

유리의 경사 미립분사가공시 가공성

박동삼[#], 서태일^{*}

Machinability in Oblique Powder Blasting of Glass

Dong Sam Park[#], Tae Il Seo^{*}

ABSTRACT

The old technique of sandblasting which has been used for decoration of glass surface has recently been developed into a powder blasting technique for brittle materials such as glass, silicon and ceramics, capable of producing micro structures larger than 100 μ m. In this study, we introduced oblique powder blasting, and investigated the effect of the impacting angle of particles, the scanning times and the stand-off distance on the surface roughness and the weight-loss rate of samples with no mask, and the wall profile and overetching of samples with different mask pattern in powder blasting of soda-lime glass. The varying parameters were the different impact angles between 50° and 90°, scanning times of nozzle up to 40 and the stand-off distances 70mm and 100mm. The widths of mask pattern were 0.2mm, 0.5mm and 1mm. The powder was alumina sharp particles, WA #600. The mass flow rate of powder during the erosion test was fixed constant at 175g/min and the blasting pressure of powder at 0.2Mpa.

Key Words : Powder blasting(미립분사가공), Impact angle(분사각도), Glass(유리), Surface roughness(표면거칠기) Weight-loss rate(무게제거율), Overetching(과도에칭), Wall profile(벽면형상)

1. 서론

미립분사가공(powder blasting)은 종래에 표면의 페인트 제거나 디버링(deburring) 및 유리 장식 등에 사용되어져 오던 샌드블라스팅 기법이 발전된 형태로서 최근 유리나 실리콘 및 세라믹 등 경취 재료의 미세가공에 적용되기 시작했다. 이 가공법은 고압의 가스에 의하여 가속된 수 μ m~수십 μ m의 미립분사재(micro abrasive)들을 노즐로부터 고속으로 분사하고 이들의 충격력으로 재료에 미세 크랙을 발생시켜 가공하는 기계적 부식(mechanical

etching)의 일종이다.

한편, 반도체나 미세센서 및 평판 디스플레이(flat panel display) 등의 분야에서 유리는 아주 유용한 재료로 인식되기 시작했으며 유리의 정밀 미세가공에 미립분사가공 기법이 아주 효율적으로 사용될 수 있음이 밝혀지고 있다. 유리의 미세형상가공에 관한 연구를 보면 미세 유체칩(micro-fluidic chip)이나 미세 패터닝(micro patterning) 및 각종 미세 센서 등의 가공에 미립분사가공을 응용하였으며¹⁻⁴ PDP나 LCD 등과 같은 분야의 미세가공에도 활발한 응용 연구가 진행되고 있다.^{5,6}

접수일: 2003년 9월 23일; 게재승인일: 2004년 3월 12일
교신저자, 인천대학교 기계공학과
E-mail: dspark@incheon.ac.kr, Tel: (032) 770-8418
* 인천대학교 기계공학과

일반적인 분사가공시 노즐의 분사각도가 가공성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려졌는데^{7,8} 최근에는 3차원적 미세형상의 성형을 위하여 패턴 마스크를 이용하는 기존의 가공법에서 노즐의 분사각도를 변화시키는 새로운 개념의 경사(oblique) 미립분사가공이 도입되었다. 이 연구에서는 가공형상에 대한 측벽 효과(sidewall effect)와 마스크 언드에칭 효과(mask underetching effect)를 주로 다루었다.⁹ 그러나, 앞으로 미세형상 성형의 잠재적 중요성을 고려하면 이 경사가공시의 가공특성에 관한 더 많은 연구가 필요하리라 판단된다.

한편, 국내의 경우 미립분사가공과 관련된 연구는 2000년에 Park 등이 처음으로 소개 하였으며 지금까지는 주로 가공 가능성과 효율성을 검증하였으나^{4,13,14}, 최근에는 TFT-LCD용 도광판(light guide panel)의 도트패턴(dot pattern)을 무인쇄 방식으로 사출성형하기 위한 금형가공에 관하여도 연구하고 있다.¹⁵

본 연구에서는, 미립분사가공이 3차원 미세형상 가공으로 기존의 MEMS 기술을 대체할 가능성이 있는지를 살펴보기 위한 기초 연구로서, 경사 미립분사가공을 이용한 소다라임 유리의 표면부식시 노즐의 분사각도(impact angle), 노즐과 공작물간의 거리(stand-off distance), 마스크 패턴의 크기 및 노즐의 주사(scanning) 횟수 등이 공작물의 표면거칠기, 가공능률, 가공 단면의 형상(wall profile) 및 과도에칭(overetching)에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 미립분사가공

2.1 미립분사가공의 기본원리

미립분사가공의 기본원리를 Fig. 1에 나타내었다. 분사재는 입자의 크기가 3-30 μ m인 알루미늄을 주로 사용하는데 입자들은 노즐에서 1-5기압의 공기로 가속되어 약 80-200m/sec의 속도로 공작물에 충돌되면서 표면 부식을 일으키게 된다. 부식을 원하지 않는 부분은 설계된 패턴형상을 갖는 마스크(mask)로 보호를 한 상태에서 가공하게 되는데, 노즐을 좌우 혹은 전후로 주사(scanning) 하면 아주 미소하거나 복잡한 형상뿐만 아니라 높은 세장비(aspect ratio)의 부식도 가능하게 된다. 부식의 깊이는 주사 횟수를 조절함으로써 제어가 가능하다.

2.2 부식량의 모델링

Fig. 2는 한 개의 미립분사재가 가공물의 표면을 때릴 때 미세 크랙이 발생하는 원리를 설명한 것이다.⁶ 입자 충격에 의하여 바로 밑 부분이 소성변형을 일으키게 되고 충격력의 증가에 의하여 2 종류의 미세 크랙이 발생하게 된다. 공작물의 표면과 평행한 측면 크랙(lateral crack)은 최종적으로 공작물을 제거하는 역할을 하나 표면에 수직인 반경방향 크랙(radial/median crack)은 표면부식에 큰 영향을 미치지 않는 대신 주로 재질의 강도를 떨어뜨리는 역할을 하게 된다.

소재의 제거 즉 부식과 관련된 측면 크랙의 길이 l_c 와 깊이 d_c 를 구하면 미립분사재의 단위 무게당 제거되는 소재 무게의 비로서 정의되는 부식율(erosion rate) Q 는 다음 식으로 표현된다.¹²

$$Q \propto \pi l_c^2 d_c \propto \frac{\rho_t E^{5/4}}{H^{17/12} K_c} \rho_p^{1/6} r_p^{1/2} v_p^{7/3} \quad (1)$$

단, E : 소재의 탄성계수

H : 경도

K_c : 소재의 파괴인성(fracture toughness)

ρ_t : 소재의 비질량(specific mass)

ρ_p : 분사재 입자의 비질량(specific mass)

r_p : 분사재 입자의 평균직경

v_p : 분사재 입자의 속도

식 (1)로부터 부식율은 두 개의 파라미터 군으로 구성된다는 것을 알 수 있는데 앞부분은 가공하고자 하는 소재의 물성치에, 뒷부분은 분사가공시 공정 변수들에 영향을 받는 항이 된다.

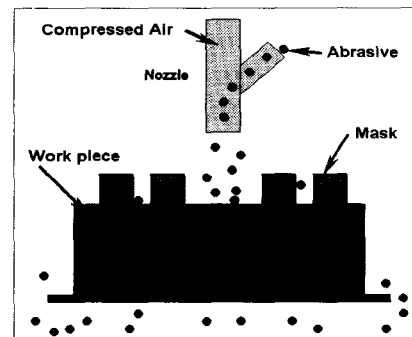


Fig. 1 A schematic principle of powder blasting

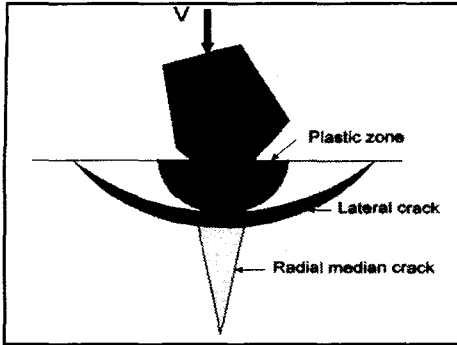


Fig. 2 Erosion mechanism by a single particle impact

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험시편

분사각도가 표면 부식에 미치는 영향을 조사하기 위하여 두 단계의 실험을 수행하였다. 첫 단계 실험은 마스크가 없는 평면형상의 시편에 대하여 가공능률과 부식 표면의 거칠기를 분석하였으며 두번째 단계의 실험에서는 직사각형의 패턴을 갖는 마스크가 있는 시편에 대하여 가공 측벽의 형상과 과도부식량을 조사하였다.

시편은 국산 소다라임 유리판(soda-lime glass sheet)을 이용하여 제작되었으며 유리의 종탄성계수는 75GPa, 프와송 비는 0.25, 표면 인장강도는 500MPa이다.

첫 단계 실험의 시편형상은 20mmx20mmx2mm 이고 두번째 단계의 실험에서는 일본에서 제작된 0.1mm 두께의 마스크용 필름인 Ordyl BF410을 사용하여 폭이 0.2mm, 0.5mm 및 1mm인 3종류의 직사각형의 패턴 마스크를 갖는 Fig. 3과 같은 시편을 사용하였다.

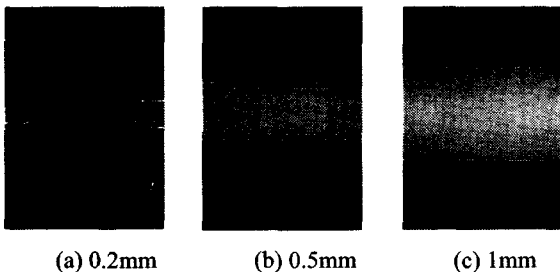


Fig. 3 Width of rectangular pattern mask

3.2 실험 장치 및 조건

실험장치의 개요도를 Fig. 4에 나타내었다. 노즐은 분사각도를 쉽게 조정할 수 있도록 특별히 자체적으로 설계 제작된 지그(jig)에 고정되며 분사각도는 50° 부터 90° 까지 10° 간격으로 변화시켰다. 노즐의 직경중심과 가공물 표면까지의 거리(stand-off distance) d는 7cm와 10cm의 두 조건으로 변화시켰다.

모든 가공실험은 일본의 Sintobator에서 제작된 MICROBLASTER (type MB1)을 사용하여 수행되었다. 노즐은 알루미늄 재질로 내경이 8mm인 원통형상이며 사용된 미립분사재는 알루미늄의 일종인 WA #600이다. 분사재의 공급은 175g/min으로, 분사압력은 0.2MPa로 일정하게 유지하였다. 실험 조건을 Table 1에 요약하여 나타내었다.

첫번째 단계의 실험에서 분사재는 Fig. 5(a)와 같이 전체의 시편표면에 분사되며 두번째 단계 실험에서는 Fig. 5(b)와 같이 노즐의 중심선이 마스크 패턴의 중심선에 일치하도록 분사되게 하였다.

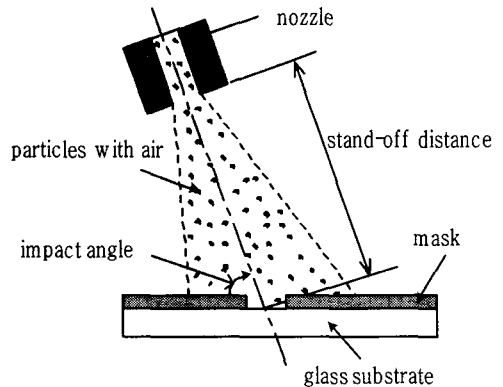


Fig. 4 A schematic view of experimental set-up

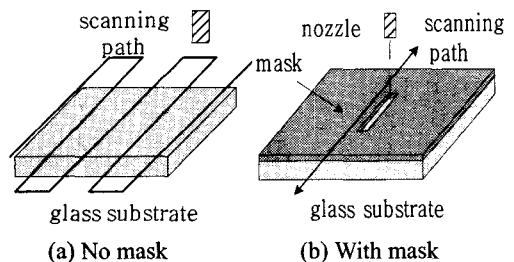


Fig. 5 Scanning path of blasting nozzle

Table 1 Experimental conditions

Powder material		WA #600
Impact angle (°)		50,60,70,80,90
Nozzle diameter (mm)		8
Scanning speed(mm/s)		50
Scanning path interval(mm)		5
Mass flow rate of powder (g/min)		175
Blasting pressure(MPa)		0.2
Stand-off distance(mm)		70,100
Scanning times	without mask	5, 10, 15, 20, 25
	with mask	5, 15, 30, 45

3.3 측정

분사각도가 부식율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 부식전의 원래 시편무게에 대한 시편에서 제거된 무게의 백분율로 정의되는 무게제거율 (weight-loss rate)을 도입하였다. 이때 시편 무게의 측정은 1/10000g의 정밀도를 갖는 정밀 밸런스인 OHAVS AS-200을 사용하였다. 표면거칠기의 측정은 Taylorsurf-120를 사용하였다. 또한, 부식된 시편의 단면 형상은 정밀 현미경인 KH-100 HI-SCOPE을 사용하여 관찰하였으며 이의 처리 소프트웨어는 image-plus pro V4이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 무게제거율

Fig. 6은 노즐의 높이, d가 7cm 일 때 분사가공시 분사각이 시편의 무게제거율에 미치는 영향을 나타낸 것으로 무게제거율은 분사각도가 증가할수록 점진적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그런데 그 증가 경향을 보면 60° 부터는 뚜렷한 증가세를 보이거나 80° 에 이르면 거의 일정한 상태를 유지하며 수직으로 분사할 때 제거율이 가장 크게 나타나고 있다. 이전의 연구들에서 보면 측면 크랙의 길이는 접촉력(contact force)에 비례하는데^{10,11} 분사각도가 커질수록 수직방향으로의 접촉력이 커지므로 측면 크랙의 크기가 커짐에 따라 제거율이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 또 다른 원인은 소성영역의 최대깊이와 비슷한 측면 크랙의 깊이는 대체적으로 공작물의 경도나 분사재의 투사속도, 투사반경이나 밀도에 크게 영향을 받는데¹⁰ 분사각이 커질수록 투사밀도가 증가하므로 측면 크

랙의 깊이가 커지게 된다. 따라서 식 (1)에서 보는 바와 같이 측면 크랙의 길이와 깊이가 증가하는 제거율을 높이게 된다.

또한, 노즐 주사횟수 N이 증가함에 따라 제거율은 거의 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

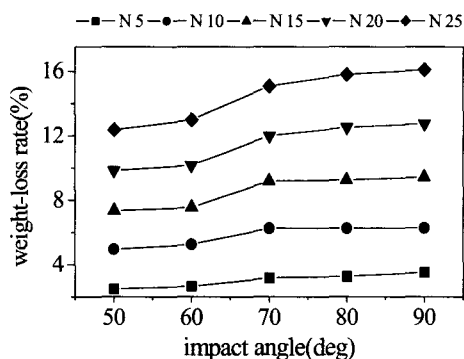


Fig. 6 Effect of the impact angle on the weight-loss rate for different scanning times, N (d=7cm)

Fig. 7은 25회의 노즐 주사가 이루어진 후 분사각과 노즐의 높이가 무게제거율에 미치는 영향을 나타낸 것으로 노즐 높이가 커지면 무게 제거율은 작아지게 된다는 것을 알 수 있다. 이론적으로 취성재료의 부식율(erosion rate)은 입자의 운동에너지가 증가할수록 더 커지게 되는데¹² 노즐 높이가 작을수록 분사입자들의 집중도가 커지므로 입자 속도 또한 증가하게 된다. 따라서, 노즐 높이가 작아지면 입자의 속도가 증가하게 되어^{2,11} 제거율이 커지게 된다고 판단된다. 입자의 속도증가에 따른 고에너지는 큰 크랙을 유발함과 동시에 많은 칩을 발생시키게 된다.

4.2 표면거칠기

분사각도가 표면거칠기 Ra에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 표면거칠기는 대체적으로 분사각도가 증가함에 따라 나빠지게 된다는 것을 알 수 있으나 분사횟수의 영향은 거의 미미하다는 것을 알 수 있다. 표면거칠기의 크기를 보면 50°에서 0.78-0.82μ m, 90°에서는 0.83-0.90μ m로 그 차이는 1μ m 이내임을 알 수 있다. 분사각이 커지면 입자분사에 의한 수직력이 증가하게 되고 따라서 크기가 큰 칩이 배출됨에 따라 표면거칠기가 악화된다고 판단된다.

Fig. 9는 각각의 분사각도에서 5종류의 모든 주사횟수에서의 평균 표면거칠기를 나타낸 것으로 분사각도의 증가에 따라 뚜렷이 증가하며 노즐의 높이가 낮을 때 표면거칠기가 더 나쁘다는 것을 알 수 있다. 이의 원인은 앞서서도 언급되었듯이 노즐의 높이가 작을수록 분사재의 속도가 증가하며 이에 따라 운동에너지도 커져 더 큰 크랙을 유발함과 동시에 큰 칩을 배출하게 됨에 따른 결과라 판단된다.

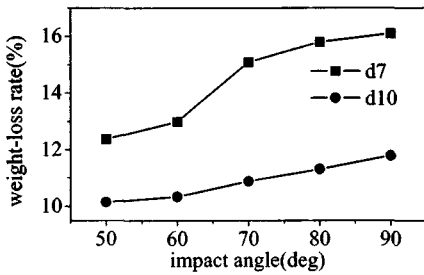


Fig. 7 Weight-loss rate as a function of the impact angle for the stand-off distance 7 and 10mm (N=25)

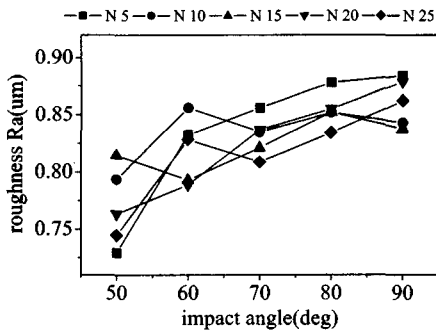


Fig. 8 Effect of the impact angle on the surface roughness for different scanning times, N (d=7cm)

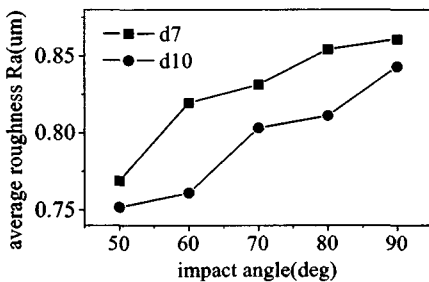


Fig. 9 Averaged surface roughness as a function of the impact angle

4.3 부식 단면의 형상

Fig. 3의 시편들에 대한 두번째 단계의 실험에서 부식면의 형태를 관찰하였는데 Fig. 10은 0.5mm의 패턴 폭을 갖는 시편에 45회 주사 후 단면형상을 나타낸 것이다. Fig. 11은 분사가공시 시편이 부식되는 형상을 도식적으로 나타낸 것으로 분사가공시에는 과도부식이 일어나게 되는데 이는 마스크재의 마멸에 기인하여 양쪽에 생기는 것과 오른쪽 면에서 가공된 바닥면에서 튀어나온 분사재의 재 부식에 기인하는 것으로 구별된다. 그림에서 실제면(real profile)과 이상면(ideal profile) 사이의 차이는 결국 형상오차로 남게 된다.

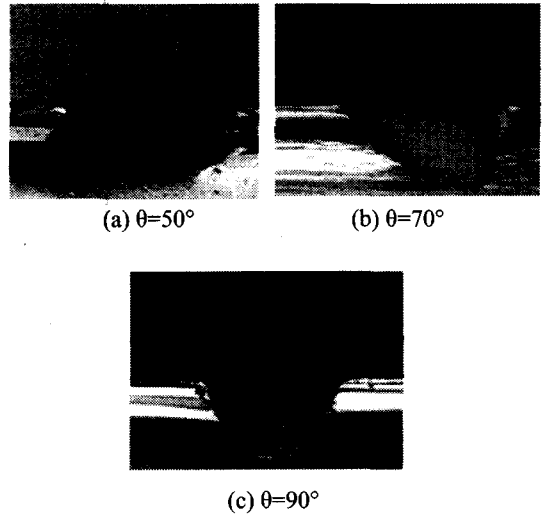


Fig. 10 Photographs of sidewall profiles (d=7cm, N=45)

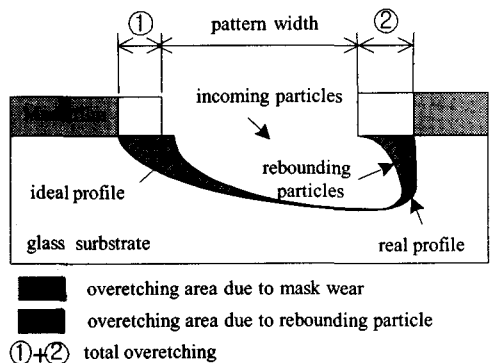


Fig. 11 Schematic wall profile and overetching

4.4 과도부식량과 단면형상

Fig. 12는 노즐높이 7cm에서 분사각도와 주사횟수가 과도부식량에 미치는 영향을 나타낸 것으로 과도부식량은 분사각도가 커질수록, 주사횟수가 적을수록 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 분사각도와 패턴 폭을 고려했을 때의 과도 부식량으로 패턴 폭이 증가함에 따라 어느 정도 미소하나마 증가된다는 것을 알 수 있다. 마스크 폭이 작아질수록 분사재가 마스크 공간을 지나 공작물 표면에 충격을 가하기가 어려워 과도부식이 감소하는 것으로 판단된다.

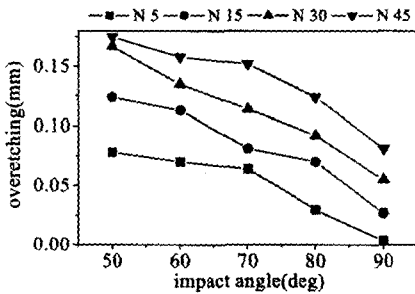


Fig. 12 Total overetching (d=7cm, pattern width=0.5mm)

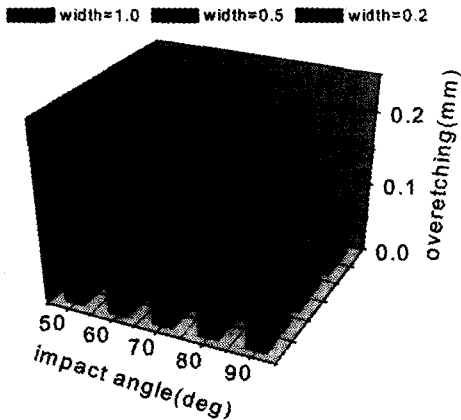
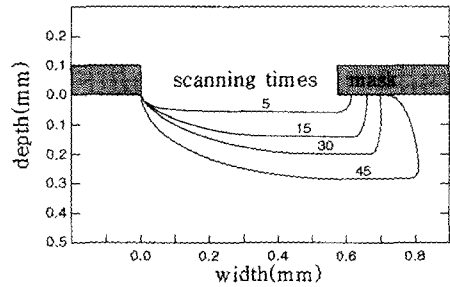


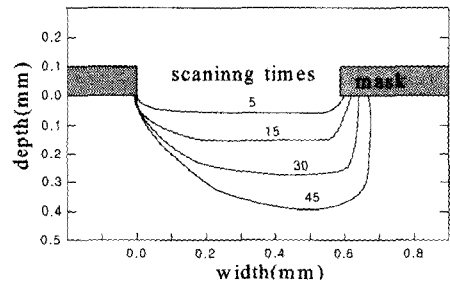
Fig. 13 Total overetching (d=7cm, N=30)

Fig. 14는 KH-100 HI-SCOPE를 사용하여 가공 후의 시편을 관찰한 후 이를 토대로 도식적으로 그린 단면형상의 변화 모습을 나타낸 그림이다. 전체적으로 과도부식과 그 증가율은 분사각이 작

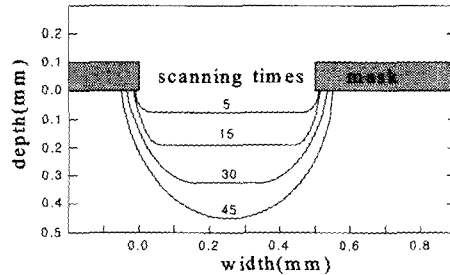
을수록 비교적 뚜렷하게 커진다는 것과 부식깊이는 분사횟수의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가하고 있다는 것을 볼 수 있다.



(a) $\theta=50^\circ$



(b) $\theta=70^\circ$



(c) $\theta=90^\circ$

Fig. 14 Experimental profiles plotted schematically (d=7cm, pattern width=0.5mm)

이상의 실험결과로부터 분사각도의 변화에 따라 과도부식의 형태가 다르게 나타나는데 이는 마스크의 마멸과 반사되는 분사재의 충돌에 따른 부식에 기인되며 특히 3차원 미세구조의 제작시에는 과도부식 현상을 고려하여 패턴의 설계단계부터 충분한 주의가 주어지지 않으면 안될 것이다.

5. 결 론

경사 미립분사가공을 이용한 유리의 표면부식 시 부식현상에 영향을 미치는 요소들을 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 무게제거율은 분사각도와 주사횟수의 증가 및 노즐높이의 감소에 따라 증가한다. 특히 분사각도가 60°부터는 급격히 증가하다가 80° 부근에서 거의 일정하게 유지된다.
- (2) 표면거칠기는 전반적으로 분사각도의 증가와 노즐높이의 감소에 따라 악화되나 주사횟수에는 거의 무관하며 평균적으로 분사각이 50°일 때 0.78~0.82 μ m, 90°일 때 0.83~0.90 μ m로 나타났다.
- (3) 가공면 형상은 두 종류의 과도부식에 영향을 받는데 마스크의 마멸에 따라 양끝에서 일어나는 부식과 가공입자가 소재의 바닥표면을 때린 후 반발력에 의하여 입자가 벽을 때릴 때 한쪽 끝에서 발생하는 부식이 주 원인이다.
- (4) 총 부식량은 분사각의 감소, 주사횟수의 증가 및 패턴폭의 증가에 따라 증가한다.
- (5) 경사 미립분사가공을 이용한 3차원 미세구조물의 성형시 정밀도 유지를 위하여 과도부식을 고려한 패턴설계가 필요하다.

참고문헌

1. Wensink, H., Berenshot, U. W., Jan seu, H. V., Elwenspoek, M. C., "High Resolution Powder Blast Micromachining," Pro. of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 2000, pp. 769-774, 2000.
2. Belloy, E., Thurre, S., Walckiers, E., Sayah, A., Gijs, M.A.M., "The introduction of powder blasting for sensor and microsystem applications," Sensor and Actuators 84, pp. 330-337, 2000.
3. Solignac, D., Sayah, A., Constantin, S., Freitag, R., Gijs, M.A.M., "Powder blasting for the realization of microchips for bio-analytic applications," Sensor and Actuators A 3003, pp. 1-6, 2001.
4. Choi, J. S., Park, K. H., Park, D. S., "Micro Grooving of Glass Using Micro Abrasive Jet Machining," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 178-183, 2001.
5. Kruusing, A., Leppavuori, S., Uusimaki, A., Uusimaki, M., "Rapid prototyping of silicon structures by aid of laser and abrasive-jet machining," Part of the Symposium on Design, Test, and Micro-fabrication of MEMS and MOEMS, Paris, France, SPIE, Vol. 3680, pp. 870-878, 1999.
6. Ligthart, H. J., Slikkerveer, P. J., Verd, F.H.I., Swinkels, P.H.W., Zonneveld, M. H., "Glass and Glass Machining in Zeus Panels," Philips J. Res., Vol. 50, No. 3/4, pp. 475-499, 1996.
7. Lawn, B. R., Fracture of Brittle Solids, 2nd edn., Cambridge Univ., Cambridge, UK, pp. 302-304, 1993.
8. Bouzid, S., Bouaouadja, N., "Effect of impact angle on glass surfaces eroded by sand blasting," J. of the European Ceramics Society 20, pp. 481-488, 2000.
9. Belloy, E., Sayah, A., Gijs, M.A.M., "Oblique powder blasting for three-dimensional micromachining of brittle materials," Sensor and Actuators A 2998, pp. 1-6, 2001.
10. Evans, A. G., Gulden, M. E., Rosenblatt, M., "Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-plastic Response Regime," Proc. R. Soc. London A 361, pp. 343-365, 1978.
11. Verma, A. P., Lal, G. K., "A Theoretical Study of Erosion Phenomenon in Abrasive Jet Machining," Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 564-570, Nov. 1996.
12. Slikkerveer, P. J., Bouten, P.C.P., Veld, F.H.I., Scholten, H., "Erosion and damage by sharp particles," Wear, 217, pp. 237-250, 1998.
13. Kim, K. H., Choi, J. S., Park, D. S., "Effect of Nozzle Scanning in Micro Grooving of Glass by Powder Blasting," J. of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 1280-1287, 2002.
14. Park, K. H., Oh, Y. T., Park, D. S., "Mechanical Etching of Micro Pocket by Powder Blasting," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 219-226, 2002.
15. Park, D. S., Micromachining of the injection mold for TFT-LCD LGP with dot pattern and diffusion function, KOSEF Report No. R05-2002-000-00421-0, 2002.