

레이저 에칭을 이용한 미세 홈 및 구멍 가공

Fabrication of micro grooves and holes using laser-assisted etching

광주과학기술원 기전공학과 M.T.I. Mazumder, 오광환, 이민규, 정성호

I. 서론

수-수십 마이크로 크기의 미세홈 및 미세구멍은 의료용 마이크로소자, 마이크로유체소자, 마이크로열교환기, 마이크로반응기, 마이크로센서 등에 널리 응용되는 구조물로서 최근의 MEMS 및 마이크로시스템의 발전과 함께 가공기술 개발이 크게 요구되고 있다 마이크로소자 및 마이크로시스템은 정보통신, 계측, 생명공학 등의 분야를 중심으로 수요가 크게 증가하고 있으며 이와 관련된 다양한 산업분야의 활성화가 이루어질 것으로 예상된다 따라서 이와 같은 마이크로소자 및 마이크로시스템에 소요되는 마이크로구조물 제조, 특히 수요가 많은 미세홈 및 미세구멍 등의 가공을 중심으로 한 초정밀 가공기술은 관련기술의 발전과 산업화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다

미세홈 및 미세구멍 가공기술로는 기계가공, 반도체공정, 레이저 어블레이션, 전자빔가공, 등 다양한 기술의 활용이 가능하나 각 기술별로 장단점이 다르며 이에 따라 활용대상도 달라지게 된다 기존의 반도체공정으로는 수 마이크로 이하의 크기는 매우 정밀하게 가공할 수 있으나 오히려 수십에서 수백마이크로 두께의 금속과 같은 재료의 가공에는 불리하며 초정밀기계가공의 경우 수십 마이크로미터 이하의 크기로 가공이 곤란하다 특히 미세구멍 가공에 있어서 시편의 두께가 증가하면 공구의 파손이 발생한 가능성이 매우 높아져 정밀한 가공이 힘들고 공정의 안정성 확보도 곤란한 면이 있다 이외에 초미세 가공으로 전자빔가공이나 X선을 이용한 LIGA공정 등이 있으나 진공에서 가공해야 하던지, X선발생장치가 필요한 등의 공정상 어려움 뿐 아니라 장비가 매우 비싼 단점이 있다

본 연구에서는 레이저 유도 습식에칭(Laser-assisted wet etching, 이하 레이저에칭)을 이용하여 비교적 단순한 장비와 공정으로 금속에 미세홈 및 미세구멍을 가공하는 새로운 공정을 개발하였다 레이저에칭은 가공하고자 하는 시편을 액체상태의 에칭용액에 담근 후 레이저빔을 시편 표면에 조사해 시편과 에칭용액과의 화학반응을 통해 가공하는 방법이다 이는 시편을 레이저를 이용해서 직접 가공하는 레이저 어블레이션(ablation)에 비해서 낮은 에너지에서 가공이 가능하고, 시편이 액상의 에칭용액에 담겨 있으므로 열변형이나 영향부가 매우 작은 장점이 있어 미세금속구조물 제조에 많이 응용되어 왔다[1,2] 기존의 레이저 에칭은 렌즈에 의해 집속된 레이저빔을 시편에 조사하여 가공하는 방식을 사용하고 있으나 이 경우 가공 중에 발생하는 기포에 의한 레이저빔의 산란과 에칭이 진행됨에 따라 레이저빔이 확산되어 가공깊이가 제한되는 한계가 있다 따라서 수백 마이크로미터 두께의 금속박판과 같은 재료에 미세홈이나 미세구멍을 가공할 경우에는 이를 보완할 수 있는 가공기술이 요구된다

본 논문에서는 집속빔을 사용한 레이저에칭을 보완하는 기술로 광섬유를 가공도구로 사용하는 새로운 공정을 개발하였다 광섬유를 이용한 레이저에칭에서는 광섬유를 에칭용액 속의 시편표면에 근접시켜 별도의 집속렌즈 없이 직접 가공하는 방식으로 시스템이 단순하고 복수의 광섬유를 이용해 생산성을 크게 높일 수 있는 장점이 있다 더구나 광섬유를 이용해 레이저에서 시편까지 레이저 빛을 이송하므로 집속빔을 이용할 때 요구되는 광학계 구성이 필요 없으므로 시스템 구성 및 관리가 용이한 장점이 있다 본 연구에서는 광섬유를 가공도구로 사용하는 레이저에칭시 발생하는 여러 가지 현상을 관찰하고 레이저출력, 반복이송, 에칭용액의 농도 등이 에칭결과에 어떻게 영향을 미치는지를 보이고, 이를 이용하여 티타늄 박판을 가공할 결과를 제시하였다

II. 실험방법

Fig 1은 광섬유를 이용한 레이저에칭 실험장치이다 광원으로는 파장 532nm의 DPSS Nd,YAG 레이저를 사용하였다 DPSS 레이저 빔은 현미경용 5배 대물렌즈(Mitutoyo, NIR 5X, NA=0.14, DOF=14 μ m)를 이용하여 광섬유에 집속하였다 광섬유는 코어(core)/클래드(clad)직경 105/125 μ m의 다중모드 광섬유(NA=0.22)를 사용하였다 광섬유의 끝단은 홀더에 고정되어 있으며 홀더는 정밀 x-y-z 이송계(resolution=1 μ m)에 장착하여 시편표면까지 근접할 수 있도록 하였다 에칭용기는 별도의 x-y-z 이송계 위에 고정되어 있으며, 화학반응을 방지하기 위해 테플론을 이용하여 제작하였다 에칭용액은 연동펌프(peristaltic pump)를 이용하여 에칭용기로 순환시켰으며, 실험과정을 관찰하고 광섬유 끝단과 시편표면 사이의 거리를 측정하기 위해 CCD를 이용하여 에칭공정을 관찰하였다

실험에 사용된 시편은 두께500 μ m, 순도 99.2%의 티타늄(Titanium)을 가로, 세로 약 1cm 크기로 절단 후 표면을 연마하여 사용하였으며, 에칭용액은 인산(H₃PO₄, 85%)을 증류수와 혼합하여 농도를 조절하며 실험하였다

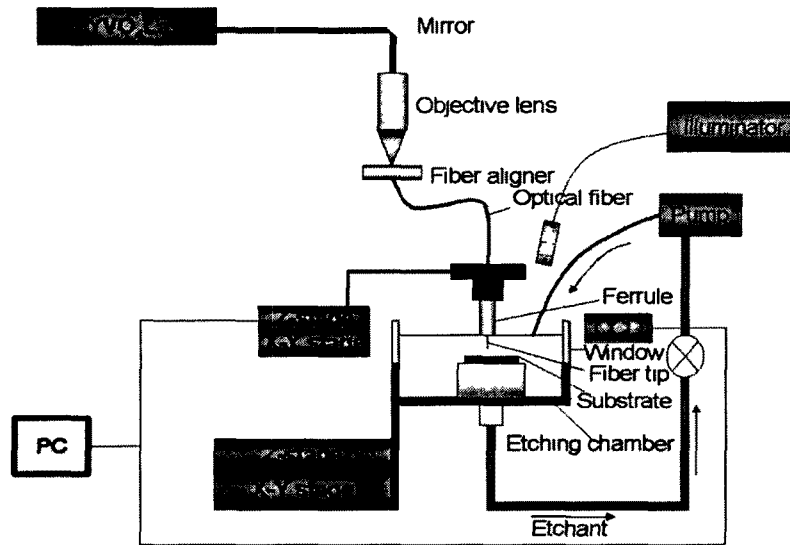
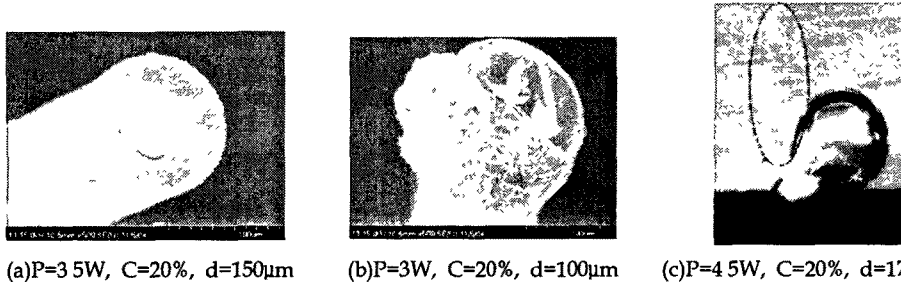


Fig 1 Schematic diagram of the laser etching system using an optical-fiber as the tool

III. 결과 및 고찰

광섬유를 이용한 레이저 에칭을 위해서는 광섬유 끝단이 시편과 수심에서 수백마이크로미터 거리 이내로 접근해야 한다 레이저 에칭의 경우 에칭용액의 증발로 인한 기포발생은 피할 수 없으며 본 연구에서 연구된 광섬유를 이용한 가공의 경우에도 예외는 아니다 에칭 중에 발생하는 기포가 공정에 미치는 영향은 기포의 크기와 매우 관련이 깊은데, 큰 기포가 발생할 경우 광섬유의 손상 가능성이 매우 큰 반면 미세한 기포가 연속적으로 발생하는 조건에서는 가공부에서 기포가 원활하게 빠져나가므로 광섬유의 손상 없이 가공이 가능하다 광섬유 가공 중에 관찰되는 광섬유 손상의 유형은 크게 Fig 2(a)에서와 같은 광섬유 끝단의 용융과 Fig 2(b)에서와 같은 광섬유의 파손으로 구분할 수 있으며 모두 가공 중에 발생하는 기포에 기인한다 먼저 용융에 의한 손상은 광섬유와 시편의 간격이 너무 작아 기포가 원활히 주변 액체로 빠져나가지 못할 경우 발생한다 이 경우 기포는 광섬유와 시편사이에 갇히게 되어 광섬유 끝단과 시편사이에 증기층이 형성된다 증기층이 형성되면 레이저 에너지가 시편 표면으로 전달되지 못하고 증기층과 광섬유 끝단 사이에서 다중반사가 일어나면서 에너지가 집중되며, 증기의 열전달율이 매우 작으므로 광섬유 온도가 급속히 올라가서 궁극적으로 Fig 2(a)에 나타난 것과 같은 용융을 일으키게

된다 또한 광섬유와 시편사이에 기포층이 형성된 후 기포의 성장이 일어나는 경우가 자주 발생하는데 기포의 성장은 초기에는 시편가공으로 발생한 증기가 더해짐으로 인해 일어나다가 후반에는 광섬유 끝단 주변의 에칭용액의 증발로 인해 성장하는 것으로 사료되며 Fig 2(c)에서와 같이 직경 수백마이크로미터 이상의 크기까지 성장한다 이와 같이 성장한 기포는 결국 시편표면과 거의 평행한 방향으로 튕겨나가듯이 떨어져 나가게 되는데 이 때 상당한 반발력을 광섬유에 작용하게 되고 이로 인해 광섬유는 휨이 발생하거나 Fig 2(b)와 같이 파손이 발생하기도 한다



(a)P=3.5W, C=20%, d=150 μ m (b)P=3W, C=20%, d=100 μ m (c)P=4.5W, C=20%, d=170 μ m

Fig 2 Damaged fiber tips due to melting, (a), and fracture, (b), and the bending of the fiber tip due to a large bubble (fiber is in the circle)

레이저에칭 중의 기포발생 및 성장은 레이저출력이 클수록 혹은 광섬유 끝단과 시편사이의 간격이 작을수록 심각한 것으로 나타났다 따라서 광섬유 끝단과 시편 사이에 기포가 갇히는 현상 및 성장으로 인한 광섬유 손상을 막기 위해서는 발생된 기포가 가공부에서 원활히 빠져나갈 수 있도록 간격을 크게 해주는 것이 필요하다 레이저출력이 클수록 기포발생도 활발하므로 출력이 증가할수록 간격도 증가해야 하며 기포의 갇힘 및 성장을 피할 수 있는 광섬유 끝단과 시편사이의 최소간격을 Fig 3에 제시하였다 광섬유 끝단에서 나오는 레이저빔의 발산각(divergence angle)을 이용하여 광섬유 끝과 시편사이의 간격이 증가함에 따른 시편표면에서의 레이저강도(irradiance)를 계산한 결과 모든 레이저출력에 대해 문턱조건(threshold condition)에서의 레이저강도는 거의 일정한 것으로 나타났으며 값은 약 2×10^8 W/m²이다

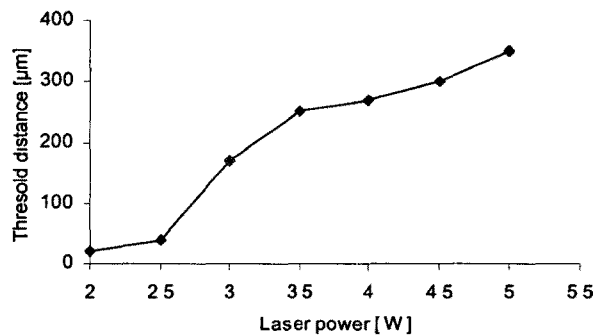


Fig 3 Threshold distance between the fiber tip and sample surface to avoid fiber damage

광섬유 에칭을 이용해 티타늄 박판에 구멍을 가공한 결과를 Fig 4에 나타내고 있다 문턱조건에서 레이저출력을 변화시키면서 가공한 구멍의 직경은 출력에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다 이는 출력이 증가함에 따라 광섬유 끝단과 시편의 거리가 증가하게 되고 이에 따라 시편에서의 레이저빔의 크기가 커짐에 따른 자연스런 결과이다 그러나 구멍의 깊이는 거의 일정하여 약 25 W 이상의 출력에서는 Fig 4(b)에서와 같은 깊이 약 350 μ m의 역원뿔형 구멍이 가공되었다

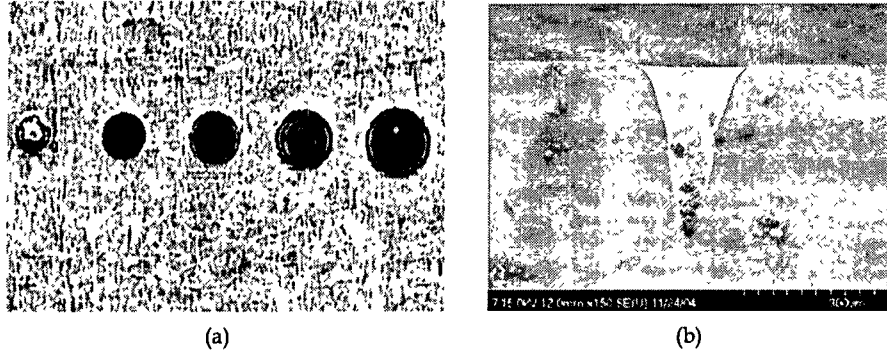


Fig 4 (a) Variation of hole diameter with respect to the laser power $P=2, 25, 3, 35, 4W$ from left to right at the corresponding threshold distances (b) SEM picture of the cross-section of an etched hole, $P=5W, C=20\%, \text{Gap}=350\mu\text{m}$

Fig 4에서 나타난 바와 같은 역원뿔형 구멍가공은 에칭이 안정적으로 일어날 때 가공된 결과로 에칭 공정의 안정성은 에칭용액의 농도에 의해서도 크게 영향을 받는다 예를 들면 본 연구에서는 에칭용액의 농도가 약 20%일 때 가장 안정적인 에칭이 일어났으며 에칭용액의 농도가 이보다 낮거나 높을 때에는 앞에서 설명한 바와 같은 기포성장에 따른 문제가 발생하였다 Fig 5(a)는 에칭용액의 농도가 낮을 때 불안정한 에칭에 의해 가공된 구멍의 예를 보여주고 있다 농도가 낮을 때 발생하는 기포는 주로 에칭용액의 증발자체가 많이 일어나서 기포가 레이저빔의 산란을 일으키는 데 따른 것으로 사료된다 한편, 농도가 40%로 높아질 경우 Fig 5(b)에서와 같이 역시 불안정한 가공이 일어나는데 이때는 용액의 높은 점성으로 인해 기포가 빨리 주변으로 빠져나가지 못하고 구멍주변에서 합쳐져 성장하는데 따른 것으로 보인다 문턱조건에서 농도가 20%로 적절한 경우에도 광섬유 끝단과 시편사이의 간격을 문턱조건 이하로 낮추면 이미 설명한대로 광섬유의 손상이 일어날 뿐아니라 에칭도 Fig 5(c)와 같이 불안정하게 일어난다

따라서 원하는 형상의 가공을 위해서는 기포의 발생량과 적절한 유동을 통해 가공부에서 빠져나갈 수 있는 점성 및 에칭용액의 흐름을 확보해주는 것, 그리고 기포가 광섬유와 시편사이에 갇히는 현상을 방지할 수 있는 적절한 간격 유지 등이 중요한 변수인 것으로 파악되었다

한편, 광섬유를 이용한 레이저에칭에서 가공된 구멍의 형상은 그림 Fig 4(b)에서와 같이 역원뿔형이 된다 그러나 실제 대부분의 응용에서는 깊이 방향으로 균일한 구멍을 가공하는 것이 요구된다 따라서 본 연구에서는 균일한 구멍을 가공할 수 있도록 하기 위해 광섬유를 가공 중에 가공부 내부로 삽입하는 방법을 이용해 전체 두께에 대해 비교적 균일한 구멍을 가공할 수 있었다 광섬유 끝을 가공부 내부로 삽입할 경우 가공부가 광을 유도하는 역할을 하므로 광효율이 증가하고 직진성이 우수한 구멍가공이 가

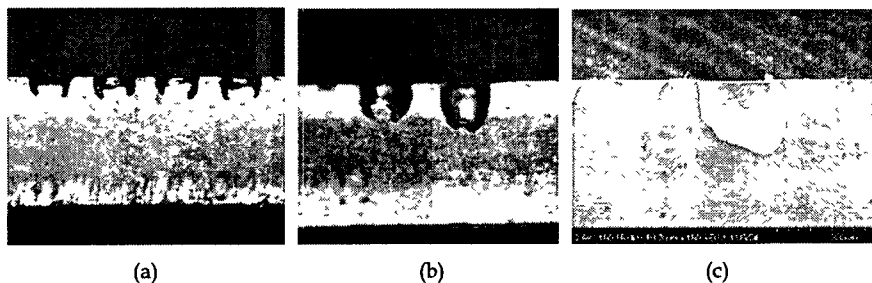


Fig 5 Optical micrographs of the holes drilled at unstable conditions, (a) $P=3.5W, C=10\%, \text{Gap}=250\mu\text{m}$, (b) $P=3.5W, C=40\%, \text{Gap}=250\mu\text{m}$, (c) $P=3.5W, C=20\%, \text{Gap}=200\mu\text{m}$

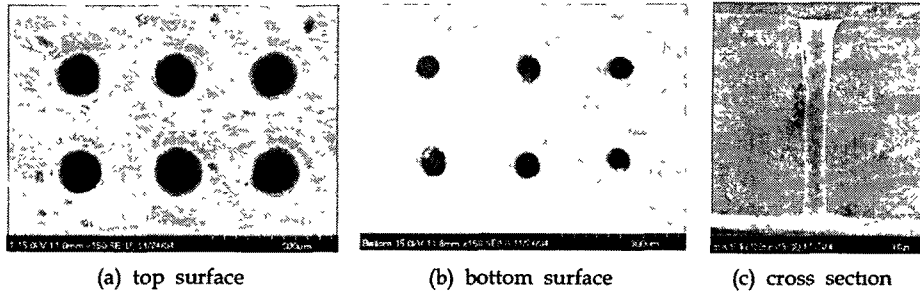


Fig 6 Straight holes drilled in titanium foil of thickness $250\mu\text{m}$ ($P=3.5\text{W}$, $C=20\%$, $\text{Gap}=200\mu\text{m}$)

능해진다 Fig 6은 이와 같은 방식으로 가공된 시편의 단면과 상·하부 표면에서의 구멍을 보여주고 있다 상부의 직경은 약 $170\mu\text{m}$ 하부의 직경은 약 $80\text{-}100\mu\text{m}$ 으로 측정되었으며 구멍의 전체 깊이에 대해 표면이 깨끗하고 형상도 우수한 가공이 가능함을 보였다

IV. 결론

본 연구에서는 집속빔을 이용한 레이저에칭의 문제점인 낮은 가공속도 및 깊이방향으로 균일한 크기의 구멍가공이 곤란한 점을 보완하기 위한 방법으로 광섬유를 가공도구로 사용하는 새로운 레이저에칭 공정을 개발하고 실제 가공 시 공정에 영향을 미치는 변수에 대해 조사하였다 광섬유 가공에서 기포발생은 전체 공정의 안정성 및 광섬유의 손상을 결정짓는 가장 중요한 변수로 파악되었으며 안정적인 가공을 위해서는 광섬유 끝단과 시편사이의 간격, 에칭용액의 농도가 매우 중요한 것으로 나타났다 한편 균일한 크기의 구멍을 가공하기 위한 방법을 개발하여 두꺼운 시편에 대해 깊이방향으로 전체적으로 비교적 형상 및 표면품질이 균일한 구멍 가공이 가능함을 보였다

V. 참고문헌

- 1 R Nowak et al, "Nd YAG-laser-induced wet chemical etching of titanium and stainless steel", *Sensor and Actuators A* 51, pp 41-45, 1995
- 2 Y S Shun and S H Jeong, "Laser-assisted etching of titanium foil in phosphoric acid for direct fabrication of microstructures", *Journal of Laser Applications*, Volume 15, pp 240-245, Number 4, 2003