

마이크로 채널에서의 표면 거칠기와 유동성에 관한 연구

*홍민성¹, 김종민², 박현기², 박범수², 정현수²

¹ 아주대학교 기계공학부, ² 아주대학교 기계공학과

The Effect of Surface Roughness on the Fluidity in a Micro-machined Channel

*M. S. Hong¹, J. M. Kim², H. K. Park², B. S. Park², H. S. Jung²

¹ Div. of Mech. Eng., Ajou Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Ajou Univ.

Key words : Micro-milling, Micro-pump, Micro-Channel, Surface Roughness

1. 서론

마이크로-기계가공은 기존의 MEMS 공정에서 제작할 수 없었던 금속재료의 세밀한 형상 가공이 가능하며, 높은 가공 정밀도를 구현할 수 있어서 이를 위한 가공 장비 및 가공 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 현재까지 진행되어 있는 마이크로 기계가공의 주요특성은 최소 칩 두께 효과와 가공 재료의 조성에 따른 절삭력의 변화가 있다고 알려져 있다.[1] 또한 마이크로 가공을 통한 유체이동에 관한 많은 연구를 위한 유체의 이동과 제어를 위한 장치들이 고안되고 실험되고 있다.

그 대표적인 예가 마이크로-기어 펌프 등의 일반적 매크로 개념을 마이크로-스케일로 축소한 액체이송장치들이다. 따라서 마이크로 스케일에서는 마이크로-버블 펌프(micro-bubble pump), 일렉트로 웨팅 펌프(electro-wetting pump), 그리고 마이크로-노즐-디퓨저 펌프(micro-nozzle-diffuser pump) 등과 같은 새로운 개념의 액체이송수단이 연구되었으며 그에 수반한 다양한 장치들이 연구되었다.[2-3]

그러나 매크로 스케일에서 최적 설계되어진 모델의 크기 축소로 고안된 것들은 대부분의 특성이 적용되지 않고 문제가 생기기도 한다. 매크로 스케일에서 무시할만한 인자들이 마이크로 스케일에서는 무시할 수 없는 중요한 변수가 되었다. 그 중 하나가 액체의 표면장력(surface tension)이다. 결과적으로 액체표면 위에서, 임의의 단위 길이의 선을 따라 작용하는 분자 간의 인력의 강도인 표면장력의 변화를 이용한 극소량의 액체이송수단이 최근 연구되기 시작하였다.[4-5]

본 논문에서는 기존의 비금속에서 수행되었던 마이크로 채널의 유동을 마이크로 가공을 통한 금속계열의 재료를 가지고 마이크로 채널을 생성하여 여러 금속 가공 조건에서 가공한 마이크로 채널의 가공된 표면 거칠기를 측정하고 이에 따르는 재질과 표면 거칠기와 유동성을 상호 비교 분석해보고자 한다.

2. Capillarity 이론

Fig. 1은 폭 250 μm , 절삭 깊이 20 μm 의 마이크로 채널의 사진이다.

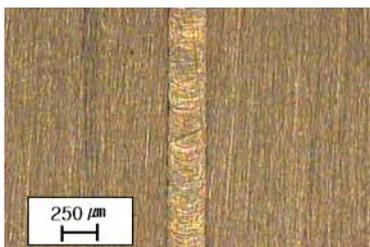


Fig. 1 Optical image of micro-channel

모세관력에 의해서 유체가 미세채널을 채울 때의 filling rate는 식(1)과 같이, 표면장력(surface tension) γ 와 유체점도(viscosity) η , 모세관의 수력학적 반경 R_H (모세관의 체적 대 표면적의 비), 유체에 의해 채워지는 모세관의 길이 z 에 의해서 결정된다.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{R_H \gamma_{LV} \cos \theta}{4\eta z} = \frac{R_H (\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{4\eta z} \quad (1)$$

여기서, θ 는 유체의 표면과의 접촉각(contact angle), γ_{LV} , γ_{SV} , γ_{SL} 은 각각 liquid-vapor, solid-vapor, solid-liquid 간의 interfacial free energy를 나타낸다. 따라서 모세관의 filling rate는 유체를 포함하는 모세관 길이 및 유체점도에 반비례하고 단면적의 크기에 비례함을 알 수 있다. 또한, filling rate는 모세관이 채워지거나 유체점도가 높아짐에 따라 감소하게 된다. Fig. 1에 제시된 채널에 대해 계산해보면 최소 약 8.3 mm/s의 filling rate를 얻을 수 있는데, 유동은 매우 빠르게 모세관내에서 움직임을 예측할 수 있으며, 실험을 통해서도 확인할 수 있었다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 마이크로 머신 시스템

Fig. 2는 실험에 사용된 마이크로 머신은 미세 구조물을 가공하기 위해 제작된 가공머신으로 주축은 에어베어링 스프링들에 의해서 마이크로 드릴링과 마이크로 밀링이 가능한 시스템이다.

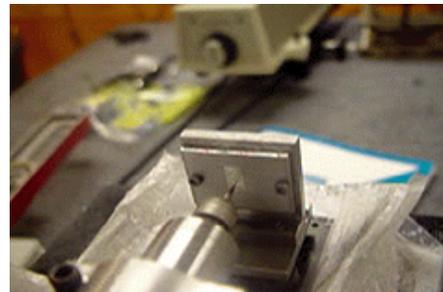


Fig. 2 Photograph of Micro-machine

3.2 마이크로 엔드밀과 공작물 가공조건

마이크로-채널을 생성하기위한 마이크로 엔드밀은 플랫폼 타입(Flat type)으로 그 사양을 Table 1에 나타내었다. 시편은 일반적으로 가장 많이 사용되는 비철금속으로 AL5052, AL6061, 황동(BC)과 인청동(BeS)을 사용하였다. 소형 펌프나 마이크로-냉각기에 사용가능한 재료의 비철금속을 택했다.

Table 1 Endmill Specifications

End-mill Type	Flat End-mill
Mill Diameter (μm)	250
Mill Dia. Tolerance (μm)	± 0.25
Number of Flutes	2

3.3 마이크로-채널의 액체 이동 속도 측정 장비

마이크로-채널에서의 액체의 유동을 측정하기 위해서 고속 디지털 카메라를 이용하여 측정하였다. 본 실험에서는 초당 1000 375장으로 설정하여 유체의 이동을 측정하였다. 일반적으로 마이크

로-냉각기에 냉매로 사용되는 에탄올을 유동 실험에 사용하였고, 선택된 채널에 촬영을 쉽게 하기 위해서 액체에 푸른색 염료를 입혀서 측정하였다. Fig. 3은 유동 실험에 사용된 장비이다.

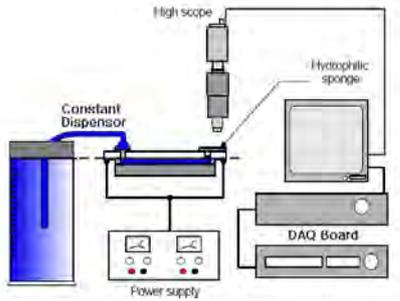


Fig. 3 Fluid experimental equipment

4. 마이크로 엔드밀을 통한 채널 가공

Table 2은 각각의 시편에 각기 다른 절삭조건을 주어서 가공한 마이크로 채널의 가공조건을 나타내었다. 특히 비철금속을 포함하는 마이크로 채널에 관해서 많은 실험을 하고 있으나 표면 형상과 거칠기에 따르는 최적의 가공 조건이 알려져 있지 않은 상황이다.

Table 2 Cutting Conditions

Feedrate (mm/min)	Depth of cut(μm)
100	15
150	20
200	25

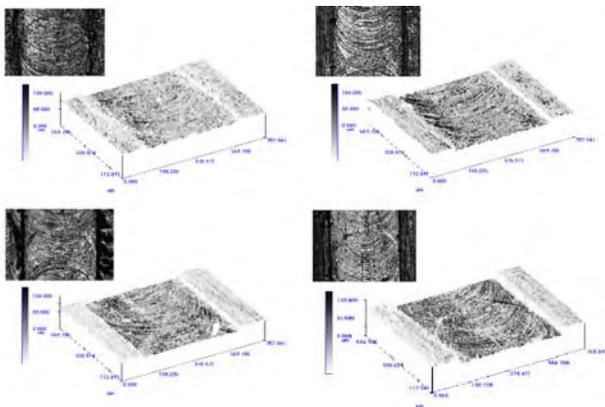


Fig. 4 Optical image of surface profile

- (a) AL5052 (b) AL6061
- (c) BC (d) BeS

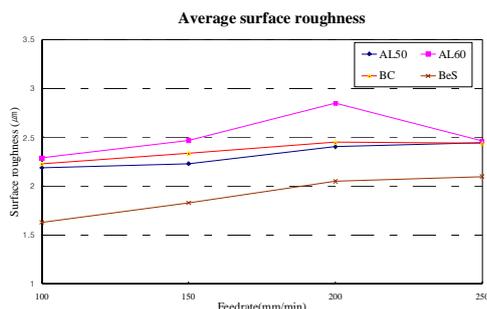


Fig. 5 Surface roughness of specimens

Table 2을 기초로 가공한 후 각각의 시편의 프로파일을 3차원 측정기를 통하여 분석한 후 통계를 내어 본 결과 100,000 rpm에서 feedrate 200 mm/min, Depth of Cut 20 μm 에서 마이크로 채널의 burr가 가장 적고 표면의 Scalop Height가 일정하게 나옴을 실험을 통해서 알 수 있었다.

5. 가공 결과와 유동 실험

정량 도포기를 이용하여 일정량의 에탄올을 흘리고 난 후, 채널을 통해서 액체가 이동한 거리를 계산하여 채널에서의 액체 이동 특성을 분석하였다.

AL50과 60의 경우 표면 거칠기가 유체의 이동 속도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 동 합금의 경우에서도 두 동합금을 비교 할 경우 표면 거칠기가 유체의 이동 속도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 표면 거칠기의 데이터만으로는 마이크로 채널이동에서는 각각의 물성치에 따라서 속도가 달라진다는 것을 Fig.5와 Table 3을 통해서 알 수 있다.

Table 3 Fluid Velocity (Ethanol)

Material	Velocity (m/s)
AL 5052	9.9
Al 6061	7.4
BC	15.5
BeS	14.6

6. 결론

마이크로-채널에서의 유동 현상에 대한 이론적 고찰과 기계적 가공을 통한 마이크로채널의 유동을 확인하였으며, 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 일반적으로 Al과 동 합금에서의 표면 거칠기와 유체의 이동 속도가 정비례 관계를 유지함을 알 수 있다.
2. 표면 거칠기와 재료의 물성치에 따른 마이크로-채널의 유동 속도식이 있음을 예측 할 수 있다.
3. 유체의 유동은 재료의 표면 거칠기뿐만 아니라 가공 후 Burr의 형상, 물체의 마찰력이 마이크로 채널에 큰 영향을 끼치는 것으로 알 수 있다.
4. 재료의 가공성과 물체의 물성치와 액체의 유동의 상관관계를 구할 수 있을 것으로 예측된다.

참고문헌

1. S. K. Min, S. W. Lee, D. J. Lee, E. S. Lee, T. J. Jea, "A Study on the Machining Characteristics for Micro Barrier Ribs by using Micro End milling", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 14~20, 2002.
2. T. K. Jun and C. J. Kim, "Valveless Pumping Using Traversing Vapor Bubbles in Microchannels", *J. Applied Phys.*, Vol. 83, pp. 5658-5664, 1998.
3. J. Lee and C. J. Kim, "Surface Tension Driven Microactuationbased on Continuous Electrowetting (CEW)", *J. Micro-electromechanical Systems*, Vol. 198, pp. 171-180, 2000.
4. J. Tsai and L. Lin, "A Thermal-Bubble Actuated Micronozzle-diffuser Pump", *J. Microelectromechanical System*, Vol. 11, No. 6 pp. 665-671, 2002.
5. K. Yang, I. Chen, B. Shew, and C. Wang, "Investigation of the Flow Characteristics within a Micronozzle/diffuser", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 26-31, 2004.