

## 미세입자 분사가공에서 SU-8 마스크의 특성

고태조#, 박동진\*, 김희솔\*\*

### Characteristics of SU-8 Mask for Abrasive Jet Machining

Tae Jo Ko#, Dong Jin Park\* and Hee Sool Kim\*\*

#### ABSTRACT

Abrasive jet machining (AJM) has been traditionally used for removing rusts or paints. Nowadays, this is promising technology for micro bulk machining where brittle substrate materials are used. In order to get accurate details, masks such as metal, polymer or elastomer is inevitable. Among them, photo polymer which is sensitive to the light has been attractive for its high accuracy using photolithography. In this research, SU-8 as a photo polymer is used since it is adequate for making thick mask. So, this paper describes how to make AJM masks using SU-8 with a photolithography process, and investigates the characteristics of SU-8 masks during AJM process. Also, an example of fabrication using AJM was shown.

**Key Words** : Abrasive jet machining(입자분사가공), Photolithography(사진식각공정), Mask(마스크), Micro machining(미세가공), Selectivity(선택성)

#### 1. 서론

미세입자 분사가공은 녹 또는 도색의 제거, 버 제거, 표면처리 등의 용도로 사용되어 왔다. 이 공정은 최근 들어 PDP나 LCD에서 주로 사용되는 유리의 미세가공, 반도체 제작공정이나 MEMS 공정 등에 적용되는 실리콘과 같은 세라믹 재료의 미세 가공분야에서 주목 받고 있다. 한편, 세라믹 재료는 파괴인성이 매우 낮고 취성이 강하기 때문에 크랙 발생 후 큰 응력이 연속적으로 주어지면 크랙은 음속으로 진행되어 파단 되는 특성이 있어서 일반적인 기계가공이 매우 어렵다. 따라서 세라믹 재료를

가공하기 위해서는 식각 등 화학적인 가공 방법, 광원의 열을 이용하여 가공하는 방법, 또는 크랙진전이 되지 않는 기계가공방법을 이용해야 한다.

그 중 미세입자 분사가공은 크랙진전이 되지 않는 기계가공 방법으로서 광원을 이용하는 것에 비해 경제적이며 가공 변질층이 없다. 또한 화학적 방법보다 가공시간이 짧고 언더컷의 발생이 없으며 초음파가공 등의 기타 기계적 가공방법에 비해 가공능률이 높은 장점이 있다. 그러나 미세입자분사가공으로 정밀한 형상을 가공하기 위해서는 패턴 마스크의 사용이 필수적이다.

현재 사용 가능한 패턴 마스크로서는 연질금속

접수일: 2006년 4월 10일; 게재승인일: 2006년 11월 5일

# 교신저자: 영남대학교 기계공학부

E-mail: tjko@yu.ac.kr Tel. (053) 810-2576

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

박막, 고무와 같은 탄성체(elastomer) 박막, 그리고 에폭시 기반 SU-8과 같은 광경화성수지이다.<sup>1,4</sup> 이 중에서 탄성체 박막이나 광경화성 수지는 반도체 제조공정에서 사용하는 노광공정을 이용하면 미세한 패턴 마스크를 성형하기가 쉽기 때문에 널리 이용된다.<sup>5,6</sup> 이러한 패턴 마스크는 선택성(selectivity)이라는 지수로서 마스크의 내마멸성을 평가하게 된다. 즉, 마스크에 대한 시편의 마멸율로서 마스크로 사용이 가능한지 결정되게 된다. 한편, 광경화성 SU-8 수지의 경우에는 미소제품에 대해서 패턴마스크를 만들기가 쉽고, 두께를 1mm까지 적층할 수 있다. 또한, 기존의 반도체 제조공정을 적용할 수 있다는 장점이 있는 반면, 취성이 강하여 내마멸성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 이유 때문에 탄성체 박막보다는 널리 사용되지 못한다. 그러나 MEMS 적용이나 Bio-MEMS 등의 분야에서는 미소 크기의 시편에 대해 입자분사가 가공되는 예가 증가하고 있으며, 이 경우에는 광경화성 수지를 이용한 사진식각공정이 패턴 마스크를 형성하는데 적당한 것으로 보인다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 광경화성 수지인 SU-8을 이용하여 반도체 제조공정의 하나인 사진식각 공정을 사용하여 미세입자분사가공을 위한 패턴 마스크를 형성하는 기법에 대해 연구하고자 한다. 이를 바탕으로 미세입자 분사가공에서 SU-8 마스크의 마멸특성과 형태 및 이에 따른 미세입자 가공 현상을 조사하고자 한다. 또한, 이 공정을 이용하여 마이크로 믹서를 위한 채널을 가공하여 봄으로써 미세입자분사가공의 가능성을 제안하고자 한다.

## 2. 미세입자분사가공

### 2.1 가공원리

미세입자 분사가공은 고압의 공기압에 의해 미세입자를 가속시켜 그 충돌에너지에 의하여 가공물을 가공하는 방법이다. 입자분사가공의 기본모델은 Fig. 1과 같다.<sup>7,9</sup> 즉, 입자가 모재에 충돌하게 되면 모재의 표면에는 소성영역이 국부적으로 생기게 되고 충돌에너지는 소재의 내부로 전달되어서 소재의 제거에 직접적으로 영향을 미치는 측면크랙(lateral crack)과 표면결함과 강도저하를 일으키는 반경크랙(radial crack)으로 전파된다. 계속되는 입자의 분사에 의해 측면크랙의 길이가 표면과 만나거

나 또는 인접한 영역의 측면크랙과 만나게 되면 소재는 떨어져나가면서 침식을 일으키게 된다. 이러한 일련의 과정에 의해 미세입자분사가공이 이루어진다. 미세입자분사가공에 대해서 마멸형상예측 또는 마멸율에 관한 많은 이론적 모델이 개발되어져 있으나, 대표적으로는 식 (1)과 같은 마멸율 모델이 자주 사용된다.<sup>9</sup> 여기서,  $v$ 는 입자의 분사속도,  $d$ 는 입자의 직경,  $\rho$ 는 입자의 밀도,  $Kc$ 는 모재의 파괴인성, 그리고  $H$ 는 모재의 경도이다.

$$W \propto v^{e1} d^{e2} \rho^{e3} Kc^{e4} H^{e5} \quad (1)$$

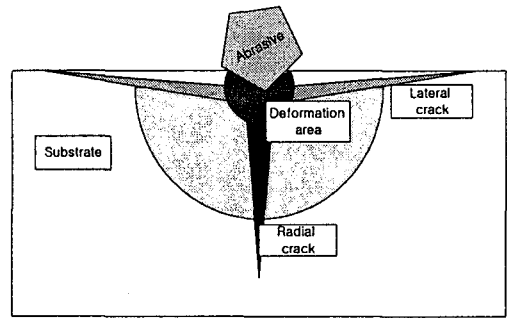


Fig. 1 The indentation process giving micro cracks

미세입자 분사가공에 사용되는 분사입자는 노즐재료로 사용되는 탄화황소보다 경도가 낮은 알루미늄 세라믹 또는 탄화규소가 주로 사용되고, 이외에 여러 가지 다양한 미세 입자를 사용할 수 있다. 경우에 따라서는 가장 단단한 재료인 다이아몬드 입자가 사용되기도 한다. 입자의 크기는 통상 5~200 $\mu$ m가 사용되고 있다. 미세입자의 조건으로는 일반적으로 강도와 경도가 높고 화학적 성질에 안정적이고 입도가 일정해야 하며 저가이어야 한다. 사용목적에 따라 미세입자는 등근형상, 다각형상이 될 수 있다. 그리고 주로 가공되는 세라믹 재료로는 소다라임유리, 실리콘, 지르코니아, 알루미늄, 질화규소, 탄화규소 등이 있다.

### 2.2 패턴 마스크를 한 미세입자분사가공

미세입자 분사가공에서는 미세한 형상을 가공하기 위하여 패턴 마스크로 시편을 보호하여야 한다. Fig. 2는 패턴 마스크를 씌운 상태에서 입자분사가공을 실시하는 기본 모형을 나타낸다. 마스크

재료로서는 금속재료를 사용하는 경질마스크와 고분자재료를 사용하는 연질마스크로 나눌 수 있다. 미세입자 가공도중 패턴 마스크와 모재는 각각 서로 다른 비율로 제거가 되면서 가공형상을 얻을 수 있다. 특히, 경질의 세라믹 가공이나 두꺼운 소재를 가공하기 위해서는 경질재료를 이용한 마스크를 사용하여야 하지만 마스크제작 방법이 어렵다. 한편, 연질마스크는 내구성이 경질마스크에 비해서 낮지만 쉽게 미세패턴을 제작할 수 있는 장점이 있다. 주로 많이 사용되는 연질마스크로서는 일본의 ORDYL사의 BF400시리즈가 많이 사용된다. 이것은 마스크를 모재위에 접착시키는 접착(Laminate) 과정 후 노광 및 현상의 공정순서로 미세패턴을 제작하게 된다. 그러나 마스크 두께를 충분히 두껍게 할 수 없으며, 우레탄 계열의 원료를 사용하므로 열에 약한 단점이 있다.

본 연구에서는 서론에서 언급하였듯이 사진식각공정을 이용하여 연질마스크 미세패턴을 제작하였다. 음성감광제의 한 종류인 Micro Chem사의 SU-8 #100을 마스크 재료로 사용하였는데, 이는 열경화성 수지인 에폭시 계열의 원료를 사용하고 있다. SU-8은 최소 제작 가능 선폭이  $2\mu\text{m}$  내외로 제작 가능하고, 우레탄계열의 연질마스크 BF400에 비해 원하는 두께의 마스크를 한번에  $200\mu\text{m}$  이상 얻을 수 있다.<sup>10-11</sup>

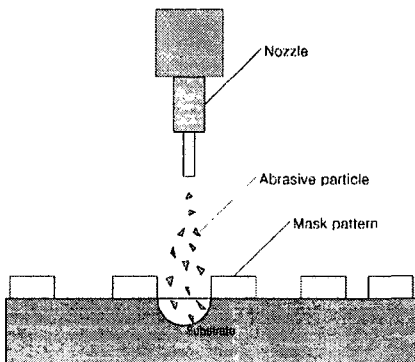


Fig. 2 The principle of micro abrasive jet machining with pattern mask

### 3. 실험준비

#### 3.1 실험장치 및 방법

실험에 쓰인 미세입자분사 가공기는 미국의

CRYSTAL MARK사의 SWAM BLASTER MV-241이다. 입자분사를 위한 노즐은 보론 카바이드 재질로 되어 있으며, 노즐 폭  $0.15\text{mm}$ , 길이  $1.5\text{mm}$ 의 사각형노즐과 내경이  $0.28\text{mm}$ 인 원형노즐을 사용했고, 분사가공에 사용한 입자는 모든 실험에서 직경  $17\mu\text{m}$ 의 알루미늄 세라믹을 사용하였다.

실험에 쓰인 시편은 실리콘 웨이퍼와 소다라임 유리이다. 패턴 마스크 제작을 위하여 사용한 마스크 얼라이너는 독일의 Karl Suss사의 MJB3 1000uv이고 사용파장은  $350\text{nm}$ 이다. SU-8을 실리콘 웨이퍼 위에 도포하기 위해서 사용한 스펀코터는 LAURELL사의 WS-400이고, 건조를 위하여 오븐을 사용하였다. Table 1은 실험조건이다.

Table 1 Experimental conditions

SOD (stand off distance)	7mm, 20mm
Impact angle	90°
Pressure	0.28MPa(40psi)
Blasting time	15sec, 20sec, 30sec

#### 3.2 패턴 마스크 제작

SU-8의 마스크 특성을 알아보기 위하여 실리콘 웨이퍼 위에 패턴 마스크를 형성하였다. 패턴을 만드는 공정순서는 Fig. 3과 같다.

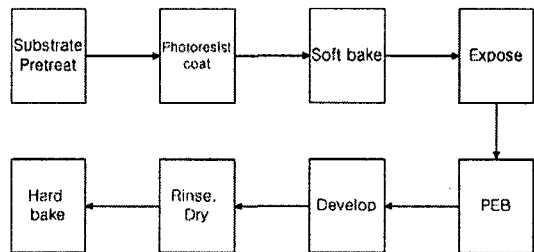


Fig. 3 The sequence of photolithography for SU-8

먼저 웨이퍼와 마스크 사이의 접착력을 높이고 잔류물을 제거하기 위하여 웨이퍼 세정을 RCA 세정방법 중의 하나인 piranha 용액 속에서  $120^\circ\text{C}$ 의 온도로 세정한 후 오븐에서 건조를 하였다. 그리고 웨이퍼 위에 SU-8을 도포하여 스펀코터로 회전시켜서 원하는 두께의 마스크를 생성했다. 스펀코팅 실험을 통하여 알아본 회전수당 얻을 수 있는 코팅

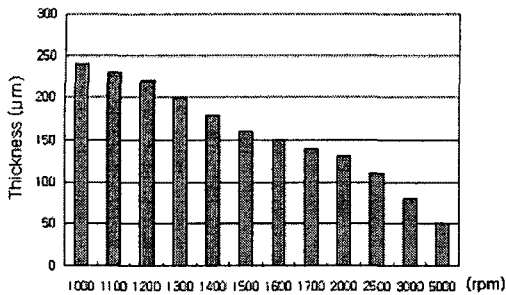
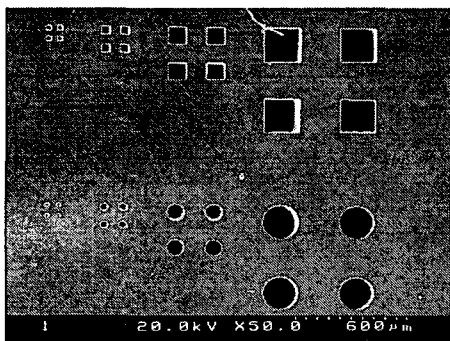


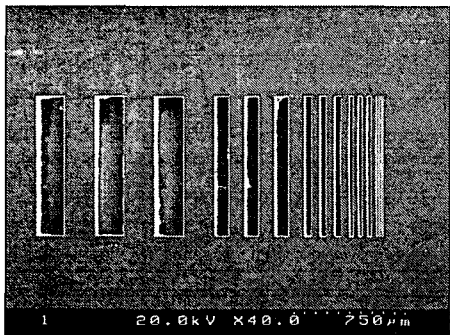
Fig. 4 Coating thickness according to spinning speed during 25 second

두께를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 스핀시간은 25 초로 고정하고, 스핀 회전수만 변화시키면서 코팅 두께의 특성을 관찰한 값이다. 실험결과, 주축 회전수에 따라서 코팅의 두께를 조절 할 수 있음을 알 수 있다.

도포 후 30분간 이완시간을 가지고 소프트 베이 크를 200μm 두께 기준으로 55℃에서 20분 실시한



(a)



(b)

Fig. 5(a), (b) SU-8 pattern mask (thickness 200μm)

후 온도를 천천히 올려 90℃에서 100분간 실시하고 천천히 온도를 내렸다. 이 공정이 과도하면 응력에 의해 패턴이 일그러지게 된다. 또한 냉각과정이 급속히 진행되면 크랙이 발생됨을 보였다. 다음 공정으로 노광을 350nm 파장으로 소다라임유리는 80초, 실리콘 웨이퍼는 70초간 각각 시행하였다. 실리콘 웨이퍼는 반사파의 영향으로 웨이퍼와 SU-8이 접촉된 부분에 볼록한 형태로 패턴형상이 커져서 노광시간을 줄여서 시행 하였다. 노광 후 PEB(post exposer bake)를 55℃ 온도로 20분간 실시한 후 천천히 온도를 올려 90℃에서 50분간 실시하였다. 현상을 하고 패턴 마스크 공정을 마쳤다. Fig. 5(a)와 (b)는 SU-8을 이용해 폭이 200μm, 100μm, 50μm, 30μm로 사각형과 원형 패턴을 만든 것을 SEM으로 관찰한 사진이다.

#### 4. 실험결과

Fig. 6은 임의의 가공조건에 대하여 가공시간의 변화에 따라서 미세입자 분사가공시 실리콘 웨이퍼와 SU-8 마스크 패턴의 변화를 나타낸다. 가공하기 전의 상태부터 아래로 갈수록 마스크 및 모재의 마멸(침식)이 증가함을 보인다. SU-8은 모서리 부분에서 마멸이 일어나 원형형태로 마멸되는 양상을

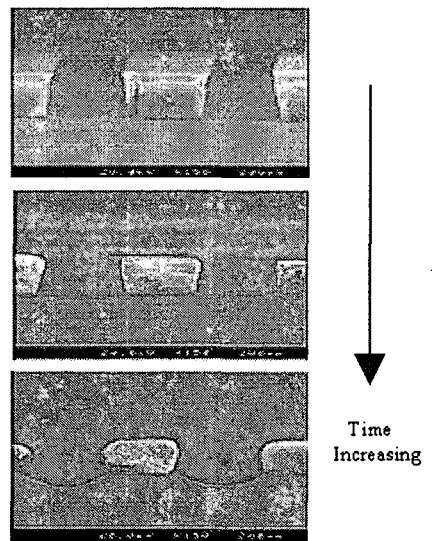
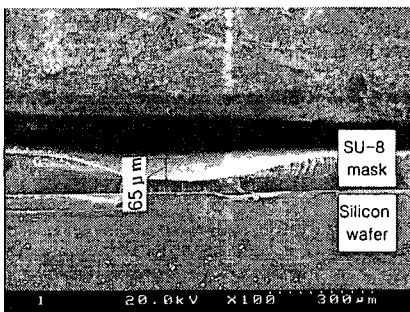


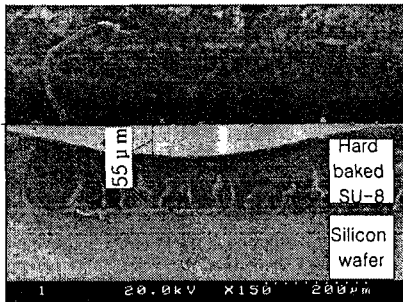
Fig. 6 Erosion of silicon wafer and SU-8 pattern mask along with machining time

보이고 실리콘 웨이퍼는 가공깊이가 증가함에 따라 종모양의 가공형상을 나타낸다.

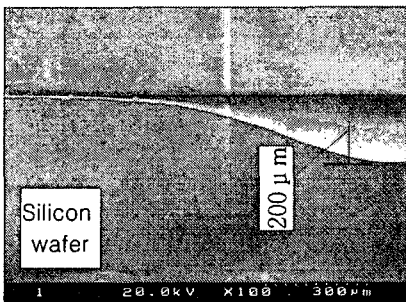
SU-8 마스크는 선택적으로 하드베이크를 실시하여 기계적 성질을 올릴 수 있는 특성이 있다. 분사 실험에서 하드 베이크를 실시한 SU-8 마스크와 그렇지 않은 SU-8 마스크, 그리고 실리콘 웨이퍼 그 자체를 Table 1과 같이 각각 SOD 7mm, 분사압력을 0.28MPa, 입자량을 4g/min, 분사 시간을 15초로 하여 분사를 실시한 후 마멸량을 측정하여 보았다. Fig. 7 (a)는 SU-8 마스크이고, Fig. 7 (b)는



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Erosion of SU-8 mask (a), (b) and silicon wafer (c) by AJM process

하드 베이크를 실시한 SU-8 마스크, Fig. 7 (c)는 실리콘 웨이퍼를 각각 분사한 것의 단면을 SEM사진으로 나타낸 것이다. SU-8마스크와 하드 베이크를 한 마스크, 그리고 실리콘 웨이퍼의 제거량은 각각 65 $\mu\text{m}$ , 55 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$  가량 나타났다. 실리콘 웨이퍼의 마멸량은 SU-8 마스크에 비해 대략 3.5배, 하드 베이크한 것의 3배 정도 큰 것을 알 수 있었다. 즉, 선택성이 충분하며, 마스크로 활용 가능함을 알 수 있다.

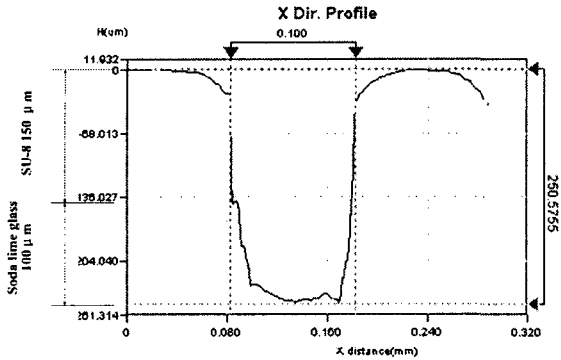
이상의 결과를 바탕으로 0.28mm 내径의 원형 노즐을 사용하여 두께 150 $\mu\text{m}$ , 폭 100 $\mu\text{m}$ 인 정사각형의 SU-8 패턴 마스크가 있는 소다라임유리를 가공하여 보았다. 이때 분사시간은 20초, SOD 20mm, 분사량 3g/min 이었으며, 이 설정값은 사전 실험에 의해 얻은 경험값이다. 가공이 끝난 후 측정기는 Nano system사의 NS-E1500 (비침착식 3차원 측정기)로 측정을 하였다. Fig. 8(a), (b), (c)는 폭이 100 $\mu\text{m}$ 인 정사각형 가공의 X, Y 프로파일과 3차원 형상 측정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 유리가 깊이 100 $\mu\text{m}$ 으로 가공될 동안 모서리부분이 30 $\mu\text{m}$ 의 반지름을 가지는 둥근 형태로 마멸이 일어났다.

Fig. 9는 선폭 200 $\mu\text{m}$ , 두께 100 $\mu\text{m}$ 의 SU-8 마스크를 SOD 20mm로 두고, 분사압력을 0.28MPa, 입자량을 4g/min으로 하여 30초간 분사했을 때 SU-8 마스크와 실리콘웨이퍼의 마멸형태를 보여준다. 마스크 마멸은 원형으로 일어나 모서리부분이 둥근 형태로 마멸되는 것을 보여주고 있다. 웨이퍼 중심부의 가공깊이가 200 $\mu\text{m}$ 가공되었고 마스크 중심부의 높이는 20 $\mu\text{m}$ 정도 마멸이 일어났다.

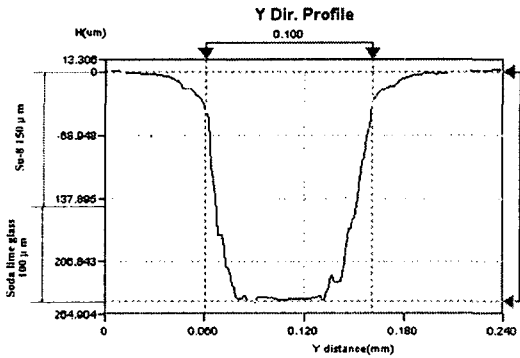
본 실험에서는 미세입자 분사가공에 사용할 마스크재료로 SU-8을 이용할 수 있고, 미세패턴 형성도 무리 없이 할 수 있었으며 하드베이크를 하면 마스크의 마멸량이 조금 줄어드는 것을 알 수 있었다. 마스크의 마멸은 원형형태로 경사지게 일어났으며 모서리 마멸이 비교적 심하게 일어남을 보였다. 또한 실리콘 웨이퍼 마멸량은 SU-8마스크에 비해 대략 3~3.5배 정도 큰 것을 알 수 있었다.

## 5. 결과의 적용

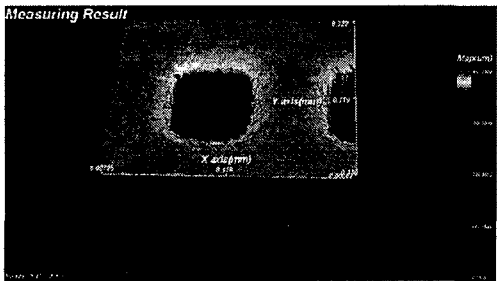
본 연구결과를 바탕으로 유리기판 상에 마이크



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Erosion profile of SU-8 masks on a soda lime-glass: (a) x-direction, (b) y-direction, (c) 3D shape

로 믹서의 채널을 제작하는 실험을 해보았다. 랩 온어칩에서 믹서의 채널 사이즈는 대체로 길이 10 mm 내외로 제작 되고 있다. 본 실험에서는 폭 2 mm, 길이 10mm의 크기를 가지는 3차원 형상의 마이크로 믹서를 대상으로 했다. 여기서 채널 선포는 150 μm이다. Fig. 10은 제작 하고자하는 마이크

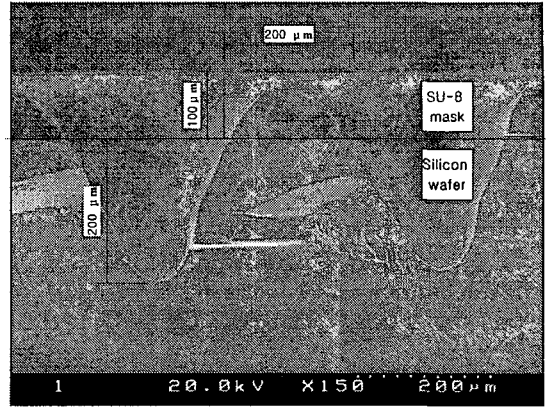


Fig. 9 A cross-section of a eroded SU-8 and a eroded silicon wafer(111) by AJM process

로 믹서의 마스크 제작을 위해 Auto CAD로 설계한 도면이다. Fig. 10의 왼쪽은 유리기판의 상부에 오른쪽은 하부에 각각 패터닝 되어지고, 각 모서리 부위를 관통시켜 채널 상호간 연결되도록 제작한 후 두개의 입구부로 두 가지 유체를 주입시키고 주입된 유체는 격벽을 타고 흐르면서 섞이다가 출구부에서는 완전히 섞여 분출 되는 형태로 혼합된다. 물론 상·하 채널을 연결하는 구멍 역시 사진식각공정과 미세입자 분사가공을 이용하여 가공한다.

Fig. 11(a)는 유리기판 상에 노광을 이용하여 패턴 마스크를 제작한 상면의 사진이며, (b)는 입자분사가공을 통하여 가공한 상면의 일부분을 나타낸다. Fig. 12는 마이크로 믹서를 제작하기 위해 소다라임유리에 마이크로 패턴을 생성시킨 후 0.18mmx3.5mm 사각노즐을 사용하여 SOD 0.5mm, 분사압력 0.56MPa, 노즐 이송속도 0.3 mm/sec의 조건으로 3회 분사를 윗면과 아랫면에 각각 실시한 사진이다. 유리판 윗면에 패턴을 생성하고 분사실시 후 패턴을 제거 하고 그 후 바닥면에 패턴을 생성해 분사가공을 실시하였다. 2개의 입구부는 두 가지 유체를 주입하는 곳이고 섞여진 유체는 출구부를 통하여 마이크로 믹서 밖으로 배출 된다. 이때 유리상에 마이크로 입자분사가공이 일어난 부분은 비교적 표면이 거칠어 유체이동시 미세하게 난류가 일어나 더욱 잘 섞일 수 있다. 이상과 같이 SU-8을 이용한 사진식각공정 방법과 미세입자 분사가공 방법을 통하여 마이크로 믹서를 기존의 생산 방식과는 달리 간단하고 빠르게 제작 할 수 있음을 알 수 있다.

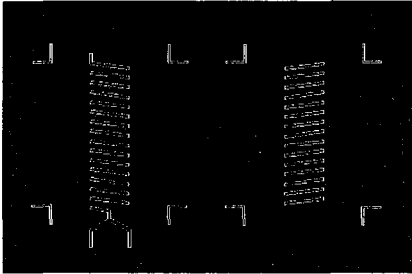


Fig. 10 CAD drawing of a micro mixer

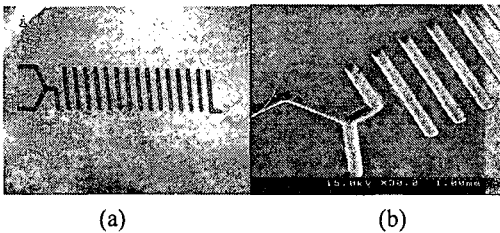
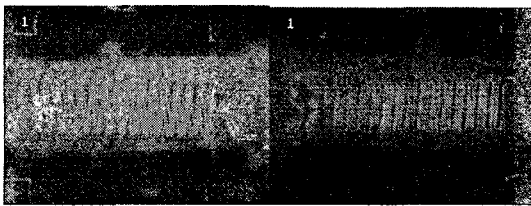


Fig. 11 Pattern masked glass(a) and machined results(b)



(a) Top side (b) Bottom side

Fig. 12 Fabricated channels for top and bottom sides

## 6. 결론

본 연구에서는 미세입자 분사가공에서 미세가공을 위하여 패턴 마스크로서 SU-8을 사용할 때의 특성에 관하여 실험을 하였다. SU-8은 광경화성 수지로서 사진식각공정을 통하여 비교적 정교하게 패턴 마스크를 제작할 수 있을 뿐 아니라, 침식가공률(마멸률)이 실리콘 웨이퍼 대비 선택성이 3배 정도 되기 때문에 마스크로서 적당한 소재임과 동시에 제작방법임을 보였다. 이 결과를 바탕으로 마이크로 채널을 제작해본 결과 깊이가 깊고, 상하 관통구멍이 있는 미소채널을 가공할 수가 있어서 현재 반도체 공정으로 만드는 마이크로 채널에 대한 대안적 제조법으로 활용할 수가 있다.

## 후 기

본 논문은 과학재단 목적 기초 연구(K01-2004-060-10556-0)지원과 2005학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원(해외파견)에 의한 것임.

## 참고문헌

1. Wensink, H., Jansen, H. V., Berenschot, J. W. and Elwenspoek, M. C., "Mask materials for powder blasting," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 10, pp. 175-180, 2000.
2. Sayah, A., Parashar, V. K., Pawlowski, A. G. and Gijs, M. A. M., "Elastomer mask for powder blasting microfabrication," *Sensors and Actuator A*, Vol. 125, pp. 84-90, 2005.
3. Park, D. S. and Seo, T. I., "Machinability in oblique powder blasting of glass," *J. of the KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 28-34, 2004.
4. Pawlowski, A., Belloy, E., Sayah, A. and Gijs, M. A. M., "Powder blasting patterning technology for microfabrication of complex suspended structures in glass," *Microelectronic Engineering*, Vol. 67-68, pp. 557-565, 2003.
5. Achtsnick, M., Drabbe, J., Hoogstrate, A. M. and Karpuschewski, B., "Erosion behavior and pattern transfer accuracy of protecting masks for micro-abrasive blasting," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp. 43-49, 2004.
6. Park, D., Cho, M., Lee, H. and Cho, W., "Micro-grooving of glass using micro-abrasive jet machining," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 234-240, 2004.
7. Slikkerveer, P. J., Bouten, P. C. P. and Haas, F. C. M., "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," *Sensors and Actuators*, Vol. 85, pp. 296-303, 2000.
8. Slikkerveer, P. J., Bouten, P. C. P., in't Veld, F. H. and Scholten, H., "Erosion and damage by sharp particles," *Wear*, Vol. 217, pp. 237-250, 1998.
9. Wakuda, M., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., "Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials," *Precision Engineering*, Vol. 26, pp. 193-198, 2002.

10. Nazmov, V., Shabel'nikov, L., Pantenburg, F. J., Mohr, J., Reznikova, E., Snigirev, A., Snigireva, I., Kouznetsov, S. and DiMichiel, M., "Kinoform X-ray lens creation in polymer materials by deep X-ray lithography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 217, pp. 409-416, 2004.
11. Bogdanov, A. L. and Peredkov, S. S., "Use of SU-8 photoresist for very high aspect ratio x-ray lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 53, pp. 493-496, 2000.