

광화학 반응을 이용한 레이저 미세가공 기술

이 글에서는 레이저빔을 이용하여 고체, 액체, 혹은 기체상태의 재료에 화학반응을 유도함으로써 증착, 식각, 광경화와 같은 다양한 형태의 가공을 마이크로 및 나노미터 크기로 가능하게 하는 기술에 대해 본 연구실의 연구내용을 중심으로 소개한다.

정 성 호 / 광주과학기술원 기전공학과, 부교수 e-mail : shjeong@gist.ac.kr

레이저에 의한 광화학 가공

레이저 가공은 일반적으로 렌즈를 통해 집중된 레이저빔을 가공하고자 하는 소재에 조사할 때 초점위치에서 생성되는 높은 에너지강도(irradiance, W/cm^2)에 따른 재료의 용융, 증발 등을 통하여 이루어진다. 이와 같이 레이저빔에 의한 직접가공(흔히 레이저 어블레이션 가공이라고 함)의 경우 레이저빔의 파장, 펄스길이, 출력 등을 조절함으로써 금속, 반도체, 유리나 세라믹과 같은 절연체, 피부나 눈의 수정체와 같은 생체조직을 포함한 거의 모든 재료에 대해 가공이 가능한 장점이 있어 금속가공, 반도체공정, 의료기기 등에 널리 응용되고 있으며, 대표적인 응용기술로는 레이저 용접, 절단, 마킹, 드릴링, TFT-LCD(박막액정디스플레이) 유리기판의 회로수정, 레이저 안구수술, 레이저 메스(mess)와 같은 것들이 있다. 한편, 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 마이크로 구조물 및 마이크로 소자 제조에 있어서도 레이저 응용기술 개발이 활발한데 이 경우 레이저빔에 의해 유도된 광화학적 반응을 이용함으로써 레이저 어블레이션 가공의 단점을 보완하거나 어블레이션 가공을 통해서 얻을 수 없는 독특한 형태의 가공이 가능하다. 예를 들어 레이저 어블레이션을 통해 금속재료에 수십 μm 크기의 미세한 구멍을 가공하는 경우 두께가 얇은 소재의 경우 자외선 레이저 등을 이용해 매우 정밀한 가공이 가능하지만 $100\mu m$ 이상의 두께를 가진 비교적 두꺼운 소재의 가공시에는 높은 레이저 에너지를 조사해주어야 하므로 구멍 크기의 2-3배에 이르는 넓은 영역이 가열되면서 열변형이 발생하거나 재료특성이 변하는 등 정밀한 가공

이 곤란해지는 문제가 발생한다(레이저 이외의 미소 금속구조 가공기술로 전해가공이나 x-선 리소그래피(LIGA) 등이 있지만 각각의 기술이 갖는 장단점이 있으므로 여기서는 다른 기술에 대한 고려는 생략한다). 또 다른 예로 레이저 어블레이션 가공의 경우 재료를 가공되는 소재로부터 제거하는 제거가공만이 가능하며 소재에 원하는 물질을 증착하여 새로운 층을 형성하는 등의 가공은 불가능하나 광화학적 가공기술을 이용하면 이와 같은 문제점을 극복할 수 있다.

이 글에서는 레이저를 이용한 광화학적 가공기술을 이용하여 위에 언급한 바와 같은 어블레이션 가공으로 해결하기 힘든 문제를 극복하면서 수십nm에서 수백 μm 범위의 나노/마이크로 구조물 가공을 가능하게 하는 기술로 레이저유도 에칭기술(laser-induced chemical etching), 레이저유도 증착기술(laser-induced chemical vapor deposition), 마이크로광조형기술(micro-stereolithography), 나노프로브를 이용한 레이저 나노패터닝 등을 소개하고자 한다.

레이저유도 에칭

레이저 유도에칭은 액체나 기체상태의 반응매체와 레이저빔을 이용하여 가공하고자 하는 소재를 식각 반응을 통해 제거하면서 원하는 형태로 가공하는 기술이다. 반응매체는 재료에 따라 다른데 금속의 경우 주로 산이나 알칼리 계열의 수용액을, 실리콘과 같은 재료는 염소와 같은 기체를 사용한다. 기본적인 원리는 액체나 기체를 사용하는 경우 큰 차이가 없으므로 아래에서는 에칭용액을 이용한 금속의 습식에칭을

중심으로 설명한다. 레이저유도 습식에칭에서는 가공하고자 하는 소재를 에칭용액 속에 넣고 소재표면에 집속된 레이저빔을 조사한다. 소재표면에서 흡수된 레이저 에너지에 의해 소재표면의 온도가 올라가면 표면과 접촉하고 있는 에칭용액이 열을 받아 열분해반응을 일으키면서 라디칼(radical)을 생성하고 이 라디칼들이 금속과 화학반응을 일으킴을 통해 소재가 제거된다. 이때 재료는 단순히 가열만 일어나거나 에너지가 높을 경우 표면의 용융이 일어나기도 하지만 증발점까지 가열되지는 않는다. 레이저 에칭가공에서는 소재가 화학반응을 통해 제거되므로 어블레이션 가공의 경우보다 레이저빔의 에너지강도가 훨씬 낮은 영역에서 가공이 가능하며, 더욱이 시편이 에칭용액 속에 잠겨 있어 레이저초에서 벗어난 주변 재료는 에칭용액에 의한 대류냉각의 효과가 일어나 전체적으로 열영향부가 크게 줄어드는 잇점이 있다.

레이저에칭에 의한 가공은 가공속도가 어블레이션 가공에 비해 오히려 빠른 편으로 어블레이션으로 가공이 힘든 비교적 두꺼운 재료에 대해서도 적용할 수 있으며 약 500~1,000 μm 두께의 금속박판에 100 μm 이하 크기의 미세홈이나 구멍을 가공하는데 유리하다. 이와 같이 가공된 미세구조물은 자기기록장치의 헤드(head)나 공기베어링 내부의 미세한 공기통로 제조 등에 응용이 보고되고 있고, 강도와 높은 열전달률이 필요한 마이크로 열교환기, 마이크로 반응기, 마이크로 크기의 금형제작 등에도 응용이

가능할 것으로 보고 있다. 레이저에칭 가공기술의 적용이 가능한 재료로는 스테인리스강, 타이타늄, 세라믹, 형상기억합금, 유리 등이 있으며 재료에 따라 에칭용액의 종류도 달라진다.

레이저에칭을 이용해 원하는 형상 및 표면품질을 유지하면서 마이크로 크기의 가공을 할 수 있기 위해서는 무엇보다도 공정변수와 함께 가공 중 발생하는 기포의 제어가 가장 중요하다. 가공자체가 용액 내에서 이루어지므로 가공 중에 용액의 증발 및 반응의 부산물로 생긴 기체로 인해 많은 양의 기포가 발생하며 이는 입사되는 레이저빔을 산란시켜 원하지 않는 가공결과를 낼 수가 있다. 기포의 수, 크기 등은 가공조건과 매우 밀접한 관계가 있으며 원하는 가공결과를 얻기 위한 연구들이 이루어지고 있다.

레이저 유도 국소증착

레이저 유도 국소증착은 레이저 유도 습식에칭과 공정측면에서 매우 유사하지만 레이저 유도 습식에칭이 가공소재로부터 재료를 제거하는 공정인데 반해 레이저 유도 국소증착은 가공소재에 증착을 통해 원하는 재료층을 더해나가는 부가공정이란 측면에서 매우 큰 차이가 있다. 레이저 유도 국소증착은 레이저빔을 시편표면에 집속하는지 혹은 시편표면 위쪽의 반응가스 내에 집속하는지에 따라 다른 결과와 특성을 얻게 된다. 먼저 레이저빔을 시편표면에 집속하여 시편이 직접적으로 가열되도록 하는 공정은 열분해성(pyrolytic) 국소증착이라고 부르며 기본적인 원리는 앞에서 설명한 레이저유도 에칭공정과 유사하다. 열분해성 레이저유도 국소증착에서는 증착시키하고자 하는 물질이 포함되어 있는 반응기체로 채워진 챔버(chamber) 내에 가공소재를 넣고 증착을 일으키고자 하는 위치에 레이저빔을 조사한다. 이때 레이저 에칭에서와 같이 레이저빔이 조사된 소재표면의 온도가 올라가고 표면에 접촉하고 있는 기체가 열분해에 의한 화학반응을 통해 소재표면에 고체상태의 증착물을 생성함으로써 증착이 이루어지게

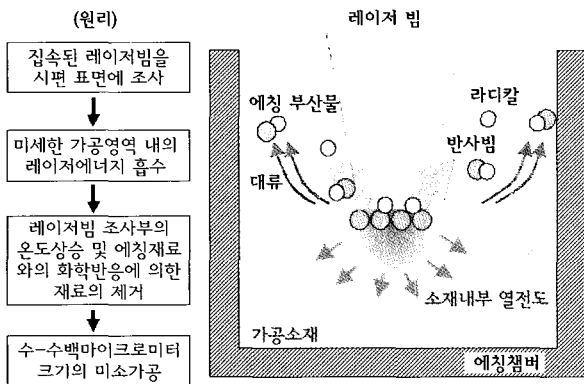


그림 1 레이저에칭에 의한 가공원리

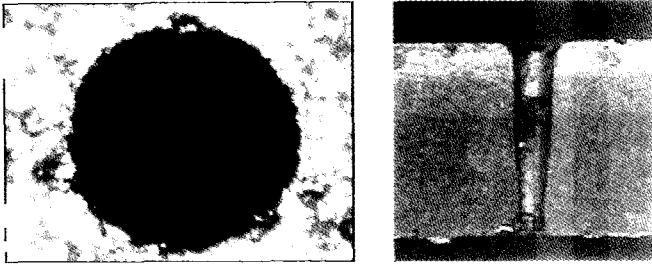


그림 2 레이저 에칭을 이용해 500µm 두께의 타이타늄 박판에 구멍을 가공한 예. 입구의 직경 약 150µm, 가공시간 약 4분 30초

된다. 이때 증착물 외에 보통 부산물로 수소 등의 기체가 발생한다. 한편 레이저빔을 소재표면 위쪽의 반응기체에 집속하는 방식을 광분해성(photolytic) 국소증착이라고 하는데 이 경우에는 반응기체가 레이저빔을 직접 흡수하여 광분해반응을 일으키면서 고체성분은 소재표면으로 이송되어 증착물을 형성하고 부산물 기체는 챔버를 통해 빠져나가게 된다.

위에 설명한 열분해성 및 광분해성 국소증착에서 증착물, 증착물의 순도, 증착에 의해 생성된 형상의 치수정밀도, 증착물의 전기전도도와 같은 특성은 열분해성 공정이 훨씬 우수하며 이러한 장점으로 인해 대부분의 응용기술에 적용되고 있다. 그러나 증착물이 생성되는 소재표면 온도의 경우 소재에 레이저빔이 직접 조사되는 열분해성 공정이 광분해성 공정에 비해 훨씬 높으므로 온도상승에 의해 손상이 우려되는 민감한 시편에 대해서는 적용이 불리한 측면이 있다.

증착을 통해 원하는 형상을 제조하기 위해 마스크를 사용하는 포토리소그래피 공정과 달리 레이저 유도 국소증착에서는 증착반응 중에 원하는 형상을 따라 레이저빔을 이송시키는 통해 임

의의 형상을 따라 직접 증착이 가능하므로 단 한 번으로 모든 공정이 완료되어 반도체공정에 비해 훨씬 단순하고 적용이 쉬운 잇점이 있다. 또한 반도체공정의 화학기상증착에서는 챔버 내 시편의 모든 표면에 증착이 일어나는데 비해 레이저 유도 국소증착에서는 레이저빔이 조사된 지점을 중심으로 국소적인 영역 내에서만 증착이 일어나므로 선택적

가공이 가능하다. 레이저 유도 국소증착시 증착물은 재료와 방식에 따라 차이가 있지만 열분해성 증착의 경우 레이저 초점에서의 증착률이 반도체공정에 비해 월등히 큰 초당 수µm에서 수십µm까지 도달하므로 증착을 통해 미세한 3차원 구조물을 제조하는데 매우 유리하며 마이크로소자용 3차원 미세부품 제조기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 한편 최근 디지털반도체산업에서 각광을 받고 있는 대면적 TFT-LCD의 경우 유리기판위에 다수의 디지털화면 회로를 동시에 제조하는 데 일부 회로에 불량인 경우 전체 기판을 폐기하는 대신 레이저를 이용해 수정하고 있다. 이때 연결되어 있는 회로를 분리시키는 것은 레이저 어블레이션 방식으로 연결부를 제거하여 처리할 수 있으나, 분리되어 있는 부분을 연결시켜주기 위해서는 새로운 전기전도성 물질을

표 1 열분해성 국소증착과 광분해성 국소증착의 특성비교

방식	열분해성 레이저 빔	광분해성
원리		
정밀도	높음	낮음
증착률	높음	낮음
전기적 특성	우수	나쁨
반응기체의존성	낮음	높음
레이저빔파장의존성	작음	큼
소재표면온도	높음	낮음
증착물의 순도	높음	낮음

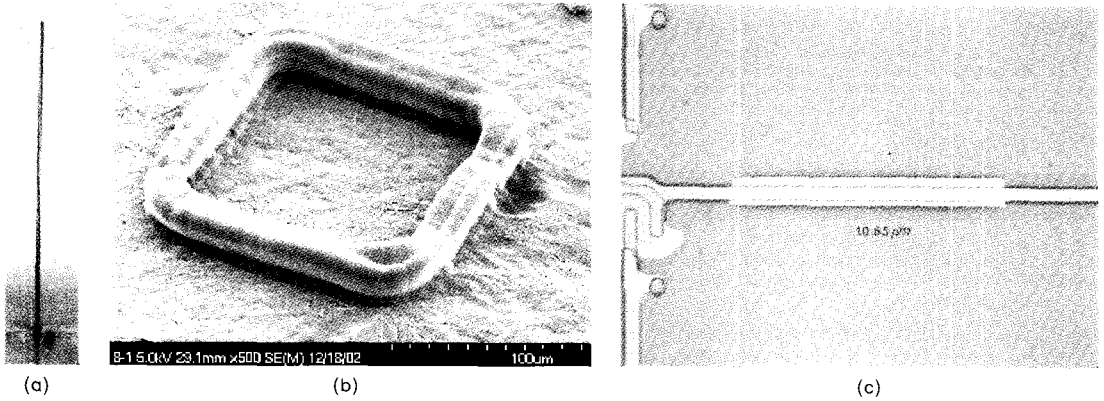


그림 3 레이저 유도 국소증착을 통해 제조된 마이크로 구조물 (a)미세바늘, 직경:28 μm , 높이:2,680 μm , (b)미소사각챔버, 크기:150 μm ×150 μm , 높이:약 40 μm , (c)TFT-LCD 기판 회로 연결, 폭:약 10 μm

추가하여 단락된 회로를 완성해주어야 하며 이를 위해 레이저유도 국소증착 방법을 적용할 수 있으며 현재 산업체 적용을 위한 활발한 기술개발이 이루어지고 있다.

광폴리머를 이용한 마이크로/나노 가공

광폴리머는 레이저빔과 같은 빛을 받으면 물리화학적 특성이 변하는 폴리머의 일종으로 다양한 형태 및 종류의 분자들의 결합으로 이루어져 있다. 광폴리머 가운데는 특정 파장의 레이저빔을 조사하면 액체 상태에서 고체상태로 상변화가 일어나는 경우가 있는데 이러한 현상을 광경화반응이라고 하며 광경화반응을 이용하여 미소한 구조물을 제조하는 기술을 마이크로광조형기술이라고 한다. 광경화반응의 정도는 레이저빔의 에너지강도 및 파장에 의해 영향을 받는데 주로 자외선 영역의 빛에 대해서는 작은 에너지에서도 쉽게 광경화가 일어나며 가시광선이나 적외선 영역에서는 에너지강도가 높은 레이저빔의 초점 주변에서만 광경화가 일어나므로, 사용되는 레이저빔의 파장 및 광폴리머의 특성에 따라 미세구조물을 제조하는 방식도 달라지게 된다. 마이크로광조형에서는 래속조형(rapid-prototyping)에서와 같이 적응을 이용한 미세3차원 구조물 제조, 액체상태의 광폴리머 내부에 원하는 형상을 따라 집속된 레이저빔의 초점을 연속적으로 이동시키면서 미세한 고

체형상이 형성되도록 하는 방식 등이 개발되어 미세한 3차원 구조물을 실제 모양에 매우 가깝게 제조할 수 있으며 최근 일본에서 펄초레이저를 이용해 10 μm 크기의 황소를 실물형상과 거의 유사하게 제조하여 널리 알려지기도 하였다. 마이크로광조형은 임의형상의 마이크로 구조물 제조가 가능한 장점을 이용해 마이크로유체소자나 광자결정 등의 제조에 응용이 기대되고 있다.

마이크로광조형의 경우 제조된 미세구조물의 형상 및 치수정밀도가 가공공정뿐 아니라 광조형에 사용되는 광폴리머의 특성에 따라 크게 좌우된다. 광폴리머의 빛 흡수 깊이(optical penetration depth), 빛에 대한 민감도, 광경화 반응으로 생성된 고체구조물의 강성과 같은 재료 자체의 특성이 마이크로광조형을 통해 제조된 미세구조물의 정밀도 및 활용성 등에 결정적인 영향을 미치므로 가공기술의 개발과 함께 광폴리머에 대한 연구도 절실히 요구되고 있다.

마이크로광조형에 사용되는 광경화성 폴리머 외에도 빛을 조사하면 폴리머 결합이 끊어지거나 빛이 조사된 부분의 재료가 다른 영역으로 이동하는 것과 같은 특성을 이용하여 미세한 패턴을 제조할 수 있다. 한 예로 최근 활발히 연구되고 있는 나노패턴 제조를 위해 근접장현미경(near-field scanning optical microscope)을 이용할 수 있는데, 근접장 현미경의 나노프로브(nanoprobe)를 통해 레

이저빔을 조사함으로써 레이저 빛의 회전한계보다 훨씬 작은 수십에서 수백nm 크기의 패턴제조가 가능하다. 이와 같이 나노프로브를 이용한 나노패터닝의 경우 반도체 공정이나 전자빔을 이용한 가공에 비해 설비가 훨씬 간단하고 한 번에 전체 공정이 완료되는 잇점이 있어 고밀도 정보저장장치와 같은 분야에 응용이 기대되고 있다.

위에서 설명한 바와 같은 광화학반응을 이용한 레이저 미세가공은 비교적 간단한 공정을 이용하여 기존의 다른 가공기술로는 가공이 힘든 미세구조물 제조, 3차원 형상 제조, 증착패턴 제조 등이 가능하고 구조물의 크기도 nm

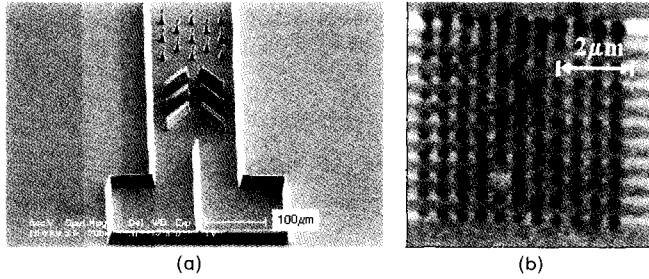


그림 4 (a)마이크로광조형을 통해 제조된 미세구조물 (b)근접장 현미경을 이용한 포토리지스트의 나노패터닝 예

에서 μm 영역에 이르기까지 적용이 가능하여 마이크로 소자 및 마이크로 시스템 등에서의 응용이 기대되고 있다.

기계용어해설

기준곡선(Master Curve)

금속의 탄성 한계가 변형을 진폭에 의존하는 경우, 각 변형을 진폭에 따른 이력곡선의 윗부분(upper branch, ascending branch)은 각 이력곡선을 탄성 기술기를 따라 적절히 이동시키게 되면 이력곡선의 윗부분이 일치하게 된다. 이 일치된 이력곡선의 윗부분 형태를 한 개의 단일 함수로 표현할 수 있으며, 이를 ‘기준 곡선’이라 한다. 기준 곡선의 원점은 가장 작은 변형을 진폭의 이력곡선을 탄성 기술기를 따라 이동시켰을 때의 최소점으로 결정된다.

완전 혼합 연소로(WSR : Well-Stirred Reactor)

완전 혼합 연소로는 연구자에 따라 PSR(Perfect-Stirred Reactor)로서 정의하여 사용하기도 한다. 완전 혼합 연소로는 혼합시간이 보다 빠르게 만들어 균일한 화학반응 유동장을 형성시키게 한다. 이를 위해 일반적으로 마이크로 제트를 이용하여 제작되고 있고, 형태로는 대칭성을 유지시키기 위하여 초기에는 구형(spherical shape)으로 제작하였으나 최근에는 환형(torus shape) 방식을 사용하고 있다. 이러한 완전 혼합 연소로는 예혼합기의 화학반응식(kinetics)의 연구에 널리 사용되고 있다.

임계치(Threshold)

이산 웨이블릿 분석 과정에서 다중 해상도 분석(MRA)을 통해 여러 스케일 대역별 웨이블릿 변환된 계수들을 필요한 부분만을 down sampling하는 과정에서 그 기준이 되는 수치를 말한다. 이 임계치 미만을 잡음성분으로 가정하고, 이상을 압축성분으로 분석하게 되므로 임계치의 타당성이 분석의 정확도에 중요한 요인으로 작용한다.