

초소형 밀링머신 개발

황 준*(충주대학교 기계설계학과), 정의식(한밭대학교 기계설계공학과),
Danel Cox, Steven Y. Liang(School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology)

The Development of Micro Milling Machine

J. Hwang*(Dept. of Mechanical Design, Chungju National University),
E. S. Chung(Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanbat National University),
D. Cox, S. Y. Liang(School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology)

ABSTRACT

Manufacturing capability at the micro or nano scale production field is requested strongly in view of parts and product miniaturization. Miniaturized parts and products will introduce lots of benefits in terms of high precision functionality and low energy consumption. This paper presents the results of micro milling machine tool development for micro machining process. Finite element analysis has been performed to know the relationship between design dimensional variables and structural stiffness in terms of static, dynamic, thermal aspects. Performance evaluation through machining has been tested and discussed for achievable machining characteristics.

Key Words : Micro or Nano Machining(마이크로 / 나노가공), Micro Milling Machine(마이크로 밀링머신), Miniaturization(초소형화), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서론

최근, 기술의 급속한 발전에 따라 전자, 항공우주, 바이오 산업 등을 중심으로 미소 또는 초미소급(micro or nano scale)의 소재 및 부품과 관련된 수요가 증대되고 있다. 이미, 소재분야 및 전자분야를 중심으로 미소급의 MEMS 장치제작을 위한 부품소재기술이 개발되어 적용되기 시작했으며, 한차원 높은 NEMS 장치제작을 위한 기술개발이 21세기의 핵심역량을 키울 수 있는 중점기술로서 인식되기 시작하였다. 한편, 이러한 수요에 대한 대응기술은 주로 2차원 가공과 화학적 또는 물리-화학적 가공 방법에 기인한 식각이 주로 이루어지고 있으며, 또는 레이저가공, 전기-화학적 방법, 제한된 재료에서만 가능한 주사탐침에 의한 가공 등에 의해 주로 이루어지고 있으나, 기술경쟁력의 또 한가지 중요 요소인 생산성 향상과 생산원가 절감 측면에서 그 한계를 나타내고 있는 실정이다¹. 특히, 자유로운 3차원 형상제작에 대한 수요 증대와 친환경적 측면에서 에너지사용을 극소화하기 위한 가공제작기술의

개발이 앞으로 절실히 요구되고 있는 시점이기도 한다. 이러한 시대적 요청을 충족하기 위해서는 기존의 기술개발개념에서 벗어난 기반장치기술 개발이 필요하며, 이러한 기술개발을 통해 초정밀 수준(ultra high precision level)의 미소 또는 초미소 크기(micro / nano scale)를 갖는, 친환경적(environmentally conscious)이며, 다양한 형상과 재료(multi dimensional shapes & materials)에 적용 가능한 소재, 부품, 제품 및 금형 제작이 가능하리라 판단된다.

이러한 요구를 충족할 수 있는 가공기술의 하나로 3차원 형상의 공구에 의한 미소가공(solid tool micro-machining)이 적용가능하며, 3차원의 초정밀 제어와 공구제작이 가능해지면서 그 적용이 증대하고 있다². 그러나, 현재까지는 기존 범용크기의 공작기계에 위치제어 정밀도를 높여 미소가공을 구현하고 있는 바, 가공정밀도, 가공효율 및 에너지 효율 측면에서 보다 많은 개선이 요구되고 있다.

따라서 기술한 바와 같이, 3차원 형상의 미소 또는 초미소 가공을 효율적으로 수행하기 위해서는 초소형 공작기계를 이용한 가공이 이루어져야 할 것

으로 판단된다.

특히, 향후 다양한 시장의 요구를 받아들이고, 생산공정의 위치와 시간에 관계없이 저렴한 비용의 제작서비스(manufacturing service with low cost)가 가능한 초소형 공장(micro factory)의 구현을 위해서는 초소형 공작기계에 의한 3차원 미소가공기술은 필수선행 사항이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 연구배경에 발맞추어 마이크로 밀링머신 개발을 수행하였으며, 소형화에 따른 특성예측과 미소가공 성능평가 등을 통해 적용 가능성을 확인해 보았다.

2. 마이크로 밀링머신 개발

2.1 마이크로 밀링머신 요구사항

마이크로 밀링머신 개발을 위해서는 구조설계를 위해 적용 재료와 형상, 치수를 결정해야 한다. Reshetov 등³에 의해 구조의 치수(dimension)와 정밀도(accuracy)는 제공근에 비례하는 경향을 보이는 것으로 보고 되었으며, 이러한 이론은 공작기계의 치수결정에 있어 치수효과(size effect)가 있음을 의미한다. 즉, 공작기계의 구조치수는 공작기계의 기본 정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 설계인자가 되는 것이다. 먼저, 마이크로 밀링머신의 요구사항을 정립해 보면 다음과 같다. 1)가공품위와 절대적 관계를 가지고 있는 정적, 동적, 열적 측면의 안정된 특성을 보유한 프레임 재질을 사용하여 고강성, 초경량, 고감쇠특성, 저열팽창성 등의 특성을 요구된다. 2)공작물 또는 공구의 정밀 위치제어를 위해 높은 고분해능과 고응답성, 높은 반복정밀도를 갖는 테이블 및 초정밀 스테이지가 필요하다. 3)초정밀 스테이지의 실시간 제어를 위해 개방형 구조를 갖는 제어기가 요구된다. 4)저발열, 초고속, 낮은 런아웃(runout) 값을 갖는 주축베어링 구조와 주축이 필요하다. 5) 고속가공에 따른 공구마멸이 최소화될 수 있으며, 적절한 형상과 강성을 갖는 공구가 요구된다.

정적 및 동적 측면의 강성과 안정성 확보를 위해 정적강성과 감쇠특성, 유효질량 등이 주요한 결정 인자가 된다. 예로서, 공작기계를 2계 선형시스템으로 모델링할 경우(Eqn.1) 다음과 같이 모델링할 수 있다. 이는 곧 공작기계의 치수가 감소할수록 고유진동수는 증가하게 되어 채터에 의한 불안정 요소를 배제한 넓은 절삭조건 범위에서의 가공이 가능함을 의미한다.

$$r_{w=w_{dn}} = \frac{A_{w=w_{dn}}}{F_{w=w_{dn}}} = \frac{\sqrt{m_{eff}}k_{static}}{c} \quad (1)$$

Fig.1 에는 개발될 마이크로 밀링머신의 개념설계안으로서 물질제거율(material removal rate: MRR)과 공작기계 강성에 밀접한 관계가 있는 주요 설계변수(a, b) 변경에 따른 강성(stiffness) 변화를 Fig.3에 나타내었다.

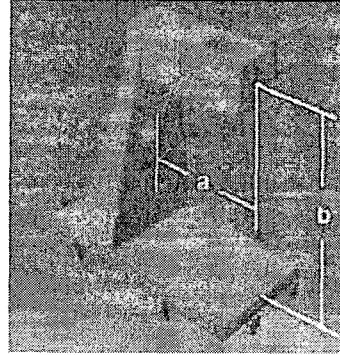


Fig. 1 Conceptual CAD model for micro milling machine development

2.2 공작기계 초소형화에 따른 치수효과분석

공작기계 자중 및 질삭력 변화에 의해 마이크로 머시닝센터 프레임 구조에는 변형이 발생하게 되며, 가공정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 다음과 같은 지배방정식을 설정하여 구조물의 정적강성을 분석하였다.

$$[K]\{u\} = \{F^{ac}\} \quad (2)$$

마이크로 머시닝센터의 동적특성은 안정적인 가공과 밀접한 관련을 갖고 있으며, 특히 외부로부터의 진동(vibration)과 내부진동(chatter)등의 가진요소들이 존재할 때, 이에 대한 응답성이 중요한 요소이다.

따라서 공작기계는 이와 같은 가진력에 대한 충분한 감쇠능력을 보유하여야 한다. 프레임의 과도 응답특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 운동방정식을 정의하였다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \quad (3)$$

미소 또는 초미소급의 초정밀가공에 있어서 열 및 온도변화는 열팽창과 수축을 동반하게 되며, 가공정밀도에 절대적 영향을 미치게 된다. 주변 환경온도 변화, 절삭열에 의한 온도 상승이 주요 원인이 될 수 있다. 따라서 다음과 같은 평형방정식을 설정하고, 온도변화에 따른 열적 강성 해석을 수행하였다.

$$[a]\{\Delta T\} = \{u\} \quad (4)$$

유한요소해석(finite element analysis)(Fig.2)을 통해 개발될 마이크로 밀링머신의 강성변화를 예측하였으며, 이때 선택한 마이크로 밀링머신 프레임 재질은 Invar 이다. Fig.3의 결과로부터, 공작 기계의 소형화(miniaturization)는 공작기계 구조의 정적강성을 개선하고, 저주파수 대역의 변형과 형상 오차를 감소시킬 것이며, 동적강성(dynamic rigidity) 개선에도 기여하여 가공정밀도를 향상시킬 것이다.

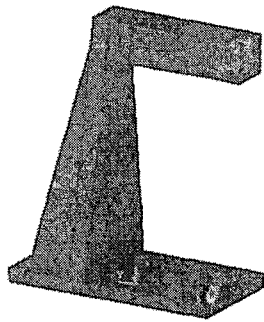


Fig. 2 Finite element modeling for analysis of micro milling machine

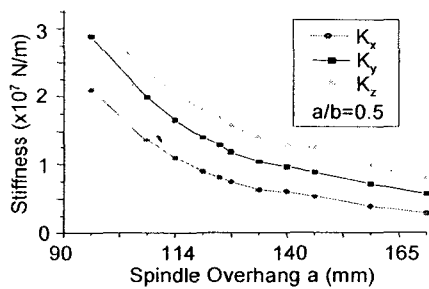


Fig. 3(a) Static stiffness variation of micro milling machine with respect to spindle overhang length

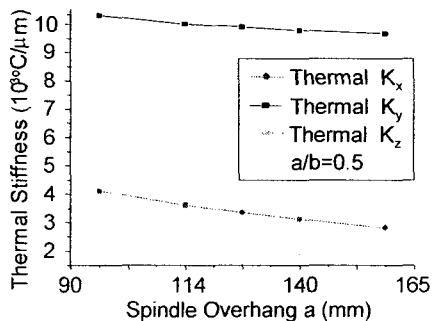


Fig. 3(b) Thermal stiffness variation of micro milling machine with respect to spindle overhang length

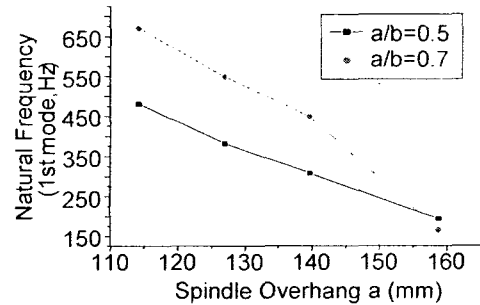


Fig. 3(c) Natural frequency variation of micro milling machine with respect to spindle overhang length

3. 성능평가실험결과

3.1 가공실험에 의한 성능평가 결과

본 연구에서 개발된 마이크로 밀링머신의 성능평가를 위하여 절삭가공실험을 수행하였다. 가공 방법으로는 크게 1차원 직선가공, 2차원 원호가공, 3차원 복합곡면 가공으로 나누어 수행하였으며, 가공 오차를 측정하여, 가공정밀도 및 가공특성을 분석·고찰하였다.

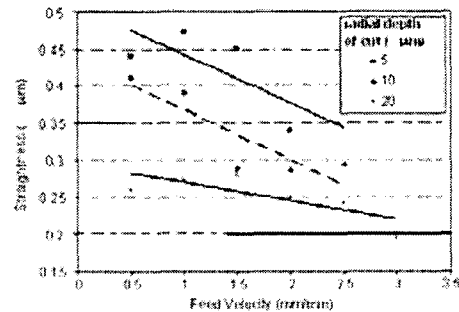


Fig. 4 Variation of straightness error with respect to feed rate and depth of cut for 1-dimensional linear trajectory machining

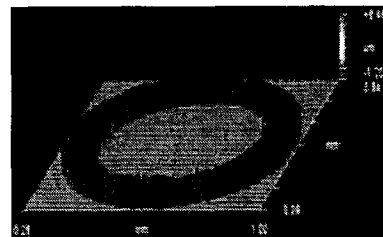


Fig. 5 Circular arc profile for 2-dimensional trajectory machining test

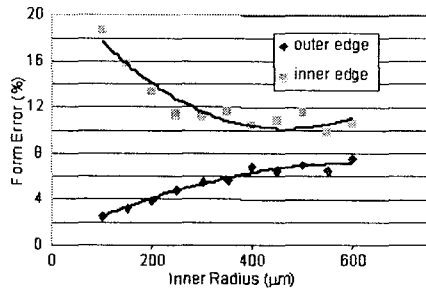


Fig. 6 Variation of percentage form error for 2-dimensional circular arc trajectory machining

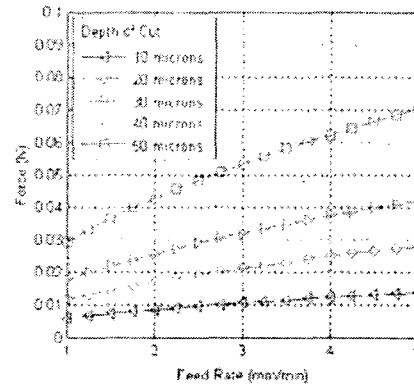


Fig. 8 Cutting force prediction with 100 micron tool on 7075-T6 aluminum alloy with developed micro milling machine

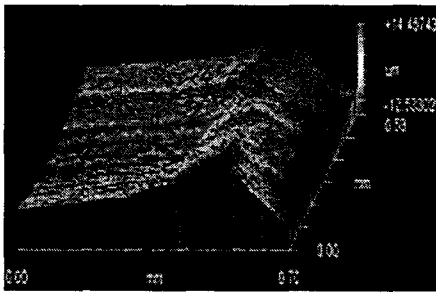


Fig. 7 Machined surface profile for 3-dimensional sculptured surface machining

1차원 직선가공결과(Fig.4)에서 알 수 있는 바와 같이, 직선가공 오차는 이송과 절삭깊이에 반비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다. 고속 이송률과 절삭깊이가 증가하는 가공조건에서 가공오차는 감소하였다.

Fig.5에는 2차원 형상가공특성을 알아보기 위하여 채택한 2개의 동심원 형상을 나타내었다. 가공결과인 Fig.6에 나타난 바와 같이, 외경 가공오차가 내경 가공오차가 작은 값을 나타내고 있다.

Fig.7에는 3차원 복합곡면 가공결과를 나타내었으며, 본 연구에서 개발된 마이크로 밀링머신은 3차원 형상을 성공적으로 가공할 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 미소절삭력 예측

미소가공시 발생하는 절삭저항 변동성분을 예측함으로써 미소가공을 위한 최적임계절삭조건(optimal & critical cutting condition), 공구수명 예측, 절삭열에 의한 열변형 영향 등을 고려한 초정밀 가공이 가능하다. Fig.8에는 미소절삭력 예측결과를 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 초소형 생산시스템 구현에 있어 필수요소인 미소 또는 초미소 가공을 위한 마이크로 밀링머신 개발을 수행하였다. 공작기계의 초소형화를 추진하기 위하여 설계단계에서 구조 강성 특성을 고려하여야 하며, 유한요소해석을 통해 정적, 동적, 열적 측면의 초소형화가 가져올 수 있는 강성변화를 정량적인 예측하였다. 또한, 제작후 성능평가를 위한 가공실험을 통해 가공특성을 파악하였으며, 1, 2차원 직선 및 곡선 형상은 물론, 3차원 복합곡면 가공도 성공적으로 수행되었다. 본 연구결과는 향후 지속적으로 연구되어질 초소형 가공기 개발과 초소형 공장 구현에 활용될 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 충주대학교 학술진흥재단 연구과제에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Corbett, J., et al, "Nanotechnology: International developments and emerging products," keynote paper, Annals of CIRP, 49(2), 2002.
2. Takacs, M., et al, "Material structural aspect to micro-scale chip removal," Material science forum, pp.414-415, 2003.
3. Reshetov, D. N., Protman, V. T., "Accuracy of machine tool," ASME Press, 1988.