

볼트(bolt)로 결합된 평판 구조물의 볼트 결합력에 따른 진동특성변화 연구

A Study on the Vibration Characteristics of Bolted Plates Depending on the Clamping Force of the Bolt

김근일* · 유효선** · 김은호†
Guenil Kim*, Hyo Sun Yu** and Eunho Kim†

(Received October 22, 2021 ; Revised December 7, 2021 ; Accepted December 27, 2021)

Key Words : Bolted Plate(볼트 결합 평판), Bolt Looseness(볼트 풀림), Vibration Characteristics(진동특성)

ABSTRACT

The vibration characteristics of bolted structures change depending on the bolt's clamping force. This can be used to detect bolt looseness or to evaluate structural integrity. In this study, the vibration characteristics based on a bolt's clamping force were experimentally and numerically studied in two plate structures connected using a bolt; where the clamping force ranged from 60 % to 100 % of the appropriate clamping force. Several vibration modes were identified under 20 kHz in the modal test and in the numerical analysis using a finite element method. We investigated the effects of the bolt's clamping force on the vibration characteristics of each vibration mode. We found that the effect of the clamping force on the natural frequency and damping ratio is different depending on the vibration modes. Additionally, its effects on the vibration characteristics are minor in low-frequency modes. However, the effect of the clamping force on the vibration characteristics is significant for high-frequency modes, which is related to the large bending deformation of the bolt. For the detection of bolt looseness based on the vibration characteristics, we recommend identifying a vibration mode sensitive to the clamping force first, and then selectively considering the vibration mode for bolt looseness detection.

1. 서 론

볼트(bolt)-너트(nut)결합은 볼트와 너트의 나사산 사이의 마찰력을 통해 둘 이상의 체결물에 압축력을 가하여 결합하는 방법이다. 결합방법의 특성상 결합

력에 따라 체결부의 응력분포, 체결물 사이와 나사산 사이의 마찰력 그리고 변형시에 미소 미끌림(micro slip) 등이 달라지기 때문에 진동특성 또한 결합력에 따라 변화한다. 이러한 진동특성변화는 볼트체결이 가장 흔한 체결방법인 만큼 이미 다양한 관점에서 연구가 수행되었다. 특히, 구조물 전체의 거동을 이해하

† Corresponding Author: Division of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University, Associate Professor
E-mail : eunhokim@jbnu.ac.kr

* Division of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University, Graduate Student

** Division of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University, Professor

‡ Recommended by Editor Jin Gyun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

거나 볼트풀림을 측정하기 위해 진동특성변화를 활용하고자 하는 시도도 다수 이루어졌다⁽¹⁻³⁾.

볼트체결물의 진동특성 변화는 주로 볼트의 체결력에 따른 구조물의 고유진동수 변화와 체결물 사이의 마찰 거동 변화로 인한 댐핑특성 변화로 설명되고 있다. 이러한 연구에서는 볼트로 결합된 구조물에서 볼트를 가로지르는 방향(transverse) 진동을 대상으로 댐핑모델⁽⁴⁻⁶⁾을 적용하여 구조물 전체가 진동하는 저주파수 대역에서 볼트체결력에 따라 증가하거나 감소하는 댐핑을 잘 설명한다⁽⁷⁻⁹⁾. Gaul 등⁽⁷⁾은 트러스 구조물에서의 볼트체결로 인한 진동특성을 분석하였으며, Bournine 등⁽⁸⁾은 구조물의 댐핑이 최대화되도록 체결력을 최적화하여 지진과와 같은 큰 진동에 대한 저항을 높이는 연구를 수행하였다.

체결물들 사이의 마찰 외에도 볼트-너트 사이의 마찰도 진동 특성에 영향을 미친다^(9,10). 이러한 연구에서는 체결력의 증가에 따라 댐핑이 감소하여 체결물들 사이의 마찰을 고려한 댐핑 경향과는 다소 상반된 결과를 보였다. 그 외에도 와사나 체결조건이 볼트구조물의 진동특성에 미치는 영향도 연구되었으며^(11,12), 외부 진동의 크기도 진동특성에 영향을 미치는 것으로 보고되었다⁽⁹⁾. 이렇게 볼트-너트의 결합이 구조물의 진동특성에 미치는 영향은 단순하지 않으며, 측정하는 볼트체결부의 구조와 진동모드에 따라 체결력에 따른 진동특성의 경향성이 다르게 나타날 수 있다.

특히 볼트풀림을 측정하기 위한 연구에서는 볼트 체결부 주위의 특정 진동모드만 분석하는 경우가 많으며, 체결력에 따른 진동특성변화의 경향성이 일관된 경향을 보이지 않는 것으로 나타났다. He⁽¹³⁾의 파이프라인 볼트풀림 연구에서는 체결력에 따라 고유진동수가 증가하였으나 Shao⁽¹⁴⁾의 압전물질을 이용한 볼트풀림 연구에서는 체결력에 따라 고유진동수가 감소하는 것으로 나타났으며, Jo 등⁽¹⁵⁾의 음압계측을 이용한 볼트풀림 연구에서는 체결력에 따라 고유진동수가 거의 변하지 않는 것으로 보고되었다. Kim 등⁽¹⁶⁾의 플랜지 결합부의 진동특성에 관한 연구에서는 볼트 체결토크에 따라 댐핑이 감소하거나 증가하는 고유진동수로 구분하여 분석하였으며, Li⁽¹⁷⁾의 복합재 플랜지에 관한 연구에서는 댐핑이 일정하게 감소하는 경향을 보였다.

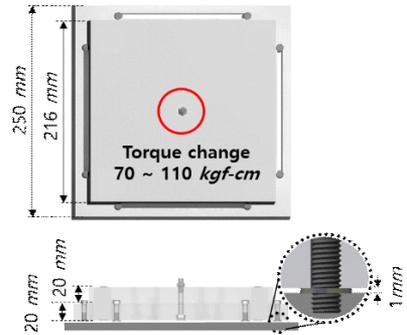
이러한 한계로 인해 진동특성을 통한 볼트풀림 측정기법은 체계화되지 못하고 작업자의 경험에 의존한

탭테스트의 형태로 주로 활용되고 있다. 따라서 볼트-너트 결합물의 진동특성을 좀 더 명확히 파악할 필요가 있으며, 이를 위해서는 구조물의 진동모드별로 구분하여 체결력에 따른 진동특성의 변화를 구체적으로 분석할 필요가 있다. 또한, 기존의 대부분의 연구에서는 볼트의 횡방향(transverse-direction) 진동을 다루었으며, 볼트의 축방향 진동에 대한 연구는 많지 않다. 이 연구에서는 볼트-너트로 결합된 두 평판 구조물에서 볼트의 결합력에 따른 볼트의 축방향 진동특성을 진동모드 별로 구분하여 분석하였다.

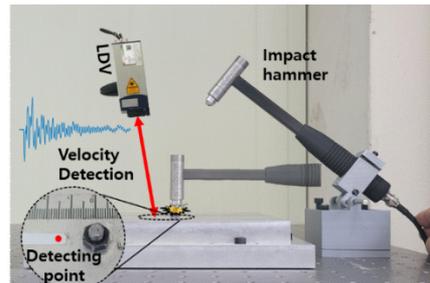
2. 실험 및 해석

2.1 시험편 및 실험방법

볼트체결물의 진동특성 변화는 인접한 볼트의 영향, 체결물 사이의 마찰, 볼트 너트의 부식 등 복합적인 요소들이 영향을 미친다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 1과 같이 알루미늄 평판 2개(216 mm × 216 mm × 20 mm, 250 mm × 250 mm × 20 mm)를 중앙에 1개의 볼트(M6)로 결합한



(a) Geometry of the specimen



(b) Experiment setup

Fig. 1 Experiment setup and the bolted plate specimen

단순한 구조물을 이용하여 볼트결합력이 시험편의 진동 특성 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 결합된 두 판의 진동특성이 잘 나타나도록 하기 위해 하판은 실험대에서 이격하여 고정하였으며, 이를 위해 Fig. 1(a)와 같이 8개의 하판 고정 볼트에 두께 1 mm 와셔(washer)를 삽입하여 실험대에 고정하였다.

일반적으로 적정 토크는 볼트를 기준으로 할 때 항복하중의 70%~90%⁽¹⁸⁾이며 볼트체결시 대부분의 토크가 볼트와 체결물 사이의 마찰력을 극복하는데 사용되어 최대 50%까지 오류가 발생할 수 있기 때문에 체결방법이나 표면상태가 고려되어야 한다⁽¹⁹⁾. 이 연구에서는 토크렌치(TOHNICHI - 225CL5)로 체결하였으며 볼트는 SCM435(강도구분 12.9)를 사용하였고 윤활처리 하였다. 이에 따라 적정토크는 항복하중의 70%를 기준으로 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$T = 0.35k(1 + 1/Q)\sigma_y A_s d \tag{1}$$

여기서, k 는 피체결물과 암나사의 재질에 따른 토크계수로 알루미늄과 SCM435를 연결하여 흑색산화피막 기름 윤활일 때 0.185이다. Q 는 체결방법의 따른 체결계수로 토크렌치를 사용하고 기름윤활일 때 1.4이다. σ_y 는 볼트의 항복강도이며 강도구분 10.9일 때 1040 N/mm²이다. A_s 는 볼트의 유효단면적이며 M6볼트일 때 20.1 mm²이다. d 는 볼트의 호칭 직경으로 M6일 때 0.6 cm다. 이때의 적정토크 T 는 115 kgf·cm로 계산된다. 이 연구에서는 적정토크의 60%인 70 kgf·cm에서 110 kgf·cm까지 10 kgf·cm씩 증가시켜가며 실험을 진행하였다.

균일한 가진조건(excitation condition)을 주기 위해 Fig. 1(b)와 같이 핀지지(pin support)된 impact hammer(086C04)를 특정각도에서 자유 운동시켜 볼트머리를 가진하였다. 측정된 충격력은 700(±10) N이며, Fourier 변환결과 20 kHz의 주파수 범위를 가짐을 확인하였다. 가진된 신호는 접촉되는 면의 비균질성 및 접촉강성에 영향을 받기 때문에, 이 연구에서는 접촉되는 볼트 끝부분을 평평하게 가공하여 실험하였다.

볼트 중심에서 15 mm 떨어진 지점을 LDV(laser doppler vibrometer)를 이용해 속도응답(mobility)을 측정하고 주파수응답(frequency response function, FRF)를 통해 주파수 영역에서 신호를 분석하였다.

댐핑 계수는 복소평면(complex plane)에서의 주파수응답함수를 이용하여 고유진동수 부근에서 근사한

나이퀴스트 원(nyquist circle)을 통해 추정하였다. Fig. 2는 110 kgf·cm로 체결한 경우 6 kHz 부근의 나이퀴스트 원을 나타낸다. ‘o’로 표시된 점은 속도응답을 복소평면에 나타낸 것이며 실선은 속도응답 데이터를 통해 근사한 원이다. 근사한 원의 중심과 고유진동수 근처의 2점을 이용하여 식 (2)를 통해 감쇠비 ξ 를 구할 수 있다⁽²⁰⁾.

$$\xi = \frac{\omega_b^2 - \omega_a^2}{2\omega_n [\omega_a \tan(\alpha/2) + \omega_b \tan(\alpha/2)]} \tag{2}$$

나이퀴스트 원을 통한 댐핑추정방법은 피크주변에서 1자유도를 가정한 방법이며 인접한 고유진동수의 영향이 커지거나 댐핑이 증가하면 오차가 증가한다. 고차의 고유진동수에서는 인접한 고유진동모드가 증가하여 1자유도 가정이 부적절한 것으로 나타났으며, 따라서 12 kHz 이하의 고유모드에 대해서만 감쇠비를 추정하였다.

2.2 유한요소해석

해석적으로 실험모델의 진동특성을 파악하기 위해 상용프로그램 abaqus/standard를 이용하여 유한요소 해석을 진행하였다. 해석모델은 실험모델을 기반으로 구성하였으며, 시험편의 하판과 실험대를 연결하는 볼트는 적정토크로 고정되어 있어 고정경계조건을 적용하였다. 볼트와 너트의 나사산은 저주파수 관심영역에서 고유진동수에 미치는 영향이 작으므로 볼트의

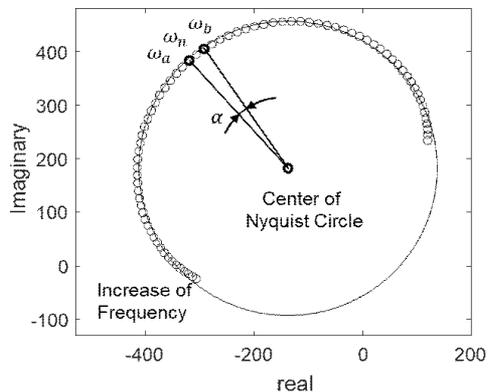


Fig. 2 Experimentally measured mobility in complex plain near the natural frequency 6 kHz (circle) and the corresponding Nyquist circle (line) for the damping ratio estimation

체결력은 abaqus/standard에서 지원하는 볼트로드(bolt load) 기능을 적용하여 구현하였다. 요소는 3차원 육면체요소(C3D8)를 사용하였고, 하판과 상판은 알루미늄의 물성값($E=70\text{ Gpa}$, $\rho=2800\text{ kg/m}^3$, $\nu=0.3$)을 적용하였으며, 볼트와 너트는 SCM435의 물성($E=205\text{ Gpa}$, $\rho=7850\text{ kg/m}^3$, $\nu=0.29$)을 적용하였다.

볼트의 체결력을 고려한 진동모드를 구하고 실험과 같은 조건에서 주파수응답함수를 해석하기 위해 3단계(3 step)해석을 진행하였다. (1st step)먼저 볼트 축하중을 가하는 정적해석을 수행하고, (2nd step)축하중이 가해진 상황에서 모달해석을 수행하였으며, (3rd step) 이를 바탕으로 주파수 응답해석을 수행하였다.

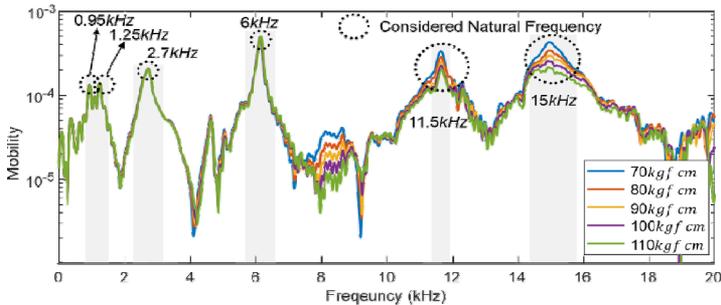
3. 실험 및 해석 결과

Fig. 3(a)는 가진 신호의 유효한 주파수 범위(20 kHz 이내)내에서 실험적으로 측정된 주파수 응답이며, 삽입된 그래프는 impact hammer 신호의 주파수성분을 나타낸다. Fig. 3(b)는 유한요소해석을 통해 계산된 주파수 응답을 나타낸다.

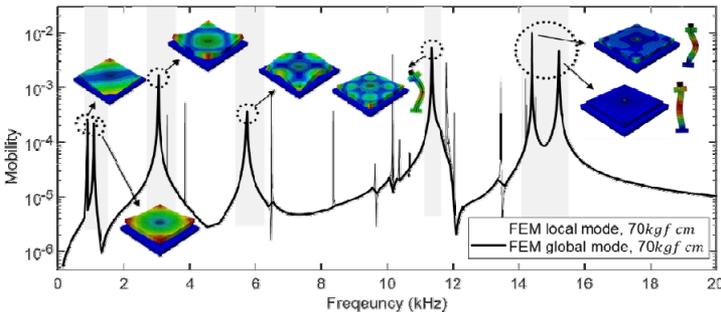
실험 결과와 달리 유한요소 해석에서는 결합된 세 구조물(상판, 하판, 볼트-너트)이 각각 독립적으로 움직이는 국부진동모드(local mode) (Fig. 3(b)의 얇은 실선)가 다수 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 국부진동모드는 주파수응답함수에서 다소 불연속적으로 나타나는 특성을 보였다. 주파수 응답에서 이러한 불연속적인 국부진동모드를 제외하면 (Fig. 3(b)의 굵은 실선), 실험에서 측정된 주파수 응답 결과와 유사한 거동을 보였으며, 두 결과를 비교하여 각 고유진동수에서의 진동 모드를 추정하였다.

관심 주파수 범위 내에서 구조물의 진동 형상은 볼트의 축방향으로의 운동이 지배적이었으며, 볼트의 경우 고주파 영역으로 갈수록 굽힘 진동이 강하게 나타나는 경향을 보였다(Fig. 3(b)). 적정토크의 60%~100% 범위를 고려한 이 연구에서는 체결력이 증가함에 따라서 고유진동수는 큰 변화를 보이지 않았으나 실험의 편차를 고려하였을 때 모드에 따라 미소하게 증가 혹은 감소하는 경향을 보였다.

또한, 저주파영역 보다는 고주파영역으로 갈수록



(a) Comparison of frequency response functions (mobility) measured in experiments at various fastening torque



(b) The mobility analyzed with a finite element method

Fig. 3 Mode shapes for the corresponding natural frequencies (velocity[m/s] and force[N] are used for the calculation of the mobility)

체결력의 변화에 따라 진동특성이 더 크게 변하는 경향을 보였다. 이는 볼트의 체결력이 진동형상이 복잡한 고주파 진동모드에 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 파악된다. 이와 같이 볼트의 체결력이 진동특성에 미치는 영향은 진동모드에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 각각의 고유진동모드에서 체결력에 따른 진동특성의 변화를 분석하였다.

Figs. 4~9는 대표적인 6개의 고유진동수에서 해석

을 통해 확인한 모드형상과 실험적으로 측정된 볼트 체결력에 따른 진폭과 감쇠비를 나타낸다.

Fig. 4는 볼트에 의해 지지된 상판이 회전하는 모드(고유진동수 0.95 kHz)로 볼트의 미소 굽힘 변형이 동반된다. 체결력이 증가함에 따라 진폭은 미소하게 감소하는 경향을 보였으며, 체결력에 따라 감쇠비의 변화는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 5는 두 판이 반대 위상으로 굽힘 변형을 보이

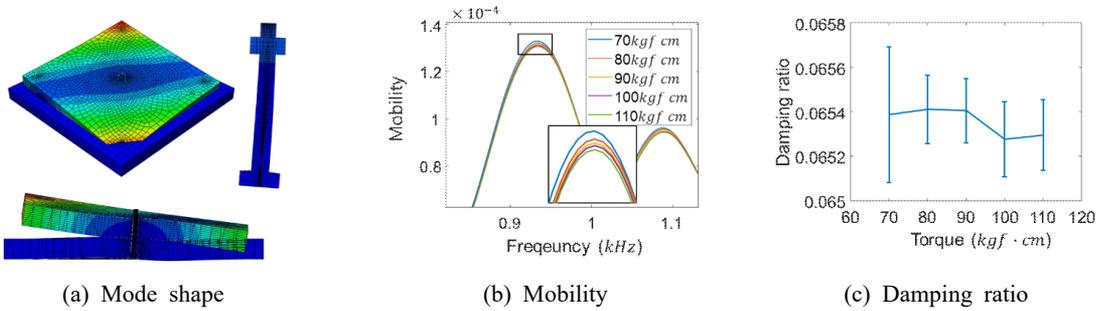


Fig. 4 Mode shape, mobility and damping ratio at 0.95 kHz natural frequency

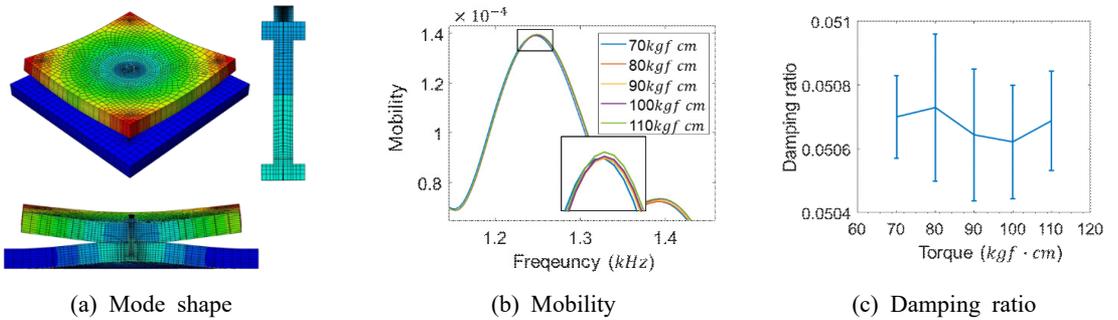


Fig. 5 Mode shape, mobility and damping ratio at 1.25 kHz natural frequency

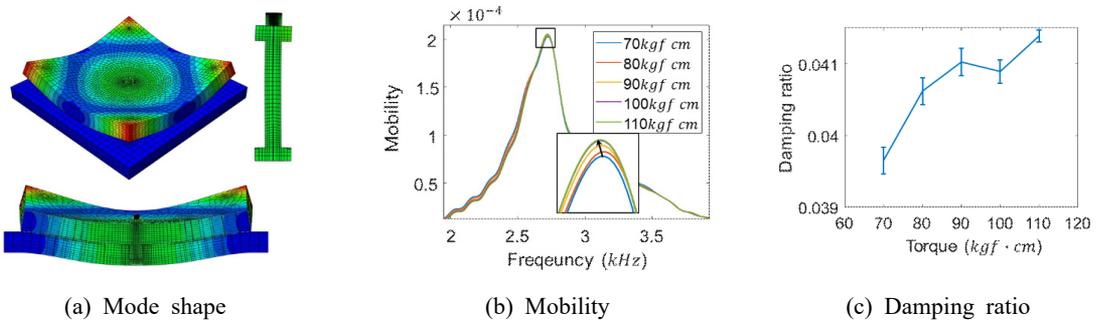


Fig. 6 Mode shape, mobility and damping ratio at 2.7 kHz natural frequency

는 모드(고유진동수 1.25 kHz)로 볼트의 축방향 진동이 동반된다. 체결력에 따라 진폭, 감쇠비, 고유진동수에는 큰 변화가 나타나지 않았다.

Fig. 6은 상판과 하판이 같은 위상으로 굽힘 진동을 하는 모드(고유진동수 2.7 kHz)로 변형시에 가장 넓은 면적에서 두 판사이의 미소미끄러짐(slip)이 발생할 것으로 추정된다. 이 모드에서는 체결력이 증가할수

록 고유진동수는 미소하게 감소하며, 진폭과 감쇠비는 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 상판이 고차의 굽힘 변형을 보이는 모드(6.0 kHz)이며, 상판의 중심부와 모서리 부분이 하판과 미소미끄러짐(slip)을 보이는 모드로 체결력이 증가할수록 고유진동수와 진폭은 미소하게 증가하며, 감쇠비는 감소하는 경향을 보였다.

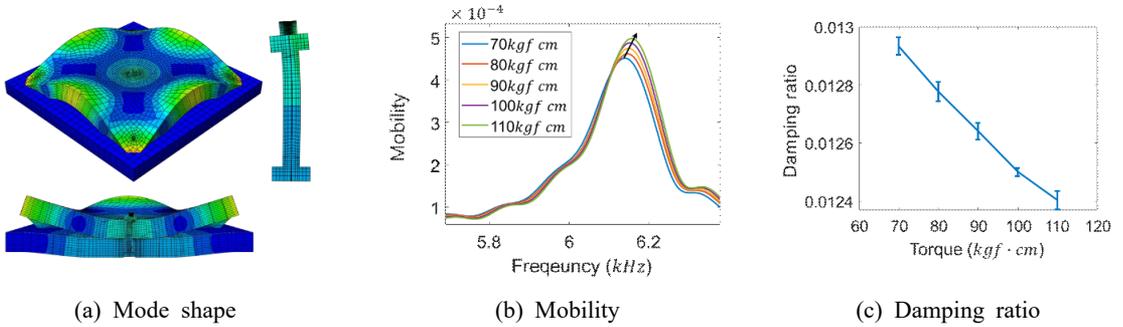


Fig. 7 Mode shape, mobility and damping ratio at 6.0 kHz natural frequency

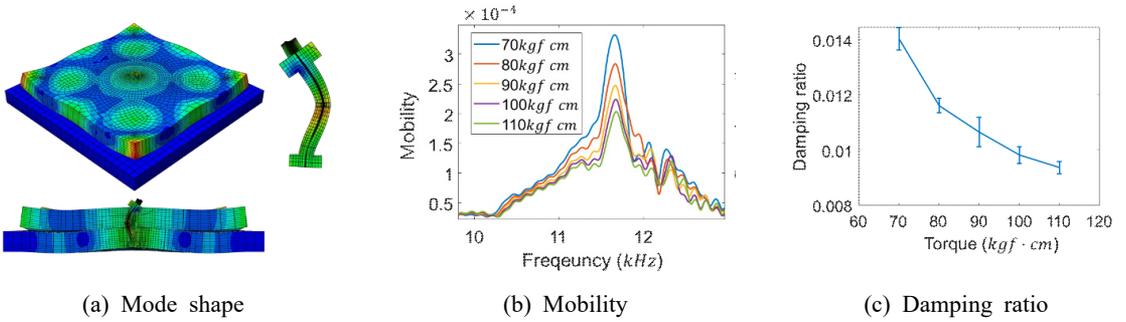


Fig. 8 Mode shape, mobility and damping ratio at 11.5 kHz natural frequency

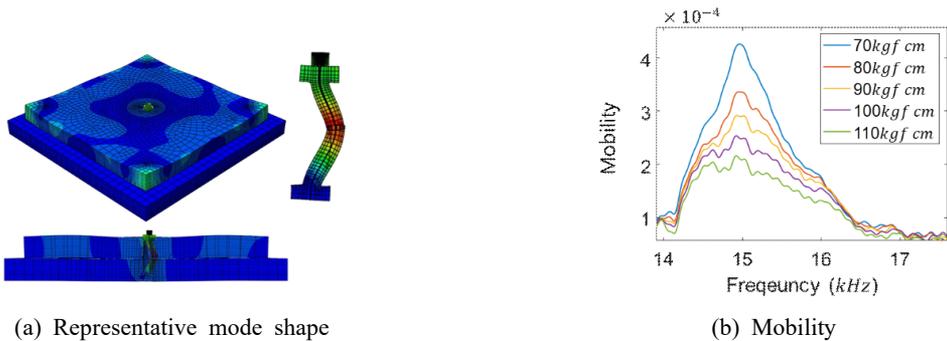


Fig. 9 Representative mode shape and mobility near 15 kHz natural frequency

Fig. 8은 상하판의 고차 굽힘 변형과 함께 볼트의 굽힘 변형이 강하게 나타나는 모드(고유진동수 11.5 kHz)이며, 체결력이 증가할수록 다른 진동모드에 비해 진폭과 감쇠비가 크게 감소하는 경향을 보였다.

실험결과(Fig. 3(a)) 15 kHz 주변에서 고유진동모드가 존재하는 것으로 보이나, 체결력이 증가할수록 진폭이 급격히 작아지는 경향을 보였다. 해석(Fig. 3(b))에서는 해당 고유진동수 주변에서 여러 개의 진동모드가 존재하는 것으로 나타났으나 어느하나로 특정하기는 어려운 것으로 판단된다. 하지만 해당 주파수 주변에서 고유진동모드들을 보면 공통적으로 볼트의 굽힘 변형이 지배적인 모드로 나타났다. Fig. 9(a)는 대표적인 볼트의 굽힘 모드 형상을 나타내며, Fig. 9(b)는 체결력에 따라 진폭이 급격히 작아지는 경향을 보여준다. 이러한 진폭의 급격한 감소는 체결력에 따라 볼트-너트의 댐핑이 급격히 증가하였거나 이 연구에서 사용한 육각 볼트의 굽힘강성이 굽힘의 방향에 따라 불균형이 커지며 고유진동이 변하는 등의 원인을 추정해 볼 수 있다. 하지만 정확한 원인을 파악하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

다음으로 각 진동모드들을 비교해보면, 저주파 모드일수록 감쇠비는 더 크게 나타났으나, 체결력에 따른 댐핑의 변화는 고주파 모드에서 더 크게 나타났다. 2.6 kHz(Fig. 6)와 6 kHz(Fig. 7) 고유진동을 비교해보면 둘 다 체결력이 증가할 때 진폭이 미세하게 증가하였으나 2.6 kHz 진동의 경우 체결력에 따라 고유진동수는 감소하고 댐핑비는 증가하였고(Fig. 6(b) 화살표), 6 kHz 진동의 경우 이와 반대의 경향을 보였다(Fig. 7(b) 화살표). 하지만 두 진동모드 모두 진동수의 변화와 댐핑비의 변화가 1% 미만으로 무시할 수 있을 만큼 작은 변화를 보였다. 볼트의 굽힘 변형이 크게 나타나는 것으로 보이는 11.5 kHz(Fig. 8)와 15 kHz (Fig. 9) 진동의 경우 체결력이 증가함에 따라서 진폭의 감소가 크게 나타났으며, 11.5 kHz 진동의 경우 체결력이 증가함에 따라 감쇠비가 30% 가까이 감소함을 확인하였다.

기존 연구들^(16,17)에서 보고되었듯이 이 연구에서도 체결력에 따른 진동특성의 변화가 진동 모드에 따라 상반되게 나타날 수 있음을 확인하였다. 이는 결합된 구조물의 진동과 볼트-너트의 진동이 모드에 따라 복합적으로 발생하며, 특히 진동시 마찰에 의한 에너지 소산이 체결력에 따라 일정한 경향을 보이지 않기 때

문⁽²⁰⁾인 것으로 파악된다. 하지만 주목할만한 점은 체결력에 직접적으로 영향을 받는 볼트에서 굽힘변형이 크게 나타나는 고유진동 모드가 체결력에 따라서 큰 변화를 보이는 것을 알 수 있다(Figs. 8, 9).

4. 결 론

이 연구에서는 볼트-너트로 결합된 두 개의 평판 구조물에서 볼트의 결합력(적정 결합토크의 60% ~ 100% 범위)에 따른 진동특성을 분석하였다. 볼트 결합구조물은 결합된 구조물의 진동 특성과 볼트-너트의 진동특성이 혼합되어 복잡한 거동을 보일 뿐 아니라 진동시에 마찰에 의한 댐핑 역시 진동 형상에 따라 달라지므로 볼트의 결합력에 따른 진동특성의 변화는 진동모드에 따라 다르게 나타날 수 있음을 확인하였다. 하지만 결합력에 따른 진동특성의 변화는 고주파 진동모드에서 더 크게 나타났으며, 특히 결합력에 직접적으로 영향을 받는 볼트-너트의 굽힘 변형이 크게 나타나는 진동 모드에서 큰 변화를 보였다. 따라서 구조물의 진동을 기반으로 볼트의 풀림을 검출하기 위해서는 볼트의 풀림에 따라 진동특성의 변화가 크게 나타나는 진동모드를 파악하고 해당 모드를 선별적으로 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 중견연구자지원사업(2020R1A2C2013414)과 BK21 four 사업의 일부 지원으로 수행됨.

References

- (1) Zhang, H., Zhu, X., Li, Z. and Yao, S., 2019, Displacement-dependent Nonlinear Damping Model in Steel Buildings with Bolted Joints, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 1049~1061.
- (2) Daouk, S., Louf, F., Cluzel, C., Dorival, O., Champaney, L. and Audebert, S., 2017, Study of the Dynamic Behavior of a Bolted Joint Under Heavy Loadings, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 392, pp. 307~324.

(3) Aoki, S., 2002, Dynamic Characteristics of Structures with Bolted Joint, ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 19442, pp. 75~79.

(4) De Wit, C. C., Olsson, H., Astrom, K. J. and Lischinsky, P., 1995, A New Model for Control of Systems with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419~425.

(5) Dahl, P., 1975, Solid Friction Damping of Spacecraft Oscillations, Guidance and Control Conference, p. 1104.

(6) Olsson, H., 1996, Control Systems with Friction, Doctoral Dissertation, Lund University.

(7) Gaul, L. and Lenz, J., 1997, Nonlinear Dynamics of Structures Assembled by Bolted Joints, Acta Mechanica, Vol. 125, No. 1, pp. 169~181.

(8) Bournine, H., Wagg, D. J. and Neild, S. A., 2011, Vibration Damping in Bolted Friction Beam-columns, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, No. 8, pp. 1665~1679.

(9) Brøns, M., Thomsen, J. J., Sah, S. M., Tcherniak, D. and Fidlin, A., 2021, Estimating Bolt Tension from Vibrations: Transient Features, Nonlinearity, and Signal Processing, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 150, 107224.

(10) Sah, S. M., Thomsen, J. J., Brøns, M., Fidlin, A. and Tcherniak, D., 2018, Estimating Bolt Tightness Using Transverse Natural Frequencies, Journal of Sound and Vibration, Vol. 431, pp. 137~149.

(11) Fujioka, Y., 2008, Behavior and Mechanisms of Bolt Self-loosening under Transverse Load Due to Vibrations of a Washer along an Arc., ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 48760, pp. 27~35.

(12) Yang, J. and Chang, F. K., 2006, Detection of Bolt Loosening in C-C Composite Thermal Protection Panels: II. Experimental Verification, Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 2, p. 591.

(13) He, K. and Zhu, W. D., 2014, Detecting Loosening of Bolted Connections in a Pipeline Using Changes in Natural Frequencies, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 136, No. 3, 034503.

(14) Shao, J., Wang, T., Yin, H., Yang, D. and Li, Y., 2016, Bolt Looseness Detection Based on Piezoelectric Impedance Frequency Shift, Applied Sciences, Vol. 6, No. 10, p. 298.

(15) Cho, D. H. and Eun, H. C., 2017, Evaluation of Bolt-Loosening Joints of Truss Structure Through Sound Pressure Measurement, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 149~154.

(16) Kim, S., Ha, J. H. and Lee, S. K., 1999, Effects of Flange Joint on the Vibrational Characteristics of the External Cylindrical Grinding Wheel Spindle, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 118~125.

(17) Li, H., Lv, H., Sun, H., Qin, Z., Xiong, J., Han, Q., Liu, J. and Wang, X., 2021, Nonlinear Vibrations of Fiber-reinforced Composite Cylindrical Shells with Bolt Loosening Boundary Conditions, Journal of Sound and Vibration, Vol. 496, 115935.

(18) Ikeda, K., Nakagawa, H. and Mitsunaga, K., 1970, On the Tightening of Bolts, Strain, Vol. 32, No. 3, pp. 9~21.

(19) Nikraves, S. M. Y. and Goudarzi, M., 2017, A Review Paper on Looseness Detection Methods in Bolted Structures, Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 14, No. 12, pp. 2153~2176.

(20) Inman, D. J., 2015, Engineering Vibration 4th Edition, Modal Parameters by Circle Fitting, pp. 603~607.



Guenil Kim received his B.S.(2017) degree in Aerospace Engineering from Jeonbuk National University. He then received M.S.(2020) degrees from the department of Mechanical System Engineering in Jeonbuk National University. His research interests include structural health monitoring, non-destructive evaluation, and mechanical metamaterials.



Hyo Sun Yu received a B.S.(1988) degree in Precision Mechanical Engineering from Jeonbuk National University. He also received M.S.(1990) and Ph.D.(1994) degrees in Mechanical Engineering from Jeonbuk National University. His research fields are material strength and nondestructive evaluation for weldment of power plant, automobile and solder joint of electronic parts.



Eunho Kim received his B.S.(2006) degree in Aerospace Engineering from Inha University. He then received M.S.(2008) and Ph.D.(2012) degrees from the department of Aerospace Engineering in KAIST.

He is currently an Associate Professor in the division of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University. His research interests include impact/damage of composite materials and structures, structural health monitoring, non-destructive evaluation, and mechanical metamaterials.