

## 초미세 금속 박판 홀 어레이 가공

임성한<sup>#</sup> · 손영기<sup>2</sup> · 오수익<sup>2</sup>

### Fabrication of Ultra Small Size Hole Array on Thin Metal Foil

S. H. Rhim, Y. K. Son, S. I. Oh

(Received September 9, 2005)

#### Abstract

In the present research, the simultaneous punching of ultra small size hole of 2~10  $\mu\text{m}$  in diameter on flat rolled thin metal foils was conducted with elastic polymer punch. Workpiece used in the present investigation were the rolled pure copper of 3 $\mu\text{m}$  in thickness and CP titanium of 1.5 $\mu\text{m}$  in thickness. The metal foils were punched with the dies and arrays of circular and rectangular holes were made. The process set-up is similar to that of the flexible rubber pad forming or Guerin process. Arrays of holes were punched successfully in one step forming. The punched holes were examined in terms of their dimensions. The effects of the wafer die hole dimension and heat treatment of the workpiece on ultra small size hole formation of the thin foil were discussed. The process condition such as proper die shape, pressure, pressure rate and diameter-thickness ratio ( $d/t$ ) were also discussed. The results in this paper show that the present method can be successfully applied to the fabrication of ultra small size hole array in a one step operation.

**Key Words** : Ultra Small Hole Array, Punching, Wafer Die

#### 1. 서 론

미세 홀 펀칭[1]은 수십에서 수백  $\mu\text{m}$  의 미세 홀을 미세 펀치와 다이를 이용하여 홀을 가공하는 방법이며, 잉크젯 프린터 헤드 노즐, IC 패키징에 필요한 비아 홀(via hole) 가공[2] 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 펀치와 금형 등의 미세 공구를 사용하는 일반적인 기계적 공정으로 미세 홀을 가공하는 방법은 홀의 크기가 작아질수록 가공 한계에 부딪히게 된다. 예를 들어 양질의 홀을 가공하기 위해서 일반적으로 필요하다고 알려진 5~15% 정도의 공구 간극 대비 소재 두께 비( $c/t$ )를 수  $\mu\text{m}$  두께를 갖는 시편에 수  $\mu\text{m}$  크기의 초미세 홀을 가공하는 공정에 적용한다면 공구 간

극은 수백 nm 크기가 되어야 한다.

이러한 크기의 초미세 금형과 펀치의 제작은 매우 어렵고, 제작이 가능하더라도 홀 가공을 위한 펀치의 강도와 위치 정렬 문제가 발생하리라 예상된다.

또한 지금까지는 여러 개의 홀을 가공하기 위해서 하나의 펀치로 연속 가공을 수행하거나 다수의 펀치를 갖는 공구를 만들어 사용하여 왔으나, 홀의 크기가 작아짐에 따라 이 공정 또한 펀치와 다이 제작이 매우 어렵게 되었다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 금속 펀치와 다이를 이용하지 않고 유연한 재료를 사용하여 수  $\mu\text{m}$  크기의 초미세 홀 어레이(hole array)를 쉽게 가공할 수 있는 플렉시블(flexible) 펀칭 공정을 제

1. 한국기술교육대학교 기계정보공학부

2. 서울대학교 기계항공공학부

# 교신저자 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부

E-mail : shrhim@kut.ac.kr

안하고자 한다[3]. 고무 패드 성형법(rubber pad forming)이나 Guerin 공정[4]이라고도 알려진 이러한 방법을 적용하여 Kurosaki[5]는 5~100 $\mu$ m 두께를 갖는 구리 시편에 실리콘 폴리머 펀치로 50~100 $\mu$ m 직경의 홀을 가공하였다. Takehashi[6] 등은 고무펀치와 텅스텐-카바이드 다이를 사용하여 25 $\mu$ m 두께의 아몰퍼스 합금재료에 수십 mm 크기의 항공기용 부품을 블랭킹하였다. Watari[7] 등은 펀치 대응으로 우레탄 시트와 철재 다이를 사용하여 각각 50 $\mu$ m, 100 $\mu$ m 두께의 SUS304 시편에 1~5mm 직경 홀을 가공하였다.

상기된 연구 사례들에서 가공된 부품은 최소 수십  $\mu$ m 크기를 갖는 형상이므로 다이는 일반적인 기계 가공에 의해 제작되었다. 그러나 수  $\mu$ m 크기의 초미세 홀 형상의 다이를 만들기 위해서는 Joo[8] 등이 미세박판 성형에 사용한 것과 같이 반도체 공정으로 웨이퍼 다이(wafer die)를 제작하는 방안을 사용하여야 한다.

본 연구에서는 폴리머 펀치(polymer punch)와 웨이퍼 다이를 사용하여 2~10 $\mu$ m 크기의 초미세 홀 어레이를 냉간압연으로 만들어진 미세박판에 성공적으로 가공하였고, 제안된 방법의 홀성형성을 등을 고찰하였다. 또한 냉간 압연된 박판과 풀림(annealing)처리된 박판의 홀 가공성 및 펀칭 압력 등에 따른 홀 성형 결과를 비교하였다.

## 2. 펀칭 공정 설계

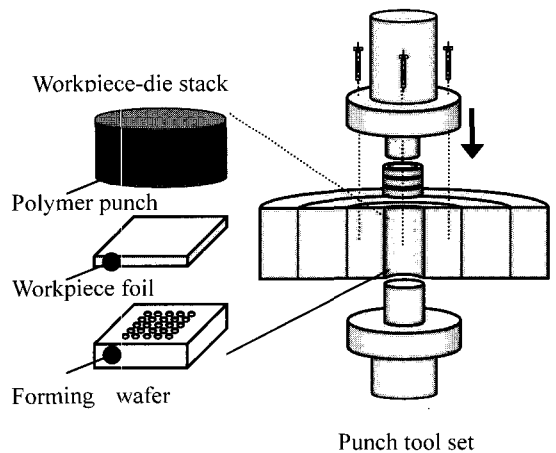
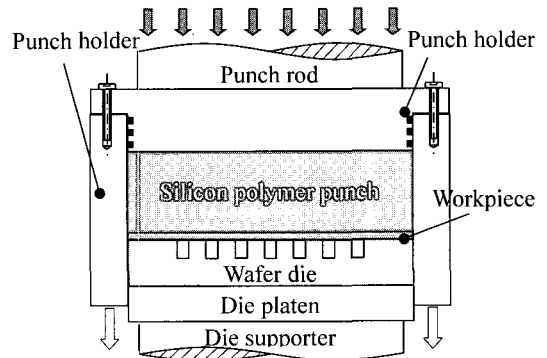
### 2.1 가공 소재

성형을 위해 사용된 미세박판은 3 $\mu$ m 두께의 구리와 1.5 $\mu$ m 두께의 CP 티타늄이다. 각각의 미세박판은 냉각 압연에 의해 제작되었으며, 두께 공차는 구리의 경우  $\pm 0.3\mu$ m 이내, 1.5 $\mu$ m 두께의 티타늄 박판에 대해서는  $\pm 0.15\mu$ m 이내이다. 각 박판의 인장 강도는 394MPa 와 450MPa 이다. 각 박판의 표면 거칠기는 150~200nm 로 측정되었고 핀 홀(pin hole)과 같은 초기 결점은 존재하지 않았다.

소재가 압연으로 제작되었기 때문에 가공 시에 더 큰 힘이 요구된다고 생각되어 구리박판을 열처리를 통해 강도를 줄이고 압연 제작된 박판과 성형 결과를 비교했다. 열처리조건은  $10^{-5}$ Torr 의 진공 상태에서  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  으로 가열과 냉각속도를 유지하였다. 열처리 온도는 Rai-Choudhury[9]를 참고하여  $385^{\circ}\text{C}$  로 선택하였다.

### 2.2 펀칭 공정

Fig. 1은 플렉시블 펀칭 공정의 기본 개념을 보여주고 있다. Fig.1(a)와 같이 공구는 실리콘 폴리머 펀치(silicone polymer punch), 펀치 홀더(punch holder), 컨테이너 다이(container die), 다이 플레이트(die platen) 등으로 구성되어 있다. 폴리머 펀치의 분해능은 0.1 $\mu$ m, 인열강도(tear strength)는 15~20 kN/m<sup>2</sup>이며 13.3mm 의 직경과 6.4mm 이 높이를 갖는 원기둥 형태로 제작되었다. Fig. 1(b)에서 보듯이 폴리머 펀치와 시편을 차례로 웨이퍼 다이 위에 적층하여 컨테이너 다이 안에 놓는다. 펀치 홀더는 펀칭 공정시 하중을 폴리머 펀치에 전달하고, 이 때 컨테이너 다이는 폴리머 펀치가 외부로 밀리는 것을 방지하여 수직 하중이 시편에 정확히 부가되도록 한다. 펀치 홀더와 컨테이너 다이는 함께 움직일 수 있도록 서로 체결되었다.



(a) Schematic of die-workpiece-punch stack [3]  
(b) Schematic of tooling set

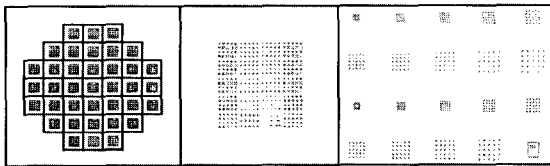
Fig. 1 Schematic of flexible punching process

### 2.1 다이 설계 및 제작

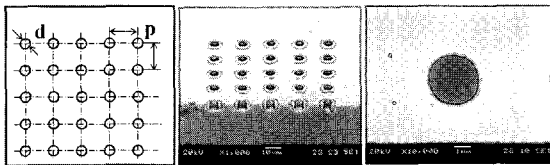
Fig. 2(a)는 포토 리소그래피공정에 사용되는 5인치 유리 마스크 위에 설계한 금형 패턴을 보여주고 있다. 하나의 마스크에는 12×12mm 크기의 구획(section)이 있고 그 안에는 서로 다른 금형패턴이 들어 있는 20 개의 부구획(sub-section)이 있다. 구획이 펀칭 공정 중 하나의 금형으로 사용되므로 하나의 마스크로 37 개의 금형을 만들 수 있다. Fig. 2(b)는 하나의 부구획 안에 있는 5×5 홀 어레이를 보여주고 있다. 원형 홀(circular hole)의 경우, Fig. 2(b)에서 보듯이 직경 d인 5×5 홀 어레이가 간격 p 만큼 떨어져 있고, 부구획 안에서 같은 직경 d인 홀 어레이가 9 가지가 있는데, 이 때 간격 p는 1.5d 크기에서 6d 까지 0.5d 만큼씩 증가하도록 고안되어 있다[3].

Fig. 2(c)와 (d)는 각각 제작된 금형의 홀 어레이와 홀 표면을 보여주고 있다.

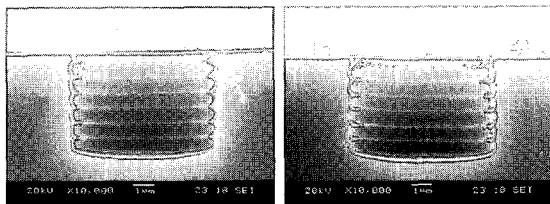
실리콘 웨이퍼를 이용하여 금형을 제작하기 위해 우선 베어 웨이퍼(bare wafer)를 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (=4:1) 용액으로 세척을 하고 HF : H<sub>2</sub>O (=1:10) 용액으로 웨이퍼의 자연 산화 층을 없앤다.



(a) Designed mask (mask, section, sub-section)



(b) Die dimension (c) Die hole array (d) Die hole surface



(e) As dry etched die (f) Die, after wet isotropic etching

Fig. 2 Cr mask design and Si wafer die

두번째로 감광액 도포(PR coating), 소프트 베이 크(soft bake), 노광(exposure), 현상(development), 하드 베이 크(hard bake)와 같은 포토 리소그래피 공정을 수행하면 크롬(Cr) 마스크의 패턴대로 두께 1.2μm 를 갖는 PR 층(photo resist layer)이 생기게 된다.

세번째로 웨이퍼에 일정한 홈(groove)을 만들기 위해 DRIE(deep reactive ion etching)[8] 공정을 이용해 건식 식각을 한다. DRIE 공정 중에 사용되는 Bosch process 는 Fig. 2(e)와 같이 홈을 수직으로 만들기 위해 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 플라즈마를 이용하여 폴리머 증착을 하고 SF<sub>6</sub> 플라즈마를 이용하여 식각을 하는 과정을 반복하여 원하는 깊이를 만든다. 이러한 반복 과정 때문에 다이 벽쪽으로 0.2μm 깊이의 0.7μm 크기 리플(ripple) 형상이 생기게 된다. 펀칭 시 전단으로 인해 제거될 시편의 스크랩(scrap) 때문에 공정이 방해 받지 않도록 홀의 깊이는 11μm 정도로 가공하였다.

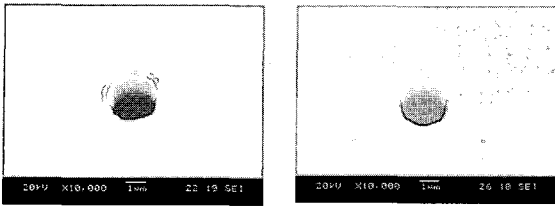
네번째로 O<sub>2</sub> 플라즈마로 PR 을 태우고 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (=4:1) 용액으로 PR 층을 웨이퍼로부터 완전히 제거한다. 끝으로 웨이퍼를 패턴에 따라 12×12 mm 로 자르면 원하는 정사각형의 금형을 얻을 수 있다.

원활한 펀칭 공정을 위해 다이 홀 가장자리를 날카롭게 만드는 것이 필요하다. 이를 위해 습식 식각을 수행하였다. 약 1초간 습식 식각(wet isotropic etching)을 수행하여 Fig. 2(f)와 같이 아주 미세하게나마 직각이 아닌 음각 형상 모서리를 갖는 다이 형상을 얻을 수 있었다.

### 3. 실험 결과 및 토의

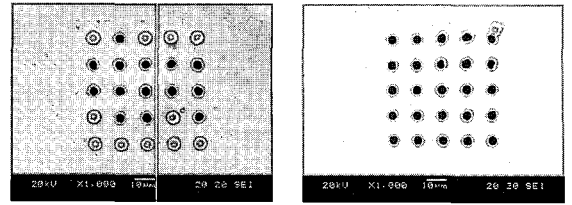
폴리머 펀치(polymer punch)와 웨이퍼 다이(wafer die)를 사용한 플렉시블 펀칭을 수행하여 2~10μm 크기의 구형(직경 기준) 및 사각형(대각선 기준) 형상의 조미세 홀 어레이와 다양한 형태의 홀을 냉간압연으로 만들어진 미세박판에 성공적으로 가공하였고, 제안된 방법의 성형성 등을 고찰하였다.

Fig. 3 은 3μm 두께의 구리 박판에 펀칭된 2μm 직경의 홀 어레이 중 실제로는 약 2.3μm 의 크기로 가공된 홀의 양면을 SEM 으로 관찰한 모습을 보여주고 있다. 폴리머 펀치쪽 면의 경우 펀치의 압입에 의해 시편이 안쪽으로 변형된 것을 볼 수 있다. Fig. 4 에서 1.5μm 두께의 티타늄 박판에 성



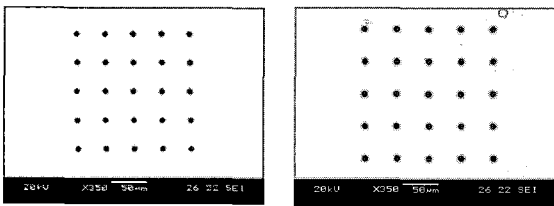
(a) Die-contact side (b) Punch-contacted side

Fig. 3 Punched hole of copper foil ( $d=2.3\mu\text{m}$ )



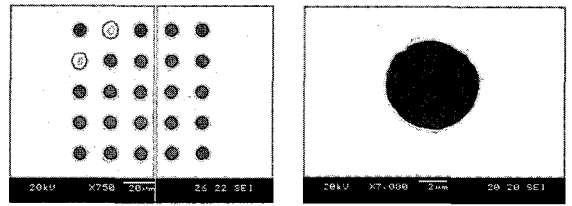
(a) As rolled foil (b) As annealed foil

Fig. 6 Punching result of as rolled and as annealed foil

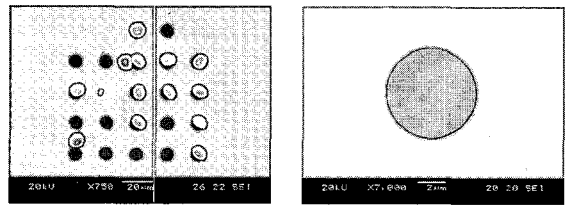


(a) 8μm diameter (b) 9μm diameter

Fig. 4 Punched hole array of titanium foil

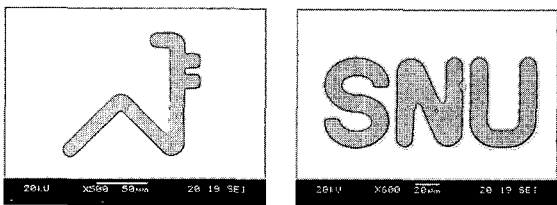


(a) Punched holes with dry etched die



(b) Punched holes with isotropic etched dies

Fig. 7 8μm-diameter holes punched on titanium foil at 1.1GPa and 5MP/sec



(a) Emblem of SNU (b) Letters 'SNU'

Fig. 5 Curved holes punched on titanium foil with 14μm width

공적으로 펀칭된 다양한 직경의 홀 어레이들을 볼 수 있다. 5×5 홀 어레이가 모두 깨끗하게 가공되었으며 티타늄의 경우 각각 8~10μm 직경의 홀 다이를 사용했을 때 실제 시편에 거의 오차 없이 같은 크기의 홀이 가공되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 14 μm 너비의 복잡한 형상을 갖는 문자열을 펀칭한 것으로 비교적 깨끗한 가공 결과를 보여주고 있다.

### 3.1 시편의 열처리에 따른 성형 결과

압연 제작된 구리 박판과 열처리를 한 구리 박판을 각각 동일한 조건(DRIE 공정으로 제작된 금형, 가압속도 2MPa/sec, 1.4GPa 까지 가압)하에서 가공하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 압연 제작된 두께 3μm 두께의 구리박판과 이를 열처리한 구리박판에 직경 4μm의 홀 어레이를 펀칭한 결과이다. 같은 가압 조건하에서는 열처리한 구리박판이 가공률과 품질이 좋은 것으로 관찰되었으나, Fig. 6(b)

에서 보듯이 성형 후에 박판을 분리하는 과정에서 박판이 부분적으로 손상되는 문제가 발생하였다. 또한 열처리를 하지 않은 박판의 경우에도 Fig. 8과 같이 가압 크기와 가압 속도를 조절하면 더 좋은 성형 결과가 나왔다. 따라서 열처리를 할 경우 열처리로 인한 항복 강도의 감소로 더 낮은 가압 조건에서도 비교적 성형이 잘 되는 것으로 보이나 결정립의 비대화 등 여러 인자의 영향에 대한 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 다이 홀 형상에 따른 성형 결과

Fig. 2(e)와 같이 건식 식각으로 제작한 웨이퍼 다이와, Fig. 2(f)와 같이 펀칭에 유리하다고 판단한 언더컷 형상을 얻기 위해 건식 식각 후 습식 식각을 추가로 수행한 다이 두 가지 금형으로 펀칭 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 두 가지 타입의 웨이퍼 다이로 1.5μm 두께의 티타늄 박판에 8μm 직경의 홀 어레이를

편칭한 결과이다. 이 때 가해진 압력은 1.1GPa 이고 가압 속도는 5MP/sec 이다. Fig. 7(a)에서 보듯이 습식 식각을 하지 않은 경우 홀 어레이 일부분만이 편칭이 되었고 가공된 홀의 단면도 정원이 아니다. 반면, 습식 식각을 하여 언더컷 형상의 다이를 가지고 가공을 한 결과, Fig.7(b)에서 보듯이 거의 모든 홀이 편칭되었고 홀의 가장자리도 깨끗하게 전단된 것을 알 수 있다. 일반적인 편칭 공정에서 알려진 바와 같이 편칭은 홀 가장자리에서 전단이 일어난 후 연성파괴에 의해 마무리되는 특성이 있다. 따라서 언더컷 형상의 다이가 편칭 중 홀 가장자리에서 전단이 쉽게 일어나도록 도움을 주었던 것으로 판단된다.

### 3.3 공정 조건에 따른 편칭 결과

원형 홀편칭을 수행하기 위해 필요한 최소 하중은 상계해(upper bound solution)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S_f \cdot S_u \quad (1)$$

여기서 d 는 홀의 직경, t 는 시편의 두께, S<sub>f</sub> 는 시편의 인장강도, S<sub>u</sub> 는 전단 계수(shear factor)로 Geiger[10]에 의하면 0.7~0.8 정도의 크기를 갖는다. 최소 가압 크기는 원형 홀이므로 식(1)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$P = (4t \cdot S_f \cdot S_u) / d \quad (2)$$

이상의 식을 3μm 두께의 구리 시편에 3μm 직경의 홀을 편칭할 경우에 적용하면 가공에 필요한 최소 가압 크기는 1.26GPa 로 계산된다. 그러나 Fig. 7(a)에서 보듯이 습식 식각으로 제작한 금형을 사용하여 3μm 두께의 구리 시편에 2MPa/sec 의 가압 속도로 최대 압력 1.4GPa 까지 가압해도 편칭 가공이 완전하게 되지 않았고 1.6GPa 까지 가압한 결과 비로소 편칭이 잘 되었다.

Fig. 9 는 최대 가압 크기 1.6GPa 에 가압 속도를 달리하여 3μm 두께 구리 시편을 편칭한 결과이다. 일반적으로 가압 속도가 크면 편칭에 의한 전단이 잘 되리라 예상되었으나, Fig. 9(c)와 (d)에서 보듯이 버가 많이 발생하는 것으로 관찰되었다. 따라서 시편의 두께와 편칭 홀의 크기에 따라 적절한 가압 크기와 가압 속도를 구하는 것이 필요하리라 판단된다.

### 3.4 홀 어레이 편칭 결과

다양한 크기의 원형 홀 어레이를 편칭한 결과 실제 얻어진 홀의 크기는 Table 1과 같다. 편칭은 일정한 크기의 가압 속도 5MPa에 가압 크기는 1.6GPa였다. 여기서 d는 반도체 공정으로 제작된 다이 홀의 직경이고, 편칭 후 얻어진 홀의 직경은 d<sub>c</sub>(구리)와 d<sub>t</sub>(티타늄)로 나타내었다. 또한 t<sub>c</sub>는 구리 박판의 두께로 3μm이고 t<sub>t</sub>는 티타늄 박판의 두께(1.5μm)이다.

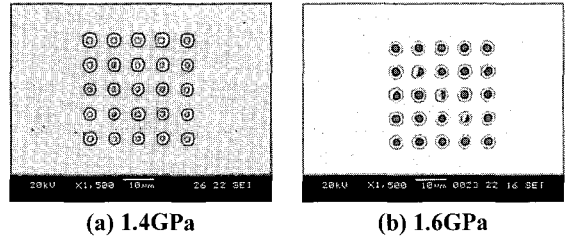


Fig. 8 3μm diameter holes punched on copper foil at 2MPa/sec

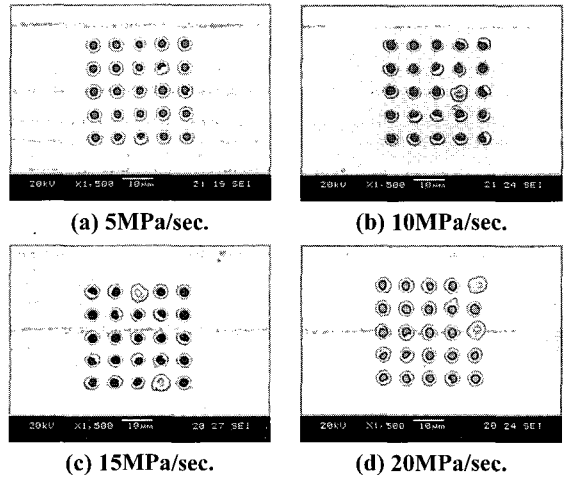


Fig. 9 3μm diameter holes punched on copper foil at 1.6GPa

Table 1 Punched hole diameter on metal foils

d (μm)	3	4	5	6	7	8	9	10
d/t <sub>c</sub>	1.0	1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3
d <sub>c</sub> (μm)	2.3	3.3	4.3	5.3	6.5	7.7	8.7	9.8
Δd <sub>c</sub> (μm)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.2
d/t <sub>t</sub>	2.0	2.7	3.3	4	4.7	5.3	6	6.7
d <sub>t</sub> (μm)	-	3.4	4.5	5.5	6.8	8.0	9.0	10
Δd <sub>t</sub> (μm)	-	0.6	0.5	0.5	0.2	0	0	0

홀 성형 정확성(punched hole accuracy)  $\Delta d$  는 다이 홀의 직경( $d$ )와 펀칭된 홀의 직경( $d_c$  혹은  $d_i$ )의 차이로 정의되며, Table 1에서 보는 바와 같이 약 0.2~0.7 $\mu\text{m}$  로 측정되었다.  $\Delta d$  는 티타늄의 경우 구리 보다 작은 것으로 관찰되었으며, 두 재료 모두 펀칭 직경이 커질수록  $\Delta d$  는 감소하였다.

그러나 직경( $d$ )이 아닌 직경-두께비 (diameter-thickness ratio,  $d/t$ )로 환산할 경우, Table 1 에서 보듯이  $d/t=2.7$  인 경우 구리시편의  $\Delta d$  가 0.3 $\mu\text{m}$  으로 티타늄 시편의 0.6 $\mu\text{m}$  보다 더 작은 것으로 관찰되었다. 일반적으로 같은 직경-두께비( $d/t$ )에 대해 펀칭 성형성을 판단하므로, 구리 시편의 홀 성형성이 티타늄 시편보다 좋다고 추정할 수 있다.

#### 4. 결론

수  $\mu\text{m}$  직경의 홀을 가공하는데 있어 펀치와 금형을 사용하는 전통적인 기계적 펀칭 공정은 펀치와 금형 제작과 공구 정렬의 어려움으로 많은 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위한 방안으로 실리콘 폴리머 펀치와 반도체 공정으로 제작된 웨이퍼 다이를 이용하는 플렉시블(flexible) 펀칭 공정을 제안하였다. 제안된 공정에 맞는 펀치 공구를 설계하고 이를 이용하여 3 $\mu\text{m}$  두께의 구리 박판과 1.5 $\mu\text{m}$  의 티타늄 박판에 다양한 형상과 홀 어레이 펀칭 공정을 성공적으로 수행하였다. 실험 결과로부터 폴리머 펀치를 사용한 초미세 홀 가공 공정의 가능성을 확인할 수 있었으나 펀칭률을 더욱 향상시킬 수 있는 방안과 적정 공정 조건을 찾는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

[1] B. Y. Joo, S. I. Oh, B. H. Jeon, 2001, Development

of micro punching system, Annals of the CIRP, Vol. 50/1, pp. 191~194.

- [2] S. H. Rhim, S. Y. Shin, B. Y. Joo, S. I. Oh, 2006, Burr formation during micro via-hole punching process of ceramic and PET double layer sheet, Int. J. of Adv. Manufacturing Technology, (to be published).
- [3] S. H. Rhim, Y. K. Son, S. I. Oh, 2005, Punching of ultra small size hole array, Annals of the CIRP, Vol. 54/1, pp. 261~264.
- [4] T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegel, 1983, Metal forming: Fundamental and applications, American society for metal.
- [5] Y. Kurosaki, 1990, Studies on microplastic working, Advanced Technology of Plasticity, Vol.2, pp. 1059~1064.
- [6] F. Takahashi, T. Nishimura, I. Suzuki, 1991, A method of blanking from amorphous alloy foils using rubber tool, Annals of the CIRP, Vol.40/1, pp. 315~318.
- [7] H. Watari, H. Ona, Y. Yoshida, 2003, Flexible punching method using an elastic tool instead of a metal punch, J. of Mater. Process Technol., Vol.137, pp. 151~155.
- [8] B. Y. Joo, S. I. Oh, Y. K. Son, 2004, Forming of micro channels with ultra thin metal foils, Annals of the CIRP, Vol.53/1, pp. 243~246.
- [9] P. Rai-Choudhury, Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication, Vol.2: Micromachining and microfabrication, SPIE Optical Engineering Press.
- [10] M. Geiger, F. Vollertsen, R. Kals, Fundamentals on the manufacturing of sheet metal microparts, Annals of the CIRP, Vo.45/1, pp. 277~282.