

브레이징으로 접합된 마이크로 엔드밀의 진동특성 평가 Evaluation of Vibration Characteristics for Brazing Bonded Micro Endmill

*이경은¹, 김진웅¹, 이희신¹, 안성훈^{1,2}

* K. E. Lee¹, J. W. Kim¹, H. S. Lee¹, and #S. H. Ahn (ahnsh@snu.ac.kr)^{1,2}

¹서울대학교 기계항공공학부, ²서울대학교 정밀기계설계공동연구소

Key words : Brazing end-mill vibration, Modal analysis, Harmonic analysis

1. 서론

마이크로 드릴(micro drill), 마이크로 엔드밀(micro endmill) 등을 통칭하는 마이크로 비트(micro bit)는 작은 직경으로 인해 힘에 취약하기 때문에 강한 비트 소재를 필요로 한다. 특히 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)용 마이크로 비트들은 금속 가공용 비트보다 동일 직경 대비 날 길이가 길기 때문에 더욱 강한 소재 강도를 요한다. 따라서 일반적으로 PCB 가공용 마이크로 비트의 소재로는 강도가 높은 초경(Tungsten Carbide, WC)이 주로 사용된다. 그러나 초경은 소재 단가가 높아서 비트의 단가를 낮추기 위한 방법이 연구되고 있다. 브레이징(brazing)은 그러한 방법 중의 하나로, 가공에 직접 관여하지 않는 몸통 부분인 샹크(shank) 부분에 저가의 스테인리스 스틸(stainless steel)을 사용하고 가공에 직접 관여하는 날 부분인 플루트(flute) 부분은 초경 재질을 사용하며 두 부분을 고온의 필러(filler)를 사용하여 접착하는 방법이다.

축 방향 힘을 주로 받는 드릴 비트와 달리 횡 방향 힘을 크게 받는 엔드밀 비트의 경우 브레이징 타입의 성능이 초경 단일 소재 타입보다 현저히 떨어져 개선 방안이 활발히 연구되고 있다. 여기에서 말하는 성능은 가공시 수명, 기관 절단부위의 깨끗한 정도 등을 의미한다. 브레이징 비트의 성능 문제는 접합의 취약성 때문일 수도 있으나, 브레이징 비트의 파손 위치가 브레이징된 지점이 아닌 경우가 많고 기관 가공면이 깨끗하지 못한 점은 진동에서 기인한다고 예상하여 재료의 강성에서 오는 굽힘 차이에 의한 진동 비교에 초점을 맞추었다. 본 연구에서는 브레이징 엔드밀의 대안으로서 변형 브레이징 엔드밀 모델을 이용하여 진동 관련 해석을 수행하여 보았다. 마이크로 비트의 경우 고속카메라나 일반적인 변위 센서로 진동을 측정하기에는 플루트 지름이 너무 작다. 따라서 브레이징 비트의 진동을 비교하기 위해 유한요소 해석을 이용하였다. 또한 진동 특성을 파악하기 위해 모드 해석 및 가진 응답 해석을 수행하였다.

2. 브레이징 엔드밀의 수명 비교 실험

브레이징 엔드밀의 성능이 떨어진다는 것은 초경 단일 소재 엔드밀에 비하여 힘에 의한 굽힘이 생기기 쉽고 가공 진행 시 규칙적인 회전력을 받으면 진동이 더 심하다는 것을 의미한다. 실제로 초경단일소재 엔드밀과 Stainless steel-WC 브레이징 엔드밀의 수명을 실험을 통해 확인하였을 때 결과는 Fig. 1과 같았다. 본 연구에서는 그 원인으로 샹크부의 재료로 쓰인 스테인리스 스틸과 브레이징 접합 부분은 은납의 강성이 약하다는 것에 초점을 맞추었다. 스테인리스 스틸은 초경에 비해 강성이 1/3 이다(Table 1).

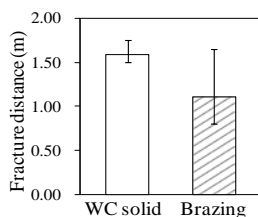


Fig. 1 Lifetime comparison (400 μm endmill)

Table 1 Young's modulus of the materials

	Tungsten Carbide	Stainless Steel	Silver solder
Young's modulus	600 GPa	200 GPa	76.0 GPa
Density	14.7 g/cm ³	8.00 g/cm ³	10.5 g/cm ³

즉 굽힘 강성이 약하면 굽힘에 대한 변형이 쉽고 진동에 의한 변형량도 크다. 그러나 브레이징 재료로 사용되는 스테인리스 스틸의 대안이 될 만한 가격과 강성을 가진 재료는 아직 없다. 따라서 브레이징 엔드밀의 진동 문제에 대한 대안으로서 두께를 늘려 2차 단면관성모멘트를 증가시킨 변형 브레이징 엔드밀 모델(Fig. 2(c))을 고안하여 기존의 단일소재 엔드밀 및 브레이징 엔드밀과의 진동 특성을 비교하기 위해 Fig. 2의 세 가지 모델의 유한요소해석 진동 특성을 파악해 보았다. 세 모델의 플루트 직경은 650 μm이다.

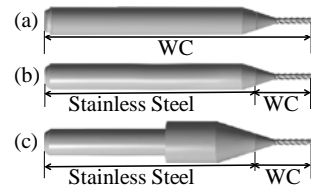
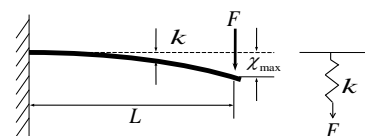


Fig. 2 End-mill modeling (From upper (a) WC solid, (b) Brazing, (c) Modified brazing endmill)

3. 엔드밀의 고유진동수 이론 및 진동 성능 개선 모델의 해석 결과 비교

마이크로 비트는 일정한 회전속도로 회전하는 스핀들에 고정되어 있기 때문에, 가진력에 의한 공진 문제가 중요하다. 외력의 진동수가 비트의 고유진동수에 가까워질수록 증폭 계수가 커져 진동 성능이 나빠질 뿐만 아니라 외력의 진동수가 비트의 고유진동수와 일치할 경우 파손이 일어난다. 그러므로 모델별 비트의 고유진동수를 파악하였다. 이론적 고찰을 수행한 후 해석을 통한 결과와 비교하였다.

마이크로 엔드밀을 Fig. 3과 같이 균일한 밀도를 갖는 보로 근사했을 때, 등가 스프링상수 및 일반적으로 알려진 보의 정적 처짐 곡선식을 이용한 고유진동수는 식 (1)과 같이 나타난다.



k : 보의 등가 스프링 상수, m : 보의 질량, χ_{max} : 보 끝단의 최대 변위량, L : 보의 길이

Fig. 3 Approximation of equivalent spring constant according to the deflection of a beam

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega_n \quad \text{where} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{3EI}{\left(\frac{33mL^3}{140}\right)}} \quad (1)$$

여기서 f 는 진동 주파수(Hz), ω_n 은 고유진동수, E 는 영률, I 는 회전관성모멘트이다. 식 (1)에 의하면 영률과 회전관성모멘트가 클수록 고유진동수는 커진다.

식 (1)에 마이크로 엔드밀의 각 물성들을 대입하면 마이크로 엔드밀의 고유 진동수를 계산할 수 있다. 해석에 사용한 초경 단일소재 마이크로 엔드밀의 탄성계수는 600 GPa, 질량은 3.4 g, 길이 20.75 mm이고, CAD 프로그램에서 구해진 회전 관성 모멘트는 2061.48 gmm^2 이다. 이를 대입하여 계산하면 14938 Hz의 고유진동수를 얻는다. 이 계산 값은 엔드밀을 보로 근사시켜 계산한 것이기 때문에 실제 엔드밀의 고유진동수 값과 약간의 차이가 있다. ANSYS 모달(modal) 해석을 통해 구한 고유진동수는 13160 Hz를 나타냈다. 유한요소해석에 의하면 Fig. 2의 세 모델의 고유진동수는 Table 2와 같은 값을 갖는다. 해석에 사용된 엔드밀 모델은 플루트 직경 650 μm 이며, 경계조건 및 힘 조건은 실제 가공조건대로 Fig. 4와 같이 부여하였다.

Table 2 Natural frequencies of the endmill models

	Solid endmill	Brazing endmill	Modified brazing endmill
Natural Frequency (Hz)	13160	10361	13478

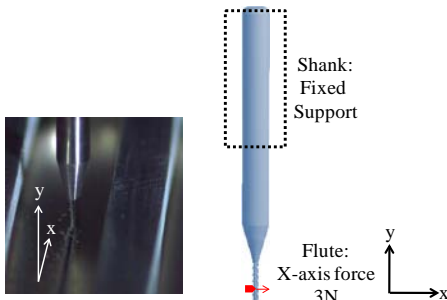


Fig. 4 Initial condition of 650 μm endmill

$$R = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\eta r)^2}} \quad (2)$$

가공주파수 영역에서의 실제 응답을 비교하기 위해 가진응답해석(harmonic analysis)을 실시하였다. 가진응답해석으로 전 주파수 영역에서 진동 증폭 정도를 확인할 수 있다. 이론적 증폭계수의 계산식인 식 (2)에서 R 은 증폭계수, r 은 ω/ω_n 로 고유진동수에 대한 진동수비이며, η 는 감쇠비, R 은 증폭계수를 나타낸다. 증폭계수에 대한 계산식인 식 (2)에 따르면 $r = 1$, 즉 $\omega = \omega_n$ 일 때 증폭이 최대로 일어나며 진동수가 $0 \sim \omega_n$ 사이의 영역에서도 증폭이 일어난다. 즉 고유주파수가 스핀들 장비의 회전주파수인 가공주파수 영역에 가까울수록 증폭 계수가 커지므로, 엔드밀의 고유주파수는 장비의 회전주파수에서 멀수록 진동 특성에 좋다.

세 가지 모델에 대한 가진 응답을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 엔드밀에 사용되는 스핀들의 회전은 1000 Hz이므로 가진 주파수를 0 ~ 1000 Hz로 확대하였을 때 플루트 끝단면의 변형(deformation)은 Fig. 6과 같이 나타난다. 세 가지 엔드밀 모두 고유진동수에 가까워질수록 응답이 증폭되고 있으나 고유진동수가 가장 큰 변형 브레이징 엔드밀의 증폭이 가장 작다. 이것은 형상의 변화에서 오는 회전관성모멘트 증가에 따른 고유진동수 증가로 설명할 수 있다. 고유진동수는 질량에 반비례하나, 스테인리스 스틸의 밀도는 초경의 약 54 %에 불과하기 때문에 무게 증가율보다 회전관성모멘트의 증가율이 더 크다. 따라서 전체적인 고유진동수는 초경 단일소재 엔드밀에 비해 증가한다.

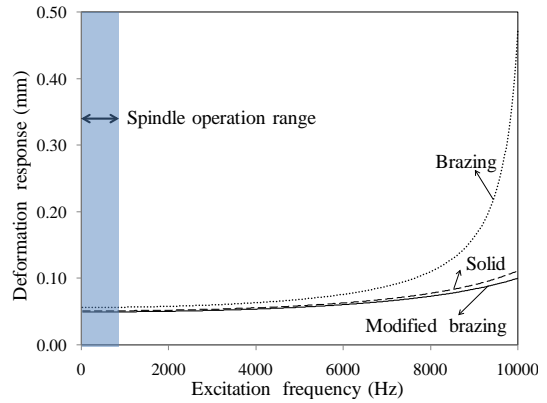


Fig. 5 X-Axis deformation response comparison according to X-axis excitation frequency (0~10000 Hz)

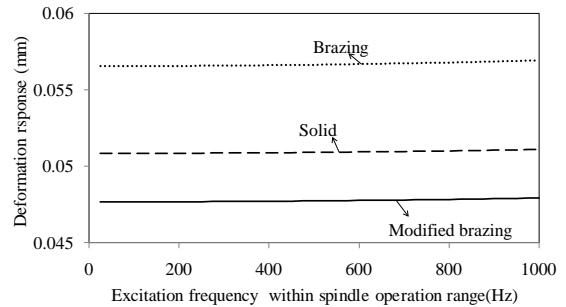


Fig. 6 Deformation response comparison within spindle operation frequency (0~1000 Hz)

Fig. 6은 가공주파수 영역에서의 세 가지 엔드밀의 진동을 비교한 것이다. 진동은 단일소재 엔드밀이 브레이징 엔드밀이 약 11 % 더 적고, 변형 브레이징 엔드밀이 단일초경소재 엔드밀보다 10.3 % 적다.

4. 결론

브레이징 엔드밀의 성능 저하 원인을 찾기 위해 고유진동수를 구하는 한편 가진 주파수에 따른 진동 증폭을 분석하였다. 가공 주파수 부근에서 브레이징 엔드밀이 단일초경소재 엔드밀보다 진동이 약 11 % 더 큰 것을 확인하였고, 수식에 따르면 그 원인은 브레이징용 재료인 스테인리스 스틸의 영률이 초경보다 낮은 것 때문으로 계산된다.

이에 대한 대안으로 형상을 변형하여 회전관성모멘트를 증가시킨 변형 브레이징 엔드밀 모델을 제시하였고, 진동해석 비교를 통해 단일초경소재 엔드밀보다 변형 브레이징 엔드밀의 가진응답이 10.3 % 적음을 확인했다.

후기

본 연구는 Neotis Technical System(네오티스㈜), SMBA(중소기업청, S1060182)와 서울대학교 ERC (Micro Thermal System Research Center)로부터 지원받았다.

참고문헌

- 오환섭, 김시현, 김성재, "이종재 브레이징 계면에서의 균열거동해석," 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 269~274, 2001.
- Saxton, H. J., West, A. J. and Barrett, C.R., "Deformation and Failure of Brazed Joint - Macroscopic Considerations," Metallurgical and Materials Transactions B, 2, 999-1007, 1971.
- West, A. J., et al., "Deformation and Failure of Thin Brazed Joints - Microscopic Considerations," Metallurgical and Materials Transactions B, 2, 1009-1017, 1971.