

메소 스케일 공작기계의 개발에 관한 연구 Development of Meso-Scale Machine Tools

*,# 이상원¹

*,# S. W. Lee(sangwonl@skku.edu)¹

¹ 성균관대학교 기계공학부

Key words : Meso-scale machine tool (mMT), graph theory, piezoelectric inchworm stage, air turbine spindle, micro-endmill

1. 서론

지난 수년간 마이크로 및 나노급 형상 및 부품에 대한 수요가 바이오 테크놀로지, 반도체를 비롯한 전자분야, 광학분야, 우주산업분야, 방위산업분야 등을 중심으로 급격하게 늘어나고 있다. 이러한 마이크로 및 나노급 형상 및 부품의 생산을 위해 MEMS 등을 중심으로 하는 마이크로 전자 제조 (Micro-electronics fabrication) 기법이 광범위하게 사용되고 있다. 그러나, 마이크로 전자 제조 기법은 3 차원 자유 형상 가공이 용이하지 않고 가공 재료에 제한이 있는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하고자 마이크로 밀링, 마이크로 드릴링 등의 마이크로 기계 가공 기술과 레이저를 사용한 마이크로 레이저 가공, 마이크로 소성 가공, 마이크로 방전 가공 기술 등이 최근에 많은 주목을 받고 있다.

상기한 마이크로 기계가공 기술의 효과적인 구현을 위하여 최근에 초소형 공작기계 시스템의 개념이 제안되었고, 이에 관한 연구가 진행되고 있다 [1, 2]. 메소 스케일 공작기계로 명명된 초소형 공작기계는 공작기계의 크기를 감소 시킴으로써 얻어진 상대적인 정밀도의 향상, 공간과 에너지 사용의 감소, 병렬 배치를 통한 대량 생산 능력 향상 등의 장점을 가지고 있다.

성공적인 메소 스케일 공작기계의 개발을 위하여 주요 구성 부품의 적절한 소형화와 각 부품의 효과적인 통합이 필요하다. 또한, 기존 기계 부품을 혁신적인 기술에 기반을 둔 부품으로 대체하는 것도 필요하다. 예를 들어, 메소 스케일 공작기계에서 사용되는 공구의 지름은 약 100 - 650 μm 이며, 이러한 공구를 사용하여 충분한 절삭속도를 얻기 위하여 70,000 - 300,000 RPM의 스피들 회전속도가 필요하다. 이러한 고속의 회전속도는 기존의 공작기계에서 널리 사용되는 전기 스피들로는 얻기 힘들기 때문에 메소 스케일 공작기계의 개발에 있어서 고압의 공기압력을 이용한 스피들 기술 등의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 마이크로급 정밀 형상 및 부품 가공을 위한 2 종류의 메소 스케일 밀링 공작기계를 설계하고 개발하였다. 개발된 메소 스케일 밀링 공작기계의 경우, 스피들 시스템으로는 고압의 공기압을 사용하는 공기압 터빈 스피들이 사용되었고, 이송시스템으로는 압전소자를 이용한 인치웸 슬라이드와 리드 스크류를 이용한 소형 슬라이드가 사용되었다.

2. 메소 스케일 공작기계 외형의 설계

메소 스케일 공작기계 외형의 체계적인 설계 및 평가를 위해 그래프 이론이 도입되었다 [3]. 그래프 이론에 기반하여 메소 스케일 공작기계의 구조를 4 단계의 계층구조로 나누었고, 각 기계부품 및 연동장치간의 기능적 적합성을 고려하여 기계의 외형 설계를 수행하였다. 메소 스케일 공작기계의 계층구조에서 최하위 수준은 고유의 기구학적 기능을 갖는 기본적인 기계부품으로 구성되어있고, 상위 수준은 이러한 기본적인 기계부품의 적절한 통합 및 조립으로 구성된다. 궁극적으로는 공구-그라운드 링크와 공작물-그라운드 링크가 메소 스케일 공작기계의 구조를 완성하게 된다. Figure 1에 그래프 이론의 기반한 메소 스케일 공작기

계의 계층적 구조가 주어져 있다.

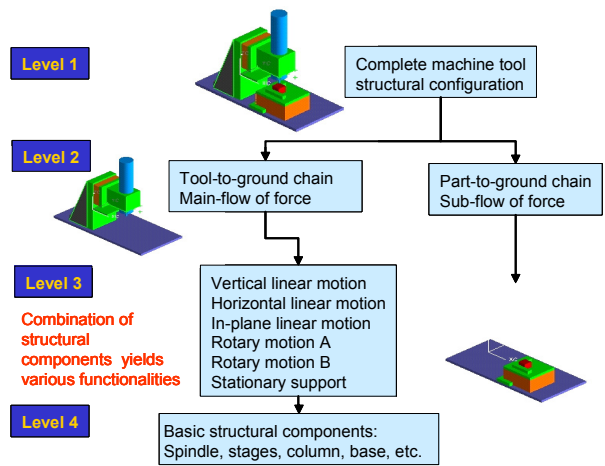


Fig. 1 Meso-scale machine tool hierarchy with graph theory

Figure 1에 주어진 공작기계 구조의 계층적 도식을 이용하여 각 기계부품의 기구학적 기능성을 고려한 통합 및 조립을 통해 메소 스케일 공작기계 외형의 체계적인 설계 및 평가가 가능하다. 이러한 계층구조 방법론을 통해 메소 스케일 공작기계의 요건을 만족하는 6 개의 외형 설계 안을 생성해 내었다. Figure 2는 생성된 6 개의 메소 스케일 공작기계의 외형을 보여주고 있다.

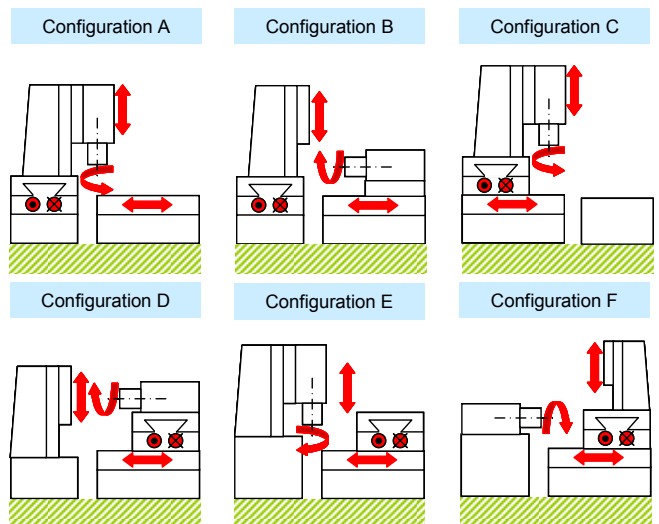


Fig. 2 Generated configurations of meso-scale machine tool (mMT)

Figure 2에 주어진 6 개의 외형 중에서 수 개의 메소 스케일 공작기계의 병렬 배치를 통한 대량생산의 용이를 위한 것으로 Configuration C를 선정하였고, 전문가 설계를 기반으로 기구학적 부품 배치의 균일화 및 이동 질량의 최소화 관점에서 Configuration B가 선정되어 실제적인 메소 스케일 공작기계 개발에 이용되었다.

3. 메소 스케일 공작기계의 제작

Configuration C에 의거한 메소 스케일 밀링 공작기계가 공기압 터빈 스피너들과 압전 인치웍 슬라이드를 이용하여 개발되었다. 개발된 메소 스케일 밀링 공작기계의 사진이 Fig. 3에 주어져 있다.

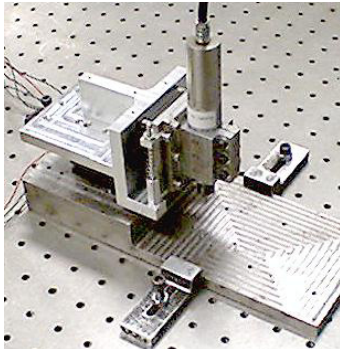
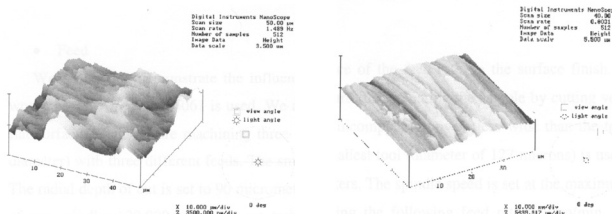


Fig. 3 Photo of the developed mMT 1

Figure 3에 주어진 수직형 메소 스케일 밀링 공작기계의 전체 크기는 150x70x140 mm이며, 이는 일반적인 대형 공작기계의 크기의 약 1/1000에 해당한다. 사용된 스피너들은 공기압 터빈 스피너들로서 NSK Nakanishi사의 AMS-1200이며, 최대 회전속도가 145,000 RPM이고, 스피너들 정밀도는 1 μm이다. 이송시스템은 Micro Pulse Systems사의 압전 인치웍 슬라이드 3개를 이용하여 구현되었으며, 각 슬라이드는 크기 48x48x14 mm, 총 변위 13 mm, 최대속도 50 mm/s, 이동분해능 0.1 μm의 제원을 갖는다. 또한, 수직으로 배치된 압전 인치웍 슬라이드의 평형력 보정을 위해 스프링을 이용한 기구가 추가되었다.

제작된 메소 스케일 밀링 공작기계의 성능을 평가하기 위해 마이크로 엔드밀 공구를 이용하여 알루미늄 6061-T6 소재에 슬롯 가공을 수행하였으며, 표면 거칠기를 조사하였다. 사용된 공구의 지름은 127 μm이고, 스피너들 회전속도는 132,000 RPM, 이송속도는 5 mm/min, 그리고, 축 방향 절삭 깊이는 100 μm이다. 가공된 슬롯의 벽면과 바닥면의 표면 거칠기를 원자현미경을 이용하여 측정하였고, 측정된 결과가 Fig. 4에 주어져 있다. 측정된 벽면과 바닥면의 표면 거칠기는 각각 300 nm와 150 nm이다. 일반적인 초정밀 다이아몬드 가공의 표면 거칠기가 100 nm임을 고려할 때, 메소 스케일 공작기계에서의 마이크로 밀링가공은 그 성능 면에서 일반적 공작기계와 초정밀 공작기계의 사이에 있음을 알 수 있다.



(a) Side surface (b) Bottom surface
Fig. 4 AFM photos of surface roughness of milled slot

Configuration B에 의거한 메소 스케일 밀링 공작기계가 동일한 공기압 터빈 스피너들과 리드 스크류 기반 소형 슬라이드를 이용하여 개발되었다. 개발된 메소 스케일 밀링 공작기계의 사진이 Fig. 5에 주어져 있다. Figure 5에서 알 수 있듯이 mMT 2는 수평형 외형을 가지고 있으며, 전체 크기는 210x114x153 mm이다. mMT 2의 이송시스템은 Siskiyou사의 리드 스크류 기반 소형 슬라이드 3개를 이용하여 구현되었다. 각 슬라이드의 총 변위는 25 mm이고, 최대속도

는 1.7 mm/s, 그리고, 이동분해능은 0.1 μm이다. 또한, 소형 공구동력계가 부착되어 있어서 마이크로 밀링 가공 시 발생하는 절삭력을 측정한다.

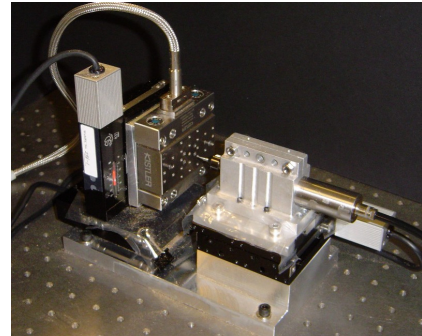
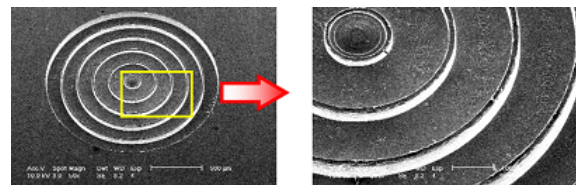
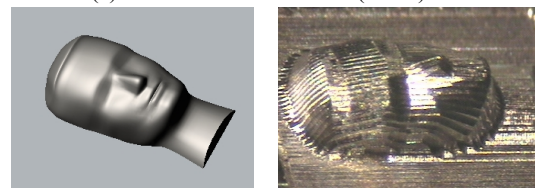


Fig. 5 Photo of the developed mMT 2

mMT2에서 지름이 127 μm인 마이크로 엔드밀 공구를 이용하여 황동소재에 원형 채널가공을 수행하였으며 그 결과가 Fig. 6(a)에 주어져 있다. 또한, 300 μm의 지름을 갖는 마이크로 볼엔드밀 공구를 이용하여 알루미늄 6061-T6 소재에 사람 얼굴 형상 가공을 수행하였으며, 그 결과가 Fig. 6(b)에 주어져 있다.



(a) Micro channel and wall (Brass)



(b) Human face – solid model and machined feature (6061-T6)

Fig. 6 Micro-scale milling results from mMT 2

4. 결론

본 연구는 마이크로급 정밀 형상 및 부품 가공을 위한 새로운 초소형 생산 시스템인 메소 스케일 공작기계의 설계 및 개발에 관한 것이다. 그래프이론에 기반을 둔 공작기계 외형 설계 방법론이 제시되었으며, 이를 바탕으로 2개의 메소 스케일 밀링 공작기계가 개발되었다. 마이크로 엔드밀 공구를 사용한 황동 및 알루미늄 소재의 마이크로 밀링 가공이 수행되었으며, 성능 면에서 마이크로 형상 가공성을 확인하였으며, 정밀도가 일반 공작기계보다 훨씬 향상되었음을 검증하였다.

참고문헌

1. Lee, S. W., Mayor, R., and Ni, J., "Dynamic analysis of a meso-scale machine tool", *ASME J. of Manuf. Sci. & Eng.*, Vol. 128, No. 1, pp.194-203, 2006
2. Lee, S. W., Mayor, R., and Ni, J., "Development of a six-degree-of-freedom geometric error measurement system for a meso-scale machine tool", *ASME J. of Manuf. Sci. & Eng.*, Vol. 127, No. 4, pp.857-865, 2005
3. Shinno, H and Ito, Y., "Computer Aided Concept Design for Structural Configuration of Machine Tools: Variant Design using Directed Graph", *Trans. of ASME*, Vol. 109. pp. 372-376, 1987