

# 표면 거칠기에 따른 마이크로 채널의 유속에 관한 연구

박현기<sup>+</sup>, 김종민<sup>+</sup>, 홍민성<sup>\*</sup>

(논문접수일 2007. 8. 13, 심사완료일 2007. 11. 5)

## A Study on the Flow Velocity of Micro Channels Depending on Surface Roughness

Hyunki Park<sup>+</sup>, Jongmin Kim<sup>+</sup>, Minsung Hong<sup>\*</sup>

### Abstract

Micro machining can manufacture complex shapes with high accuracy. Especially, this enables wide application of micro technology in various fields. For example, micro channels allow fluid transfer, which is a widely used technology. Therefore, liquidity research of flow in micro channels and micro channel manufacturing with use of various materials and cutting conditions has very important meaning. In this study, to find out correlation between fluid velocity in micro channels and surface roughness, we manufactured micro channels using micro end-mill and dropped ethanol into micro channels. We compared several surface roughness and fluid velocity in micro channels that were created by various processing conditions. Finally, we found out relationship between fluid velocity and surface roughness in micro channels of different materials.

**Key Words** : Micro channel, Flow velocity, Minimum chip thickness, Capillary theory, Surface roughness, Machining conditions

## 1. 서론

마이크로(Micro) 크기와 관련된 기술은 MEMS를 기반으로 하여 발전해 왔으며 지금까지도 많은 마이크로 장치들이 MEMS 기술을 이용하고 있다. 하지만 고가의 초기 장비와 가공재료에서의 한계를 지니고 있어서 이를 대체할 기술이 필요한 실정이다. 마이크로 기계 가공은 MEMS 공정에서 제작이 불가능한 세밀한 형상 가공이 가능하며 높은 가공

정밀도를 기대할 수 있다. 그러나 마이크로 기계가공에도 여러 가지 문제점이 존재하고 있다.

일반적으로 사용되는 범용 기계에 의한 가공, 제작, 조립을 마이크로 크기의 제품에 적용하였을 때는 문제가 발생하게 되는데 이는 매크로(Macro) 크기의 기계에서는 무시할 수 있는 요소들이 마이크로 크기에서는 상당히 중요한 특성이 되기 때문이다. 마이크로 가공의 특성으로는 최소 칩 두께 효과, 경작력, 시편의 탄성 회복 등이 있으며 이러한 현상이

<sup>+</sup> 아주대학교 기계공학과

<sup>\*</sup> 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (mshong@ajou.ac.kr)

주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지

발생하는 원인은 일반 가공에서는 무시하고 있는 공구의 날의 반지름이 마이크로 절삭에서는 매우 중요한 역할을 하기 때문이다. 이러한 특성과 문제점에 관한 연구는 현재까지도 진행 중에 있으며 여러 이론이 제기되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

마이크로 가공을 통한 부품의 개발이나 다른 연구 분야에서의 활용이 진행되고 있으며 특히 마이크로 채널을 통한 유체의 이동은 적용할 수 있는 분야가 다양하기 때문에 연구 대상으로서의 가치가 높다. 그러므로 다양한 재료와 절삭 조건을 이용한 마이크로 채널의 제작과 채널 내부를 흐르는 유체의 유동성 연구는 매우 중요한 의미를 가진다<sup>(3)</sup>.

마이크로 채널을 응용할 수 있는 분야는 상당히 다양해서 마이크로 펌프(Pump), 마이크로 디퓨저(Diffuser)와 같은 가장 기초적인 장치 개발뿐만 아니라 유동 장치를 통한 분석 시스템, 작업 처리량 검사 시스템, 마이크로 냉각기, 여러 유체의 흐름을 통한 나노 리터 파편 형성 등이 개발되고 있으며 의학이나 분자 생물학, 미생물학 등에 적용되고 있다. 이외에도 활용할 수 있는 분야가 많기 때문에 마이크로 채널의 연구는 중요한 의미를 갖는다<sup>(4-7)</sup>.

본 연구에서는 다양한 마이크로 채널을 생성하고 여기에 유체를 흘려 속도를 계산하였다. 이 실험을 통하여 얻어진 자료를 기반으로 하여 가장 효과적인 마이크로 채널을 만드는 절삭 조건을 확인하였다.

## 2. 이론

### 2.1 최소 칩 두께 (Minimum Chip Thickness) 효과

마이크로 가공에서 재질과 거칠기의 관계를 설명할 수 있는 이론으로는 최소 칩 두께 효과가 있다. 이 이론에 따르면 Fig. 1에 보여진 것과 같이 마이크로 절삭 가공 중에 경작력(Plowing Force)과 시편의 탄성 회복에 의해서 톱니 모양의 표면이 생성되고 이러한 현상은 재질이 연할수록 자주 나타나게 된다. 결국 최소 칩 두께 효과로 인하여 경도가 낮은 AL5052의 거칠기 값이 보다 높게 나타났다고 할 수 있다.

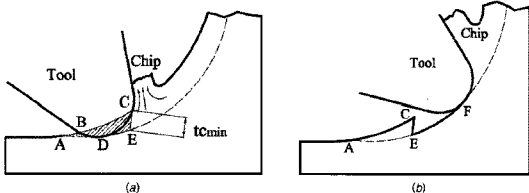


Fig. 1 Surface shape on minimum chip thickness effect

Fig. 2는 최소 칩 두께의 영향을 고려한 톱니 모양의 단면이 형성되는 방법을 표현하고 있다. 실험을 통하여 보다 부드러운 재질 상태가 표면 거칠기를 증가시키는 것이 밝혀졌다. 마이크로 절삭 과정에서 표면 거칠기가 증가하면 경작력 또한 증가하게 되고 이것은 최소 칩 두께에 의해서 결정적으로 영향을 받는다. 그러므로 최소 칩 두께는 재료의 물성에 크게 의존한다는 사실을 알 수 있다<sup>(8)</sup>.

### 2.2 모세관(Capilarity) 이론

모세관 이론은 미세 채널에서의 유속과 관련된 식으로써 모세관력에 의해서 유체가 미세채널을 채울 때의 Filling Rate는 식 (1)과 같으며, 표면장력(Surface Tension)  $\gamma$ 와 유체점도(Viscosity)  $\eta$ , 모세관의 수력학적 반경  $R_H$ (모세관의 체적 대 표면적의 비), 유체에 의해 채워지는 모세관의 길이  $z$ 에 의해서 결정된다<sup>(9)</sup>.

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

여기서,  $\theta$ 는 유체의 표면과의 접촉각(Contact Angle),  $\gamma_{LV}$ ,  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{SL}$ 은 각각 Liquid-Vapor, Solid-Vapor, Solid-Liquid 간의 Interfacial Free Energy를 나타낸다. 따라서 모세관의 Filling Rate는 유체를 포함하는 모세관 길이 및 유체점성에 반비례하고 단면적의 크기에 비례함을 알 수 있다. 또한 Filling Rate는 모세관이 채워지거나 유체점도가 높아짐에 따라 감소하게 된다. 따라서 유체의 물성치와 가공 표면에 따른 접촉각이 관련 변수가 된다.

## 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 3.1 실험 장비

Fig. 3에는 마이크로 채널을 가공한 시편의 사진이 나와 있다. 시편 재료는 Aluminum계열인 AL6061과 AL5052, 황동

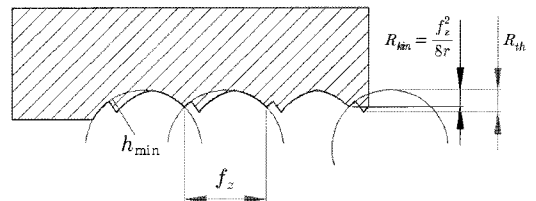


Fig. 2 Theoretical surface profile considering the minimum chip thickness effect

(Bs), 인청동(Pb-phosphor bronze)을 사용하였다. 공구는 Flat Endmill로 2개의 날을 가지고 있으며, 지름은  $250\mu\text{m}$  이다.

Fig. 4의 OLS3000 MEMS Optical Scanner를 사용하여 Fig. 5와 같은 이미지를 얻었으며, 표면 거칠기 값을 구할 수 있었다.

채널을 흐르는 유체의 속도를 측정하기 위해서 Fig. 6의 고속 디지털 카메라(Photron사의 Fastcam Apxrs)를 사용하

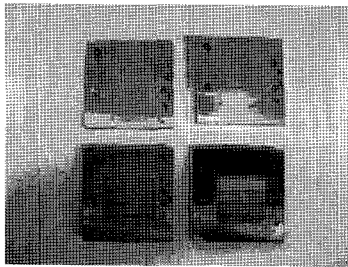


Fig. 3 Photograph of specimen

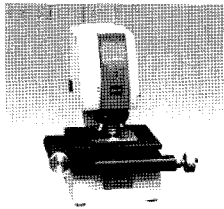


Fig. 4 Surface roughness testing machine

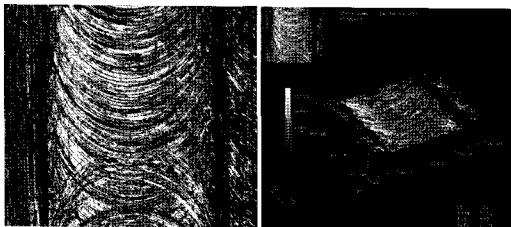


Fig. 5 Images of micro channel by OLS scanner

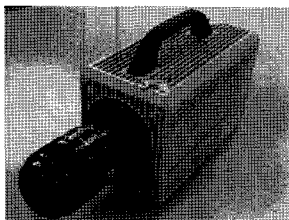


Fig. 6 High speed digital camera

였다. 이 카메라는 최대 초당 250,000장까지 촬영이 가능하며, 실험에서는 초당 500장을 촬영하여 속도 측정에 활용하였다. 그리고 Fig. 7에는 고속 카메라로 촬영한 채널 내부의 유체 흐름을 타나내고 있다.

### 3.2 마이크로 채널에서의 유속 측정

채널 내부의 유체 흐름 속도는 초고속 디지털 카메라로 유속의 흐름을 측정된 후에 사진의 수와 흘러간 길이를 비교하여서 측정하였다. 이를 위해서 초당 500장의 촬영을 하였으며 시간(초)을 사진의 수/500으로 계산하였다. Fig. 8~11은 각각 다른 재질을 갖는 시편의 채널에서의 유체의 흐름을

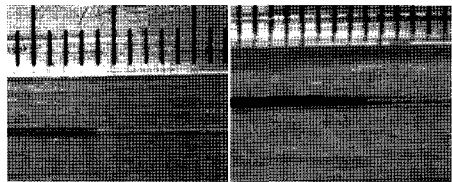


Fig. 7 Captured fluid in micro-channel

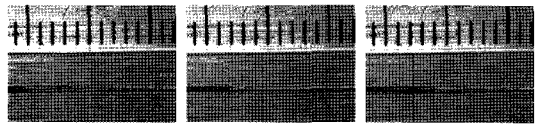


Fig. 8 Flow in micro channel of AL 5052



Fig. 9 Flow in micro channel of AL 6061



Fig. 10 Flow in micro channel of Bs



Fig. 11 Flow in micro channel of PB

보여준다. 시각적인 확인을 위해서 파란색 잉크로 염색을 한 에탄올을 유체로 사용되었다.

이를 토대로 계산한 채널의 속도가 다음의 Table 1에 나타나 있다.

### 3.3 최적 채널 생성 조건

다양한 절삭 조건을 통해 생성된 채널의 거칠기 값을 측정하였으며, 이 채널에서의 유속을 여러 장비를 통하여 계산해 내었다. 채널의 거칠기와 유속을 비교하고 다시 가공 조건과 비교하여서 가장 적절한 채널의 생성 조건에 대해서 알아보았다.

제조업의 관점으로 보았을 경우 가장 이상적인 채널 생성의 조건은 높은 이송 속도로의 가공을 통한 좋은 생산성과 가공된 채널에서의 좋은 유속을 가지는 것이다. 따라서 표면 거칠기 값이 다양한 채널이 존재할 때, 채널 내부의 유속의 차이가 크기 없다면 생산성의 증가를 위하여 이송 속도가 빠른 절삭 조건을 채택하는 것이 필요하다. 그리고 공구 마모를 고려했을 때, 비슷한 유속에서는 공구의 회전 속도가 느린 절삭 조건을 선택하는 것이 좋다.

우선 각 재질의 채널 내부의 거칠기를 그래프로 표현하여

비교하였다. Fig. 12~15에는 채널의 표면 거칠기가 각 재질 별로 표시되어 있다. 이 그래프에 따르면 이송 속도에 따른 거칠기 값의 변화가 선형적으로 나타나지 않고 있다. 대체적으로 어느 정도의 증가를 보이다가 다시 떨어지고 있다. 하지만 재질의 경도와 관련된 표면 거칠기 값은 비교적 뚜렷하게 차이를 보이고 있다.

Fig. 16과 같이 가장 경도가 낮은 AL5052의 경우에는 주어진 절삭 조건 전반에서 높은 거칠기 값을 보여주고 있으며 경도가 높은 재질로 갈수록 대체적으로 거칠기 값이 감소하

Table 1 Velocity of fluid in micro channel

Material-Channel	Velocity (mm/s)	Length (mm)	Time (s) [No. Photos/500]
AL50_1-ch02	11.2676	8	355/500
AL50_1-ch03	6.0827	5	411/500
AL50_2-ch02	8.8028	5	284/500
AL50_2-ch03	9.0439	7	387/500
Al60_1-ch02	6.3025	6	476/500
Al60_1-ch03	3.5211	5	710/500
AL60_2-ch02	10.8108	4	185/500
AL60_2-ch03	9.3284	10	536/500
Bs_1-ch02	12.0879	11	455/500
Bs_1-ch03	20.0803	10	249/500
Bs_2-ch02	15.3061	12	392/500
Bs_2-ch03	14.7929	5	169/500
PB_1-ch02	19.8238	9	227/500
PB_1-ch03	15.8501	11	347/500
PB_2-ch02	18.9873	9	237/500
PB_2-ch03	16.6307	8	241/500

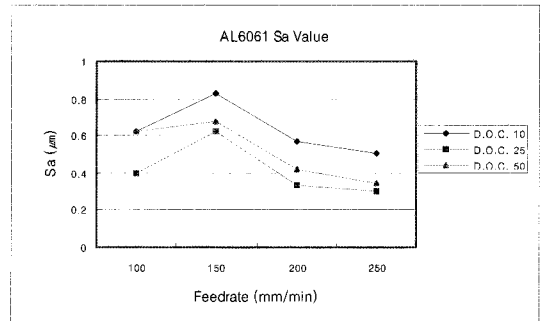


Fig. 12 Surface roughness of AL6061

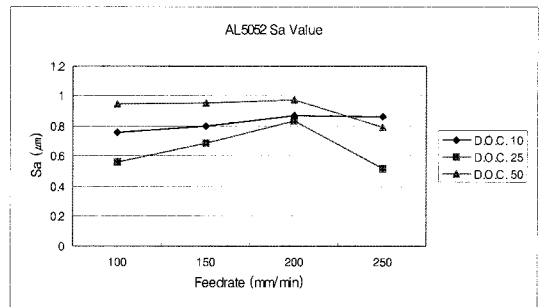


Fig. 13 Surface roughness of AL5052

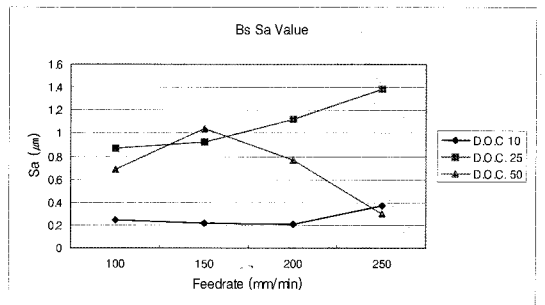


Fig. 14 Surface roughness of Bs

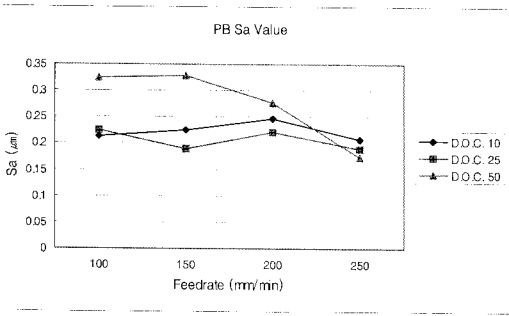


Fig. 15 Surface roughness of PB

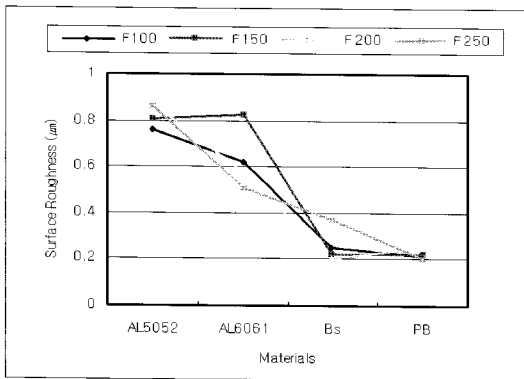


Fig. 16 Surface roughness depending on materials(depth of cut = 10 $\mu$ m)

는 것을 확인할 수가 있었다. 다만 황동의 경우, 절삭 깊이가 25 $\mu$ m로 넘어가는 부분에서 갑작스런 표면 거칠기의 증가가 발생한다. 이 부분에서만 표면 거칠기 값이 1 $\mu$ m를 넘어가게 되는데, 단순히 주어진 절삭 조건에 따른 값이 아니라 공구의 마모나 파손, 공작 기계의 진동 등 다른 요소가 개입되었으리라 여겨진다.

Table 2와 같이 표면 거칠기 값과 유속을 비교해보면, 대체적으로 표면 거칠기가 감소함에 따라서 유속이 증가함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 17에는 표면 거칠기 값과 유속의 관계를 그래프로 표현하였다.

실험에서 사용한 조건의 범위에서는 이송 속도에 따른 표면 거칠기의 값이 초반에 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면에 경도가 다른 재질에 따라서는 같은 조건에서도 표면 거칠기 값이 큰 차이를 보였다. AL5052와 상대적으로 경도가 높은 인칭동과의 표면 거칠기의 차이는 확연히 나타난다. 결과적으로 주어진 조건 내에서 최적의 채널 생성 조건은 이송 속도로 최고 이송 속도인 250(mm/min)

Table 2 Velocity of fluid in micro channel & Surface roughness

Material-Channel	Velocity (mm/s)	Surface Roughness ( $\mu$ m)
AL50_1-ch02	11.2627	0.758
AL50_1-ch03	6.0827	0.801
AL50_2-ch02	8.8028	0.868
AL50_2-ch03	9.0439	0.865
Al60_1-ch02	6.3025	0.625
Al60_1-ch03	3.5211	0.825
AL60_2-ch02	10.8108	0.571
AL60_2-ch03	9.3284	0.508
Bs_1-ch02	12.0879	0.248
Bs_1-ch03	20.0803	0.221
Bs_2-ch02	15.3061	0.204
Bs_2-ch03	14.7929	0.375
PB_1-ch02	19.8238	0.213
PB_1-ch03	15.8501	0.224
PB_2-ch02	18.9873	0.247
PB_2-ch03	16.6307	0.207

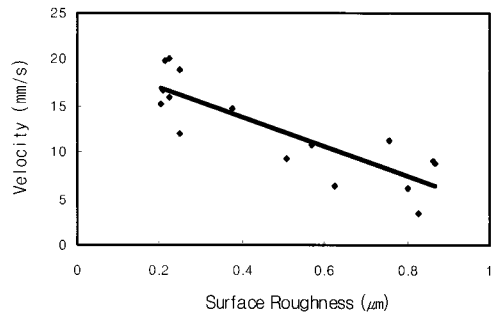


Fig. 17 Flow velocity depending on surface roughness

을 선택하고 재료로는 경도가 높은 인칭동 같은 재질을 사용하여 마이크로 채널을 제작하는 것이다.

#### 4. 결론

본 논문을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실험에서 사용한 마이크로 채널의 경우에는 유체를 강제로 주입시키는 것이 아니라 모세관 현상에 의하여 유체가 채널의 내부로 흘러들어 간다. 이것이 모세관 효과에 의한 것인지를 파악하기 위하여 모세관이론을 사용하였다.
- (2) 절삭 조건과 표면 거칠기 값을 비교하였으며 실험에 사용한 절삭 조건에서는 이송 속도의 경우 초반에는 표면 거칠기가 약간 증가하지만 결과적으로는 이송 속도가 증가함에 따라서 거칠기의 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 실험에 사용한 시편의 재질에 대한 표면 거칠기의 차이는 뚜렷하게 나타났다. 실험을 통해서 경도가 높아짐에 따라 거칠기 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 재질의 경도에 따른 표면 거칠기 값의 변화는 최소 칩 두께 효과에 의해서 설명이 가능하며 이 이론은 경작력과 시편의 탄성 회복을 포함하고 있다. 최소 칩 두께 효과에 의해서 연한 재료에서는 톱니 형상의 표면이 생성되게 되며 이러한 현상은 재료가 연할수록 자주 나타나게 되므로 경도가 낮은 재료에서 거칠기 값이 증가하게 된다.
- (5) 실험의 결과에 따르면 같은 재질일 경우에는 이송 속도를 증가시키고, 이송 속도가 일정하다면 시편을 경도가 높은 재료로 선정하여서 마이크로 채널을 생성하였을 때 보다 좋은 표면 거칠기와 채널 내에서의 빠른 유속을 얻을 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- (1) Inagaki, Y., Tsuyuki, M., and Yamamoto, T., 1984, "The Investigation of the Tube with One Way Valve and the Micro-pump for the Wearable Catheter, and the Possibility of Patients' Daily Activity," *Japanese Journal of Artificial Organs*, Vol. 13, pp. 751~755.
- (2) Gerlac, T., 1997, "Aspects of Stationary and Dynamic Micro Diffuser Flow," *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Vol. 2, pp. 1035

~1038.

- (3) Tsai, J. H. and Lin L., 2001, "A Thermal Bubble Actuated Micro Nozzle-diffuser Pump," *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 409~412.
- (4) Wunderle, B., Schacht, R., Wittler, O., Michel, B., and Reichl, H., 2004, "Performance and Thermo-mechanical Reliability of Micro-channel Coolers - A Parametric Study," *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems Proceedings of the Intersociety Conference*, Vol. 2, pp. 11~16.
- (5) Köhler, J. M., and Kirner, T., 2004, "Nano liter Segment Formation in Micro Fluid Devices for Chemical and Biological Micro Serial Flow Processes in Dependence on Flow Rate and Viscosity," *Department of Physical Chemistry/Micro reaction technology*, Vol. 2, pp. 19~27.
- (6) Petersen, K., 1996, "Biomedical Applications of MEMS," *International Electron Devices Meeting: IEEE*, pp. 239~242.
- (7) Hong, M. S., Kim, J. M., and Jung, H. S., 2006, "The Effect of Surface Roughness on the Fluidity in a Micro- Machined Channel," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2006*, pp. 379~384.
- (8) Liu, X., DeVor, R. E. and Kapoor, S. G., 2006, "An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining," *Proceedings of the International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 474~481.
- (9) Radwan, A. E., 1999, "Capillary instability of a streaming cylindrical liquid jet submerged in a streaming fluid under the influence of magnetic fields," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 86, pp. 184~196.