

Powder Blasting 에 의한 미세 포켓의 기계적 에칭

박경호*, 오영탁**, 박동삼***

Mechanical Etching of Micro Pocket by Powder Blasting

Kyoung Ho Park*, Young Tak Oh**, Dong Sam Park***

ABSTRACT

The mechanical etching technique has recently been developed to a powder blasting technique for various materials, capable of producing micro structures larger than 100 μ m. This paper describes the performance of powder blasting technique in micro-pocketing of stainless steel and the effect of the number of nozzle scanning and the nozzle height on the depth and width of pockets. Experimental results showed that increasing the no. of nozzle scanning and decreasing the nozzle height resulted in the increase of depth and width in pockets. Increase of width results from wear of mask film

Key Words : Powder blasting (미립분사가공), Micromachining (미세가공), Pocket (포켓), Abrasive (분사재), Mechanical etching (기계적 에칭), Blasting conditions (분사조건), Stainless steel (스텐레스강)

1. 서론

최근 IT 와 BT 및 NT 로 대표되는 산업분야에서 반도체용 부품, 마이크로머신용 부품 및 바이오 센서 등의 각종 미세부품에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이를 위하여 세라믹이나 유리 및 특수재질에 대한 미세가공기술이 절실히 요구되고 있다.

미세가공(micromachining)을 위한 연구가 국내에서도 활발히 진행되고 있는데 최근 미세가공의 기술개발 동향과 몇몇 응용 사례들이 소개되기도 하였으나 아직 연구 초기 단계라 할 수 있다.

파우더 블라스팅(powder blasting) 혹은 미립분사가공(micro abrasive jet machining)은 고압의 가스에 의하여 가속된 수 μ m~수십 μ m 크기의 미립분사재(micro abrasive)들을 노즐로부터 고속으로 분사하

여 이들의 충격력으로 재료에 미세크랙을 발생시켜 가공하는 기계적 에칭(mechanical etching) 방법이다. 이와 유사한 가공방법으로서 샌드 블라스팅(sand blasting)이 오래 전부터 사용되어져 왔는데 주로 페인트나 스케일 및 버(burr) 제거 등의 표면세정이나 표면 다듬질, 유리 장식품 가공 등 비교적 거친 가공 용도로 사용되어져 왔다.

최근 LCD 를 포함한 여러 종류의 평판 디스플레이들이 개발됨에 따라 수십 혹은 수백 μ m 단위의 구조물 성형을 위한 고정밀도의 기계적 에칭 기법이 연구되고 있는데 파우더 블라스팅 기법이 아주 효율적 방법으로 큰 주목을 받기 시작하였다

파우더 블라스팅을 이용한 최근의 연구로는 가공능률이나 분사조건의 영향 등 분사가공 특성에 관하여 蔚川 등^[1], 北嶋 등^[2], Slikerveer 등^[3] 및 Wensink 등^[4]의 연구가 있으며, 응용사례에 관한

2001년 9월 24일 접수
* 인천대학교 기계공학과 대학원
** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
*** 인천대학교 기계공학과

연구로서는 유리를 이용하여 평판 디스플레이의 일종인 ZEUS 패널을 성형하고자 하는 Lighthart 등^[5]의 연구, 유체기기용 미세 유체 채널(micro fluid channel)의 급속 성형을 위한 Kruusing 등^[6]의 연구, 반도체나 전자제품 및 LCD 등에 대한 미세가공 적용 사례들을 소개한 伊澤^[7]의 연구, 유리소재의 마이크로 칩 성형을 위한 Solignac 등^[8]의 연구가 있다.

국내의 경우 파우더 블라스팅과 관련한 연구는 2000년부터 박동삼 등^[9-13]에 의하여 처음으로 소개되기 시작하였으며 주로 가공 가능성 검증에 그치고 있는 실정이다.

한편, 지금까지의 연구는 주로 단위 부품이나 제품을 가공하여 그대로 사용하는 것에 주안점을 두었는데 따라서 공작물의 재질 또한 유리나 실리콘 등의 경취재료에 국한되었다. 그러나, 이러한 가공 방식은 생산성 측면에서 많은 문제가 되는데 이는 미세부품이나 제품의 성형을 목적으로 하는 금형의 활용에 관한 연구가 거의 전무한 데서 비롯된 것으로 물론 미립분사가공 방법이 금형의 소재가 되는 강의 미세가공에는 효율성이 떨어진다는 사실에 근거하는 바가 크다고 판단된다.

본 연구에서는 미소 포켓(micro pocket)의 사출 성형 금형을 가공하는 것을 목적으로 파우더 블라스팅법을 이용하여 금형 소재로 사용되고 있는 스텐레스 강을 대상으로 미세 포켓을 기계적으로 에칭하는 기법을 개발하고자 한다. 이때, 파우더 블라스팅시의 공정제어 변수들이 형상의 정밀도나 형상성형 과정에 큰 영향을 미치게 되는데 본 연구에서는 그러한 공정 변수들 중에서도 노즐의 피가공물에 대한 높이와 주사 횟수가 형상성형에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 파우더 블라스팅의 가공기구

2.1 기본 가공 기구

파우더 블라스팅의 가공기구에 관하여 Evans 등^[14], Slikkerveer 등^[15], Verma 등^[16] 및 Seldon^[17] 등이 기본적으로는 Marshall 등^[18]에 의하여 제안된 압입이론(indentation theory)을 이용하여 파우더 블라스팅시 고체 미립자에 의한 충격과 경도시험시의 압입 사이의 유사성에 기초한 해석적 모델을 제시하였다.

비교적 최근에 제안된 Slikkeryeer의 모델에 의

하면, Fig. 1과 같이 날카로운 인텐더 팁(indenter tip)의 압입시 팁 아래 부분에서 압축응력에 의하여 소성변형영역이 형성되는데 하중이 증가할수록 소성영역도 증가하여 결국에는 표면과 수직인 방향으로의 반경/중앙 크랙(radial/median crack)과 표면과 평행방향으로의 측면크랙(lateral crack)이 형성된다. 이때, 측면크랙은 분사가공시 소재의 제거와, 반경/중앙 크랙은 표면의 결함발생과 연관성을 갖는 것으로 가정할 수 있으며 가공깊이가 깊어질 경우 가공을 촉진하는 역할도 어느 정도 한다.

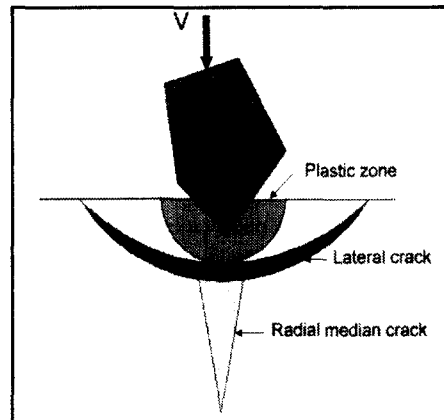


Fig. 1 The micro cracks in indentation process

소재의 제거 즉 가공과 관련되는 측면 크랙의 길이 l_c 와 깊이 d_c 를 구하면 미립분사재의 단위 무게당 제거되는 소재무게의 비로서 정의되는 가공률(erosion rate) Q 는 각각의 분사재 입자가 측면 크랙의 깊이 d_c 와 측면크랙 자체의 표면적에 비례하여 소재의 각 입자들을 제거한다고 가정할 경우 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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 가공률은 두 개의 파라미터 군으로 구성된다는 것을 알 수 있는데 앞부분은 가공하고자 하는 소재의 물성치에 관련된 항이고, 뒷부분은 분사가공시 공정 변수들에 영향을 받는 항이 된다.

2.2 가공의 특성

파우더 블라스팅은 일반적인 분사가공(abrasive jet machining)의 특성과 비슷하나 100 μ m 이하의 미소 형상을 가공한다는 점과 사용되는 분사재의 크기가 100 μ m 이하라는 측면에서 일반적 분사가공과 구별된다. 고속의 공기나 가스에 의하여 가속된 수 μ m~수십 μ m의 미립분사재들이 80-200m/s의 고속 고밀도로 시편에 충돌되어 Fig. 1과 같이 크랙의 전파에 의한 취성모드의 집적으로 미세가공을 하는 기계적 에칭의 한 가공법이다.

Fig. 2는 파우더 블라스팅의 기본 가공원리를 나타낸 것으로 피삭재가 마스크(mask)로 덮여있는 상태에서 노즐의 전후 혹은 좌우 주사(scanning)에 의하여 가공이 이루어지게 된다. 이때 피삭재는 마스크의 형상에 따라서 가공이 이루어지므로 복잡한 형상이나 아주 작은 형상도 쉽게 가공할 수 있다.

가공조건 변수로는 분사압력, 분사속도, 분사재의 재질이나 크기 및 밀도, 노즐의 주사속도나 주사횟수, 노즐과 피삭재 사이의 거리 등이 있으며 가공의 정밀도와 가공능률 향상을 위해서 적절한 조건을 선택하지 않으면 안된다.

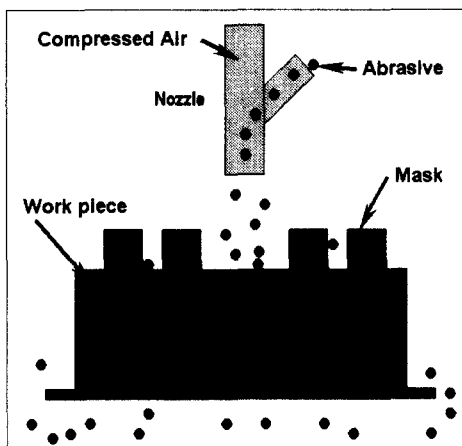


Fig. 2 Schematic impression of powder blasting

또한, 기본적으로 파우더 블라스팅에 의한 가공법은 각각의 미립분사재의 충돌에 의한 미세가공이 집적된 형태이기 때문에 칩핑이나 크랙 및 열발생이 적으므로 유리나 세라믹, 실리콘 및 수정 등 경취재료의 정밀 미세가공에 아주 적합한 가공 방법이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험방법 개요

실험은 시편에 대한 마스크링 과정과 마스크링이 끝난 상태의 시편에 대한 파우더 블라스팅 과정 및 가공형상의 3 차원적 정밀분석 과정으로 구성된다. 파우더 블라스팅을 이용한 정밀 미세형상의 가공시 대부분은 가공물에 마스크를 입히는데 이 과정을 마스크링 공정(masking process)이라고 하고 이는 크게 마스크 필름의 시편에 대한 접착(laminating), 노광(exposure) 및 현상(developing)의 3 공정으로 구성된다.

Fig. 3은 마스크링과 가공까지의 전 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

3.2 마스크링 및 장치

마스크링 공정에서 사용된 라미네이터는 한국의 Young Hwa 에서 제작한 YH-6300TCL 이며 노광기는 동사의 YH-70908K 이다.

마스크링 필름은 일본의 東京應化工業株式會社の ORDYL BF-400 계열을 사용하였다.

마스크링 과정은 Fig. 3에 나타내었듯이 라미네이팅시 스텐레스 강판과 필름의 부착을 원활히 하기 위해 오븐기를 사용하여 충분히 예열하였다. 그 후 라미네이팅된 시편을 미리 제작된 한 변이 각각 50, 100, 150, 200 μ m 인 정사각형 패턴을 가진 패턴 필름 (pattern film)을 노광기에 놓고 평행 UV를 조사시켰다. 이때 조사된 노광량은 95mj이었으며 노광기의 전압은 40~60V로 유지시켰다.

노광이 완료된 시편은 증류수와 희석된 5%의 탄산나트륨의 현상액으로 현상하였다. 현상이 완료된 후 Soft baking을 실시하여 현상된 필름이 적절히 경화되도록 하였다.

이를 세정액에 세척한 후 마스크 필름의 접착력을 높이기 위하여 산(acid)으로 중성화(neutralization) 하여 최종적으로 미립분사가공을 위한 시편을 제작하였다.

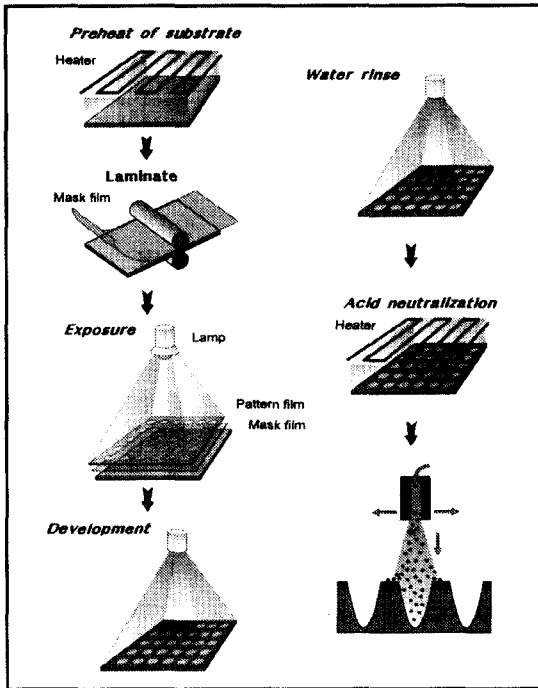


Fig. 3 Masking and powder blasting process

3.3 시편의 재질 및 최종 형상

실험을 위한 가공 시편의 재질은 금형재료로 사용될 수 있는 STS304 이며 현상까지 완료된 시편의 최종 형상을 공구현미경으로 촬영한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다.

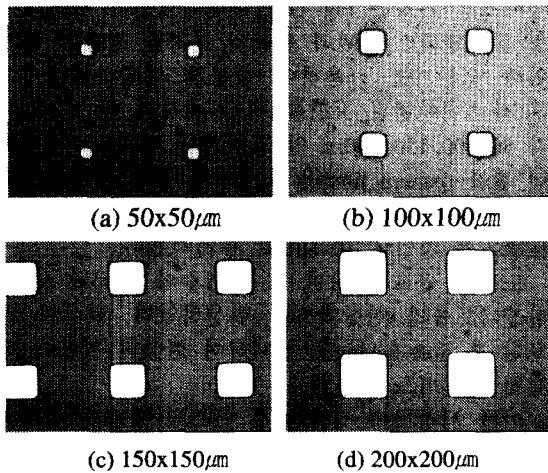


Fig. 4 Photographs of micro pocket patterns(X100)

3.4 가공방법 및 조건

실험에 사용된 파우더 블라스팅 장치는 일본의 Sintobator 에서 제작된 MB-1 모델이며 분사재는 GC(Green Carbide) #800 을 사용하였다.

가공방법은 마스크가 완료된 시편에 대하여 노즐의 주사횟수와 시편과 노즐사이의 거리를 변화시키며 Fig. 5 와 같이 ‘ㄷ’자 경로로 노즐을 주사하며 가공하였다. 파우더 블라스팅을 위한 가공조건은 Table 1 에 나타내었다.

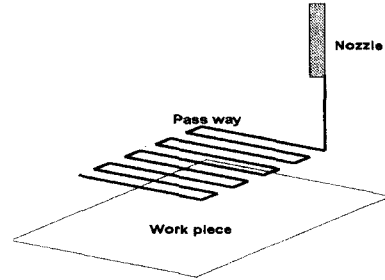


Fig. 5 Scanning path of nozzle

Table 1 Blasting conditions for micro pocket etching

Abrasive	GC #800
Nozzle Diameter	8mm
Nozzle X speed	50mm/s
Nozzle Y speed	100mm/s
X pitch	5mm/s
No. of scanning	3,5,7,10,13,15,20,25
Nozzle height	100, 65mm

3.5 가공 및 형상 계측 장치

마스크링 상태 및 포켓가공 후의 전체적인 형상분석을 위하여 독일의 Leica에서 제작된 공구현미경 (모델: DM LM)을 사용하였다. 공구현미경에 CCD 카메라를 부착하여 관찰된 형상은 미국 Data translation사의 DT3153 화상처리보드를 통하여 PC 에 입력되며 이를 이용하여 최종 형상과 크기를 분석하였다.

또한, 형상의 미세측정을 위하여 광학식 3 차원 형상측정기(미국,WYKO NT-1000)를 사용하였으며 형상분석을 위한 프로그램은 WYKO Vision 32 를 사용하였다. 가공된 포켓 형상은 일본 HIROX 의 3D Micro Vision System(KH-1000)을 이용하여 촬영하였다.

또한, 형상 측정시 측정의 정밀도 및 정확성을 유지하기 위해서 항온항습실 (20±1°C, 습도 36%)에서 측정을 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 포켓의 형상

포켓의 원래 폭이 50 μ m과 200 μ m인 시편에 대하여 3D Micro Vision System을 이용하여 가공 후 포켓의 형상을 1000배로 촬영한 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 원래 가공목표 형상이 정사각형 포켓이었으나 가공 결과를 보면 진직성을 갖는 모서리 가공이 어렵다는 점이다. 이는 Fig. 4에 나타난 마스크링 결과들도 정확한 진직 변이 나타나지 않은 사실에 기인한다고 판단된다. 특히, 포켓의 형상이 작아질 경우 상대적으로 이 현상은 더욱 심하게 나타나는데 이로부터 정확한 형상 가공을 위해서는 마스크링의 정밀성이 우선적으로 요구된다 하겠다.

일반적으로 에칭과정의 전단계인 마스크링 공정에서 형상이 작아질수록 마스크링 작업의 정밀성은 떨어지게 되는데 현재 파우더 블라스팅을 위한 최소의 마스크링 선포는 20 μ m이 한계로 알려져 있어 마스크링 기술의 개발이 요구된다 하겠다.

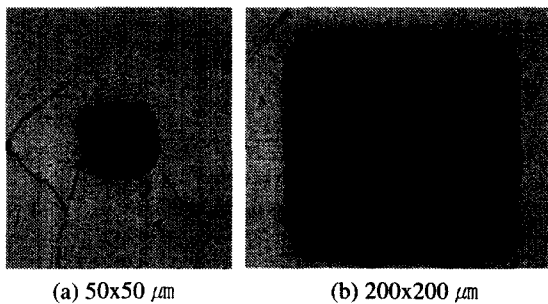


Fig. 6 Photographs of machined pockets by 3D Micro Vision System

Fig 6(b)의 포켓에 대하여 광학식 3차원 형상 측정기를 이용한 3차원적 측정 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 측정 형상을 보면 특이한 점은 파우더 블라스팅과 같은 미세 취성모드의 가공에서도 모서리부에서 미세한 버가 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 미립분사재가 마스크 필름이 제거된

부분에 선택적으로 충격력을 가할 때 소성변형으로 인하여 마스크링 필름의 경계부에서 공작물이 위로 돌기됨에 따라 생기는 현상에 기인하는데 버의 분류상으로 볼 때 포와손 버(poisson burr)에 해당된다.

또한, Fig. 8은 가공된 포켓의 X방향과 Y방향의 단면의 형상을 본 것으로 포켓의 형상은 전체적으로 U자 형태임을 알 수 있다. 단면 형상 측정 결과에서도 모서리부에서 미소하나마 버가 존재하고 있다는 것을 알 수 있는데 강과 같은 연성재료의 가공에서는 취성재료 가공보다 큰 버가 발생된다.

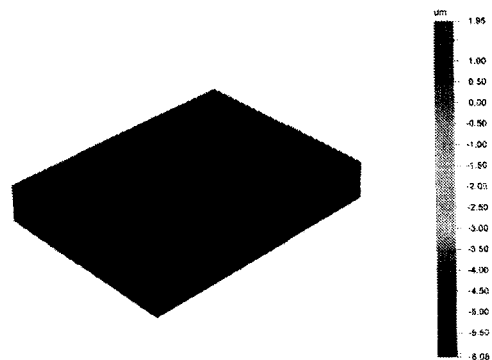


Fig. 7 Three-dimensional view

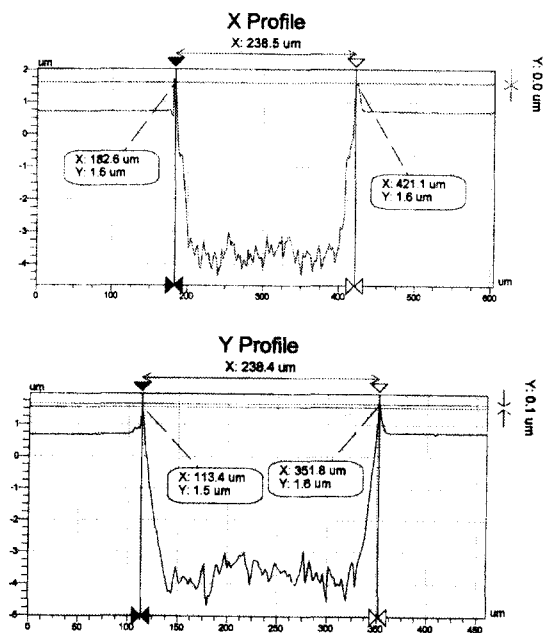


Fig. 8 X,Y profile of machined pocket

4.2 분사 횟수와 노즐 높이의 영향

노즐분사 횟수와 노즐의 높이가 포켓의 가공 깊이와 포켓의 목표 가공치 폭에 대한 실제 가공폭의 증가량에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 노즐의 분사횟수가 증가할수록 가공 깊이와 가공 폭이 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 가공깊이의 경우 노즐의 높이에 상관없이 분사횟수에 거의 비례하여 증가하고 있다. 반면에 가공 폭은 노즐의 높이가 100mm 일 경우에는 노즐의 주사횟수에 거의 비례하여 증가하지만 노즐의 높이가 65mm로 줄어들 경우에는 노즐 주사횟수가 15회를 넘으면서 거의 2차 함수적으로 크게 증가하기 시작한다.

노즐의 높이 변화에 따른 가공특성은 Fig. 9에서 알 수 있듯이 노즐의 높이가 65mm일 때와 100mm일 때 보다는 가공깊이와 가공폭의 증가 모두 더 크게 나타나고 있다. 가공깊이 증가량의 차이는 약 0.5~1.5 μm 이내에서 노즐 주사횟수에 관계없이 거의 일정한 반면에 가공폭 증가량의 차이는 노즐높이가 65mm 일 때 노즐 주사횟수가 15회 이상일 경우 급격하게 커진다는 것을 알 수 있다.

노즐의 주사를 25 회까지 했을 때의 최종 가공 형상을 보면 가공폭은 노즐의 높이가 65mm 일 때 마스킹 상태의 포켓패턴 폭에 상관없이 약 65~85 μm 이 증가하고 노즐높이가 100mm 일 때에는 약 30~35 μm 이 증가한다. 또한, 25 회 주사 후 가공 깊이는 노즐 높이가 65mm 일 때 9.5~11 μm , 노즐 높이가 100mm 일 때 8.5~9.5 μm 로 나타났다. 이로부터 가공 깊이는 가공폭에 비해서는 양적으로 많이 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

한편, 공작물과 노즐 사이의 거리가 작을수록 가공깊이를 기준으로 하는 가공성은 좋아지고 있는데 이는 분사가공시의 가공률을 나타내는 식 (1)에서 노즐의 높이가 낮을수록 공작물에 충돌되는 분사재 입자의 속도 v_p 가 증가하기 때문이다.

주사횟수의 증가에 따른 가공 폭의 증가는 전적으로 마스킹 필름의 경계부 마멸의 점진적 증가에 기인하는데 이러한 필름의 마멸은 분사재의 충돌에 의하여 필름 소재의 물리적 특성이 취약해짐과 동시에 필름 경계부에서 접착력이 저하 됨에 따라 나타나는 현상이라고 판단된다.

한편, 가공 깊이의 증가 경향은 소재의 가공성을 나타내는 것으로 볼 수 있으나 가공 폭의 증가는 원래 목표치 형상에 대한 가공치수의 정밀도를

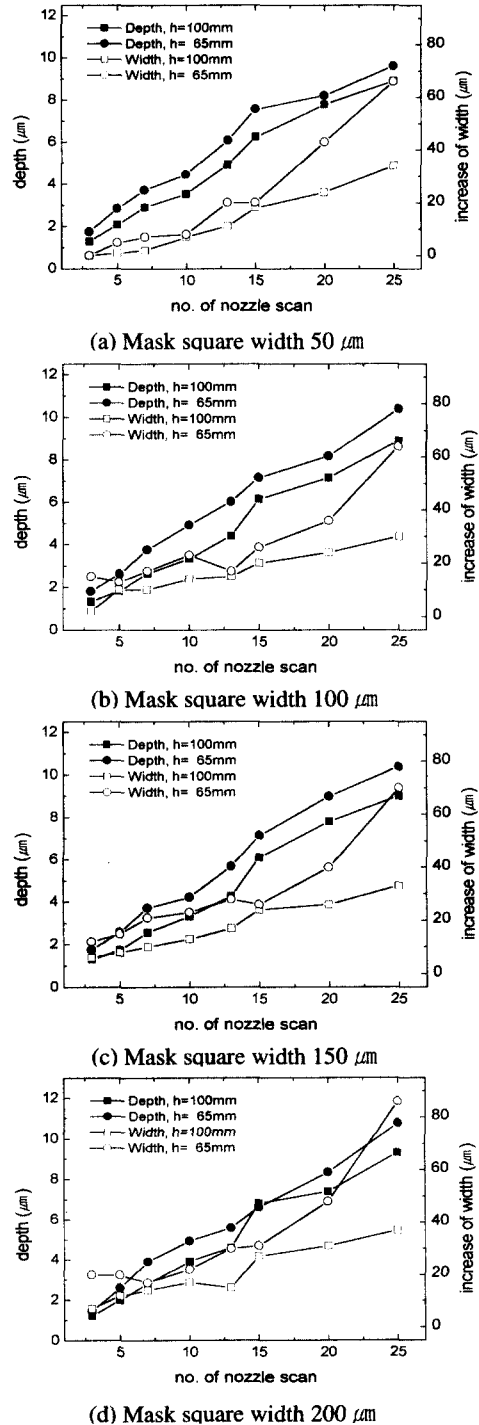


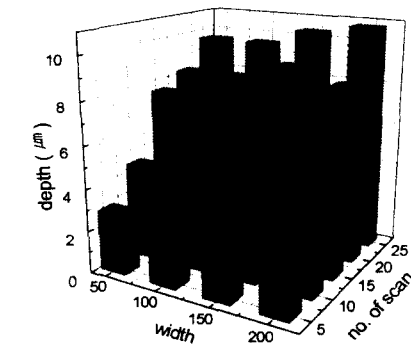
Fig. 9 Effect of no. of nozzle scan and nozzle height on depth and width of pocket

저하 시키는 요인이 되므로 가능한 한 억제하지 않으면 안되는데 따라서 필름의 마멸기구 해석이나 필름의 적절한 선택 및 라미네이팅시 필름과 가공 소재 사이의 접착력 강화 방안에 대한 계속적인 연구가 요구된다.

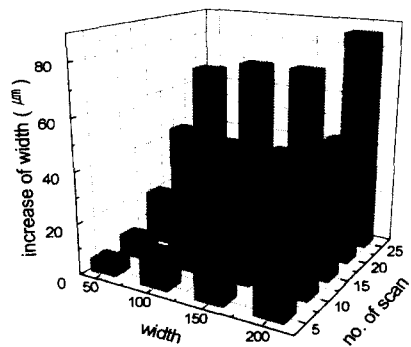
4.3 포켓 폭의 영향

동일한 노즐 주사횟수에 대하여 포켓의 폭이 가공특성에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림은 노즐의 높이가 65mm일 때로 Fig. 10(a)에서와 같이 가공깊이는 포켓의 폭에는 거의 영향을 받고 있지 않는데, 단지 노즐 주사 횟수가 많아질수록 또한 포켓 폭이 증가할수록 가공깊이는 미세하게나마 증가한다는 것을 알 수 있다.

반면에 가공폭의 증가량은 Fig. 10(b)에서 보듯이 전반적으로 마스크링 상태의 폭이 클수록 가공폭의 증가량도 커지게 된다.



(a) Etching depth



(b) Increase of width

Fig. 10 Effect of mask square width on depth and width of pocket (nozzle height 65mm)

이러한 실험결과는 가공하고자 하는 부품의 폭에 따라 가공깊이는 거의 영향을 받지 않으나 오차요인에 해당되는 가공폭의 증가는 큰 영향을 받게 된다는 것을 의미한다. 따라서, 원하는 형상을 정확히 에칭하기 위해서는 폭의 증가를 고려하여 마스크의 패턴 설계 때부터 패턴의 형상을 작게 해 주어야 하는데 이를 위하여 많은 실험결과와 축적이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

파우더 블라스팅을 이용한 스텐레스 강의 미세 포켓 가공시 노즐의 높이와 노즐 주사횟수가 가공형상에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 한 변이 각각 50, 100, 150, 200 μ m인 정사각형 포켓 형상의 가공이 가능하였으며 포켓의 단면형상은 약 10 μ m 전후의 가공깊이까지는 전체적으로 U자로 나타났다.
- (2) 노즐 주사횟수 증가에 따라 가공깊이는 거의 비례적으로 증가하였으나 가공폭은 15 회를 초과함에 따라 특히 노즐 높이가 65mm 일 경우 급격하게 증가하였다.
- (3) 노즐의 높이가 100mm 일 때 보다는 65mm 일 때 가공능률이 높았다.
- (4) 노즐주사를 25회까지 했을 때 목표치 대비 가공폭의 증가량은 노즐의 높이가 65mm일 때 마스크링 상태의 포켓패턴 폭에 상관 없이 약 65~85 μ m이 증가하고 노즐높이가 100mm일 때에는 약 30~35 μ m이 증가하였다.
- (5) 25회 주사 후 가공깊이는 노즐 높이가 65mm일 때 9.5~11 μ m, 노즐 높이가 100mm 일 때 8.5~9.5 μ m로 나타났다.
- (6) 마스크링 상태의 포켓의 폭 변화가 가공능률에 미치는 영향은 가공깊이의 경우 거의 영향을 받지 않지만 가공폭의 증가량은 포켓의 폭이 커질수록 동일 주사횟수에 대하여 증가하는 경향을 보였다.
- (7) 가공 폭의 큰 증가는 마스크링 필름의 마멸에 기인하여 가공정밀도를 저하시키는 요인으로서 필름의 마멸기구에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 廚川常元, 吉田典夫, 庄司克雄, "아블레이시브
젝트加工的加工特性," 情密工學會誌, Vol.
54, No. 6, pp. 881-885, 1998.
2. 北嶋弘一, 野中正貴, 伊澤守康, "乾式플라스트
加工に関する基礎的研究 (第 2 報)," 2000 年度
精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, pp.
238, 2000.
3. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.C.M. de Haas,
"High quality mechanical etching of brittle
materials by powder blasting," Sensors and Actuators
85, pp. 296-303, 2000.
4. Henk Wensink, U.W. Berenshot, Henri V. Jan seu,
Miko C. Elwenspoek, "High Resolution Powder
Blast Micromachining," Proceedings of the IEEE
Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 2000,
pp. 769-774, 2000.
5. H.J. Ligthart, P.J. Slikkerveer, F.H. In't Verd, P.H.W.
Swinkels, M.H. Zonneveld, "Glass and Glass
Machining in Zeus Panels," Philips J. Res., Vol. 50,
No. 3/4, pp. 475-499, 1996.
6. Arvi Kruusing, Seppo Leppavuori, Abtti Uusimaki,
Matti Uusimaki,, "Rapid prototyping of silicon
structures by aid of laser and abrasive-jet
machining," Part of the Symposium on Design, Test,
and Microfabrication of MEMS and MOEMS, Paris,
France, SPIE, Vol. 3680, pp. 870-878, 1999.
7. 伊澤守康, "噴射加工の動向と應用," 砥粒加工
學術誌, Vol. 44, No.1, pp. 11-14, 2000.
8. D.Solignac, A.Sayah, S.Constantin, R.Freitag,
M.A.M. Gijs, "Powder blasting for the realization of
microchips for bio-analytic applications," Sensor and
Actuators A 3003, pp. 1-6, 2001.
9. 최중순, 박경호, 박동삼, "Abrasive Jet Machining
을 이용한 유리의 미세 홈 가공," 한국정밀공
학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 963-
966, 2000/10.
10. 박경호, 김광현, 최중순, 박동삼, "Powder Blasting
을 이용한 유리의 미세선형홈 가공시 노즐 주
사횟수의 영향," 2001년도 한국공작기계학회 춘
계학술대회논문집, pp. 294-299, 2001/4.
11. 박경호, 최중순, 김광현, 박동삼, "Powder Blasting
을 이용한 미세 포켓가공," 한국정밀공학회
2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 1060-1063,
2001/5.
12. 박경호, 김광현, 최중순, 박동삼, "Micro Abrasive
Jet Machining시 절삭조건과 가공형상," 대한기
계학회 2001년 생산 및 설계공학부문 춘계학
술강연회 논문집, pp. 113-119, 2001/7.
13. 최중순, 박경호, 박동삼, "Micro Abrasive Jet
Machining 을 이용한 유리의 미세 홈 가공,"
한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 10 호, pp. 178-
183, 2001.
14. A.G. Evans, M.E. Gulden, M. Rosenblatt, "Impact
Damage in Brittle Materials in the Elastic-plastic
Response Regime," Proc. R. Soc. London A 361, pp.
343-365, 1978.
15. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. in Veld, H.
Scholten, Erosion and damage by sharp particles,"
Wear, 217, pp. 237-250, 1998.
16. A.P.Verma, G.K.Lal, "A Theoretical Study of
Erosion Phenomenon in Abrasive Jet Machining,"
Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 564-570.,
Nov. 1996.
17. G.L. Sheldon, "Similarities and Differences in the
Erosion Behavior of Materials," Trans. of the ASME,
Journal of Basic Engineering, pp. 619-626, 1970.
18. D.B. Marshall, B.R. Lawn, A.G. Evans, "Elastic/
plastic Indentation Damage in Ceramics : the Lateral
Crack System," J. Am. Ceram. Soc. 65 (11), pp. 561-
566, 1982.