은 지반 동적강성의 주파수 종속적인 특징을 적절히 나타낼 수 있는 주파수영역 해석을 하였다. 주파수영역의 해석은 각 주파수 단계마다 반복적으로 수행되기 때문에 많은 양의 계산이 필요하다. 지반-구조물 상호작용 해석의 다른 방법으로 지반의 강성, 감쇠를 지반-구조물 시스템의 동특성을 고려한 대표주파수값을 사용하여 주파수에 독립되게 결정하고 이를 사용한 시간영역 해석을 수행하였다.



(a) 지반의 모형화와 하중전달에 의한 경계면의 등가지하철하중

(b) 지하철진동에 의한 등가지하중의 작용과 구조해석 모형

그림 1 지반-구조물 시스템의 분리해석 방법

3 지반 - 구조물 상호작용을 고려한 주파수영역 해석법

3.1 주파수영역에서의 운동방정식과 해석방법

지반-구조물 상호작용을 고려한 지하철진동의 주파수영역 해석을 위한 기본 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss}(\omega) & \mathbf{S}_{sb}(\omega) \\ \mathbf{S}_{bs}(\omega) & \mathbf{S}_{bb}(\omega) + \mathbf{S}_{bb}^g(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t(\omega) \\ \mathbf{u}_b^t(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{bb}^f(\omega) \mathbf{u}_b^f(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{u}_s^t(\omega)$ 와 $\mathbf{u}_b^t(\omega)$ 는 전체변위를 의미하고, $\mathbf{u}_b^f(\omega)$ 는 자유장에서의 경계면 자유도의 변위를 나타낸다. $\mathbf{S}_{bb}^g(\omega)$ 는 굴착지반의 전체 지반영역을 정적응축기법을 사용하여 경계면 자유도로 응축시켜 얻은 지반을 대표하는 동적강성행렬이다. 식(1)의 우측항인 자유장 운동항은 식(2)와 같이 산란운동으로 나타낼 수 있고, $\mathbf{u}_b^g(\omega)$ 는 지반과 구조물의 경계면에 작용하는 산란운동으로 기초부에 작용하는 입력운동을 나타낸 것이다.

$$\mathbf{S}_{bb}^f(\omega) \mathbf{u}_b^f(\omega) = \mathbf{S}_{bb}^g(\omega) \mathbf{u}_b^g(\omega) \quad (2)$$

식(2)의 관계를 이용하여 식(1)의 운동방정식을 다시 쓰면 식(3)과 같은 운동방정식이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss}(\omega) & \mathbf{S}_{sb}(\omega) \\ \mathbf{S}_{bs}(\omega) & \mathbf{S}_{bb}(\omega) + \mathbf{S}_{bb}^g(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t(\omega) \\ \mathbf{u}_b^t(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{p}(\omega) = \mathbf{S}_{bb}^g(\omega) \mathbf{u}_b^g(\omega)$$

$\mathbf{S}_{ss}(\omega), \mathbf{S}_{sb}(\omega), \mathbf{S}_{bs}(\omega), \mathbf{S}_{bb}(\omega)$ 는 구조물 자유도의 동적강성행렬을 나타낸 것으로 식(4)와 같다.

$$\mathbf{S}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (4)$$

운동방정식(3)을 풀어서 각 주파수 ($n \Delta f; n=1,2, \dots, 2^m$, m 은 양의 정수)에 해당하는 변위를 계산하면, 속도와 가속도는 식(5)와 같은 관계를 통해서 쉽게 구할 수 있다.

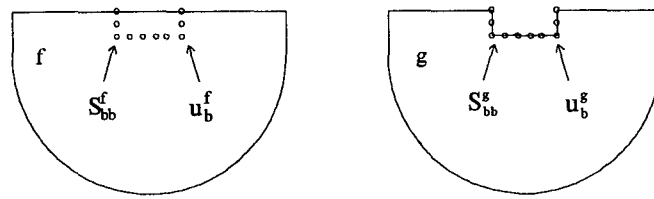
$$\dot{\mathbf{u}}(\omega) = i\omega \mathbf{u}(\omega), \quad \ddot{\mathbf{u}}(\omega) = i\omega \dot{\mathbf{u}}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{u}(\omega) \quad (5)$$

주파수영역과 시간영역의 변환관계식으로 사용되는 Fourier 변환은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(f) e^{i2\pi ft} df \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

지반-구조물의 상호작용 시스템의 지반영역은 아래 그림 2에 상세히 나타나 있다.



(a) 자유장 지반

(b) 굴착 지반

그림 2 지반-구조물 상호작용 시스템의 지반영역

3.2 지반-구조물의 경계면에서의 동적강성행렬

본 연구에서 사용하는 지반의 동적강성행렬은 전체지반을 대표하는 지반-구조물의 경계면 자유도로 응축된 동적강성행렬($S_{bb}^g(\omega)$)이다. 구조물과의 경계면에서의 지반 동적강성행렬은 그림 3 과 같이 내부영역을 유한요소로 외부영역을 무한요소로 모형화하여 얻은 식(7)의 좌측항에 정적 응축기법을 적용하여 식(8)와 같이 얻은 것이다.

$$\begin{bmatrix} S_{bb}^g(\omega) & S_{bc}^g(\omega) \\ S_{cb}^g(\omega) & S_{cc}^g(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b^g(\omega) \\ u_c^g(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$S_{bb}^g(\omega) = S_{bb}^g(\omega) - S_{bc}^g(\omega) S_{cc}^g(\omega)^{-1} S_{cb}^g(\omega) \quad (8)$$

$u_b^g(\omega)$, $u_c^g(\omega)$ 는 주파수영역에서 구조물의 경계면과 지반의 원역에서의 변위벡터를 나타낸다. 유한요소법을 사용하기 때문에 지반의 물성분포나 기초부의 기하학적 형상, 또는 층상지반에 구애 없이 경계면에서의 동적강성행렬을 구해낼 수 있다. 지반영역을 유한요소법으로 모형화하기 위하여 사용한 유한요소는 내부영역에서 9 절점 평면요소를 사용하였고 외부영역은 무한요소를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 무한요소는 “무한요소를 이용한 터널의 동적해석(1994 양신추 [1])” 에서 개발한 것을 사용하였다.

3.3 지하철운행에 의한 지반-구조물 경계면에서의 등가하중

지하철운행에 의한 인접 구조물과 지반의 경계면에 작용하는 하중은 유한요소와 무한요소를 사용하여 구하였다. 그림 4 와 같이 구조물과 임의의 거리만큼 떨어진 곳에 지하철운행에 의한 하중을 작용시켜 경계면에서의 변위를 계산하고, 이 변위에 식(10)와 같이 경계면의 동적강성을 곱하여 경계면에 작용하는 등가지하철하중을 산정하였다.

$$S_{bb}^g(\omega) u_b^g(\omega) = p(\omega) \quad (10)$$

지하철하중은 식(11)과 같이 지점통과시간 10 초, 지점통과속도 100km/h 를 기준으로한 것으로 지반진동에 대한 실험적인 자료를 근거로하여 H.L. Wong 과 J.E. Luco 에 의해 제안된 운동력의 함수 ($F(t)$)를 사용하였다. 하중크기의 단위는 kg, 회전각의 단위는 rad/sec 이다.

$$F(t) = 15000 + 15000 \sin 25t + 16000 \sin 100t + 24000 \sin 250t \quad (11)$$

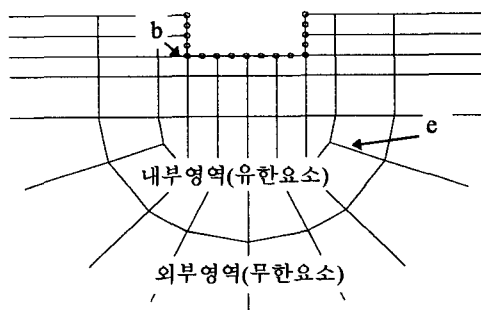


그림 3 지반의 동적강성을 위한 유한요소 모형

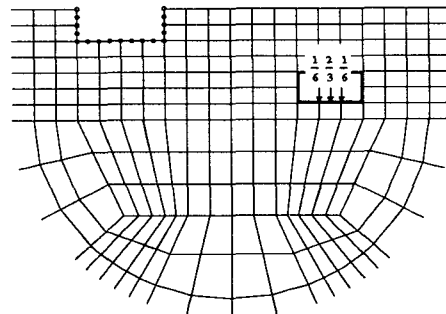


그림 4 경계면에서의 등가지하철하중 산정을 위한 유한요소 모형

3.4 지하철하중에 의한 구조물의 진동해석

지하철하중에 의한 인접 구조물의 진동해석을 위해서 그림 5와 같은 지하 2층 지상 6층의 강구조물을 예제구조물로 사용하였고, 연직진동 해석을 위해서 분할모델을 사용한 구조물 모형을 사용하였다[2]. 지반과 구조물의 물성치는 그림 5에 나타내었고, 지반에 관한 동적강성과 하중은 3.2절과 3.3절에서 구한값을 사용하였다. 해석결과는 그림 6에 지상 5층 우측보의 중앙점에 대한 연직거동을 시간영역에서의 변위로 나타내었다.

4 지반-구조물 상호작용을 고려한 시간영역해석법

4.1 시간영역에서의 운동방정식과 해석법

본 연구에서 사용된 지반-구조물 상호작용을 고려한 지하철진동의 시간영역 해석을 위한 기본 운동방정식은 다음 식(12)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_a & \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_a & \mathbf{M}_b + \mathbf{M}_{bb}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_a(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_a & \mathbf{C}_b \\ \mathbf{C}_a & \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{bb}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_a(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_a & \mathbf{K}_b \\ \mathbf{K}_a & \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{bb}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_a(t) \\ \mathbf{u}_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}(t) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{u}_a(t)$ 는 경계면을 제외한 상부구조물 자유도의 변위이며 $\mathbf{u}_b(t)$ 는 경계면 자유도의 변위를 나타낸다. $\mathbf{p}(t)$ 는 지하철운동에 의해 발생한 지반-구조물 경계면에서의 등가지하철하중을 나타내며 그 값은 식(10)의 $\mathbf{p}(\omega)$ 를 푸리에 역변환하여 얻은 것이다. 식(12)는 상부구조물의 운동방정식에 지반-구조물 경계면에서의 조건으로 각 절점에 대한 수평과 연직방향의 강성과 감쇠를 첨가한 것이다. 적절한 방법을 통해서 대표주파수($\bar{\omega}$)과 이에 상응하는 경계면의 지반동적강성($\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})$)이 결정되면, 식(13), 식(14)와 같은 관계를 통하여 식(15)와 같이 시간영역에서의 지반을 대표하는 강성과 감쇠항을 결정한다.

$$-\bar{\omega}^2 \mathbf{M}_{bb}^g + i\bar{\omega} \mathbf{C}_{bb}^g + \mathbf{K}_{bb}^g = \mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega}) \quad (13)$$

$$i\bar{\omega} \mathbf{C}_{bb}^g = i \text{Imag}(\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})), \quad -\bar{\omega}^2 \mathbf{M}_{bb}^g + \mathbf{K}_{bb}^g = \text{Real}(\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})) \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_{bb}^g = \mathbf{0}, \quad \mathbf{C}_{bb}^g = \frac{1}{\bar{\omega}} \text{Imag}(\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})), \quad \mathbf{K}_{bb}^g = \text{Real}(\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})) \quad (15)$$

$\bar{\omega}$: 대표주파수

지반의 동적강성행렬($\mathbf{S}_{bb}^{g*}(\bar{\omega})$)은 제 3.2절에서 구한 것으로 지반-구조물의 경계면에 있는 절점에 대해 각각 2개의 자유도(수평, 수직방향)를 갖게되며 모든 자유도는 서로 연계되어 있는 특징을 가지고 있다. 시간영역 해석을 위한 운동방정식의 해석방법으로는 직접적분법과 모우드중첩법의 두가지를 사용할 수 있다. 일반적으로 직접적분법이 많이 사용되는데 이 방법은 모우드중첩법에서 문제되는 운동방정식의 비비례 감쇠항에 관계없이 직접 문제를 해결할 수 있으나 해석 시간이 모우드중첩법에 비해 상대적으로 많이 소요된다. 다른 해석방법으로 모우드중첩법은 필요한 만큼의 모우드수를 사용하기 때문에 계산량이 적어 경제적인 해석을 할 수 있다. 반면, 지반-구조물 시스템에서 비비례 감쇠항을 일반적인 방법(각 모우드별 감쇠비)으로 쉽게 처리할 수 없

기 때문에 이를 적절히 고려할 수 있는 해석기법이 필요하다. 본 논문에서는 정확성과 경제성을 얻을 수 있는 반복법에 의한 모우드중첩법을 사용하여 운동방정식의 시간영역 해석을 수행하였다. 반복법에 의한 모우드중첩법은 반복과정으로 계산량이 어느정도 증가하지만 필요한 수 만큼의 모우드를 사용하기 때문에 직접적분법에 비해 경제적인 해석을 할 수 있다.

4.2 대표주파수 결정방법

시간영역 해석에 사용되는 지반의 강성, 감쇠항은 대표주파수를 정하고 그값에 상응하는 동적강성행렬을 식(14), (15)에 적용하여 결정한다. 대표주파수의 결정은 시간영역 해석의 정확성에 영향을 주는 가장 큰 요인이며 일반적으로 많이 사용되고 있는 방법은 다음과 같다. 이 방법은 지반-구조물 시스템의 첫번째 자유진동 모우드의 진동수를 대표주파수값으로 사용하는 방법으로 반복적인 과정을 통해서 구해지고 그 과정은 다음과 같다. 먼저 임의의 진동수를 대표주파수로 가정하여 그 값에 해당하는 지반의 동적강성을 사용하여 지반의 강성과 감쇠를 정한다. 지반의 강성과 감쇠를 사용하여 지반-구조물 시스템의 운동방정식을 구성하고 시스템의 비감쇠 자유진동 해석을 수행하여 첫번째 자유진동 모우드를 구한다. 여기에서 구해진 첫번째 진동수와 가정한 대표주파수가 일치할때까지 반복하여 대표주파수를 구한다.

4.3 반복법에 의한 모우드중첩법을 사용한 시간영역해석법

지반-구조물 시스템의 비비례항을 고려한 모우드중첩법의 한가지 방법으로 Gauss-siedel 반복법을 사용한 모우드중첩법을 사용하여 식(12)의 운동방정식을 해석하였다[4]. 이 방법의 특징은 비비례 감쇠항을 갖는 시스템을 모우드중첩법의 장점인 필요한 수만큼의 모우드수를 사용하여 해석하는 경제적인 이점을 갖추면서 직접적분법과 유사한 정도의 정확성을 가지고 문제를 해석할 수 있다는 점에 있다. 식(16)은 비비례 감쇠항을 갖는 식(12)를 간단하게 표현한 식이고, \mathbf{C} 는 비비례 감쇠항을 나타낸 것이다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (16)$$

식(17)과 같은 방법으로 비감쇠 시스템의 자유진동 해석을 통하여 고유치와 고유벡터를 구한다.

$$\mathbf{K}\Phi - \omega^2\mathbf{M}\Phi = \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\Phi_m = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$$

변위벡터 \mathbf{u} 를 $\mathbf{u} = \Phi_m \mathbf{q}$ 의 관계식을 통해서 일반좌표계로 변환하고 Φ_m^T 를 선승하면 식(18)과 같은 방정식이 완성된다.

$$\Phi_m^T \mathbf{M} \Phi_m \ddot{\mathbf{q}}(t) + \Phi_m^T \mathbf{C} \Phi_m \dot{\mathbf{q}}(t) + \Phi_m^T \mathbf{K} \Phi_m \mathbf{q}(t) = \Phi_m^T \mathbf{f}(t) \quad (18)$$

$$\Phi_m^T \mathbf{M} \Phi_m = \mathbf{I}$$

$$\Phi_m^T \mathbf{K} \Phi_m = \omega_m^2 = \text{diag}(\omega_1^2) \quad (19)$$

$$\Phi_m^T \mathbf{f}(t) = \mathbf{f}_m(t)$$

감쇠행렬 \mathbf{C} 는 비비례 감쇠항이므로 질량행렬이나 강성행렬처럼 일반좌표계에서 독립되지않고

남아 있게 된다. 식(19)와 같은 관계를 적용하고 $\sum_{j=1}^m C_{ij}\dot{q}_j = 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^m \bar{C}_{ij}\dot{q}_j$ 을 도입하여 식(18)을 정리하면 식(20)과 같은 m 개의 단자유도계 미분방정식이 구성된다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = f_i(t) - \sum_{j=1(j \neq i)}^m \bar{C}_{ij}\dot{q}_j(t) \quad (i=1,2,\dots, m) \quad (20)$$

식(20)은 오른쪽 두번째 항이 연계된 문제이므로 직접 풀 수 없고 반복법으로 문제를 해결해야 한다. Gauss-Seidel 반복법을 적용하기 위해 식(20)을 수정하면 식(21)같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_i^{(k)}(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i^{(k)}(t) + \omega_i^2q_i^{(k)}(t) = f_i - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{C}_{ij}\dot{q}_j^{(k-1)}(t) - \sum_{j=i+1}^m \bar{C}_{ij}\dot{q}_j^{(k)}(t) \quad (21)$$

초기 속도벡터($\dot{q}(t)$)를 영(zero)이나 이전단계($k-1$)의 속도로 가정하고 고차모우드부터 계산하여 전체모우드의 변위와 속도를 구하고, 속도벡터($\dot{q}(t)$)로부터 식(22)와 같은 오차를 계산하여 원하는 정도를 만족할 때까지 반복 계산함으로써 임의의 시간단계에서 변위를 구한다.

$$\left| \dot{q}^{(k)} - \dot{q}^{(k-1)} \right| / \left| \dot{q}^{(k)} \right| \leq \text{Tol}. \quad (22)$$

4.4 지하철하중에 의한 구조물의 진동해석

지반-구조물 시스템의 비비례 감쇠항을 고려하는 반복법에 의한 모우드중첩법을 사용하여 시간영역 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 구조물과 지반의 물성치는 그림 5에서 나타낸 것과 같고 반복법에 의한 모우드중첩법은 제 4.3 절에서 설명한 Gauss-seidel 반복법을 사용하였다. 그림 7은 직접적분법을 사용한 해석과 1/3 모우드를 사용한 모우드중첩법의 해석결과를 비교한 것인데, 반복법을 사용한 모우드중첩법의 해석이 비교적 정확한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 주파수영역의 해석과 시간영역의 해석 결과를 비교한 것으로 대표주파수에 상응하는 지반의 동적강성을 사용한 시간영역 해석 결과가 주파수영역 해석의 결과와 매우 유사함을 알 수 있는데, 이 것은 지반조건의 균질한 반무한체 가정으로 인해 주파수에 따른 지반 동적강성의 변화가 크지 않기 때문이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지하철하중에 의한 인접 건물의 진동해석을 효율적으로 수행할 수 있는 방법에 대하여 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 반무한 지반영역을 유한요소와 무한요소로 모형화하여 지반의 기하적조건이나 불규칙한 물성치를 고려할 수 있었고, 지반-구조물의 경계면 자유도로 응축된 동적강성을 사용하여 효율적인 해석을 수행할 수 있었다.
2. 지반 동적강성의 주파수 의존특성을 적절히 고려할 수 있도록 주파수영역 해석을 하였고, 대표주파수를 사용하여 주파수에 독립적인 지반의 강성과 감쇠를 결정하고 이를 사용한 시간영역 해석을 수행하여 비교해 보았다.

3. 시간영역 해석에 있어서 지반의 발산감쇠로 인한 비비례 감쇠항을 고려할 수 있도록 반복법에 의한 모우드중첩법을 사용하여 일반적인 해석방법인 직접적분법에 비해 경제적인 해석을 할 수 있었다.

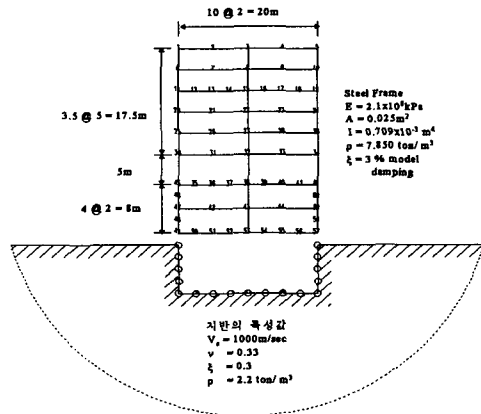


그림 5 지하철 진동의 해석을 위한 예제구조물

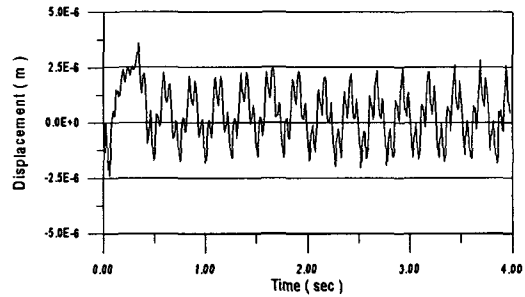


그림 6 주파수영역에서의 예제구조물 해석결과 (지상 5층 중앙점 연직방향 변위)

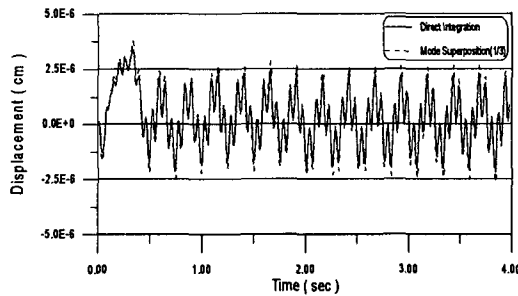


그림 7 1/3 모우드올 반복법을 사용한 모우드중첩법과 직접적분법의 해석결과 (지상 5층 중앙점의 연직방향 변위)

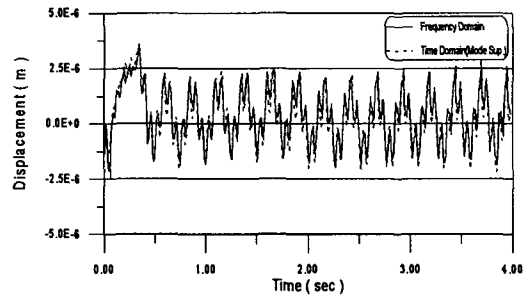


그림 8 시간영역 해석결과와 주파수영역 해석결과와의 비교 (지상 5층 중앙점의 연직방향 변위)

참고문헌

1. 양신추, 이희현, 변재양. “무한요소를 이용한 터널의 동적해석”, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집. (1994) pp. 145-152
2. 이동근, 송종철, 정길영, 김우법. “대형철골구조물의 효율적인 국부진동해석”, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집 (1994). 제 7 권, 제 1 집 pp. 105-112
3. 박형기, 조양희. 부분구조법에 의한 지반-구조물 시스템 내진해석 모델링방법 연구(III) (1995) 한국원자력안전기술원 KINS/ HR-117.
4. Ibrahimbegobic and E. L. Wilson. “Simple Numerical Algorithms for the Mode Superposition Analysis of Linear Structural Systems with Non-Proportional Damping”. (1989) Computer and Structures Vol. 33 No. 2 pp. 523-531.