

미세입자 분사가공을 위한 쾌속 마스크 제작기술의 개발

이승표*, 이인환#, 고태조**, 강현욱***, 조동우***

Development of Rapid Mask Fabrication Technology for Micro-abrasive Jet Machining

Seung Pyo Lee*, In Hwan Lee#, Tae Jo Ko**, Hyun-Wook Kang*** and Dong-Woo Cho***

ABSTRACT

Micro-machining of a brittle material such as glass, silicon, etc., is important in micro fabrication. Particularly, micro-abrasive jet machining (μ -AJM) has become a useful technique for micro-machining of such materials. The μ -AJM process is mainly based on the erosion of a mask which protects brittle substrate against high velocity of micro-particle. Therefore, fabrication of an adequate mask is very important. Generally, for the fabrication of a mask in the μ -AJM process, a photomask based on the semi-conductor fabrication process was used. In this research a rapid mask fabrication technology has been developed for the μ -AJM. By scanning the focused UV laser beam, a micro-mask pattern was fabricated directly without photolithography process and photomask. Two kinds of mask patterns were fabricated using SU-8 and photopolymer (Watershed 11110). Using fabricated mask patterns, abrasive-jet machining of Si wafer were conducted successfully.

Key Words : Mask (마스크), Micro-abrasive jet machining (미세입자 분사가공), SU-8, Photopolymer (광 경화성 수지), Micro-stereolithography (마이크로 광 조형)

1. 서론

MEMS 혹은 반도체 공정에 이용되는 실리콘 등과 같은 세라믹 재료의 미세 가공분야가 최근 들어 활발히 연구되고 있다. 그 중 미세입자 분사가공(micro-AJM)¹⁻² 기술은 고압의 공기압에 의해 미세입자를 고속으로 가속 및 분사하여 상대적으로 기계가공이 어렵고 경도 및 취성이 큰 세라믹 재

료를 침식 시켜 원하는 형상을 얻는 기술이다. 즉, 모재 위에 마스크를 입히고, 그 위에 미세입자를 분사하여 모재의 선택적인 가공이 되게 하는 것이다. 따라서, 미세입자 분사가공에서 적절한 마스크의 제작은 필수적이다.

일반적으로 미세입자분사 가공의 마스크의 재료로서는 금속을 사용하는 경질마스크와 폴리머를 사용하는 연질마스크가 이용되고 있으며, 그 중

☞ 접수일: 2007년 7월 16일; 게재승인일: 2007년 11월 20일

* 충북대학교 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 충북대학교 기계공학부

E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr Tel. (043) 261-3161

** 영남대학교 기계공학부

*** 포항공과대학교 기계공학과

연질마스크는 상대적으로 내구성이 약하지만 쉽게 제작할 수 있고 미세패턴 제작이 용이하기 때문에 많이 사용된다.³ 특히, SU-8 등을 이용한 연질마스크의 제작에 대한 연구가 점차 증가되고 있으나, 대부분의 연구들은 포토리소그래피 공정을 이용한 마스크의 제작에 관련된 것들이다. 하지만 이 공정은 기본적으로 고가의 반도체 제작장비 및 복잡한 공정이 필수적이다.

한편, 마이크로 광 조형기술^{4,5}은 자외선 광원을 일련의 광학계를 통하여 광 경화성 수지에 주사하여 경화시켜 3 차원 마이크로 구조물을 만드는 기술이다. 따라서 이를 이용하면 기존의 반도체 제작공정인 포토리소그래피 공정을 이용하지 않고도 매우 간단하게 미세입자분사가공을 위한 마스크를 제작하는 것이 가능하다.

이에 본 연구에서는 자외선 레이저와 광 섬유를 이용하는 마이크로 광 조형기술 응용 마스크 제작장치를 개발하고 이를 이용하여 미세입자분사가공을 위한 패속 마스크 제작기술을 개발하였다. 또한, 기존에 미세입자분사가공을 위한 마스크 재료로 많이 이용되는 SU-8 뿐만 아니라 일반적으로 패속조형에 많이 이용되는 광 경화성 수지를 마스크 제작공정에 성공적으로 적용하였다.

2. 미세입자분사가공을 위한 마스크 제작장치

기존의 미세입자 분사가공을 위한 마스크 제작을 위해서는 포토리소그래피 공정을 이용하는 것이 일반적이었다.⁶ 따라서 포토리소그래피 공정을 위한 별도의 포토 마스크가 필요하며 또한 노광전에 정렬 과정이 필요하였다. 하지만 본 연구에서는 포토마스크 및 정렬과정이 없이 입자분사가공이 될 모재 위에 마스크 재료를 입힌 후, 매우 작은 초점지름을 갖는 자외선 빛을 x-y 스테이지 시스템의 이송에 의해 미세입자분사가공용 마스크 재료에 직접 주사하여 마스크 패턴을 만들게 된다.

Fig. 1(a) 및 (b)는 본 연구에서 개발된 미세입자분사가공을 위한 마스크 제작장치의 개념도 및 사진을 각각 보여주고 있다. 광원에서의 자외선 레이저 빛은 대물렌즈를 통하여 광섬유에 입사된다. 광섬유의 끝에는 시준기(collimator)가 부착되어 광섬유에서부터의 빛을 최종적으로 매우 작은 초점지름을 갖게 해 준다. 한편, 시준기는 x-y 방향의 이송이 가능한 정밀 스테이지 시스템에 부착되며, 따

라서 초점된 빛이 마스크 형상에 따라 재료에 수직으로 주사되게 된다. 그리고 x-y 및 z 스테이지의 움직임과 셔터의 개폐는 별도로 제작된 Lab VIEW 응용 프로그램에 의해 제어되게 된다. Table 1은 제작된 장치의 구성을 보여주고 있다.

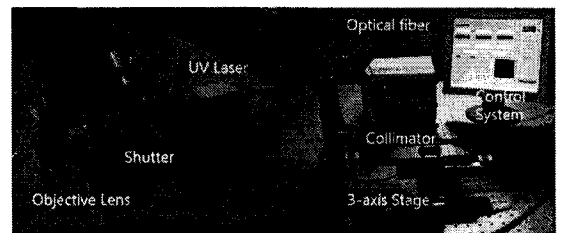
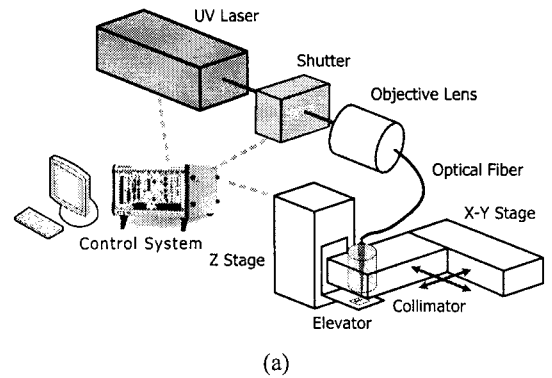


Fig. 1 (a) Schematic drawing and (b) photograph of mask fabrication apparatus for micro-abrasive jet machining

Table 1 Construction of mask-fabrication apparatus

UV Laser	Coherent CUBE 375-8C (375nm)
Control system	National Instruments PXI-1024Q
Stage	SARUGA SEIKI KS262-50
Shutter	Cheongwon Mechatronics Co.
Optical fiber	Tholabs M14L02
Objective lens	Newport M-10X
Collimator	Tholabs F230SMA-A

3. 마스크 재료의 경화특성

본 연구에서는 에폭시 계열의 네거티브 포토리소그래피(negative PR)의 한 종류인 Microchem 사의 SU-8 2100 및 일반적으로 패속 조형(rapid proto-

typing)시스템에 이용되는 DSM 사의 WaterShed 11110 의 두 가지 수지를 이용하여 미세입자분사가공을 위한 마스크 패턴을 제작하였다. 한편, 이와 같은 마스크 재료 위에 제작된 장치를 이용하여 원하는 패턴을 직접 성형하기 위해서는 자외선 빛에 따른 수지의 경화특성을 파악하는 것이 필수적이다. 따라서, 이들 마스크 재료에 대한 경화특성파악 실험을 수행하였다.

3.1 SU-8 의 경화특성

SU-8 은 한번의 스핀코팅 공정으로 두꺼운 패턴을 제작 할 수 있으며 고 세장비의 수직 벽을 갖는 복잡한 미세패턴이 제작 가능하다. 또한 미세입자분사가공에서 입자 침식에 대한 저항성이 크다는 장점이 있기 때문에 미세입자분사가공을 위한 마스크 재료로 많이 이용된다.⁷

한편, 본 연구에서와 같이 매우 작은 초점지름을 갖는 자외선 빛을 직접 주사하여 미세입자분사가공을 위한 마스크를 제작하기 위해서는 자외선 레이저 빛의 세기와 주사속도에 따른 SU-8 의 경화현상 파악이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 모재가 될 Si 웨이퍼 위에 약 200 μm 로 균일한 두께의 SU-8 을 스핀 코팅으로 도포한 후 자외선 빛의 세기 및 주사속도를 변화시켜 가면서 SU-8 의 경화특성 실험을 실시하였다. Si 웨이퍼에 SU-8 을 도포하기 위한 공정조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 Fabrication condition of SU-8 mask

Parameters	Value
Spin coating condition	1. Spin at 500rpm for 20 sec 2. Spin at 1500rpm for 30 sec
Pre-bake time	7 min at 65°C
Soft bake time	50 min at 95°C

Fig. 2 는 자외선 레이저 빛의 세기가 43.5 μW 및 55.3 μW 일 때의 빛의 주사속도에 대한 SU-8 의 경화 폭을 실험한 결과이다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 자외선 레이저 빛의 세기가 강하고 주사속도가 느릴수록 SU-8 의 경화 폭이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 레이저 빛의 세기와 이송속도를 적절히 조절하면 SU-8 을 마스크 재료로 하는 미세입자분사가공을 위한 패턴 형상을 용이하게 제작할 수 있게 된다.

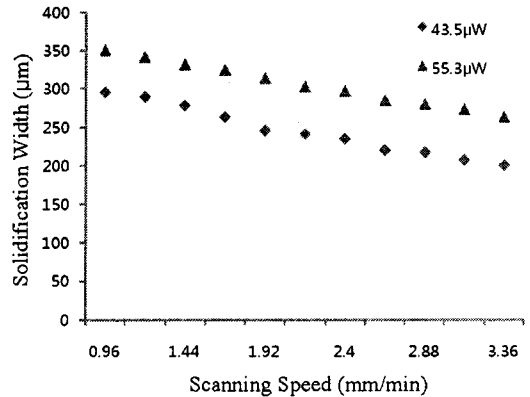


Fig. 2 Solidification width of SU-8 according to scanning speed and power of the laser beam

한편, 이와 같은 연구결과는 향후 반도체 제작 공정 등에서 마스크 없이 직접 자외선 레이저 빛의 주사만으로 photoresist 를 패턴링 할 수 있는 마스크리스 패턴링(maskless patterning) 기술의 개발에 활용될 수 있을 것이다.

3.2 패속조형용 광 경화성 수지의 경화특성

한편, 기존 패속조형 시스템에 많이 이용되는 상용화된 광 경화성 수지들도 SU-8 등의 폴리머 연결마스크와 유사한 기계적 성질을 가지고 있는 것들이 많다. 또한 이들 재료들은 본 연구에서 제작된 마스크 제작장치에 바로 적용이 가능하다. 이에 본 연구에서는 SU-8 뿐만 아니라 기존 패속조형시스템에 많이 이용되는 일반적인 광 경화성 수지인 DSM 사의 WaterShed 11110 를 이용하여 미세입자분사가공을 위한 마스크 패턴을 제작하였다.

특히, 이와 같은 패속조형용 광 경화성 수지를 이용한 마스크 제작에서는, 광 경화성 수지의 점성이 상대적으로 매우 낮기 때문에 SU-8 과 같은 스핀코팅 공정을 거치지 않고 모재 위에 액체상태의 광 경화성 수지를 직접 도포하고 경화시켜 패턴을 만드는 것이 가능하다. 즉, z 축 스테이지에 부착된 엘리베이터에 모재인 Si 웨이퍼를 부착한다. 그리고, 이를 미세입자분사가공을 위한 마스크 두께만큼 덮이도록 액체상태의 광 경화성 수지가 담긴 용기에 담긴 후, 매우 작은 초점지름을 갖는 자외선 빛을 직접 주사하여 미세패턴을 형성하게 된다. 따라서 기존의 SU-8 을 이용하는 방법보다

빠른 패속 마스크 제작이 가능하게 된다.

앞서 살펴 본 SU-8 을 이용한 경우와 마찬가지로 자외선 레이저 빛의 세기와 주사속도에 따른 WaterShed 11110 수지의 경화특성을 파악 하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 3 은 WaterShed 11110 광 경화성 수지를 이용한 경화실험 결과를 보여주고 있다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 광 경화성 수지의 경화 특성은 Fig. 2 의 SU-8 을 이용한 경화특성 실험 결과와 매우 유사하게 자외선 빛의 이송속도가 빠를수록 경화 폭이 감소하는 경향을 보인다. 따라서, 이와 같은 결과를 이용하면 일반적인 광 경화성 수지를 이용하는 미세입자 분사가공을 위한 마스크의 패속 제작이 가능하게 된다.

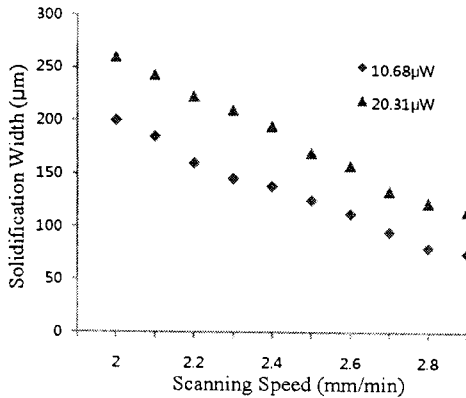


Fig. 3 Solidification width of Watershed 11110 photo-polymer according to scanning speed and power of the laser beam

4. 미세입자 분사가공

4.1 마스크의 제작

앞서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 사용된 SU-8 및 WaterShed 11110 수지는 자외선 레이저 빛이 주사된 부분이 경화되는 특성을 갖는다. 따라서 미세입자 분사가공을 위한 마스크 제작을 위해서는 미세입자가 통과할 부분을 제외하고 마스크 재료를 경화시켜야 한다. 한편, 이때 성형 속도를 높이기 위해서 레이저 파워를 높이고 동시에 주사속도를 높이면 마스크 재료가 웨이퍼에서 분리되는 등의 결과가 나타난다. 따라서 Fig. 2 및 3 의 결과를 바탕으로 해서 Table 3 과 같은 레이저 빛의 주사조건을 선정하였다.

Table 3 Laser beam exposure conditions for SU-8 and WaterShed 11110 patterning

Parameters	SU-8	Watershed 11110
Beam power	43.5μW	10.68μW
Scanning speed	3.36mm/min	2mm/min
Layer thickness	200μm	300μm

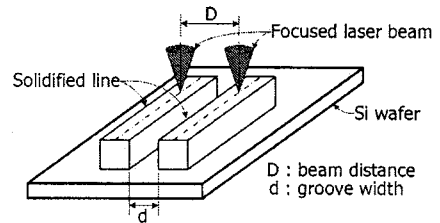


Fig. 4 Experimental setup of groove width measurement

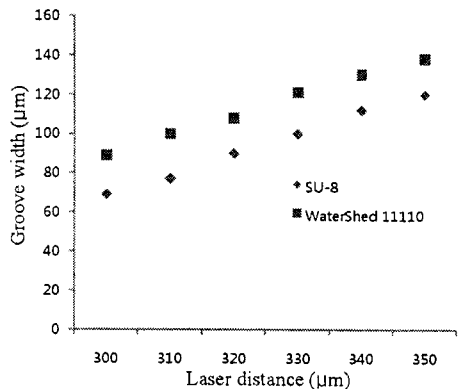
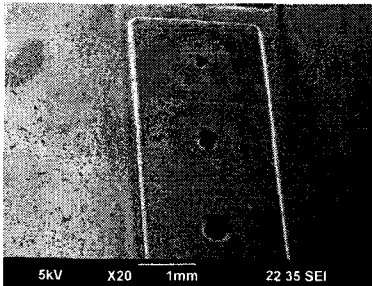


Fig. 5 Groove width of SU-8 and WaterShed 11110 according to laser beam distance

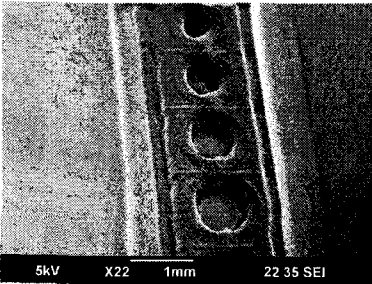
한편, 주사되는 레이저 빛의 간격이 작게 되면 빛의 산란 등에 의해서 경화 폭이 변화하게 되는 경우가 발생한다. 이에 본 연구에서는 마스크 제작에 앞서 자외선 빛의 주사간격과 경화폭의 관계를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 즉, Fig. 4 와 같이 자외선 레이저 빛의 주사조건을 일정하게 유지시킨 상태에서, 자외선 레이저 빛의 주사 간격(D)을 300~350μm 로 변화시켜 가면서 경화된 두 선(solidified line) 사이의 경화되지 않은 부분의 폭(d)을 측정하는 실험을 수행하였다. Fig. 5 는 실험 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

한편, SU-8 의 경우에는 기계적 성질을 높이기 위해 레이저 빛을 이용하여 경화한 후 95℃ 도에

서 15 분간 PEB(post expose bake)를 수행하였으며 15 분간 현상(develop)하고 IPA 와 DI water 를 이용한 세척과정을 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 6 SEM photograph of (a) SU-8 and (b) WaterShed 11110 mask patterns for abrasive-jet machining

이와 같은 실험결과를 바탕으로 Si 웨이퍼 위에 SU-8 과 WaterShed 11110 수지를 이용한 미세입자 분사가공을 위한 원형 단면을 갖는 마스크 패턴을 성형하였다. 마스크 패턴의 제작에는 Table 3 의 조건이 이용되었다.

Fig. 6 (a) 및 (b)는 Si 웨이퍼 위에 성형된 SU-8 및 WaterShed 11110 마스크 패턴에 미세입자 분사가공을 한 것을 각각 보여준다. 마스크 패턴을 제작하기 위한 주사경로는, 홈이 될 부분의 형상을 먼저 주사하여 만든 후 가장자리를 채워나가는 방법을 이용하였다. 마스크의 제작 시간은 SU-8 마스크의 경우 약 57 분이고 WaterShed 11110 의 경우 약 96 분이다. 한편, Fig. 6 (b)에서 WaterShed 11110 마스크의 경우 Fig. 6 (a)의 SU-8 에서와 같은 매우 미세한 형상의 제작이 어려웠으며, 이는 레이저 빛에 의한 SU-8 및 WaterShed 11110 의 경화특성이 다른 것에 기인한 것으로 판단된다.

4.2 미세입자 분사가공 실험

앞서 제작된 SU-8 마스크와 WaterShed 11110 마스크를 이용하여 미세입자 분사가공실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 4 와 같다.

Table 4 Experimental condition of μ -AJM

Parameters	Value
Al ₂ O ₃ particle diameter	17 μ m
Nozzle size	0.18 x 3.15mm
Distance from the sample	5mm
Pressure	0.2Mpa
Flow rate	2g/min
Scanning speed	0.3mm/min
Blasting time	2times

Fig. 7 (a), (b)는 지름 300 μ m 인 원형 홈을 가진 SU-8 마스크 및 지름 600 μ m 인 원형 홈이 있는 WaterShed 11110 광경화성 수지 마스크에 대한 미세입자 분사가공 실험결과에 대한 미세입자 분사가공 후의 단면 형상을 비 접촉식 3 차원 측정기로 측정한 결과를 각각 보여주고 있다. 두 경우 모두 분사가공 후의 Si 웨이퍼 중심부의 제거량은 약 50 μ m 이며, SU-8 마스크의 제거량은 약 30 μ m, 그리고 WaterShed 11110 광경화성 수지를 이용한 마스크의 제거량은 약 50 μ m 이다.

한편, Fig. 7 에서 단면의 아랫부분은 의도한 원의 지름보다 작게 나타나고 있다. 이는 마스크 제작 시 형상오차가 존재하기 때문이라 생각되며, 이러한 오차의 원인은 마스크 재료가 초점된 레이저 빛에 의해서 경화될 때 초점평면 하부의 경화폭이 좀 더 넓게 되는 경향에 기인한 것으로 보인다. 따라서, 이를 해결하기 위해서는 향후 연구에서 초점거리가 긴 레이저 광학계를 적용하여야 할 것으로 생각된다. 그리고, 웨이퍼의 가공된 영역의 지름이 작게 나타나는 것은 미세입자분사 가공 시 노즐의 분사방향이 정확히 수직으로 되지 않았기 때문이다. 하지만 본 연구는 기존의 미세입자 분사가공에서 적용되는 포토리토그래피 공정이 아닌 빠르게 제작이 가능한 새로운 마스크 제작공정에 대한 것이다. 이에 새로운 제작 공정을 제시한다는 측면에서 본 연구결과는 유용하다고 판단된다. Fig. 8 (a), (b)는 미세입자 분사가공 후의 SU-8 마스크와 WaterShed 11110 광 경화성 수지 마스크의 전

자현미경 사진이다.

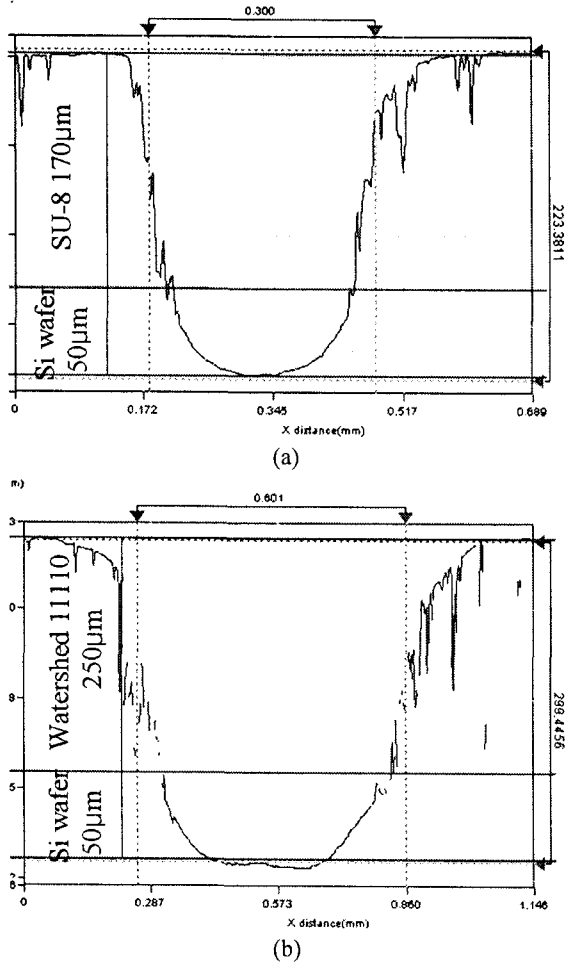
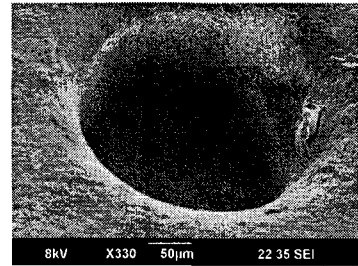


Fig. 7 Erosion profile of (a) SU-8 and (b) Watershed 11110 mask

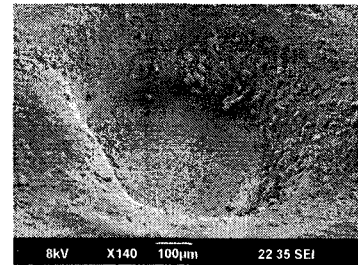
미세입자 분사가공이 끝난 후, SU-8 마스크의 경우는 제거재(remover)를 이용하면 마스크 재료가 제거된다. 한편, Watershed 11110으로 제작된 마스크는 적당한 제거재가 존재하지 않으며, 따라서 이를 제거하기 위하여는 900 °C 의 가열로(furnace)에서 1 시간 가열하여 모재인 Si 웨이퍼 손상 없이 마스크를 제거하였다.

이상과 같은 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제시된 패속 마스크 제작기술은 기존의 반도체 제작기술을 기반으로 하는 마스크 제작보다 매우 용이하고 빠르게 미세입자 분사가공을 위한 마스크

를 제작할 수 있다. 또한, 기존의 마스크 제작에 많이 이용되는 SU-8 뿐만 아니라 일반적으로 패속조형에 쓰이는 광경화성 수지도 마스크 재료로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 특히, 이 경우에는 자외선 레이저를 직접 마스크 재료에 주사하여 경화 시키게 되므로 별도의 노광 및 PEB 등의 공정이 필요하지 않고 빠르게 마스크를 제작할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 SEM photograph of (a) SU-8 and (b) Watershed 11110 mask after abrasive-jet machining

5. 결론

기존의 미세입자 분사가공을 위한 마스크를 제작하기 위해서는 고가의 장비와 공정이 필요한 포토리소그래피 공정을 이용되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 반도체 자외선 레이저를 광원으로 하는 마이크로 광 조형기술 응용하는 패속 마스크 성형기술을 개발하였다. 즉, 이를 이용하면 마스크 재료에 직접 초점 된 자외선 레이저 빛을 주사하여 매우 신속하게 미세입자 분사가공을 위한 마스크를 제작할 수 있다.

또한, 일반적으로 패속조형에 이용되는 상용화된 광 경화성 수지를 이용한 미세입자 분사가공 마스크의 제작기술을 개발하였으며, 이는 스피코

팅 공정이 요구되지 않고 광 경화성 수지에 직접 레이저 빛을 주사하여 마스크를 제작이 가능하다. 그리고, SU-8 및 WaterShed 11110 광경화성 수지의 두 가지 재료로 된 마스크를 각각 이용하여 Si 웨이퍼 소재의 미세입자 분사가공이 성공적으로 수행되었다.

후 기

이 논문은 2006 년도 충북대학교 학술연구 지원 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Wensink, H., Berenschot, J. W., Jansen, H. V. and Elwenspoek, M. C., "High resolution powder blast micromachining," Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system, pp. 769-774, 2000.
2. Wakuda, M., Yamauchi, Y. and Kansaki, S., "Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials," Precision Engineering, Vol. 26, Issue 2, pp.193-198, 2002.
3. Wensink, H., Jansen, H. V., Berenschot, J. W. and Elwenspoek, M. C., "Mask materials for powder blasting," J. of Micromechanics and Microengineering, Vol. 10, No.2, pp. 175-180, 2000.
4. Lee, I. H. and Cho, D. W., "An investigation on photopolymer solidification considering laser irradiation energy in micro-stereolithography," Microsystem Technologies, Vol. 10, No. 8-9, pp. 592-598, 2004.
5. Ikuta, K. and Hirowatari, K., "Real three-dimensional micro fabrication using stereolithography and metal model," Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system, pp. 42-47, 1993.
6. Park, D. S., Cho, M. W., Lee, H. and Cho, W. S., "Micro-grooving of glass using micro-abrasive jet machining," J. of Material Processing Technology, Vol. 146, Issue 2, pp. 234-240, 2004.
7. Ko, T. J., Park, D. J. and Kim, H. S., "Characteristics of SU-8 mask for abrasive jet machining," J. KSPE, Vol. 24, No. 1, pp. 71-78, 2007.