

# 공작기계 구조물의 마운트 강성예측 Stiffness Estimation of Mounting Devices for Machine Tools

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

\*\*T. H. Ha (taehoha@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, J. H. Lee<sup>1</sup>, Y. J. Kim<sup>1</sup>, D. H. Kim<sup>1</sup>, C. H. Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부

Key words : Machining tools, Mounting device, FEM, Stiffness, Estimation

## 1. 서론

공작기계는 점점 그 구조가 복잡해지며 모델 또한 다양해지고 있어 신제품 개발 및 수정에 많은 시간 및 비용이 소요되고 있다. 개발기간 단축 및 비용절감을 위해서는 3차원 가상 모델을 이용한 시뮬레이션이 제품 개발에 있어서 필수적인 프로세스이다. 시뮬레이션을 통하여 장비의 구조적 취약점을 설계단계에서 검증하여 이를 고려한 구조 설계 및 제작을 행하게 된다.

공작기계는 베드, 칼럼, 축, 기어, 베어링, 볼트, 마운트 등 다양한 부분으로 구성되어 있으며, 이 중에서 마운트 부분은 공작 기계의 최하부에 위치하여 기계의 지지, 고정, 높이 조정 등의 역할을 행하는 부분을 칭한다. 마운트 (Mounting Devices or Mounting elements), 머신 풋 (Machine Foot), 혹은 기초 (Foundation) 등과 혼용되어 불리고 있으나, 본 논문에서는 마운트로 통일하여 칭하기로 한다.

마운팅 방법 및 조건에 따라 기계의 정적 안정성은 물론 동적 거동에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 마운트 및 기초부분은 기계의 높이 및 위치조정, 기초를 이용한 부가적인 강성 부여, 동적 외란에 대한 능동적·수동적 격리를 고려해서 설계가 이루어져야 한다.

이들 마운트는 크게 소형기계, 대형기계, 정밀기계, 대형 공작기계와 같이 공작기계의 종류에 따라 제작이 필요하게 된다. 기존에는 LVDT (Linear Variable Differential Transducer) 또는 가속도 센서를 이용하여 최종제품의 강성 평가를 하는 연구가 행하여졌다. 실제 실험을 통한 강성 평가로 실용적인 결과를 얻을 수 있으나, 이는 제품이 이미 개발된 상태에서 검증차원의 평가이므로 효과적인 마운트 개발을 위해서는 설계 단계에서부터 강성예측이 필요하게 된다. 이를 위해서는 설계된 도면으로부터 마운트의 강성 값의 도출이 필요하게 되며, 이 값을 이용한 시뮬레이션을 통한 강성 예측을 행하게 된다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통한 강성 예측과 실제 실험 결과를 이용한 통한 강성치의 보정 및 데이터 베이스 구축을 통하여 설계 최적화된 안을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 논문에서는 공작기계 구조물의 마운트 강성예측을 위하여 공작기계에 사용되는 마운트의 종류에 따른 강성 계산식의 예와 FEM 해석 결과를 제시하였다.

## 3. 해석 프로세스

공작기계의 강성해석은 공작기계의 3 차원 모델에서 각 구성요소를 단순화한 유한요소해석 모델을 구축하여, 최종적으로 공작기계 전체의 해석 결과를 얻게 된다. 유한요소해석 모델의 최적화는 Frequency Response Function (FRF) 및 Mode Shape 측정실험을 통하여 이루어지게 된다. 이때 각 요소들은 독립된 형태의 소프트웨어 모듈 형태로 개발되게 된다. 공작기계 구성요소 중 마운트의 강성을 계산하기 위한 소프트웨어 모듈의 해석 흐름은 다음과 같다. 먼저 설계된 3 차원 CAD 모델 및 재료에 대한 정보 받아 들인 후 단순화된 해석 모델을 구축한다. CAD 모델로부터는 마운트의 종류에 따라, 볼트의 종류, 직경, 길이, 체결력, 삽입 깊이, 접촉면적, 높이 등의 치수정보와 구축해 둔 데이터 베

이스로부터 재료에 따른 물성치를 이용하여 강성치를 예측하게 된다. 이 예측치와 실제 검증실험결과의 비교를 통하여 강성 예측식의 유용성 검증 및 최적화를 행하며 이를 바탕으로 데이터 베이스의 업데이트를 행하는 프로세스를 거치게 된다.

## 2. 마운트 (Mounting Device) 강성 계산식

공작기계에 주로 사용되는 대표적인 마운트의 종류를 Fig. 1 에 나타내었다. 앵커를 이용하여 지반에 고정시키는 타입, 웨지 타입의 높이 조정기구를 가지는 타입 및 단순한 댐핑 패드 구조 등 다양한 형태의 마운트가 존재하며 각 종류에 따라 높이조정 기능과 댐핑 기능의 유무를 나타내고 있다.

먼저 압축은 물론 전단에 잘 견디는 댐핑 패드의 경우, 압축강성,  $k_c$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{K_c} = \frac{h}{A} \left[ \frac{1}{E(1+2\alpha A_r^2)} \right] + \frac{1}{B}$$

여기서, E는 Young's modulus, B는 Bulk modulus 를 나타내며,  $A_r$  은 하중을 받는 면적과 측면확정 영역의 면적비로 다음과 같이 나타내진다.

$$A_r = \frac{lb}{2h(l+b)}$$

여기서, l은 길이, b는 넓이, h는 높이를 나타낸다.

전단강성,  $k_s$  는 중형비가 충분히 작아 휨에 의한 변형이 무시할 수 있을 경우 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$k_s = \frac{GA}{h}$$

여기서, G는 Shear modulus 를 나타낸다.

계산을 위한 값은 고무의 쇼어 경도 (Shore Hardness) 값에 따라 적절한 값을 선택하여 입력하면 된다. 그러나, 고무의 경우 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성 거동을 보이는 초탄성 (Hyperelastic) 특성을 지니고 있어, 고무 부품의 해석을 위해서는 시편의 물성시험이 필수적이다.

Adjustable height	Damping effective		Adjustable height	Damping effective	
	h	d			h
	Yes	No		No	Yes
	Yes	No		No	Yes
	No	No		Yes	Yes
	Yes	Yes		No	Yes
	Yes	Yes		No	Yes
	No	No		No	Yes

Fig. 2 Machine mounting devices types

앵커 (Anchor)의 경우는 앵커 볼트를 이용하여 콘크리트에 고정시키는 방법으로 볼트, 베이스, 콘크리트 등으로 구성된다.

볼트의 강성,  $k_b$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_b = \frac{A_s E_b}{L_{eq}}$$

$$L_{eq} = L + (1.95 - \frac{\beta}{2} - \nu)d$$

여기서,  $A_s$ 는 볼트 샹크 면적 ( $m^2$ ),  $E_b$ 는 볼트의 Young's modulus,  $L_{eq}$ 은 등가 그림길이 (m),  $\beta$ 는 볼트 또는 와서의 외경과 볼트 직경과의 비를 나타낸다.

또한, 구조체의 강성,  $k_m$ 은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$k_m = \frac{\pi E_0 d \tan \alpha}{\ln \left[ \frac{(2t_0 \tan \alpha + D_0 - d)(D_0 + d)}{(2t_0 \tan \alpha + D_0 + d)(D_0 - d)} \right]}$$

여기에서  $d$ 는 볼트의 외경,  $D$ 는 볼트헤드 또는 와서의 직경,  $\alpha$ 는 압력 콘 해석방법에서 사용되는 콘 형태의 꼭지각의 반각을 나타내며  $30^\circ$  정도가 일반적인 경우가 많다.

앵커의 경우, 동작기계의 베이스 부분, 변형 부분, 콘크리트를 포함해서 3개의 구조체로 구분 가능하다.

각각의 부분의 강성치는 아래의 식을 대입하여 표현 가능하다.

$$E_0 = E_1, t_0 = t_{m1}, D_0 = D$$

$$E_0 = E_2, t_0 = \frac{t_{m2} - t_{m1}}{2}, D_0 = 2t_{m1} \tan \alpha + D$$

$$E_0 = E_2, t_0 = \frac{t_{m2} + t_{m1}}{2}, D_0 = D$$

이 영역은 직렬로 연결되어 있어 구조체 전체의 강성은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$k_t = k_b + k_m$$

최종적인 볼트와 구조체는 병렬로 연결되는 구조이므로 최종 앵커결합에 의한 마운트부의 강성은 다음과 같다.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m21}} + \frac{1}{k_{m22}}$$

위 식에서 보는 바와 같이 전체 앵커 결합의 의한 마운트의 강성은 앵커 볼트와 구조체의 강성에 의해 구해지게 된다. 이때 볼트 및 콘크리트의 종류, 삽입 깊이, 체결력 등과 같은 변수가 있어, 이들 값에 대한 FEM 해석 및 실험을 통하여 보다 최적화된 계산식의 도출이 필요하다.

#### 4. 유한요소해석 결과

상용 해석 프로그램을 이용하여 앵커볼트를 이용한 마운트의 해석 결과를 나타내었다. 앵커를 이용하여 직접 바닥에 직결할 경우는 바닥의 고유주파수가 2~3Hz 일 경우만 유효하여, 일반적으로 고립주파수 대역에 따라 고무재질의 댐핑 패드, 스프링 등을 사용하는 경우가 많으나 모델 단순화를 통한 경향 분석을 위하여 이들 댐핑 요소를 제외하고 해석을 행하였다. 콘크리트의 poisson's ratio는 일반적으로 0.15~0.25가 일반적으로, 본 해석에서는 poisson's ratio 0.2, Young's modulus 2.6E6 psi 값에 체결력을 각각 2kN, 4kN, 6kN을 가하였을 때를 결과를 나타내었다. 앵커볼트의 길이는 60 mm로 두께 20 mm를 베이스를 관통하여 콘크리트 내부에는 40 mm가 삽입되도록 설계하였다.

Fig.2 (a)는 앵커볼트가 콘크리트에 4kN의 체결력으로 체결되었을 때 해석 단면의 예를 나타내었다. Fig.2. (b), (c), (d)는 체결력을 증가시켰을 때의 동작기계 베이스부와 콘크리트부를 추출하여 그 압력분포를 임계값 1.7MPa로

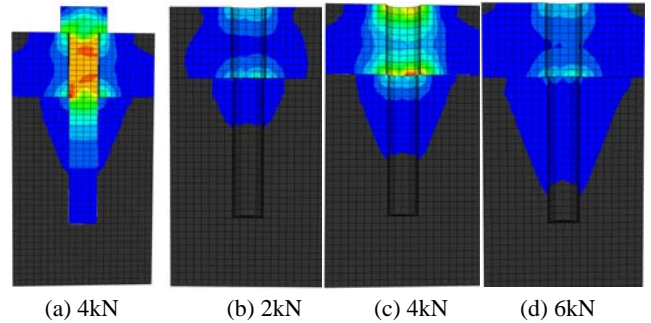


Fig. 2 FEM analysis result of anchor (Cross-sectional view)

설정한 값을 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 체결력의 증가에 따라 전체적인 압력이 커지며, 앵커볼트 헤드부근과 콘크리트와의 계면에서 대칭형태로 높은 압력이 인가되는 경향을 확인할 수 있었다.

마운트 강성 계산식에서의 미지수인 콘 형태의 꼭지각의 반각인  $\alpha$ 의 경우, 일반적으로  $30^\circ$ 로 설정하는 경우가 많으나, 유한 요소 해석결과와 실험결과를 통해 유추가 가능할 것으로 기대되며, 또한 이들 결과를 이용하여 보다 정확한 예측이 가능하리라 예상된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 대표적인 동작기계 마운트의 강성예측 이론 계산식의 정리와 마운팅 조건에 따른 강성예측을 위하여 유한요소 해석을 행하였다. 향후 유한요소 해석 결과와 실험 결과를 통하여 보다 정확하고 일반화된 강성예측을 위한 소프트웨어 모듈의 구축으로 동작기계 설계단계에서의 강성예측을 통한 제품개발 기간단축 및 비용절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. Yoshida, K., Shimura, H., Yahagi, H., Yoshioka, J., "Effects of Mounting Conditions of Surface Grinding Machines upon Their Rocking Mode Vibrations", Proc of 6<sup>th</sup> ICPE, 477, 1987
2. Weck, M., "Handbook of Machine Tools", Vol.2, John Wiley & Sons, 1984
3. Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., and Witt, S., "Virtual machine tool," Annals of the CIRP, **54**, 115-138, 2005
4. J. G. Williams, R. E. Anley, D. H. Nash and T. G. F. Gray, "Analysis of Externally Loaded Bolted Joints: Analytical and Experimental Study", International Journal of Pressure Vessels and Piping, **86**, 420-427, 2009
5. Stephenson, D., Agapiou, J., "Metal Cutting Theory and Practice: second edition", CRC press, 2009
6. Tusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, **39**, 517-521, 1990.
7. Hong, S., Kato, H., Nakano, Y., Tomita, Y., "Installation of Cylindrical Grinding Machine by Using Load-Sensible Mounting Elements - Relation between Mounting Load and Dynamic Stiffness-", Japan Society for Precision Engineering, 57, 04, 92-96, 1991, in Japanese
8. Yoshida, K., Shimura, H., Yoshioka, J., "Development of Special Mounting Elements with Damping for Surface Grinding Machines", Japan Society for Precision Engineering, 55, 05, 49-52, 1992, in Japanese