

# 복수 절점에 가진되는 건물 바닥판의 해석을 위한 응답스펙트럼 해석법의 응용

## Application of Response Spectrum Method for Analysis of a Floor System Subjected to Dynamic Loads on Multiple Locations

김 태 호\*

Kim, Tae-Ho

이 동 근\*

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2001년 1월 18일 ; 심사종료일 : 2001년 12월 13일)

### 요 지

일반적으로 응답스펙트럼 해석법은 건물의 지진해석에 널리 사용되고 있지만 기계하중이나 이동하중 등에 의하여 발생하는 진동에 대한 해석에는 시간이력해석이 주로 사용되고 있다. 그런데, 시간이력해석법은 정확한 반면 매우 복잡하고 어려우며 많은 시간을 필요로 한다. 따라서, 본 논문에서는 동적하중을 받는 구조물의 최대응답을 응답스펙트럼 해석법을 이용하여 간편하게 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

우선, 이 해석법의 해석과정에 대하여 알아보았으며, 복수절점에 동적 하중을 받는 경우에 대해서 해석시간 및 메모리를 줄이는 방법을 제시하였다. 다음으로는 이동하중을 받는 경우에 대하여 구조물의 최대응답을 구하는 방법에 대하여 알아보았다. 마지막으로 예제를 통하여 시간이력해석을 수행하여 얻은 최대응답과 응답스펙트럼해석에 의한 최대응답을 비교하여 제시한 해석법의 정확성을 확인하였다.

**핵심용어** : 응답스펙트럼해석, 시간이력해석, 동적하중, 건축구조물, 이동하중

### Abstract

In general, the response spectrum analysis method (R.S.A) is widely used for seismic analysis of building structure. But, it is not common to apply R.S.A for the analysis of structural vibration caused by dynamic loads of equipments, machines and moving loads, etc. The time history analysis method(T.H.A) for the vibration analysis, compared with R.S.A, is very complex, difficult and time consuming. So the application of R.S.A, that is convenient to calculate maximum responses for structural vibration, is proposed in this study.

At first, the procedure for the application of the R.S.A to calculate of the maximum vibration response induced by dynamic load applied on the single point is described. And then, the process, which can save the time and the memory for calculation of the maximum vibration response induced by dynamic loads on the multi-point is proposed, and the maximum structural response caused by moving loads are obtained. Lastly, the accuracy of the proposed method is verified by comparing the results of R.S.A to T.H.A for some example models.

**Keywords** : *response spectrum analysis, time history analysis, multi-point dynamic loads, building structures, moving loads*

† 책임저자. 학생회원 · 성균관대 건축공학과 박사과정  
전화: 031-290-7574; Fax: 031-280-7570  
E-mail: tahz91@yahoo.co.kr

\* 정회원 · 성균관대 건축공학과 교수 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

### 1. 서 론

동적하중에 의하여 구조물에 발생하는 진동 문제는 구조물의 안전성(safty)보다는 사용성(serviceability)의 문제이다. 이러한 사용성의 문제는 주로 연직진동 성분에 의한 것으로 근로자, 건물의 입주자 혹은 공장 의 정밀 기계 등이 그 영향을 받을 수 있다. 이러한 경 우 구조물의 안전에는 지장이 없지만 사용자들에게 불 편함을 주거나 기계 등에 오차를 발생시킬 수도 있다. 사용성 문제는 구조물에 생기는 변위보다는 속도나 가 속도에 의하여 평가된다. 그리고 구조물의 설계시 이러 한 문제를 해결하기 위해서는 여러 가지 규준에 합당하 도록 설계하는 것이 중요하다. 이들 규준에는 최대 허용 기준 등을 제시하고 있으며 참고로 국내 기준<sup>1)</sup>에서는 바닥구조의 상하진동으로 불쾌감을 유발하지 않도록 바닥구조의 강성, 고유진동수 및 감쇄효과 등을 고려하 여 설계할 것을 요구하고 있다. Allen과 Murray<sup>2)</sup>는 바닥구조의 고유진동수 범위에 따른 설계조건에 대하 여 언급하였으며, 표 1과 같다.

위 표에서 보는 바와 같이 낮은 진동수를 가질 것 으로 예상되는 구조물은 동적해석을 수행하여 응답을 구하여야 한다. 현재 기존의 상용 프로그램은 이와 같 은 진동에 대하여 시간이력해석을 수행하고 있으며, 이는 많은 해석시간과 데이터 분석이 필요함을 의미 한다.

이전의 연구<sup>3)</sup>에서는 단일하중에 대하여 구조물의 응답을 응답스펙트럼 해석법을 이용하여 구하였으며, 하중이 복수절점에 가해질 경우에 대해서는 각각의 하중 에 대한 응답을 구한후 이를 SRSS(the Square Root of the Sum of the Squares)하여 구하였었다. 하지만 이 방법은 구조물에 가해지는 하중의 수가 많으면 많을수록 계산시간이 늘어나 결국에는 시간이력해석에 사용되는 시간과 큰 차이를 보이지 않는 단점을 가지고 있었다. 본 논문에서는 복수절점에 동적하중을 받는 경 우에 해석시간을 단축할 수 있는 해석과정을 개발하였 다. 그리고, 구조물에 가해질 수 있는 또 다른 하중조

건에 대한 것으로 이동하중을 받는 경우에 대해서도 응 답스펙트럼 해석법을 적용할 수 있는 방법에 대하여 연 구하였다.

### 2. 지반운동에 대한 응답스펙트럼 해석법

일반적으로 응답스펙트럼 해석법은 지진하중을 받는 구조물의 해석에 이용된다. 응답 스펙트럼 해석법의 장점은 여러 가지 지진 하중에 대한 거동의 평균인 설 계 스펙트럼으로 구조물의 응답을 구한다는 것이다. 이것은 구조물의 모드 형상과 여러 하중의 스펙트럼 을 알고 있으면 계산이 단순화되는 장점을 가지고 있 으며 현재 UBC, ATC 및 우리나라의 「건축물 하중 기준」과 기존의 상용 프로그램은 지진 해석의 경우 에 대하여 응답 스펙트럼 해석법을 사용하고 있다. 우 선 해석 흐름을 살펴보면 구조물의 운동방정식은 식(1) 과 같다.

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = -[M]\{1\} \ddot{X}_g(t) \tag{1}$$

여기서, [M], [C], [K], {Ẍ(t)}, {Ẋ(t)}, {X(t)}, Ẋ<sub>g</sub>(t)는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬, 가속도 벡터, 속도벡터, 변위벡터 및 지반가속도이며 {1}은 지진하중이 전달되는 자유도에 대하여 1이고 그 외는 0으로 이루어진 벡터이다.

식(1)에 [Φ]<sup>T</sup>를 선승하고 [Φ][Φ]<sup>-1</sup>=[I]임을 이용 하여 정리하면 식(2)와 같으며, 직교 조건에 의하여 각 항은 대각 요소를 제외한 나머지는 모두 0이 되어 각 모드에 대하여 독립된 단자유도 방정식을 구성할 수 있다.

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] [\Phi]^{-1} \{\ddot{X}(t)\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] [\Phi]^{-1} \{\dot{X}(t)\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] [\Phi]^{-1} \{X(t)\} = -[\Phi]^T [M] \{1\} \ddot{X}_g(t) \tag{2}$$

식(2)는 식(3)과 같이 간략히 표현할 수 있으며, [M<sub>n</sub>], [C<sub>n</sub>], [K<sub>n</sub>]은 각각 일반화된 질량, 감쇠, 강성 행렬이며, {L}는 모드참여계수(modal participaton factor)이다.

표 1 고유진동수에 따른 바닥구조의 설계조건

진동수 범위	설계 조건
9Hz 이하	공진에 대한 설계(resonance control)
9Hz~18Hz	충격에 대한 설계(impulse response control)
18 Hz 이상	정적 강성에 대한 설계(static stiffness control)

$$[M_n]\{\ddot{X}_n(t)\} + [C_n]\{\dot{X}_n(t)\} + [K_n]\{X_n\} = -\{L\}\{\ddot{X}_g(t)\} \quad (3)$$

모드질량으로 식(3)을 나누고 임의의 i번째 모드에 대하여 단자유도 운동방정식으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\ddot{x}_{ni} + 2\xi_i\omega_i\dot{x}_{ni} + \omega_i^2x_{ni} = -\frac{L_i}{M_{ni}}\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

임의의 모드 i에서의 최대 변위응답은 식(5)와 같으며 이 모드에 관련된 구조물의 변위응답은 식(6)과 같다. 여기서,  $S_d(\omega_i, \xi_i)$ 는 i번째 모드에서 감쇠비  $\xi_i$ 를 갖는 진동수  $\omega_i$ 에서의 변위 응답스펙트럼이다.

$$x_{ni, \max} = \max |x_{ni}| = L_{ni} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (5)$$

$$x_{i, \max} = \{\phi_i\} L_{ni} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (6)$$

### 3. 구조물에 직접 가해지는 동적하중에 대한 응답 스펙트럼 해석법

응답 스펙트럼 해석법은 구조물의 임의의 절점에 동적하중이 직접 가해질 경우에도 적용이 가능하다. 그림 1(a)는 일반적인 응답 스펙트럼 해석에 사용되는 해석 모형이며, 이 해석 모형은 구조물에 작용하는 하중이 지반 가속도로써 구조물에 전달되는 것이다. 반면 구조물의 내부에 진동원이 있는 경우에 대한 해석은 그림 1의 (b)와 같은 모델이어야 한다. 두 해석 모형의 차이점은 구조물에 가해지는 동적 하중이 하나는 시간에 따른 하중의 형태로 직접 전달되는 형태이고 나머지 하나는 지반 가속도로 구조물에 전달되는 것이다.

즉 응답스펙트럼해석을 수행하는 데 필요한 응답스펙트럼을 구하는 과정 또한 기존의 지진해석모델은 각 주기에 대하여 단자유도 모델이 지반가속도를 받아 나타나는 응답에 최대값을 기록하는 것이고 구조물에 동적하중이 작용하는 경우는 각 주기에 대하여 단자유도 모델이 동적하중을 직접 받아 나타나는 응답에 최대값을 기록하는 것이다.

구조물의 임의의 절점에 동적하중이 가해지는 응답스펙트럼 해석의 경우에 대하여 운동 방정식으로 표현하면 식(7)과 같다.

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

여기서,  $F(t)$ 는 구조물에 가해지는 동적하중이다. 식(2)와 같은 방식으로 식(7)을 일반화시키면 식(8)이 된다.

$$\begin{aligned} & [\phi]^T [M] [\phi] [\phi]^{-1} \{\ddot{X}(t)\} \\ & + [\phi]^T [C] [\phi] [\phi]^{-1} \{\dot{X}(t)\} \\ & + [\phi]^T [K] [\phi] [\phi]^{-1} \{X(t)\} \\ & = [\phi]^T \{F(t)\} \end{aligned} \quad (8)$$

i번째 자유도에 동적하중을 가할 경우 임의의 한 모드(j번째)에서의 식은 (9)와 같다.

$$\ddot{x}_{nj} + 2\xi_j\omega_j\dot{x}_{nj} + \omega_j^2x_{nj} = \phi_{ij}f_i(t) \quad (9)$$

이때, 임의의 모드 j에서의 최대 응답은 식(10)과 같으며 이 모드에 관련된 구조물의 변위응답은 식(11)이다.

$$x_{nj, \max} = \max |x_{nj}| = \phi_{ij} S_d(\omega_j, \xi_j) \quad (10)$$

$$x_{j, \max} = \{\phi_j\} \phi_{ij} S_d(\omega_j, \xi_j) \quad (11)$$



그림 1 단자유도 해석모형

다시 원래의 좌표계로 변환할 경우의 모드조합방법은 고층건물의 수평 진동 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 방법이 필요할 것으로 보인다. 본 논문에서는 CQC(Complete Quadratic Combination)<sup>4),5)</sup>기법을 이용하여 모드간 상관도를 고려하였다.

#### 4. 여러절점에 작용하는 동적하중에 대한 응답스펙트럼 해석

##### 4.1 여러절점에 작용하는 동적하중에 대한 응답스펙트럼 해석법의 정식화

여러 절점에 가해지는 하중들에 의한 응답은 각각의 하중에 의한 응답이 다른 응답에 영향을 끼칠 확률이 낮을 것이라고 가정하면 서로 낮은 상호 연관성(cross-correlation)을 가진다고 볼 수 있다. 이에 따라 여러 절점에 동적하중이 동시에 가해질 경우에 각각의 응답을 SRSS로 구하는 것이 편리하다. 기존의 연구결과<sup>3)</sup>에서 사용되었던 이 방법은 각각의 하중에 대한 응답스펙트럼 해석을 수행하여 재해되는 절점이 많으면 많을수록 소요되는 시간이 길어지게 되는 단점을 가졌다. 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 이용하여 해석 과정 및 시간을 단축시킬 수 있다. 우선 임의의 자유도 i에서의 응답은 식(12)와 같다.

$$U_{i, \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m U_{ij}^2} \quad (12)$$

이때, i는 자유도 번호이며, m은 가해지는 동적하중의 수이다.  $U_{ij}$ 는 j번째 동적하중에 의한 i번째 자유도의 응답으로 이를 자세히 쓰면 식(13)이다. 여기서,  $\rho_{kl}$ 은 모드상관행렬<sup>4),5)</sup>을 의미한다.

$$U_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n U_{ij(k), \max} \rho_{kl} U_{ij(l), \max}} \quad (13)$$

식(13)의 내부항을  $U_{ij}^*$ 라 하고, 행렬식으로 표시하면 식(14)이다. 여기서,  $S_{dij} = \phi_{ij} S_{dj}$  이다.

$$U_{ij}^* = \begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{dj1} \\ \phi_{i2} S_{dj2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{djin} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{dj1} \\ \phi_{i2} S_{dj2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{djin} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(14)의 첫 번째와 마지막 행렬은 다음과 같은 변환 과정에 의하여 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_{i1} S_{dj1} \\ \phi_{i2} S_{dj2} \\ \vdots \\ \phi_{in} S_{djin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{dj1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{dj2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{djin} \end{bmatrix} \quad (15)$$

이를 식(14)에 대입하여 정리하면 식(16)과 같이 풀어 쓸 수 있으며, 임의의 자유도에서의 응답은 모든 하중에 대하여 첫 번째와 마지막 행렬이 같고, 내부의 스펙트럼 값만이 차이를 갖는 식으로 변환된다.

$$U_{ij}^* = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_{dj1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{dj2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{djin} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 내부행렬의 곱에 의한 새로운 행렬을  $[\rho']$ 라 표현하면, 새로운 행렬  $[\rho']$ 의 원소는  $S_{djk} S_{djl} \rho_{kl}$ 이며, m개의 하중이 가해질 경우, 이에 대한 i절점의 응답은 식(17)과 같다.

$$U_{i, \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m U_{ij}^*} \quad (17)$$

여기서,  $U_{i1}^*, U_{i2}^*, \dots, U_{im}^*$ 는  $[\rho']$ 가 다르고 전후의 항이 동일한 항으로 구성된 식으로 이를 행렬식으로 표현하면 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{i, \max} = \left[ \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix}^T \{ [\rho_1] + [\rho_2] + \cdots + [\rho_m] \} \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix} \right]^{1/2} \quad (18)$$

#### 4.2 예제 해석

본 논문에서 제시한 해석방법의 정확성과 효율성을

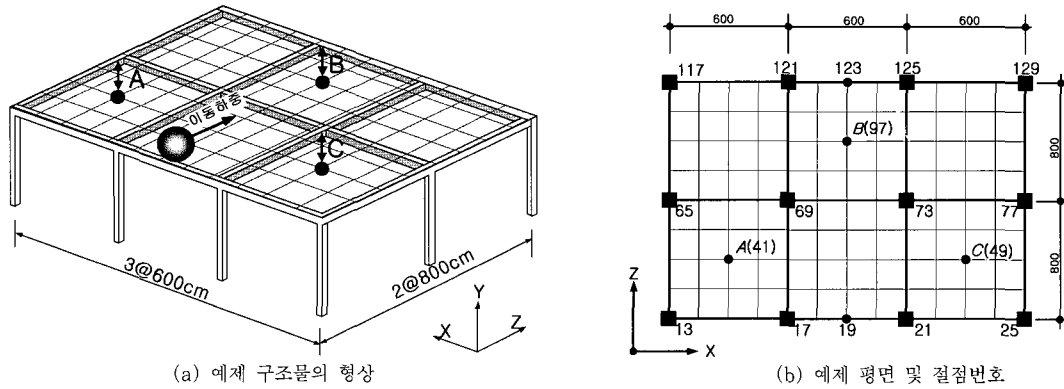


그림 2 예제구조물의 형상 및 절점번호

알아보기 위하여 다음과 같은 예제 구조물을 사용하였다. 예제 구조물의 형상은 그림 2와 같고, 보와 기둥의 크기는 각각 60cm×40cm, 40cm×40cm이다. 재질은 콘크리트로서 탄성계수는  $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ , 밀도는  $2.4 \text{ tf/m}^3$ , 프와송비는 0.167이다. 감쇠율은 5%를 적용하였다.

질량행렬은 consistent mass matrix를 사용하였고 경계 조건은 고정된 것으로 하였다. 예제 구조물의 요소분할을 보면 보는 모두 4개로 분할하였으며, 바닥 판은 4x4로 분할하였다. 자유도 선택은 보와 기둥이 만나는 절점은 y방향 회전 자유도를 제외한 모든 자유도를 고려하였으며 나머지 보의 경우는 연직 자유도와 x, z회전 자유도를 고려하였다.<sup>(6)~(8)</sup> 그림 2는 구조물의 평면형상으로 3경간 2스팬의 보 위에 두께 12cm의 콘크리트 슬래브가 있는 것으로 하였다.

하중의 적용은 응답스펙트럼 해석법의 정확성을 알

아보기 위하여 그림 2에 나타난 절점 A, B, C에 임의의 하중을 가하였다. 이때 가하여 지는 하중은 기계하중으로 구조물의 진동수와 비교적 근접하는 하중을 적용하였다.

구조물의 주요 연직 모드 형상은 그림 3에 나타내었으며 괄호 속에 나타낸 것은 고유진동수이다. 주요 연직모드를 살펴보면 저차모드가 형성되는 9Hz부근에 5개의 모드가 나타나고 있으며 이것은 각각 구조물의 일부를 진동시키는 모드이지만 임의의 하중에 대하여 이들 모드가 모두 영향을 주게되어 바닥판 전체에 진동의 영향이 나타나게 될 것으로 보인다. 이들 저차모드 다음에 나타난 연직 16차에서 20차모드들은 가진하게 될 기계하중과 관련된 모드들이다. 이들 모드의 성향을 간단히 보면 구조물 전체에 상당히 복잡한 거동을 일으키는 것들로 이와 같은 변형을 하기 위해서는 많은 에너지를 필요로 할 것으로 사료된다.

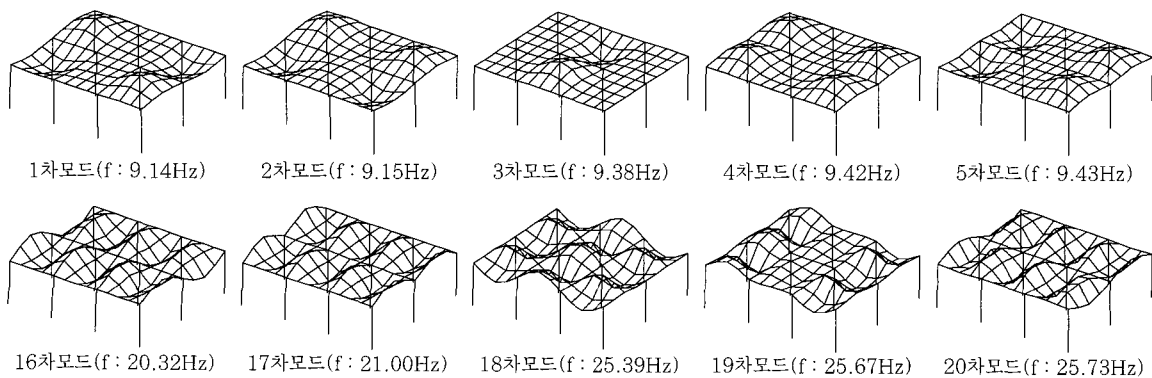


그림 3 구조물의 주요 연직 모드

4.2.1 모드조합법에 따른 응답분석

이 절에서는 절점 A에 그림 4와 같은 응답스펙트럼을 가지는 동적하중을 가하여 그 인접모드의 상관관계를 고려하여야 할 필요성에 대하여 확인하고자 한다. 이 하중의 주성분은 20Hz, 25Hz로서 구조물의 연직 16차 모드에서부터 20차 모드까지가 이 대역에 해당된다. 구조물의 응답은 그림 5에 나타내었다. 시간이력 해석에 의한 결과와 응답스펙트럼 해석에 의한 결과를 비교해 볼 때 모드조합방법을 CQC기법으로 한 것이 SRSS기법을 선택한 경우에 비하여 좀 더 가까운 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 위에서 보인 바와 같이 모드가 잘 분산된 고층 건물의 수평모드와는 달리 일반 건축 구조물의 연직진동모드는 서로 근접한 경우가 많다. 따라서, 동적하중에 대한 응답스펙트럼 해석을 수행할 경우에는 반드시 모드조합방법으로서 CQC기법과 같은 인접모드를 고려할 수 있는 방법을 선택해야 할 것으로 사료된다.

4.2.2 절점A, B, C에 동일한 진동수의 하중을 가할 경우

이 예제에서 사용된 동적하중은 25Hz성분을 가지는 것으로 그림 6(a)에 나타내었다. 일반적으로 동적하중은 하중의 시작시간 또는 위상각의 차이로 인하여 여러 절점에 하중이 동시에 가하여 질 경우에는 다른 응답을 나타낼 수 있다. 하지만 응답스펙트럼 해석의 경우에는 하중의 위상차나 시간 차이 등을 전혀 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 이러한 경우 제안된 응답스펙트럼 해석법이 얼마나 적절한 응답을 나타낼 수 있는지를 확인하는 것이 중요하다.

여기서는 시간이력해석의 경우를 세 가지로 나누어 응답을 구하여 보고 응답스펙트럼 해석에 의한 결과와 비교하였다. 먼저, 동일한 동적하중을 동시에 가지는 경우를 case 1 이라 하고 다음으로 각 절점에 가해지는 하중이 0.1초씩 늦게 시작하는 경우를 case 2라 하였다. 마지막으로 절점 A에 가해지는 동적하중의 위상

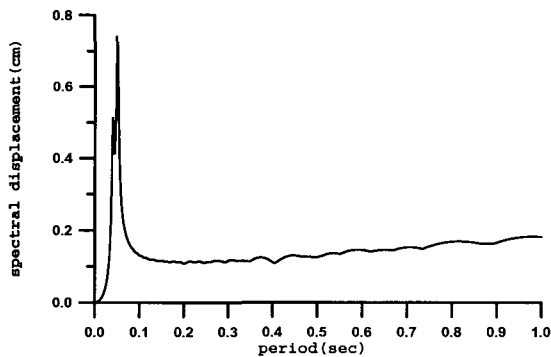


그림 4 하중의 변위 응답스펙트럼

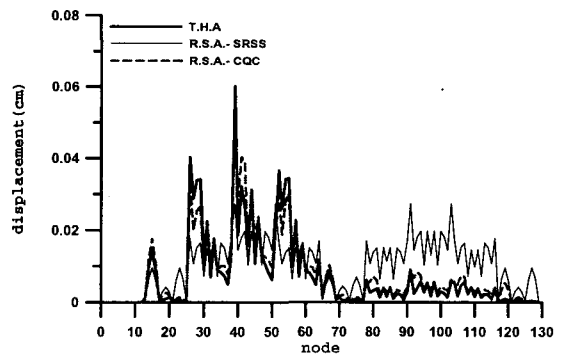
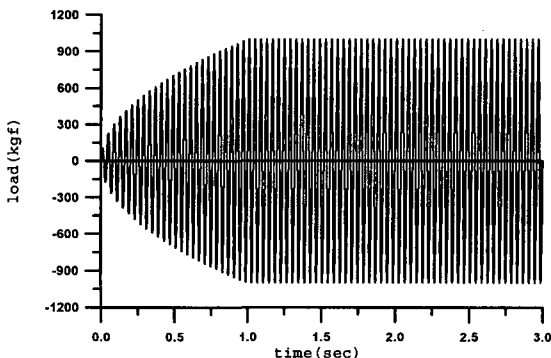
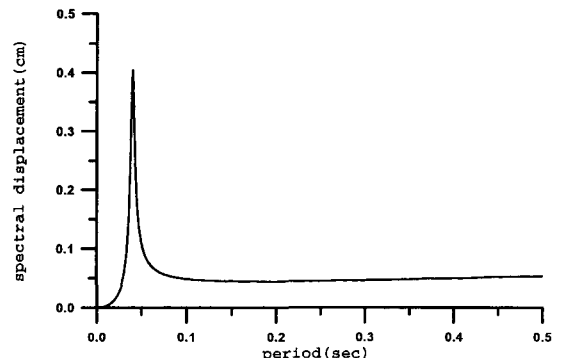


그림 5 구조물의 절점별 변위응답



(a) 시간이력



(b) 변위 응답스펙트럼

그림 6 25Hz의 기계하중에 대한 시간이력 및 변위 응답스펙트럼

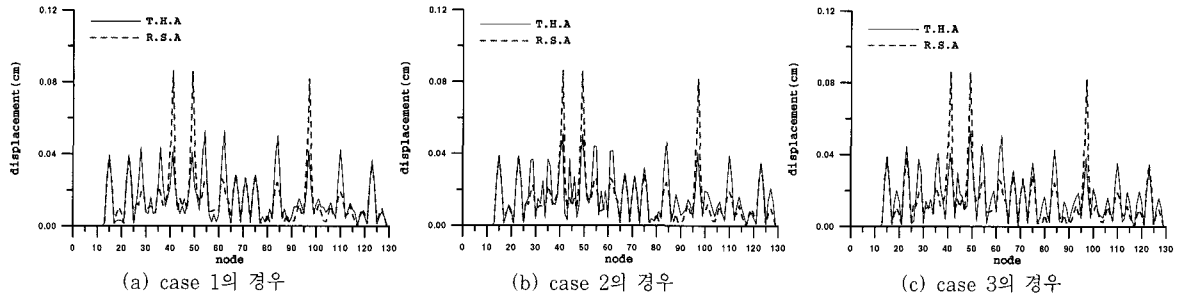


그림 7 절점별 변위응답 비교

각을 0으로 하고 절점 B, C는 각각  $\pi/2, 3\pi/2$ 의 위상 각을 가진 경우를 case 3으로 하여 응답스펙트럼 해석에 의하여 나타난 결과와 비교하였다.

구조물에 가해지는 25Hz의 기계하중에 대한 시간 이력과 응답스펙트럼은 그림 6에 나타내었으며 구조물의 거동은 그림 7에 나타내었다. 시간이력해석의 경우에는 세가지 경우 각각 응답이 모두 약간은 다르지만 전체적으로 응답스펙트럼 해석의 경우와 비교할 때 가진점을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이것은 응답스펙트럼 해석법의 특성상 주요 저차 모드의 응답이 지배적으로 나타나 가진점의 응답이 과대 평가된 것으로 보인다. 실제로는 가진점이 저차모드의 정점에 해당하더라도 고차모드에 동조되고 있어 상대적으로 크게 나타나지 않았다.

4.2.3 세 절점에 서로 다른 동적하중을 가할 경우

여기서는 앞에서 적용하였던 세 가지 동적하중(10, 20, 25Hz)을 세 점에 각각 가하였다. 가하는 방법은 절점 A, B, C에 각각 10, 20, 25Hz를 적용시켰다. 그림 8에 구조물의 응답을 나타내었다. 저차모드에 동조되는 10Hz의 하중이 작용한 절점 A에 가장 큰 응답이

나타남을 또한 알 수 있다. 변위, 속도, 가속도 응답을 각각 나누어서 보면 양상이 약간씩 달라진다. 변위 응답의 경우에는 구조물의 응답은 가진점 부근이 크게 나타나고 나머지 부분의 응답은 상당히 작게 나타난다.

그러나 속도응답에서는 지배적인 응답이 나타나는 부분은 동일하지만 나머지 부분들도 적지 않은 응답을 보이는 것으로 나타났다. 마지막으로 가속도 응답의 경우를 보면 절점 A 뿐만 아니라 절점 B와 C에 해당되는 부분들도 상당한 응답을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 절점 B와 C에 가해진 동적하중이 변형에너지는 작지만 많은 운동에너지를 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 기계하중 등에 의하여 발생하는 진동은 구조물의 안전성보다는 사용성에 영향을 미치는 바가 크다. 따라서, 위와 같은 결과를 보면 구조물의 설계에 영향을 미치는 구조물의 변위는 거의 무시할 만 하지만 속도나 가속도 성분은 구조물에 상당한 영향을 끼치고 있으며 이 경우 구조물의 설비나 정밀기계 등은 문제를 일으킬수 있으며 거주자 혹은 근로자들은 작업에 상당한 불편함을 느낄 수도 있는 것이다. 따라서, 구조물의 설계시 이러한 문제에 대한 고려가 반드시 필요하다고 볼 수 있다.

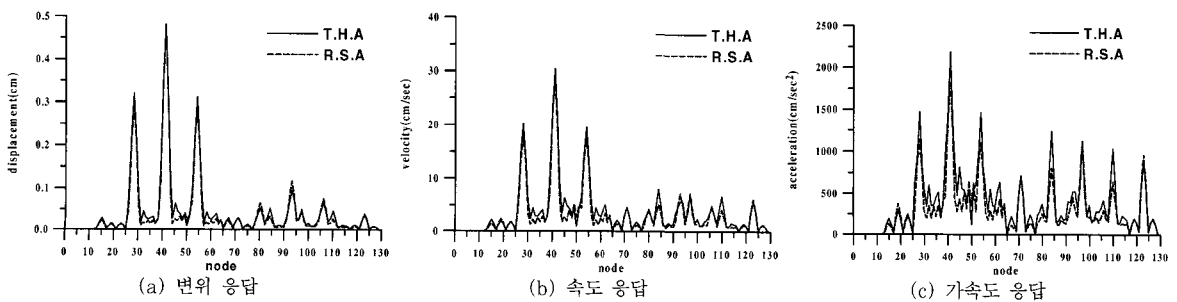


그림 8 구조물의 절점별 응답

표 2 시간영역 및 응답스펙트럼 해석시간 비교(단위 : sec)

	T.H.A	R.S.A <sup>1)</sup>	R.S.A(improved)
A점 가진	40.07	5.00	3.36
A,B,C점 가진	40.07	14.43	3.90

복수절점에 가해질 경우에 대하여 새로이 제안된 방법의 효율성을 살펴보면 표 2와 같다. 두 해석방법이 고유치해석부분까지는 동일한 과정을 거치므로 표에 나타난 시간은 시간이력해석의 경우 감쇠행렬조합, 하중조합 및 응답을 구하는데 걸린 시간을 나타낸 것이며, 응답스펙트럼해석의 경우는 순수하게 응답스펙트럼해석을 하는데 걸린 시간을 나타낸 것이다.

시간이력해석에 사용된 방법은 모드중첩법이며 두 번째로 나타난 것은 기존에 제안되었던 방법<sup>3)</sup>에 의한 것이다. 그리고 마지막에 나타난 것은 본 논문의 4.1 절에서 제시한 방법에 의한 알고리즘에 따른 것이다. 표를 보면 한 절점에 가진 한 경우에는 기존에 제시한 방법과 본 논문에서 제시한 방법이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 세 절점에 가지는 경우를 보면 시간이력해석의 경우에는 해석시간의 차이가 없지만 기존의 방법에서는 하중의 수가 늘어감에 따라서 해석 시간도 비례하여 늘어나는 경향을 보이고 있다. 하지만 본 논문에서 제안된 방법에 의하면 하중의 수가 증가하여도 해석시간의 차이가 거의없어 이 방법이 효율적인 것으로 판단된다. 그리고, 프로그램의 알고리즘에 관계는 있지만 이 예제에 사용된 메모리는 시간이력에서 사용된 양의 약 30% 정도에 불과하였다.

## 5. 이동 하중에 대한 응답스펙트럼 해석

### 5.1 이동하중에 대한 응답스펙트럼 해석법

이동하중에 대하여 응답스펙트럼을 작성하기 위해서

는 이동하중이 가해지는 절점의 시간이력을 알아야 한다. 이동하중을 모형화하는 방법에는 이동질량모형과 이동하중모형이 있다. 이동질량모형은 이동하중모형에 비하여 정확한 응답을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 일반적으로 건축구조물 내부를 통과하는 동적 하중이 건물 전체의 질량에 비하여 상대적으로 대단히 작다고 가정하면 이동하중 모형을 사용하여도 이동질량 모형과 응답에서 큰 차이를 보이지 않으며 모형화도 단순하다. 따라서, 본 논문에서는 이동하중모형을 이용하여 등가의 절점하중<sup>9)</sup>으로 치환하고 이 성분들을 이용하여 각 절점에 가해지는 응답스펙트럼을 얻어내었다. 그림 9는 이 과정을 나타낸 것으로 이동하중을 등가절점하중으로 치환한 후 이 하중을 이용하여 응답스펙트럼을 구한 것이다. 하지만 이렇게 매번 응답스펙트럼을 각 절점에서 다시 구한다는 것은 많은 시간을 필요로 하며, 비효율적인 일이기도 하다. 대체적으로 알려진 이동하중들은 주기성이 커서 대부분 하중을 받는 모든 절점에서 거의 동일한 응답 스펙트럼을 갖는다. 따라서, 한 절점에서의 응답스펙트럼을 얻어내어 이를 이동하중을 받는 절점에 모두 적용하면 용이하게 결과를 얻어낼 수 있다.

이동하중에 대한 응답스펙트럼 해석은 기본적으로 여러 절점에 동적하중을 가하는 경우와 다르지 않다. 다만, 이동 하중은 그 특성상 동적하중의 작용시간이 한정되어 있으므로, 각 절점에서의 최대응답 또한 작용 시간을 고려하여야 한다. 이에 따라 하중에 대한 응답을 조합하는 방법으로는 이동하중이 작용하는 절점들 중 응답을 구하고자 하는 절점과 동일한 시간대에 하중이 작용하는 절점들의 응답을 SRSS하는 것으로 하였다.

$$U_{i, \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m U_{ij}^2} \quad (17)$$

(m=동일 시간에 이동하중이 작용하는 절점수)

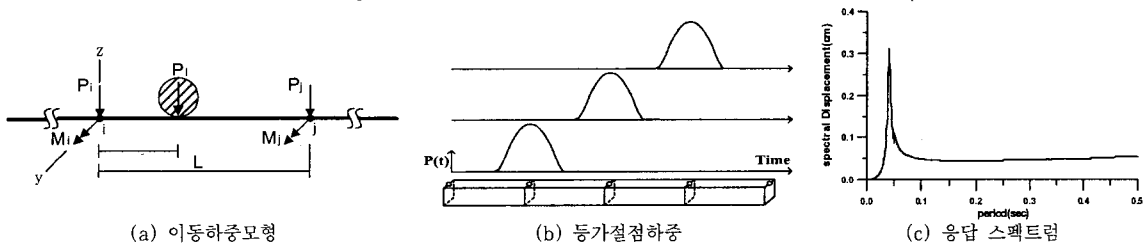


그림 9 이동하중의 응답스펙트럼 치환 과정



그리고, 최대 응답은 이러한 과정을 거쳐 구해진 응답들 중 가장 큰 값으로 하였다.

$$U_i = \text{Max} | \{ U_{i,max} \}_j \quad (18)$$

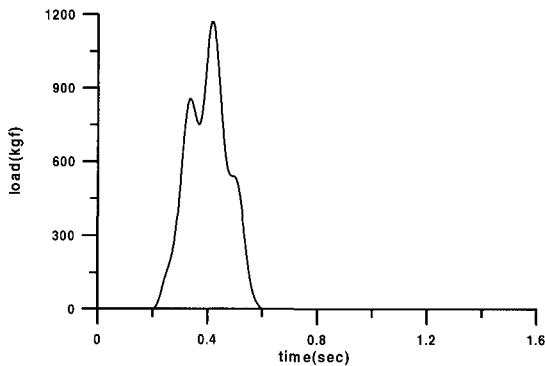
이때,  $j$ 는 이동하중이 작용하는 절점의 수이며,  $\{ U_{i,max} \}_j$ 는  $j$ 절점 위에 이동하중이 가해질 경우에  $i$ 절점의 응답을 나타낸다.

### 5.2 예제 해석

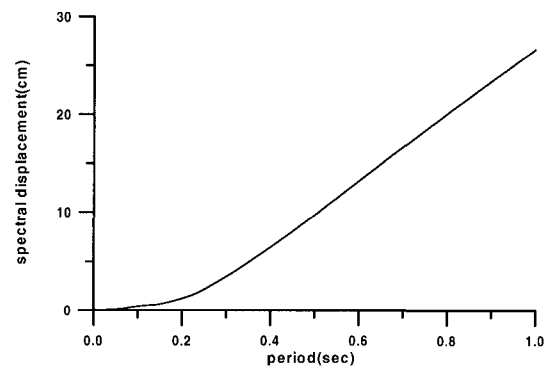
예제는 4.2절에 사용하였던 것과 동일한 구조물을 사용하였고, 사용한 하중은 1000kgf의 자중에 200kgf의 크기를 가지고 10Hz로 상하 진동하는 것으로 하였다. 이 하중은 36km/h의 일정한 속도로 절점 19번에서 123까지 구조물의 정중앙을 통과하는 것으로 설정하였다. 이 이동하중은 구조물에 매끄럽게 진입하여 통

과하는 것으로 가정하였으며 이에 따라 19번 절점과 123번 절점에 나타날 수 있는 충격 효과는 제외하였다. 이동하중이 통과하는 구조물 내부의 절점 중 하나인 45번 절점에 가해지는 하중의 시간이력과 응답스펙트럼은 그림 10에 나타내었고, 이 응답스펙트럼을 통과 지점 모두에 적용하였다.

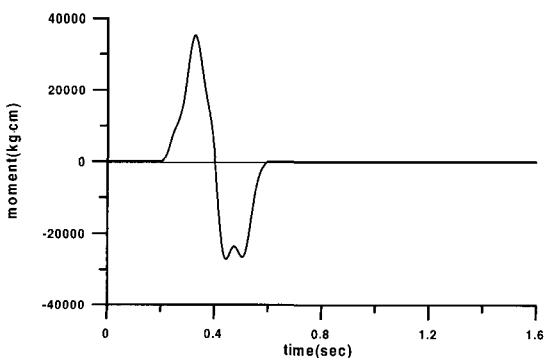
해석 결과는 그림 11에 나타내었으며 구조물의 거동을 보면 시간이력해석과 비교하여 볼 때 응답스펙트럼 해석에 의한 결과도 전체적으로 구조물의 최대응답을 잘 따라가고 있다. 회전하중의 영향은 응답이 크게 나타나는 절점들에서는 큰 영향을 미치지 못하지만 응답이 작은 절점들에서는 상당한 영향을 미친 것으로 나타났다. 이것은 하중조합방법을 SRSS기법을 취하여 응답이 크게 나타나는 절점에서는 연직하중에 의한 응답에 비하여 회전하중의 응답이 작기 때문에 소실되지만 응답이 작은 절점들은 회전하중의 영향도 연직하중과 비교할 때 무시할 수 없는 영향을 나타내었기 때문으로



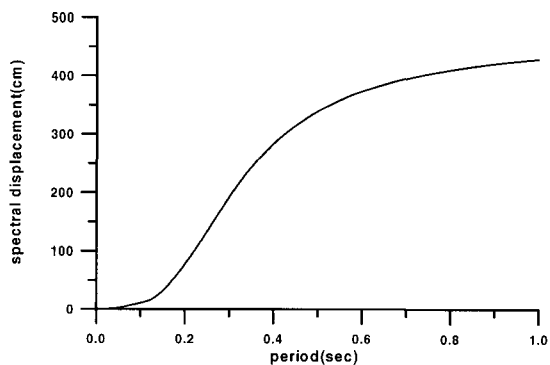
(a) 연직하중에 대한 시간이력



(b) 연직하중에 대한 변위 응답스펙트럼



(c) 모멘트에 대한 시간이력



(d) 모멘트에 대한 변위 응답스펙트럼

그림 10 45번 절점하중의 시간이력 및 응답스펙트럼

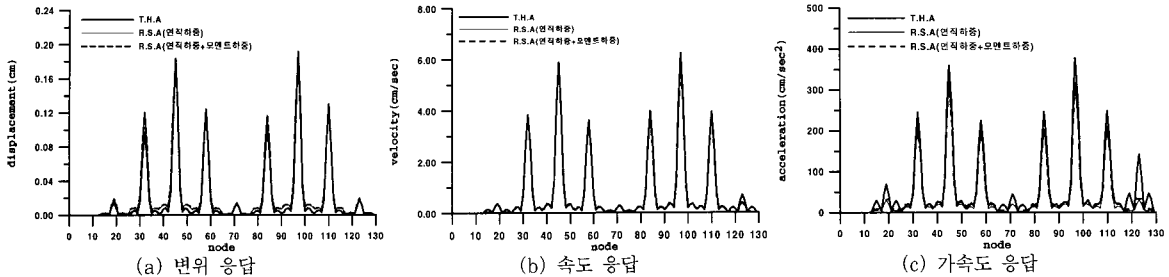


그림 11 구조물의 절점별 응답

판단된다. 따라서, 이동하중에 대한 응답스펙트럼 해석의 경우에는 연직하중 뿐만 아니라 회전하중도 고려해야 할 것으로 사료된다.

중 등에 대한 응답스펙트럼 작성 등 실제 설계자료 확보를 위한 연구도 필요한 것으로 사료된다.

## 6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 시간 영역의 해석을 수행하지 않고 모드 형상과 가진 하중에 대한 응답 스펙트럼을 이용하여 간단하고 빠르게 구조물의 각 부분의 최대 응답을 예상하는 방법에 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) 구조물의 내부에 직접적으로 작용하는 동적하중에 대한 응답스펙트럼 해석법은 가진 위치 또는 가진 하중의 수에 관계없이 비교적 근사한 응답을 얻을 수 있어 구조물의 사용성 검토에 용이 할 것으로 판단된다.
- 3) 제안된 해석법은 고차모드보다는 저차모드에 동조되는 경우의 해석결과가 훨씬 정확한 것으로 나타났다. 따라서, 이 해석법은 보행하중 등 낮은 주기를 갖는 동적하중에 대한 해석에 적용이 용이할 것으로 판단된다.
- 4) 이동하중에 대한 응답스펙트럼 해석을 수행할 경우에는 모멘트 효과도 고려해야 할 것으로 사료 된다.

추후과제로는 우선 현재 여러 절점에 동적하중이 동시에 가해질 경우의 응답을 편의상 SRSS로 구하고 있으나 상호 연관성을 고려할 수 있는 방법을 적용하기 위한 연구가 필요할 것으로 보이며, 보행하중, 차량하

## 감사의 글

본 연구는 2001년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학기술재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 대한건축학회, “강구조 한계상태 설계기준 및 해설”, 1998
2. Allen D.E. & T.M. Murray, “Design Criterion for Vibration Due to Walking”, AISC, *Engineering Journal*, 4th Qtr., 1993
3. 이동근, 김태호, “응답 스펙트럼 해석법을 이용한 건축구조물의 바닥진동해석”, 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제4호, 1998
4. Clough, R. W. & Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1993
5. 한국전산구조공학회, “구조물의 내진설계”, 1997
6. 이동근, 안상경, 김진구, “부분구조법에 의한 건축구조물의 국부진동해석”, 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제1호, 1999
7. 안상경, 홍성일, 이동근, “3차원 골조 구조물의 효율적인 연직진동해석”, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1996
8. 정길영, 송종걸, 이동근, 김우범, “구조물의 효율적인 연직진동해석”, 대한토목학회 논문집, 제15권, 제4호, 1995

9. 안상경, 김태호, 이동근, 김진구, "이동하중을 받는 골조 구조물의 진동해석", 대한건축학회 춘계학술 발표회 논문집, 1998
10. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1995
11. Edward L. Wilson., *Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures*, Computer & Structures Inc. 1997
12. Hugo Bachmann. et al., *Vibration Problems in Structures*, BIRKHÄUSER, 1995