

Nd:YAG 레이저를 이용한 polyoxymethylene 표면의 마이크로 딥플 가공 및 특성에 관한 연구

조민행[†] · 이재봉* · 이성혁* · 김주한**

Characteristics of micro-dimple formed on polyoxymethylene surface by Nd:YAG laser texturing technique

Minhaeng Cho, Jaebong Lee, Seonghyuk Lee, and Joohan Kim

Key Words: Laser surface texturing(레이저 표면 가공), Polyoxymethylene(POM), Tribology(트라이볼로지), Micro-cavity(미세공동), HAZ(열변형구간)

Abstract

Array of micro-dimple on polyoxymethylene (POM) surface was fabricated using Q-switched Nd:YAG laser and its characteristics were studied in terms of heat affected zone (HAZ), dimple geometry, and the effect of specimen surface roughness. Process parameters such as lamp current, process time, and the stream of air in order to minimize HAZ and flow of molten polymer into cavity were extensively studied in this work. Dimple geometry was further investigated by 3-D optical microscopy to provide deep insight into morphological analysis near the dimples. This paper also presents the applicability of micro-dimples in polymeric tribological system, such as a thrust bearing. Micro-dimples were expected to provide low coefficient of friction and enhanced lubricity at the sliding interface.

기호설명

μJ : 레이저 조사 에너지량 (W·s)

1. 서 론

윤활성능의 향상 및 계면에서의 마찰을 줄이기 위한 다양한 방법 중, 최근 재료의 표면에 딥플(dimple) 혹은 공동(cavity)과 같은 일정한 형상의 가공을 통한 트라이볼로지적 연구가 활발하게

이루어지고 있다⁽¹⁻³⁾. 특히, 내연기관의 피스톤 링과 같이 마찰, 마모 특성이 중요한 부품에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽⁴⁾. 대부분의 미세 공동가공(micro-cavity process)은 레이저 표면가공(laser surface texturing, LST)기법을 통하여 이루어지며 이를 통해 공동의 기하학적 특성 및 밀도 등이 마찰, 마모, 윤활거동에 미치는 영향에 관한 연구가 주를 이루고 있다⁽⁵⁻⁷⁾.

일정한 패턴을 갖는 표면형상은 윤활거동 시 윤활유의 저장 및 재공급을 하는 역할과 유체 역학적 동압력 포켓 현상(Hydrodynamic pressure pocket phenomenon)을 통하여 마찰·마모를 줄이는 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 하지만, 마찰 성능을 향상시키기 위한 표면가공형상은 작동조건 및 재료의 특성에 상당히 의존하며 이를 체계적으로 입증하기 위해서는 레이저의 성능 및 특성, 가공형상의 기하학적 특성, 재료에 따른 가공특성 및 트라이

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : mhcho87@cau.ac.kr
TEL : (02)823-5332 FAX : (02)814-9476

* 중앙대학교 기계공학부

** 서울산업대학교 기계공학과

볼로지적 특성 등 다양한 조건이 동시에 고려되어야 한다.

본 연구에서는 고분자 재료에 대한 미세표면형상 가공의 특성에 관한 연구를 목적으로 하고 있다. 특히, 기존 스러스트 베어링(thrust bearing), 슬라이딩 기구(sliding components) 등에 널리 사용되고 있는 대표적 저마찰 고분자재료인 POM (polyoxymethylene)에 대한 가공연구를 통해 트라이볼로지적 성능향상을 위한 선행연구로써 딥플 가공패턴연구에 그 목적을 두고 있다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편 준비

본 연구에서는 결정성의 열가소성 수지인 폴리옥시메틸렌(polyoxymethylene:POM)을 가공 대상재료로 사용하였으며, 시편의 화학 성분은 Table 1에 주어져 있다. 위에서 언급된 바와 같이, POM은 내마모성이 우수하며 또한, 저마찰성 재료로 잘 알려져 있다. 레이저를 이용한 표면형상가공에 앞서 POM 표면은 일정한 다음과 같은 방식으로 일정한 표면조도를 얻었다.

우선, 레이저 가공에 앞서 POM 시편은 두께 4mm, 직경 30mm의 크기로 기계가공을 하였으며 이후, 레이저 가공표면에 대한 일정한 표면 상태를 얻기 위해 #400과 #2000 SiC 연마지(Daesung Co.)를 이용하였다. 이를 통해 표면조도의 차이가 가공에 미치는 영향을 연구할 수 있을 것으로 예상되었다. 연마작업은 낮은 번호의 연마지로부터 일정한 방향으로 이루어 졌으며 연마작업의 정확성을 위해 초기 가공방향과 직각방향으로의 2차 가공을 통해 초기 연마가공 시 생성된 스크래치가 사라질 때 까지 재가공을 실행하였다. 또한, #2000 연마지를 이용한 표면조도를 얻기 위해서는 #1000과 #1500의 중간단계의 연마지를 사용함으로써 낮은 번호의 연마지에 의한 깊은 스크래치

Table 1 Chemical composition of polyoxymethylene

| Components | Material | % |
|------------------|----------|--------|
| Polyoxymethylene | | >97 |
| Antioxidant | | <0.2 |
| Stabilizers | | <2 |
| Formaldehyde | | <0.005 |

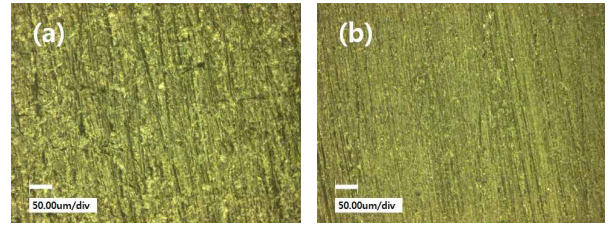


Fig. 1. Optical micrographs(x450) of POM surface after finishing by SiC abrasive paper of (a) #400, (b) #2000. Scale bar 50 μ m.

마크를 최대한 제거하였다. 이로써 각각의 연마지에 대한 표면조도의 차이를 부여하였으며 이결과는 Fig. 1에 잘 나타나있다. 연마 시 연마유에 의한 외부영향을 최소화 하기위해 탈이온수(de-ionized water)를 이용하였으며 POM 표면측정 시 각각의 샘플은 초음파 세척기를 이용하여 표면에 남아있을 수 있는 미세입자들을 제거한 후 표면측정이 이루어졌다.

2.2 실험 장치

레이저 표면 가공을 위한 레이저 가공장치 및 가공표면형상을 측정하기 위한 측정 장치의 구성은 Fig. 2와 같다.

2.2.1 레이저 표면 가공

미세표면형상 가공을 위한 레이저 장치의 구성은 다음과 같다. 우선, 발생된 레이저(IPG, YLR-LP Series)는 주사장치(SCANLAB, hurryscaan II 14)와 스테이지(JUSTEK, JTSG Acu Positioner)를 통해 컴퓨터의 CAD 파일에 따라 레이저를 조사하도록 구성되었다. 그리고 레이저 가공 시 노즐을 통해 공기를 불어줄 수 있도록 에어 스프레이를

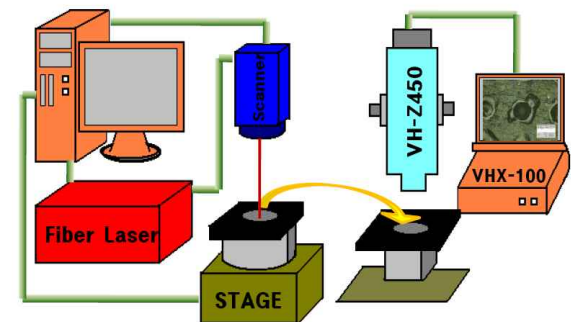


Fig. 2. Schematic of experimental set up for laser surface texturing.

스테이지로부터 약 10cm 거리를 두고 분사하였다.

레이저 표면 가공의 패턴은 미세공동이 10개의 행과 열이 되도록 즉, 100개의 미세공동을 정 방향으로 배열하였다. 또한 각 미세공동 사이의 거리는 150 μ m이다. 본 연구에서 사용한 레이저의 경우 레이저 조사 범위(laser spot size)가 30 μ m로 가공 경로를 지정하기 위해 주사장치에 입력하는 CAD의 그림 형상을 레이저 조사 범위보다 작은 1 μ m 크기의 정사각형을 이용함으로써 레이저가 한 점에 머무르는 것과 같은 효과를 나타내었다. 또한, 레이저가 이 점에 머무르는 시간과 레이저의 출력을 조절함으로써 레이저 조사 에너지를 달리할 수 있으며 이를 응용하여 형상가공실험을 진행하였다.

2.2.2 표면 검사

레이저 표면 가공된 미세공동의 표면 검사는 광학 현미경(KEYENCE VHX-100)을 이용해 촬영된 이미지를 2D 및 3D 이미지로 변환할 수 있도록 구성하여 이루어졌다. 미세공동의 직경은 미세공동 주변의 3점을 지정하여 현미경 측정 소프트웨어를 이용하여 자동측정 되었다. 3차원 미세공동형상은 현미경의 fine depth up 기능을 이용하여 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 레이저 조사에 의한 가공면의 용융거동

POM의 용융점은 약 180 $^{\circ}$ C이며 고에너지의 레이저 조사에 의해 쉽게 용융현상이 나타났다. 하지만 다수의 가공된 공동에서 용융된 POM이 다시 가공부위로 흘러들어가 가공공동부위를 막는 현상이 나타났으며 이를 방지하기 위하여 레이저 가공 시 압축공기를 분사함으로써 용융된 POM이 다시 흘러들어가는 것을 방지하고자 하였으며 공기 분사에 의한 효과는 Fig. 3에 잘 비교되어있다. Fig. 3(a)에서 보는바와 같이 공동주위로 용융된

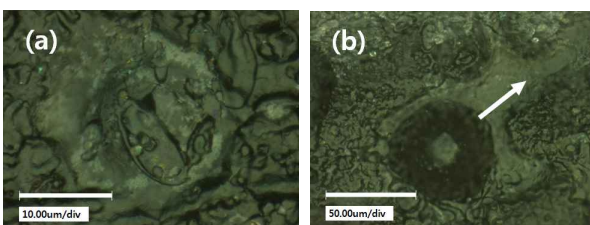


Fig. 3. Optical micrographs of micro-cavity (a) without stream of air and (b) with stream of air.

부분이 넓게 분포되어있으며 공동이 용융된 POM에 의해 다시 채워진 것을 볼 수 있다. 또한 가공 시 레이저의 고에너지에 의해 POM의 연소에 의한 발연현상이 나타났으며 이는 곧 일정 양의 POM이 연소에 의해 표면으로부터 제거됨을 의미한다. 만일 적절한 레이저 에너지와 조사시간이 밝혀진다면 공동 주위의 용융현상을 최소화하면서 원하는 형상의 공동을 가공할 수 있을 것으로 기대된다.

이와 반대로, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 레이저 가공 시 공기를 분사하였을 경우, 공동은 가공 상태를 유지하는 것으로 확인되었으며, 그림의 화살표 방향의 공기분사 방향으로 용융된 POM이 흘러감을 또한 확인하였다. 이를 통해, 원하는 형상의 공동을 얻기 위해서는 공기분사가 필요한 것으로 실험결과 나타났다. 공동의 직경은 약 50 μ m이며 용융부분의 제거로 인해 약간의 차이가 생길 것으로 예측된다. 위에서 언급된 바와 같이, 공기분사와 적절한 레이저 에너지를 동시에 사용하면, 보다 원하는 형상에 근접한 공동형상을 가공할 수 있을 것으로 보인다.

3.2 에너지에 변화에 의한 표면형상 변화

조사된 레이저 에너지에 의한 가공형상의 변화는 Fig. 4에 나타나있으며, 이는 앞에서 확인된 공기 분사효과를 병행하여 실행되었다. Fig. 4(a)는 비교적 낮은 에너지의 레이저를 이용하였을 경우 표면가공형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, POM의 표면에 약간의 마크형상만을 남겼을 뿐 가공흔적이 전혀 나타나지 않았다. 레이저가 직접 조사된 중앙부분에서 약간의 용융흔적이 나타났으며, 그 주위로 열변형구간이 생성되었다. 반면에 Fig. 4(b)에서 보여진 바와 같이, 조사 레이저 에너지가 높을 경우, 공동주위의 대부분의 영역에서 용융현상이 나타났음을 알 수 있다. 그러므로, 가공부위를 제외한 타 부분에서의 용융현상 등을 배제하기 위해서는 적당한 에너지의 선택

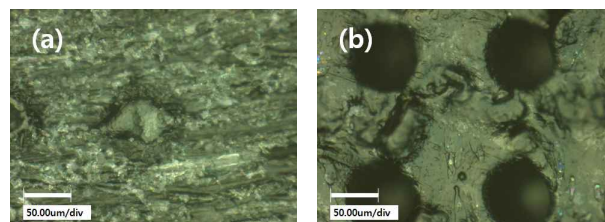


Fig. 4 Optical micrographs of micro-cavity formation at the irradiation energy of (a) 160 μ J and (b) 930 μ J.

이 요구됨을 확인 하였다. 이와 같이, 용융현상이 지배적일 경우, 공기의 분사에 의한 효과 또한 거의 없는 것으로 보인다.

이로부터 두 가지의 가공성 영향인자를 예측할 수 있다. 첫째, Fig. 4(a)의 경우, 만일 레이저 조사시간을 약간 증가한다면 심한 용융현상 없이 표면가공이 가능할 수 있다는 점이다. 둘째, Fig. 4(b)에서 보는바와 같이, 용융현상이 지배적이지만 만일 용융된 표면부를 2차 가공을 통해 제거한다면 용융문제를 해결할 수 있을 것이다. 하지만 이 경우, 두께방향 혹은 길이방향 등의 가공치수의 변화를 유발할 수 있어 실제 조립이나 작동에 문제를 야기할 수 있다는 점에서 불리할 것으로 보인다. 그러므로, 용융부를 최소화 하여 2차 가공에 의한 표면부 연삭작업에 의한 영향을 줄이는 방향으로 가공인자의 설정이 필요할 것으로 보인다.

3.3 표면조도에 따른 표면형상 변화

표면조도에 따른 레이저 가공형상의 변화를 알아보기 위해 #400과 #2000으로 표면 연마처리된 두 표면의 가공형상을 비교하였다. Fig. 5에서 보는바와 같이, POM 표면의 연마 차이에 의한 효과는 거의 없는 것으로 보인다. 즉, 표면조도의 차이는 최적의 레이저 조사 에너지를 사용함으로써 극복될 수 있는 요인으로 보인다. 물론, 각각의 표면조도의 경우 조사된 에너지의 차이에 의해 미가공부 생성 및 용융현상이 동일하게 발생하였다. 이는 곧 표면조도의 영향보다는 조사 에너지의 영향이 더 크다는 것을 의미하기도 한다

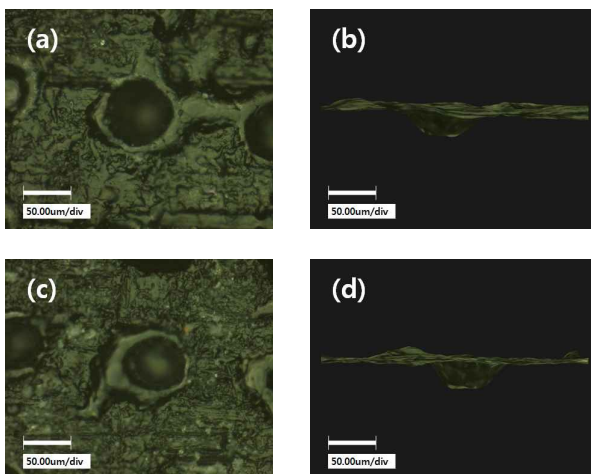


Fig. 5 Optical micrographs of micro-cavity formed at (a-b) 808 μ J with #400 and (c-d) 404 μ J with #2000.

다. Fig. 5(b)와 5(d)는 공동의 전형적인 3차원 이미지로서 실제 가공이 이루어진 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 공동의 테이퍼 형상은 다음과 같은 영향에 의한 것으로 추정된다. 첫째, 용융된 POM의 흐름현상, 둘째, 열전달에 의한 용융작용. 그 이유는 레이저의 직경이 약 30 μ m이기 때문에 공동의 입구부분이 조사레이저에 의해 직접 용융되었다 볼 수 없으며 이는 조사 기간 동안의 열전달에 의한 용융작용으로 볼 수 있기 때문이다.

4. 결 론

우수한 성능을 지닌 고분자 재료들의 등장으로 최근 다양한 분야에서 금속재료의 대체재로서 고분자는 그 적용이 날로 증가하고 있다. 특히, 저마찰성 및 내마모성 고분자 재료인 POM은 여러 분야에 실제 적용중이며, 본 연구에서는 레이저표면형상가공을 통해 향후 트라이볼로지적 성능을 더욱 높이기 위한 가공성 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

우선, 고에너지의 레이저 조사에 의해 용융된 고분자의 일부가 가공부분으로 다시 흘러감으로써 가공된 공동을 채우는 현상을 유발하며 이를 제거하기 위한 방법으로 가공 시 공기분사가 효과적임을 실험을 통하여 입증하였다.

최적의 공동형상 가동을 위해서는 적절한 레이저 조사에너지의 선택이 요구되며, 이는 조사시간의 변화로 조절 가능함을 확인하였다. 특히, 최적의 조사에너지와 조사시간의 사용으로 인해 용융부를 최소화하면서 원하는 공동형상을 얻을 수 있을 것으로 기대되며 향후 이에 대한 연구가 이루어질 계획이다.

표면조도는 적합한 조사 레이저 에너지의 사용과 더불어 가공형상에 큰 영향을 미치지 않았다. 즉, 어느 표면조도 조건하에서도 미가공부 생성 및 용융현상은 공통적으로 나타났으며 오히려 기구의 작동조건에 따른 표면조도의 변화에 의한 가공성의 저하는 없을 것으로 예측된다.

열변형구간(HAZ)에 대한 보다 구체적인 분석은 형상가공표면에 대한 2차 연마작업을 통해 가공 시 형성된 용융 POM을 제거한 후 가능할 것으로 보인다. 대부분의 열변형구간은 용융부에 의해 가려져 있으며 보다 구체적인 열변형구간

분석은 공동 단면(cross-section) 분석과 2차 가공을 통해 가능할 것으로 보인다. 또한, 분사유체에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다. 즉, 분사유체의 분사조건 등에 관한 체계적인 연구와 가공부위에서의 분사유체와의 화학적 반응 등을 연구하기 위한 다양한 분사유체에 관한 영향 연구가 이루어져야 할 것이다. 이와 같은 연구를 통해, 가공성에 관한 연구가 이루어진 후 공동의 밀도 및 형상 제어를 통한 다양한 조건하에서의 마찰, 마모, 윤활성능을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 과제는 지식경제부 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) A. O. Parry, P. S. Swain and J. A. Fox, 1996, "Fluid Adsorption at a Non-Planar Wall: Roughness-Induced First-Order Wetting", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 8 No. 45, pp. L659~L666
- (2) T. S. Chow, 1998, "Wetting of rough surfaces", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 10 No. 27, pp. L445~L451
- (3) P. Andersson, J. Koskinen, S. Varjus, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Georgiou, B. Zhmud, W. Buss, 2007, "Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces", *Wear*, Vol. 262 No. 3, pp. 369~379
- (4) G. Ryk, I. Etsion, 2006, "Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction", *Wear* Vol. 261 No. 7, pp. 792~796
- (5) Da-ping Wan, Hong-bin Liu, Yu-ming, De-jin Hu, Zhen-xing Gui, 2008, "CO₂ laser beam modulating for surface texturing machining", *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, pp. 309~314
- (6) Izhak Etsion, 2005, "State of the Art in Laser Surface Texturing", *Journal of Tribology*, Vol. 127 No. 1, pp. 248~253
- (7) Xiaolei Wang, Koji Kato, Koshi Adachi, Kohji Aizawa, 2001, "The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed", *Tribology International*, Vol. 34 No. 10, pp. 703~711
- (8) G. Dumitru¹, V. Romano¹, H.P. Weber¹, H.Haefke, Y. Gerbig, E. Pflüger, 2000, "Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications", *Appl. Phys. A*, Vol. 70, pp. 485~487