

단일 기준 틀을 사용한 구조 동역학 모델링 비교 연구

김정민[†] · 유흥희^{*}

Comparison Study on Structural Dynamic Modelings Employing Single Reference Frame

Jung Min Kim, Hong Hee Yoo

Key Words : Reference frame (기준 틀), Finite element method (유한요소법), Geometric stiffening effect (기하학적 강성변화 효과), Fore-shortening effect (단축효과)

Abstract

In this paper, modeling methods for the structural dynamic analysis employing single reference frame are presented and their modal and transient analysis results are compared. The geometric stiffening effects often occur when structures undergo large overall motion. These effects were considered in several structural previous modeling methods but the role of reference frame has never been scrutinized. In this study, modeling methods employing single reference frame are presented, and their numerical results are compared. The results show that discrepancy between the two modeling methods increases as the eccentricity of the structural system and the magnitude of the large overall motion increase.

기호설명

R : 기준틀 원점의 위치벡터
 θ : 기준틀의 자세
A : 방향코사인 행렬
 $\bar{\mathbf{u}}_f$: 절점 탄성변위
N : 모드행렬
 \mathbf{q}_f : 모드좌표

1. 서 론

최근 인공위성 등 우주구조물에 대한 해석 및 설계의 필요성이 증대되면서 대변위 강체운동을 하는 구조물의 동적해석에 관한 연구가 활발히 전개되고 있다. 그것은 어떤 구조물들의 경우는 실험을 통한 동적 특성 검증이 매우 제한적으로

이루어질 수밖에 없으며, 그 대상이 초 고가라는 점에서 기인하고 있다. 인공위성은 회전 운동과 같은 강체운동을 하는데 이 때 인공위성에 부착된 부 구조물들도 강체운동을 하게 되어 이러한 구조물들의 동적 반응을 정확히 파악할 필요가 발생한다. 구조물의 탄성변형 예측을 위한 모델링은 현재에도 고전적 선형 모델링이[1,5,6] 가장 널리 쓰이고 있다. 이 모델링은 간명하며 시스템 자유도를 현격히 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 구조물이 강체운동을 할 때에 발생하는 강성변화 현상을 모델링에 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 강체운동과 관련된 고전적 선형 모델링의 문제점을 극복하기 위해 여러 가지 비선형 모델링이[2] 등장하였다. 이들은 고전적 선형모델링에서 무시된 기하학적 비선형 항들을 추가로 고려함으로써 강체운동에 의한 강성변화 효과를 예측할 수 있었다. 그러나 이 방법들은 고전적 선형모델링에서는 가능했던 자유도 축소가 불가능하게 되어 많은 계산시간이 소요되는 단점을 갖고 있다. 이 문제를 극복하기 위해 새로운 선형 모델링 방법들이[3,4] 제시되어 왔는데 이들은 비선형 모델링이 지니는 해석의

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계설계학과 대학원

^{*} 회원, 한양대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0446 FAX : (02)2293-5070

정확성과 고전적 선형 모델링이 지니는 계산의 효율성을 동시에 가지게 하였다. 그러나 이 연구들에는 단순한 구조물을 해석 대상으로 사용하여 이론의 적용 가능한 구조형태가 단순한 구조로 제한되어 있었다.

본 연구에서는 기존 모델링 방법의 제한조건을 극복하기 위해 강제운동을 하는 복합 구조물의 동적 해석을 위한 모델링 방법을 제시하려 한다. 이 방법은 우선 복잡한 구조물의 모델링을 위해 유한요소법을 이용하여 구조물을 이산화 하였다. 이때 구조물을 집중질량 모델로 이산화 하는데 이는 후에 운동방정식의 유도 시 유한요소법의 형상함수를 사용하지 않게 하여서 운동방정식의 유도를 간명하게 하는 동시에, 상용의 유한요소 프로그램을 통해 쉽게 얻을 수 있는 질량행렬과 강성행렬을 이용하여 강제운동을 하는 탄성 구조물의 동적해석을 위한 운동방정식 유도를 가능케 하였다. 이산화된 구조물의 질량 및 강성 행렬로 구성된 고유치 문제의 모드행렬을 이용하여 탄성 변위를 근사화하며 보 구조물의 강성변화 효과는 축 방향 힘이 굽힘 변형에 미치는 효과에 의해 나타나는데 이 축 방향 힘을 고려하는 두 가지 방법을 제시하였다. 또한 해석방법에 대한 설명의 간명성을 위해 평면운동을 하는 보 구조물을 대상으로 하였으며 이는 수치해석 결과 검증을 위한 용이성도 염두에 둔 것이다.

2. 과도해석 모델링

2.1 운동 에너지

Fig.1 은 관성기준틀 X_i 에서 관찰한, 1 개의 기준 틀 \bar{X}_i 를 갖는 강제 및 탄성변형 운동을 하는 구조물 B 에 속한 임의의 절점 j 의 변형 전 후 모습을 나타내고 있다. 여기서 \mathbf{R} 은 기준 틀 원점의 위치를 나타내고 $\bar{\mathbf{u}}_j$ 는 기준 틀에서 측정 한 절점 j 의 변형 전의 위치, \mathbf{u}_j 는 변형 후의 위치 그리고 $\bar{\mathbf{u}}_f$ 는 탄성 변형을 나타내고 있다. 임의의 절점 j 의 위치벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_j = \mathbf{R} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{u}}_j = \mathbf{R} + \mathbf{A}(\bar{\mathbf{u}}_{rj} + \bar{\mathbf{u}}_f) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{A} 는 기준틀 \bar{X}_i 의 방향코사인 행렬이며

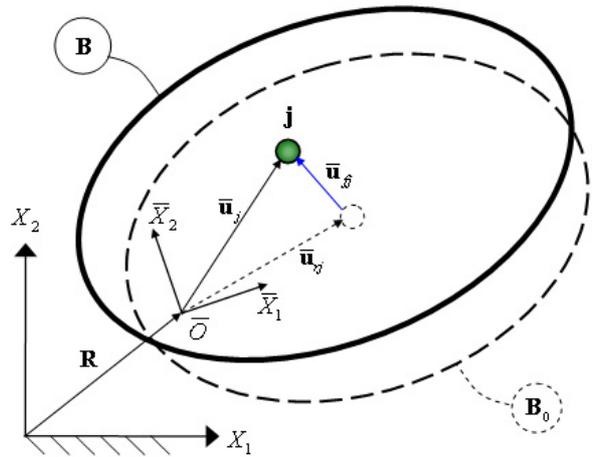


Fig. 1 Configuration of a structure undergoing rigid body motion and elastic deformation

절점 탄성변위 $\bar{\mathbf{u}}_f$ 는 모드행렬을 이용하여 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{u}}_f = \mathbf{N}\mathbf{q}_f \quad (2)$$

위 식에서 \mathbf{N} 은 모드행렬의 낮은 고유진동수에 해당하는 모드벡터들로 구성된 축소모드행렬이며 \mathbf{q}_f 는 모드좌표를 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 절점 j 의 탄성변위 $\bar{\mathbf{u}}_f$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\mathbf{u}}_f = \mathbf{N}_j\mathbf{q}_f \quad (3)$$

여기서 \mathbf{N}_j 는 절점 j 와 관련된 축소모드행렬의 부분 행렬이다. 식 (1)과 (3)을 사용하고 위치를 시간에 대해 미분하면 속도는 다음과 같이 표현 된다.

$$\dot{\mathbf{r}}_j = \dot{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_j\dot{\theta} + \mathbf{A}\mathbf{N}_j\dot{\mathbf{q}}_f \quad (4)$$

여기서

$$\mathbf{B}_j \equiv \mathbf{A}_\theta \bar{\mathbf{u}}_j^i \quad (5)$$

여기서 θ 는 기준틀의 자세를 나타내며 \mathbf{A}_θ 는 \mathbf{A} 의 θ 에 대한 편미분을 나타낸다. 절점 j 의 질량을 m_j 라 하고 탄성 구조물 B 가 NG 개의 절점을 가지고 있다고 하면 식 (4)를 이용하여 탄성구조물의 운동에너지는 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\mathbf{q}}_f \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{rr} & \mathbf{M}_{r\theta} & \mathbf{M}_{rf} \\ & \mathbf{M}_{\theta\theta} & \mathbf{M}_{\theta f} \\ \text{symmetric} & & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\mathbf{q}}_f \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}} \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

위식에서 정의된 기호의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{rr} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{I} & \mathbf{M}_{r\theta} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{B}_j & \mathbf{M}_{rf} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{A} \mathbf{N}_j \\ \mathbf{M}_{\theta\theta} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{B}_j^T \mathbf{B}_j & \mathbf{M}_{\theta f} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{B}_j^T \mathbf{A} \mathbf{N}_j \\ \mathbf{M}_{ff} &= \sum_{j=1}^{NG} m_j \mathbf{N}_j^T \mathbf{N}_j \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{q} = [\mathbf{R} \quad \theta \quad \mathbf{q}_f]^T \quad (8)$$

2.2 탄성 에너지

구조물의 탄성에너지는 변위와만 관련되므로 유한요소법에서와 동일하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{u}}_f^T \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{u}}_f \quad (9)$$

위 식에서 $\bar{\mathbf{K}}$ 는 유한요소법에서 구한 강성행렬을 나타낸다. 따라서 식 (2)와 (9)를 이용하면 탄성 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \theta \\ \mathbf{q}_f \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \theta \\ \mathbf{q}_f \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{K}_{ff} 는 다음같이 정의되는 대각 행렬이다.

$$\mathbf{K}_{ff} = \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{K}} \mathbf{N} \quad (11)$$

2.3 보 요소의 기하학적 비선형에 의한 일반력
보 요소로 구성된 시스템의 강제 운동에 의한 강성변화 효과를 고려하기 위해서는 보 요소의 축력이 굽힘변형에 미치는 영향을 고려해야 한다. 이러한 영향에 의한 가상 일은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\delta W_g = - \sum_{k=1}^{n_e} P^k \left(\frac{\Delta u_2^k}{l^k} \right) \delta \left(\frac{\Delta u_2^k}{l^k} \right) l^k = (\mathbf{Q}_g)_f^T \delta \mathbf{q}_f \quad (12)$$

위 식에서 n_e 는 보 요소의 개수, l^k 는 k 번째 보 요소의 길이, P^k 는 축력을 나타내며 Δu_2^k 는 구조 기준틀에 대해서 측정된 두 절점의 처짐량 차이를 나타낸다. $(\mathbf{Q}_g)_f$ 는 기하학적 비선형에 의한 일반력을 나타내는데 이를 축소모드행렬과 모드좌표 등을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$(\mathbf{Q}_g)_f = - \sum_{k=1}^{n_e} \left(\frac{P^k}{l^k} \right) \mathbf{T}_{52}^{kT} \mathbf{T}_{52}^k \mathbf{q}_f \quad (13)$$

식 (13)에 사용된 기호는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{T}^k = \mathbf{C}^k \mathbf{B}_1^k \mathbf{N} \quad \mathbf{T}_{52}^k = \mathbf{T}_5^k - \mathbf{T}_2^k \quad (14)$$

여기서 \mathbf{C}^k 는 변환행렬을 \mathbf{B}_1^k 은 Boolean matrix 를 나타내며 \mathbf{T}_r^k 은 \mathbf{T}^k 의 r 번째 행 벡터를 나타낸다. 식 (13)에서 축력을 구하는 방법에 따라 두 가지의 모델링 방법이 있다.

2.3.1 인장변형을 이용법

인장변형율과 구성방정식을 이용하면 축력은 다음과 같이 표현된다.

$$P^k = \left(EA \frac{\Delta u_1}{l} \right)^k = \left(\frac{EA}{l} \right)^k \mathbf{T}_{41}^k \mathbf{q}_f \quad (15)$$

여기서 E 는 탄성계수, A 는 단면적을 나타낸다. 식 (15)를 이용하면 기하학적 비선형 효과에 의한 일반력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\mathbf{Q}_g)_f = -\mathbf{K}^G \mathbf{q}_f \quad (16)$$

위 식에서 \mathbf{K}^G 는 기하강성행렬로서 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{K}_G \equiv \sum_{k=1}^{n_e} \left[\frac{EA}{l^2} \mathbf{T}_{52}^{kT} \mathbf{T}_{52}^k (\mathbf{T}_{41}^k \mathbf{q}_f) \right]^k \quad (17)$$

2.3.2 관성력 이용법

이 방법은 구조물을 강체로 가정하여 각 절점의 관성력을 구한 후 이를 이용하여 축력을 다음과 같이 근사적으로 나타낸다.

$$P_x^k = - \sum_{j=j_2^k}^{NG} m_j \left\{ [\cos(\theta + \alpha^k) \quad \sin(\theta + \alpha^k)] \ddot{\mathbf{R}} + [\sin \alpha^k \quad -\cos \alpha^k] \ddot{\mathbf{u}}_{vj} - (\dot{\theta})^2 [\cos \alpha^k \quad \sin \alpha^k] \ddot{\mathbf{u}}_{vj} \right\} \quad (18)$$

여기서 α^k 는 기준틀과 k 번째 보 요소가 이루는 각도를 나타내고 j_2^k 는 k 번째 보 요소의 두 절점 중 기준틀에 부착된 보 요소로부터 시작하여 각 보 요소의 축 방향을 따라 거리를 측정할 경우 더 먼 거리를 갖는 절점이다.

식 (18)을 이용하면 기하학적 비선형에 의한 일반력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\mathbf{Q}_g)_f = -\mathbf{M}_{f\theta}^G \ddot{\mathbf{R}} - \mathbf{M}_{f\theta}^G \ddot{\theta} - (\dot{\theta})^2 \mathbf{K}^{GB} \mathbf{q}_f \quad (19)$$

여기서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{f\theta}^G &\equiv - \sum_{k=1}^{n_e} \left(\frac{1}{l^k} \right) \left(\sum_{j=j_2^k}^{NG} m_j \right) \mathbf{T}_{S2}^{kT} \mathbf{T}_{S2}^k \mathbf{q}_f [\cos(\theta + \alpha^k) \quad \sin(\theta + \alpha^k)] \\ \mathbf{M}_{f\theta}^G &\equiv - \sum_{k=1}^{n_e} \left(\frac{1}{l^k} \right) \left\{ \left(\sum_{j=j_2^k}^{NG} m_j \ddot{\mathbf{u}}_{vj}^T \right) [\sin \alpha^k \quad -\cos \alpha^k]^T \right\} \mathbf{T}_{S2}^{kT} \mathbf{T}_{S2}^k \mathbf{q}_f \\ \mathbf{K}^{GB} &\equiv \sum_{k=1}^{n_e} \left(\frac{1}{l^k} \right) \left\{ \left(\sum_{j=j_2^k}^{NG} m_j \ddot{\mathbf{u}}_{vj}^T \right) [\cos \alpha^k \quad \sin \alpha^k]^T \right\} \mathbf{T}_{S2}^{kT} \mathbf{T}_{S2}^k \end{aligned} \quad (20)$$

2.4 운동 방정식

앞 절에서 구해진 운동에너지, 탄성에너지와 기하학적 비선형에 의한 일반력을 이용하면 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v + \mathbf{Q}_g \quad (21)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0} \quad (22)$$

여기서 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, t)$ 는 구속조건식, \mathbf{C}_q 는 constraint Jacobian matrix, $\boldsymbol{\lambda}$ 는 Lagrange multiplier 를 나타내며 \mathbf{Q}_e 는 외력에 의한 일반력을 나타낸다. 또, \mathbf{Q}_v 와 \mathbf{Q}_g 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Q}_v = -\dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}) \right]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{Q}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & (\mathbf{Q}_g)_f^T \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

2.5 수치해석 및 결과

앞서 유도된 운동방정식을 사용하여 수치해석을 수행하였다. Fig.2 는 수치해석에 사용된 각속도 ω 로 회전하는 직각 보를 나타내며 Table 1 은 해석에 사용된 보 요소의 제원을 나타내고 있다. 수치해석 시 보 요소의 개수는 10 개, 모드벡터는 인장 변형률을 이용한 방법은 15 개, 관성력을 이용한 방법은 5 개를 각각 사용하였다. 인장 변형률 이용한 방법에서는 축력을 고려할 때 인장방향 모드가 필요한데 이는 고주파 성분이므로 관성력을 이용한 방법보다 더 많은 모드벡터를 사용해야 하는 자유도 축소의 문제가 있다.

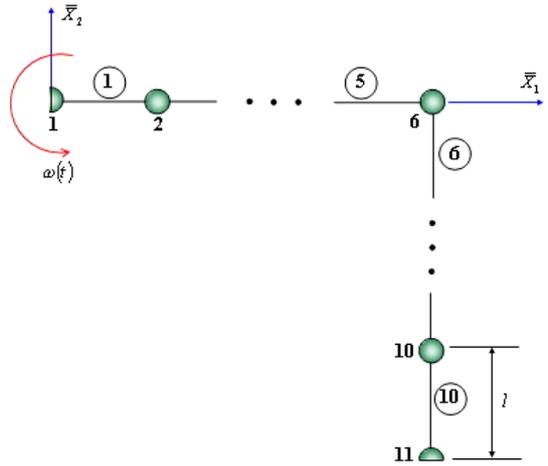


Fig. 2 Configuration of a rotating right-angle beam

Table 1 Properties of the beam

E (N/m ²)	ρ (kg/m)	I (m ⁴)	A (m ²)	l (m)
7×10^{10}	1.2	2×10^{-7}	4×10^{-4}	1

직각보는 다음과 같이 spin-up motion 으로 회전운동하도록 하였다.

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{\Omega_s}{T_s} \left[t - \frac{T_s}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_s}\right) \right] \quad (0 \leq t \leq T_s) \\ \omega(t) &= \Omega_s \quad (T_s \leq t) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 T_s 는 15 초, Ω_s 는 3 rad/s , 6 rad/s 의 두 경우를 고려하였다.

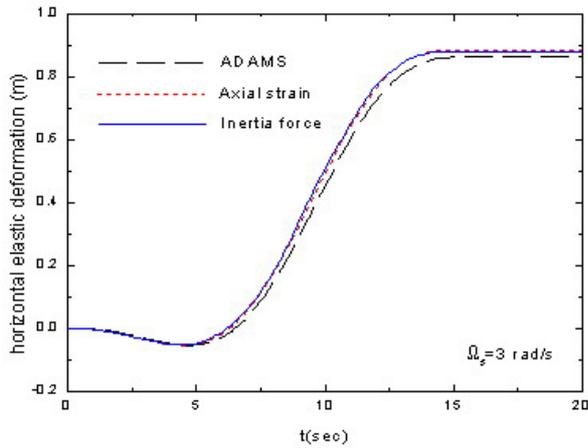


Fig. 3 Horizontal deformation at node 11($\Omega_s = 3 \text{ rad/s}$)

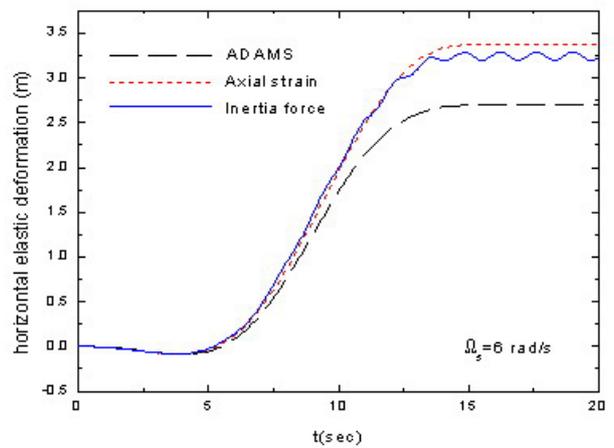


Fig. 5 Horizontal deformation at node 11($\Omega_s = 6 \text{ rad/s}$)

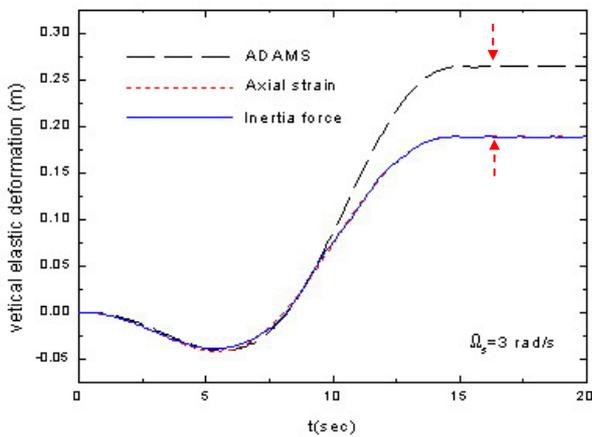


Fig. 4 Vertical deformation at node 11($\Omega_s = 3 \text{ rad/s}$)

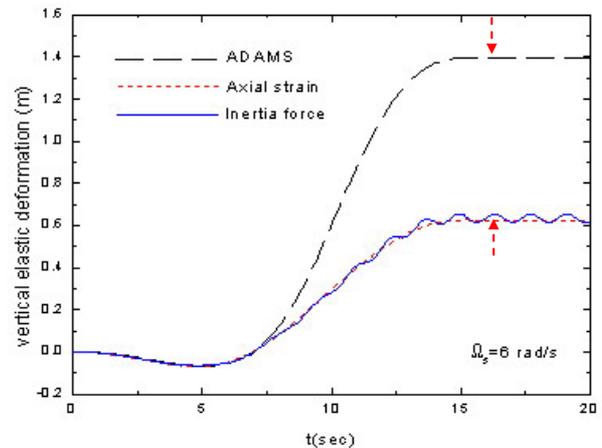


Fig. 6 Vertical deformation at node 11($\Omega_s = 6 \text{ rad/s}$)

Fig.3 에서 Fig.6 은 자유단 절점(node 11)의 탄성변형을 나타내는데 Fig.3 과 Fig.4 는 정상 상태 회전각속도 Ω_s 가 3rad/s 일 때의 결과이며 Fig.4 와 Fig.5 는 6rad/s 일 때의 결과이다. 두 경우 모두 상용 프로그램 ADAMS 의 결과와 비교하였다. Fig.3 에서 볼 수 있듯이 자유단의 수평 방향 탄성변위는 인장변형률과 관성력을 사용한 방법 모두 ADAMS 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig.4 에서 볼 수 있듯이 수직 방향 탄성변위는 두 방법모두 ADAMS 와 상이한 결과를 보여준다. 이러한 차이가 발생하는 것을 좀더 명확하게 관찰하기 위하여 좀더 고속 (6rad/s)으로 직각 보를 회전시켜보았다. 이 때 Fig.5 에서 볼 수 있듯이 수평방향 변위도 ADAMS 결과와 상당한 차이가 나는데 특히 Fig.6 에서 보듯이 수직방향은 현격한 차이가 발생하였다. 본 연구에서 제안한 두 방법과 ADAMS 해석 시에 모두 10 개의 보 요소와 11 개의 집중질량을 사용하여 직각 보를 모델링 하였다.

제안된 두 모델링에 의한 결과와 ADAMS 결과가 차이가 발생하는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 본 연구에서 제시된 모델링 방법은 수치해석 시 첫 번째 보 요소에 고정된 1 개 기준 틀만을 사용하였지만 ADAMS 모델링 방법에서는 각 집중질량마다 기준 틀을 사용해 총 11 개의 기준 틀을 사용한다. 이 때문에 ADAMS 는 각 보 요소 절점에서의 처짐각에 의한 단축효과(foreshortening effect)를 고려할 수 있지만 1 개의 기준 틀만을 사용한 본 논문에 제시된 방법들은 단축효과를 고려하지 못하므로 특히 자유 단의 수직방향 탄성변위의 응답차이가 크게 나타나게 된다. 이러한 사실로 미루어 보아 복잡한 형상을 가진 구조물 해석 시 기하학적 형상이 급격하게 변하는 부분에 추가로 기준 틀을 설정하여 동적 해석을 하는 것이 해석 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 제시된 두 모델링 중에는 모드 수를 더 적게 고려할 수 있는 관성력 이용 방법이 더 우수하다고 사료된다.

3. 진동해석 모델링

3.1 진동 방정식

운동방정식에서 일정 각속도 회전에 의한 정상상태를 가정하면 진동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_{ff} \ddot{\mathbf{q}}_f + [\mathbf{K}_{ff} - (\dot{\theta})^2 \mathbf{M}_{ff} + \mathbf{K}^G] \mathbf{q}_f = \mathbf{0} \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_{ff} \ddot{\mathbf{q}}_f + [\mathbf{K}_{ff} - (\dot{\theta})^2 \mathbf{M}_{ff} + (\dot{\theta})^2 \mathbf{K}^{GB}] \mathbf{q}_f = \mathbf{0} \quad (26)$$

식 (25)는 인장 변형률을 이용할 때, 식 (26)은 관성력을 이용할 때 얻어지는 진동방정식을 나타낸다. 식 (25)에서 기하강성행렬 \mathbf{K}^G 는 모드좌표 \mathbf{q}_f 의 함수이므로 진동해석 수행 전에 정상상태의 모드 좌표를 먼저 구한 후에 해석을 하여야 하는 단점이 있다.

3.2 수치해석 및 결과

Fig.7 은 직각보 예제에 대한 결과로서 인장변형률과 관성력을 이용한 방법의 회전각속도 변화에 따른 고유진동수변화 그래프를 보여준다. 제시된 두 모델링에 의한 결과를 상용 프로그램인 ANSYS 의 결과와 비교하였다. 회전각속도가 증가할수록 모든 고유진동수가 증가함을 보여주는데 인장변형률을 이용한 모델링 방법은 회전각속도가 증가할수록 고유진동수가 ANSYS 에 비해 커지나 관성력을 이용한 모델링 방법은 ANSYS 결과와 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

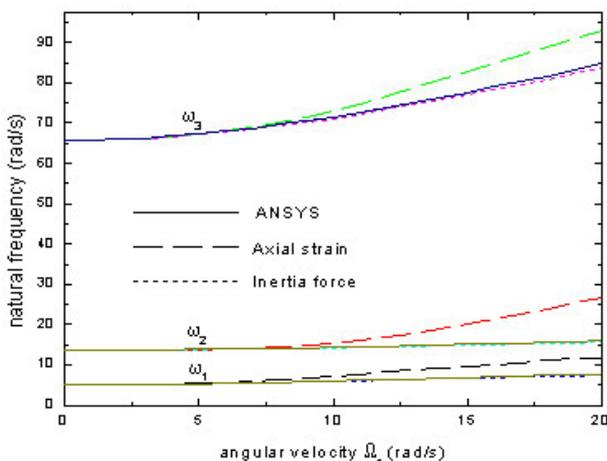


Fig. 7 Lowest three natural frequency variations versus angular velocity

4. 결론

본 연구에서는 복잡한 형상을 가진 보 구조물의 강제 운동에 의한 강성변화효과를 고려할 수 있는 두 가지 모델링 방법을 제시하였다. 이 방법들은 구조물에 부착된 1 개의 기준 틀을 사용하였으며 그 결과 구조시스템의 형상의 편심도와 강제운동 크기가 증가할 때 과도 해석의 정확도가 감소하는 결과를 보여주었다. 특히 관성력을 이용한 모델링 방법은 과도 해석 시에도 상대적 효율성을 가지며 진동해석 시도 상용프로그램(ANSYS)과 비교하여 신뢰할 만한 결과를 제공하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 설계 신기술 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Ho, J., 1977, "Direct Path Method for Flexible Multibody Spacecraft Dynamics," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 14, pp.102~110.
- (2) Christensen, E. and Lee, S., 1986, "Nonlinear Finite Element Modeling of the Dynamics of Unrestrained Flexible Structures," *Computers and Structures*, 23, pp.819~829.
- (3) Kane, T., Ryan, R., and Banerjee, A., 1987, "Dynamics of Cantilever Beam Attached to a Moving Base," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 10, pp139~151.
- (4) Yoo, H., Ryan, R., Scott, R., 1995, "Dynamics of Flexible Beams Undergoing Overall Motions," *Journal of Sound and Vibration*, 181(2), pp261~278.
- (5) Ahmed A., Shabana, 1986, "Dynamics of Inertia-Variant Flexible Systems Using Experimentally Identified Parameters," *Journal of Mechanism, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 108, pp.358~366.
- (6) A., Shabana, R.A., Wehage, 1982, "Variable Degree-of-Freedom Component Mode Analysis of Inertia Variant Flexible Mechanical Systems," *Journal of Mechanical Design*, No. 82-DET-93, pp.1~8.
- (7) Eung-Min Park, Hong-Hee Yoo, 1997, "Dynamic Analysis of Multi-beam Structures Considering Stiffening Effects Induced By Large Overall Rigid Body Motion," *Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 26, No.2, pp.40~46.
- (8) Ahmed A., Shabana, 1988, *Dynamics of Multibody Systems*, John Wiley & Sons.
- (9) L., Meirovitch, 1967, *Analytical method in vibration*, Macmillan Company.