3D 프린터를 이용한 마이크로 리액터 가공에 관한 연구

최해운^{a*}, 윤성철^b, 마재권^b, 방대욱^c

Fabrication of Micro-reactor by 3D Printing Machine

Hae Woon Choi^{a*}, Sung Chul Yoon^b, Jae Kwon Ma^b, Dae Wook Bang^c^a Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, 704-701, Republic of Korea^b Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Grad. School of Keimyung University, Daegu, 704-701, Republic of Korea^c Dept. of Computer Science, Keimyung University, Daegu, 704-701, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	March	2014
Revised	14	May	2014
Accepted	20	May	2014

Keywords:

3D printer

Micro reactor

Micro-TAS

ABSTRACT

A 3D printer was used to fabricate a micro-TAS system for biomedical applications. A polymeric medical device fabrication based on a 3D printer can be performed at atmospheric conditions. A CAD- and CAM-based system is a flexible method to design medical components, and a 3D printer is a suitable device to perform this task. In this research, a 100-micron-wide fluidic channel was fabricated with a high-aspect ratio. A cross-sectional SEM image confirmed its possible usage in a micro-reactor using 3D printers. CNC-machined samples were compared to 3D printer-fabricated samples, and the advantages and disadvantages were discussed. Based on the SEM images, the surface roughness of the 3D printed reactor was not affected by wet or dry conditions due to its manufacturing principle. An aspect ratio of 5 to 1 was achievable with 100- μ m-wide fluid channels. No melting was found, and the shape of channels was straight enough to be used for micro reactors.

1. 서 론

의료기기 및 진단기기로 많이 사용되고 있는 마이크로 종합 진단 시스템(μ -TAS, micro-Total Analysis System)은 최소의 샘플 및 시약으로 질병을 효과적으로 진단 하는 첨단의료기기 부품으로서 그 활용도가 최근 매우 높아지고 있다.

일반적으로 μ -TAS 부품은 주로 반도체 기술이나 폴리머 사출 기술을 응용하여서 생산되지만 소형화와 고신뢰도의 제품을 원하는 수요자를 충분히 만족시키지 못하고 있다. 또한, 진단 샘플 및 시약이 마이크로 스케일의 유체통로(유로, fluid channel)를 지나면서 광학장치에 의해서 샘플 및 시약이 검출되어야 하며, 진단 신뢰도는

유로의 표면상태나 가공상태에 따라서 민감하게 반응을 한다^[1,2].

마이크로 리액터는 일반적으로 1 mm 이하의 크기를 가지는 마이크로 유로를 사용하여서 시약과 테스트 물질의 화학적 작용을 유도하는 장치로서 최소의 테스트 물질을 사용하여서 고정밀도 측정을 하는 장치이며, 의료기기 전반에 많이 활용되고 있다^[7].

이러한 마이크로 리액터 제작방법으로는 반도체 공정이 사용되기도 하는데, 노광기술은 공정이 복잡하고 제작시 고정밀도를 요구하여서 진단기기의 가격상승의 요인이 되고 있으며, 사용재료 또한 반도체 공정에 가능한 재료로 제한을 받는다. 특히, 투명한 재질로 된 유리계열이나 폴리머 계열은 가공이 난해 하여서 화학적 에칭 공정 등이 후처리로 추가 요구되기도 한다^[3].

* Corresponding author. Tel.: +82-53-580-5216

Fax: +82-53-580-6067

E-mail address: hwchoi@kmu.ac.kr (Hae Woon Choi).

CNC공정 기술은 오늘날 컴퓨터 제어기술 및 고정도 부품가공 기술의 발달로 인하여 산업계에서 가장 보편적인 기계가공법으로 자리 잡았고, 전산설계 및 생산(CAD/CAM) 시스템의 연동으로 인해 그 활용도가 더 넓어 졌다. 또한, 복잡한 가공물의 가공이 가능해 졌으며 품질 및 마이크론 급의 정밀도도 쉽게 구현할 수 있게 되었다. 하지만, 절삭공구의 마모나 공구인선 보정, 작업자의 숙련도 및 생산환경 개선은 여전히 해결해야 할 숙제로 남아 있다.

레이저가공은 작업공구가 직접 공작물에 닿지 않아서 공구마모나 마찰, 소음, 진동 등으로 인한 정밀도 저하를 막을 수 있고, 가공 재질에 제한성이 거의 없는 것이 특징이다.

이러한 레이저 기술의 발달로 인하여 레이저 기술이 보편화 되고, 바이오물질 가공에도 많이 사용이 되고 있지만, 높은 초기투자 비용 등으로 인해서 다품종 소량생산에 최적 생산시스템으로 도입하기에는 여러 가지 어려움이 있다^[4].

RP (Rapid prototyping) 기술에서 진보된 3D 프린트 기술은 생산기술 전반에 많은수요를 창출하고 있다. 3D 프린트 기술은 단순한 2D에서 3D 영역으로의 확장이 아니라, 적층소재(Mold & Support)의 기반기술도 요구되기 때문에, 제어, 소재 및 기계전반에 대한 학술적인 연구의 필요성이 요구되고 있다. 일반적으로 반도체 공정을 이용하여 형상을 가공 시 노광공정을 사용하여 음각한 후 PDMS 등의 폴리머를 통해 Replica를 만들어서 가공하는 방법을 선호하기도 하고, 특수한 경우 레이저가공을 이용하여 마스터 형상제작 및 핫 엠보싱 공정을 통해서 제작하는 경우도 있다^[6]. 이러한 방법에 비해서 3D 프린터를 이용한 Reactor 제조 공법은 다양한 형태의 유로를 단시간에 시험해 보고 그 성능을 평가해 볼 수 있는 장점이 있다. 또한 다품종 소량의 경우는 반도체공정이나 레이저 가공보다는 제조원가가 훨씬 낮아질 것으로 기대가 된다.

본 논문에서는 최근에 많이 응용되고 있는 3D 프린터를 마이크로 중합 진단시스템(μ -TAS) 제작에 적용하기 위한 방안으로 CNC 가공의 장단점에 대한 이론 및 실험적 선행 연구결과와 이를 극복하기 위한 3D프린터의 실험적 연구결과를 소개 한다.

2. 실험장치 구성 및 방법

본 연구에 벤치마킹한 마이크로 리액터는 실험용으로 많이 사용되고 있는 혈액 및 진단시약 글래스 리액터로서 Fig. 1에 예시되어 있다. 구성은 3개의 진단매체 Inlet와, 4개의 시약 Inlet, 그리고 3개의 Outlet으로 구성하였으며, 유로는 100 μ m를 타겟 하였고, Inlet 및 Outlet은 직경 1.5 mm로 설정하였다.

마이크로 리액터 제작에 사용된 3D 프린터는 PROJET HD3500 (미국 3D systems Inc.)이며, 최대 실물제작 크기는 298 × 185 × 203 mm이고, 적층 정밀도는 0.001-0.002 inch 이다.

Fig. 1 Modeling for μ -reactor

이 장치는 액체상태의 광경화성수지에 조형하고자 하는 모양의 빛을 프로젝터로 조사하여 수지를 층층이 경화시켜 출력하는 DLP (Digital Light Processing) 방식으로 특히 빛을 투과할 때 빔프로젝터의 원리처럼 마이크로 미러를 사용하기에 매우 세밀한 표면조도와 정밀도를 구현 할 수 있는 장점이 있어 본 논문에서 마이크로 리액터 제작에 응용하였다.

사용된 소재(Mold)는 우레탄 계열의 Urethane acrylate oligomers (20~40%), Ethoxylated bisphenol A diacrylate (15~35%), 그리고 Tripropyleneglycol diacrylate (1.5~3%)로 구성되어 있으며, 비등점은 200°C 이상, 비중은 1.1 이며, 세부 화학적 조성 제조사의 지적재산으로 보호 되어 있다.

또한, 제조 후 공백으로 처리되는 서포트(Support)는 Hydroxylated wax가 60~100% 첨가되어 있다. 서포트 물질은 녹는점이 55~65°C 이기 때문에, 적층 후 오븐에서 일정시간 경과하면 제품 밖으로 흘러나오게 된다.

3. 실험 결과

3.1 저 중형비 유로가공

앞 절에서 기술된 내용을 기반으로 적층 및 후처리를 하였으며, 최종 완제품이 Fig. 2에 예시 되었다. Inlet 부위를 확대한 광학현미경 사진 Fig. 2와 같이 100 μ m 내외의 유로가 형성이 되었으며, 점성이 낮은 붉은색의 시약을 떨어뜨린 결과 유로를 통해서 잘 흘러감도 확인 할 수 있었다. 실제 제작된 유로는 개방형 Reactor로서 제작 및 분석의 편의를 위해서 Top sealing을 하지 않았다. 하

(a)

(b)

Fig. 2 (a) Enlarged view of inlet (b) flow drop test

지만, 유로의 깊이가 깊어서 적정량의 Flow drop으로 유로내를 순환토록 하였다.

형상관찰을 위해서 전자현미경(SEM) 사용하였고, 이를 통해서 유로 및 적층형상을 분석하였다. Fig. 3(a)에서 보여지는 바와 같이 직경 1.5 mm 크기의 Inlet이 비교적 잘 완성되었음을 관찰 할 수 있었다. 유로 입구측이 일부 적층오차에 의해서 막힘이 있어 보이지만, 깊이 방향으로 충분한 기공이 확보 되어 있음이 시약 테스트에서 알 수 있었다.

Fig. 3(b)은 유로의 전자현미경 사진을 보여주고 있으며, 적층오차에 의해서 소재(Mold)가 흘러나와서 유로형성이 일부 부드럽지 못함도 관찰 되었다. 하지만 전반적으로 유로는 막힘이 없이 형성이 되었고, 유로의 크기는 100 μm 정도로 관찰이 되었다.

유로의 단면형상 측정을 위해서 샘플을 절단후 기계가공 후 전자현미경 촬영을 실시 하였다. 그 결과가 Fig. 3(c) 에 예시되어 있으며, 종횡비(깊이 대비 폭)가 약 1:2 정도 되는 것을 확인 할 수 있었다. 단면형상에서 알 수 있듯이 유로가 비교적 원활하게 형성이 되었

(a)

(b)

(c)

Fig. 3 SEM image of (a) Inlet (b) fluid channel top view (c) cross section of fluid channel

으며, 측면 조도(Roughness)를 제외하면 μ-TAS 부품으로 사용하 기에도 손색이 없을 정도로 형성이 되어 있음을 확인 할 수 있었다.

3.2 고종횡비 유로 제작

기계가공 및 제조에서 μ-TAS에서 극복해야 할 중요한 난제 중 의 하나는 고 종횡비(High aspect ratio) 즉, 폭에 대해 깊이의 비 율이 높아 지도록 하는 것이다. 3D프린터를 이용하여서 고 종횡비

가공에 대한 실험적 방법을 연구하였고 그 결과가 Fig. 4에 도시되어 있다.

이전 설정과 마찬가지로 폭은 100 μm 정하고, 깊이를 약 500 μm 까지 만들어지도록 설계하였으며 제작 후 후처리를 거친 제품의 평면과 단면을 전자현미경을 이용 촬영 하였다. Fig. 4(a)에서 나타난 바와 같이 종횡비 5:1의 유로의 형성도 비교적 양호하게 나타났다. 다만, 유로의 기능을 살펴보기 위해서 단면한 Fig. 4(b)를 통해서 유로의 형성이 불균일 하게 나타나는 것이 관찰되었다. 일부 유로는 막힘 현상이 발견되었지만 전반적으로 비교적 장애 없이 잘 통과 됨이 관찰되었다.

3D 프린터로 제작된 유로제품의 객관성을 위해서 본 연구진이 선행 연구한 CNC Milling 가공과 비교를 수행하였다. 소형 밀링 머신에서 주축의 회전속도는 약 20,000 rpm 으로 회전 하였으며, 이때 공구날 끝의 절삭속도는 식 (1)과 같이 계산 될 수 있다.

$$v(r, h) = \frac{\pi(d + 2 \cdot h \cdot \tan(7.5^\circ))N}{60} \quad (1)$$

여기에서, v 는 공구날 끝의 절삭속도, h 는 절삭깊이, d 는 공구

끝의 지름, 그리고 N 은 공구의 회전수 이다. 실제 가공에 사용된 수치를 대입하면,

$$\begin{aligned} v(r, h) &= \frac{\pi(0.2 + 2 \cdot 0.2 \cdot \tan(7.5^\circ)) \cdot 20000}{60} \\ &= 236.8 \text{ mm/sec} \end{aligned} \quad (2)$$

로 됨을 알 수 있다. 실제 사용한 10 mm 엔드밀을 1500 rpm 으로 회전시에 공구끝의 회전 절삭속도는 785 mm/sec 정도로 되는데 본 실험에서 도출된 절삭속도는 이의 1/3에 해당되는 값이다.

공구 끝의 저속 절삭속도는 공구와 공작물의 상대속도를 떨어뜨리기에 이송속도(Feed rate)를 저속으로 하여서 공구에 발생하는 절삭 부담을 작게 하였다. 기계가공을 위한 최적조건 도출을 위해서 주어진 공구를 Poly-carbonate 소재에 가공을 수행하였으며, 공작물 가공을 Dry 한 조건과, Wet한 조건에서 이송속도 10 mm/sec, 20 mm/sec, 30 mm/sec 변환 하면서 수행 하였다. Fig. 5에서는 CNC 가공으로 형성된 약 200 μm 폭의 유로와 3D 프린터로 가공된 약 100 μm 폭의 유로를 비교하였다. 또한, CNC 가공에서는 Dry 상태와 Wet 상태 에서의 가공결과가 이송속도별로 비교되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Dry 한 경우 공구와 공작물의 과도한 마찰열로 인하여 국부적인 용융상태가 관찰되었으며, Wet 상태의 경우에는 이러한 용융결과가 현저히 줄어들음을 알 수가 있었다.

(a)

(b)

Fig. 4 SEM of high aspect fluid channel (a) top view (b) cross sectional view

	Dry	Wet
10mm/sec		
20mm/sec		
30mm/sec		
3D Printing		

Fig. 5 Comparison of CNC and 3D printing^[5,8]

반면, 3D 프린트는 공정의 특성상 Dry 조건이나 Wet 조건에 영향을 받지 않고, 마찰열에 의한 변형도 미미한 것을 알 수 있다. Fig. 5에 예시된 바와 같이 전반적인 단면형상이 3D 프린터가 우수하며 최적 파라미터 설정을 통해서 단면 조도도 개선 될 수 있을 것으로 판단된다.

정량적인 비교를 위해서 표면조도를 측정하였다. 실험에 사용된 표면조도계는 Surform 1400A (Maker: Tokyo Seimitsu Inc.) 이며 각 샘플별 5회 측정하였으며, CNC 가공의 경우는 Water 가공의 경우 이송속도에 따라서 Ra 평균값이 $0.46\ \mu\text{m}$ (이송속도 $10\ \text{mm/sec}$)~ $0.95\ \mu\text{m}$ (이송속도 $30\ \text{mm/sec}$) 로 측정이 되었다.

3D 프린터의 경우는 $0.001\sim0.002\ \text{inch}$ 정도가 발생하나 이는 적층두께에 따른 경계부 차이이며, 가공표면 거칠기로 보기는 어렵다. 다만, 3D 프린터의 특성상 제작시 액상(Liquid)에서 표면장력으로 인해 평탄화 된 후 고상화가 되기 때문에 적층경계부를 제외하고는 가공 거칠기가 극히 미미하게 발생하였으며, 보유장비로서 측정의 한계가 있어 추후 원자현미경 등을 이용하여서 가공변수에 따른 표면 거칠기를 연구할 계획이다.

4. 결론 및 고찰

본 연구논문에서는 의료용 $\mu\text{-TAS}$ 폴리머를 가공하기 위한 3D 프린터 사용사례를 소개하고 중형비 개선을 위한 연구내용을 보고하였다. 3D 프린터를 사용하여서 고품질의 우레탄계열의 소재를 적층하여 $100\ \mu\text{m}$ 급 유로 형성 가능성이 확인 되었고, 5:1의 고중형비 유로형성 가능성도 확인이 되었다.

CNC 가공과 비교하여 고속 이송 $30\ \text{mm/sec}$ 의 가공에서는 열발생에 의한 가공거칠기 개선이 뚜렷하지 않음을 알 수가 있었으나, 3D프린터의 경우 열발생에 대한 우려가 적고, 단면형상도 비교적 양호하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험은 3D 프린

터에서 수행하였지만, 중형 또는 대형기계에서 대량생산도 가능 할 것으로 기대되며 소재에 대한 기초연구가 병행되면 의료용 $\mu\text{-TAS}$ 및 리액터 제작에 3D 프린터가 유용하게 사용 될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Farson, D., Choi, H., Zimmerman, B., Steach, J., Chalmers, J., Olesik, S., Lee, L. 2008, Femtosecond laser micromachining of dielectric materials for biomedical applications, J. Micromech. Microeng. 18 035020-035028.
- [2] Shin, H., Lee, Y., Choi, H., 2012, Multi-layer Glass Cutting by Femtosecond Laser, J. of KSMTE 21:3 382-386.
- [3] Choi, S. D., Cheong, S. H., Kwon, H. G., Jun, J. M., Choi, M. S., Yang, S. C., 2007, Design of hybrid cutting system for flat glass by laser beam, Proc. KSMTE 838-843.
- [4] Ben-Yakar, A., Harkin, A., Ashmore, J., Byer, R., Stone, H. 2007, Thermal and fluid processes of a thin melt zone during femtosecond laser ablation of glass: the formation of rims by single laser pulses, J. Appl. Phys. D 40 1447-1459.
- [5] Shin, H., Choi H., Kim, S., 2010, Hybrid process for lubricant groove on linear guides, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 46 1001-1008.
- [6] Choi, H., Lee, S., Farson, D., Lu, C., Lee, L., 2009, Femtosecond laser micromachining and application of hot embossing molds for microfluid device fabrication, Journal of Laser Apps. 21:4 196-204.
- [7] Watt, P., Wiles, C., 2007, Recent advances in synthetic micro reaction technology, Chem. Comm. 5 443-467.
- [8] Kim, S., Choi, H., 2010, A study of influence of cutting oils on surface profiles for micro-channels, Proc. of KSME spring meeting 302-304.