

25 μ m 홀 펀칭 공구 정렬을 위한 광학 시스템 설계

주병윤* · 임성한** · 오수익***

(2004년 2월 10일 접수)

Design of Two-way Image Acquisition System for 25 μ m Tool Alignment in the Micro Hole Punching

B. Y. Joo, S. H. Rhim and S. I. Oh

Abstract

The objective of this study is to develop a highly accurate micro tool alignment system applicable to the micro machining technology. In a specific application such as micro hole punching, radial clearance between micro tools is order of a few micron. Under this micron scale tool clearance, accuracy of tool alignment is very important for ensuring hole quality. In the present study, a two-way image acquisition system was developed, which can produce overlapped image of both micro tools that face each other, and applied to the tool alignment in the micro punching. Also, to meet alignment accuracy of tools within 1 μ m, the cross correlation image processing algorithm was employed. With this system, 25 μ m punching tools with 1 μ m radial clearance could be accurately aligned.

Key Words : Alignment, Tool, Micro Punching, Two-way Imaging, Cross Correlation

1. 서론

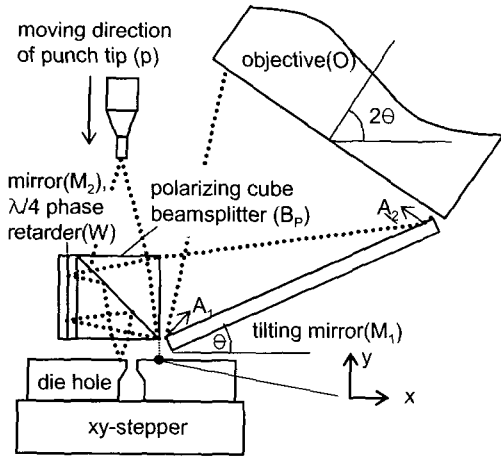
미세 가공 기술⁽¹⁻³⁾ 개발 과정에서 대두되는 여러 기술적 문제들 중 기계 정밀도 확보는 미세 가공 기구 설계 시 매우 중요한 설계 목표이다. 직경 25 μ m의 미세 홀 펀칭 공정에서 가공 소재의 두께 대비 다이 간극 비, $c/t=5\%$ ⁽⁴⁾를 실현하려면 펀치 팁의 직경이 25 μ m, 다이 홀의 직경이 27 μ m가 되어야 한다. 따라서 육안으로 볼 수 없는 미세 크기의 펀치와 다이 홀을 정확도 1 μ m 이내에서 정렬해야 한다. 부정확한 공구 정렬(tool alignment)은 펀칭 가공된 홀에 편심 버(eccentric burr)를 유발할 수 있고 펀치 팁 또는 다이 홀의 파손을 야기할 수 있다. 실제로 공구 정렬의 어려움 때문에 미세

홀 펀칭에 관한 이전 연구들에서는 미세 공구의 능동적인 정렬을 피하는 방향으로 공정 설계가 이루어졌으나 결과적으로 다른 문제들이 유발되었다. 즉, Masuzawa⁽⁵⁾의 연구에서는 펀칭 가공 전 미세 방전 공정으로 공구를 만들어야 하는 번거로움이 있고, Mori⁽⁶⁾의 연구에서는 펀칭 가공 전 미세 펀치로 다이 홀을 피어싱해야 하므로 다이 재질로 초경 합금 같은 고강도재를 쓸 수 없다는 단점이 있다. 미세 팁을 홀에 넣어야 하는 또 다른 응용 예는 미세 프로브 팁의 바이브로스캐닝⁽⁷⁾(vibroscanning)을 이용한 미세 홀 형상 측정에 관한 연구에서 찾을 수 있다. 프로브를 미세 홀에 넣기 위해 프로브와 수평 방향으로 일정한 거리 만큼 떨어져 있는 현미경(teaching microscope)이 사

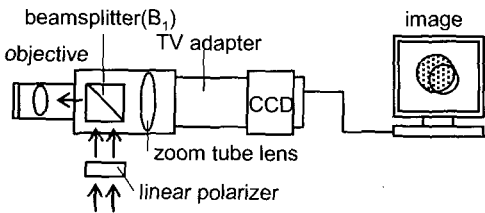
* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 정민기계설계공동연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부



(a) Two-way imaging optic



(b) Infinity microscope

Fig. 1 Micro tool alignment system

용되었고, 현미경의 광축(optical axis)과 측정하고자 하는 홀의 중심을 정렬시킨 후 이송 장치에 의해 홀을 미세 프로브에 접근시킨다. 그러나 이러한 방법으로 미세 팁과 홀의 정렬 정확도를 1 μ m 이내로 만족시키기 위해서는 현미경의 광축과 미세 프로브 팁 중심과의 수평거리를 정확도 1 μ m 이내에서 측정해야 하는 어려움이 있다. 또 여타의 미세 가공 분야에서도 혹독한 공구 정렬 요구가 있다고 사료된다.

본 연구에서는 미세 펀칭 공구 정렬을 위하여 양안 영상 획득 시스템(two-way image acquisition system)을 개발하였다. 미세 펀칭 공구 정렬은 평면적으로 두 동일한 크기 원의 정렬 문제로 생각되었고, 개발된 양안 영상 획득 시스템을 이용하여 미세 원형 팁의 밑면과 다이 홀 윗면을 동시에 관찰하면서 펀칭 팁 근방에서 다이 홀의 수평 위치를 미세하게 조정하여 공구 정렬을 수행하였

다. 또 1 μ m 이내의 정렬 정확도 확보를 위하여 분해능 0.6 μ m인 크로스 코릴레이션⁽⁸⁾ 영상 처리 알고리즘(cross correlation image processing algorithm)을 적용하였다. 개발된 영상 획득 시스템을 앞서 제작된 미세 펀칭 시스템⁽⁹⁾에 적용하여 간극 1 μ m의 직경 25 μ m 펀칭 공구를 정렬한 후 미세 홀 펀칭 가공을 수행하였다.

2. 양안 영상 획득 시스템 설계

양안 영상 획득 옵틱은 크게 편광 큐브 빔스플리터⁽¹⁰⁾(polarizing cube beamsplitter), 쿼터 웨이브 플레이트⁽¹⁰⁾와 반사경(mirror coated quarter wave plate)으로 구현되었다. Fig. 1(a)는 양안 이미지 획득의 원리를 보여준다. 우선, 텅스텐-할로겐 광원으로부터 나온 선형 편광(linearly polarized light)이 Fig. 1(b)에서 보이는 현미경에 입사된다. 선형 편광은 빔스플리터(B₁)과 반사경(M₁)에 의해서 타원편광(elliptically polarized light)으로 바뀐다. 편광 빔스플리터(B_p)는 입사광을 s-와 p-편광으로 수직 분리시킨다. 이때 B_p에서 반사된 s-편광은 큐브에서 나가고 미세 펀치 팁(p)를 조명한다. 한편, 큐브를 투과한 p-편광은 큐브 B_p에 부착된 쿼터 웨이브 플레이트에 들어가고 이때 p-편광은 원형 편광(circularly polarized light)으로 바뀐다. 다음으로 광의 직진 방향이 반사경 M₂에 의해서 역전되고 그 결과 원형 편광의 회전 방향 또한 역전된다. 원형 편광은 쿼터 웨이브 플레이트에 의해서 다시 s-편광이 된 후 편광 빔스플리터 B_p의 경사면에서 전반사가 일어나서 다이 플레이트를 조명할 수 있게 된다. 미세 공구들은 이러한 원리에 의해 조명되고, 공구 표면에서 반사된 광은 조명 광경로의 역경로를 따라가며 현미경 대물렌즈로 들어간다. 만일 편광자를 회전시켜 조명광의 선형편광 상태를 조작하면 상하 공구의 중첩 이미지 외에도 각 공구의 개별 이미지만을 영상화할 수 있다.

미세 공구의 중첩된 이미지는 대물렌즈와 증렌즈에 의해 확대된다.(Fig. 1(b)참조) 본 연구에서는 작업거리(working distance) 33.5mm, 초점거리(focal length) 20mm인 10 \times 대물렌즈(Mitutoyo corp., infinity-corrected plan apochromatic objective)를 사용하였다. 또 대물렌즈의 개구수(numerical aperture, NA)는 0.28이고 렌즈의 회절 분해능(diffraction-limited resolution)은 약 1 μ m이다. 증렌즈는 Navitar coaxial zoom 6000을 사용하였고 증렌즈의 등가 초점 거리

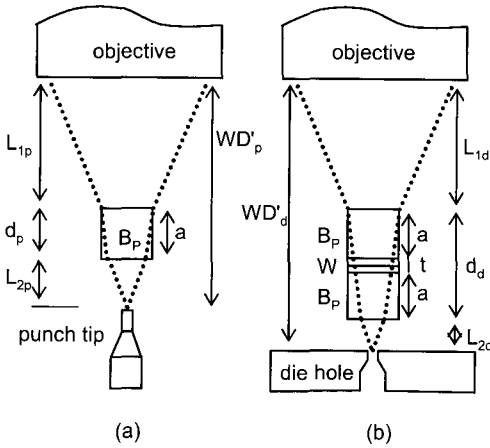


Fig. 2 Cube size and its spatial position

(effective focal length)는 69.6~457.2mm 이다. 570 라인의 수평 해상도를 갖는 1/3 in. 포맷 흑백 CCD 카메라를 사용하였고 줌 렌즈와 CCD 카메라 사이에 1× TV 어댑터를 사용하였다. 무한대 보정 광학 현미경(infinity-corrected microscope)의 주배율(primary magnification)은 F_e/F_o 에 의해 결정되므로 주배율은 3.48~22.86× 였다. 본 연구에서는 임의의 형상을 분해하기 위한 최소 픽셀 크기가 에어리 원판⁽¹¹⁾ (Airy disc) 반경의 절반 보다 작아야 한다는 원리로부터 이미지의 픽셀 분해능(R_p)을 0.6 μ m 으로 결정하였다. 따라서 0.6 μ m 의 픽셀 분해능을 갖는 이미지를 얻기 위해서 식 (1)에 근거하여 주배율을 13×로 선정하였다. 식 (1)에서 W_{camera} 는 1/3in. CCD 센서의 폭이고 R_p 는 픽셀 분해능이다. 여기서 줌렌즈의 초점거리를 변화시켜 주배율을 13× 보다 크게 할 수도 있지만 이는 분해능 향상 없이 단순히 이미지만을 확대하는 것이므로 무의미하다.

$$\text{Primary mag.} = W_{camera} \times 1.56 / R_p \quad (1)$$

편광 큐브 빔스플리터로는 투과(50)/반사(50)의 광역(broad band) 편광 빔스플리터가 사용되었고, 글라스 소재는 굴절률 1.71의 SF1이 사용되었다. 또 쿼터 웨이브 플레이트는 가시 영역에서 복굴절(birefringence) 변화가 완만한 마이카 시트(mica sheet, centered at 550nm)를 사용하였다. 마이카 시트의 양단은 두께 1mm 글라스(protective glass)로

보호되었고, 글라스-마이카-글라스로 구성된 쿼터 웨이브 플레이트의 전체 두께는 2.2mm 였다. 반사경 M_2 의 고 반사율을 얻기 위해 보호 글라스 한쪽에 유전체 반사 코팅(dielectric optical coating)을 하였다. 이때 반사경 면이 마이카 시트에 부착되었다. 반사경 M_1 은 유전체 반사경 대신 알루미늄 반사경을 채택하였다. 이는 반사경 M_1 에 입사되는 빛의 입사각(2θ)이 브루스터 각⁽¹¹⁾ (Brewster's angle)과 거의 같고 입사각에 대한 편광의 반사율 변화에 있어 금속 반사경이 유전체 반사경에 비해 안정적이기 때문이다. 실제로 프레넬 방정식¹⁰ (Fresnel formula)에 의해 입사각 60°에 대한 p -편광의 반사율을 계산해 본 결과 0.85의 반사율이 계산되었다. 계산에 필요한 굴절률 값은 파장이 500nm인 경우 알루미늄의 복소굴절률(complex refractive index)인 0.77-6.08j를 사용하였다.

편광 큐브 빔스플리터 B_p 의 큐브 크기(a)와 미세 공구들 사이에서 큐브의 상대적 위치 L_1, L_2 결정은 중요한 설계 인자이다.(Fig. 2참고) 여기서 d는 큐브 안에서의 광경로 길이(optical path length of a ray)를 의미하는 등가 큐브 크기(effective cube size)이다. 펀치 팁을 영상화할 경우, d_p 는 큐브 크기 a가 되고, 반면 다이 홀을 영상화할 경우 d_d 는 $2a+t$ 가 된다. 여기서 t는 쿼터 웨이브 플레이트 안에서의 광경로 길이로써 2.2mm 이다. a, L_1, L_2 에 대한 기본적 설계 방향은 각 공구에서 반사된 빛으로 구성된 광원뿔(light cone)이 대물렌즈의 개구수에 의해 정의되는 최대 광원뿔이 되도록 하는 것이다. 즉, 편광 빔스플리터의 큐브 크기가 너무 작거나 혹은 큐브가 공간상에 부적절하게 위치한 경우, 광원뿔의 반각(half angle of light cone)이 줄어들고, 따라서 대물렌즈의 개구(aperture)가 작아진다. 이 경우 대물렌즈에 의해 형성된 상의 회절 분해능은 저하된다. 반면 큐브 크기가 너무 크면 등가 큐브 크기가 증가하여 큐브면과 대물렌즈 사이의 거리 L_1 이 감소하게 된다. 또 미세 공구 사이에 큐브 빔스플리터를 위치시키면 공기와 큐브 글라스의 경계에서 일어나는 굴절에 의해 대물렌즈의 작업거리가 증가한다. 이상에 기술된 각 설계 인자들간의 관계는 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다. 여기서 n은 편광 큐브 빔스플리터의 굴절률, NA는 대물렌즈의 개구수, WD는 대물렌즈의 작업거리를 나타내고 변수 L_{1i}, L_{2i}, d_i 는 첨자 i가 d 이면 다이 홀 영상화, p 이면 펀치 팁 영상화에 해당된다.

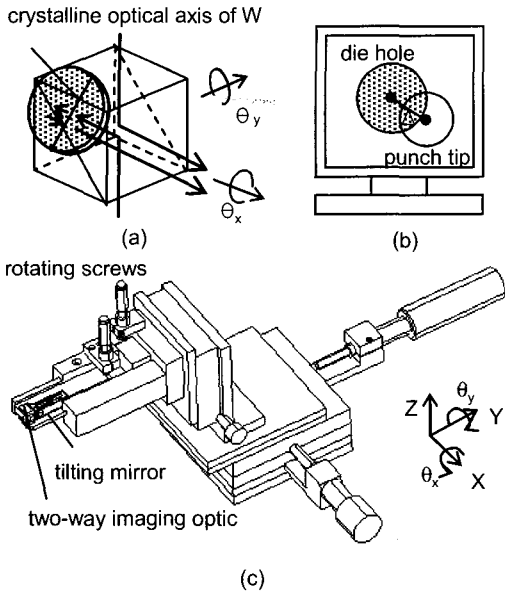


Fig. 3 Image correction and cube mounting stage

$$c = 2(L_{2i} \tan(\sin^{-1} NA) + d_i \tan(\sin^{-1}(NA/n))) \quad (2)$$

$$L_{2i} = WD' - d_i - L_{2i} \quad (3)$$

$$WD' = WD + d_i \left(\frac{\tan(\sin^{-1} NA) - \tan(\sin^{-1}(NA/n))}{\tan(\sin^{-1} NA)} \right)$$

적절한 큐브 빔스플리터 크기(a)는 Fig. 2(b)의 다이 홀 영상화를 고려하여 결정하였다. 우선 L_{1d} 는 Fig. 1(a)에서 볼 수 있는 것처럼 반사경 M_1 과 대물렌즈(O)의 기하적인 구속 조건을 고려하여 25mm로 결정하였다. 이때 대물렌즈 경통의 외경은 24.5mm였고, 반사경 M_1 은 지면에 대해 30° 경사각을 유지하였다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 L_{1d} 를 최대화하기 위해서 L_{2d} 를 최소화해야 하고 L_{2d} 를 1.5mm로 고정한 결과 $d_d = 12.3mm$ 가 되었다. 따라서 식 (2)에 의해서 큐브 크기 a를 $5mm = (d_d - t)/2$ 로 결정하였다. 미세 펀치 팁의 영상화 경우, $L_{1p} = L_{1d}$ 이고 $d_p = a$ 이므로 $L_{2d} = 5.6mm$ 가 되었다. 따라서 양안 영상 획득 시 미세 펀치 팁과 다이 플레이트의 거리는 약 12mm가 되어야 한다.

이와 유사한 방법으로 반사경 M_1 의 크기도 결정된다. 즉 대물렌즈의 개구수 0.28에 의해 정의되는 광원뿔을 보장하기 위해 Fig. 1(a)의 점 A_1 ,

A_2 는 식 (4)를 만족해야 한다. 여기서 α 는 $\sin^{-1}(NA)$ 로 계산되고 A_{1x} 는 1mm이며 반사경 M_1 의 기울기 각 θ 는 30°일 때, 식 (4)에 의해 반사경 M_1 의 최소 크기는 23.5mm 이었다.

$$(A_{1x}, A_{1y}) = (A_{1x}, L_{2d} - A_{1x} \tan \alpha)$$

$$(A_{2x}, A_{2y}) = \left(\frac{A_{1x} \tan \theta + a + L_{2d} - A_{1y}}{\tan \theta - \tan \alpha}, A_{2x} \tan \alpha + a + L_{2d} \right) \quad (4)$$

크기 5mm의 편광 빔 스플리터 큐브는 세심하게 지지(grip)되어야 하고 공간상에서 정밀한 위치 제어가 필요하다. Fig. 3-(a)에서 도시된 바와 같이 큐브의 정밀한 제어를 위 x-,y-,z-방향의 직선운동과 θ_x, θ_y 의 회전운동을 조절할 수 있는 광학 스테이지를 구성하였다. (Fig. 3-(c)참조) 큐브 글라스와 공기 간 굴절률 차이 때문에 Fig. 3-(b)에서 볼 수 있듯이 양안 영상 획득 옵틱에 의해 얻어진 미세 펀치와 다이 홀의 상대 거리는 큐브의 θ_x, θ_y 에 의해 변할 수 있다. 실제로 미세 펀치에서의 공구 정렬은 펀치가 다이 홀 안으로 들어갈 때 실제 의미가 있고 양안 영상 획득 옵틱에 의해 얻어진 미세 공구의 중첩된 이미지는 펀치 팁과 다이 홀이 약 12mm떨어진 상태의 공구 정렬 상태이므로 미세 공구가 실제로 정렬되었는지 보장하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 미세 펀치 팁으로 급속 포일에 인덴팅(indenting)을 하고 양안 영상 획득 시스템으로 펀치 팁과 인덴팅 마크를 일치시키는 방향으로 큐브를 미세하게 기울여 양안 영상 획득 큐브를 미세 펀칭 시스템에 적응시켰다.

3. 공구 정렬 정확도 보장을 위한 크로스 코릴레이션 영상 처리 알고리즘 적용

1 μm 이내의 공구 정렬 정확도 확보를 위해 크로스 코릴레이션 영상 처리 알고리즘을 적용하였다. 여기서 영상 처리 알고리즘으로 미세 공구에 대한 경계선 추출(edge-detection) 알고리즘은 배제하였다. 이는 대물렌즈의 회절 분해능이 약 1 μm 이므로 획득된 공구 영상의 경계선을 1 μm 이내의 정확도를 가지고 추출하는 것이 불가능했기 때문이다. 크로스 코릴레이션은 두개의 서로 다른 이미지 함수의 유사성(similarity)의 수학적 표현이고 식 (5)에 의해 정의된다. 식 (5)는 식 (6)의 푸리에 변환을 통해 계산할 수 있다. 여기서 $F\{\}$ 와 $F^*\{\}$

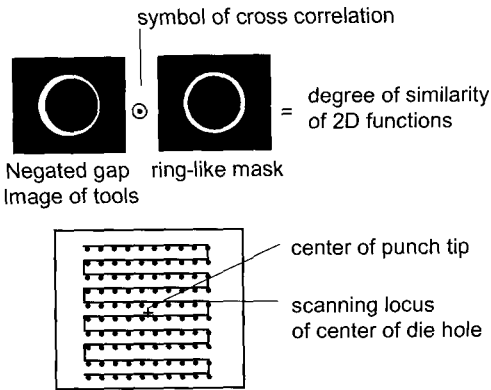


Fig. 4 Micro tool alignment strategy

은 각각 푸리에 변환과 그것의 복소 켈레를 의미한다.

$$C_{gh}(X,Y) = g e h = \iint_{\pm x} g(x,y)h(x+X,y+Y)dx dy \quad (5)$$

$$C_{gh}(X,Y) = F^{-1}\{F\{g(x,y)\}F^*\{h(x,y)\}\} \quad (6)$$

Fig. 4는 미세 공구 정렬을 위한 크로스 코릴레이션 알고리즘의 적용 방법을 보여준다. x-, y- 이송 장치에 놓여 있는 다이 홀은 미세 펀치 팁의 근방에서 스캐닝된다. 임의의 샘플링 지점(sampling point)에서 미세 공구의 반전 이미지(negated image)와 인공적으로 만들어진 환형상 이미지(artificially made ring image)의 유사성(C_{gh})을 크로스 코릴레이션으로 계산하여 저장시킨다. 스캐닝은 0.6 μ m 거리 마다 한번씩 수행하였고 샘플링 개수는 100개로 하였다. 이때 양안 영상 획득 시스템

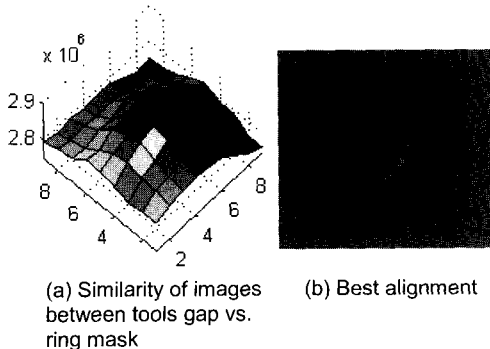
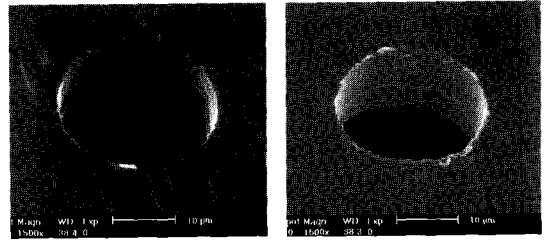


Fig. 5 25 μ m tool alignment



(a) upper side (b) lower side
Fig. 6 Punched 25 μ m holes on stainless steel

으로 얻은 이미지의 픽셀 분해능이 0.6 μ m 이므로 스캐닝 주기를 0.6 μ m으로 결정하였다. 스캐닝 종료 후 최적의 공구 정렬은 C_{gh} 의 값이 최대가 되는 지점에서 일어난다. Fig. 5(a)는 펀치 팁 하에서 다이 홀을 스캐닝했을 경우 계산된 C_{gh} 값들의 분포를 보여주고 C_{gh} 들의 최대값에서의 공구 정렬 상태는 Fig. 5(b)와 같다.

4. 25 μ m 홀 펀칭 가공

미세 공구 정렬 시스템의 성능을 확인하기 위해 25 μ m 홀 펀칭을 수행하였다. 미세 펀치의 팁 직경은 25 μ m 이고 펀치는 연삭으로 가공되었다. 다이 홀의 직경은 27 μ m 이고 미세 방전 가공으로 제작되었다. 펀치와 다이의 재질은 초경합금(ultra fine grade)이 사용되었다. 미세 펀칭 공구는 미세 펀칭 시스템에 장착되었고 개발된 방법을 적용하여 미세 공구를 정렬한 후 25 μ m 두께의 스테인레스스틸 (AISI 316) 박판에 25 μ m 홀을 펀칭 가공하였다. 그 결과 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 양호한 품질의 홀을 가공할 수 있었으며, 성공적인 공구 정렬의 결과로 시편 아랫면에 편심 버가 발생하지 않았음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 미세 펀칭 공구의 정렬을 위한 양안 영상 획득 시스템을 개발하였다. 양안 영상 획득 옵틱은 편광, 회절, 기하 광학등의 광학 이론을 바탕으로 설계되었고 그 결과 주배율 13 \times , 픽셀 분해능 0.6 μ m 의 양안 영상 획득이 가능하였다. 또 크로스 코릴레이션 영상 처리 알고리즘을 이용하여 분해능 0.6 μ m 의 미세 공구 정렬 방법을

고안했다. 개발된 정렬 시스템을 이용하여 직경 25 μm 홀을 펀칭 가공하였고 실험 결과 본 연구에서 개발된 공구 정렬 시스템의 정렬 정확도가 1 μm 이내로 만족됨을 보였다. 본 연구에서 개발된 미세 공구 정렬 방법은 여타의 미세 가공 기술에서 생길 수 있는 혹독한 조건의 공구 정렬에도 응용될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행된 것이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) K. Egashia, T. Masuzawa, "Microultrasonic machining by the application of workpiece vibration", Annals of the CIRP, Vol. 48/1, pp. 131~134.
- (2) T. Higuchi, Y.B. Bang, Y. Meotgi, M. Tsuda, "Automation of centered micro hole drilling using a magnetically levitated table", Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, 1999, pp. 1409~1426.
- (3) Tönshoff, H. K., Hesse, G., Mommesen, J., "Micro-machining using excimer lasers", Annals of the CIRP, Vol. 42/1, 1993, pp. 247~251.
- (4) Metals Handbook, Vol 14, Forming and Forging, ASM, 1988.
- (5) Masuzawa, T., Fujino, M., "A process for manufacturing very fine pin tools", SME Technical aper, MS90-307, 1990.
- (6) T. Mori, K. Hirota, D. Tokumoto, "Improvement of ultra-fine piercing by vacuum system", Int. symposium MHS, IEEE, 2000, pp. 77~82.
- (7) Yamamoto, M., Kanno, L., Aoki, S., "Profile measurement of high aspect ratio micro structures using a tungsten carbide micro cantilever coated with PZT thin films", 13th Annual Int. Conference on MEMS, IEEE, 2000, pp. 217~222.
- (8) Bangham, J. A., Harvey, R. Tattersall, G., "Recognition of image pattern generated by a stochastic object-replacement model", Int. Conference on image processing, Vol 3, 1998, pp. 576~580.
- (9) B.Y. Joo, S.I. Oh, B.H. Jeon, "Development of micro punching system", Annals of the CIRP, Vol 50/1, pp. 191~194, 2001.
- (10) Handbook of Optics, Vol 2, Devices, measurements, and properties, Optical society of America, 1995.
- (11) E. Hecht, Optics, Addison-wesley, 1998.