

지반-구조물 연계모델의 동가감쇠값에 관한 연구

A Study on Equivalent Modal Damping Values of Soil-Structure Coupling Models

박 형 기*
Park, Hyung Ghee

Abstract

The theoretical backgrounds of the several methods were surveyed and reviewed to find out the adequate one to determine equivalent modal damping values in solving the dynamic problem of soil-structure interaction by mode superposition method. Furthermore the rigorous damping matrix of equation of motion was obtained through component mode synthesis technique and used in direct integration of the equation. The analytical results by direct integration method were compared with those of mode superposition approach using the various sets of equivalent modal damping values calculated by the methods to be reviewed. Two types of superstructures and four kinds of subsurface conditions were considered and combined to make soil-structure coupled models.

It was realized that dissipating energy method gives the equivalent modal damping values which lead the most similar results to direct integration ones. In case of fixed base, the responses of all methods except stiffness weighted approach are almost equal to those of direct integration method.

요 지

지반-구조물 상호작용 효과가 큰 경우의 동적문제를 모드중첩법으로 해결하기 위하여 여러 가지 등가모드감쇠값 결정 방법에 대한 이론적 배경을 검토하였다. 또한 component mode synthesis method에 의하여 감쇠행렬을 구하고 이를 이용한 직접적분법으로 지반-구조물의 연계 모델의 응답을 계산하여 각 등가모드감쇠값 결정 방법으로 구한 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 해석 결과와 비교 분석하였다. 해석모델로는 2종류의 상부구조와 4종류의 지반조건을 고려하고 이를 조합한 경우를 채택하였다.

본 연구 결과로 소멸에너지법으로 얻은 등가모드감쇠값이 직접적분법의 결과에 가장 근사적인 결과를 주는 것을 알 수 있었다. 고정지반모델인 경우에는 강도가중법을 제외한 다른 방법으로 구한 등가모드감쇠값은 직접적분법의 결과와 거의 일치되는 응답을 주었다.

* 경희원 · 인천대학 조교수, 토목공학과

1. 서 론

고층건물의 감쇠에 대한 진동시험 결과에 의하면 지반-구조물 상호작용 효과는 그다지 크지 않다. 동적해석 시에는 이러한 건물을 고정지반 상의 상부구조로 가정할 수 있고⁽¹⁾, 따라서 지반 특성을 고려한 지반-구조물 모델의 비선형해석은 필요하지 않다. 경계조건을 고정지반으로 하여 상부 구조물을 해석하더라도 비교적 정확한 응답을 얻을 수 있다. 그러나 원자력발전소와 같은 높은 고유 진동수를 갖는 구조물의 경우는 그러하지 않다.

실무에서는 비선형해석이 필요한 경우라도 해석 결과에 가장 큰 영향을 주는 모드에 맞춰 지반의 임피던스함수를 구하고 이를 사용하여 선형해석을 하여 근사적인 결과를 얻고 있다. 동적해석 방법으로는 직접적분법 또는 모드중첩법을 이용한다.

직접적분법에 의하면 구조물의 응답을 모드중첩법 보다 정확하게 얻을 수 있으나, 해석 과정이 복잡하여 전산처리 시간이 크게 소요된다. 적절히 결정된 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법에 의하면 직접적분법에 비하여 다소 정확도가 떨어지나 효율적으로 타당성 있는 해석 결과를 얻을 수 있다. 등가모드감쇠값 결정 방법을 모드 조사 방법, 질량 가중법, 강도 가중법, 소멸에너지법, 전달함수 사용법 등으로 대별할 수도 있다.

Johnson과 McCaffery⁽²⁾가 1969년에 질량 및 모드형태에 따른 가중치를 고려한 등가모드감쇠 계산법을 발표한 후, Biggs⁽³⁾는 변형에너지에 따른 가중치를 고려하였고, Roesset⁽⁴⁾등이 히스테리틱감쇠만을 고려할 수 있는 Biggs의 결과에 비스코스감쇠도 함께 고려할 수 있도록 하였다. 전달함수를 사용하는 방법에 대하여 Tsai⁽⁵⁾가 제안한 바 있고, 최근에는 벡텔사의 엔지니어링 표준절차⁽⁶⁾ 및 Novak 등⁽⁷⁾이 에너지 이론에 의한 등가모드감쇠 계산 방법을 연구 발표하였다. 국내에서도 조양희⁽⁸⁾가 상부구조의 감쇠율과 지반의 감쇠계수로 구성된 감쇠행렬을 사용한 직접적분법 결과와 수정 Roesset 법으로 구한 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과

를 비교 연구한 바 있다.

본 연구에서는 component mode synthesis method에 의하여 감쇠행렬을 구하고 그 결과를 이용하여 직접적분법으로 지반-구조물의 연계 모델의 응답을 구한다. 이를 기준으로 하여 대표적인 몇가지 방법으로 결정된 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과를 비교 분석하여 각 방법에 대한 실용성과 제한 등의 특성을 규명함으로써, 지반-구조물 상호작용 효과가 큰 경우의 문제 해결에 효과적으로 사용될 수 있는 등가모드감쇠 결정 방법을 찾으려 시도하였다. 해석모델로는 2종류의 상부구조와 4종류의 지반조건을 서로 조합한 경우가 사용된다.

2. 운동방정식과 해석법

지지부 기진력을 받는 자유도가 n 인 구조물의 운동방정식은

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -\ddot{u}_g M \bar{v} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, M : 질량행렬

C : 감쇠행렬

K : 강도행렬

$\bar{x}, \dot{\bar{x}}, \ddot{\bar{x}}$: 구조물의 지지부에 대한 상대가

속도, 상대속도 및 상대변위 벡터

\ddot{u}_g : 가속도—시간이력곡선으로 표시된 지지부의 입력운동

\bar{v} : 입력운동의 방향성분에 대한 영향계수 벡터

감쇠특성이 크게 상이한 건설재료로 이루어진 상부구조나 지반-구조물의 상호작용 효과가 큰 경우는 방정식 (1)의 감쇠행렬 C 를 Rayleigh 감쇠로 나타낼 수 없다. 이 경우의 해는 직접적분법에 의하여만 구해진다.

그러나 모드감쇠값만 타당성 있게 결정할 수 있다면 연립미분방정식으로 표시된 운동방정식을 동적 또는 정적연계가 없는 독립미분방정식들로 변환시킬 수 있고, 모드중첩법으로도 운동방정식의 근사해를 구할 수 있다. 식 (1)의 물리적 좌표계를 다음과 같이 선형 변환시키면

$$\ddot{\bar{x}} = \bar{\phi} \ddot{z} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, $\bar{\phi}$: 열이 질량에 대한 직교 정규화된 모드(M-orthonormalized mode) ϕ_i 로 구성된 행렬

\bar{z} : 일반화시킨 좌표계

식 (3)과 같이 비연계된 n 개의 독립 미분방정식을 얻는다⁽¹⁰⁾.

$$\ddot{z}_i + 2\beta_i \omega_i \dot{z}_i + \omega_i^2 z_i = -\ddot{u}_g \Gamma_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

.....(3)

여기서, $\ddot{z}_i, \dot{z}_i, z_i$: i 번째 모드 of 가속도, 속도 및 변위

ω_i : i 번째 모드 of 고유진동수 (rad./sec.)

β_i : i 번째 모드 of 감쇠값

Γ_i : i 번째 모드 of 참여계수, $\phi_i^T M \bar{v}$

본 연구에서는 직접적분법으로 선형 가속도 가정을 사용한 Wilson- θ 법⁽⁹⁾을 이용한다.

3. Component mode synthesis method 에 의한 감쇠행렬 계산

3.1 Component 의 감쇠행렬

감쇠특성이 다른 건설재료로 건설된 상부구조의 각 부분을 별개의 component 로 구분하고, component 별로 강체모드를 포함한 제한모드와 정규모드를 구하고 이를 component 별 감쇠행렬 $\bar{C}^{(i)}$ 을 구하기 위하여 Ritz 변환행렬 \bar{T} 로 사용한다^(11,12). 즉

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} \bar{\phi} & \bar{T} \\ \bar{O} & \bar{I} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, \bar{O} : 영행렬

\bar{I} : 단위행렬

\bar{T} : 단위 강체운동에 의한 상부구조의 변위를 얻을 수 있는 변환행렬

식 (4)의 변환행렬을 사용하여 component 의 운동방정식 중 감쇠력 항을 좌표변환하면 다음 관계가 성립된다⁽¹³⁾.

$$\bar{T}^T \bar{C}^{(i)} \bar{T} = \begin{pmatrix} 2\beta_i \omega_i & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{C}_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

여기서, \bar{C}_r : 강체운동으로 인한 소멸되는 에너지 나타내는 행렬

어깨글자 \bar{T} : 진치행렬을 표시함

3.2 Component 감쇠행렬의 합성

그림 1의 구조모델에 대하여 component 별로 계산된 감쇠행렬을 합성하는 방법을 설명한다. 물리적 좌표계 \bar{x} 를

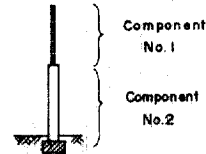


그림 1. Component mode synthesis method 의 설명

$$\bar{x}^T = [\bar{x}_{11}^T, \bar{x}_{1j}^T, \bar{x}_{2i}^T, \bar{x}_{2j}^T, \bar{x}_{2s}^T]$$

여기서, $\bar{x}_{1i}^T, \bar{x}_{2i}^T$: 각각 component 1 과 2 의 내부 자유도에 해당되는 좌표계

$\bar{x}_{1j}^T, \bar{x}_{2j}^T$: 각각 component 1 과 2 의 공유하는 자유도에 해당되는 좌표계

\bar{x}_{2s}^T : component 2 의 지반을 나타내는 자유도에 해당되는 좌표계

로 정의하면, 다음의 관계식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_{1i} \\ \bar{x}_{1j} \\ \bar{x}_{2i} \\ \bar{x}_{2j} \\ \bar{x}_{2s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & \bar{O} & \bar{O} & \bar{O} \\ \bar{O} & I & \bar{O} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{O} & I & \bar{O} \\ \bar{O} & I & \bar{O} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{O} & \bar{O} & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_{1i} \\ \bar{x}_{1j} \\ \bar{x}_{2i} \\ \bar{x}_{2s} \end{pmatrix} \dots\dots(6)$$

$$= \bar{A} \bar{x} \dots\dots\dots(7)$$

또한 component 1 과 2 의 감쇠행렬을 각각 내부 자유도와 공유하는 자유도의 좌표계에 상응하도록 정리하여

$$\bar{C}^{(1)} = \begin{pmatrix} \bar{C}_{1i}^{(1)} & \bar{C}_{1j}^{(1)} \\ \bar{C}_{2i}^{(1)} & \bar{C}_{2s}^{(1)} \end{pmatrix}$$

$$\bar{C}^{(2)} = \begin{pmatrix} \bar{C}_{1i}^{(2)} & \bar{C}_{1j}^{(2)} & \bar{C}_{1s}^{(2)} \\ \bar{C}_{2i}^{(2)} & \bar{C}_{2j}^{(2)} & \bar{C}_{2s}^{(2)} \\ \bar{C}_{3i}^{(2)} & \bar{C}_{3j}^{(2)} & \bar{C}_{3s}^{(2)} \end{pmatrix}$$

이라면, 다음의 식 (8)에 의하여 운동방정식 (1)의 감쇠행렬이 얻어진다.

$$\bar{C} = \bar{A}^T \begin{pmatrix} \bar{C}^{(1)} & \bar{O} \\ \bar{O} & \bar{C}^{(2)} \end{pmatrix} \bar{A} \dots\dots\dots(8)$$

4. 등가모드감쇠값의 결정

4.1 질량 가중법

Johnson 과 McCaffery 가 처음으로 제안한 질량 가중법에 의한 등가모드감쇠값은 질량과 절대변위를 이용하여 다음과 같이 계산된다^(2,14).

$$\beta_n = \frac{\bar{\phi}_n^T \bar{M}_D \bar{\phi}_n}{\bar{\phi}_n^T \bar{M} \bar{\phi}_n} \dots\dots\dots(9)$$

여기서, β_n : n 번째 모드의 등가모드감쇠값
 $\bar{\phi}_n$: n 번째 모드형태

\bar{M}_D : 각 부재의 요소질량행렬에 해당
 감쇠율을 곱하여 중첩시킨 수정
 질량행렬

수정 Roesset 법⁽¹⁵⁾은 Roesset 등이 제시한 방
 법에서 계산하는 진동 싸이클당의 최대 변형에
 너지 대신에 최대 운동에너지를 구하여 사용한
 방법으로서, n 번째의 등가모드감쇠값 β_n 은

$$\beta_n = \frac{\bar{\phi}_{Fn}^T \bar{M}_F \bar{\phi}_{Fn} + \bar{\phi}_{Sn}^T \bar{M}_S \bar{\phi}_{Sn}}{\bar{\phi}_{Fn}^T \bar{M} \bar{\phi}_{Fn} + \bar{\phi}_{Sn}^T \bar{M} \bar{\phi}_{Sn}} \dots\dots(10)$$

여기서, $\bar{\phi}_{Fn}$: 상부구조의 강제운동에 의한 진
 동 모드형태

$\bar{\phi}_{Sn}$: 상부구조의 변형에 의한 진동 모
 드형태

\bar{M}_F : 지반의 질량행렬에 지반의 감쇠
 율 곱하여 구한 수정 지반 질량
 행렬

\bar{M}_S : 상부구조의 각 구조요소의 질량
 행렬에 해당 감쇠율을 곱하여 중
 첩으로 구한 수정 상부구조 질
 량행렬

수정 Roesset 법에서는 상대변위를 이용하여
 가중치를 계산한다. 이 점이 Johnson 과 McCa-
 ffery 가 제안한 방법과 다른 점 중의 하나임을
 알 수 있다.

4.2 강도 가중법

계산된 각 모드의 변형에너지를 기준으로 각
 모드의 등가모드감쇠값을 결정하는 방법을 강도
 가중법이라 한다. 이 부류에는 Biggs 방법, Ro-
 esset 법, 미국원자력규제위원회 추천 방법 등을
 포함한 여러가지가 있으나 그 중 미국원자력규
 제위원회 추천 방법만을 연구대상으로 택한다.
 이 방법으로 n 번째 모드의 등가모드감쇠값을 구
 하면,

$$\beta_n = \frac{\bar{\phi}_n^T \bar{K}_D \bar{\phi}_n}{\bar{\phi}_n^T \bar{K} \bar{\phi}_n} \dots\dots\dots(11)$$

여기서, \bar{K}_D : 각 부재의 요소강도행렬에 해당
 감쇠율을 곱한 후 중첩시켜 구
 한 수정 강도행렬

이다⁽¹⁴⁾.

4.3 소멸에너지법

n 번째의 등가모드감쇠값 β_n 은 식 (8)로 구한
 운동방정식의 감쇠행렬 C 를 이용하여 다음과 같
 이 결정된다⁽⁶⁾.

$$\beta_n = \frac{\bar{\phi}_n^T C \bar{\phi}_n}{2\omega_n} \dots\dots\dots(12)$$

여기서, ω_n : n 번째 모드의 고유진동수(rad./
 sec.)

5. 수치해석과 결과 분석

5.1 입력데이터

동적 해석모델은 그림 2와 같으며, 상부구조
 는 전형적인 뼈대구조와 전단벽구조가 되도록
 모델을 만든다. 각 구조의 모드형태와 고유진동
 수를 다섯 모드씩 보이면 그림 3과 같다.

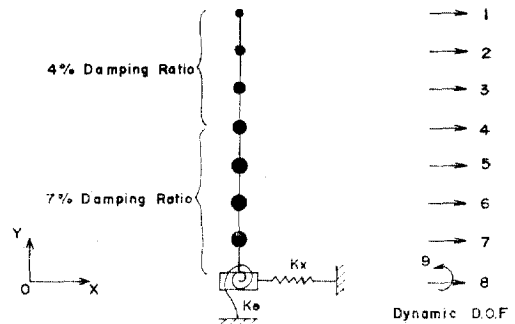
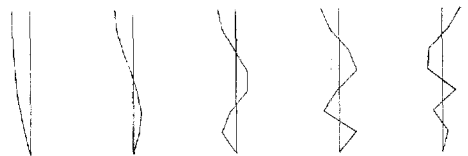
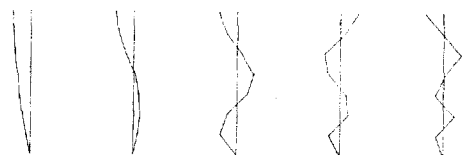


그림 2. 동적 해석모델



모 드	1	2	3	4	5
고유진동수(Hz)	0.88	2.17	3.30	4.53	5.20

(a) 뼈대구조



모 드	1	2	3	4	5
고유진동수(Hz)	5.24	11.51	18.86	26.28	29.77

(b) 전단벽구조

그림 3. 상부구조의 모드형태와 고유진동수

표 1. 고려한 지반조건

지 반	단 위 중 량 (pcf)	포 아 슨 비	리츠메리틱감쇠율 (일계감쇠값의%)	전 단 파 속 도 (fps)	비 고
조 건 (1)	125	0.35	7	1000	잘 다져진 사질토 지반
조 건 (2)	135	0.35	5	2000	풍화암 지반
조 건 (3)	150	0.35	4	4000	견고한 암반

지반조건은 잘 다져진 사질토 지반, 풍화암 지반과 견고한 암반의 지반을 나타낼 수 있도록 표 1과 같이 고려한다. 지반특성을 나타낼 집중파라미터(스프링상수와 감쇠계수)는 기초슬래브의 반경을 75 ft로 하여 반무한탄성체이론⁽¹⁶⁾에 의하여 결정된다.

표 2. 해석을 위한 상부구조와 지반조건 조합

경 우	조 합 방 법
1	전단벽 구조와 지반조건 (1)
2	전단벽 구조와 지반조건 (2)
3	전단벽 구조와 지반조건 (3)
4	고정지반 상의 전단벽 구조
5	베대 구조와 지반조건 (1)
6	베대 구조와 지반조건 (2)
7	베대 구조와 지반조건 (3)
8	고정지반 상의 베대 구조



모 드	1	2	3	4	5
고유진동수(Hz)	2.01	6.77	9.97	12.10	19.34
모드참여계수	-190.4	-15.13	-0.26	2.15	-0.65

그림 4. 전단구조와 풍화암 지반의 연계모델에 대한 모드형태, 고유진동수와 모드참여계수

표 3. 전단벽구조와 풍화암 지반의 연계모델에 대한 감쇠행렬

$$\bar{C} = \begin{pmatrix}
 6.8925E3 & -4.3699E3 & -6.7604E2 & -1.8465E3 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\
 -4.3699E3 & 1.3109E4 & -4.3699E3 & -4.3698E3 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\
 -6.7604E2 & -4.3699E3 & 1.4461E4 & -9.4150E3 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\
 -1.8465E3 & -4.3698E3 & -9.4150E3 & 5.9240E4 & -4.5942E4 & -1.5269E4 & -6.0751E3 & 2.3676E4 & -2.3676E5 \\
 0.0 & 0.0 & 0.0 & -4.5942E4 & 7.6658E4 & -2.1564E4 & -3.0766E3 & -6.0751E3 & 6.0751E4 \\
 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.5269E4 & -2.1564E4 & 7.3665E4 & -2.1564E4 & -1.5269E4 & 1.5269E5 \\
 0.0 & 0.0 & 0.0 & -6.0751E3 & -3.0766E3 & -2.1564E4 & 7.6658E4 & -4.5942E4 & 4.5942E5 \\
 0.0 & 0.0 & 0.0 & 2.3676E4 & -6.0751E3 & -1.5269E4 & -4.5942E4 & 2.2637E5 & -4.3609E5 \\
 0.0 & 0.0 & 0.0 & -2.3676E5 & 6.0751E4 & 1.5269E5 & 4.5942E5 & -4.3609E5 & 5.8224E8
 \end{pmatrix}$$

상부구조와 지반조건이 조합된 해석모델로는 표 2에 보인 8가지 경우를 고려한다. 한 예로서 전단벽구조와 지반조건 (2)의 조합인 경우에 대한 연계모델의 모드형태, 고유진동수와 모드참여계수는 그림 4와 같다.

해석모델에 입력되는 지지부 기진력은 non-stationary random wave로서, 그림 5와 같은 최대 가속도가 0.2g 인 가속도-시간이력 곡선이다.

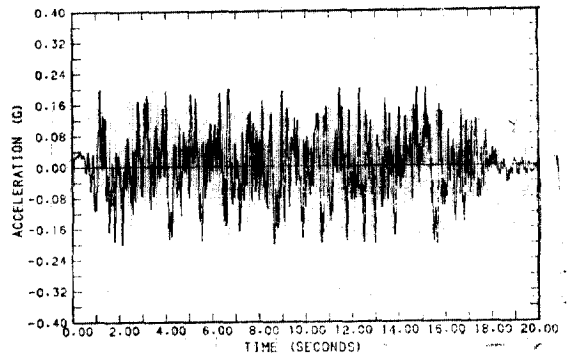


그림 5. 입력운동인 가속도-시간이력 곡선

5.2 결정된 감쇠행렬과 동가모드감쇠 값

각 방법의 이론으로 구성한 프로그램의 실행 결과는 간단한 모델에 대한 수계산된 결과와 프로그램의 결과를 비교함으로써 검토되었다.

경우 (2)에 대하여 component mode synthesis method로 구한 감쇠행렬을 보이면 표 3과 같

표 4. 등가모드감쇠값의 비교(임계감쇠값에 대한 비)

경우	방법	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	질량가중법(식(9))	0.1238	0.1069	0.1795	0.0744	0.0709	0.0607	0.0607	0.0524	0.0405
	수정 Roesset 법	0.1853	0.2477	0.2533	0.1977	0.1708	0.0963	0.0741	0.0527	0.0405
	강도가중법	0.1824	0.0761	0.1097	0.0563	0.0649	0.0624	0.0605	0.0540	0.0404
	소멸에너지법	0.1721	0.0516	0.2106	0.0660	0.0827	0.0730	0.0609	0.0785	0.0420
5	질량가중법(식(9))	0.0765	0.1553	0.0789	0.1943	0.0787	0.0661	0.0613	0.0443	0.0403
	수정 Roesset 법	0.0976	0.1715	0.1244	0.1875	0.1194	0.0805	0.0630	0.0443	0.0402
	강도가중법	0.1238	0.1417	0.0679	0.1933	0.0694	0.0659	0.0643	0.0493	0.0401
	소멸에너지법	0.0617	0.1714	0.0876	0.3734	0.0955	0.0787	0.0791	0.0566	0.0409
8	질량가중법(식(9))	0.0575	0.0546	0.0634	0.0639	0.0610	0.0443	0.0403		
	수정 Roesset 법	0.0575	0.0546	0.0634	0.0639	0.0610	0.0443	0.0403		
	강도가중법	0.0687	0.0568	0.0615	0.0655	0.0642	0.0433	0.0401		
	소멸에너지법	0.0569	0.0488	0.0691	0.0710	0.0675	0.0528	0.0408		

으며, 경우 (2), (5), (8)에 대한 각 방법으로 구한 등가모드감쇠값을 표 4에 정리하였다.

또한 고정지반인 경우 (4)와 경우 (8)에 대해서는 식(9)와 (10)의 결과가 동일함을 직관적으로 알 수 있는 사실이지만, 계산 결과로부터도 확인할 수 있었다.

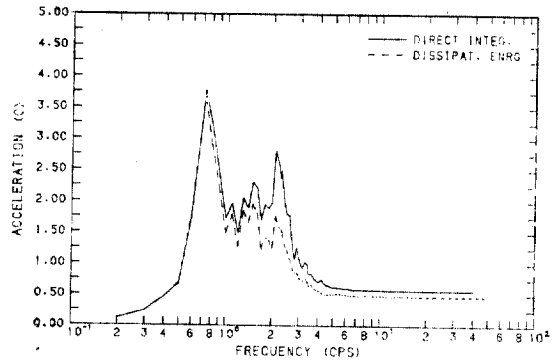
5.3 바닥응답스펙트럼의 비교

계산된 등가모드감쇠값을 직접 서로 비교하는 것만으로는 최종 응답에 미치는 영향을 파악하기 어렵다. 그래서 한 방편으로 감쇠율 2%, 4%, 7%에 대하여, 해석모델의 정상부, 중앙부, 기초슬래브 위치에서 각 경우의 응답스펙트럼을 계산한다. 그러나 각 방법의 특성을 설명하는데 필요한 대표적인 경우 (2), (5), (8)의 감쇠율 2%에 대한 결과만 그림 6, 7, 8에 보였다.

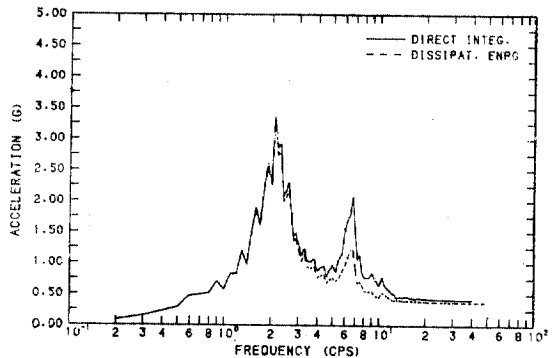
그림 6과 7에서 고찰할 수 있는 바와 같이 지반-구조물 연계모델에서 소멸에너지법으로 구한 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과가 감쇠행렬을 사용한 직접적분법으로 얻은 응답에 가장 근사적인 값을 준다는 사실을 알 수 있다. 그러나 첫째 모드에 대해서는 직접적분법의 결과와 거의 동일한 값을 주나 높은 모드에서는 낮은 응답을 준다.

또한 고정지반모델의 경우는 그림 8에서 보이는 바와 같이 강도가중법을 제외하곤 나머지 방법으로 계산한 등가모드감쇠값은 직접적분법의 결과와 거의 동일한 결과를 주는 것을 알 수

있다.



(a) 뼈대구조와 잘 다져진 사질토지반의 조합



(b) 전단벽구조와 풍화암 지반의 조합

그림 6. 지반-구조물 연계모델에서 직접적분법의 해석 결과와 소멸에너지법으로 계산한 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과 비교

6. 결 론

현장 시험을 통한 검증이 이루어져야 하나, 본 연구에서 수행한 component mode synthesis method로 구한 감쇠행렬을 이용한 직접적분법의 결과와 몇가지 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과를 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

(1) 지반-구조물 연계모델의 등가모드감쇠값을 소멸에너지법으로 구한다면 직접적분법의 동적응답에 가장 근사적인 결과를 얻을 수 있다. 그러나 높은 모드 범위에서는 두 해석 결과가 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

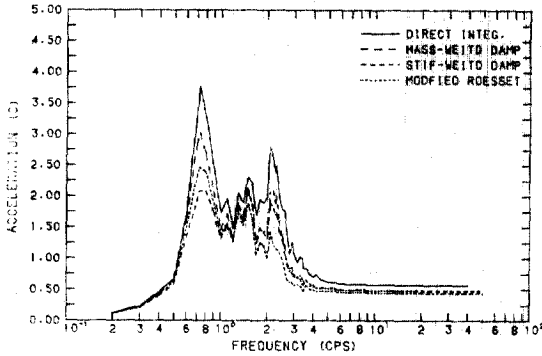
(2) 고정지반 조건인 경우는 강도 가중법을 제외한 질량 가중법, 수정 Roesset 법, 소멸에너지법 등으로 등가모드감쇠값을 구한다면 모드중첩법으로도 타당한 결과를 얻을 수 있다.

감사의 말

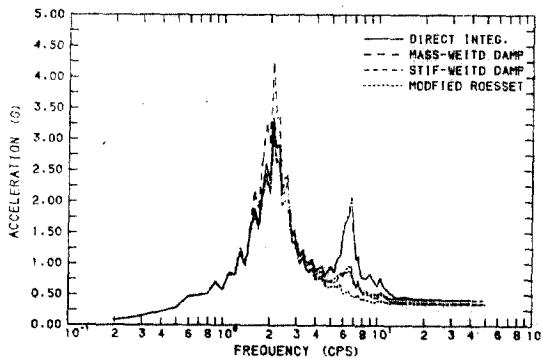
본 연구는 한국과학재단의 1986년도 후반기 연구비 지원에 의하여 이루어진 것이며, 이에 지원해 주신 한국과학재단에 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) N.C. Tsai, D. Niehoff, M. Swatta and A.H. Hadjian, "The Use of Frequency-Independent Soil-Structure Interaction Parameters", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.31, 1974.
- 2) T.E. Johnson and R.J. McCaffery, "Current Techniques for Analyzing Structures and Equipment for Seismic Effectse", *Presented in ASCE Conference*, New Orleans, La., 1969.
- 3) R.V. Whitman, "Soil-Structure Interaction," *Seismic Design of Nuclear Power Plants*, R.J. Hansen, editor, MIT Press, Cambridge, Mass., 1970, pp. 241~269.
- 4) N.C. Tsai, "Modal Damping for Soil-Structure Interaction," *J. of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, Vol.100, No. EM2, Proceedings Paper 10490, 1974, pp. 323~341.
- 5) J.M. Roesset, R.V. Whitman, and R. Dobry,



(a) 뼈대구조와 잘 다져진 사질토지반의 조합



(b) 전단벽구조와 풍화암 지반의 조합

그림 7. 지반-구조물 연계모델에서 직접적분법의 결과와 질량가중법, 수정 Roesset 법, 강도 가중법으로 구한 등가모드감쇠값을 사용한 모드중첩법의 결과 비교

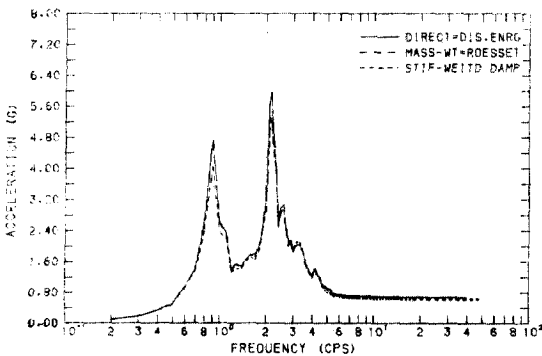


그림 8. 고정지반모델에서 직접적분법의 해석결과와 모드중첩법의 결과 비교

- "Modal Analysis for Structures with Foundation Interaction," *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 99, No. ST3, 1973, pp. 399~416.
- 6) Bechtel Power Corp., "BO-TCP-4, *Seismic Analyses of Structures and Equipment for Nuclear Power Plants*, Rev. 4", 1980.
- 7) M. Novak and L.E. Hifnawy, "Effect of Soil-structure Interaction on Damping of Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, 1983, pp. 595~621.
- 8) 조양희, "지반-구조물 상호작용을 고려한 모드감쇠에 대한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 1984.
- 9) K. Bathe and E.L. Wilson, "*Numerical Methods in Finite Element Analysis*," Prentice-Hall Inc., 1976, pp. 319~322.
- 10) R.W. Clough and J. Penzien, "*Dynamics of Structures*," McGraw-Hill Inc., 1975, pp. 194~199.
- 11) R.R. Craig, Jr. and M.C.C. Bampton, "Coupling of Substructures for Dynamic Analyses", *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 7, 1968, pp. 1313~1319.
- 12) R.M. Hintz, "Analytical Methods in Component Modal Synthesis", *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 8, 1975, pp. 1007~10016.
- 13) J. Pajuhesh and A.H. Hadjian, "Dynamic Interaction of Components, Structure, and Foundation of Nuclear Power Facilities", Paper No. K3/9, *Transactions of 4th SMIRT Conference*, San Fransico, CA., 1977.
- 14) ASCE, "*Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities*," 1980, pp. 249~254.
- 15) Gilber Associates Inc., GAISSAR, USNRC Docket No. STN-50-595, 1978, pp. 3.7-22~3.7-23.
- 16) F.E. Richart, Jr., J.R. Hall, Jr., and R.D. Woods, "*Vibrations of Soils and Foundations*," Prentice-Hall Inc., 1970, pp. 216~226.

(接受 : 1987. 7. 29)