

CO₂레이저 가공을 이용한 3D 랩언어칩 3D Lab-on-a-chip using CO₂ Laser Machining

손문탁¹, *#권혁홍²

S. M. Son(muntak@yahoo.com)¹, *#H. H. Kwon(hhkwon@daejin.ac.kr)²

¹ 바이오록스, ²대진대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

Key words : Lab-on-a-chip, CO₂ laser, Sequential injection analysis

1. 서론

순차주입분석[1](Sequential Injection Analysis, SIA)은 분석 화학에서 널리 사용되는 화학분석방법으로서 복잡한 분석 과정을 자동화할 수 있다(그림 1). SIA 는 주사기 펌프, 멀티포트밸브, 연동펌프, 홀딩코일로 구성된다. 튜브연동펌프는 시료를 채취하여 멀티포트밸브에 전송하고, 주사기펌프와 멀티포트밸브는 길고 좁은 유로에 시료와 여러 가지 시약을 순차적으로 채워 넣는다. SIA 는 일정량의 시료만 채취하는 정량샘플링과정, 시료와 시약의 혼합과정, 시료-시약 반응산물을 검출기에 일정한 속도로 이송하는 과정을 자동으로 수행 할 수 있다(Fig. 1 참조).

최근 SIA 를 마이크로머시닝 기법으로 초소형화하여, 생물학적 분석처럼 시료나 시약이 극 미량인 경우에 적용하려는 연구가 활발하다[2]. 주사기펌프, 연동펌프, 멀티포트밸브의 초소형화는 MEMS 공정으로 구현한 사례가 많다. 그러나 MEMS 형 부품은 신뢰성 때문에 SIA 에 잘 쓰이지 않고, 대신에 전통적인 기계식 부품이 여전히 사용되고 있다.

홀딩코일은 실제로 화학반응이 일어나는 곳이며, 미세 배관이 복잡하게 얽힌 부분이므로 초소형화의 주요 대상이 되고 있다. 기존 SIA 시스템에서는 홀딩코일을 테프론® 튜브를 코일처럼 감아서 제작한다. 홀딩코일의 소형화는 유리나 PMMA(polymethyl metha acrylate)수지에 미세한 유로를 에칭하거나[3] 레이저 기법으로 형성하는 방법으로 구현한다[4]. 본 연구는 PMMA 수지에 CO₂ 레이저를 이용한 미세 가공으로 SIA를 소형화하는 방법에 관한 것이다.

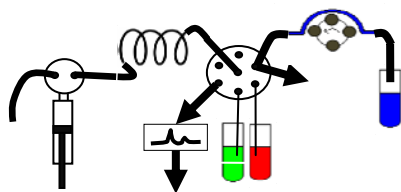


Fig. 1 SIA system overview

2. 제작

3D CAD 를 이용하여 8 개의 층의 도면을 그리고 레이저 가공용 CAM 소프트웨어에 레이저 가공조건을 입력한 다음 80W CO₂ 레이저가공기(베이징레이저, 중국)를 이용하여 2mm, 1mm 두께의 PMMA(polymethylmetha acrylate)판에 레이저를 조사하여 8 개의 PMMA 레이어를 얻었다(Fig. 3 좌측 그림).

레이어 1 은 전기화학 센서 층이며 검출기로 사용된다. 2D CAD 를 이용하여 도면을 그린 후 필름마스크를 만들었다. 스크린에 감광제를 바르고 필름마스크를 덧대어 자외선을 조사하고, 바로 현상하여 인쇄용 스크린을 제작하였다. 스크린인쇄기를 이용하여 탄소잉크, 은 잉크 그리고 절연잉크를 차례로 인쇄한 다음 오븐에서 건조하였다. 은전극에는 염화은 층을 전기화학적으로 형성하여 은/염화은 기준전극으로 사용하였다(Fig. 3 의 우측 그림).

전기화학센서 판독을 위한 포텐시오 스택은

OPAMP(OP07, TL082, TI,USA)와 마이크로컨트롤러(ATMega8, ATMEL, USA) 반도체를 사용하여 제작하였고 PCB 를 시스템의 9 번째 레이어로 부착하였다. 컴퓨터와 RS232C 로 연결하여 뷰어프로그램을 제작하여 데이터를 얻었다(Visual C++ 6.0, Microsoft, USA)

레이어 2,3 은 미세유로층이다(Fig. 2). 정밀한 유로가공을 위해 레이저빔의 파워와 속도를 다양한 조합으로 가공을 해보았고 최적의 조건을 찾았다. 레이어 2 와 3 은 열융착 접합법에 따라 온도와 압력을 가하여 접합하였다.

레이어 4 는 미세유로층과 액추에이터 사이의 인터페이스 역할을 한다. 레이어 5,6,7,8 은 주사기펌프와 멀티포트밸브를 위한 액추에이터를 실장하기 위한 공간을 제공하는 역할을 한다. 이 레이어들은 CNC 고속가공기와 CO₂ 레이저를 이용하여 드릴링, 포켓가공, 그루브 가공, 홀가공, 절단가공 등의 공정으로 제작하였다(레이저 출력제어: 20KHz PWM 펄스). 열융착 접합법으로 각 레이어들을 접합한 다음 액추에이터를 삽입하여 조립하였다. 초소형모터를 사용하여 멀티포트밸브, 시린지펌프의 액추에이터로 사용하였다. 광학식 엔코더는 0.05mm 두께의 금속판을 광식각법으로 에칭하여 제작하였고 초소형모터의 샤프트에 접착제로 붙였다. 마이크로컨트롤러(ATMega123, ATMEL,USA)와 모터 제어용 H-Bridge 칩(L298), 광센서를 이용하여 위치 서보 제어를 3 개 제작하여 단일 PCB 에 조립하고 10 번째 레이어로 붙였다. 이 PCB 는 멀티포트밸브 위치제어, 주사기펌프 피스톤 위치제어, 주사기펌프용 3-way 밸브 위치제어용으로 사용하였다. 서보제어는 디지털 PID 알고리즘을 사용하였고 시행착오법으로 P,I,D 계인을 조정하였다. 펌웨어는 C 언어로 제작하고 AVR-GCC 로 컴파일 하였다. 엔코더의 슬롯은 40 개이며, 광센서 두 개로 A,B 신호를 얻었기에 4 체배가 되어 160/rev 해상도를 얻었다.

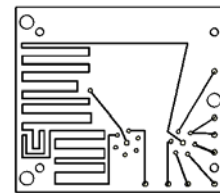


Fig. 2 CAD drawing of fluidic channel

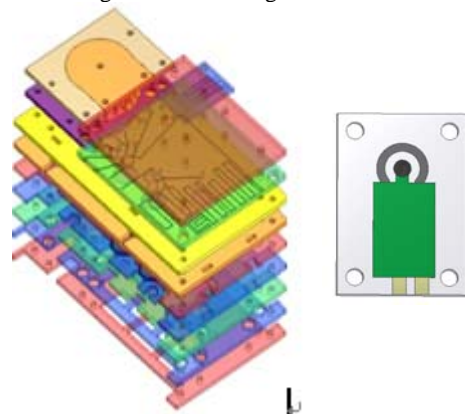


Fig. 3 3D assembly of the lab-on-a-chip and electrochemical sensor with carbon paste and Ag/AgCl reference electrodes.

Tygon® 재질의 폴리머튜브로 시약병과 랩언어칩을 연결하였다. 누수방지를 위해 직경 1.6mm의 금도금된 금속튜브를 특별히 제작하여 랩언어칩에 삽입하고, 그 튜브에 폴리머 튜브를 연결하였다(Fig. 4)



Fig. 4 Assembled photo of miniaturized SIA system

3. 결과 및 토의

SIA의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 주사기펌프의 정확성과 미세유로의 품질이다. 주사기펌프의 정도는 만족스러웠으나 미세유로가 문제가 되었다. 미세유로를 CO2 레이저로 가공하기 때문에 기존의 광식각이나, 핫엠보싱에 비해 가공속도가 빨랐으나 유로의 품질이 떨어지는 단점이 발견되었다. 이번 연구에서는 레이저로 그루브가공(유로), 홀가공(thruhole), 절단가공을 수행하였는데, 가장 문제가 되는 것이 바로 그루브 가공이었다.

CO2 레이저는 Duty 비와 속도 두 가지 변수로 파워를 조절한다. 속도가 빠르면 레이저 조사량이 줄어들게 된다. 그루브(유로)가공의 경우, 레이저파워를 40%로 고정하고 속도를 50-400mm/sec로 바꾸면서 조사한 결과 평균 1.5 밀리미터 정도의 깊은 유로가 생겼다. 한편 레이저파워를 30%로 고정하고 속도를 50에서 400mm/s로 변화시킨 결과, 깊이가 평균 1.1mm로서 깊이가 줄어들었다. 레이저 파워를 20%로 낮추면 표면에 0.2mm 이하의 미세한 그루브가 형성되었다. 그루브가공의 문제점은 단면사진을 보면 드러난다. 양쪽 에지가 열 변형으로 부풀어 오르고, 그루브의 바닥면이 너무 뽀족하다는 점이다. 이러한 형상의 유로에 시약을 펌프로 압송할 때, 모세관 현상에 의하여 뽀족한 바닥부분에서 액체가 앞서 흘러가 버리는 문제가 있다.

레이저파워를 30%, 속도를 100mm/sec로 고정하였을 때 가장 좋은 유로를 얻었으나 여전히 유로의 단면이 매우 뽀족한 원뿔형상이라는 문제가 남아 있었다(Fig. 5-1,2,3).

한편 홀가공의 경우 레이저파워를 75%에서 30%까지 변화시키면서 0.3 초 동안 같은 위치에서 레이저를 조사하였다. 레이저 빔에 의하여 순간적으로 홀이 생겼다. 가공된 홀의 단면은 원뿔 형상으로서 레이저 받는 윗부분이 바닥 면 보다 넓었다(홀 바닥 면의 경우 0.3mm, 윗면은 0.6mm) 그림에서 보듯이 레이저파워가 50%를 넘어서면 홀 주위의 홀 입구가 심하게 열로 변형된다. 빔 조사 시간을 0.3, 0.2, 0.1 초로 변화시키면서 가공을 해본 결과 0.2 초가 적합함을 알게 되었다. Thruhole은 액체를 위층과 아래 층 사이의 연결을 해주는 역할을 하므로 그루브보다 단면형상의 중요성이 크지 않다(Fig. 5-4).

레이저를 이용한 그루브 가공의 다른 문제점은 빔의 가속/감속구간에서의 파워조절이다. 빔의 출력이 일정할 때, 속도가 느려지는 가속 구간에서 에너지가 집중되어 유로가 너무 깊어지는 문제가 있다. SIA의 경우 충분한 반응을

시키기 위해 홀딩코일의 길이를 길게 해야 하므로, 지그재그 형상으로 유로를 길게 설계한다. 따라서 가속 구간이 매우 짧게 되고 이러한 특성은 레이저 가공으로 미세유로를 만들 때 가장 어려운 문제를 야기하였다.

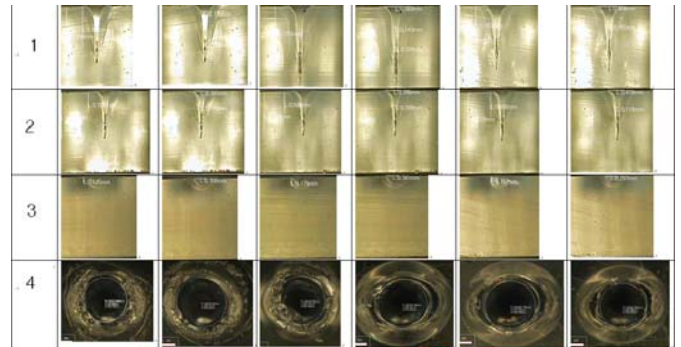


Fig. 5 Cross sectional photo. 1: 40%, 50-400mm/s, 2:30% 50-400mm/s, 3:20%,50-400 mm/s 4:75-30%,0.3sec

본 연구에서는 모든 유로 세그먼트에 대해 가속, 감속 구간에 대해 시행착오로 얻은 파워감쇄변수를 지정하여, 빔의 강도를 감쇄시켰다. 적당한 감쇄량은 등속구간에 대해 70%이었다. 그러나 레이저 파워 서플라이에서 Duty 비를 조절할 때, Duty 비 30%이하 구간에서는 Duty에 대한 빔의 파워가 선형적인 관계가 아니었다. 이러한 문제 때문에 빔의 파워가 15%이하가 되지 않도록 Fig. 6과 같이 파워감쇄변수를 일정한 휴리스틱 알고리즘으로 조정하였다.

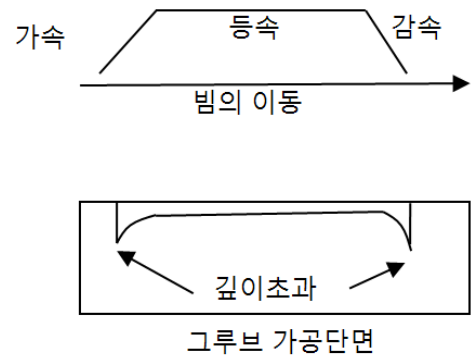


Fig. 6 Over-ablation at acceleration/deceleration

4. 결론

본 연구에서는 PMMA수지를 CO2 레이저를 이용하여 미세가공 하여 초소형 SIA 분석기를 구현하였다. 완성된 시스템은 80x50x70mm³ 이었다. 연구결과 SIA시스템에서는 미세유로의 단면형상이 중요한데, 횡적 단면을 보면 원뿔모양의 단면이 문제가 되었고 종적 단면에서는 유로의 양끝이 깊이가 너무 깊어지는 문제가 발견되었다. 본 연구에서는 시행착오법으로 레이저빔의 속도와 파워를 조정하여 가공을 수행하였으나, 향후 좀더 체계적이고 자동화된 미세유로 가공법을 개발하고자 한다.

참고문헌

1. J. Ruzicka, Analyst, 125, 1053, 2000
2. C. Wu, L. Scampavia, J. Ruzicka and B. Zamostb, Analyst, 126, 291-297, 2001
3. Q. Pu and S. Liu, Analytica Chimica Acta, 511, 105-112, 2004
4. H. Klank, J. Kutter and O. Geschke, Lab Chip, 2, 242-246, 2002