

기계식 마이크로 머시닝을 이용한 마이크로 형상의 특성과 비용 평가

강혁진*, 최운용*, 안성훈[#]

Fabrication and Characterization of Micro parts by Mechanical Micro Machining: Precision and Cost Estimation

Hyuk-Jin Kang*, Woon-Yong Choi* and Sung-Hoon Ahn[#]

ABSTRACT

Recently, demands on mechanical micro machining technology have been increased in manufacturing of micro-scale precision shapes and parts. The main purpose of this research is to verify the accuracy and cost efficiency of the mechanical micro machining. In order to measure the precision and feasibility of mechanical micro machining, various micro features were machined. Aluminum molds were machined by a 3-axis micro stage in order to fabricate microchips with 200 μm wide channel for capillary electrophoresis, then the same geometry of microchip was made by injection molding. To evaluate the cost efficiency of various micro manufacturing processes, cost estimation for mechanical micro machining was conducted, and actual costs of microchips fabricated by mechanical micro machining, injection molding, and MEMS (Micro electro mechanical system) were compared.

Key Words: Mechanical micro machining (기계식 마이크로 머시닝), Microchip (마이크로 칩), Cost estimation (비용 평가), Injection molding (사출성형)

1. 서론

최근의 초소형 기계부품 시장은 빠른 속도로 성장하고 있으며 우주공학, 전자공학, 의학 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 이런 초소형 부품을 만드는 기술로는 반도체 제조 기술에 기반을 둔 MEMS (Micro electro mechanical system) 공정, 레

이저 가공 공정, μ -EDM 공정 (micro-electrical discharge machining), RIE 공정 (deep reactive ion etching) 그리고 LIGA 공정 (X-ray lithography galvanoformung abformung) 등이 있다.¹⁻⁵ 이러한 공정들은 3 차원 형상을 제작하기 위해서 고가의 장비와 복잡한 공정이 필요하거나 사용 가능한 재료가 한정되는 등의 단점이 있다.¹⁻³

* 접수일: 2006년 8월 21일; 개재승인일: 2006년 11월 7일

* 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ahnhsh@snu.ac.kr Tel. (02) 880-7110

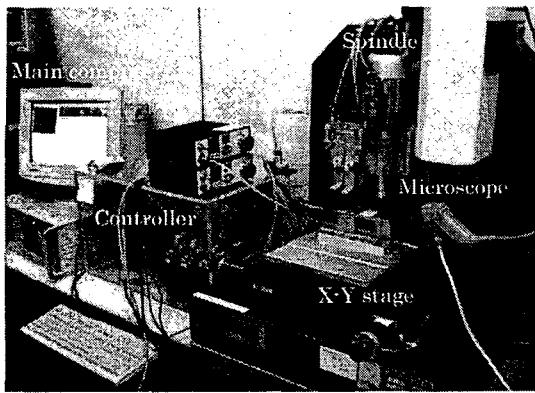


Fig. 1 3-axis stage for micro machining

이러한 제약을 극복하기 위한 방법으로, 미세공구를 이용한 기계식 절삭가공이 새로운 마이크로 머시닝 기술로 연구되고 있다. 기계식 마이크로 머시닝은 초소형 장치나 부품을 만드는 제조 방법 중의 하나로 수십 μm 에서 수 mm 까지 제조할 수 있고 다양한 재료도 가공이 가능한 특징을 가지고 있다.³ 비록 기계식 마이크로 머시닝은 MEMS 공정에 비하여 작은 크기의 제조에는 어려움이 따르지만 다양한 재료로 복잡한 구조물의 형상까지 제조할 수 있고, 전통적인 매크로 (macro) 스케일의 절삭가공과 동일한 제조공정을 적용할 수 있어 기반 기술이 많이 축적된 상태이다. 또한, 기계식 마이크로 머시닝에서 사용하는 초소형 공구들은 생산성이나 유용성 그리고 경제적 효율면에서 매우 뛰어난 장점을 가지고 있다.¹

본 연구에서는 기존의 MEMS 기술을 이용하여 제작된 몰드로 폴리머 위에 직접 핫엠보싱 (hot-embossing) 공정으로 임프린팅하여 마이크로 칩을 제조하던 방식과 달리, 기계식 마이크로 머시닝으로 제작된 몰드에 사출성형으로 마이크로 칩을 제작하였다. 또한 마이크로 칩을 만드는 다른 제조 과정에서 소요되는 비용과 비교하였다.

2. 기계식 마이크로 머시닝

2.1 마이크로 스테이지

스테이지의 정확한 위치, 움직임 그리고 가공 조정에 대한 빠른 반응은 기계가공의 안정성을 위해 매우 중요하다.^{4,6} 기계식 마이크로 머시닝을 위한 마이크로 스테이지는 Fig. 1 과 같이 구성되었다. 마이크로 머시닝 스테이지는 수평방향의 움직임인

X-Y 스테이지 (404XR150, Packer Automation) 와 수직방향인 Z 축으로 구성되어있다. 마이크로 스테이지는 각 축으로 $1.3 \mu\text{m}$ 의 반복위치정밀도를 갖는다. 이송 시 진직도는 100 mm 이송 시 $8\text{-}10 \mu\text{m}$ 의 오차 정밀도를 가지고 편평도는 $6 \mu\text{m}$ 이내의 오차 정밀도를 갖는다. 바이스와 진공체온 X-Y 스테이지와 수직으로 스피드들을 향해 고정되었다. 그리고 분해능이 $1 \mu\text{m}$ 의 리니어 인코더와 신호처리를 위한 드라이버를 연결하여 테이블의 이송정밀도를 $1 \mu\text{m}$ 로 제어하였다. 또한 스테이지를 제어하기 위해 PMAC2 (Delta Tau Systems Inc.) 를 사용하였다. Z 축의 이동과 가공 상태를 확인하기 위해 디지털 현미경을 설치하였다.

2.2 스피드들의 런아웃 (Run-out of spindle)

기계식 마이크로 머시닝 시 가공공구와 스피드 (Fischer HEN 40) 간의 런아웃 (Run-out) 현상이 발생한다. 매크로 단위에서는 몇십 μm 의 런아웃은 큰 영향을 주지 않지만 마이크로 단위에서의 런아웃은 정밀도에 있어서 치명적인 오차를 발생시킨다. 이러한 런아웃은 미세형상의 가공에서 형상의 정밀도는 물론 채터무늬와 버 (burr) 를 발생시키는 오차요인이다.⁷ TIR (Total Indicator Reading) 을 측정하기 위해 $1 \mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 디지털 인디케이터를 생크 (shank) 끝에 설치하여 측정한 결과 $2 \mu\text{m}$ 이내로 측정되었다. 실제 가공 시에는 진동과 절삭력, 열변형 등의 다양한 동적 요소가 오차로 작용하므로 총 런아웃은 TIR 값보다 큰 값을 갖는다.⁷ 총 런아웃을 측정하기 위해 알루미늄 (6061-T6) 에 마이크로 채널을 $200 \mu\text{m}$ 평엔드 밀로 가공하여 측정한 결과, 가공된 채널의 폭은 $1.72 \mu\text{m}$ 이 더 넓었다.

2.3 마이크로 스테이지의 위치 정밀도

디지털 인디케이터로 스테이지의 높이 차를 측정한 결과, $150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 의 면적에 대해 $6 \mu\text{m}$ 이내의 높이 차가 나왔다. 그리고 정전 용량식 캡센서 (Microsense II, ADE Tech) 를 이용하여 $1 \mu\text{m}$ 의 이송 단위로 스테이지의 정밀도를 측정하였다. Fig. 2 는 마이크로 스테이지의 이송정밀도를 보여준다. 백래쉬 (backlash) 는 거의 없는 것으로 나타났고 $1 \mu\text{m}$ 위치 정밀도를 보여주었다. Z 축의 반응이 다소 느린 것은 15kg 의 스피드 무게에 기인하는 것으로 판단된다.

2.4 마이크로 형상 가공

스테이지의 정밀한 가공성을 확인하기 위해 알루미늄 6061-T6를 사용하여 마이크로 격벽과 마이크로 로터(rotor)를 제작하였다. Fig. 3의 마이크로 격벽은 200 μm 의 평엔드밀로 24,000 rpm의 스픈들 속도와 0.1 mm/s의 이송속도로 폭 60 μm , 높이 500 μm 의 마이크로 격벽을 4시간 동안 10 μm 의 가공깊이로 가공하였다. Fig. 4의 마이크로 로터는 1 mm/s의 이송속도로 500 μm 의 평엔드밀을 사용하여 횡삭 가공한 후 0.5 mm/s의 이송속도로 반지름 100 μm 의 불엔드밀을 사용하여 총 6시간 동안 정삭 가공하였다. 가공결과 본 마이크로 스테이지는 미세구조물 제작에 적합한 가공성과 정밀도를 갖는다는 것을 알 수 있다.

3. 마이크로 칩의 제작

3.1 마이크로 칩 (Micro chip)

최근 생체물질을 분석하는 장치로서 μ TAS (Micro Total Analysis System)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁵⁻⁹ μ TAS는 반도체 제작공정에서 사용되는 미세가공기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼나 유리, 플라스틱으로 된 수 cm^2 크기의 기판 위에 여러 가지 장치들을 집적시킨 화학분석장치이다. 이를 이용하면 시료의 전처리, 반응, 분리, 검출 등을 하나의 칩 위에서 연속적으로 수행할 수 있어 적은 비용으로 더 빠른 실험을 할 수 있다.⁵

전기영동 (capillary electrophoresis: CE)을 위한 폴리머 마이크로 칩의 제작방법에는 몇 가지 방법이 있다.¹¹⁻¹⁴ 그 중 가장 많이 쓰이고 있는 방법으로 폴리머 캐스팅(casting)이나 핫엠보싱(hot embossing)과 같은 복제기법(replicating technique)이 있다.⁹

Fig. 5는 마이크로 칩의 대량 생산 방법을 보여준다. 현재 Fig. 5의 (a), (b)의 과정이 많이 쓰이고 있다. Fig. 5의 (a)의 핫엠보싱 방법은 빠르고 간단한 실리콘 몰드기법이지만 실리콘 몰드가 잘 깨지고 핫엠보싱 후에 폴리머와 몰드가 잘 떨어지지 않는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 실리콘 몰드를 금속 몰드로 대체하는 방법이 개발되었다.¹¹⁻¹²

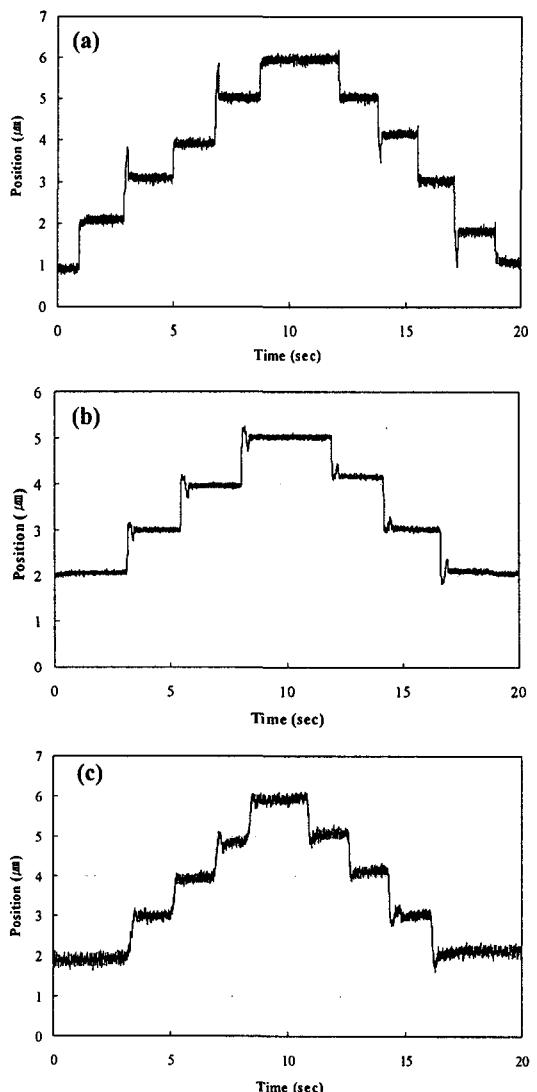


Fig. 2 Measurement of stage accuracy of 1 μm step:
(a) X-axis, (b) Y-axis, and (c) Z-axis

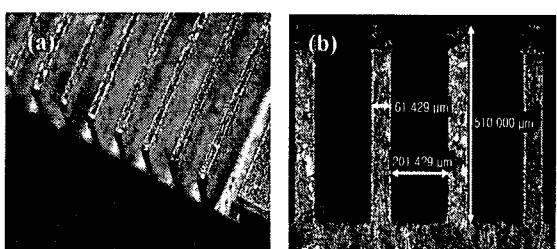


Fig. 3 Micro walls: (a) isometric view and (b) cross sectional view

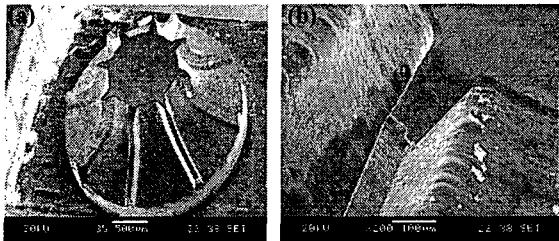


Fig. 4 Micro rotor: (a) isometric view and (b) cross sectional view

Fig. 5 의 (b)는 실리콘 몰드를 금속 몰드로 대체하는 방법이다. 이 방법은 최종적으로 형성하고자 하는 유로의 형상을 실리콘 위에 식각하여 형성하고 그 위에 니켈을 도금 (electroplating method) 한 후, 실리콘을 제거하여 금속 몰드를 얻는 방식이다. 이는 실리콘 몰드보다 견고하고 재현성이 좋은 장점이 있으나 일반적인 니켈도금의 증착률이 $0.3 \mu\text{m}/\text{min}$ 으로 사용 가능한 몰드를 얻기 위해서는 약 8~10 시간 정도로 오랜 증착 시간을 필요로 한다.¹² 따라서 이 과정은 실리콘 몰드의 수명을 향상시켜 주나 더 많은 시간과 비용이 들고 제작 과정도 복잡해지는 단점을 갖는다. 반면에 Fig. 5 의 (c) 같은 사출성형 방법은 비용이 낮고 짧은 시간에 제작이 가능하다. Fig. 6 은 본 연구에서 제작한 마이크로 칩의 설계형상이다.

3.2 직접 가공법 (Direct machining)

직접 가공법은 PMMA (Poly Methyl methacrylate) 판 위에 마이크로 엔드밀로 직접 미세유로를 가공하는 쉽고 빠른 방법이다. 미세유로의 형상은 SolidWorks 로 설계하였고, 가공 공구 경로는 PowerMILL 로 생성하는데 15 분이 소요되었다. 가공에 사용된 엔드밀은 직경 $200 \mu\text{m}$ 이고 스펀들 속도는 30,000 rpm, 이송속도는 0.1 mm/s , 가공 깊이는 $10 \mu\text{m}$ 였다.

3.3 사출성형법 (Injection molding)

Fig. 7 은 알루미늄 몰드의 설계도와 실제 제작된 몰드의 사진이다. 알루미늄 몰드의 크기는 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 이다. 우선 알루미늄 블록 (aluminum 6061-T6) 을 표면 밀링 (face milling) 하였다. 그리고 $\Phi 4 \text{ mm}$ 의 엔드밀로 1 시간 동안 황삭 (roughing) 가공 하였다. 황삭 가공 시 절삭 깊이 (depth of cut) 는 0.1 mm , 절삭 너비 (width of

cut) 는 2 mm , 이송 속도 (feed rate) 는 1 mm/s , 스펀들 속도 (spindle speed) 는 30,000 rpm 으로 가공하였다. 직경 4 mm 의 엔드밀로 황삭을 하면 채널의 교차부와 각 코너부에서 2 mm 반경의 잔류부가 발생하는데, 이는 직경 $200 \mu\text{m}$ 의 마이크로 엔드밀로 잔삭 (finishing) 하여 제거하였다. 이 때 스펀들 속도는 30,000 rpm, 이송 속도는 0.1 mm/s , 절삭 깊이는 $50 \mu\text{m}$, 절삭 너비는 $100 \mu\text{m}$ 이었고 가공 시간은 45 분이었다. Fig. 8 은 이러한 과정으로 가공한 몰드의 SEM 사진이다.

측정된 금형 표면의 표면거칠기 (R_a) 는 35 nm 로써 금형 표면을 연마하는 기존의 공정을 생략할 수 있어 시간 및 비용 절감효과가 크다. Fig. 9 는 사출성형으로 만들어진 마이크로 칩을 보여준다.

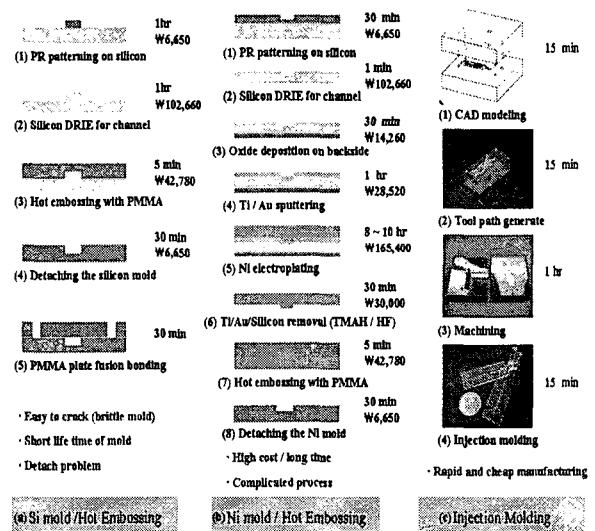


Fig. 5 Various mass production processes for microchip:

- Hot embossing with silicon mold,
- Hot embossing with nickel mold, and
- Injection molding

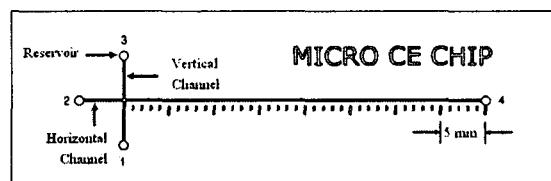


Fig. 6 Top view of microchip for capillary electrophoresis

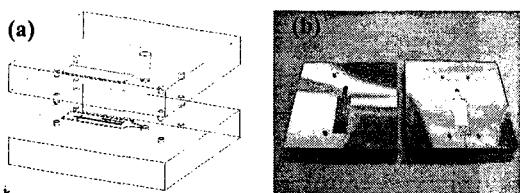


Fig. 7 Aluminum molds for injection molding: (a) mold design and (b) Machined mold

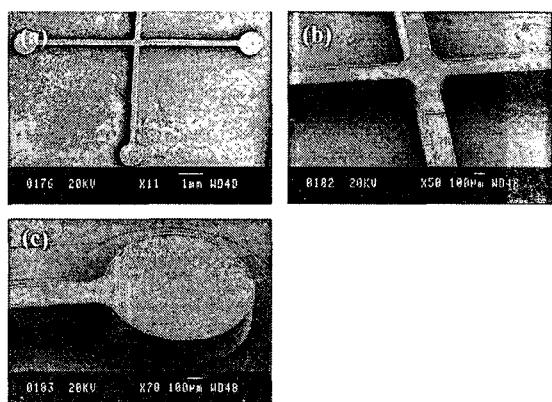


Fig. 8 The SEM images of aluminum mold for microchip:
(a) channels and reservoirs (b) enlarged view of intersection, and (c) buffer reservoir

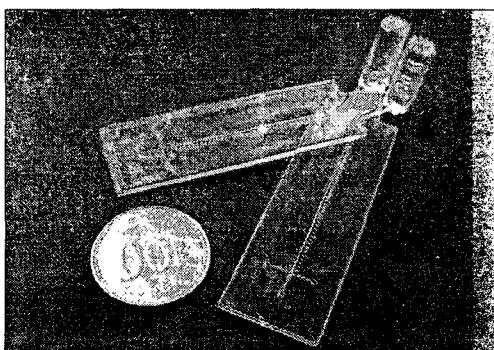


Fig. 9 Microchips fabricated by injection molding

마이크로칩은 사출성형기기 (G-100T, Morgan Press) 와 PMMA 입자 (IF-850, LG MMA) 로 성형하였다.

3.4 치수 오차의 측정

몰드와 마이크로 칩의 치수 오차들을 Table 1에

Table 1 Dimensions of microchips and injection mold

process \ position intersection (μm)		Horizontal channel (μm)	Vertical channel (μm)	Reservoir (μm)
Original Design	No rounding	200	200	1000
Direct machined microchip	No rounding	201.2	201.7	1003.9
Injection mold microchip	R100	196	195.5	989.4
Injection molded microchip	R100	197.5	198.1	995.8
MEMS chip: hot embossing ¹¹	R50	203.5	204.3	1008.4

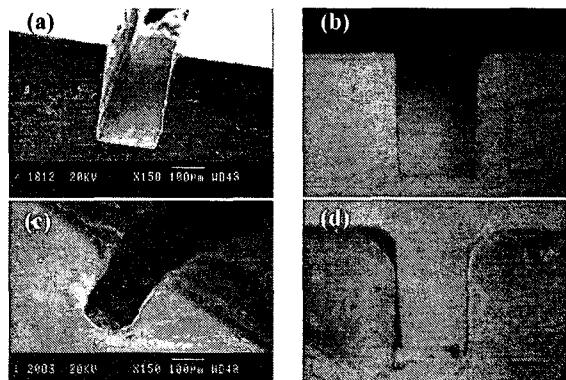


Fig. 10 Images of direct machined microchip and injection molded microchip: (a) Isometric view of direct machined chip, (b) cross sectional view of direct machined chip, (c) isometric view of injection molded chip, and (d) cross sectional view of injection molded chip

나타내었다. Fig. 10 과 같이 SEM 과 광학 현미경으로 마이크로 칩 채널의 단면도를 촬영하였고 profiler로 측정하였다.

가공된 마이크로 칩은 약 $2 \mu\text{m}$ 의 오차가 있었지만 사출성형이나 니켈 몰드로 핫엠보싱된 마이

크로 칩 보다 정밀하였다. PMMA에 직접 가공한 마이크로 칩은 정밀하고 R_a 43 nm로 좋은 표면 거칠기를 나타냈다. 그러나 이 방법은 대량생산하기엔 어려움이 따른다. 사출성형으로 만들어진 마이크로 칩은 채널의 너비가 기준의 디자인된 모델보다 3 ~ 5 μm 작게 제작되는 오차를 보였고 Fig. 10 (d)처럼 제조 과정에서 원형의 코너형상이 나타났다. 이 원형형상은 사출 성형 시 PMMA 입자의 고르지 않은 수축성으로 인하여 생성되는 것으로 균일하지 않은 잔류응력의 원인이 된다.¹⁵ Fig. 11은 마이크로 칩과 몰드의 모양을 보여준다.

4. 비용 평가

4.1 마이크로 머시닝의 비용 모델

기계가공의 총 비용은 일반적으로 식 (1)과 같이 크게 네 가지 요인으로 이루어져 있다.¹⁶⁻¹⁹

$$C_{total} = C_w + C_p + C_m + C_t \quad (1)$$

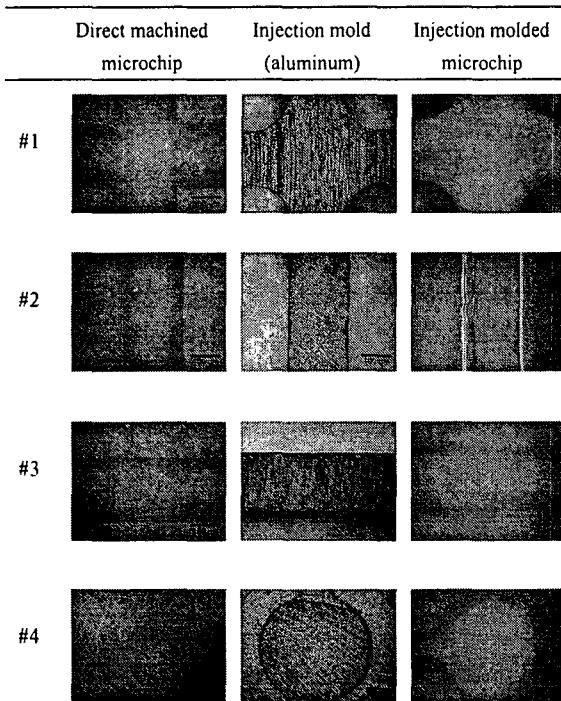


Fig. 11 Optical images of microchips and injection mold (#1: intersection, #2: vertical channel, #3: horizontal channel, and #4: reservoir)

여기서 C_{total} 은 개당 총비용, C_w 는 재료비용, C_p 는 준비비용, C_m 은 절삭작업비용, C_t 는 공구비용이다. 공작물의 준비와 가공을 위한 장비설정 등에 소요되는 비용은 준비비용으로 설정하였다¹⁹.

첫 번째 항인 재료비용 C_w 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.¹⁷⁻¹⁸

$$C_w = V\rho C_{um} \quad (2)$$

여기서 V 는 필요한 재료의 부피 (m^3)이고 ρ 는 재료의 밀도 (kg/m^3) 그리고 C_{um} 은 원재료의 단위 무게 당 비용 ($\text{₩}/\text{kg}$)이다.

둘째 항인 C_p 는 준비비용으로 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.²⁰

$$C_p = WT_p \quad (3)$$

셋째 항인 절삭작업비용 C_m 은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.²⁰

$$C_m = T_m(W + B_m) \quad (4)$$

여기서 T_m 은 제품 한 개를 가공하는데 소요되는 순수절삭시간이고, B_m 은 단위시간당 작업자의 임금은 기계사용에 따른 감가상각비와 보수비 등이 포함된 단위시간 당 기계사용에 대한 간접비용으로 식 (5)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

`machine_overhead` 항은 기계의 간접비로서 동력소모비와 유지보수 비용을 포함하는 값으로 보통 100 ~ 300 %로 책정한다. 또한 M_t 는 사용한 장비의 감가상각비로 식 (6)으로 나타낼 수 있다.¹⁸

$$B_m = M_t + M_t \left(\frac{\text{machine_overhead}[\%]}{100} \right) \quad (5)$$

$$M_t = \left(\frac{\text{initial_purchase_cost_of_machine}}{\text{working_hours} \times \text{repayment_period}} \right) \quad (6)$$

여기서 T_p 는 재료와 기계의 준비에 소요되는 시간이고, W 는 단위시간당 작업자의 임금이다.

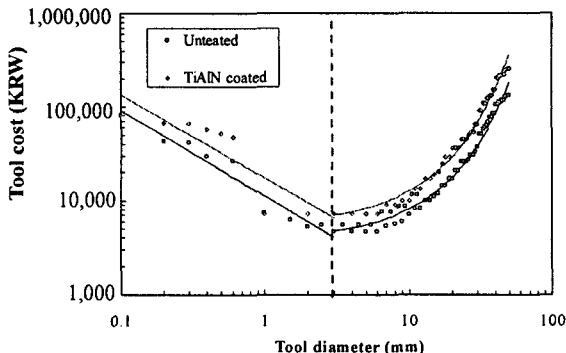
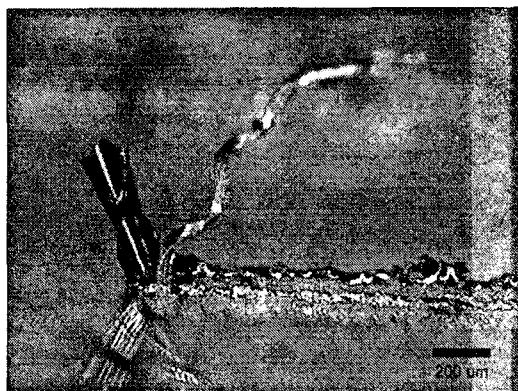


Fig. 12 Tool cost of micro and macro endmills

Fig. 13 $\phi 200 \mu\text{m}$ endmill fractured during cutting aluminum

마지막 항인 C_t 는 공구비용이다. 공구비용은 가공에 소모된 공구의 비용을 산정한 값으로 식 (7) 과 같이 정의 할 수 있다.¹⁶ Fig. 12 는 매크로와 마이크로 공구들의 가격을 비교한 그림이다. 마이크로 공구는 치수가 작아짐에 따라 비싼 것을 알 수 있다. 공구 가격은 YG-1 와 OSG Korea, Sinki Micron 에서 참고하였다.

$$C_t = y \left(\frac{T_m}{T} \right) \quad (7)$$

여기서 y 는 초기공구 구입비용을, T_m 은 가공에 소요된 시간, 그리고 T 는 평균공구수명을 나타낸다. 공구수명을 나타내는 대표적인 식은 Taylor 의 공구 수명식으로 식 (8)과 같이 절삭속도에 대한 공구의 수명으로 나타낸다.²⁰

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

여기서 V 는 절삭속도 (m/min)이고 C 는 공구수명 T 가 1 min 일 때의 V 값이다. 그리고 n 은 공구의 재질에 따라 실험을 통해 결정되는 상수이다.²⁰ 약 1 mm 이상 직경의 엔드밀은 Taylor 식에 의해 수명을 결정할 수 있다. 마이크로 엔드밀의 경우, Fig. 13 에서 확인할 수 있는 것처럼 마모를 측정하기 어렵고 주로 파단 (fracture) 에 의해 공구수명이 결정되므로 Taylor 식을 적용시키기 어렵다.¹⁹ 일반적인 기계가공에서 알루미늄에 대한 절삭속도의 범위는 $300 \sim 3000 \text{ m}/\text{min}$ 이다.²⁰ 이러한 범위의 절삭속도를 달성하기 위해 직경이 $200 \mu\text{m}$ 인 마이크로 엔드밀의 경우, 스픬들 속도는 최소 $477,000 \text{ rpm}$ 이 되어야 한다. 이러한 속도는 보통 스픬들 속도의 한계를 넘어서다. 그리고 빠른 절삭 속도에서는 더 쉽게 공구가 파손된다.¹⁹ 따라서 본 연구에서는 이송속도의 변화에 따른 마이크로 공구의 수명을 판단하기 위한 가공실험을 하였다. 공구수명 실험에 사용한 공구의 직경은 $200 \mu\text{m}$ (M.A. Ford) 이었고, 이송속도는 $0.1 \text{ mm}/\text{s}$, $1 \text{ mm}/\text{s}$, $3 \text{ mm}/\text{s}$, 그리고 $5 \text{ mm}/\text{s}$ 에 대해 각각 3 개씩 실험하였다. 실험은 알루미늄 평판 (6061)에 깊이 $30 \mu\text{m}$ 의 채널을 $30,000 \text{ rpm}$ 의 스픬들 속도로 가공하여 공구의 파손이 일어나는 지점을 측정하였다. Fig. 14 는 이송속도의 변화에 따른 공구의 평균수명을 나타낸 결과이다.

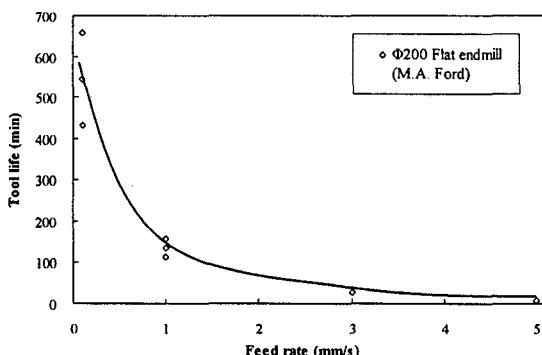
Fig. 14 Tool life of $\phi 200 \mu\text{m}$ endmill as a function of feed rate

Table 2 Cost estimation of micro machined part

Item	Direct machining		Injection molding		MEMS
C_w	PMMA	₩20	Al	₩9,780	
C_p	T_p	10 min	$T_{p,machining}$	10 min	Wafer
	W	₩2,370 /hr	$T_{p,injection}$	30 min	₩28,520
Subtotal		₩400	W	₩2,370 /hr	PR patterning ₩6,650
C_m	T_m	51 min	$T_{m,roughing}$	67 min	Mask
	M_t	₩1,810	$T_{m,finishing}$	32 min	₩75,000
B_m	M_t	₩1,810	$M_{t,machining}$	1 min	DRIE
	B_m	₩5,420	$M_{t,injection}$	₩1,810	₩96,050
Subtotal	W	₩2,370 /hr	$B_{m,machining}$	₩5,420	Oxidation
		₩6,620	$B_{m,injection}$	₩1,430	₩14,260
y	y	₩43,000 /ea	$y_{roughing}$	₩4,000 /ea	Ti/Au sputtering
			$y_{finishing}$	₩43,000 /ea	₩28,520
T_m	T_m	51 min	$T_{m,roughing}$	67 min	
			$T_{m,finishing}$	32 min	
C	C	600	$C_{roughing}$	600	Ni
	V	300m/min	$C_{finishing}$	-	electroplating
n	n	0.14	$V_{roughing}$	300m/min	₩165,400
			$V_{finishing}$	-	
T	T	9hr: at 0.1mm/s	$n_{roughing}$	0.14	Si/Au/Ti
			$n_{finishing}$	-	removal
Subtotal		₩4,000	$T_{roughing}$	141min	₩28,530
Total		₩11,040 /ea	$T_{finishing}$	545min	₩442,930 /ea

4.2 사례 연구

식 (3) ~ (8)을 이용하여 마이크로 칩을 제조하는 데 소요되는 비용을 산출하였다. 작업자의 임금과 간접적인 설비의 비용은 본 실험실을 기준으로 계산하였다. Table 2 는 마이크로 칩을 제조하는 다양한 방법에 대해 소요되는 비용을 비교한 표이다. 마이크로 칩을 직접 제조했을 때는 약 11,000 원이 소요되었고 사출성형은 약 30,000 원, MEMS 는 약 443,000 원의 비용이 소요되었다. 즉, 사출성형에 소요되는 비용이 MEMS 에 비해 약 1/15 인 것을 확인할 수 있었다. MEMS 를 이용한 마이크로 칩 제조에 소요되는 비용은 서울대학교 반도체 공동 연구소의 요율을 참고하였다.

대량생산 체제에서는 사출성형에 드는 비용이

더 줄어들 것으로 예상된다. 예를 들어 하나의 알루미늄 몰드로 1000 개의 마이크로 칩을 제조하는 경우 재료비도 마이크로 칩 한 개당 20 원이므로 재료비를 20,000 원으로 가정할 수 있다. 사출 성형으로 마이크로 칩 하나를 제조하는 데 약 60 초가 소요된다면 1000 개는 16.67 시간이 걸릴 것으로 계산된다. 식 (9)는 사출성형 비용의 계산을 보여준다.²³

$$C_{m,injection} = T_{m,injection} \cdot (B_m + W) \\ = 16.67 \times (1,430 + 2,370) = ₩10,560 \quad (9)$$

따라서 1000 개의 마이크로 칩의 비용은 식 (10)과 같다.

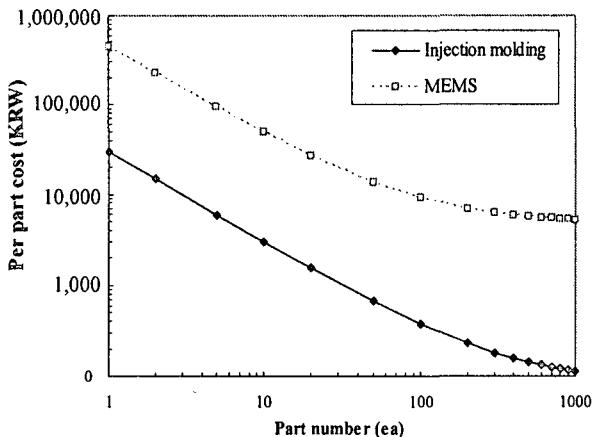


Fig. 15 Per part cost of each manufacturing process

$$\begin{aligned} C_{total,1000ea} &= C_{total,1ea} + C_{injection,1000ea} \\ &= 29,370 + (20,000 + 63,330) = ₩112,700 \end{aligned} \quad (10)$$

니켈 몰드를 사용하여 핫엠보싱 (hot embossing) 공정으로 제조하는 마이크로 칩의 가격은 식 (11)과 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 쓰인 B_m 과 W 는 서울대학교 반도체 공동 연구소의 자료를 기반으로 산정하였다.

$$\begin{aligned} C_{m,MEMS} &= T_{m,MEMS} (B_m + W) \\ &= 33.33 \times (142,900) = ₩4,762,860 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_{total,1000ea} &= C_{total,1ea} + C_{MEMS,1000ea} \\ &= 442,930 + (20,000 + 4,762,860) = ₩5,225,790 \end{aligned} \quad (12)$$

그러므로 사출성형과 핫엠보싱 공정은 Fig. 15에서처럼 각각 개당 약 113 원과 5,226 원의 비용이 소요된다.

5. 결론

본 연구에서는 기계식 마이크로 머시닝을 이용하여 마이크로 형상들과 μ-TAS 를 위한 부품들을 제작하였다. 제작 방식에 따른 비용을 비교하기 위하여 기계식 마이크로 머시닝으로 가공한 몰드를 사용하여 사출 성형 공정으로 마이크로 칩을 제작하는 방법과 핫엠보싱 공정으로 마이크로 칩을 제작하는 방법 그리고 직접 마이크로 칩을 제

작하였을 때 소요되는 비용을 측정하고 비교하였다. 1000 개를 제작하는 경우 사출성형은 약 112,700 원이, 핫엠보싱 공정은 약 5,225,790 원의 비용이 소요되었다. 직접 마이크로 칩을 제작하는 방법은 하나의 마이크로 칩 제조에서는 비용이 가장 적지만 대량 생산 체제에 적용할 경우 사출 성형에 비해 시간과 비용이 높게 측정되었다. 따라서 기계식 마이크로 머시닝 공정을 사용하여 몰드를 만든 후 사출 성형하는 방법은 적은 비용으로 빠른 시간에 마이크로 부품을 제조할 수 있는 공정 기술로 마이크로 칩 제조 공정에 적합한 방법 중 하나로 평가된다.

후기

본 연구는 서울대학교 “2 단계 BK 21 사업”단 및 마이크로 열 시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Chae, J., Park, S. S. and Freiheit, T., “Investigation of micro-cutting operations,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 3-4, pp. 313-332, 2006.
- Luo, X., Cheng, K., Webb, D. and Wardle, F., “Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, No. 2-3, pp. 515-528, 2005.
- Takeuchi, Y., “Ultraprecision micromachining of small workpieces with complicated shape,” Proceedings of Nanoengineering Symposium, pp. 129-134, 2005.
- Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J. and Schubert, K., “Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills,” Precision Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 229-235, 1999.
- Uhlmann, E., Piltz, S. and Doll, U., “Machining of micro/minature dies and moulds by electrical discharge machining – Recent development,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, No. 2-3, pp. 488-493, 2005.

6. Uhlmann, E., Piltz, S. and Schauer, K., "Micro milling of sintered tungsten-copper composite materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, pp. 402-407, 2005.
7. Lee, K. H, Ahn, S. H., Dornfeld, D. and Wright, P. K., "The effect of run-out on design for manufacturing in micro-machining process," *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 11-16, 2001.
8. Yoshino, M., Matsumura, T., Umehara, N., Akagami, Y., Aravindan, S. and Ohno, T., "Engineering surface and development of a new DNA micro array chip," *Wear*, Vol. 260, No. 3, pp. 274-286, 2005.
9. Ribeiro, J. C., Minas, G., Turmezei, P., Wolffebuttel, R. F. and Correia, J., "A SU-8 fluidic microsystem for biological fluids analysis," *Sensor and Actuators A* , Vol. 123-124, No. 23, pp. 77-81, 2005.
10. Mecomber, J. S., Hurd, D. and Limbach, P. A., "Enhanced machining of micron-scale features in microchip molding masters by CNC milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1542-1550, 2005.
11. Liu, D., Zhou, X., Zhong, R., Ye, N., Chang, G., Xiong, W., Mei, X. and Lin, B., "Analysis of multiplex PCR fragments with PMMA microchip," *Talanta*, Vol. 68, No. 3, pp. 616-622, 2005.
12. Kim, M. S., Cho, S. I., Lee, K. N. and Kim, Y. K., "Fabrication of microchip electrophoresis devices and effects of channel surface properties on separation efficiency," *Sensors and Actuators B*, Vol. 107, No. 2, pp. 818-824, 2004.
13. Lee, S. H., Cho, S. I., Lee, C. S., Kim, B. G. and Kim, Y. G., "Microfluidic chip for biochemical reaction and electrophoretic separation by quantitative volume control," *Sensors and Actuators B*, Vol. 110, No. 1, pp. 164-173, 2005.
14. Pumera, M., "Microchip-based electrochromatography: designs and applications," *Talanta*, Vol. 66, No. 4, pp. 1048-1062, 2005.
15. Lee, H. S., "In-plane deformation analysis and design of experiments approach for injection molding of light guide plate for LCDs," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 7, No. 1, pp. 51-56, 2006.
16. Ostwald, P. F., "Engineering cost estimating," Prentice Hall, pp. 250 - 279, 2002.
17. Kwon, Y. and Fischer, G. W., "A novel approach to quantifying tool wear and tool life measurements for optimal tool management," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 4, pp. 359-368, 2003.
18. Shehab, E. M. and Abdalla, H. S., "Manufacturing cost modeling for concurrent product development," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, No. 4, pp. 341-353, 2001.
19. Lee, K. and Dornfeld, D. A., "Micro-burr formation and minimization through process control," *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 246-252, 2005.
20. Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., "Manufacturing processes for engineering materials," Addison Wesley, pp. 490-493, 2002.