

극초단 레이저를 이용한 극미세 가공 (1)

-AFM cantilever 제작-

유병현, 조성학, 장원석, 김재구, 황경현(한국기계연구원), 이동주(충남대학교)

한국기계연구원(KIMM), 나노공정장비연구센터

E.mail: shcho@kimm.re.kr

I. 서론

펨토기술은 펨토초 영역에서 일어나는 물리화학적 현상을 이용하여 공학적으로 이용하는 학문이다. 펨토초(femtosecond)는 시간의 단위로서 1펨토초는 1000조분의 1초(10^{-15})에 해당된다. 일반적으로 사람의 머리카락 두께는 약 $100\mu\text{m}$ 인데 100 펨토초라고 하더라도 빛이 머리카락 두께의 1/2도 진행하지 못하는 극도의 짧은 시간에 불과하다. 이러한 펨토기술은 극초단 레이저의 발달로 가능해졌다. 1960년대 초 레이저 펄스폭을 줄일 수 있는 기술의 개발로 나노초 시대가 열린 이후 60년대 중반에 펄스폭을 더욱 줄일 수 있는 모드잠금 기술이 개발되어 피코초시대가 도래했다. 그 후 다양한 레이저 발전기술의 개발로 펨토초 레이저의 발전이 가능해졌으며 80년대 중반에는 차프펄스증폭기술(CPA, Chirped Pulse Amplification)이 개발되고 90년대 초부터 펨토초영역의 극초단파 레이저는 그 출력이 테라와트(1 Tera: 10^{12}W)급으로 증가되면서 펨토기술의 응용영역이 급속도로 확대되기 시작했다. 펨토기술은 그 응용분야와 파급효과가 매우 커서 물리학, 화학, 생물학, 의학을 비롯한 기초과학부터 IT, BT, NT, ST, ET 등 많은 응용분야가 있다. 그 중 가장 중요한 응용 분야는 펨토초 레이저를 이용한 극미세 가공 및 나노기술분야에서의 펨토기술의 응용이다. 미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 나노 기술이 한가지 분야에 국한한 기술이 아니고 융합 기술이며 물리학, 광학, 화학, 생물학, 의학, 전자공학, 기계공학, 재료공학, 생명공학 등이 결합되고 있음을 잘 인식하고 있다. 이러한 인식의 토대하에 나노기술(NT)를 펨토기술에 접목시키는 연구를 수행하고 있다.

펨토초 레이저를 이용한 재료가공은 주로 미세한 구멍이나 절단 또는 특정 물질을 선택적으로 제거하는 작업으로서 나노 테크놀로지에 해당되는 극도의 정밀 가공이며 고부가가치를 창출하는 작업이다. 펨토초 레이저를 이용하게 되면 빛의 흡수에 의하여 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 가공이 끝나게 되어 가공부의 주변에 어떠한 손상이나 구조변화를 일으키지 않는 장점이 있다. 또한 펄스폭이 극도로 짧은 반면 침투출력은 아주 높아서 일반적으로는 투명한 매질이라 할지라도 다광자흡수 과정에 의하여 레이저광의 흡수가 일어나 가공이 가능하여 매질의 종류에 구애를 받지 않는다. 펨토초 레이저를 이용한 재료 가공은 다음과 같은 네 가지

특징이 있다. 첫째로는, 효율적이며, 빠르고 국소적인 에너지가 주입된다는 것이다. 둘째로는 변형이 적고 레이저 용발문턱(Ablation Threshold) 에너지가 낮다는 점이다. 셋째로는 열적 손상을 최소화 시킬 수 있다. 넷째로는 침투 파워가 크기 때문에 일반레이저에서 일어날 수 없는 비선형 현상이 손쉽게 일어난다는 점이다. 이러한 특징을 이용하기 때문에 초정밀 미세구조 가공이 가능하게 된다.

II. 나노물성측정용 AFM cantilever 가공

2.1 AFM cantilever

최근 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용한 자이로스코프(gyroscope), 가속도센서(accelerometer) 등이 상용화되면서, 이들 제품들의 성능 및 신뢰성에 마이크로 구조물의 기계적 특성이 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 나노 구조물들의 물성은 기존의 물성측정 방법으로는 측정할 수 없는 경우가 대부분이다. 또한 같은 재료라도 거대 구조물일 때의 물성과 마이크로 혹은 나노 구조물일 때의 물성은 차이가 있으므로, 실제 공정 및 제품에 사용되는 구조물의 크기와 같은 크기를 가지는 시편을 제조하여 그 물성을 측정할 필요가 있다⁽¹⁾. 따라서 $1\mu\text{m}$ 이하의 크기를 갖는 시편의 물성측정에는 주로 AFM이 사용된다. 본 연구에서는 비열적 가공으로 우수한 가공특성을 갖는 펨토초 레이저를 이용하여 나노압입 시험(nanoindentation test) 등에 사용될 수 있는 AFM cantilever를 제작하였다.

2.2 가공경로 및 가공조건

AFM cantilever 재질은 내식성이 뛰어나고 충분한 탄성을 얻을 수 있어야 한다. 또한 레이저 가공에서 재질의 두께는 가공형상의 정밀도에 큰 영향을 미치므로, 만족스러운 결과를 위해서는 기계적 탄성이 유지되는 범위에서 되도록 얇은 스테인리스를 사용하는 것이 좋다. 설계된 Cantilever는 약 $50\mu\text{m}$ 폭을 갖는 구조물이므로 반복적인 z축 가공에 따른 형상 왜곡을 피하기 위해 얇은 $50\mu\text{m}$ 두께의 SUS304를 사용하였다. 가공에 사용된 대물렌즈는 NIR 50x로써 수 μm 선폭으로 가공할 수 있다. 가공경로는 그림 1과 같다. 안쪽의 라인은 설계된 cantilever의 외형이며 가공 빔의 직경을 고려하여 외곽으로 $5\mu\text{m}$ 밖에서부터 $3\mu\text{m}$ 간격으로 5개의 가공경로를 생성하였다. 최종 결과물은 시편에서 분리되어야 하므로 안쪽과 바깥쪽에 대한 2개의 경로를 순서대로 적용하여 안쪽을 제거한 후 외곽을 가공함으로써 가공이 완성된다.

가공에는 800nm 파장 및 펄스폭 100fs인 1kHz 펨토레이저를 사용하였다. 레이저를 이용한 절단(cutting) 가공에서는 가공경로 외에 출력, 속도 및 Z축 이송 깊이가 중요한 변수이다. 따라서 이들의 조합에 따라 결과물의 품질은 크게 차이 나게 되고 미세한 구조물인 경우 형상이 파괴되는 경우도 발생할 수 있다. 최종 결정된 가공조건은 출력 $150\mu\text{W}$, 속도 2mm/s이며 z축 방향으로 $2\mu\text{m}$ 씩 초점을 이동하면

서 가공하였다(그림 2).

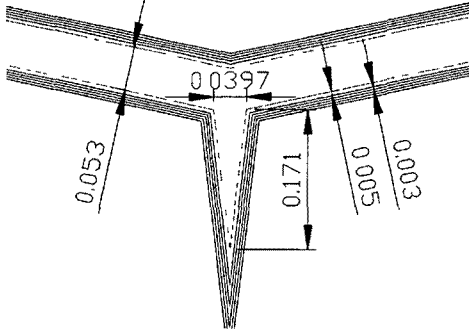


그림 1 Auto CAD를 이용한 가공경로 생성

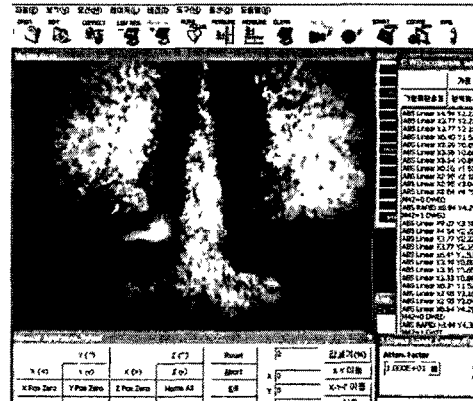
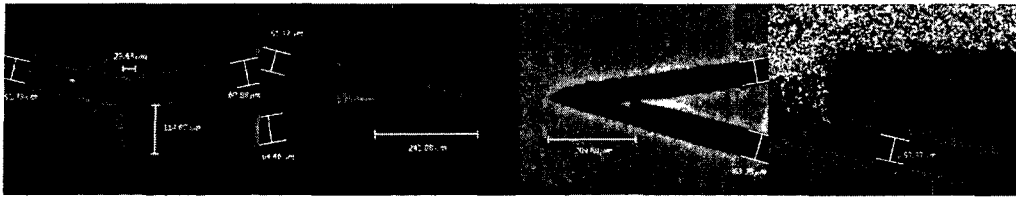


그림 2 가공 프로그램 및 모니터링

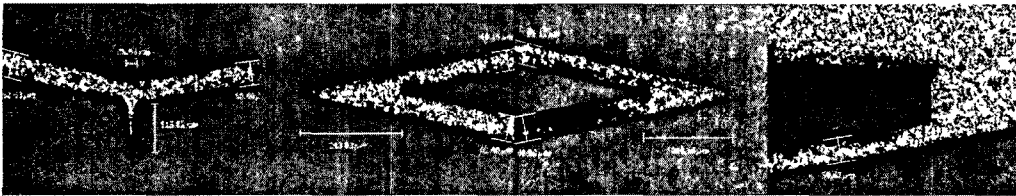
III. 가공결과 및 고찰

그림3은 가공된 AFM cantilever를 각 부분별로 현미경 측정한 사진이며 a와 b는 각각 가공면과 뒷면을 보여주고 있다. 어브레이션(abration) 된 입자들이 산화된 후 표면에 증착되어 가공면과 뒷면의 이미지가 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 현상은 가공중에 에어블로잉(air blowing)을 실시하여 줄일 수 있고 화학적 에칭(etching)을 사용하여 제거 가능하다

가공경로가 복잡한 형상은 스테이지에서 비롯하는 가감속 구간의 영향으로 레이저 가공에 불리하게 작용한다. 또한 레이저 빔 모드가 정확한 가우시안(Gaussian) 분포를 갖지 않는다면 가공면에 따라 서로 다른 공구를 사용하는 것과 같은 현상이 발생하게 된다. 따라서 실제 설계된 가공경로와 최종결과물의 형상은 이러한 영향에 따라 차이를 보일 수밖에 없으므로 최종결과와 비교하여 가공경로를 수정해주어야 한다. 특히 가공경로변화가 심한 팁(tip) 부분은 작은 가공조건 변화에도 형상이 쉽게 훼손되므로 출력 및 속도와 함께 가공경로를 설정할 필요가 있다. 완성된 팁은 폭 $25.6\mu\text{m}$ 길이 $115.8\mu\text{m}$ 이지만 가공경로는 폭 $39.7\mu\text{m}$ 길이 $171\mu\text{m}$ 이므로 각각 $14.1\mu\text{m}$, $55.2\mu\text{m}$ 의 차이를 나타내었다. 주목할만한 특징은 팁 부분은 가공경로보다 작아진 반면 cantilever 부분은 크게 나타난 것이다. 이는 가감속 변화가 심한 구간에서 에너지의 집속으로 나타나는 미세 레이저 가공의 특징으로 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 3 초음파세척 후 AFM cantilever (a)가공면 (b)뒷면

IV. 결론

나노구조물의 물성측정에 이용할 수 있는 AFM cantilever를 펄스레이저를 이용하여 제작하였다. 팁 형상과 같이 스테이지 가감속에 따른 에너지 집속이 이루어지는 부분은 가공경로에 대한 고찰이 필요함을 알 수 있다. 실험에서 사용된 가공경로는 가공결과와 비교하여 수 차례의 수정으로 얻어진 결과이며, 가공경로와 cantilever 사이에서 발생한 폭과 길이의 차이는 출력, 속도 등 가공조건에 따라 달라짐에 유의해야 한다. 따라서 미세 구조물을 레이저 가공할 때는 에너지 집속의 정도에 따라 가공경로를 수정하여 보정할 필요가 있음을 알 수 있다.

V. 참고문헌

1. 김재현, 이학주, 최병익, “마이크로/나노 구조물의 기계적 물성측정 기술,” 기계와재료 제15권 제4호 통권58호, pp15~29
2. M.Gad-el-Hak, Eds, (2002) The MEMS Handbook, CRC Press, USA
3. M.F. Yu, O.Lourie, M.J.Dyer, K. Moloni, T F Kelly, R S Ruoff, (2000) “Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load,” Science 287, pp. 637-640.
4. B.N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, “Ablation of metals by ultrashort laser pulses,” J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 14, No, 10(1997)