

3차원 직선형 구조물의 동적응답에 대한 감도해석

문덕홍* · 강현석** · 최명수***

A Study of Sensitivity Analysis on Dynamic Response of Three Dimensional Rectilinear Structure

D. H. Moon · H. S. Kang · M. S. Choi

Abstract

This paper presents new sensitivity analysis algorithm for the dynamic response of three dimensional rectilinear type structure. This method is derived from a combination of the transfer stiffness coefficient method(TSCM) and the Newmark method.

We developed dynamic response analysis algorithm by TSCM. This method has more safe computational precision and time than transfer matrix method(TMM). We defined new design variable and object function, and computed simple three dimensional computation model by TSCM. The presented analysis algorithm was validated by results of changing design variable.

1. 서론

외부로부터 가진을 받는 구조물의 동적응답 해석은 설계의 안정성확보와 대형사고를 예측하고, 사전에 미리 방지할 수 있다는 차원에서 대단히 중요시 되고 있다¹⁾.

최근, 퍼스널 컴퓨터(PC ; Personal Computer)의 발달에 따라 과거 대형컴퓨터에 의존했던 대규모 구조물의 동적응답 해석을 PC에 적용하고 있는 실정이다. 대상으로 하는 시스템이 대형일 경우, 동적응답 해석에 요구되는 자유도가 확대되어 계산에 PC를 사용할 경우, 계산시간 및 메모리의 확대라는 점이 문제점으로 지적되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 시스템을 이산화한 후, 시간적분법과 각 시간스텝에서의 응답을 전달매트릭스법(TMM ; Transfer Matrix Method)을 이용한 기법이 보고되어 있다^{2), 3)}.

그리고 이 기법을 이용하여 설계변수와 목적함수를 정의한 후, 설계변수를 변경하지 않고도 어떤 설계변수에 대한 동적응답의 감도해석을 통해 설계변수의 변경에 따른 동적응답의 변화를 예측할 수 있는 해석기법이 최적설계의 한 분야로 활용되고 있다⁴⁾. 저자들은 강성계수의 축차전달에 기본개념을 두고 있는 전달강성계수법에 시간적분법인 Newmark 법을 적용하여, 새로운 동적응답 해석알고리즘을 개발하여 다양한 구조물에 대하여 계산정도 및 계산시간을 TMM 및 FEM과의 비교를 통해서 그 유용성을 제시하였다^{5), 6)}.

본 연구는 3차원 직선형 구조물을 해석대상으로 하여 중·급힘·비틀림 연성 강제진동에 대한 동적응답의 감도해석 알고리즘을 정식화하고, 간단한 수치계산 모델에 대한 수치실험을 통해 본 해석기법의 유용성을 입증하고자 한다.

2. 동적응답 해석

2.1 해석대상의 모델링

해석대상계는 이산화하여 질량과 회전관성 및 보요소가 직렬결합되어 있는 집중질량계로 모델링

* 부경대학교 제어기계공학과

** 부경대학교 대학원

*** 부경대학교 산학연협동연구센터

한다. 계의 양단과 기초지지(BSE : base support element)가 존재하는 부분 및 강제력이 존재하는 부분등 힘벡터가 불연속으로 되는 부분은 반드시 절점으로 분할하여, 계의 좌단을 절점 0, 우단을 절점 n 이라 하고, 절점 $j-1$ 과 절점 j 사이의 보요소를 j 번째 부재라고 한다. 본 연구에서 사용하고 있는 기호의 의미는 다음과 같다.

- (1) 기호 「 \wedge 」는 기초지지 요소에 대한 물리량을 나타낸다.
- (2) 기호 「 $\bar{}$ 」는 절점 좌측의 물리량, 붙어 있지 않은 기호는 절점 우측의 물리량을 나타낸다.
- (3) 아래첨자 「 j 」는 절점 j 또는 j 번째 부재에 관한 물리량을 나타낸다.

2.1 운동방정식

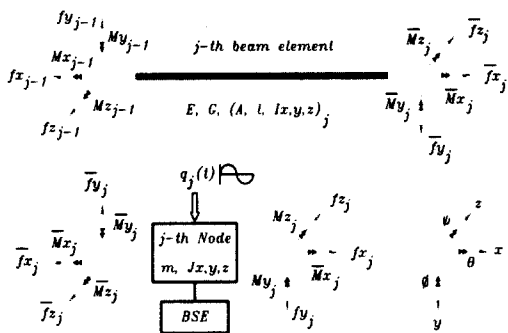


Fig. 1 Positive direction of state vector

Fig. 1은 절점 j 와 j 번째 부재에서의 변위와 힘의 정방향을 나타낸다. 해석모델의 전체계는 이런 기본요소들의 직렬결합으로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{d}_j(t) &= [x \quad \theta \quad y \quad \psi \quad z \quad \phi]_j^t \\
 \bar{\mathbf{f}}_j(t) &= [\bar{f}_x \quad \bar{M}_x \quad \bar{f}_y \quad \bar{M}_y \quad \bar{f}_z \quad \bar{M}_z]_j^t \\
 \mathbf{f}_j(t) &= [f_x \quad M_x \quad f_y \quad M_y \quad f_z \quad M_z]_j^t
 \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)은 변위벡터 $\mathbf{d}_j(t)$ 및 힘벡터 $\mathbf{f}_j(t)$ 을 나타낸다. x, y, z 및 θ, ϕ, ψ 는 XYZ 방향에서의 변위 및 각변위를 나타내고, f_x, f_y, f_z 및 M_x, M_y, M_z 는 각 방향의 힘 및 모멘트를 나타낸다. Fig. 1에서 E, G, I, l, A, j 는 j 번째 부재의 종탄성계수, 횡탄성계수, 단면2차 모멘트, 길이 및 면적을 나타낸다. \mathbf{q}_j 는 강제력벡터를 나타

내며, 기초지지요소는 전단과 회전의 스프링 및 감쇠기로 이루어져 있다.

이상으로부터 절점 j 에서의 운동방정식은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_j \ddot{\mathbf{d}}_j(t_k) + \mathbf{C}_j \dot{\mathbf{d}}_j(t_k) + \mathbf{K}_j \mathbf{d}_j(t_k) \\
 + \bar{\mathbf{f}}_j(t_k) - \mathbf{f}_j(t_k) = \mathbf{q}_j(t_k)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_j &= \text{diag}[k_x \quad K_x \quad k_y \quad K_y \quad k_z \quad K_z]_j^t \\
 \mathbf{C}_j &= \text{diag}[c_x \quad C_x \quad c_y \quad C_y \quad c_z \quad C_z]_j^t \\
 \mathbf{M}_j &= \text{diag}[m \quad J_x \quad m \quad J_y \quad m \quad J_z]_j^t \\
 \mathbf{q}_j(t) &= [q_x \quad Q_x \quad q_y \quad Q_y \quad q_z \quad Q_z]_j^t
 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 시간적분법

본 연구에서 시간적분법으로는 Newmark 법을 사용하였다. 시간 t_k 에서의 가속도벡터 $\ddot{\mathbf{d}}_j(t_k)$ 및 속도벡터 $\dot{\mathbf{d}}_j(t_k)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{\mathbf{d}}_j(t_k) &= \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{d}_j(t_k) - \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{d}_j(t_{k-1}) \\
 &\quad - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1})
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{d}}_j(t_k) &= \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \mathbf{d}_j(t_k) - \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \mathbf{d}_j(t_{k-1}) \\
 &\quad - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right) \dot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) \ddot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1})
 \end{aligned}$$

식(4)에서 β, γ 는 차분상수, Δt 는 시간스텝을 의미한다.

2.3 강성계수 및 보정벡터의 전달식

시간 t_k 에서의 절점 j 에서의 변위벡터 및 힘벡터 사이의 관계는 다음식으로 정의한다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{f}}_j(t_k) &= \bar{\mathbf{S}}_j \mathbf{d}_j(t_k) + \bar{\mathbf{e}}_j(t_k) \\
 \mathbf{f}_j(t_k) &= \mathbf{S}_j \mathbf{d}_j(t_k) + \mathbf{e}_j(t_k)
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\mathbf{S}}_j, \mathbf{S}_j$ 및 $\bar{\mathbf{e}}_j(t_k), \mathbf{e}_j(t_k)$ 는 시간 t_k 에서의 강성계수 및 힘 보정벡터를 나타낸다. 식(2)와 식(4)로부터

$$P_j \mathbf{d}_j(t_k) = \mathbf{Q}_j(t_k) + \mathbf{f}_j(t_k) - \bar{\mathbf{f}}_j(t_k) \quad (6)$$

여기서

$$P_j = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{M}_j + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \widehat{\mathbf{C}}_j + \widehat{\mathbf{K}}_j \quad (7)$$

$$\mathbf{Q}_j(t_k) = \mathbf{q}_j(t_k) - \mathbf{M}_j \mathbf{H} \mathbf{a}_j(t_k) - \widehat{\mathbf{C}}_j \mathbf{H} \mathbf{v}_j(t_k)$$

식(7)에서 $\mathbf{H} \mathbf{a}_j(t_k)$ 및 $\mathbf{H} \mathbf{v}_j(t_k)$ 는 시간 t_{k-1} 에서의 변위, 속도, 가속도로 결정되는 벡터이고, 시간스텝 t_k 에서는 이미 알고 있는 양이 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H} \mathbf{a}_j(t_k) = & -\frac{1}{\beta \Delta t^2} \cdot \{ \mathbf{d}_j(t_{k-1}) \\ & + \Delta t \dot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) + (\frac{1}{2} - \beta) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H} \mathbf{v}_j(t_k) = & \dot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) + \Delta t \cdot \{ (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{d}}_j(t_{k-1}) \\ & + \gamma \mathbf{H} \mathbf{a}_j(t_k) \} \end{aligned}$$

j 번째 부재 양단에서의 힘과 변위의 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{f}}_j(t_k) \\ \mathbf{f}_{j-1}(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} \mathbf{d}_j(t_k) \\ \mathbf{d}_{j-1}(t_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_j &= \mathbf{F}_j, & \mathbf{B}_j &= -\mathbf{F}_j \mathbf{L}'_j \\ \mathbf{C}_j &= \mathbf{L}_j \mathbf{F}_j, & \mathbf{D}_j &= -\mathbf{L}_j \mathbf{F}_j \mathbf{L}'_j \\ \mathbf{L}_j &= \text{diag}[1 \ 1 \ \mathbf{L}' \ \mathbf{L}']_j \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_j = \left(\text{diag} \left[\frac{l}{EA}, \frac{l}{GL}, \mathbf{F}_z, \mathbf{F}_y \right]_j \right)^{-1}$$

$$\mathbf{L}'_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ l & 1 \end{bmatrix}_j, \quad \mathbf{F}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{l^3}{3EI} & \frac{l^2}{2EI} \\ \frac{l^2}{2EI} & \frac{l}{EI} \end{bmatrix}_j$$

($i = y$ or z)

식(5)와 식(9)의 관계로부터 절점 $j-1$ 의 우측에서 절점 j 의 좌측으로 강성계수 및 보정벡터를 전달하는 필드 전달식을 구한다.

$$\bar{\mathbf{S}}_j = \mathbf{A}_j + \mathbf{B}_j \mathbf{V}_j$$

$$\bar{\mathbf{e}}_j(t_k) = -\mathbf{B}_j \mathbf{G}_j^{-1} \mathbf{e}_{j-1}(t_k) \quad (11)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

여기서

$$\mathbf{G}_j = \mathbf{S}_{j-1} - \mathbf{D}_j \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_j = \mathbf{G}_j^{-1} \mathbf{C}_j \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

절점 j 의 좌측에서 절점 j 의 우측으로 강성계수 및 보정벡터를 전달하는 포인트 전달식을 구하기 위해 식(5)와 식(6)의 관계로부터

$$\mathbf{S}_j = \bar{\mathbf{S}}_j + \mathbf{P}_j$$

$$\mathbf{e}_j(t_k) = \bar{\mathbf{e}}_j(t_k) - \mathbf{Q}_j(t_k) \quad (13)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

계산의 효율을 위하여 필드 전달식과 포인트 전달식을 통합한 필드·포인트 전달식은 식(11)과 식(13)의 관계에 의해

$$\mathbf{S}_j = \mathbf{A}_j + \mathbf{B}_j \mathbf{V}_j + \mathbf{P}_j$$

$$\mathbf{e}_j(t_k) = -\mathbf{B}_j \mathbf{G}_j^{-1} \mathbf{e}_{j-1}(t_k) - \mathbf{Q}_j(t_k) \quad (14)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

강성계수 및 보정 벡터의 식은 전달식의 형태이므로, 계산을 시작하는 절점 0에서의 강성계수 및 보정벡터 \mathbf{S}_0 와 $\mathbf{e}_0(t_k)$ 를 구해야 한다.

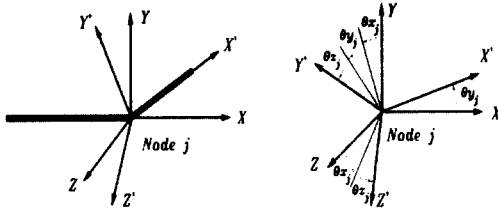
Fig. 1에서와 같이 계의 좌단의 경계조건 ($\bar{\mathbf{f}}_0 = 0$)과 식(5)와 식(6)의 관계로부터

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{P}_0$$

$$\mathbf{e}_0(t_k) = -\mathbf{Q}_0(t_k) \quad (15)$$

2.4 좌표변환

식(15)를 시작으로 식(14)를 이용하여 연속적으로 \mathbf{S}_j 와 $\mathbf{e}_j(t_k)$ 를 전달계산하면서 Fig. 2(a)와 같이 굴곡부등이 존재하는 경우, 요소들 사이의 좌표계가 다르게 된다.



(a) Crooked point (b) Euler angle
Fig. 2 Coordinate transformation at node j

Fig. 2(b)와 같이 요소들이 오일러 각 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$; 만큼 회전이 되어 있다면, 좌표 변환 매트릭스 R_j 를 사용하여 XYZ 좌표계에서 $X'Y'Z'$ 좌표계로 변환해야 된다.

$$\begin{aligned} d_j'(t_k) &= R_j d_j(t_k) \\ f_j'(t_k) &= R_j f_j(t_k) \end{aligned} \quad (16)$$

$$R_j = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} & 0 & r_{15} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 & r_{24} & 0 & r_{26} \\ r_{31} & 0 & r_{33} & 0 & r_{35} & 0 \\ 0 & r_{42} & 0 & r_{44} & 0 & r_{46} \\ r_{51} & 0 & r_{53} & 0 & r_{55} & 0 \\ 0 & r_{62} & 0 & r_{64} & 0 & r_{66} \end{bmatrix}$$

식(16)에서

$$\begin{aligned} r_{11} &= r_{22} = \cos(\theta_b), & r_{13} &= -r_{26} = \cos(\theta_a) \sin(\theta_b) \\ r_{15} &= r_{24} = \sin(\theta_a) \sin(\theta_b), & r_{31} &= -r_{62} = -\sin(\theta_b) \cos(\theta_c) \\ r_{33} &= r_{66} = \cos(\theta_a) \cos(\theta_b) \cos(\theta_c) - \sin(\theta_a) \sin(\theta_c) \\ r_{35} &= -r_{64} = \sin(\theta_a) \cos(\theta_b) \cos(\theta_c) + \cos(\theta_a) \sin(\theta_c) \\ r_{42} &= r_{51} = \sin(\theta_b) \sin(\theta_c), & r_{62} &= \sin(\theta_b) \cos(\theta_c) \\ r_{44} &= r_{55} = -\sin(\theta_a) \cos(\theta_b) \sin(\theta_c) + \cos(\theta_a) \cos(\theta_c) \\ r_{46} &= -r_{53} = \cos(\theta_a) \cos(\theta_b) \sin(\theta_c) + \sin(\theta_a) \cos(\theta_c) \end{aligned} \quad (17)$$

식(16)과 식(5)의 관계로부터 다음식을 구한다.

$$\begin{aligned} S_j' &= R_j S_j R_j^t \\ e_j'(t_k) &= R_j e_j(t_k) \end{aligned} \quad (18)$$

식(15)를 계산의 시작으로 식(14)와 식(18)을 이용하여 계의 좌단에서 우단으로 강성계수와 보정벡터를 연속적으로 전달 계산할 수 있다.

2.5 응답계산

강성계수 및 보정벡터를 좌단에서 우단으로 연속적으로 전달 계산한 후, 계의 우단의 경계조건 ($f_n(t_k) = 0$)과 식(5)로부터 우단의 변위벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_n(t_k) = -S_n^{-1} e_n(t_k) \quad (19)$$

식(19)로부터 구한 $d_n(t_k)$ 과 식(5), 식(6), 식(9)로부터 다음식을 구한다.

$$\begin{aligned} d_{j-1}(t_k) &= V_j d_j(t_k) - G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) \\ (j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (20)$$

식(19)에서 계의 우단에서의 변위벡터를 계산한 후, 식(20)을 이용하게 되면 계의 우단에서 좌단으로, 전체 절점의 변위벡터를 연속적으로 계산할 수 있다.

3. 감도해석 알고리즘

설계변수 x_i 로 식(5)를 미분하면 다음과 같은 감도 전달강성계수법의 기본식을 구한다.

$$\begin{aligned} \bar{f}_j^*(t_k) &= \bar{S}_j^* d_j(t_k) + \bar{S}_j d_j^*(t_k) + \bar{e}_j^*(t_k) \\ f_j^*(t_k) &= S_j^* d_j(t_k) + S_j d_j^*(t_k) + e_j^*(t_k) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, 기호 *는 설계변수 x_i 에 대한 편미분 ($\partial/\partial x_i$)을 의미한다.

감도 필드전달식을 구하기 위해 식(11)을 설계변수 x_i 로 미분하면

$$\begin{aligned} \bar{S}_j^* &= A_j^* + B_j^* V_j + Z_j (G_j^* V_j - C_j^*) \\ \bar{e}_j^*(t_k) &= Z_j^* e_{j-1}^*(t_k) - \\ & (B_j^* + Z_j G_j^*) G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서

$$Z_j = -B_j G_j^{-1} \quad (23)$$

식(13)을 설계변수 x_i 로 미분하면 감도 포인트 전달식을 구한다.

$$\begin{aligned} S_j^* &= \bar{S}_j^* + P_j^* \\ e_j^*(t_k) &= \bar{e}_j^*(t_k) - Q_j^*(t_k) \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)에 식(22)을 대입하면 감도 필드·포인트 전달식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_j^* &= A_j^* + B_j^* V_j + \\
 &Z_j (G_j^* V_j - C_j^*) + P_j^* \\
 e_j^*(t_k) &= Z_j^* e_{j-1}^*(t_k) - \\
 &(B_j^* + Z_j G_j^*) G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) - Q_j^*(t_k)
 \end{aligned} \quad (25)$$

감도 강성계수매트릭스 및 보정벡터의 전달식도 마찬가지로 점화식의 형태이기 때문에 계산을 시작하는 초기값이 있어야 한다. 식(15)로부터

$$\begin{aligned}
 S_0^* &= P_0^* \\
 e_0^*(t_k) &= -Q_0^*(t_k)
 \end{aligned} \quad (26)$$

식(26)과 식(25)를 이용하여 계의 좌단에서 우단으로 감도 강성계수 및 보정벡터를 연속적으로 계산할 수 있다.

우단의 경계조건과 식(19)을 설계변수로 미분하면 우단에서의 감도 변위벡터는

$$d_n^*(t_k) = -S_n^{-1} \{ S_n^* d_n(t_k) + e_n^*(t_k) \} \quad (27)$$

식(20)을 설계변수로 미분하면

$$\begin{aligned}
 d_{j-1}^*(t_k) &= \{ -G_j^* C_j + G_j^{-1} C_j^* \} d_j(t_k) + \\
 &V_j d_j^*(t_k) + G_j^* e_{j-1}(t_k) - G_j^{-1} e_{j-1}^*(t_k)
 \end{aligned} \quad (28)$$

여기서

$$G_j^* = G_j^{-1} G_j^* G_j^{-1} \quad (29)$$

그러므로 식(27)과 (28)을 이용하면 계의 우단에서 좌단까지의 감도 상태벡터를 연속적으로 구할 수 있다. 좌표변환의 관계는 앞절과 동일하다.

4. 수치실험

본 해석기법의 유용성을 알아보기 위해 Fig. 3과 같은 간단한 3차원 직선형 구조물을 대상으로 수치실험을 하였다. 계산 모델은 각 부재의 길이가 1 m이고, 중심단면(외경 : 0.05 m)인 총 4개의 부재로 구성되고, 또한 각 부재는 2⁴개의 집중질량으로 등분하여 계산하였다. 구조물의 밀도 ($\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$)와 종 및 횡탄성계수 ($E = 2.06 \times 10^{11} \text{ [N/m}^2\text{]}$, $G = 7.92 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$)

는 연강(Mild steel)의 물성치를 사용하였다.

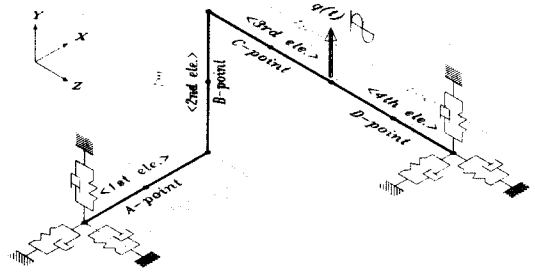


Fig. 3 Numerical model

Fig. 3에서 양단은 전단 및 회전의 스프링 ($k_x = k_y = k_z = 10^{12} \text{ [N/m]}$, $K_x = K_y = K_z = 10^{12} \text{ [Nm/rad]}$)과 감쇠기 ($c_x = c_y = c_z = 1 \text{ [Ns/m]}$, $C_x = C_y = C_z = 1 \text{ [Nms/rad]}$)로 이루어진 기초지지 요소가 존재하고, 그림에서와 같이 우단으로부터 1m인 지점에 조화 강제력 $q_y(t) = q \cos \omega t$ ($q = 100 \text{ [N]}$, $\omega/2\pi = 16 \text{ [Hz]}$)가 작용하고 있는 계산모델로서, 이후의 수치계산은 외력의 10주기 (0.625 [sec])까지 하였다. 상수 $\beta = 1/4$, $\gamma = 1/2$ 을 사용하였고, 각 절점의 초기변위와 감도변위 및 초기속도와 감도속도는 모두 0으로 하였다.

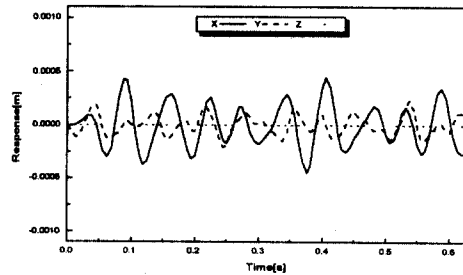


Fig. 4 Time response(C-point : TSCM & TMM)

Fig. 4는 수치모델의 세번째 부재의 중간지점인 C-Point에서의 시간응답을 외력의 1주기를 10등분 (NDT ; Number of division time)으로 등분할한 경우 ($\Delta t = 6.25 \times 10^{-2} \text{ [sec]}$)의 TSCM 및 TMM에 의한 응답을 나타낸 그림으로서 두 기법이 잘 일치하고 있다.

Table 1은 본 연구에서 적용한 감도해석문제를 나타낸다. 설계변수는 계산모델의 두번째 부재의 외경 (d_2)을 취했고, 목적함수는 특정절점의 전 시간에서의 감도응답의 평균치를 취했다.

Table 1 Sensitivity analysis problem

Design variable	d_2 (Diameter of 2nd Ele.)
Object function	$\tilde{y}_j = \sqrt{\frac{1}{NDT} \sum_{k=1}^{NDT} \left(\frac{\partial d_j}{\partial d_2} \right)_k^2}$

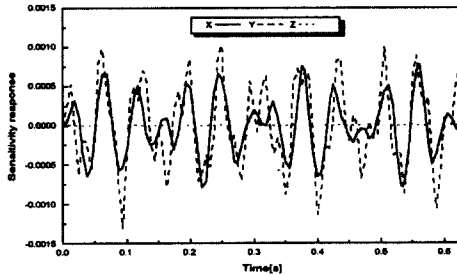


Fig. 5 Sensitivity dynamic response of C-Point

Fig. 5는 앞절의 알고리즘을 토대로 하여 Fig. 4의 동적응답에 대한 감도변위를 TSCM에 의해 구한 그림이다.

Table 2. Result of Sensitivity Analysis(C-point)

	X-dir.	Y-dir.	Z-dir.
\tilde{y} (C-point)	0.00037669	0.00053412	0.00000120

Table 2는 감도변위의 평균치를 나타내었다. Fig. 5와 Table 2의 결과로부터 두 번째 부재의 외경이 설계변수가 되었을 경우, C점에서의 각축에 대한 응답의 변화중에서 Y축에서의 응답변화에 가장 큰 영향을 미치고, Z축에서의 응답변화에는 영향이 가장 작은 것을 의미한다.

이 결과를 확인하기 위해 두 번째 부재의 외경을 0.05m에서 0.025m로 변경했을 경우의 응답을 Fig. 6에 나타내었다.

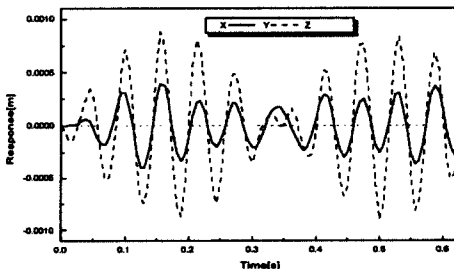


Fig. 6 Sensitivity dynamic response

Fig. 4와 Fig. 6을 비교해 보면 Z축에서의 응답은 거의 변화가 없었고, Y축에서의 응답이 가장 크게 변했음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 3차원 구조물의 종·굽힘·비틀림 연성 강제진동의 동적응답에 대한 감도해석 알고리즘을 진동해석기법으로는 전달강성계수법을 시간적분법으로는 Newmark 법을 도입하여 해석알고리즘을 정식화하였다.

간단한 수치계산모델에 대하여 동적응답을 구하기 위한 해석을 한 후, 설계변수 및 목적함수를 정의하여 동적응답에 대한 감도해석을 수행하여, 실제로 설계변수의 변화에 따른 결과와 비교하여 본 해석 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 浪田方郎, 川畑淳一, 市橋一郎, 福田俊彦, “彈塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発”, 日本機械學會論文集(C編), 61卷, 590号, pp. 3881~3888, 1995
2. H. Yamakawa, T. Ohinishi, “Dynamic Response Analysis of Structure with Large Degrees of Freedom by Step-by-step Transfer Matrix Method”, Bull. of JSME, Vol. 26, No. 211, pp. 109~116, 1983
3. A. S. Kumar, T. S. Sankar, “A New Transfer Matrix Method for Response Analysis of Large Dynamic Systems”, Computers & Structures, Vol. 23, No. 4, pp. 545~552, 1986
4. H. Yamakawa, “Efficient Sensitivity Analysis and Optimum Designs of Linear/Nonlinear Mechanical and Structural Systems for Static and Dynamic Problems by using the ordinary and the Incremental Transfer Matrix Method”, KSME/JSME Vibration Conference, pp. 252~261, 1987
5. 문덕홍의 2인, “전달강성계수법에 의한 분기형 구조물의 시간이력응답해석”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회는문집, pp. 426~431, 1998
6. 문덕홍의 2인, “전달강성계수법에 의한 직선형구조물의 시간이력응답 해석알고리즘에 관한 연구”, 한국동력기계공학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 74~79, 1999

