

복수의 동적하중을 받는 바닥판 구조물의 응답스펙트럼 해석

Response Spectrum Analysis of Floor Structure Subjected to Group Dynamic Loads

김 태 호*
Kim, Tae-Ho

한 덕 전**
Han, Duck-Jeon

요 약

건축구조물의 응답스펙트럼 해석법은 주로 내진설계를 위하여 많이 사용되고 있고 시간이력 해석법은 기계, 설비, 사람에 의한 하중 등이 건축물에 가해지는 경우에 많이 사용되고 있다. 응답스펙트럼 해석법과 시간이력해석법을 비교해 보면 시간이력 해석법은 복잡하고 분석이 어려우며 해석에 시간을 많이 필요로 하고 구조물이 복잡해질 경우에는 해석이 어려운 경우도 있다. 본 연구에서는 응답스펙트럼해석법을 이용하여 기계나 사람에 의한 하중을 받는 건축물 바닥판의 연직응답을 구하고자 한다. 이를 위하여 모드조합에서는 CQC기법을 적용하였으며, 사람의 활동을 중심으로 하중간의 상관관계를 분석하여 해석에 적용하였다. 제안방법은 시간이력해석결과와도 비교하였으며 하중간의 상관계수는 복수의 하중을 받는 바닥판구조물의 응답스펙트럼 해석에 반드시 고려해야 하는 결과를 얻었다.

Abstract

In general, the response spectrum analysis(RSA) method is widely used for seismic analysis of building structures, and the time history analysis(THA) is applied for computation of structural vibration caused by equipments, machines and moving loads, etc. However, compared with the RSA method, the THA method is very complex, difficult and time consuming. In this study, the maximum responses for the vertical vibration are calculated conveniently by the RSA method. At first, the process for the RSA in excitation is proposed, and the maximum modal responses are combined by CQC and SRSS methods. Also, the responses obtained by the two modal combination methods are compared to the responses by the THA. And the correlation coefficients for human activities is proposed, and the RSA responses obtained by used to the correlation coefficients are calculated. Finally, results of the proposed method are compared with those of the time history analysis and correlation coefficients should be considered for the RSA of floor structure subjected to group dynamic loads.

키워드 : 응답스펙트럼해석, 시간이력해석, 연직진동, 건축구조물, 상관계수

Keywords : Response spectrum analysis, Time history analysis, Vertical vibration, Building structures, Correlation coefficient

1. 서 론

구조물에 가해지는 동적하중에 관한 진동 문제는 주로 사용성(serviceability)의 문제이다. 이러한 사용성의 문제는 주로 연직진동 성분에 의한 것으로 근로자, 건물의 입주자 혹은 공장의 정밀 기계 등이 그 영

향을 받을 수 있다. 이러한 경우 구조물에 안전에는 지장이 없지만 사용자들에게 불편함을 주거나 기계 등에 오차를 발생시킬 수도 있다. 이러한 문제는 구조물에 생기는 변위보다는 속도나 가속도에 의한 경우가 크다. 그리고 구조물의 설계시 이러한 문제를 해결하기 위해서는 여러 가지 규준에 합당하도록 설계하는 것이 중요하다. 이들 규준에는 최대 허용 기준 등을 제시하고 있으며 해석에서 최대 응답을 쉽게 알아내어 구조 설계에 적용할 수 있다면 이러한 진동 문제 해결에 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

* 교신저자, 정회원 · 대림산업 기술연구소, 공학박사
Tel : 02-2011-8233 Fax : 02-2011-8068
E-mail : tahz91@daelim.co.kr

** 정회원 · 서울대학 건축과 교수

일반적으로 선형 탄성 범위 내에서는 모드 중첩법을 통해서 변위 등의 응답을 정확히 계산할 수 있다. 하지만 이러한 접근에는 두 가지 불리한 점이 있다. 첫 번째로는 시간의 함수로서 나타나는 결과를 분석하는 데 많은 시간이 소요된다는 것이다. 두 번째로는 설계에 적용하는 경우 구조물이 가지는 모든 모드에 대한 진동수를 확인하기 위해서는 여러 가지 동적하중을 이용한 반복해석을 수행하여야 하므로 이는 상당한 시간을 소요하게 된다. 또한 개인용 전산기에서는 대형 구조물을 해석하는 데 많은 메모리와 저장공간, 그리고 계산 시간이 길어지게 되고 때에 따라서는 해석을 할 수 없는 경우도 발생하게 된다^{1,2)}.

지진 해석에 사용되는 응답 스펙트럼 해석법의 장점은 위에서와 같이 여러 가지 지진 하중에 대한 거동의 평균인 설계스펙트럼으로 구조물의 응답을 구한다는 것이다. 이것은 구조물의 모드 형상과 여러 하중의 스펙트럼을 알고 있으면 계산이 단순화되는 장점을 가진다. 기존의 상용 프로그램인 SAP 2000³⁾, Midas Gen, GTSTRUDL 등은 지진 해석의 경우에 응답 스펙트럼을 사용하고 있으나, 구조물에 가해지는 동적하중에 대한 해석의 경우에는 시간이력해석(time history analysis)만을 수행하고 있는 실정이다. 시간이력해석에는 진동원의 명확한 규명이 필요하고 설계에 반영하고자 할 경우에는 여러 가지 경우에 대해서 해석을 하여야 하거나 큰 안전율을 적용하는 등의 불편함이 있다. 본 논문에서는 구조물에 동적하중이 작용하는 경우에 대하여 응답스펙트럼 해석법(response spectrum analysis method)을 적용하여 최대응답을 구하였으며 모드조합의 필요성 및 동적하중간의 상관관계 등에 관하여 연구를 수행하였고 이를 시간이력해석에 의한 결과와 비교하였다. 이 연구에 사용된 구조해석 프로그램은 성균관 대학교 지진진동연구실에서 작성한 것이며 해석 프로그램에 사용된 유한 요소(보 및 판요소) 및 동적 해석 알고리즘은 참고문헌[1, 2, 4]를 참고로 하여 작성된 것이다.

2. 동적하중에 대한 응답 스펙트럼 해석법

이 절에서는 우선 구조물에 동적하중이 가하여지는 경우에 구조물의 응답을 근사적으로 알아보는 과정에

대하여 언급하였다. 다음으로는 조화진동하는 하중원(사람의 울동, 기계진동 등)의 상관관계를 알아보고 이를 정식화하였다. 모드조합방법은 고층건물의 수평진동 모드의 경우에 일반적으로 고유진동수가 충분히 잘 분리가 되어 있어서 SRSS기법을 사용하여도 근사한 응답을 얻을 수 있으나 연직 진동 모드는 인접 모드의 진동수가 비슷한 경우가 많으므로 각 모드간의 상관도를 고려한 CQC기법을 적용하였다.

여러 절점에 동적하중이 동시에 가하여질 경우에 대해서는 하중간의 상관관계를 무시할 수 있을 경우와 무시할 수 없을 경우로 나눌 수 있다. 상관관계를 무시할 수 있는 경우는 보행자들의 자유 보행과 같이 주변환경에 의하여 동조될 가능성이 낮은 경우나 기계의 작동과 같이 기계 각각의 작동이 다른 기계에 전혀 영향을 미치지 않을 경우에 적용이 가능하다. 이 경우에는 하중간의 상관관계가 없으므로 각각의 응답을 SRSS할 수 있으며 다음과 같이 정리할 수 있다.

임의의 자유도 i 에서의 응답은 식 (1)과 같다.

$$U_{i,\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m U_{ij}^2} \quad (1)$$

이때, i 는 자유도 번호이며, j 는 가해지는 동적하중의 수이다. U_{ij} 는 j 번째 동적하중에 의한 i 번째 자유도의 응답으로 이를 자세히 쓰면 식 (2)이다.

$$U_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N U_{ij(k),\max} \rho_{kl} U_{ij(l),\max}} \quad (2)$$

내부의 항을 U_{ij}^* 라 하고, 행렬식으로 표시하면

$$U_{ij}^* = \begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{d1} \\ \phi_{i2} S_{d2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{din} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{21} & \cdots & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1n} & \rho_{2n} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{d1} \\ \phi_{i2} S_{d2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{din} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{d1} \\ \phi_{i2} S_{d2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{din} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{din} \end{bmatrix}$$

이를 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 풀어 쓸 수 있으며, 임의 자유도에서의 응답은 모든 하중에 대하여 첫 번째 항과 마지막 항이 같고, 내부의 스펙트럼 값만이 차이를 갖는 식으로 변환된다.

$$U_{ij}^* = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_{d_{j1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{d_{j2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{d_{jn}} \end{bmatrix} [\rho] \begin{bmatrix} S_{d_{j1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{d_{j2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{d_{jn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{j1} \\ \phi_{j2} \\ \vdots \\ \phi_{jn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 내부행렬의 곱에 의한 새로운 행렬을 $[\rho']$ 라 표현하면, 새로운 행렬 $[\rho']$ 의 원소는 $S_{d_{jk}} S_{d_{j1}} \rho_{ki}$ 이며, i 절점에 가해지는 모든 하중에 대한, 응답은 식 (5)과 같다.

$$U_i = \left[\begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix} \right]^T \{ [\rho_1]' + [\rho_2]' + \cdots + [\rho_n]' \} \left[\begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \\ \vdots \\ \phi_{1n} \end{bmatrix} \right]^{1/2} \quad (5)$$

3. 하중간의 상관관계를 고려한 응답스펙트럼 해석

하중간의 상관관계를 고려하는 경우로는 주로 사람에 의하여 발생할 수 있는 무리하중을 들 수 있다. 사람의 활동(보행, 댄스, 응원 등)과 같은 일정한 진동수에 의하여 발생하는 하중과 육교나 쇼핑몰과 같이 많은 사람들이 일정한 흐름에 따라 이동하는 보행에 의한 무리하중이 있다. 이러한 종류의 하중은 사람들의 몸무게와 운동(이동)속도가 서로 다르지만 자의 혹은 타의에 의해서든 동조되는 경향이 있으므로 무리하중의 진동수를 단위하중의 진동수와 같다고 가정할 수 있다. 구조물의 응답에 대한 주요 진동수 성분은 적용하중의 진동수성분에 의하여 주로 결정되므로 무리하중에 의한 응답의 상관관계도 하중의 상관관계를 알면 정의할 수 있다. 하중간의 상관관계가 있는 경우는 식 (1)을 다음과 같이 바꾸어야 한다.

$$U_{i, \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m U_{ij} r_{jk} U_{ik}} \quad (6)$$

여기서, r_{jk} 는 하중간의 상관계수이다.

하중간의 상관관계를 정의하기 위해서는 하중들 사이의 관계를 확인하는 것이 중요하다. 상호상관계수를 구하기 위해서 일반적으로 알려진 두 사람 사이의 상관계수를 구하여 보았다. 두 명의 사람에 대한 동적하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_a(t) = Q_a \left(1 + \sum_{n=1}^k \beta_n \sin(2\pi n f_a t + \Psi_{an}) \right) \quad (7-1)$$

$$F_b(t) = Q_b \left(1 + \sum_{n=1}^k \beta_n \sin(2\pi n f_b t + \Psi_{bn}) \right) \quad (7-2)$$

여기서 β_n 은 n 번째 조화함수에 대한 상수이고, Q 는 사람의 몸무게, f 는 보행진동수이고 Ψ_n 은 n 번째 조화항의 위상각을 나타낸다. 시간에 대한 상관관계식은 식 (8)과 같다.

$$Y_{F_a, F_b} = \frac{\mu_{F_a F_b} - \mu_{F_a} \mu_{F_b}}{\sigma_{F_a} \sigma_{F_b}} \quad (8)$$

여기서 μ_{F_a} , μ_{F_b} 은 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 평균이고, $\mu_{F_a F_b}$ 는 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 곱의 평균이다. 그리고 σ_{F_a} , σ_{F_b} 는 각각 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 표준편차이다. 식 (7)의 하중을 이용하여 상관계수를 얻는 데 필요한 평균과 표준편차를 구하면 다음과 같다. 우선 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 평균은 각각 Q_a , Q_b 이다. 이는 두 하중이 정적인 몸무게를 중심으로 조화운동을 하기 때문이다. 두 동적 하중의 곱에 대한 평균값은 $Q_a Q_b + \frac{Q_a Q_b}{2} \sum_{n=1}^m \beta_n^2 \cos(\Psi_{an} - \Psi_{bn})$ 이고 두 하중의 표준편차는 각각 $\sigma_{F_a} = Q_a \left(\sum_{n=1}^k \beta_n^2 / 2 \right)^{1/2}$, $\sigma_{F_b} = Q_b \left(\sum_{n=1}^k \beta_n^2 / 2 \right)^{1/2}$ 이다. 이들 평균과 표준편차를 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$Y_{F_a, F_b} = \frac{\sum_{n=1}^k \beta_n^2 \cos(\Psi_{an} - \Psi_{bn})}{\sum_{n=1}^k \beta_n^2} \quad (9)$$

이 식 (9)는 위상차가 상관관계를 결정하는 것을 보이고 있다. 위상이 다를 경우 사람들간의 운동시간차이(Δt)가 발생하고 n 번째 조화하중에서의 위상

차는 $2m\pi(f_a - f_b)\Delta t$ 가 된다. 여기서 β_n 은 보행, 뒹, 춤 등등에 대한 동적계수이고 <표 1>과 같다^{5,6)}. <그림 1>은 1차조화항만 고려한 경우와 3차항까지 고려한 경우에 대하여 상관계수를 비교한 것이다. 이 그림을 살펴보면 점핑의 경우를 제외하고는 1차 조화항만 고려하여도 상관계수를 비슷하게 얻어낼 수 있음을 보이고 있어 상관관계를 식 (10)으로 단순화시킬 수 있다.

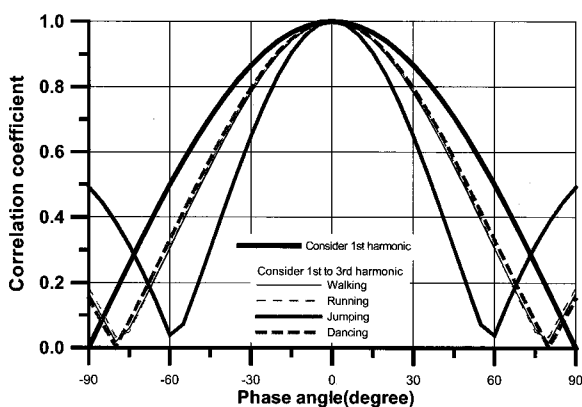
$$Y_{F_a, F_b} = \cos(\psi_{a1} - \psi_{b1}) \quad (10)$$

<표 1> 사람의 활동에 대한 동적계수

Activity type	동적계수		
	β_1	β_2	β_3
walking	0.4	0.1	0.1
running	1.6	0.7	0.2
jumping	1.8	1.3	0.7
dancing	0.5	0.15	0.1

<표 2> 사람의 활동에 대한 상관계수

상관 계수	1차항 고려	3차항까지 고려한 경우			
		walking	running	jumping	dancing
μ	0.62	0.52	0.53	0.49	0.54
$\mu + \sigma$	0.95	0.87	0.88	0.80	0.89



<그림 1> 활동타입에 따른 상관계수

해석의 편의성을 위하여 상관계수를 안전측으로 계산하고자 할 경우에는 1차조화항만을 상관함수로 선택하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 점핑의 경우는 다른 운동과는 다소 다른 경향을 보였는데

이것은 2, 3차 조화항이 다른 운동에 비하여 크기 때문인 것으로 판단된다. 각 운동에 대하여 상관계수의 평균(μ)과 평균+표준편차($\mu + \sigma$)한 결과를 표 2에 나타내었으며 점핑을 제외하고는 다른 경우는 거의 차이가 없음을 알 수 있으며 이 경우들의 평균적인 상관정도는 0.5~0.55, 보수적으로 평가할 경우의 상관정도는 0.87~0.89로 나타났으며 점핑은 평균은 비슷하지만 $\mu + \sigma$ 의 경우는 약 10%정도 상관정도가 낮은 것으로 나타났다. 응답스펙트럼 해석법으로 이러한 인간의 활동에 대한 상관성을 고려할 경우에는 해석법이 가지는 최대응답을 평가하는 특성상 보수적인 상관계수를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각되며 사람들 간의 상관성은 운동상황에 따라 달라지는 특성(예를 들면 춤이나 에어로빅과 같은 운동은 하나의 신호 또는 대표자의 움직임에 좌우되거나 사람들 상호간의 관계는 약함)을 가지므로 그 확률분포의 특성을 균등분포(uniform distribution)한 것으로 볼 수 있다. 이에 따라서 하중간의 상호 상관계수는 모두 동일한 것으로 가정할 수 있으며 위에서 제시한 상관계수를 일률적으로 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이에 따라 하중간의 상관행렬은 다음과 같이 결정하였다.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, m 은 하중의 수이며 비대각항의 상관계수는 동일한 것으로 다음과 같이 두었다.

- 안전측으로 평가하고자 할 경우: 0.95
- 보행, 뒹, 춤과 같은 운동의 경우: 0.90
- 점핑의 경우: 0.80

4. 예제 해석

본 논문에서 제시한 해석방법의 정확성과 효율성을 알아보기 위하여 다음과 같은 예제 구조물을 사용하였다. 예제 구조물의 형상은 <그림 2>와 같고, 보와 기둥의 크기는 각각 60cm×40cm, 40cm×40cm이

다. 재질은 콘크리트로서 탄성계수는 $2.1 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2$, 밀도는 $2.4 \times 10^5 \text{ kN/cm}^3$, 프와송비는 0.167이다. 감쇠율은 2%를 적용하였다. 질량행렬은 consistent mass matrix를 사용하였고 경계 조건은 고정된 것으로 하였다. <그림 2>는 구조물의 평면형상으로 두께 15cm의 콘크리트 슬래브가 있는 것으로 하였다.

하중의 적용은 응답스펙트럼 해석법의 정확성을 알아보기 위하여 <그림 2>에 나타난 절점 A, B, C에 임의의 하중을 가하였다. 적용한 동적하중은 식 (7)에 의하여 산정된 것으로서 제자리에서 걸기 및 점핑의 경우를 가진 위치에서 적용하였으며 사람들의 평균 몸무게는 700N으로 응답스펙트럼 해석과 시간이력 해석 모두 동일한 하중을 가한 경우와 임의의 하중을 가한 경우의 응답을 구하였다.

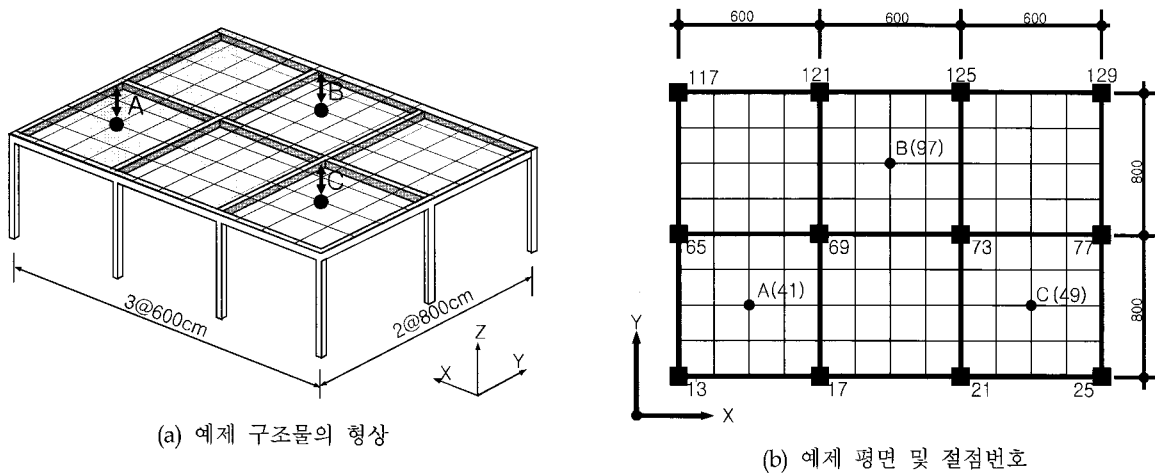
시간이력해석에서의 하중들간의 시간차는 두 하중들 간의 위상차가 $\pm \pi/2$ 를 넘지 않도록 임의로 가한 경우와 위상차가 없는 경우로 해석을 수행하였다. 응답스펙트럼 해석의 경우에는 모드간의 상관정도를 확인하기 위하여 SRSS 기법과 CQC 기법을 적용하였으며 하중간의 상관정도를 위해서는 2절에서 제안한 상관계수를 사용하여 응답을 산정하였다. 적용하중의 시간이력 및 응답스펙트럼은 그림 3에 나타내었으며 제자리 보행하중의 경우에는 기본진동수를 1.75Hz, 2, 3차 진동수의 위상각을 $\pi/2$ 로 하였으며 점핑의 경우는 기본진동수를 2Hz로 하였고 2, 3차 진동수 위상각은 0.7π (접촉시간 0.15초로 가정)로 하였다. 가진하중의 응답스펙트럼 특성을

살펴보면 보행하중과 점핑하중의 진동수 특성이 다른 것을 알 수 있다. 특히 가속도 응답스펙트럼의 경우에는 보행하중의 경우에는 1차진동수가 크게 작용하며 2, 3차의 경우는 작지만 점핑하중의 경우는 피크값의 경우에는 오히려 2차진동수 성분이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 변위 스펙트럼의 경우에는 1차진동수 성분은 점핑에 비하여 보행하중이 더 큰 것으로 나타났으며 두 하중 모두 1차진동수 성분이 크게 작용하는 것으로 나타났다.

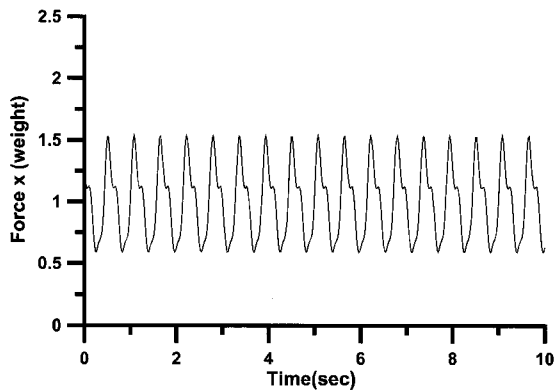
4.1 모드조합법에 따른 응답

지진에 대한 응답스펙트럼 해석법은 구조물이 정형인 경우에 모드간의 상관성이 상대적으로 적어 SRSS기법이나 CQC기법의 차이가 크지 않은 경우가 많다. 바닥판의 응답스펙트럼해석의 경우에는 그림 4와 같이 진동모드들의 진동수비의 차이가 크지 않음을 알 수 있고 연속 8차모드까지를 보면 두 개의 모드씩 짝으로 진동수비가 근접하여 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이에 모드간의 상관성이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 A절점에 <그림 3>의 0.7kN의 몸무게를 가진 사람의 보행하중을 가한 경우에 대하여 시간이력 해석 및 응답스펙트럼 해석을 수행하였다.

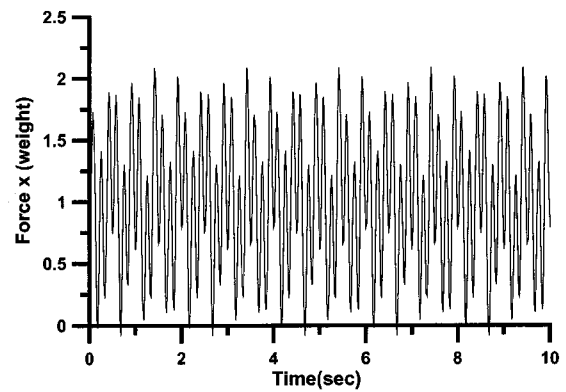
응답스펙트럼 해석은 두 가지 모드 조합법을 적용하였으며 그 결과는 <그림 5>에 나타내었다. <그림 5>는 가진위치를 포함한 (Y=400)열 위치의 변위 및 가속도 응답을 나타낸 것으로 모든 경우에서 시



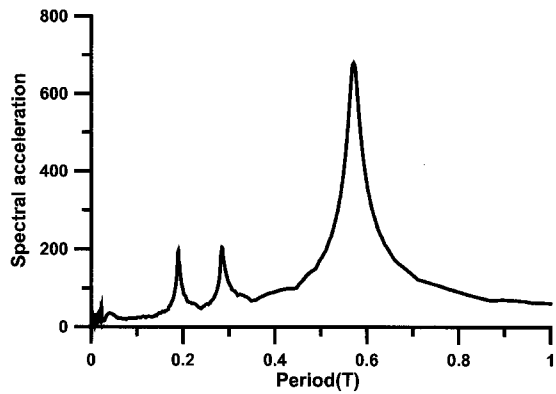
<그림 2> 예제구조물의 형상 및 절점번호



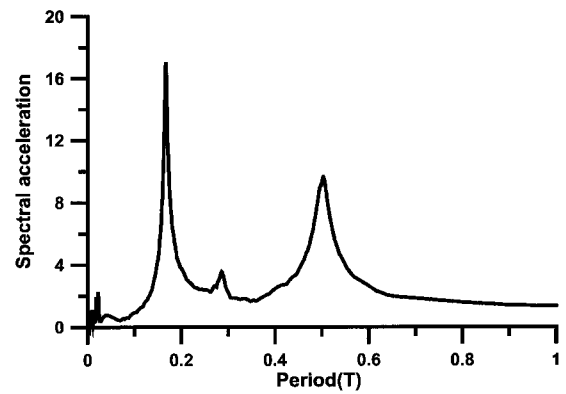
(a) 보행하중 시간이력



(b) 점핑하중 시간이력

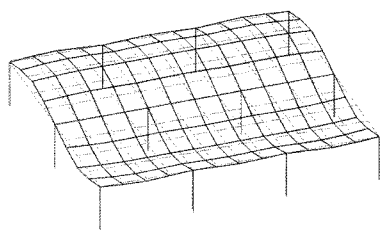


(c) 보행하중 가속도스펙트럼

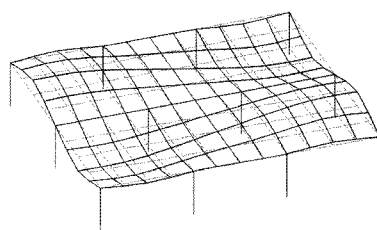


(d) 점핑하중 가속도스펙트럼

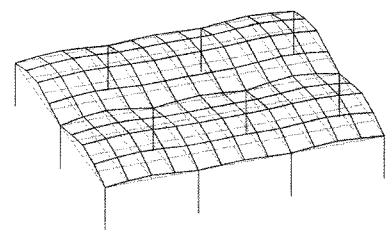
〈그림 3〉 가진하중의 시간이력 및 응답스펙트럼



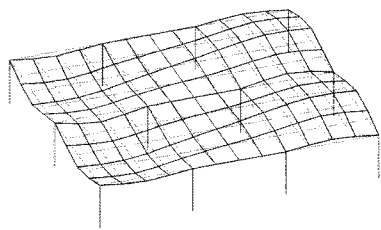
1차모드 (f: 4.25Hz)



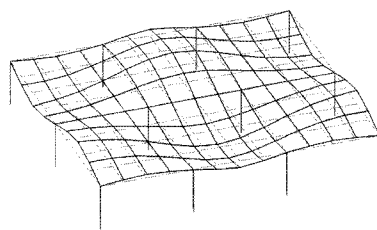
2차모드 (f: 4.68Hz)



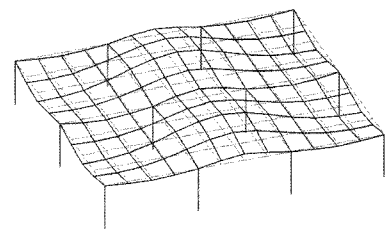
3차모드 (f: 5.01Hz)



4차모드 (f: 5.17Hz)



5차모드 (f: 5.92Hz)

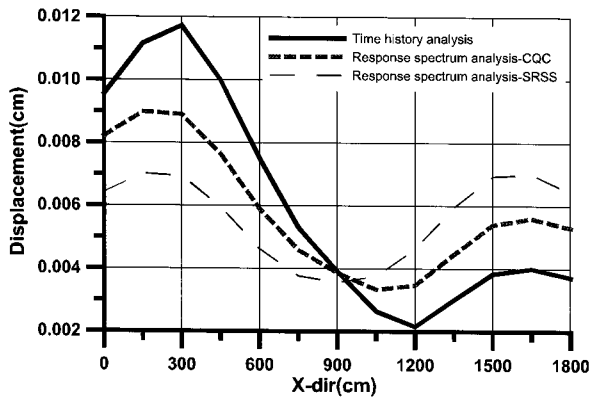


6차모드 (f: 5.99Hz)

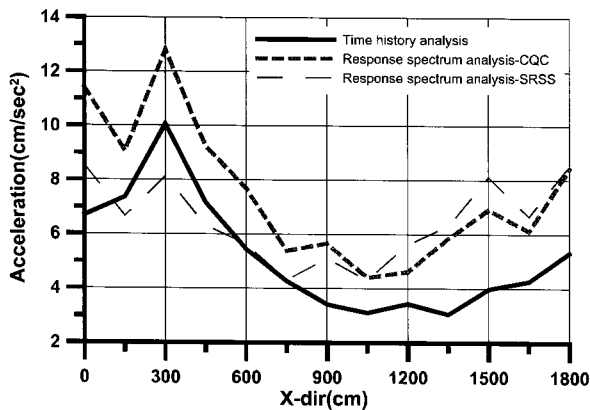
〈그림 4〉 예제 구조물의 주요 연직 모드

간이력 해석의 결과를 CQC조합의 경우가 가속도응답의 경우에 다소 과대평가하는 경향이 있지만 전

체적으로 응답을 근사하게 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 인접모드들이 많은 바닥진동해석의 경우



(a) 변위 응답



(b) 가속도 응답

〈그림 5〉 모드조합에 따른 응답비교(Y=400 위치)

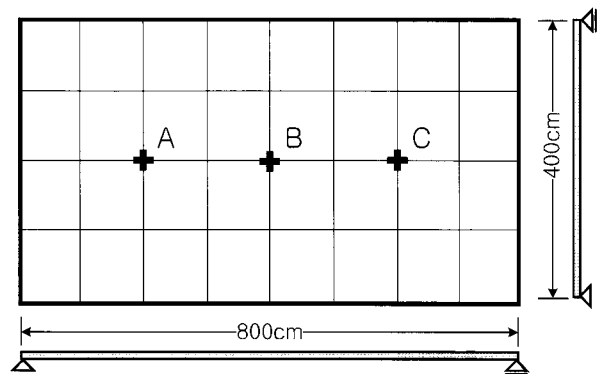
에는 반드시 모드간의 상관관계를 고려해야 함을 의미한다.

4.2 하중간의 상관관계에 따른 응답

하중간의 상관관계를 검토하기 위하여 단순지지 바닥판과 <그림 2>에 제시한 구조물의 A, B, C 절점에 보행 및 점핑하중을 가하였으며 <표 3>과 같은 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 시간이력 해석에 대하여 <표 3>과 같은 위상차를 둔 것은 <그림 1>의 상관계수를 기준으로 하여 완전히 동조된 경우(위상차 없음), 상관성이 높은 경우, 중간정도의 경우, 상관관계가 낮은 경우를 가정한 것이다. 이에 대응하여 응답스펙트럼 해석법의 경우에는 2절의 연구결과를 토대로 보행과 점핑하중에 대하여 각각 상관계수를 적용하였다.

〈표 3〉 하중간의 상관관계분석을 위한 해석조건

하중	시간이력해석		응답스펙트럼해석	
	모델명	위상차	모델명	상관계수
보행 하중	TW-0	없음	RW-0	0.95
	TW-1	0, $\pi/8$, $\pi/4$	RW-1	0.90
	TW-2	0, $\pi/4$, $\pi/2$	RW-2	0.50
	TW-3	0, $\pi/2$, $-\pi/2$	RW-3	0.00
점핑 하중	TJ-0	없음	RJ-0	0.95
	TJ-1	0, $\pi/8$, $\pi/4$	RJ-1	0.80
	TJ-2	0, $\pi/4$, $\pi/2$	RJ-2	0.50
	TJ-3	0, $\pi/2$, $-\pi/2$	RJ-3	0.00



〈그림 6〉 바닥판 예제구조물

〈표 4〉 주요 모드 진동수(Hz)

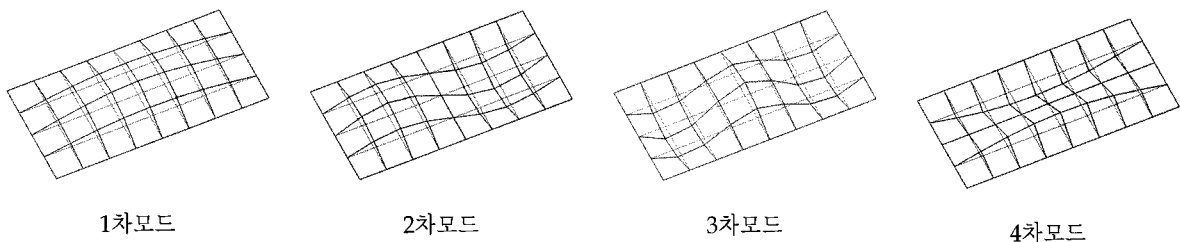
	case 1	case 2
1차모드	2.08	10.41
2차모드	3.28	16.39
3차모드	5.29	26.45
4차모드	7.12	35.62

4.2.1 바닥판의 위상이 동일한 경우의 응답

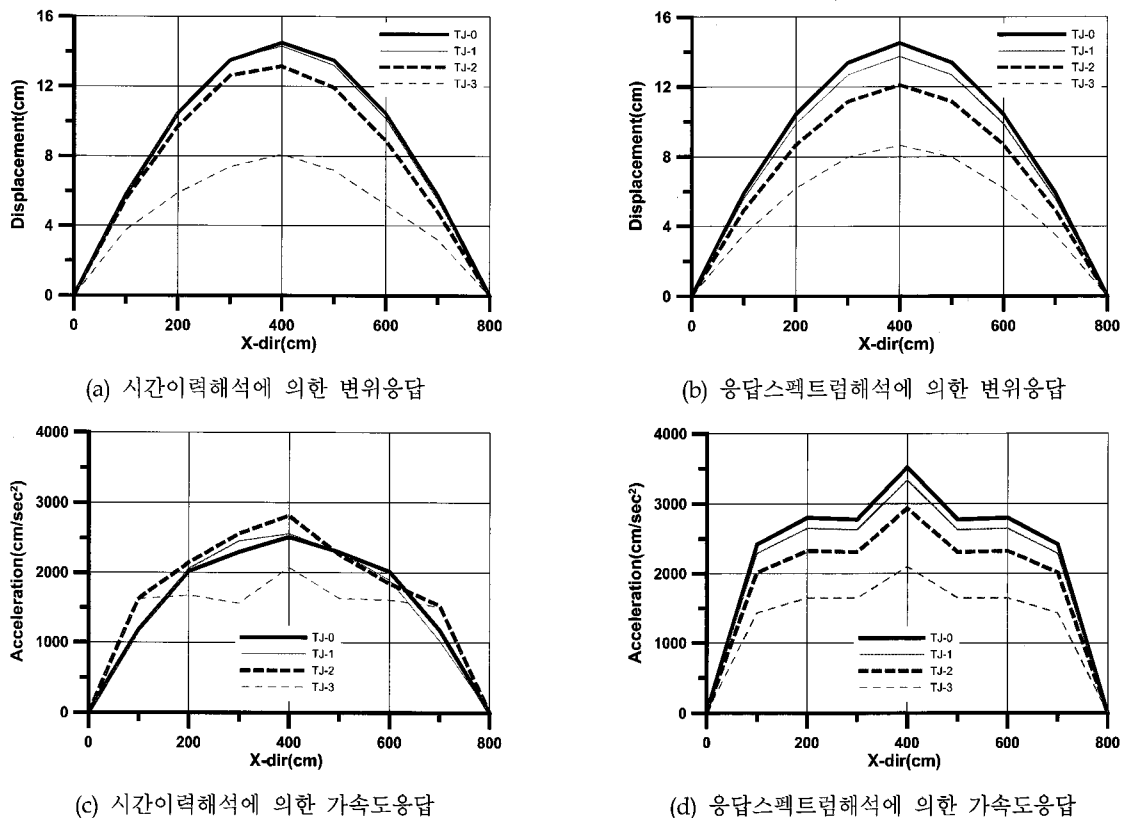
하중간의 상관관계의 영향을 파악하기 위하여 <그림 6>과 같은 4변 단순지지 바닥판의 A, B, C 절점에 점핑하중을 가하였다. 이 구조물은 <그림 7>에 나타난 바와 같이 각 모드들의 진동수가 아주 근접하지는 않아 앞선 예와는 다르게 모드간의 상관성은 상대적으로 떨어지는 예이다. 여기서는 바닥판의 두께를 조정하여 주요모드의 진동수 대역을 두 가지로 조정하였다. case 1은 하중의 진동수 대역과 유사하게 조정한 것으로 1차모드의 진동수를 점핑하중의 진동수와 유사하게 조정하였다. case 2는 1차모드 진동수를 높게 하여 하중의 진동수 대역과 벗어나도록 조정한 것이다.

두 경우(case 1, case 2)에 대한 해석결과를 그림 8과 9에 나타내었으며 하중의 진동수 대역과 구조물의 주요모드 진동수 대역의 근접유무에 관계없이 하중의 상관관계를 고려한 응답이 비교적 정확한 결과를 주는 것으로 나타났다. 특히 case 1의 변위 응답의 경우에는 위상에 따른 시간이력해석의 결과(<그림 8 (a)> 및 <그림 9 (a)>)와 이를 모사한 상관계수의 적용결과(<그림 8 (b)> 및 <그림 9 (b)>)가 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다. 다만 가속도 응답의 경우(<그림 8, 9 (c~d)>)에는 두 경우 모두에서 하중의 상관관계가 없는 경우에서 50%의 상관관계만 고려한 경우 사이의 응답을 나타냈으며 이

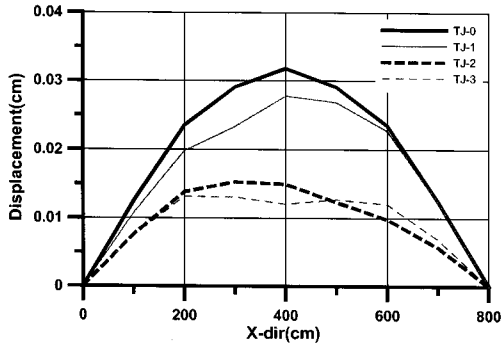
에 따라 가속도 응답의 평가시에는 하중간의 상관관계를 50%만 고려하여도 충분히 보수적인 응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다. case 1(<그림 8>)과 case 2(<그림 9>)를 기준으로 보면 하중의 진동수 대역과 구조물의 진동수 대역이 유사한 경우의 해석결과가 훨씬 정확한 것으로 나타났다. 따라서 이 해석법은 보행하중 등 낮은 주기를 갖는 동적하중에 대한 해석에 적용이 용이할 것으로 판단된다. 변위 응답의 경우에는 에어로빅과 같이 같은 리듬운동이 발생하는 경우에 대한 설계를 위하여 상관성을 95%정도로 안전하게 평가하는 것이 좋을 것으로 생각된다.



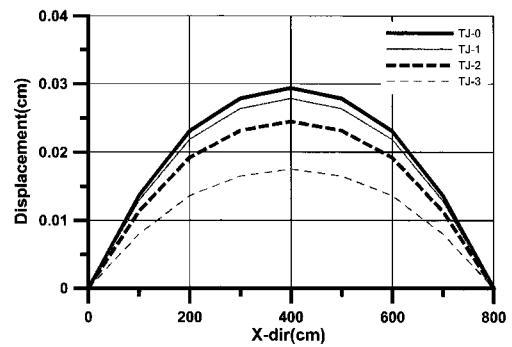
<그림 7> 단순지지 바닥판의 주요 연직진동 모드형상



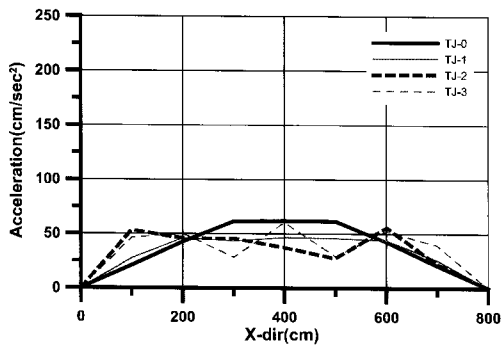
<그림 8> 그룹하중에 따른 case 1의 응답비교 (Y=400 위치, 점핑하중)



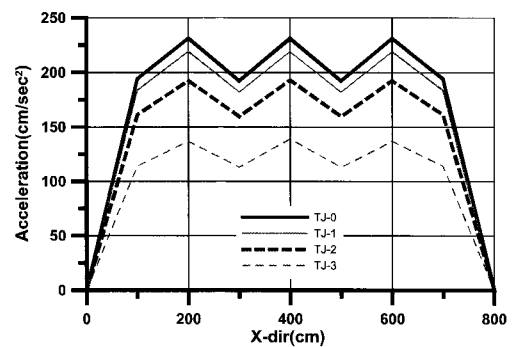
(a) 시간이력해석에 의한 변위응답



(b) 응답스펙트럼해석에 의한 변위응답



(c) 시간이력해석에 의한 가속도응답



(d) 응답스펙트럼해석에 의한 가속도응답

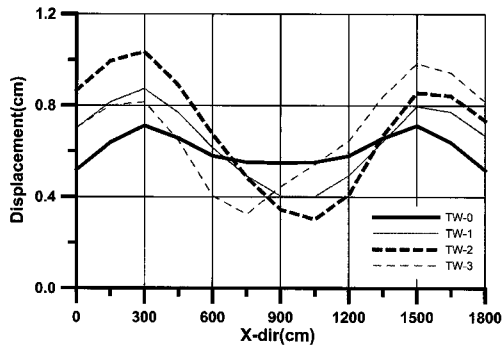
<그림 9> 그룹하중에 따른 case 2의 응답비교 (Y=400 위치, 점핑하중)

4.2.2 바닥판의 위상이 다른 경우의 응답

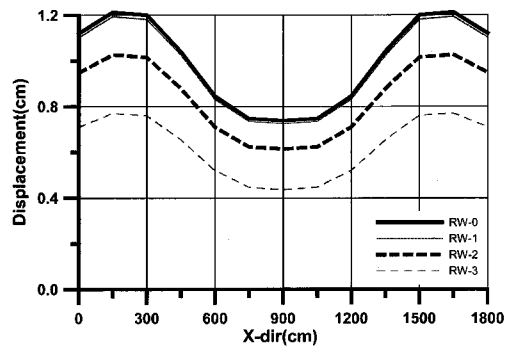
바닥판의 위상이 다른 경우란 가진 바닥판 외에 보나 기둥 등과 같은 지지부에 의하여 가진 바닥판의 위상과 다른 경우를 의미한다. 이러한 경우에는 여러 개의 하중이 작용할 경우에 바닥판에 발생하는 진동이 서로 다른 하중의 영향에 의하여 줄어들 수도 있다. 이를 확인하기 위하여 <표 3>의 조건을 <그림 2> 구조물의 A, B, C 절점에 가하였다. <그림 4>의 모드형상에서 볼 수 있듯이 1차 모드의 형상만 생각해보면 A, C 위치에 가진은 동일한 위상을 가지나 B의 위치에서는 반대의 위상을 가지며 동일한 하중이 동시에 가해지면 B의 응답은 줄어들 가능성도 있다. 이러한 경향을 보이는 모드들은 <그림 4>에서 만 1, 2, 4, 6차 모드로 구조물의 응답에 적지 않은 영향을 줄 수 있음을 알 수 있고 이러한 간섭에 의한 응답과 하중간의 상관관계에 의한 응답을 비교해볼 필요가 있다. 두 하중에 의한 응답은 동일한 무게를 가지더라도 운동의 성향에 따른 동적증폭계수의 차

이를 잘 보여주고 있다. <그림 10>과 <그림 11>을 보면 동일한 위치의 응답을 나타내지만 응답의 성향은 전혀 다른 것을 확인할 수 있다. 즉 보행의 경우를 나타낸 <그림 10>은 가진 위치(x=300, 1500cm)에서 큰 응답을 보이는 반면 <그림 11>에 나타낸 점핑의 경우는 중앙부(x=900cm)에서도 적지 않은 응답을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 하중이 가해지지 않는 수진부도 무시할 수 없음을 의미한다.

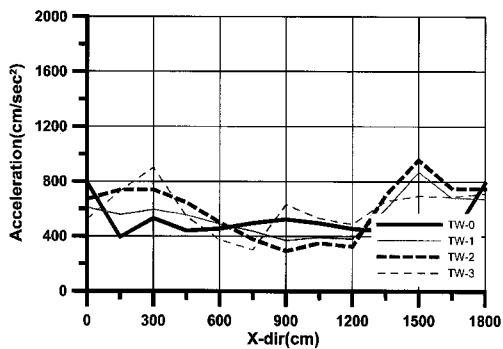
하중의 상관관계를 살펴보면 여러 개의 경간을 가진 바닥판 구조물의 경우에는 앞선 단순지지판의 응답과는 다른 양상을 <그림 10>과 <그림 11>을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 예상한 바와 같이 하중의 위상과 모드간의 간섭효과에 의하여 응답이 상쇄되는 것에 기인한 것으로 하중간의 상관관계는 50%정도면 충분한 것으로 나타났으며 아무리 하중의 위상과 모드간의 간섭효과에 의하여 응답이 줄어들더라도 하중간의 상관관계를 무시할 수 없음을 잘 보여주고 있다. 가속도응답을 살펴보면 보행하중



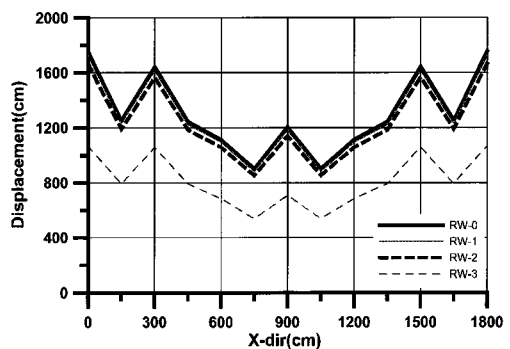
(a) 시간이력해석에 의한 변위응답



(b) 응답스펙트럼해석에 의한 변위응답

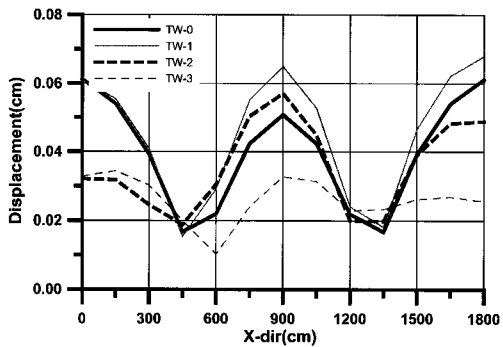


(c) 시간이력해석에 의한 가속도응답

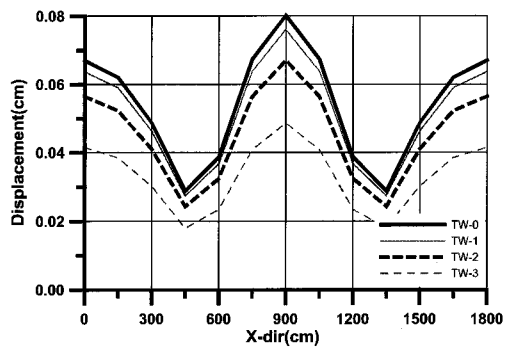


(d) 응답스펙트럼해석에 의한 가속도응답

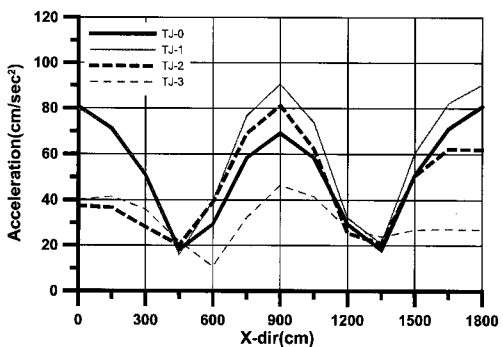
〈그림 10〉 그룹하중에 따른 응답비교 (Y=400 위치, 보행하중)



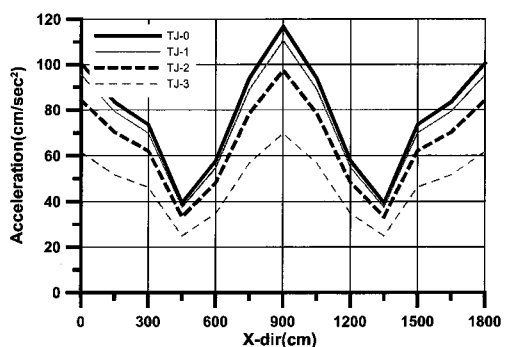
(a) 시간이력해석에 의한 변위응답



(b) 응답스펙트럼해석에 의한 변위응답



(c) 시간이력해석에 의한 가속도응답



(d) 응답스펙트럼해석에 의한 가속도응답

〈그림 11〉 그룹하중에 따른 응답비교 (Y=400 위치, 점핑하중)

의 경우(<그림 10> (c), (d))는 큰 차이를 보이지만 점핑하중의 경우(<그림 11> (c), (d))에는 상대적으로 적은 차이를 보이고 있다. 이것은 보행하중의 진동수 성분이 점핑하중에 비하여 1차진동수에 집중되어 시간이력해석에서는 응답이 크지 않은 반면에 응답스펙트럼 해석법에서는 다른 모드의 성분을 과대평가하여 다소 큰 응답을 준 것으로 판단된다. 이러한 성향은 점핑하중을 통하여 파악할 수 있으며 점핑하중은 1~3차 진동수 성분 모두가 적지 않은 크기를 가지고 있어 상대적으로 많은 모드의 응답을 나타내며 이에 따라 상대적으로 두 해석법의 응답차가 적음을 나타내고 있다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 시간 영역의 해석을 수행하지 않고 구조물 및 하중의 상관관계를 고려한 응답 스펙트럼 해석법에 관하여 연구하였다. 앞에서 살펴본 내용을 정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연직 진동 해석의 경우에는 다수의 고유진동수들이 서로 근접하므로 인접모드의 영향을 고려할 수 있는 방법(CQC 기법 등)을 사용하는 것이 요구된다.
- 2) 제안된 해석법을 통하여 하중의 상관성을 고려할 수 있었으며 전반적으로 시간이력해석결과에 비하여 보수적인 결과를 주어 설계에 적용이 용이할 것으로 생각된다. 고차모드보다는 저차모드에 동조되는 경우의 해석결과가 훨씬 정확한 것으로 나타났다. 따라서 이 해석법은 보행하중 등 낮은 주기를 갖는 동적하중에 대한 해석에 적용이 용이할 것으로 판단된다.
- 3) 동일한 경간 내에 무리하중이 발생할 경우에 하중간의 상관관계가 큰 것으로 나타났으며 이에 따라 하중간의 상관관계를 반드시 고려해야 되며 설계에 적용할 경우에는 80%이상의 상관관계를 고려해야할 것으로 판단된다.
- 4) 여러 경간의 경우에는 하중간의 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다. 그러나 이 경우에도 상관성을 무시할 수 없으며 최소한 50%

이상의 상관성을 고려해야 한다고 판단된다.

추후에는 실제 구조물의 대상으로 실험을 수행할 예정이며 고정된 위치가 아닌 이동하중(보행 등)에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 서일대학 학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이동근, 안상경, 김진구, "부분구조법에 의한 건축구조물의 국부진동해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제 12권, 제 1호, 1999.3.
2. 안상경, 홍성일, 이동근, "3차원 골조 구조물의 효율적인 연직진동해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1996
3. Edward L. Wilson., Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures, Computer & Structures Inc. 1997
4. 이동근, 김태호, "응답 스펙트럼 해석법을 이용한 건축구조물의 바닥진동해석", 한국지진공학회 논문집, 제 2권, 제 4호, 1998.12.
5. Hugo Bachmann. et al., Vibration Problems in Structures, BIRKHÄUSER, 1995.
6. Hugo Bachmann., Walter Ammann., Vibration in Structures, IABSE-AIPC-IVBH, 1987.
7. Chopra, A. K., Dynamics of Structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1995
8. 한국전산구조공학회., 구조물의 내진설계, 1997