

설계파라미터 변경에 의한 비례 감쇠 구조물의 동특성 변화 해석

이 정 윤*, 이 정 우[†], 이 준 호**, 오 재 응***

Eigenderivative Analysis by Modification of Design Parameter in the Proportional Damping System

J. Y. Lee, J. W. Lee, J. H. Lee, J. O. Oh

Key Words: Damping Natural Frequency(감쇠고유진동수), Vibrational Mode(진동모드), Generalized Mass(일반질량), Generalized Stiffness(일반강성), Sensitivity Analysis(감도해석), Sensitivity Coefficient(감도계수), Proportional Damping(비례감쇠), F.E.M(유한요소법)

Abstract

This paper predicts the modified proportional damping structural eigenvectors and eigenvalues due to the change in the mass and stiffness of a proportional damping structure by iterative calculation of the sensitivity coefficient using the original dynamic characteristics. The method is applied to examples of a cantilever and 3 degree of freedom lumped mass model by modifying the mass and stiffness. The predicted dynamic characteristics are in good agreement with these from the structural reanalysis using the modified mass and stiffness.

1. 서 론

기계 구조물에 요구되는 동특성과 거동을 실행시키기 위한 최적 설계를 시행하는 경우 시행착오를 줄이기 위한 방법은 주로 설계자의 축적된 경험과 실험을 통하여 이루어 졌다. 또한 기계 구조물이 경량화, 다양화, 소형화됨에 따라 구조물의 동특성을 해석하는 것이 중요사항이 되고 동특성을 개선하고자 많은 연구들이 시도되었다.

감도해석을 통하여 설계파라미터의 변화가 전체 구조물 시스템에 어떠한 영향을 미치는가를 미리 예측할 수 있고 목적하는 동특성을 얻기 위하여 변화하는 설계파라미터를 예측할 수 있다. 특히 감쇠를 고려한 동특성 변화에 대한 연구 사례가 드물고, 실제 시스템은 복잡한 구조물이나 이산계로 이루어져 적용이 어렵다. 따라서 복잡한 구조물이나 이산계, 연속계에 적용할 수 있도록 유한요소법의 질량 및 강성 행렬을 사용한 감도계수로부터 설계 파라미터가 변경된 구조물의 고유진동수, 진동모드, 질량변화, 감쇠변화 및 강성변화에 대한 해석이 시급한 형편이며 시간과 자원 낭비를 줄이기 위해 최소한의 조작을 통해 다양한 모델에서의 동특성을 해석할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

[†] 주저자 경기대학교 기계공학과 대학원

E-mail: jylee@kuic.kyonggi.ac.kr

Tel : (031)249-9811 FAX : (031)249-9796

* 경기대학교 기계시스템디자인공학부

** 경기대학교 기계공학과 대학원

*** 한양대학교 기계공학부

고유치에 대한 감도해석 방법은 크게 직접법(direct method)과 모달 방법(modal method) 두가지로 나누어진다. 직접법(direct method)은 오직 반복된 고유치가 없을 경우 적용되어 실용적인 면에서 문제가 있었다. 이 방법은 1976년 Nelson⁽¹⁾이 발표하였다.

모달방법(modal method)은 구조 변경의 모드(mode) 변화량이 변경 전 모드에 감도 계수를 곱한 합으로 표시하여 용이하게 감도 해석을 수행하나 동특성 변화를 구할 때 구조 변경 후 모드 변화량이 없다고 가정하였기 때문에 구조 변경량이 많으면 오차가 증가하여 변경량이 많은 구조물에 적용하는 데 문제가 있었다.

Fox와 Kapoor⁽²⁾가 고유모드 변화량을 변경 전 구조의 고유모드 선형결합으로서 표시하였으며, Yoon⁽³⁾, Zhang⁽⁴⁾등은 수치해석 방법인 반복법을 통하여 고유치와 고유벡터의 감도해석을 하였으며, Adhikari⁽⁵⁾는 선형 감쇠 이산계에서의 고유치와 고유벡터의 변화 비율을 시스템의 변수를 고려하여 구하였다. 또한 이정운⁽⁶⁾은 복잡한 구조물이나 이산계에 적용할수 있도록 유효요소법의 질량, 강성행렬을 사용하여 변경 전 고유치, 고유벡터를 감도계수가지고 변경 후 고유치 고유벡터, 질량 및 강성변화를 예측하였으며, Lee⁽⁷⁾, 정길호⁽⁸⁾등은 대수학적인 방법을 통하여 고유치와 진동모드를 구하고 감쇠계에서의 감도해석을 행하였다.

비감쇠에서의 동특성변화에 대한 연구와 감쇠를 고려한 단순 구조물의 동특성변화 해석은 많이 수행되어져 왔으나 감쇠를 고려한 복잡한 구조물이나 이산계에서 적용 어려웠다.

본 논문에서는 비례감쇠를 고려하였으며, 구조물이나 이산계에서 적용하였다. 또한 강성행렬과 질량행렬을 사용하여 감쇠행렬을 예측하고, 감도계수로부터 설계파라미터가 변경된 구조물의 감쇠 고유진동수, 진동모드를 변경 전의 감쇠 고유진동수, 진동모드, 질량행렬과 강성행렬만으로 예측할 수 있는 방법을 제시 하였다. 연구의 타당성을 검증하기 위하여 3자유계도와 외팔보에 적용하여 감쇠 고유진동수, 진동모드 변화량을 예측하고 재해석치와 비교 검토 하였다.

2. 이 론

2.1 감쇠 구조물의 동특성 변화

비례 감쇠 구조물에서 질량, 강성 또는 감쇠의 변경으로 동특성이 변하게 된다. N 자유도계의 비례 감쇠계에서의 자유진동 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = 0 \quad (1)$$

여기서 M, C와 K는 질량, 감쇠 및 강성행렬이며, 감쇠 행렬 C를 질량행렬 M과 강성행렬 K의 1차 결합으로 다음과 같이 정의 하였다.

$$[C] = a[M] + b[K] \quad (2)$$

여기서 a 와 b는 비례상수 이다.

식(1)에 식(2)를 대입하고 해를 $x = e^{\omega_{od}t}$ 라고 할 경우 식(3)으로 구해진다.

$$(\omega_{od}^2 + a\omega_{od})[M] + (b\omega_{od} + 1)[K] = 0 \quad (3)$$

비례 감쇠계를 비감쇠화 한 구조 변경 전·후의 동특성은 다음과 같다

$$\left\{ [M_0] + \frac{(b\omega_{od} + 1)}{(\omega_{od}^2 + a\omega_{od})} [K_0] \right\} \phi_0 = ([M_0] + \lambda_0 [K_0]) \phi_0 = 0 \quad (4)$$

여기서, $\lambda_0 = \frac{(b\omega_{od} + 1)}{(\omega_{od}^2 + a\omega_{od})}$ 이다.

$$([M] + \lambda[K])\phi = \{ ([M_0 + \Delta M] + (\lambda_0 + \Delta\lambda)[K_0 + \Delta K]) \} (\phi_0 + \Delta\phi) = 0 \quad (5)$$

여기서 $K_0, M_0, K, M, \Delta K$ 과 ΔM 은 각각 변경 전 강성 행렬, 질량 행렬, 변경 후 강성행렬, 질량행렬과 강성 행렬, 질량행렬의 변화량이며 $\lambda, \phi, \lambda_0, \phi_0, \Delta\lambda$ 와 $\Delta\phi$ 는 각각 구조 변경 후 고유치, 진동모드, 변경 전 고유치, 진동모드, 고유치 변화량과 진동모드 변화량이다.

2.2 질량 및 강성 변경에 의한 일반질량의 해석

정규화시킨 i차 모드의 일반질량은 다음과 같다

$$m_{oi} = \{ \phi_o \}_i^T [M_o] \{ \phi_o \}_i = 1 \quad (6)$$

$$m_{ii} = \{ \phi \}_i^T [M] \{ \phi \}_i = 1 \quad (7)$$

여기서 m_{oi}, m_{ii} 는 각각 i차 모드의 변경 전 변경후 일반질량이다. 또한 i차 모드의 변경 후 일반질량은 다음과 같이 된다.

$$m_{ii} = \{ \phi \}_i^T [M] \{ \phi \}_i$$

$$\begin{aligned}
 &= \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i^T [M_o + \Delta M] \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i \\
 &= \{ \phi_o \}_i^T [M_o] \{ \phi_o \}_i + \{ \phi_o \}_i^T [M_o] \{ \Delta\phi \}_i + \{ \phi_o \}_i^T \\
 &[\Delta M] \{ \phi_o \}_i + \{ \phi_o \}_i^T [\Delta M] \{ \Delta\phi \}_i + \{ \Delta\phi \}_i^T [M_o] \\
 &\{ \phi_o \}_i + \{ \Delta\phi \}_i^T [M_o] \{ \Delta\phi \}_i + \{ \Delta\phi \}_i^T [\Delta M] \{ \phi_o \}_i \\
 &+ \{ \Delta\phi \}_i^T [\Delta M] \{ \Delta\phi \}_i \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서 고유벡터의 변화량을 변경 전 고유벡터의 진동모드의 선형결합으로 표시될 수 있다고 가정하면⁽²⁾ 다음과 같이 된다.

$$\{ \Delta\phi \}_i = \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \phi_{ok} \quad (9)$$

여기서 α_{ki} 는 i 차 모드에 대한 k 차 모드의 감도 계수이다.

$\{ \phi_o \}_i^T [\Delta M] \{ \phi_o \}_j = \Delta M_{ij}$ 으로 나타내면 일반질량 m_{ij} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 m_{ii} &= m_{oii} + 2\alpha_{ii}m_{oii} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2 m_{oii} + \Delta M_{ii} \\
 &+ 2 \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{ik} + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{qk} \quad (10)
 \end{aligned}$$

또한 정규화된 일반질량은 1이므로 α_{ii} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 1 &= 1 + 2\alpha_{ii} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2 + \Delta M_{ii} + 2 \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{ik} \\
 &+ \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{qk} \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{ii} &= -\frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2 + \Delta M_{ii} + 2 \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{ik} \right. \\
 &\left. + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{qk} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

한편 m_{ij} 는 다음과 같이 표현된다.

$$m_{ij} = \{ \phi \}_i^T [M] \{ \phi \}_j$$

$$\begin{aligned}
 &= \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i^T [M_o + \Delta M] \{ \phi_o + \Delta\phi \}_j \\
 &= m_{oij} + \alpha_{ij}m_{oii} + \alpha_{ji}m_{oij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \alpha_{kj} m_{okk} \\
 &+ \Delta M_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{ik} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta M_{jk} \\
 &+ \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta M_{pk} \quad (13)
 \end{aligned}$$

정규화된 일반질량 $m_{oij} = 0$, $m_{oii} = 1$ 이므로

$$\begin{aligned}
 \alpha_{ij} + \alpha_{ji} &= - \left\{ \Delta M_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta M_{ik} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta M_{jk} \right. \\
 &\left. + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta M_{pk} \right\} - \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \alpha_{kj} \quad (14)
 \end{aligned}$$

이다.

2.3 질량 및 강성변경에 의한 일반강성의 해석
정규화시킨 일반강성은 다음과 같다

$$k_{oii} = \{ \phi_o \}_i^T [K_o] \{ \phi_o \}_i = \lambda_o = \omega_{oi}^2 \quad (15)$$

$$k_{ii} = \{ \phi \}_i^T [K] \{ \phi \}_i = \lambda = \omega_i^2 \quad (16)$$

여기서 k_{oii} , k_{ii} 는 각각 i 차 모드의 변경 전 및 변경 후 일반강성이며 ω_i^2 , ω_{oi}^2 는 각각 i 차 모드의 변경 전 및 변경 후의 고유진동수이다. 또한 변경 후 i 차 모드의 일반강성은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 k_{ii} &= \omega_i^2 = \{ \phi \}_i^T [K] \{ \phi \}_i \\
 &= \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i^T [K_o + \Delta K] \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서 $\{ \phi_o \}_i^T [\Delta K] \{ \phi_o \}_j = \Delta K_{ij}$ 으로 나타내면 일반강성 k_{ii} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 k_{ii} &= k_{oii} + \alpha_{ii}k_{oii} + \Delta K_{ii} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{ik} \\
 &+ \alpha_{ii}k_{oii} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2 k_{okk} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{ki} \\
 &+ \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{qk} \quad (18)
 \end{aligned}$$

한편 k_{ij} 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 k_{ij} &= \{ \phi \}_i^T [K] \{ \phi \}_j \\
 &= \{ \phi_o + \Delta\phi \}_i^T [K_o + \Delta K] \{ \phi_o + \Delta\phi \}_j \\
 &= k_{oij} + \alpha_{ij} \omega_{oi}^2 + \Delta K_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{ik} + \alpha_{ji} \omega_{oj}^2 \\
 &+ \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \alpha_{kj} \omega_{ok}^2 + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{kj} \\
 &+ \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{pk} \quad (19)
 \end{aligned}$$

정규화된 일반강성 $k_{oij} = 0$, $k_{ij} = 0$ 이므로

$$\begin{aligned}
 \alpha_{ij} \omega_{oi}^2 + \alpha_{ji} \omega_{oj}^2 &= \Delta K_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{ik} \\
 &+ \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \alpha_{kj} \omega_{ok}^2 + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{jk}
 \end{aligned}$$

$$+ \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{qk} \quad (20)$$

이 된다.

2.4 반복법을 이용한 감도 계수 해석

질량 및 강성 변경에 의한 진동모드 변화가 없다고 가정하여 1차 감도계수 α_{ii} , α_{ij} 를 구하고 반복법을 이용해 감도 계수 α_{ij} , α_{ij} 를 수렴할 때까지 구한다.

$\alpha_{ij}(m)$ 은 m번 반복해서 구한 감도 계수라고 정의하면 식(12), (14)과 (20)으로부터 일차 및 (m+1)차 감도 계수는 다음과 같이 된다.

$$\alpha_{ii}(1) = - \frac{\Delta M_{ii}}{2} \quad (21)$$

$$\alpha_{ij}(1) = \frac{-\Delta M_{ij} \omega_{oi}^2 + \Delta K_{ij}}{\omega_{oi}^2 - \omega_{oj}^2} \quad (22)$$

$$\alpha_{ii}(m+1) = -\frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2(m) + \Delta M_{ii} + 2 \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) \Delta M_{ik} \right.$$

$$\left. \alpha_{ij}(m+1) = \frac{1}{\omega_{oj}^2 - \omega_{oi}^2} \left\{ \Delta K_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi}(m) \sum_{k=1}^n \alpha_{kj}(m) \Delta M_{qk} \right\} \quad (23)$$

$$\left. \Delta K_{kj} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj}(m) \Delta K_{jk} + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi}(m) \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) \Delta K_{qk} + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi}(m) \sum_{k=1}^n \alpha_{kj}(m) \Delta M_{qk} \right\} - \frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{oj}^2 - \omega_{oi}^2} \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) \alpha_{kj}(m) + \Delta M_{ij} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) \Delta M_{kj} + \sum_{k=1}^n \alpha_{kj}(m) \Delta M_{ik} + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi}(m) \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}(m) \Delta M_{qk} \right\} \quad (24)$$

2.5 고유 진동수 및 진동모드 변화 해석

고유진동수 변화는 식(18)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\omega_i^2 = \omega_{oi}^2 (1 + 2\alpha_{ii}) + \sum_{k=1}^n \omega_k^2 \alpha_{ki}^2 + \Delta K_{ii} + 2 \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{ik} + \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{qk} \quad (25)$$

진동모드의 변화는 식(9)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\{\phi\} = \{\phi_o\} + \{\Delta\phi\}_i = \{\phi_o\} + \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \phi_{ok} \quad (26)$$

3. 적용 예

Fig. 1은 위에서 수식으로 정의된 이론을 적용하기 위해 사용한 외팔보의 모델을 나타낸 것이다. 변경전의 외팔보의 질량, 길이, 탄성계수를 1로 하였으며 질량과 강성의 변화를 주기 위해서 5번 요소의 단면을 20% 증가시켜 EI는72.8%, 질량은 20%를 증가시켰고 10번 요소는 질량만 30%를 증가 시켰으며 감쇠 비례상수는 $\alpha=0.2$, $\beta=0.01$ 로 하였다.

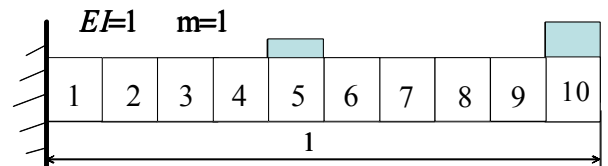


Fig. 1 Model of cantilever

Fig. 2는 3 자유도계의 모델로 변경 전 질량은 $m_1=3kg$, $m_2=1.5kg$, $m_3=2kg$, 강성은 $k_1=1N/m$, $k_2=1.6N/m$, $k_3=2N/m$ 로 하였으며 감쇠는 식(2)에서 비례정수 $\alpha=0.1$ 과 $\beta=0.2$ 로부터 $c_1=0.5Ns/m$, $c_2=0.32Ns/m$, $c_3=0.4Ns/m$, $c_4=0.15Ns/m$, $c_5=0.2Ns/m$ 로 하였으며, 변경 후 질량은 $m_1=3.5kg$, $m_2=1.5kg$, $m_3=3.5kg$ 과 강성은 $k_1=1N/m$, $k_2=2N/m$, $k_3=3N/m$, 감쇠는 $c_1=0.55Ns/m$, $c_2=0.4Ns/m$, $c_3=0.6Ns/m$, $c_4=0.15Ns/m$, $c_5=0.35Ns/m$ 로 하여 감도 해석을 하였다. 변화량에 대한 예측 정도 E_{st} 는 아래와 같이 나

타내었다.

$$E_{st} = \frac{(z_p - z_o)}{(z_e - z_o)} \quad (27)$$

여기서 z_p 는 구조 변경 후 예측치, z_e 는 구조 변경 후 이론치, z_o 는 구조 변경 전 이론치이 E_{st} 가 1에 가까울수록 정도가 좋다.

4 결과 및 고찰

4.1 감쇠 고유진동수 변화 검토

Table 1은 외팔보의 5번 요소는 단면을 20% 증가로 시고, 10번 요소는 질량만을 30% 증가시켰을때의 4차까지 감쇠 고유진동수와 비감쇠 고유진동수의 예측 정도를 나타낸것이다. 감쇠의 영향으로 인한 비감쇠, 감쇠 구조물의 고유진동수를 나타냈으며, 제시한 방법이 구조변경 후 재해석치와 잘 일치함을 알 수 있다.

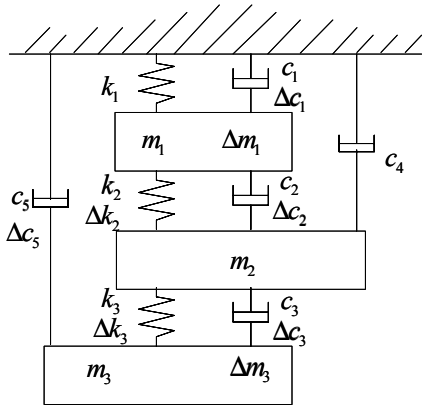


Fig. 2 Model of 3 degree of freedom

Table 1 Comparison of natural frequencies and damping natural frequencies by modifying structure in cantilever beam

| | mode No. | origi-nal | modify | | Est. (%) |
|----------|----------|-----------|--------|---------|----------|
| | | | exact | predict | |
| undamped | 1 | 3.519 | 3.387 | 3.386 | 100.90 |
| | 2 | 22.035 | 21.765 | 21.767 | 99.53 |
| | 3 | 61.713 | 60.644 | 60.645 | 99.96 |
| | 4 | 121.017 | 121.59 | 121.59 | 99.72 |
| damped | 1 | 3.515 | 3.383 | 3.382 | 100.90 |
| | 2 | 21.889 | 21.624 | 21.626 | 99.53 |
| | 3 | 58.669 | 57.757 | 57.758 | 99.96 |
| | 4 | 96.273 | 96.464 | 96.463 | 99.72 |

Table 2은 질량 및 강성을 동시에 변경하기 위해 3자유도계의 첫 번째, 세 번째 질량을 각 0.5kg, 1.5kg 을 추가하고 두번째, 세번째 스프링 강성을 0.4N/m에서 1N/m로 변경하였을 때 3차까지 감쇠고유진동수와 비감쇠 고유진동수의 예측정도를 나타낸 것이다. 구조물의 감소 영향으로 인한 감쇠, 비감쇠 진동수를 나타내었으며, 구조 변경 후 제시한 방법과 재해석치가 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of natural frequencies and damping natural frequencies by modifying structure in 3 D.O.F model

| | mode No. | origi-nal | modify | | Est. (%) |
|----------|----------|-----------|--------|---------|----------|
| | | | exact | predict | |
| undamped | 1 | 0.3475 | 0.3049 | 0.3049 | 100.00 |
| | 2 | 0.9537 | 0.9258 | 0.9258 | 100.00 |
| | 3 | 1.7989 | 2.0242 | 2.0242 | 100.00 |
| damped | 1 | 0.3419 | 0.2990 | 0.2990 | 100.00 |
| | 2 | 0.9432 | 0.9158 | 0.9158 | 100.00 |
| | 3 | 1.7597 | 2.0324 | 1.9713 | 100.00 |

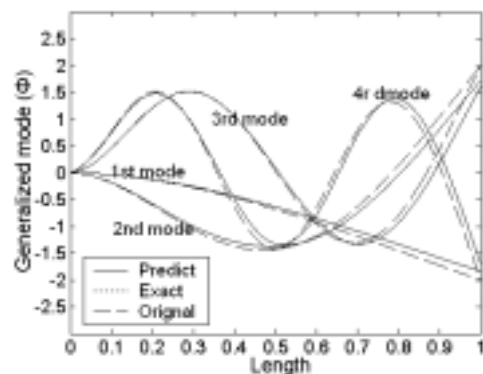


Fig. 3 Variation of mode shape by modifying structure in the cantilever beam

4.2 모드 형상의 변화 검토

Fig. 3은 외팔보의 모드형상 변화를 나타낸 그림으로 재해석치와 잘 일치하여 두 곡선이 겹쳐보임을 알 수 있다. 또한 진동모드가 커질수록

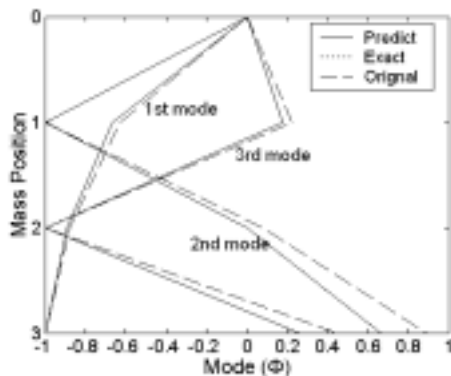


Fig. 4 Variation of mode shape by modifying structure in the 3 D.O.F model

감쇠의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 3자유도계의 모드 형상 변화를 질량위치에 따라 나타낸 그림으로 제안한 방법이 재해석치와 잘 일치하여 두 곡선이 겹쳐 보임을 알 수 있다.

5. 결론

질량 및 강성의 변경에 따른 감쇠 구조물의 감도 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비례감쇠 구조물 변경 시 진동모드 변화량을 고려한 일반질량, 일반강성 가지고 감도계수를 구하는 방법을 제시하였다.

(2) 감도 계수를 이용하여 비례감쇠 고유진동수 및 진동모드 변화량을 보다 정확히 예측할 수 있는 방법을 개발하였다.

(3) 구조 변경된 외팔보와 3자유도계의 적용한결과 감쇠 고유진동수 및 진동모드 변화량이 잘 예측되어 이산계, 연속계 모두 적용이 가능하였다.

참고문헌

- (1) Nelson, R.B., 1976, "Simplified Calculation of Eigenvector Derivatives," AIAA, Vol. 14, No. 9, pp.1201~1205.
- (2) Fox, R.S., and Kapoor, M.P., 1968. " Rates of Change of Eigenvalues and Eigenvectors," AIAA, Vol. 6, No. 12, pp.2426~2429.
- (3) B.G. Yoon and A.D. Belegundu, 1988, "Iterative Methods for Design Sensitivity Analysis," AIAA, Vol. 26, No. 11, pp.1413~1415.
- (4) O. Zhang and A. Zerva, 1997, "Accelerated Iterative Procedure for Calculating Eigenvector Derivatives," AIAA, Vol. 35, No. 2. pp.340~348.
- (5) S. Adhikari, 1999, " Rates of Chang of Eignevalues and Eigenvectors in Damped Dynamic System," AIAA, Vol. 37, No. 11, pp.1452~1458.
- (6) J.Y. Lee, 2002, "A Structural Eigenderivative Analysis by Modification of Design Parameter," Journal of KSME, Vol. 26, No. 4, pp.739~744.
- (7) I.W. Lee, D.O. Kim and G.H. Jung, 1999," Natural Frequency And Mode Shape Sensitivity of Damping systems:Part I, Distinct Natural Frequencies," Journal of Sound and Vibration, Vol. 223, No. 3, pp.339~412.
- (8) H.J. Jung, D.O. Kim, I.W. Lee, 1997, "Algebraic Method for Evaluating Natural Frequency and Mode Shape Sensitivities", Journal of KSME, Vol.21, No.5, pp.1310~1316