



레이저 가속 플라이어 충돌에 의한 금속 표면상의 마이크로 딥플 어레이 가공 및 특성 파악

이정환^a, 최대철^b, 김홍석^{a*}

Patterning and Characterization of Micro-dimple Arrays on Metallic Surfaces by Laser-accelerated Flyer Impact

Jeong Hwan Lee^a, Dae Cheol Choi^b, Hong Seok Kim^{a*}^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 December 2017
Revised 12 January 2018
Accepted 15 January 2018

Keywords:

Laser accelerated flyer
Plasma
Micro dimple array
Embossing
Surface patterning

ABSTRACT

In this paper, we have studied an efficient fabrication method that can produce a microscale dimple array at one instance by striking the workpiece with a thin metallic flyer accelerated by laser-induced plasma. Because the workpiece was embossed with the high-speed impact of the flyer, the benefits of high-speed processing, such as improved formability, could be realized. The effects of the laser-beam size, relative ratio of the laser-beam size to the flyer diameter, and flyer thickness on the forming performance were examined. It was found that, when the laser-beam size was smaller than the mold shape, the manufacturing performance was significantly lowered. To ensure the uniformity of the embossing dimples, it was more effective to increase the flyer speed by reducing the flyer thickness, rather than the diameter. Future research is needed to determine the optimal process conditions to improve the homogeneity of the dimple array.

1. 서 론

금속 표면에 마이크로 패턴을 구현하는 기술에 대한 관심이 전 세계적으로 증가하고 있다^{1,2}. 마찰 표면에서 마이크로 딥플은 윤활제와 마모 부스러기(debris)를 저장하는 역할을 하기 때문에 접촉면의 마찰 성능 및 마모 저항성(wear resistance)을 향상시키는 것으로 알려져 있으며³, 엔진 실린더 표면에 마이크로 그루브(groove)는 연소효율(combustion efficiency) 및 실링(sealing) 효과를 증가시키는 것으로 확인되었다⁴. 또한 티타늄과 같은 생체

재료에서의 마이크로 패터닝은 소재의 부식 저항성(corrosion resistance) 및 피로 강도(fatigue strength)를 증가시킬 뿐 아니라, 세포의 성장(growth) 및 부착성(attachment)을 향상시키는 것으로 보고되었다⁵.

현재 이와 같은 마이크로 패턴을 구현하기 위하여 기계 가공(mechanical machining)⁶, 화학적 에칭(chemical etching)⁷, 레이저 표면 처리(laser surface treatment)⁸ 등 다양한 가공법이 적용되고 있으나, 이 중 효율성이나 제어성(controllability) 측면에서 장점을 가지고 있는 레이저 표면 처리 기법이 가장 널리 사용

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6333

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: hongseok@seoultech.ac.kr (Hong Seok Kim).

되고 있다⁹⁾. 레이저 텍스처링(laser texturing) 기술은 고에너지 레이저를 이용하여 소재를 직접 삭마(ablation)시켜 마이크로 패턴을 구현하는 것으로, 공정이 간편하기 때문에 레이저 표면 처리 기법 중 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 이 공정에서 소재는 높은 열에 노출되기 때문에 열 영향부(heat affected zone)와 마이크로 크랙이 생성되기 쉬어 표면의 균질성을 확보하기 어려운 단점을 가지고 있다. 근래에 관심이 높아지고 있는 레이저 쇼크 피닝(laser shock peening) 기술은 소재를 직접 제거 가공하지 않고 레이저 충격파에 의해 소재 표면에 기계적인 힘을 추가하는 공법으로 마이크로 패턴의 균질성을 확보하는데에는 유리하나, 패턴의 크기나 형상에 따라 레이저 빔을 변조해야 하는 번거로움이 존재한다. 또한, 한 번의 레이저 빔으로 하나의 마이크로 패턴을 가공하는 방식이기 때문에 공정의 효율성이 낮은 단점을 가지고 있다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 레이저 플라즈마(plasma)에 의하여 금속 박판 플라이어(flyer)를 고속으로 가속시키고, 이를 가공물에 충돌시켜 마이크로 딤플 어레이를 효율적으로 구현하는 공법을 제안하고자 한다. 레이저 유도 가속 플라이어를 이용한 가공법에 대한 연구는 기존의 몇몇 연구자들에 의하여 수행되었으나^{11,12)}, 아직 개발 초기 단계이기 때문에 공정에 대한 이해도가 높지 않고 주로 단일 마이크로 형상을 구현하는 데에만 초점을 맞추고 있다. 마이크로 딤플 어레이를 성공적으로 가공하기 위해서는 개별 딤플의 가공성 뿐 아니라 딤플들 간 균질성도 확보해야 하는 만큼 이와 관련된 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 레이저 가속 플라이어를 이용하여 총 25개의 원형 마이크로 딤플들을 동시에 엠보싱 가공하는 실험을 수행함으로써 마이크로 패턴에 있어 제안된 공법의 효율성을 확인하고자 하였다. 레이저 빔과 플라이어의 지름, 플라이어의 두께와 같은 공정변수가 마이크로 딤플 어레이의 가공성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 마이크로 딤플들의 가공 균질성을 확보하기 위한 공정 조건을 제안하고자 하였다.

2. 실험 방법

레이저 유도 가속 플라이어를 이용한 마이크로 딤플 어레이 가공 실험의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 10^9 W/cm^2 이상의 나노초 급 레이저가 시료 표면에 조사되면, 표면 온도가 순간적으로 기화점을 넘어서면서 시료 표면이 삭마된다. 삭마된 물질은 레이저 에너지를 흡수하면서 이온화 되고, 입자들 간의 충돌에 의해 고온, 고압의 플라즈마 상태가 된다. 이 플라즈마는 급격히 팽창해 나가면서 주변에 충격파를 발생시키게 된다. 이러한 원리에 따라 본 연구에서는 최대 2 J 에너지를 가지는 펄스폭

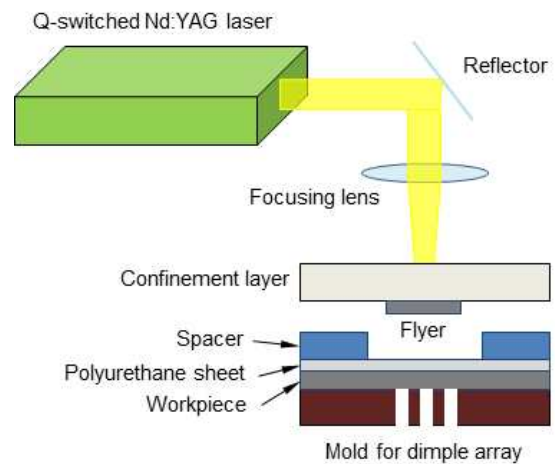


Fig. 1 Experimental set-up for microscale dimple array fabrication using laser accelerated flyer impact

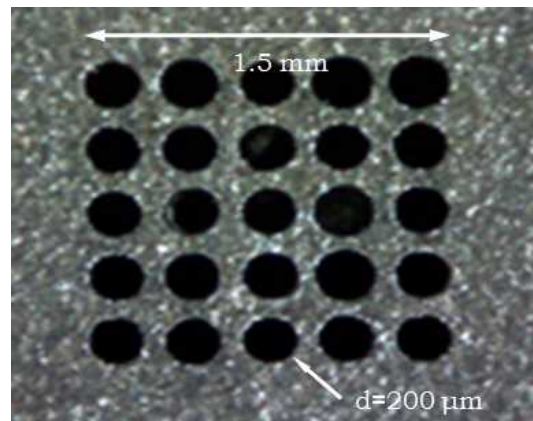


Fig. 2 5×5 dimple array mold

10 ns, 파장 1064 nm의 Q-switched Nd:YAG 레이저를 에너지 원으로 사용하였다. 발진된 빔이 반사경과 집속렌즈를 거쳐 플라이어에 도달하면, 플라이어의 표면이 순간적으로 삭마되면서 고온, 고압의 플라즈마가 발생하게 된다. 이 플라즈마는 급격히 팽창하면서 박판 플라이어를 가속시키게 되며, 가속된 플라이어는 가공물에 고속으로 충돌하여 소재를 몰드의 형상으로 엠보싱하게 된다.

Fig. 2에 5×5 딤플 어레이 가공을 위한 몰드의 형상을 나타내었다. 각 구멍의 지름은 200 μm 이고, 전체 몰드의 형상은 1.5 mm × 1.5 mm이다. 플라이어의 지름은 몰드의 형상보다 크게 설정하여 한 번의 충돌로 5×5 딤플 어레이를 동시에 가공하게 하였다. 이 공정에서는 플라이어가 수백 m/s의 높은 속도로 가속되어 가공물에 충돌하기 때문에 소재의 변형 속도가 매우 높아지게 된다. 따라서 성형성 향상 및 가공품질 개선과 같은 고속 가공의 특징을 본 공정을 통해 구현할 수 있게 된다. 플라이어는 다양한 두께와 지름을 가지도록 제작하여 플라이어의 속도 및 크기가 가공성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였고, 가공물은 50 μm 두께로 제작

하였다. 플라이어와 가공물의 재질은 모두 알루미늄이었다. 가공물과 플라이어 사이에는 스페이서를 삽입하여 플라이어가 가공물에 충돌하기 전 가속할 수 있는 공간을 확보하였고, 폴리우레탄 (polyurethane) 시트를 가공물 위 쪽에 설치하여 고온의 플라즈마가 가공물에 미치는 열 영향을 최소화 하였다. 플라이어는 유리로 이루어진 구속층(confinement layer) 밑에 접착되었고, 구속층은 몰드와 함께 단단히 고정되었다. 이는 플라이어 표면이 삭마되면서 발생한 플라즈마가 가공물 방향으로만 팽창하여 플라이어의 가속 효율을 높이기 위한 것이었다. 엠보싱 된 덤플 어레이의 형상은 전자현미경(HS-300U)을 통하여 관찰하였고, 덤플의 엠보싱 깊이는 삼차원 비접촉 형상측정 장비인 Nano 3D를 이용하여 측정하였다.

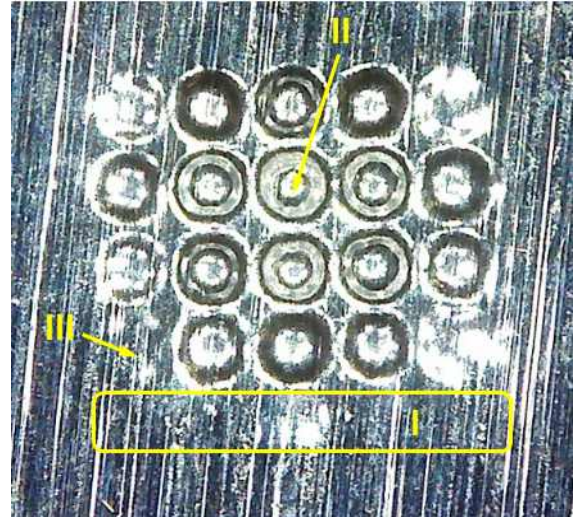
3. 실험 결과 및 고찰

Table 1에 나타난 것처럼 서로 다른 다섯 가지 실험조건에서 플라이어를 가속시켜 마이크로 덤플 어레이를 제작하였고, 플라이어의 가속 특성에 따른 가공성의 변화를 고찰하였다.

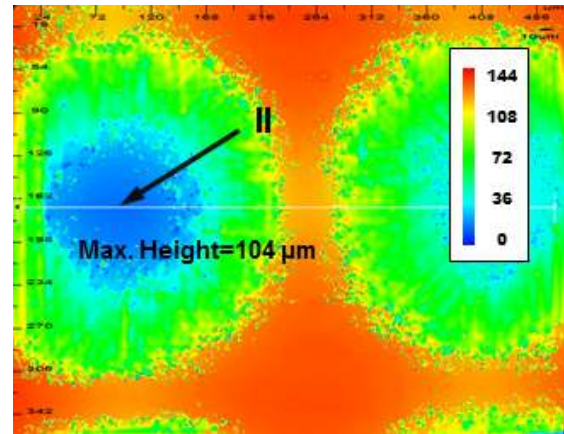
3.1 레이저 빔 크기의 영향

Fig. 3은 Case 1 조건에서 가공된 덤플 어레이의 형상을 나타내고 있다. 이 조건에서는 플라이어의 크기($d_f=3.5$ mm)가 5×5 덤플 어레이 몰드 형상의 크기($l=1.5$ mm)보다 두 배 이상 컸지만, 플라이어에 조사되는 레이저 빔의 크기($d_L=1.5$ mm)는 몰드 형상과 비슷하였다. Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 엠보싱 된 덤플 어레이는 매우 불균질한 특성을 나타내었다. 어레이 중앙 부분의 덤플들은 비교적 선명하게 엠보싱 되었으나, 영역 I의 5개의 덤플들은 엠보싱 된 형상을 육안으로 관찰할 수 없었다. 3차원 형상 측정기를 이용하여 엠보싱 깊이를 측정한 결과(Figs. 3(b) and 3(c)), 영역 II 덤플의 엠보싱 깊이가 $104 \mu\text{m}$ 로 가장 컸고, 영역 III 덤플의 엠보싱 깊이는 $10 \mu\text{m}$ 에 불과하였다. 이와 같은 가공의 불균질성은 가속된 플라이어가 가공물에 균일한 압력을 전달하지 못하는 데 원인이 있다. 플라이어의 크기가 덤플어레이 형상 보다 2배 이상 크지만,

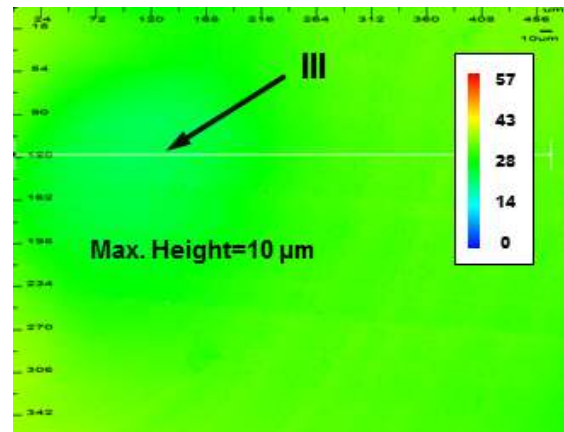
가공압력은 주로 레이저 빔이 조사되어 플라즈마가 발생하는 플라이어의 중앙부분에서 높게 발생하는 것으로 보인다. 따라서 레이저 빔의 크기는 덤플 어레이 몰드의 형상보다 다소 크게 설정하는 것



(a) Optical microscope image



(b) Embossing height in Region II



(c) Embossing height in Region III

Table 1 Experimental conditions for 5×5 dimple array fabrication

	Flyer diameter (mm)	Flyer thickness (μm)	Laser beam diameter (mm)
Case1	3.5	300	1.5
Case2	3.5	300	2
Case3	2.5	300	2
Case4	4.5	300	2
Case5	3.5	50	2

Fig. 3 Embossing feature and heights of 5×5 dimple array in Case 1 condition

이 바람직한 것으로 판단되었다.

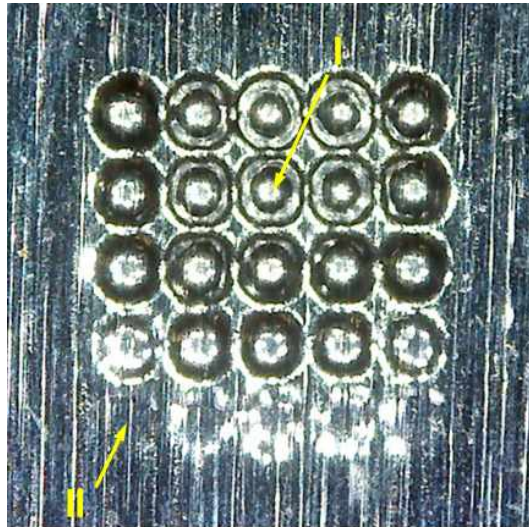
Case 2에서는 레이저 빔의 지름을 2 mm로 확대하여 몰드의 형상 보다 크게 설정한 후 실험을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 레이저 삭마에 의해 플라즈마가 발생하는 영역을 증가

시켰기 때문에 Case 1과 비교할 때 보다 균질한 가공 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4(a)에서 25개의 덩플이 모두 엠보싱 가공 된 것을 확인할 수 있다. 하지만 어레이 하단부의 엠보싱 깊이는 나머지 부분과 비교할 때 현저히 줄어드는 것으로 관찰되었다. 3차원 형상 측정기로 측정된 결과 Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 것처럼 영역 I 덩플의 엠보싱 깊이가 80 μm 로 가장 크고, 영역 II (Fig. 4(c)) 덩플은 엠보싱 깊이가 11 μm 로 가장 작았다. 레이저 빔 지름을 확대함으로써 덩플 어레이의 가공 균질성을 다소 향상시켰지만 여전히 엠보싱 깊이에서 큰 편차가 존재하는 것을 확인하였는데, 이는 플라이어와 몰드 사이의 정렬(alignment) 오차와 레이저 빔과 플라이어의 상대적인 크기가 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 특히 레이저 빔과 플라이어의 상대적인 크기는 레이저 플라즈마에 의해 발생한 압력이 플라이어 표면에 작용하는 분포에 영향을 미치게 되어 플라이어가 가공물에 충돌하기 전 형상을 변화시키기는 원인이 되기 때문에 이에 대한 효과를 확인할 필요가 있다.

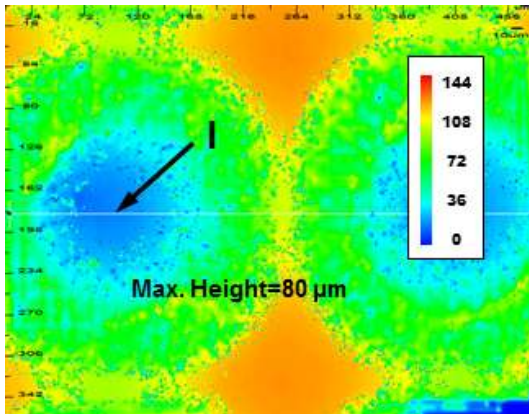
3.2 레이저 빔과 플라이어의 상대적 크기의 영향

플라이어와 레이저 빔의 상대적인 크기가 가공 성능에 미치는 영향을 Case 3과 Case 4 실험에서 확인하였다. Case 3의 경우 레이저 빔 지름 대 플라이어의 지름의 비율이 80%로 상대비율이 57%인 Case 2와 비교하였을 때 플라이어 표면에서 플라즈마가 발생하는 영역의 비율이 증가하게 된다. 따라서 플라이어가 비형 중 평면성을 유지하는데 도움이 되고 가공압력의 전달효율도 향상될 것으로 기대하였다. 또한 동일한 에너지 조건에서 플라이어의 크기가 감소하는 만큼 속도가 증가하기 때문에 높은 변형률 조건에서 소재를 가공하는 장점도 가지게 된다. Fig. 5에 덩플 어레이 엠보싱 결과를 나타내었는데 Fig. 5(a)에서와 같이 가공물의 중앙부분에서는 높은 가공압력에 의해 덩플들이 편칭 가공됨을 확인할 수 있었다. 하지만 덩플 어레이 모서리 부분은 여전히 엠보싱 깊이가 작아 덩플들 간 엠보싱 편차를 줄이는 데에는 실패하였다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 영역 I 덩플의 엠보싱 깊이는 12 μm 에 불과하였다. 즉 Case 3의 경우 Case 1이나 Case 2 보다 가공압력의 전달력은 향상한 것으로 보이나 가공 균질성 확보에는 한계가 있었다.

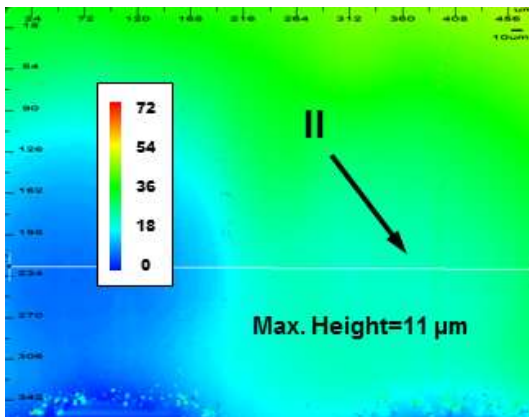
Case 4는 Case 2와 Case 3과 비교할 때 레이저 빔 지름 대 플라이어 지름의 상대적인 비율이 44%로 감소하는 경우로 플라이어의 평면성 유지나 충돌속도 측면에서 성능이 다소 감소하는 경우이다. 엠보싱 결과 Fig. 6(a)에 나타난 것처럼 25개의 덩플 중에서 일부분의 덩플들만 성공적으로 엠보싱 된 것을 확인할 수 있었다. 영역 I에서는 덩플들이 엠보싱 된 형상을 관찰할 수 없었고, 최대 엠보싱 깊이는 영역 II 덩플(Fig. 6(b))에서 나타난 95 μm 였다. 덩플들의 평균 엠보싱 깊이를 비교하였을 때에도 Case 2 및 Case 3에 비해 15 μm 이상 감소하는 것을 확인하였다. 즉



(a) Optical microscope image

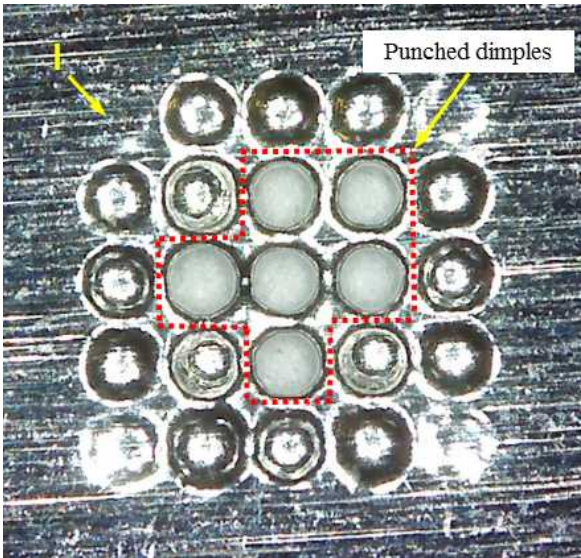


(b) Embossing height in Region I

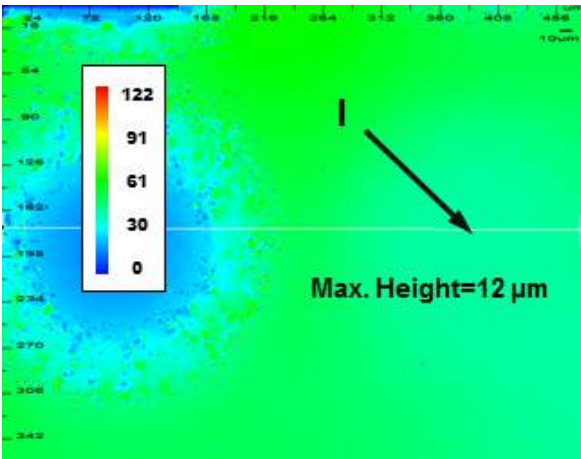


(c) Embossing height in Region II

Fig. 4 Embossing feature and heights of 5×5 dimple array in Case 2 condition



(a) Optical microscope image



(b) Embossing height in Region I

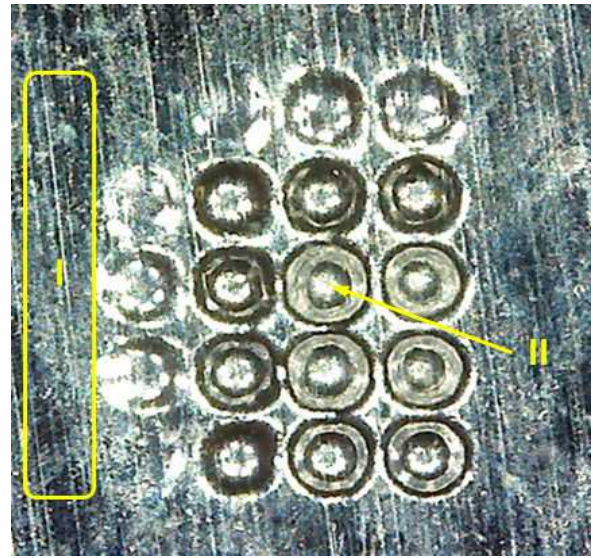
Fig. 5 Embossing feature and height of 5×5 dimple array in Case 3 condition

플라이어의 크기가 커지면 플라이어의 가속 성능이 감소하고, 플라이어 대 레이저 빔의 상대적인 크기가 증가하면 가공 압력의 전달 효율이 감소하기 때문에 뎀플 어레이 가공성이 저하되는 것으로 판단된다. 또한 이 조건에서는 뎀플 어레이의 가공 균질성 확보도 어려운 것으로 확인되었다.

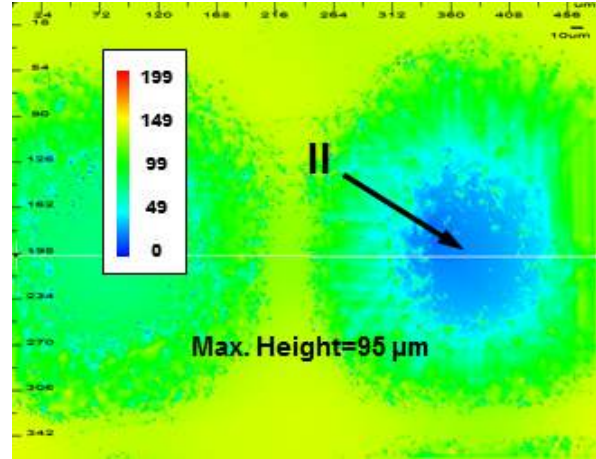
3.3 플라이어 두께에 의한 영향

앞 절의 Case 1~Case 4의 실험 결과를 종합해 보면 레이저 빔의 크기는 뎀플 어레이 몰드 형상보다 크게 설정할 필요가 있고, 레이저 빔 대 플라이어의 지름의 상대적 비율은 증가할수록 가공성이 향상되는 것으로 판단된다. 하지만 어느 조건에도 5×5 뎀플 어레이의 가공 균질성을 확보하기는 힘들었다.

플라이어의 지름이 작은 경우($d_f=2.5$ mm, Case 3)) 구멍이 펀칭



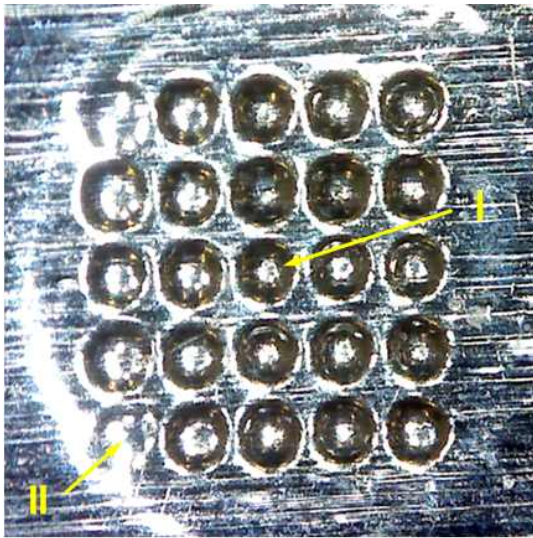
(a) Optical microscope image



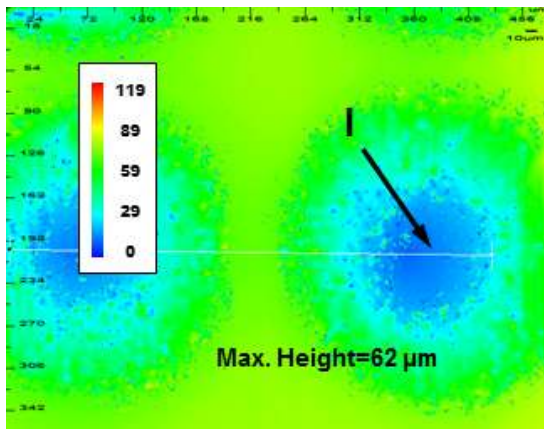
(b) Embossing height in Region II

Fig. 6 Embossing feature and height of 5×5 dimple array in Case 4 condition

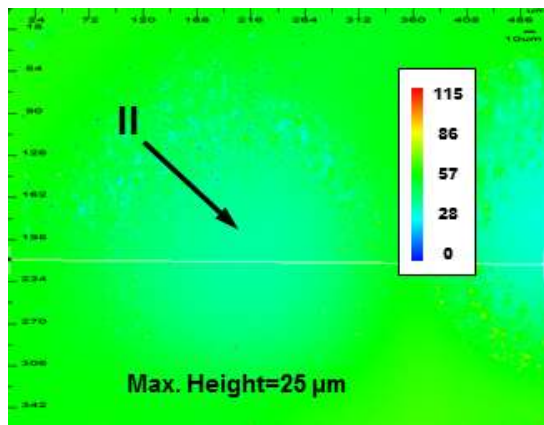
가공되기 때문에 플라이어의 지름은 3.5 mm, 레이저 빔 지름을 2 mm로 고정하고 플라이어의 두께를 50 μm로 감소시켜 엠보싱 실험을 진행하였다(Case 5). 이 조건에서는 플라이어의 질량이 다른 경우에 비해 1/6로 감소하기 때문에 동일 에너지 조건에서 2.5 배 이상의 속도 증가 효과가 있다. Fig. 7에 엠보싱 결과를 나타내었는데 5×5 어레이의 모든 뎀플들이 엠보싱 되었고, 이전 경우들과 비교하였을 때 가공 균질성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 3차원 형상 측정기를 이용하여 뎀플의 엠보싱 깊이를 측정한 결과 최대 깊이는 62 μm로 영역 I 뎀플에서 관찰되었다. 모서리 부분 뎀플의 경우 엠보싱 깊이가 다소 작았는데 영역 II 뎀플은 엠보싱 깊이가 25 μm 였다. 25개 뎀플들의 평균 엠보싱 깊이는 52 μm, 표준편차는 11 μm로 본 연구의 실험 조건에서는 가장 우수한 가공 균질성을 얻을 수 있었다.



(a) Optical microscope image



(b) Embossing height in Region I



(c) Embossing height in Region II

Fig. 7 Embossing feature and heights of 5×5 dimple array in Case 5 condition

이와 같은 결과는 플라이어가 두께가 얇을수록 가공물과 충돌시 변형이 쉽게 일어나는 것에서 원인을 찾을 수 있다. 플라이어 두께가 얇은 경우 레이저 에너지의 일부가 플라이어의 변형에너지로

소모되기 때문에 가공성(딤플의 최대 및 평균 엠보싱 깊이) 측면에서는 다소 성능이 저하됨을 관찰할 수 있었다. 하지만 플라이어의 변형에 의해서 가공물과의 접촉이 향상되고 각각의 딤플들로 전달되는 가공압력의 전달효율이 증가하게 되기 때문에 딤플 어레이의 가공균질성을 확보하는 데에는 도움이 되는 것으로 판단된다.

하지만 여전히 딤플들 간 엠보싱 깊이에서 일정한 편차가 존재하는 만큼 향후 딤플 어레이의 가공성을 증가시키면서 동시에 딤플들 간 편차를 줄여 균질성을 확보하는 방안을 마련하는 것이 필요하다. 레이저 빔 프로파일과 플라이어의 재질 및 구조, 비행거리 등이 본 공정의 성능에 영향이 큰 변수들로 파악되기 때문에, 향후 이를 포함한 다양한 인자들의 영향 및 상호관계 분석을 통해 최적화된 공정을 설계하는 추가 연구를 진행할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 플라즈마에 의하여 가속된 플라이어를 가공물에 충돌시켜 마이크로 딤플 어레이를 효과적으로 가공하는 실험을 수행하였으며, 레이저 빔 크기, 레이저 빔과 플라이어의 상대적인 크기, 플라이어의 두께가 엠보싱 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 레이저 빔의 크기는 딤플 어레이 몰드 형상의 크기보다 작은 경우 가공 성능이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 레이저 빔과 플라이어의 상대적인 크기 변화는 플라이어 비행거리가 짧은 현재 실험조건에서 딤플 어레이의 가공균질성에 미치는 영향이 제한적이었다. 플라이어의 두께를 감소시켜 속도를 증가시키는 것이 가공균질성 확보에 가장 효과적이었는데 이는 얇은 플라이어의 경우 플라이어의 국부적 변형이 보다 용이하기 때문에 가공물에 전달되는 압력의 전달 효율이 향상되기 때문인 것으로 판단된다. 향후 레이저 빔 프로파일과 플라이어의 재질, 비행거리 등을 고려한 추가적인 실험을 통해 딤플 어레이의 가공성과 균질성을 동시에 확보하기 위한 최적의 공정조건을 도출할 예정이다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Sim, J. W., Choi, D. C., Shin, K. H., Kim, H. S., 2015, Characterization of Microscale Drilling Process for Functionally Graded M2-Cu

- Material Using Design of Experiments, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 24:5 502-507.
- [2] Kim, H. S., 2015, A Quantitative Study of the Tribological Size Effect in Microforming With a Multi-Region FEA Model, *Tribology International*, 90 104-112.
- [3] Ye, Y. X., Xuan, T., Lian, Z. C., Hua, X. J., Fu, Y. H., 2015, Fabricating Micro Embossments on the Metal Surface Through Spatially Modulating Laser-Induced Shock Wave, *Applied Surface Science*, 357 678-688.
- [4] Etsion, I., Sher, E., 2015, Improving Fuel Efficiency With Laser Surface Textured Piston Rings, *Tribology International*, 42 542-547.
- [5] Shen, N., Ding, H., Bowers, R., Yu, Y., Pence, C. N., Ozbolat, I. T., Stanford, C. M., 2015, Surface Micropatterning of Pure Titanium for Biomedical Applications via High Energy Pulse Laser Peening, *Journal of Micro- and Nano-Manufacturing*, 3 011005-1-8.
- [6] Friedrich, C. R., 2002, Micromechanical Machining of High Aspect Ratio Prototypes, *Microsystem Technologies*, 8 343-347.
- [7] Wang, X., Kato, K., 2003, Improving the Anti-Seizure Ability of SiC Seal in Water With RIE Texturing, *Tribology Letter*, 14 275-280.
- [8] Etsion, I., Kligerman, Y., Halperin, G., 1999, Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces, *Tribology Transactions*, 42 511-516.
- [9] Dai, F. Z., Wen, D. P., Zhang, Y. K., Ren, X. D., Zhou, J. Z., 2015, Micro-Dimple Array Fabricated on Surface of Ti6Al4V With a Masked Laser Ablation Method in Air and Water, *Materials & Design*, 84 178-184.
- [10] Zheng, L., Zhang, C., Zhang, C., Dai, F., 2017, Performance of Micro-Dent Array Fabricated by Laser Shock Peening on the Surface of A304 Stainless Steel, *Vacuum*, 138 93-100.
- [11] Liu, H. X., Shen, Z. B., Wang, X., Wang, H. J., Tao, M. K., 2010, Numerical Simulation and Experimentation of a Novel Micro Scale Laser High Speed Punching, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, 50 491-494.
- [12] Wang, X., Yuan, Y., Shen, Z., Gu, C., Zhang, Q., Liu, H., 2014, Investigation of the Forming Pressure and Formability of Metal Foil by Laser-Driven Multi-Layered Flyer, *Opt. Laser Technol.*, 58 151-160.