

레이저를 이용한 미세 원통 구조물 제조를 위한 빔과 회전축 정렬 방법

정성진*(광주과학기술원 기전공학과), 정성호(광주과학기술원 기전공학과),
이선규(광주과학기술원 기전공학과)

Method of Beam Alignment with the Rotation Axis for Laser Fabrication of Micro Cylindrical Structures

S. J. Jeong(Mechatronics. Dept. K-JIST), S. H. Jeong(Mechatronics. Dept. K-JIST),
S. K. Lee(Mechatronics. Dept. K-JIST)

ABSTRACT

An optical technique to align the laser beam with the rotation axis of a cylindrical microstructure is developed for laser microfabrication. The sample surface is first set normal to the rotation axis by applying a simple reflection law of geometrical optics and then the laser beam is aligned with the rotation axis using translation stages with quadrant photodiodes. Principle and the configuration of the alignment technique are described. An application of the present technique to laser microstereolithography showed that it could be effectively used for fabrication of micro cylindrical structures.

Key Words : Laser beam alignment (레이저 빔 정렬), Rotation axis (회전축), Laser microfabrication (레이저 미세가공)
Cylindrical structure (원통 구조물)

1. 서론

근래에 급속히 성장하고 있는 정보통신, 전자, 생명산업 등의 발전에 있어서 주목할 만한 경향 중의 하나는 제품의 소형화 및 집적화라고 할 것이다. 반도체 분야를 중심으로 한 마이크로 가공기술은 평면가공의 경우 이미 마이크로미터 이하의 정밀도를 달성하였고, 최근에는 마이크로 센서 및 액츄에이터를 중심으로 한 MEMS 및 마이크로 시스템에 활용하기 위한 3 차원 마이크로 가공기술에 대한 관심과 기술개발 노력이 크게 증대되고 있다.

레이저 미세가공 기술은 복잡한 3 차원 구조물을 기존의 반도체 가공기술을 이용할 때 보다 비교적 손쉽게 제조가 가능하며 설비가 상대적으로 간단하다는 장점으로 인해 많은 관심을 끌고 있다. 또한 레이저 가공기술은 반도체 재료뿐만 아니라 세라믹, 금속, 폴리머 등과 같은 다양한 소재의 가공이 가능한 이점이 있다. 레이저를 이용한 3 차원 구조물 제조기술의 대표적인 예로 레이저 빔의 위치에서 국소적으로 증착을 유도하여 증착물이 3 차원 구조를 형성하도록 하는 증착가공, 식각액체나 기체 속

에서 레이저 빔이 조사된 영역만이 식각(etching)을 통해 조금씩 깎여 나가도록 하는 식각가공, 혹은 광폴리머(photopolymer)에 레이저 빛을 조사하여 빛에 노출된 폴리머 용액만이 경화되게 하는 광조형법(Microstereolithography) 등이 있다.^[1-5]

위의 레이저 미세가공기술로 제조가 가능한 3 차원 구조물의 형상은 주로 직선구조와 곡선구조의 복합으로 되어 있으며 따라서 정확한 가공을 위해서 정밀한 직선 (linear translation) 및 회전(rotation) 이송이 필수적이다. 직선이송의 경우 0.1 μ m 까지 반복 정밀도 확보가 가능하며 회전에 있어서는 50 μ rad 의 각도 분해능을 얻을 수 있다. 그러나 Fig. 1 에 나타낸 것과 같은 원통형 회전체의 경우 마이크로 크기 구조물의 반경(R)을 설정하기 위해서는 레이저 빔과 회전축의 정렬이 선행되어야 하며 이것은 원통형 구조물의 직경 정밀도와 직접 연관되어 있다. 수동식 4 축 고니오미터를 이용하여 시행착오를 통해 레이저 빔과 회전축을 정렬할 수 있으나 이 경우 매번 정렬을 다시 해야 하는 어려움이 있다.^[5]

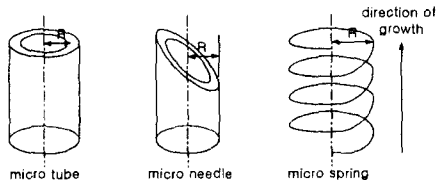


Fig 1. Micro cylindrical structures

회전축 정렬기술들을 살펴보면 회전 기계장치의 샤프트 정렬에 다이알 게이지, 레이저 시스템 등을 사용한 방법이 있지만 회전축들간의 정확한 연결에 초점이 맞추어져 있다.^[6] 또 George H. Seward 등은 Seward 정렬모듈을 개발하여 광학 부품의 제거와 재배치를 요하는 일반 정렬작업의 어려움을 제거하여 빔의 위치와 각도 조절을 신속하고 정밀하게 수행하여 레이저 식각공정에 적용했으나 가공 레이저 빔을 회전축에 정렬시키는 방법은 제시되지 않고 있다.^[7]

본 논문에서는 원통형 미세 구조물을 제조하는데 필요한 레이저 빔과 회전축의 광학적 정렬법을 개발하였다. 회전 스테이지 끝단에 평면 거울 및 평면 거울이 부착된 빔 스플리터(Beamsplitter, BS)를 설치해 정렬 오차를 4 분할 포토다이오드(Quadrant photodiode, QPD)로 측정하는 회전축 정렬방법의 원리, 광학계의 구성에 대해서 설명하고 광조형법에 적용한 결과를 제시하였다.

2. 레이저 빔 정렬법의 원리

2.1 회전축 정렬 원리

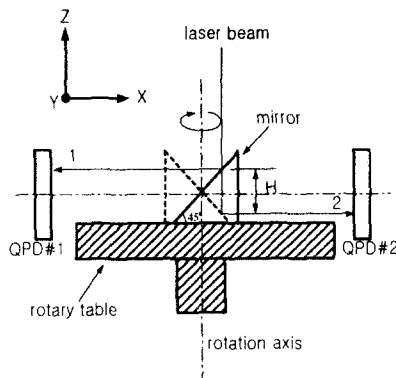


Fig 2. Principle of laser beam alignment with the rotation axis

Fig 2.는 회전축 정렬의 원리를 나타내며 이때 레이저 빔은 회전 테이블에 대해서 수직하게 조사된다고 가정한다. 45° 경사진 면을 가진 거울을 그 위에 부착하면 레이저 빔의 회전축에서 벗어난 양을

다음과 같이 측정할 수 있다. 1 번 빔은 초기 상태의 반사 빔 위치를 나타내며 테이블이 180° 회전하면 거울의 반사면이 점선 부분과 같이 반대로 되어 2 번 위치로 빔이 반사 된다. 만약 1 번 빔과 2 번 빔 사이에 높이 편차가 발생하면 이는 빔이 회전축에 정렬되어 있지 않다는 것을 나타낸다. 이 축 정렬 오차에 의한 높이 편차는 좌우 양쪽에서 QPD로 측정할 수 있다. 이 경우 QPD 는 표면에서부터 동일한 높이에 위치하여야 하는데 두 센서를 양쪽의 동일선상에 정확히 설치하는 것이 곤란한 문제점이 있다.

이 문제점을 보완하기 위해서 Fig. 3 과 같은 거울이 부착된 빔 스플리터(BS)를 사용한다. 초기 상태에서 조사된 빔은 BS 의 경사면에서 일부는 1 번 위치로 반사가 되고 나머지는 투과되어 다시 거울에서 반사된 후 BS 를 통해 1'의 위치로 나아간다. 즉 T 자형으로 빔이 각각 반사가 된다. 회전 테이블이 180° 회전하면 점선부분과 같이 BS 의 위치가 바뀌게 되고 2 번 빔과 2' 번 빔을 얻을 수 있다. Fig 3.과 같이 1 과 2'의 빔을 이용해 왼쪽에서 센서한 개로 정렬오차에 의한 높이 편차 H 를 측정할 수가 있다. 그리고 y 축 방향에 대해서도 동일한 방식으로 측정을 한다.

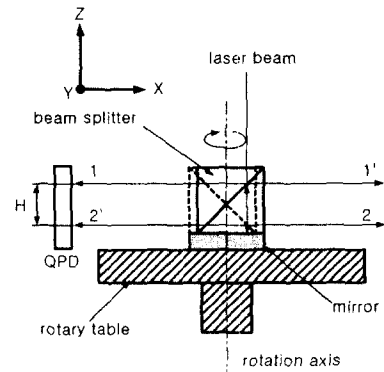


Fig 3. Measurement of the laser beam offset from the rotation axis using single quadrant photodiode and a beamsplitter

2.2 정렬 오차 보상방법

수직 조사된 빔에 의해 생긴 회전축 정렬오차 보상량은 Fig 4. (a)의 빔 스플리터의 기하학적 형상으로부터 구할 수가 있다.

레이저 빔과 회전축과의 정렬오차를 S 라고 하고 측정된 높이 편차가 H 라고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S = \frac{H}{2} \quad (1)$$

즉, 식(1)의 S 만큼 이송계를 이용하여 회전축을 이동시키면 오차가 보정된다. Fig 4. (b)에서 보는 것처럼 보통 정렬오차는 x, y 축 방향에 대해서 존재하므로 90° 씩 BS를 1회전시킨 후 측정된 오차를 이용하여 x 축 방향(A→B), y 축 방향(B→O)으로 순차적으로 회전축을 이동시켜 레이저 빔과 회전축이 O 점에 일치하도록 보정해 준다.

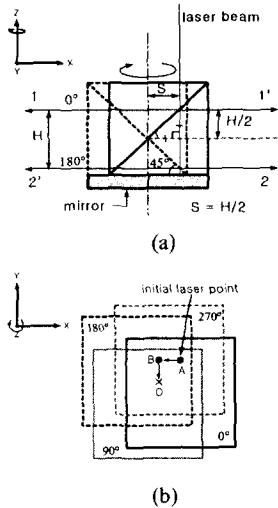


Fig 4. (a) Determination of the alignment offset and (b) the compensation procedure

3. 회전축 정렬 순서

3.1 레이저 빔의 수직정렬

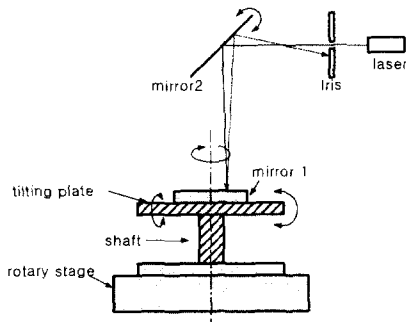


Fig 5. Alignment of the reference surface in the plane perpendicular to the rotation axis

2 장의 회전축 정렬 원리에서는 레이저 빔이 테이블 면에 대해서 수직하다는 가정에서 출발하였다. 그러나, 실제 시스템에서는 회전테이블의 표면이 회전축에 정확히 수직이 되지 않는 정도를 나타내는 수평오차 때문에 회전 시 레이저 빔과 회전 테이블면 사이의 수직정렬 오차가 달라지게 된다. 이와 같은 수평오차 및 그에 따른 레이저 빔의 회전축 정렬 오차를 최소화 하기 위해서는 회전 테이블에 대해서 빔을 수직하게 조사 시키는 것이 필요하다.

Fig 5.는 회전 테이블의 수평오차를 수정하기 위한 구성을 나타낸다. 거울이 부착된 2 축 각도 조정판(tilting plate)을 회전테이블에 설치하고 레이저 빔의 크기와 동일한 직경의 조리개를 레이저 빔 경로에 설치하여 거울에서 반사된 빔의 위치를 확인하도록 하였다. 여기서 회전축에 수직한 면을 이론적으로 기준면으로 설정하며 위에서 얘기한 수평오차는 이 기준면과 거울면 사이의 각도에 해당한다.

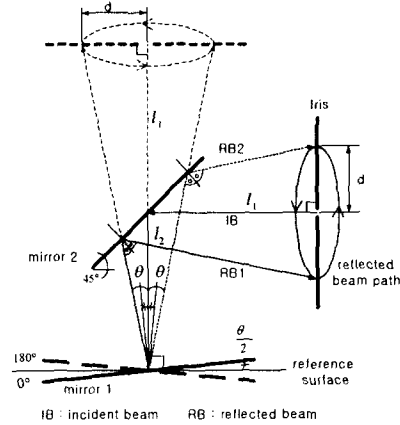


Fig 6. Alignment error due to a slanted mirror surface

Fig 6에서 우선 거울 1의 수평오차가 0이라고 하면 입사되는 레이저 빔은 기준면에 수직하게 조사되며 이때 반사된 빔은 반사원리(reflection law)에 의해 조리개 구멍을 다시 통과할 것이다. 그러나 거울 1이 초기위치(0°)에서 기준면에 대해 $\theta/2$ 만큼 기울어져 있었다면 반사 빔 RB1은 입사 빔 IB에 대해서 θ 만큼 각도오차를 가지고 진행한다. 거울이 180° 회전하게 되면 반사 빔 RB2역시 같은 오차를 가지며 대칭되는 방향으로 진행하며 1회전 시 그립과 같은 원 궤적을 그리게 된다. 이 원 궤적을 조리개 구멍 주위에서 관찰 할 수 있으며 조리개에서 거울 2까지 거리를 l_1 , 거울 2에서 거울 1까지 거리를 l_2 라고 한다면 관찰되는 빔 궤적의 반경 d 는 점선으로 표시된 기하학적인 대칭 도형으로부터

다음과 같은 관계가 성립한다.

$$d = (l_1 + l_2) \tan \theta \quad (2)$$

Fig 7.은 식(2)를 이용하여 구한 조리개의 설치 거리와 거울 1의 기울어진 각도에 따른 조리개에서 관찰되는 빔 궤적의 반경 값 변화를 나타낸다. 이 그래프에서 보는 것처럼 조리개의 설치 거리가 멀수록 육안으로 관찰할 때 민감도를 증가시킬 수 있으며 측정의 정밀도를 높일 수가 있다. 예를 들어 거울 1의 기울어진 각도가 0.1°일때 조리개가 500mm 떨어져 있으면 관찰할 수 있는 반경은 약 0.9mm 인 반면 거리가 2000mm 인 경우 반경이 3.5mm 가 되므로 오차를 측정하기가 쉬워짐을 알 수 있다.

거울 2와 조정판의 기울기를 조정하여 반사 빔 궤적의 반경 d를 줄임으로써 거울 1이 회전축에 수직이 되도록 하며 수직 정렬이 완성될 경우 반사 빔은 조리개 구멍을 통과하게 된다.

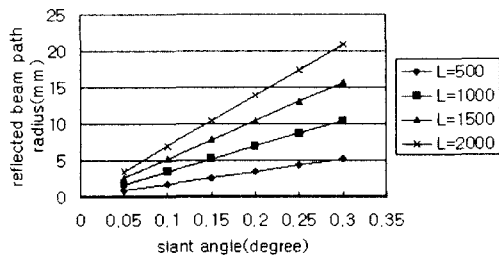


Fig 7. Variation of the radius of reflected beam path on the iris surface with respect to the slant angle of mirror 1 and the distance between the iris and mirror 1

3.2 레이저 빔과 회전축의 정렬

수직정렬이 완료되면 Fig 8.과 같이 BS를 거울 1 위에 설치하고 2장에서 설명한 방법으로 회전축과 레이저 빔 사이의 정렬오차를 보정한다.

3.3 초점 렌즈에 의한 회전축 정렬 오차 보정

Fig 8.은 레이저 빔과 회전축의 정렬이 끝난 후 초점렌즈를 삽입할 때 생기는 정렬오차를 나타낸다. 1번 빔은 초점렌즈 삽입 전 정렬된 상태의 빔 경로로서 기준 위치 설정을 나타내고 2번 빔은 렌즈 삽입에 의해 원래 위치에서 변경된 빔을 나타낸다. QPD로 1번 빔에 대한 2번 빔의 차이 값 ϵ_y, ϵ_z 를 측정하고 틀어진 빔이 1번 빔의 위치로 옮겨 수 있도록 렌즈를 XY 방향으로 이송 및 각도 조정을 해 준다.

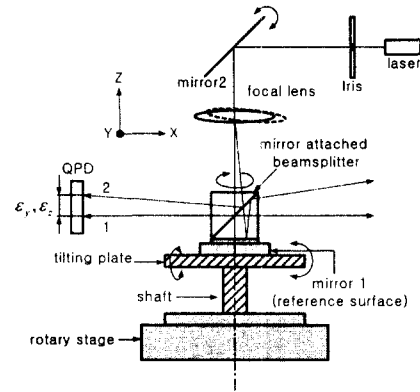


Fig 8. Schematic diagram of the complete alignment setup and an alignment error caused by misaligned focusing lens

4. 실험 및 결과

4.1 마이크로 광조형 실험장치

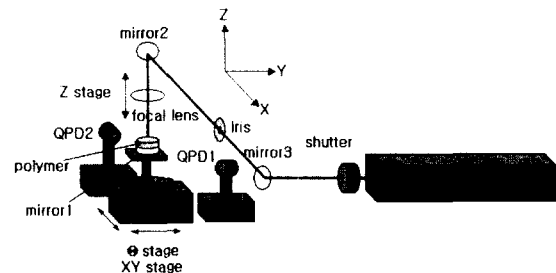


Fig 9. Schematic diagram of a microstereolithography system

Fig 9.는 위에서 설명한 회전축 정렬 방법을 마이크로 광조형 기술에 응용한 경우의 실험장치를 보여준다. 사용 광원은 파장 442nm의 He-Cd 레이저이고 광경화 되는 폴리머는 SK Chemical사의 상용 레진(resin) FA1260T를 사용하였다. 실험조건으로 레이저 출력은 4.5mW, 스테이지의 회전속도는 12°/sec로 설정하고 f = 75mm 초점렌즈를 사용하여 기준면인 거울 1 위에 폴리머 용기를 올려놓고 레이저를 조사한다.

회전축에 대한 정렬 정도를 확인하기 위해 회전 스테이지를 정지상태에서 경화 시킨 것과 회전축 정렬 후 오프셋(offset)량을 주지않고 1회전 시키면서 경화 시킨 결과를 비교해 본다. 정렬오차가 존재하지 않는다면 두 경우에 대해서 같은 한 점으로 나타날 것이다.

4.2 실험결과

Fig 10.은 회전축 정렬 기술을 광조형법에 적용한

실험결과이다. 검은색으로 보이는 부분이 레이저 빔의 초점 영역에서 폴리머가 경화 된 것을 나타내는데 (a)는 정지상태에서 얻은 결과로 폴리머가 한 점으로 경화가 된 것을 알 수 있으며 그 직경은 약 30 μm 정도이다. (b)의 경우 회전 테이블을 1 회전하여 얻은 결과로 직경이 약 100 μm 정도인 도우넛 형태로 나타났다. 즉, 본 연구에서 제시된 방법을 응용하여 약 50 μm 이내로 회전축 정렬이 가능함을 알 수 있다.

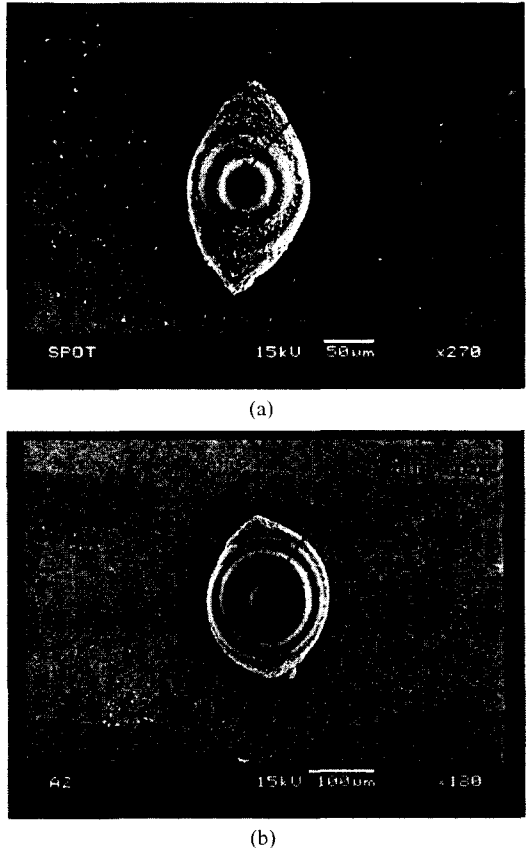


Fig 10. Experimental results (a) for no rotation of the rotation table and (b) for rotation without offset

5. 결론

본 논문에서는 미세 원통 구조물 제조를 위한 레이저 빔과 회전축과의 정렬 방법을 개발하여 광조형 장치에 시험 적용하였다. 결과로부터 거울이 부착된 빔 스플리터와 QPD 를 이용하여 레이저 빔과 회전 중심축의 정렬이 가능하다는 것을 보여 주었다. 실험 결과에서 약 50 μm 이내로 회전축 정렬이 가능한 것으로 나타났지만 본 실험에서와 같이 조

리개 표면상의 반사 빔 위치를 육안으로 관찰하는 대신 QPD 등을 사용하여 반사된 빔의 위치를 보다 정확히 설정함으로써 보다 향상된 정밀도를 얻을 수 있을 것으로 본다.

후기

본 내용은 과학기술부 21 세기 프론티어 개발사업 중 “지능형 마이크로 시스템 개발 사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

1. Mats Boman and Helena Westberg, “Helical Microstructures Growth by Laser Assisted Chemical Vapour Deposition”, IEEE, pp.162-167, 1992
2. Helena Westberg, Mats Boman, “Free-standing silicon microstructures fabricated by laser chemical processing”, J. Appl. Phys. 73(11), 1993
3. Daniel J. Ehrlich, Jeffrey Y. Tsao, “Laser Microfabrication”, Academic Press, Inc., 1989
4. X. Zhang, X. N. Jiang, C. Sun, “Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures”, Sensor and Actuators 77, pp. 149-156, 1999
5. K. Williams, J. Maxwell, “Freeform Fabrication of Functional Microsolenoids, Electromagnets and Helical Springs Using High-Pressure Laser Chemical Vapor Deposition”, IEEE, pp. 232-237, 1999
6. John Piotrowski, “Shaft alignment handbook”, Marcel Dekker, Inc
7. George H. Seward, John M. Leszczynski, Edward J. Mulhern, “Rapid alignment of laser beams within optical systems”, Opt. Eng. 36(5), pp. 1414-1420, 1997
8. 박준호, “정밀측정시스템 공학”, 야정문화사
9. Manfred Weck, H. Bibring, Handbook of Machine Tools Vol. 4 “Metrological Analysis and Performance Test”, John Wiley & Sons, 1980
10. Warren J. Smith, “Modern Optical Engineering”, 2nd ed, McGraw-Hill, New York, 1990
11. William H. Roadstrum, Dan H. Wolaver, “Electrical Engineering for all Engineers”, 2nd ed, John Wiley & Sons, 1994