

# 경사진 볼트결합부의 2D 강성에 관한 연구 Study on 2D Stiffness of Slant Bolt Joint

\*#이재학<sup>1</sup>, 이찬홍<sup>1</sup>, 하태호<sup>1</sup>

\*#J. H. Lee(jaehak76@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, C. H. Lee<sup>1</sup>, T. H. Ha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 초정밀시스템연구실

Key words : Slant Bolt Joint, Lateral Stiffness, Longitudinal Stiffness, Fasten Force, FEM

## 1. 서론

초정밀 기계장비들은 수많은 볼트결합부로 체결되어 있으며 볼트결합부에 압축하중뿐만 아니라 굽힘 및 장력이 동시에 작용하므로 볼트결합부의 강성을 고려하여 해석을 수행해야만 정확한 정밀도를 예측할 수 있다. 이전 연구에서 체결력에 따른 볼트결합부의 종방향 및 횡방향 강성을 계산할 수 있는 볼트결합부 강성 계산 소프트웨어를 구성하였으며, 본 연구에서는 경사진 볼트결합부의 강성 및 감쇠 계수를 FEM에 적용하기 위해 좌표변환 및 분배 방법에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 경사진 볼트결합부의 강성 및 감쇠계수 좌표변환 및 분배 방법

수평형 터닝센터와 같은 기계장비의 경우 Fig.1 과 같이 경사진 베드 구조 및 결합부를 갖는다. 또한 모델링 좌표계와 FEM 해석 소프트웨어의 좌표계가 불일치하는 경우 FEM 소프트웨어에서 강성 및 감쇠계수를 입력하기 위하여 강성 및 감쇠계수의 좌표변환이 요구된다. Ansys 의 경우 각 볼트결합부의 강성 및 감쇠계수를 입력하기 위하여 matrix 27 요소를 이용하여 78 개의 행렬요소를 입력이 요구된다. 각 행렬요소는 축방향 강성 요소뿐만 아니라 좌표변환 시 축방향 강성 이외의 성분들이 생성되어 입력되어야 한다. 수 많은 복수 결합부로 구성되어 있는 기계장비의 경우 사용자가 수동으로 모든 요소성분을 입력하기에 많은 시간과 노력이 요구된다. 본 연구에서는 경사진 볼트결합부의 강성 및 감쇠계수를 좌표 변환하여 자동으로 입력 가능하도록 강성 및 감쇠계수의 좌표변환 및 분배 기술에 관한 연구를 진행하였다.

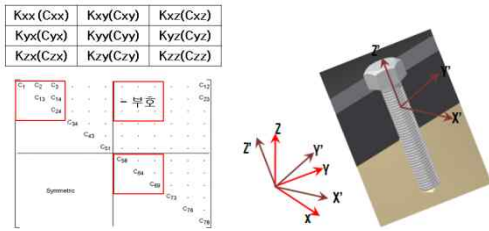


Fig. 1 Slant bed structure of turning center

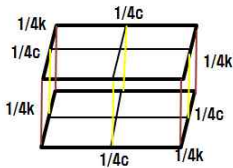
Ansys 의 경우 볼트결합부의 강성 및 감쇠 계수를 입력하기 matrix 27 을 이용하며 78 개의 성분이 대칭을 이루는 대칭행렬 형태를 갖는다. 좌표 변환된 볼트결합부의 강성 및 감쇠계수 행렬인 Fig. 2 (a)의 3x3 강성 및 감쇠계수 행렬은 matrix 27 요소의 빨간색으로 표시되는 부분에 배열되며 나머지 요소의 값은 0 을 갖는다. 강성행렬은 Kxx, Kyy, Kzz 의 축방향 강성요소 이외에 전단방향의 강성 요소를 갖으며 볼트결합부의 로컬 좌표계와 글로벌 좌표계가 일치하는 경우 전단강성 요소는 0 의 값을 갖는다. 하지만 로컬 좌표계와 글로벌 좌표계가 일치하지 않고 각 축방향으로 일정한 각도를 갖을 경우 전단 강성요소는 임의의 값을 갖는다.

Fig. 2 (b)는 전산모델에서 볼트결합부 강성 및 감쇠계수의 분배 개략도를 나타내며 볼트결합부의 볼트 및 볼트 구멍을 제거하고 면분할하여 4 개의 강성과 4 개의 감쇠계수를 분배하도록 구성하였다. 면분할 크기는 체결력에 의한 볼트결합부 유효각을 고려하여 볼트헤드의 직경으로 단순화하여 사각형으로 면분할을 수행하였다.

볼트결합부의 로컬 좌표계와 해석영역의 글로벌 좌표계가 일치하지 않을 때 각도를 산



(a) Elements of matrix 27



(b) Distribution of Stiffness and damping coefficient

Fig. 2 Distribution method of stiffness and damping coefficient of bolt joint for FEM analysis

출하기 위하여 로컬 좌표계의 z 축방향의 단위 방향벡터를 글로벌 좌표계로 표현한 방향벡터 좌표를 추출하여 볼트결합부 강성 및 감쇠 계산 소프트웨어의 입력으로 받아들여 아래와 같은 식을 이용하여 두 좌표계 사이의 각도를 산출하였다. 로컬좌표계의 z 축에 관한 회전의 경우 볼트결합부가 축대칭이므로 회전이 없는 것으로 가정하였다.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{ey}{\sqrt{ey^2 + ez^2}}, \quad \beta = \cos^{-1} \frac{ez}{\sqrt{ex^2 + ez^2}}$$

IF  $ey=ez=0$  이면  $\alpha=0$ , IF  $ex=ez=0$ 이면  $\beta=0$

위 식에서 계산 시 분모가 0 이되어 계산이 어려운 부분을 고려하여 위와 같이  $ey=ez=0$  이면  $\alpha=0$  으로 정의하였으며  $ex=ez=0$  인 경우  $\beta=0$  으로 정의하였다. 강성계수의 좌표변환 행렬은 아래와 같은 3x3 행렬로 표현이 가능하다.

$$M_{RM}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

강성계수의 경우 4 의 matrix27 요소로 표현하여 전체강성을 4 로 나누어 단일 스프링의

강성값을 좌표 변환하였으며 좌표 변환된 강성 행렬은 아래와 같이 표현가능하며 감쇠계수의 경우도 동일한 방법으로 표현 가능하다.

• 강성 계수( $Kx'x'$ ,  $Ky'y'$ ,  $Kz'z'$ )의 좌표변환

$$\begin{bmatrix} Kxx & Kxy & Kxz \\ Kyx & Kyx & Kyz \\ Kzx & Kzy & Kzz \end{bmatrix} = M_{RMT} \begin{bmatrix} Kx'x'/4 & Kx'y'/4 & Kx'z'/4 \\ Ky'y'/4 & Ky'z'/4 & Ky'z'/4 \\ Kz'z'/4 & Kz'y'/4 & Kz'z'/4 \end{bmatrix} M_{RMT}^T$$

Fig. 3 은 마운트, 볼트결합부, 직선이송계, 회전이송계가 결합된 복합결합부의 전산모델을 나타내고 있다. 볼트결합부의 거동 및 전산모델을 검증 확인하기 위하여 전산 해석을 수행하였으며 이때 볼트결합부의 입력조건은 M16 볼트, 체결력 40kN 을 조건으로 해석을 수행하였다. 모드해석을 수행한 결과 볼트결합부의 거동 모드는 59.76 HZ 로 z 축방향으로 움직이는 결과를 얻었다.

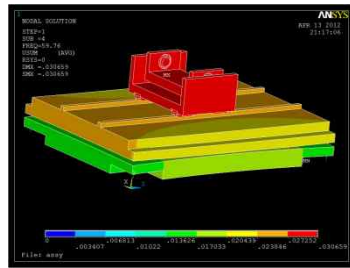


Fig. 3 Result of mode shape analysis for multi-joints for verification

4. 결론

본 연구를 통하여 경사진 볼트결합부의 강성 및 감쇠계수를 FEM 에 쉽게 적용하기 위해 CAD 도면에서 볼트결합부의 방향벡터를 추출하고 이를 활용하여 강성 및 감쇠계수를 좌표변환 및 분배하는 방법에 관한 연구를 수행하였으며 이를 검증하였다.

참고문헌

1. Williams, J. G., Anley, R. E., et al., "Analysis of Externally Loaded Bolted Joints: Analytical, Computational and Experimental Study," International Journal of Pressure Vessels and Piping, **86**, 420-427, 2009