

## 워터젯을 이용한 블라스팅 유리 마이크로 채널의 표면거칠기 개선

손성균\*, 한솔이\*, 성인하\*\*, 김옥배\*\*

\* 한국산업기술대학교 기계설계공학과, \*\* 한남대학교 기계공학과

### Surface Smoothing of Blasted Glass Micro-Channels Using Abrasive Waterjet

Sung-Gyun Son\*, Sol-Yi Han\*, In-Ha Sung\*\* and Wook-Bae Kim\*†

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received February 13, 2013 ; Revised August 28, 2013 ; Accepted August 30, 2013)

**Key Words:** Glass Micromachining(유리미세가공), Surface Roughness(표면거칠기), Blasting(블라스팅), Waterjet Polishing(워터젯 연마), Microfluidic Device(미세유체소자)

**초록:** 파우더 블라스팅은 미세 유리가공법으로서 가공속도가 빠르고 저비용의 장점이 있지만 유리를 취성파괴 시키기 때문에 표면거칠기가 좋지않다. 블라스팅된 표면에 저압의 워터젯을 분사하여 표면에서의 연마 슬러리의 흐름을 통해 표면거칠기를 저감할 수 있다. 본 연구에서는 소다라임 유리에 블라스팅으로 마이크로 채널을 가공한 후 워터젯을 연속 적용하고, 마이크로 채널의 표면거칠기 및 단면 형상의 변화의 과정을 관찰하였다. 워터젯의 적용결과, 초기단계에서는 블라스팅에 의한 미세 요철이 제거되었고, 이후 표면하부의 크랙이 제거되어 평균 표면거칠기 50 nm 근방의 매끈한 표면을 얻을 수 있었다. 표면거칠기 저감에 동반하여 채널단면의 확장 과정도 함께 관측하였다. 마지막으로 제안한 방법에 의해 미세유체칩의 가공 결과를 제시하였다.

**Abstract:** Powder blasting, which is an efficient micromachining method for glass, silicon, and ceramics, has a critical disadvantage in that the surface finish is poor owing to the brittle fracture of materials. Low-pressure waterjet machining can be applied to smoothen the rough surface inside the blasted structure. In this study, the surface roughness and sectional dimension of micro-channels are observed during the repetitive application of a waterjet to blasted micro-channels. The asperities and subsurface cracks created by blasting are removed by waterjet machining. Along with the surface roughness, it is found that the sectional dimension increases and the edges of the finished micro-channel become slightly round. Finally, a microfluidic chip is machined by the blasting-waterjet process and a transparent microfluidic channel is obtained efficiently.

### 1. 서 론

유리소재는 높은 광학적 투과성, 화학적 안정성, 고경도, 보존성 등의 장점 때문에 마이크로 시스템 및 부품 소재로서 많이 사용되어왔다. 미세 유체(microfluidics) 분야의 경우, 폴리머 소재의 미세 복제기술이 많이 사용되고 있지만 온도안정성, 생체적합성 등 유리가 우수한 점도 많아 여전히 선

호되는 재료이다. 유리의 미세가공에는 여러가지 방법이 있다. 리소그래피(lithography) 기반의 습식 에칭법은 1 μm 정도의 미세한 형상정밀도를 구현할 수 있기 때문에 보편적으로 많이 사용되는 가공법이다. 그러나 불산(HF) 등의 반응용액은 환경과 인체에 극단적으로 위험한 단점이 있다. 건식 에칭은 습식에칭과 달리 비등방성(anisotropic)의 특징을 지니며 극미세의 정밀도가 구현되지만 가공속도가 매우 낮아 적용범위에 제약이 따르는 것이 단점이다.<sup>(1-3)</sup> 기계적 방법으로서 미세절삭(micro-cutting), 마이크로초음파가공(micro-ultrasonic machining)이 적용될 수 있으며, 대체로 구현가능

† Corresponding Author, [wkim@kpu.ac.kr](mailto:wkim@kpu.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 부품 형상에 자유도가 높은 대신에, 역시 가공 시간 소요가 많은 등의 이유로 시작품 제작에 한정되는 편이다.<sup>(4,5)</sup>

파우더 블라스팅은 연마입자를 유리 표면에 고속으로 투사하고, 표면의 국부적인 취성과파괴에 의해 형상을 구현하는 가공법이다. 공정비용이 매우 낮은 반면, 가공속도는 최대 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  에 이를 정도로 매우 빠르다는 장점이 있다. 그래서 블라스팅 가공은 마이크로 연료전지부품, 모세관 전기영동 칩, 마이크로 펌프 및 믹서 등 마이크로시스템의 넓은 영역에 두루 적용되어 왔다.<sup>(6-8)</sup> 아울러 클린룸 환경이 필요하지 않으며, 습식 블라스팅 방식을 이용하면 분진과 같은 환경문제도 완화할 수 있기 때문에 생산성도 매우 우수하다.

그러나 블라스팅의 문제점은 평균 표면거칠기가 0.7~2.5  $\mu\text{m}$  수준으로서 건식에칭법 등에 비해 매우 높다는 것이다. 취성과파괴에 의해 생성된 마이크로 채널 표면의 불규칙적인 요철과 표면하부로 이어진 크랙 때문에 제작된 미세유체 시스템의 성능의 안정성 및 신뢰성이 떨어져서 그 활용이 기피된다. 실제로, 블라스팅 가공 채널과 건식 및 습식에칭 가공 채널을 상호 비교할 때 전기영동(electrophoretic) 및 전기삼투(electroosmotic) 시스템에서의 이동도(mobility) 등 여러 특성의 차이가 있음이 보고 되었다.<sup>(9,10)</sup>

이에 파우더 블라스팅의 높은 표면거칠기를 저감하고자 하는 몇몇 연구가 있었다. 주로 블라스팅 가공에 의해 마이크로 구조를 형성한 뒤에, 표면거칠기를 낮추기 위한 후공정을 실시하는 것이었다. Wensink 등<sup>(11)</sup>은 후공정으로서 보다 작은 입자에 의한 포스트블라스팅(post-blasting), 아닐링(annealing), 불산 에칭을 실시하였으나 Ra 1  $\mu\text{m}$  수준으로서 표면거칠기 개선효과가 크지 않았다. 최근 Mineta 등<sup>(12)</sup>은 Pyrex 유리에 습식 블라스팅에 의한 마이크로 채널 가공에서 Ra 200 nm 수준을 달성하고, 후공정으로서 투사입자의 운동에너지(분사속도)를 낮추어 Ra 100 nm 수준의 크랙 없는 표면을 구현하기도 하였다. 그러나 표면거칠기가 저감에 소요되는 속도가 상당히 느려 한 지점에서만 30 분 이상 소요되는 것으로 보고되었다. 이것은 디바이스 전체 가공에서는 훨씬 긴 시간이 필요로 하므로 효율성이 좋지 않다.

연마입자를 함유한 워터젯에 의한 연마법은 수백 bar 이상의 고압의 절단용 워터젯과 달리, 저압(3~20bar)으로 피가공 소재에 제트줄기를 분사하여 가공한다. 주로 초정밀 광학소자의 마무리 가공으

로서 형상오차 보정에 적용되고, 또한 금형 및 경면 부품의 표면거칠기 저감이나 특정 파장의 주파수 제거 등에 적용되기도 하였다. 초정밀 유리 렌즈의 경우, 최종 마무리 가공에 의해 수 nm 수준의 표면거칠기를 구현 가능한 것으로 보고되었다. 이것은 낮은 운동에너지를 갖는 연마입자가 표면에 비스듬히 충돌할 때 취성소재의 표면에서 연성(ductile) 절삭에 의한 재료제거가 일어나기 때문이다.<sup>(13)</sup>

본 연구에서는 워터젯 연마의 새로운 응용으로서, 습식 파우더 블라스팅과 워터젯을 하나의 장치에서 연속으로 적용하여, 유리소재에 표면거칠기가 매우 낮은 마이크로 채널 가공법을 제안하였다. 블라스팅에 의해 형성된 마이크로 채널에 워터젯을 적용하여 채널의 표면거칠기 및 단면형상의 변화를 관찰하고 그 결과를 분석하고자 한다.

## 2. 실험조건 및 방법

### 2.1 가공방법

Fig. 1에 제안하는 가공방법을 나타내었다. 첫째, 유리기관 위에 금속 박판으로 된 마스크를 배치하고 마스크 개구부의 치수와 형태에 따라 적정의 분사조건으로 유리를 미세가공한다. 둘째, 마스크를 제거하고 블라스팅에 의해 가공된 패턴을 따라 워터젯을 표면에 수직 분사한다. 두 가공에서 모두 패턴을 따라 노즐을 이동하게 된다.

워터젯은 마스크를 빠르게 마모시키고, 높은 제트 압력으로 인해 마스크와 유리기관의 안정적인 접합상태가 유지되지 않으므로 워터젯 가공에서는 마스크를 제거한다.

### 2.2 피가공소재

피가공 재료로서 소다라임(soda-lime) 유리를 선택하였다. 내열유리인 Pyrex 유리에 비해 열팽창률이 크지만, 기계적 물성은 유사하며 미세유체소자 등에 자주 사용되고 있다. Table 1에 소다라임 유리의 밀도, 탄성계수, 경도, 파괴인성을 나타

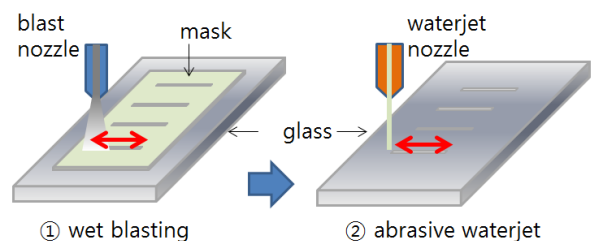


Fig. 1 Machining scheme for super-smooth  $\mu$ -channel

**Table 1** Material properties of soda-lime glass<sup>(14)</sup>

Density	Young's modulus	Vickers hardness	Fracture toughness
2.52g/cm <sup>3</sup>	86.1 GPa	5.7 GPa	0.74 MPa·m <sup>0.5</sup>

**Table 2** Two channels through the different mask aperture

	Channel A	Channel B
Aperture width in mask	170 μm	52 μm
Length	10 mm	

내었다.

### 2.3 마스크킹 방법

미세패턴을 위한 블라스팅 가공에서는 감광성 드라이필름(dry-film), 폴리머 코팅(PDMS, polyimide, SU-8 등), 금속도금 등 다양한 방법이 적용될 수 있다.<sup>(15)</sup> 여기에서는 스테인레스스틸(SUS 316) 박판(0.1t)에 레이저가공을 하여 채널 개구부를 형성하였다. 이러한 방법은 마스크의 두께가 두꺼워지는 단점이 있지만, 포토리소그래피(photolithography) 공정을 필요로 하지 않아 제작이 간단하고, 마스크 마모율이 매우 낮아 마스크를 반복해서 사용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 마스크의 채널 개구부 선폭을 2종으로 선정하여 결과를 관찰하고자 하였다.

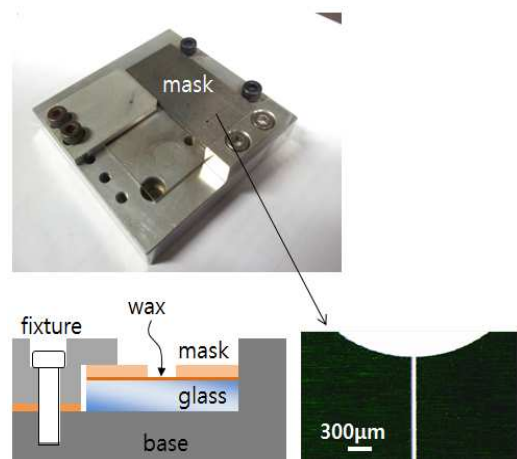
Fig. 2와 같이 베이스 위에서 마스크와 유리를 고정구를 이용하여 구속하였으며, 마스크와 유리 사이의 들뜸이 없도록, 시편고정용 왁스를 접합재로 사용하였다. 고화된 왁스는 잘 부스러지기 때문에 블라스팅 초기에 제거되었다.

### 2.4 가공장치

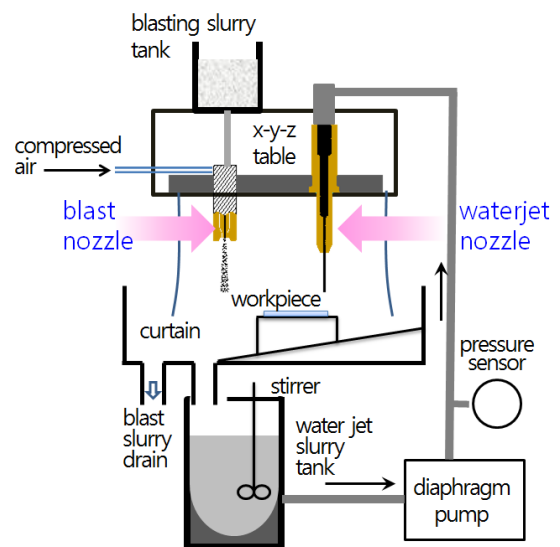
Fig. 3은 실험장치의 개요를 나타낸다. 습식 블라스팅과 위터젯 공정을 연속으로 수행할 수 있도록 3축 이송테이블에 블라스팅 노즐과 위터젯 노즐을 나란히 고정하였다. 블라스팅용 2 유체(two fluids) 노즐을 사용하여, 압축공기와 함께 상단의 용기(tank)의 슬러리가 함께 분무된다. 노즐의 출구직경은 1.5 mm, 스프레이의 퍼짐각도는 15도이다. 위터젯은 장치하단의 다이어프램(diaphragm) 펌프를 이용하여 발생시키며, 분사된 제트는 용기로 다시 수거되어 순환한다. 다이어프램 펌프 출구측에 댐퍼를 설치하여 토출압력을 안정화한 결과, 압력의 진동폭은 0.1 bar 수준으로 유지되었다.

**Table 3** Size of alumina particles and air pressure for the channel A and B in blasting

	Channel A	Channel B
Abrasive	Alumina #600 (Ave. Dia. 20 μm, Max. Dia. 53 μm)	Alumina #1000 (Ave. Dia. 11 μm, Max. Dia. 32 μm)
Air pressure	2 bar	3 bar



**Fig. 2** Masking and fixture for the blasting of glass



**Fig. 3** Schematic of experimental setup

위터젯 노즐의 직경은 1.5 mm, 원형부 직선길이는 15 mm이다.

### 2.5 가공조건

블라스팅은 노즐과 유리표면 간의 간격(stand-off)을 5 mm로 설정하였고, 노즐을 마스크의 개구부를 따라 1 mm/s의 이송속도로 11회 왕복시켜서

채널을 가공하였다. 슬러리는 알루미나(alumina) 입자를 물에 질량기준 5:95의 비율로 분산하여 사용하였으며, Table 3 과 같이 마스크 선폭에 따라 입자크기와 공기압을 달리하였다.

복수개의 채널가공이 끝난 후 마스크를 제거하고 워터젯 가공을 실시하였다. Channel A 와 B 에 대해 같은 조건을 적용하였으며 알루미나 #2500 (평균입경 5.5 μm)를 물과 섞어 5wt%가 되도록 하였다. 워터젯 분사속도를 파악하기 위해서, 펌프 모터의 회전수에 따른 1 분간의 분사 슬러리의 체적을 확인하였고, 본 실험에서는 체트속도 35 m/s 를 유지하였다.

또한 블라스팅 때와 같이 노즐-유리시편 간격을 5 mm 로 유지하고, 이송속도 1 mm/s 로 하여 기 가공된 블라스팅 채널을 따라 왕복운동한다. 워터젯

가공에 따른 마이크로 채널 표면거칠기의 변화 과정을 보기 위해 왕복스캔 횟수를 2, 4, 6 회로 하여 결과를 관측하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 블라스팅에 의한 마이크로 채널의 형성

설명한 조건에 의해 channel A 는 폭 186 μm, 깊 이 36 μm 의 채널이 형성되었고, channel B 는 폭 85 μm, 깊이 46 μm 의 채널이 형성되었다. 실제 마스크 개구부 폭보다 넓어진 이유는 마스크의 두께가 두꺼워 충돌 전후의 입자들이 서로 부딪히면서 채널의 폭 방향으로 erosion 이 발생했기 때문으로 추정한다. 블라스팅의 상세결과는 이하 워터젯 공정 결과와 함께 제시한다.

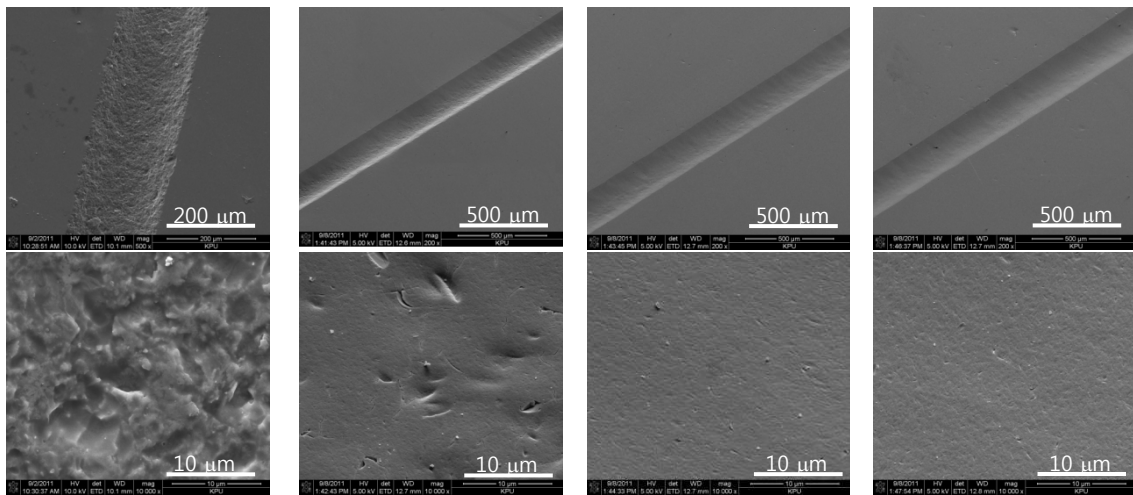


Fig. 4 SEM images of channel A and close-up of the bottom surface after the blasting and during different passes of the waterjet

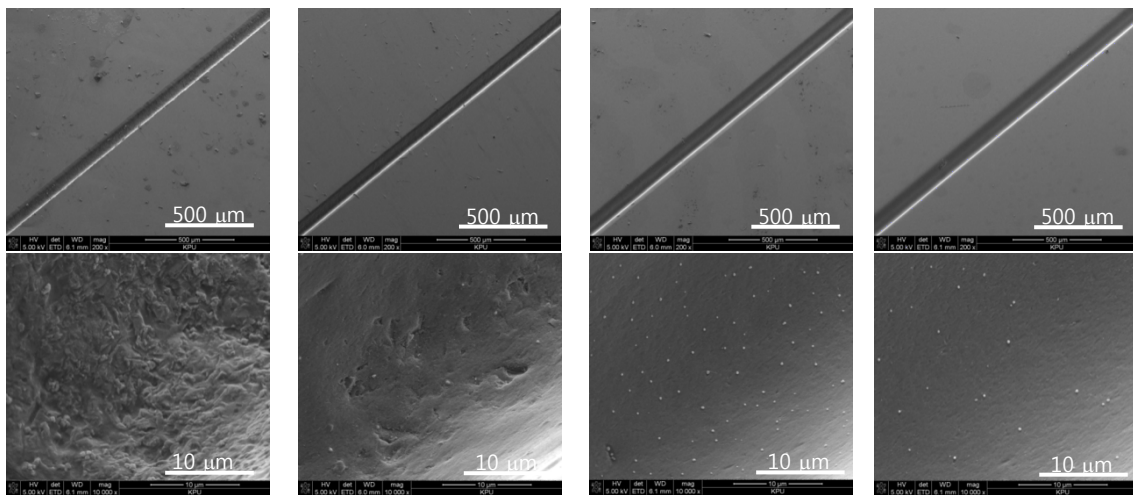


Fig. 5 SEM images of channel B and close-up of the bottom surface after the blasting and during different passes of the waterjet

3.2 표면거칠기

Fig. 4, Fig. 5 에 각각 channel A, channel B 에 대한 블라스팅 직후 및 워터젯 가공의 스캔 횟수에 따른 각 채널의 형태와 채널 내부 표면에 대한 SEM 이미지를 나타내었다. Fig. 4 에서, 블라스팅 직후의 표면이 재료의 취성과파괴에 의해 매우 거칠게 보여진다. 다음, 워터젯으로 4 회 스캔하였을 때에는 표면의 미세 요철이 상당히 제거되고, 블라스팅 시에 발생한 크랙들이 선명하게 나타나고 있다. 워터젯의 스캔횟수가 8 회에 이르면 요철들과 크랙이 거의 사라졌다. 그리고 연마입자가 표면에 낮은 각도로 부딪힐 때 발생한 나노규모의 압입 흔적만 남아있다. 12 회에는 8 회와 큰 차이가 보이지 않고 표면거칠기 개선은 완료된 것으로 판단된다.

Channel B 는 channel A 에서 보다 작은 입자를 블라스팅에 적용하였으므로 표면상의 요철이 보다 촘촘하게 형성된 것을 알 수 있다. 워터젯으로 4 회 스캔하였을 때, 표면의 요철이 뚜렷히 줄어들었으며, 잔류 크랙들이 확인된다. 역시 8 회와 12 회에 이르면서 표면거칠기 변화는 거의 파악하기 어렵다.

알파스텝(AlphaStep 500, Tencor Instrument)을 이용하여 채널 바닥면의 평균표면거칠기를 측정하였다. 채널의 길이방향을 따라 100 μm 의 길이를 5 μm/s 속도로, 3 개소에서 측정하였으며 그 평균값을 Fig. 6 에 도시하였다. 두 채널에서 공통적으로 워터젯 가공 초기에 표면거칠기가 빠르게 감소하고, 워터젯의 스캔횟수가 8 회, 12 회 사이에서는 거칠기 변화가 크지 않다. Channel A 의 경우는 블라스팅시에 channel B 에 비해 상대적으로 큰 입자가 적용되었지만 블라스팅 표면거칠기는 다소 낮은 편이며, 이후 워터젯 반복시에도 표면거칠기가 더 낮다. 이것은 워터젯 적용전의 표면거칠기가 더 작은 원인이 있었지만, channel A 의 폭이 넓고 깊이는 얇기 때문에 워터젯에 의한 표면 흐름시에 channel A

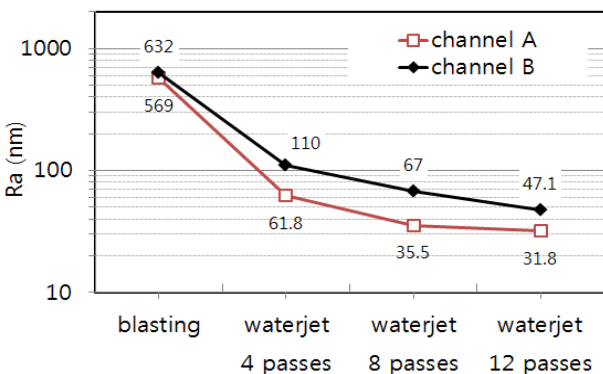


Fig. 6 Transition of average surface roughness of the channels A and B

내부에서 유동성이 더 좋기 때문으로 생각된다.

3.3 채널 단면의 변화

블라스팅에 의해 발생하는 표면 하부로의 크랙의 길이는 입자의 충돌에너지에 비례하여 증가하며 대체로 수 μm 에 이른다고 판단된다.<sup>(16)</sup> 이러한 크랙을 제거하고 매끄러운 표면을 얻으려면 워터젯 과정에서 크랙층의 깊이만큼 재료를 제거해야 한다. 따라서 마이크로 채널의 단면의 크기와 형상의 변화가 수반될 수 밖에 없다.

Fig. 7 은 블라스팅과 워터젯 반복회수에 따라 channel B 의 단면에 대한 SEM 이미지이다. 워터젯이 반복됨에 따라서 채널의 깊이는 깊어지고 폭도 또한 넓어지고 있다. 또한 채널의 모서리부분이 점차 완만해지면서 12 회 적용되었을 때 곡률이 비교적 커졌음을 확인할 수 있다.

알파스텝에서 마이크로채널의 횡방향 200 μm 을 스캔하여 채널 폭을 측정된 결과를 Fig. 8 에, 채널 깊이를 측정된 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. Channel A 는 최초 186 μm 에서 워터젯 12 회 스캔 후 290 μm 으로 증가하여 폭이 56 % 증가하였고, channel B 는 85 μm → 133 μm 이 되어 역시 똑같이 56 % 폭이 증가하였다. 깊이는 channel A 의 경우 36 μm → 48 μm 으로 약 33 % 깊어졌고, channel B 의 경우 46 μm → 72 μm 로서 약 56 % 깊이가 깊어졌다.

Channel A 의 경우, 폭과 깊이의 변화에 편차가 있지만 channel B 는 양 방향으로의 변화율이 거의

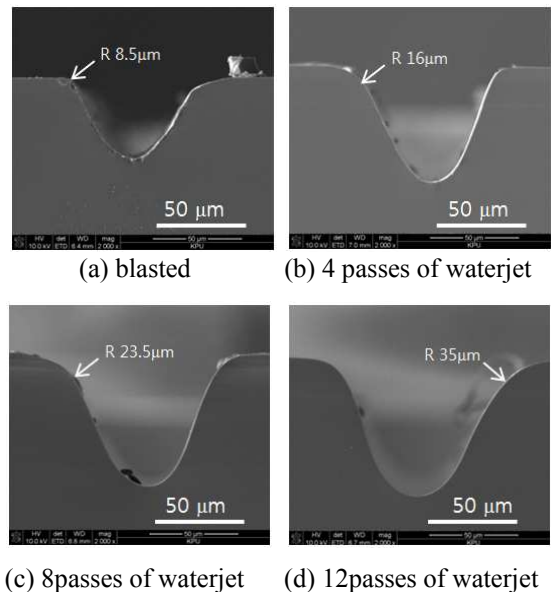


Fig. 7 Cross-sectional view of the channel B

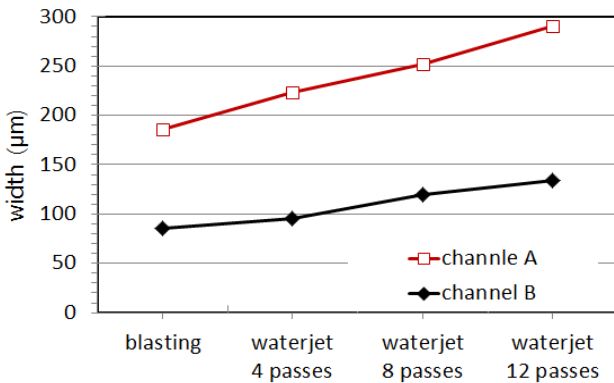


Fig. 8 Dependency of the width of the channels A and B on the pass numbers of the waterjet

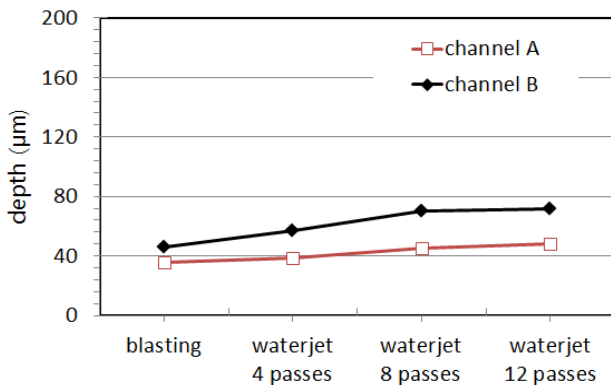


Fig. 9 Dependency of the depth of the channels A and B on the pass numbers of the waterjet

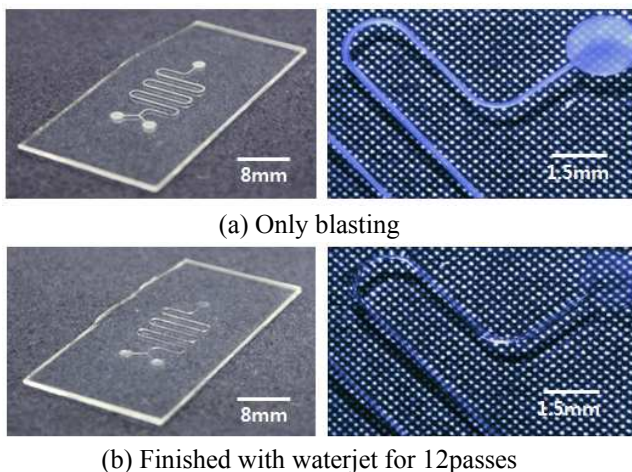


Fig. 10 Comparison of the machined microfluidic chips before (a) and after (b) waterjet

동일하였다. 이것은 channel B의 단면 세장비가

#### 4. 미세유체칩의 제작

본 연구에서 제안한 방법에 의해 지그재그 패턴을 갖는 미세유체칩(microfluidic chip)을 제작하였

다. Fig. 10에 워터젯을 적용하기 전후에 칩의 형태와 패턴부의 확대 사진을 나타내었다. 패턴의 영역은 가로 10.2 mm, 세로 24.7 mm이며, 마스크의 선폭은 150 µm을 적용하였다. 그림에서 블라스팅에 의해 불투명한 채널은 워터젯을 12회 스캔한 결과 경면화 되어 표면거칠기가 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 블라스팅으로 가공된 마이크로 채널에 대해 저압의 워터젯으로 연마가공을 수행하여 채널의 표면거칠기 변화를 관측하였다. 제트가 표면에 수직으로 충돌한 후 피가공물 평판 위에서 퍼져나가는 전단흐름에서, 마이크로 채널의 길이방향 유동이 발생하게 되고 채널 내부로 빠르게 흐르는 슬러리에 의해 미세 돌기가 빠르게 제거되고, 이후 표면하부의 크랙의 제거로 이어져 매끈한 표면이 형성된다. 블라스팅으로 마이크로 채널 형성 시 Ra 0.57 µm의 표면거칠기를 가지나 워터젯 반복 스캔으로 Ra 47 nm 수준의 표면을 얻을 수 있었다.

한편 채널 모서리의 라운딩(rounding) 효과는 디바이스로서 성능을 저해하는 요인이 될 수도 있으므로 이후 워터젯 연마의 최적화 또는 후공정 등을 통해 라운딩을 최소화하기 위한 방안을 연구하고자 한다.

본 논문에서 제안한 방법에 따라 지그재그 패턴을 갖는 미세유체칩을 제작하였다. 블라스팅과 워터젯을 연속적으로 적용함으로써 채널표면이 매끈한 칩을 가공할 수 있었다. 특히 기존의 다른 미세 유리 가공법에 비해 가공속도가 빠르고 제조비용이 낮아, 고품위 표면이 필요한 유리의 미세 가공 시에 본 방법이 매우 효과적일 수 있다.

#### 후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0004018).

#### 참고문헌

- (1) Geschke, O., Klank, H. and Tellemann, P., 2004, *Microsystem Engineering of Lab-on-a-Chip Devices*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 161~168.
- (2) Zribi, A. and Fortin, J., 2003, *Functional Thin Films*

- and Nanostructures, Springer Science+Business Media, New York, pp. 70~72.
- (3) Ilescu, C. Chen, B. and Miao, J., 2008, "On the Wet Etching of Pyrex Glass," *Sens. Actuator A*, Vol. 143, pp. 154~161.
- (4) Jeon, S. K., Shin, Y. J., Kim, B. H., Kim H. Y. and Jeon, B. H., 2003, "Micro-Machining of Glasses using Chemical-assisted Ultrasonic Machining," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 12, pp. 2085~2091.
- (5) Takeuchi, Y., Sawada, K. and Sata, T., 1996, "Ultraprecision 3D Micromachining of Glass," *CIRP Annals*, Vol. 45, No. 1, pp. 401-404.
- (6) Sayah, A., Thivolle, P. A., Pararshar, V. K. and Gijs, M. A. M., 2010, "Three-dimensional Mixers with non-Planar Microchannels in a Monolithic Glass Substrate using Oblique Powder Blasting," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, 085028.
- (7) Jauregui, A. L., Siller, H. R., Rodrigues, C. A. and Elias-Zuniga, A., 2010, "Evaluation of Micromechanical Manufacturing Processes for Microfluidic Devices," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 48, pp. 963~972.
- (8) Shen, M., Walter, S., Dovat, L. and Gijs, M. A. M., 2011, "Planar Micro-Direct Methanol Fuel Cell Prototyped by Rapid Powder Blasting," *Microelectronic Engineering*, Vol. 88, pp. 1884~1886.
- (9) Kirby, B. J. and Hasselbrink, E. F., 2004, "Zeta Potential of Microfluidic Substrates: 1. Theory, Experimental Techniques, and Effects on Separation," *Electrophoresis*, Vol. 25, pp. 187~202.
- (10) Ghobeity, A., Crabtree, H. J., Papini, M. and Spelt, J. K., 2012, "Characterisation and Comparison of Microfluidic Chips formed using Abrasive Jet Micromachining and Wet Etching," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 22, 025014.
- (11) Wensink, H., Schalausmann, S., Goedbloed, M. H. and Elwenspoek, M. C., 2002, "Fine Tuning the Roughness of Powder Blasted Surfaces," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 616-620.
- (12) Mineta, T., Takada, T., Makino, E., Kawashima, T. and Shibata, T., 2009, "A Wet Abrasive Blasting Process for Smooth Micromachining of Glass by Ductile-Mode Removal," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 19, 015031.
- (13) Hutchings, I. M., 1992, "Ductile-Brittle Transitions and Wear Maps for the Erosion and Abrasion of Brittle Materials," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 25, pp. 212~221.
- (14) Wensink, H. and C.Elwenspoek, M., 2002, "A closer look at the Ductile-Brittle Transition in Solid particle Erosion," *Wear*, Vol. 253, pp. 1035~1043.
- (15) Wensink, H., Jansen, H. V., Berenschot, J. W. and Elwenspoek, M. C., 2001, "Mask Materials for Powder Blasting," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 10, pp. 175~180.
- (16) Slikkerveer, P. J., Bouten, P. C. P., Veld, F. H. and Scholten, H., 1998, "Erosion and Damage by Sharp Particles," *Wear*, Vol. 217, pp. 237~250.