

고온 임프린팅을 통한 알루미늄합금 표면의 마이크로/나노 구조 성형 기술

문인용¹ · 이호원¹ · 오영석¹ · 김세종¹ · 김지훈² · 강성훈^{1,*}

Hot Imprinted Hierarchical Micro/Nano Structures on Aluminum Alloy Surfaces

I. Y. Moon, H. W. Lee, Y. S. Oh, S. J. Kim, J. H. Kim, S. H. Kang

(Received April 1, 2019 / Revised September 4, 2019 / Accepted September 17, 2019)

Abstract

Various surface texturing techniques have been studied because of the effective applicability of micro or nano scale surface patterns. Particularly, the most promising types of patterns include the hierarchical patterns, which consists of micro/nano structures. Different processes such as MEMS, laser machining, micro cutting and micro grinding have been applied in the production of hierarchical patterns on various material surfaces. This study demonstrates the process of hot imprinting to induce the hierarchical patterns on the Al alloy surfaces. Wire electrical discharge machining (WEDM) process was used to imprint molds with micro scale sinusoidal pattern. In addition, the sinusoidal pattern with rough surface morphology was obtained as a result of the discharge craters. Consequently, the hierarchical patterns consisting of the sinusoidal pattern and the discharge craters were prepared on the imprinting mold surface. Hot imprinting process for the Al plates was conducted on the prepared mold, and the replication performance was analyzed. As a result, it was confirmed that the hierarchical patterns of the mold were effectively duplicated on the surface of Al plate.

Key Words: Hot imprinting, Hierarchical patterns, Electrical discharge machining, Discharge crater, Micro/Nano structures

1. 서 론

표면 텍스처링 기술은 표면의 발수성 조절, 소성 가공 시 마찰 저감 그리고 재료 표면의 미적 향상을 위한 방법으로 다양하게 활용되고 있다[1-3]. 특히, 다양한 표면 텍스처링 기술 중 방전면 (electrical discharge textured surface, EDT surface)을 이용한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다[4,5]. 방전가공 (electrical discharge machining, EDM)을 통해 재료의 표면을 가공하게 되면 가공 중 발생하는 스파크에

의해 재료의 표면이 짧은 시간 동안 국부적으로 액화되었다가 응고되어 수많은 방전흔 (discharge crater)이 형성되게 된다. 이렇게 형성된 면은 거친 표면을 갖는다는 특징이 있다[6,7].

금속 판재 성형 시 금형 및 소재의 거친 표면은 그들 사이의 접촉 면적을 줄여주고 틈새에 윤활유가 유지될 수 있게 하는 특징이 있다. 이러한 특성을 이용하기 위해 방전면을 판재에 적용하여 성형성을 향상시키는 연구가 수행된 바 있다[4]. 또한 금속 표면을 방전가공으로 가공하여 발수성을 증대시킨 사례도 대표적인 방전면의 활용 방법이라 할 수 있다[8]. 하지만 방전가공은 전도성이 있는 금속에 대해서만 적용 가능하다는 제한을 갖고 있다. 이를

1. 재료연구소 가상재료공정연구소

2. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author : Department for Virtual Materials Processing,
Korea Institute of Materials Science, E-mail: kangsh@kims.re.kr, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-5814-2154>

극복하기 위해 최근 방전면을 갖는 패턴 금형을 이용한 임프린팅 공정을 통하여 폴리머 표면에 방전면을 복제하는 연구가 수행되었다[9,10]. 특히, 임프린팅이라는 공정을 통해 표면 텍스처링을 수행하였기 때문에 기존 방전가공을 통해 방전면을 제작하는 것과 비교하였을 때 공정의 생산성 및 생산단가 측면에서 상당한 장점을 보였다.

이러한 임프린팅 공정의 장점을 금속 표면에 대한 텍스처링 공정에 적용하기 위해 본 연구에서는 고온 임프린팅 공정을 적용한 알루미늄 합금 표면의 다중스케일 패턴 복제 기술을 개발하고자 하였다. 와이어 방전가공 (WEDM)을 이용하여 정현파 패턴과 방전흔으로 이루어져있는 계층적 패턴 (hierarchical patterns)을 금형 표면에 가공하였으며, 이를 고온 임프린팅 공정에 사용하여 알루미늄 합금 표면을 성형하였을 때의 정현파 패턴 및 방전면의 거친 표면이 얼마나 효과적으로 복제되는지를 분석하였다. 또한 임프린팅 금형을 반복적으로 사용하였을 때 방전면의 변형 정도를 분석하였으며, 이를 통하여 임프린팅 금형의 반복 사용 가능성을 고찰하였다. 그 결과 반복적 사용에 따라 임프린팅 금형 표면의 방전면 거칠기는 점차 감소하지만, 임프린팅 된 알루미늄 합금 표면의 거칠기의 경우 금형의 거칠기 감소에 비하여 감소량이 적음을 확인하였다. 그 결과, 고온 임프린팅 공정을 통한 금속 표면에의 마이크로/나노 구조의 계층적 패턴 성형 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 임프린팅 공정

Fig. 1은 고온 임프린팅 공정에 대한 개략도를 보여주고 있다. 폭 10 mm의 채널이 파져 있는 하부 금형에 알루미늄 시편을 넣은 뒤 임프린팅 금형을 이용하여 소재를 가압하는 방식으로 시스템을 구성하였다. 금형 및 시편은 할로겐 램프 내부에 위치시킨 뒤 450° C로 가열한 뒤 성형을 수행하였다. 시편을 충분히 가열하기 위해 승온 시간 10초, 유지 시간 10분으로 설정하여 가열을 수행하였다. 할로겐 램프 내부 온도는 열전도계를 이용하여 가열과 동시에 정밀하게 측정되도록 장치를 구성하였다. 성형시 임프린팅 금형의 하강 속도는 1 mm/min으로 설정하였으며 윤활유는 사용하지 않았다.

AISI H13 금형강을 사용하여 임프린팅 금형 및 하부 금형을 제작하였으며, 임프린팅 금형의 패턴은 와이어 방전가공을 통하여 제작하였다. 와이어 방전가공에서 와이어의 이송 경로를 조절하여 다양한 진폭을 갖는 정현파 패턴을 표면에 제작하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 정현파 패턴의 표면을 확대해보면 수많은 방전흔으로 이루어진 거친 표면이 존재함을 알 수 있다. 따라서 이렇게 제작된 임프린팅 금형은 마이크로 스케일의 정현파 패턴과 나노 스케일의 방전흔 패턴으로 이루어진 계층적 패턴을 갖고 있음을 확인 할 수 있다.

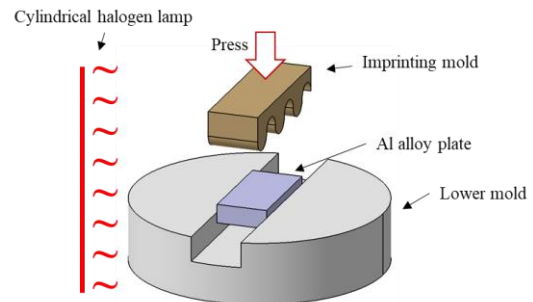


Fig. 1 Schematic of hot imprinting process

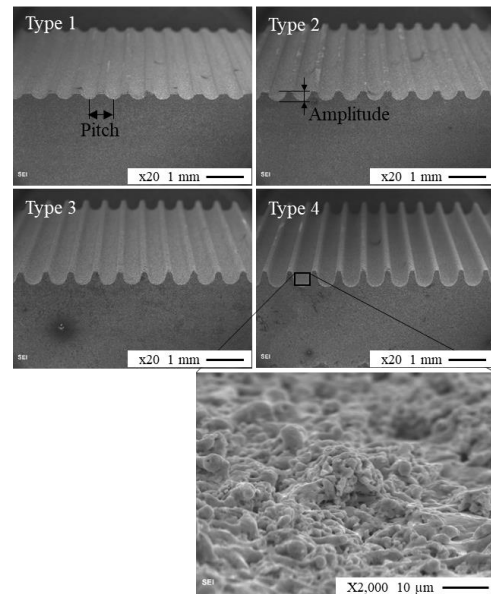


Fig. 2 SEM images depicting the imprinting molds with micro/nano hierarchical patterns (pitch: 640 μm , amplitude: 147 μm , 246 μm , 329 μm and 435 μm for type 1, 2, 3 and 4, respectively)

2.1 재료 및 평가 방법

시편으로는 알루미늄합금 Al6061을 사용하였다. 두께 4 mm의 판재 형태의 재료를 구매 후 실험에 사용하기 위해 10 mm × 10 mm로 절단하였다.

임프린팅 금형 및 성형된 알루미늄 표면을 분석하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM, JEOL Co.)을 사용하였다. 이와 더불어 금형 및 소재의 표면 거칠기를 정밀하게 분석하기 위해 비접촉식 3차원 표면 측정기 (non-contact 3D profiler, Nano System Co.)를 활용하였으며, 이 결과를 이용하여 임프린팅 금형의 변형 정도를 분석하였다.

금형의 정현파 패턴이 시편에 복제되었을 때 금형과 시편 간의 정현파 진폭 차이를 확인하기 위해 단면 분석을 실시하였으며, 이를 위해 레진을 이용하여 시편을 마운팅 한 뒤 사포로 연마한 후 분석을 수행하였다.

3. 결과 분석

3.1 임프린팅 결과

준비된 고온 임프린팅 장치를 사용하여 성형을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 금형의 정현파 패턴 형태가 알루미늄 시편에 효과적으로 복제 되었음을 확인 할 수 있다. 또한 확대한 표면 이미지에서 금형의 방전흔이 복제된 거친 표면을 확인할 수 있다. 따라서 정현파 패턴과 방전흔으로 구성된 계층적 패턴이 성공적으로 알루미늄 시편에 복제되었음을 알 수 있다.

금형의 정현파 진폭과 임프린팅된 알루미늄 시편의 진폭 차이를 비교하기 위해 Fig. 4와 같이 단면 분석을 실시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 임프린팅된 알루미늄 시편의 모든 타입 패턴형상에서 금형 대비 높은 값을 갖는 진폭이 관찰되었다. 이는 임프린팅 공정에서 금형이 알루미늄 시편을 가압한 뒤 금형과 시편을 분리하는 과정에서 상호간의 높은 접착력에 의해 발생된 인장력이 시편의 정상부 (peak)에 가해져 정현파 패턴이 진폭방향으로 늘어났을 것이라 판단된다. 이러한 높은 접착력은 성형 시 방전흔 틈새로 소재가 끼어 들어가기 때문에 발생된다.

금형과 시편 사이의 방전면 복제율을 정량적으로

분석하기 위해 표면의 거칠기를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그림과 같이 금형 및 시편 표면 모두 거친 표면을 갖고 있음을 알 수 있다. 측정 데이터를 바탕으로 표면 거칠기 값을 Table 1에 비교하여 나타내었다. 임프린팅 금형의 경우, 전체적으로 정상부의 거칠기가 계곡부 (valley)의 거칠기에 비하여 높음을 알 수 있다. 이에 따라 임프린팅 된 시편의 경우 금형의 정상부로부터 복제된 계곡부가, 계곡부로부터 복제된 정상부에 비해 높은 거칠기를 보임을 알 수 있다. 복제율의 경우 Ra기준 최소 0.59에서 최대 0.84의 수준으로 복제가 이루어 졌음을 알 수 있다. 이는 임프린팅 시 소재의 탄성 회복과 고온 성형 시 발생하는 열팽창과 축소에 의해 1보다 낮은 복제율을 갖는 것이라 판단된다. 따라서, 향후 복제율을 더욱 높일 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다는 것을 알 수 있다.

3.2 금형 변형에 따른 영향 분석

임프린팅 금형의 반복적 사용에 의한 방전면의 변형 영향을 분석하기 위해 하나의 금형을 이용하-

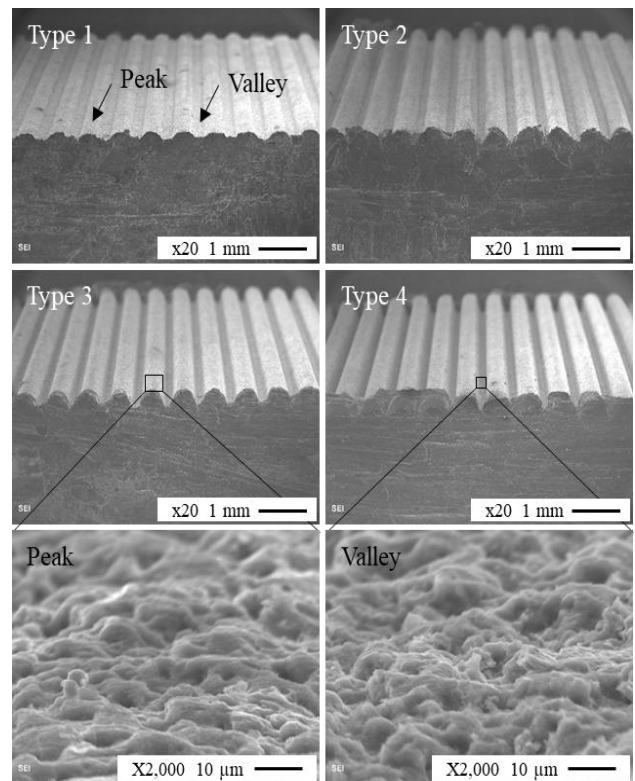


Fig. 3 SEM images depicting the imprinted Al plates

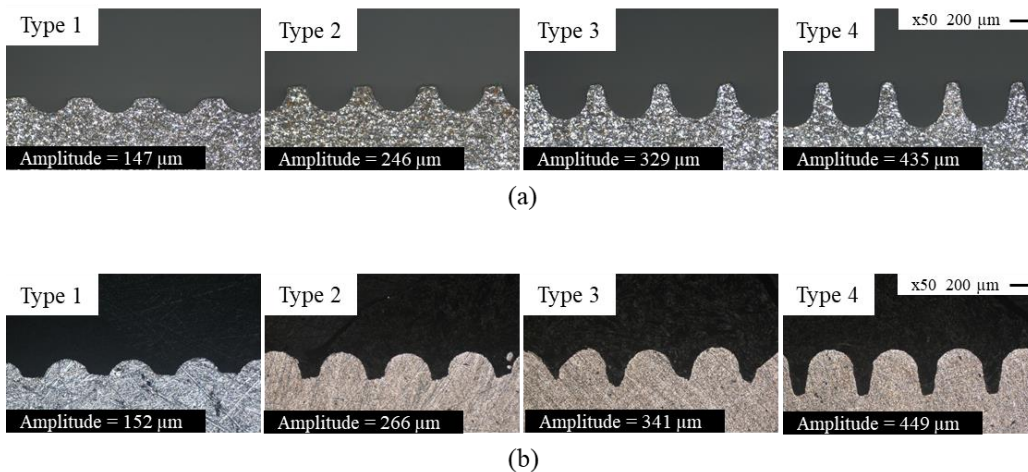


Fig. 4 Optical microscopy images showing cross sections of (a) imprinting molds and (b) imprinted Al plates

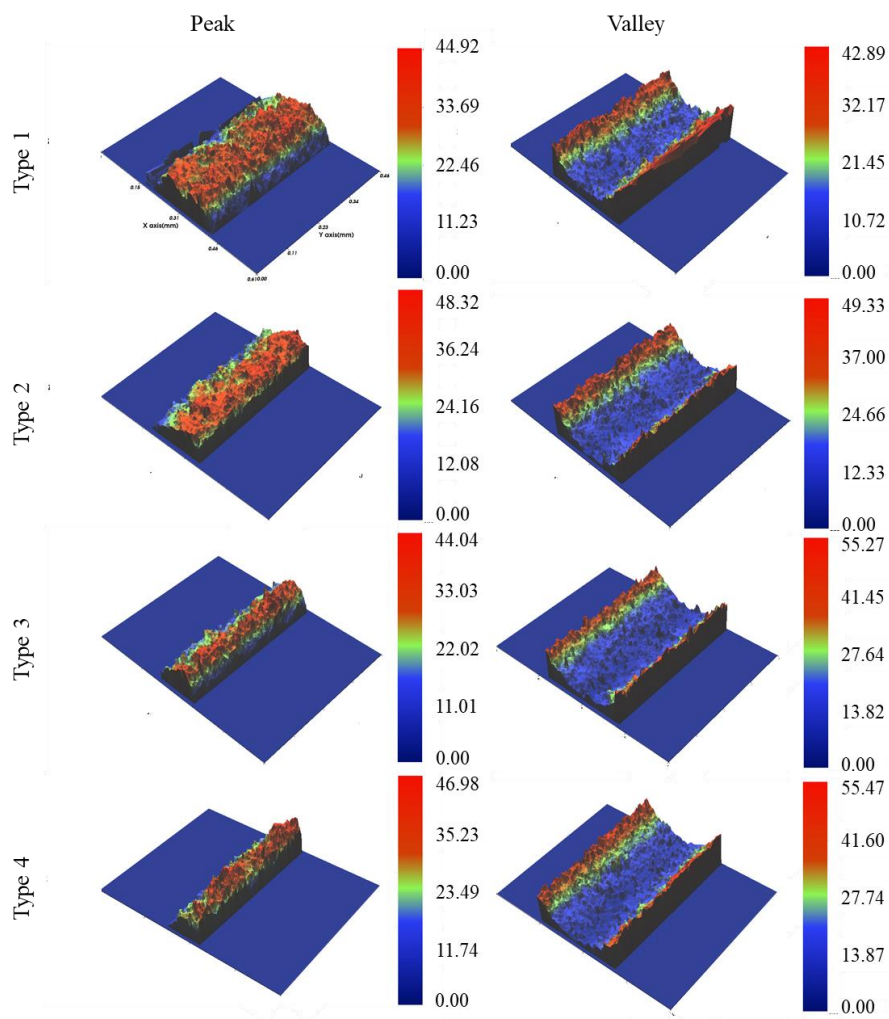


Fig. 5 Surface images of imprinting molds

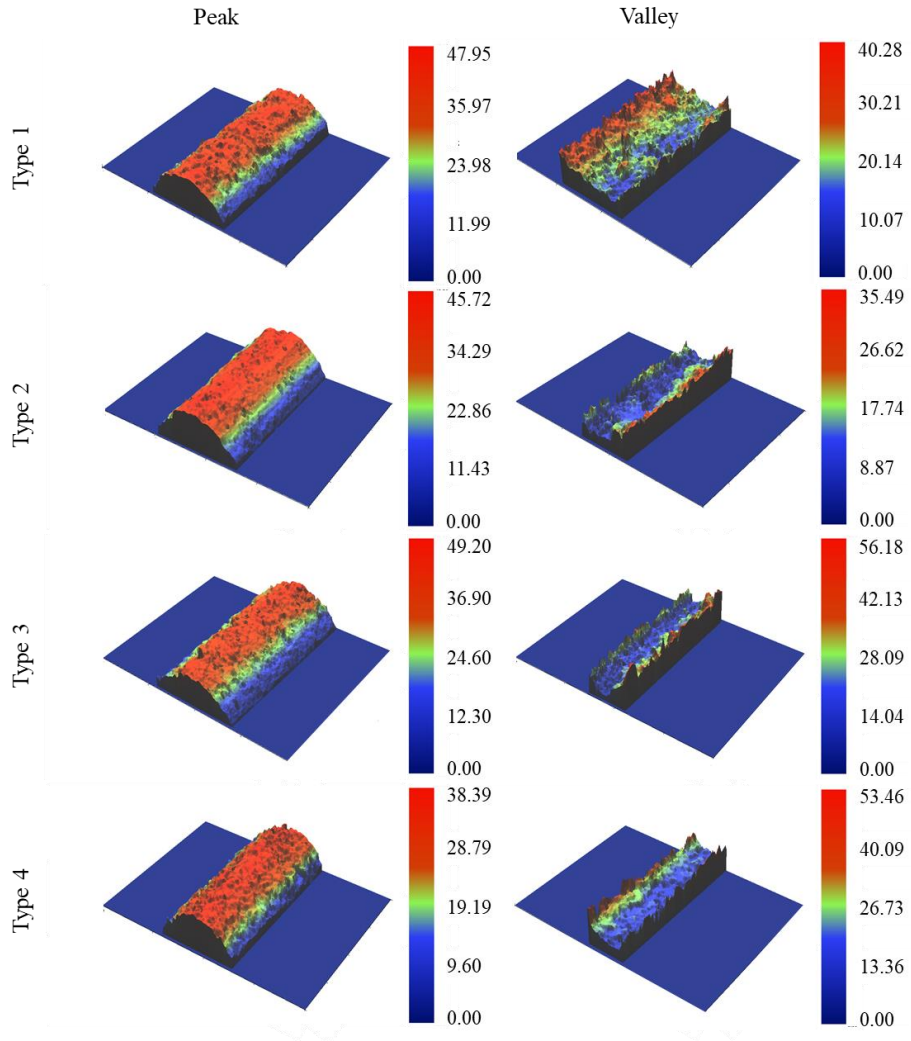


Fig. 6 Surface images of imprinted Al plates

Table 1 Comparison of measured surface roughness data

Pattern type	Imprinting mold		Imprinted Al plate		Replication rate	
	Peak	Valley	Peak	Valley	From peak to valley	From valley to peak
Type 1	Ra 3.01 μm (Rz 10.1 μm)	Ra 2.39 μm (Rz 8.44 μm)	Ra 1.67 μm (Rz 6.11 μm)	Ra 2.18 μm (Rz 7.81 μm)	0.72 (0.84)	0.70 (0.72)
Type 2	Ra 3.00 μm (Rz 10.54 μm)	Ra 1.94 μm (Rz 7.71 μm)	Ra 1.15 μm (Rz 4.05 μm)	Ra 2.53 μm (Rz 7.98 μm)	0.84 (0.76)	0.59 (0.53)
Type 3	Ra 2.90 μm (Rz 9.27 μm)	Ra 2.27 μm (Rz 8.35 μm)	Ra 1.71 μm (Rz 6.14 μm)	Ra 2.26 μm (Rz 8.29 μm)	0.78 (0.89)	0.75 (0.74)
Type 4	Ra 3.09 μm (Rz 10.39 μm)	Ra 2.36 μm (Rz 9.10 μm)	Ra 1.40 μm (Rz 5.26 μm)	Ra 2.08 μm (Rz 7.44 μm)	0.67 (0.72)	0.59 (0.58)

여 수차례 고온 임프린팅을 수행하는 실험을 실시하였다. Type 4 임프린팅 금형을 사용하여 실험을 진행하였으며, 총 7차례의 임프린팅을 수행한 뒤 반복 횟수에 따른 표면 거칠기의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 7차례의 임프린팅 공정에 사용된 금형의 방전면이 사용 전의 방전면에 비하여 거칠기 수준이 저감되는 양상을 보인다. 특히 정상부의 경우 계곡부 보다 더 큰 폭으로 거칠기가 감소되는데, 이는 임프린팅시 더 많은 하중이 금형의 정상부에 집중되기 때문이라 판단된다. 이에 따라 정상부는 사용 전 Ra 3.3 μm 에서 사용 후 Ra 1.9 μm 로, 계곡부는 사용 전 Ra 2.4 μm 에서 사용 후 Ra 1.8 μm 로 저감되는 결과를 확인할 수 있었다.

임프린팅 금형의 거칠기 감소에 따른 알루미늄 시편의 거칠기 영향을 알아보기 위해 금형 반복 사용에 따른 알루미늄 시편 표면의 거칠기 변화를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 금형이 반복적으로 사용됨에 따라 알루미늄 표면의 거칠기 또한 감소하는 경향을 보이나, 금형의 거칠기 감소 정도에 비하여 시편 거칠기 감소 변화는 크지 않았다. 금형의 경우 사용 전, 후의 정상부의 거칠기 차이는 Ra 1.4 μm (사용 전: Ra 3.3 μm , 사용 후: Ra 1.9 μm)인 것에 비해 금형의 정상부로부터 복제되는 알루미늄 시편의 계곡부 거칠기 변화는 Ra 0.4 μm (첫번째 시편: Ra 2.1 μm , 7번째 시편 Ra: 1.7 μm)로 작은 차이를 보였으며, 금형의 계곡부의 감소량이 Ra 0.6 μm (사용 전: Ra 2.4 μm , 사용 후: Ra 1.8 μm)인 것에 비해 알루미늄의 정상부의 감소량은 Ra 0.1 μm (첫번째 시편: Ra 1.5 μm , 7번째 시편 Ra: 1.4 μm)로 거칠기의 변화가 미미하였다.

Fig. 9는 금형 반복 사용에 따른 금형 및 알루미늄 시편의 표면을 보여주고있다. Fig. 9a에서 볼 수 있듯이 사용 전의 금형 방전면에 존재하는 보조적 방전흔 (secondary discharge crater) 들이 사용 후에는 모두 짓눌려진 형태로 변형되었음을 알 수 있다. 알루미늄 시편의 경우, 첫번째 시편과 일곱 번째 시편의 표면 차이가 두드러지게 나타나지 않는데 이는 Fig. 8의 표면 거칠기 측정 결과와 일치한다. 따라서 금형의 보조적 방전흔은 첫번째 임프린팅 공정에서 대부분 변형되며 그 후에는 주 방전흔 (primary discharge crater)을 중심으로 표면 패터닝이 수행됨을 알 수 있다. 또한 주 방전흔의 경우 임프린팅의 반복 사용에 의한 변형이 적음을 알 수 있다.

대량생산에의 적용가능성을 논하기 위해서는 이보다 더 많은 횟수의 테스트가 수행 되어야 할 필요는 있다. 하지만 7차례의 반복 사용 테스트를 통해서 금형에 비해 시편의 거칠기 변화가 미미하다는 것을 알 수 있었으며 이에 따라 직접적인 방전가공을 통해 방전면을 얻는 것뿐만 아니라 고온 임프린팅을 통해 방전면을 복제하고 이를 유용하게 사용할 수 있다는 가능성을 확인 할 수 있었다.

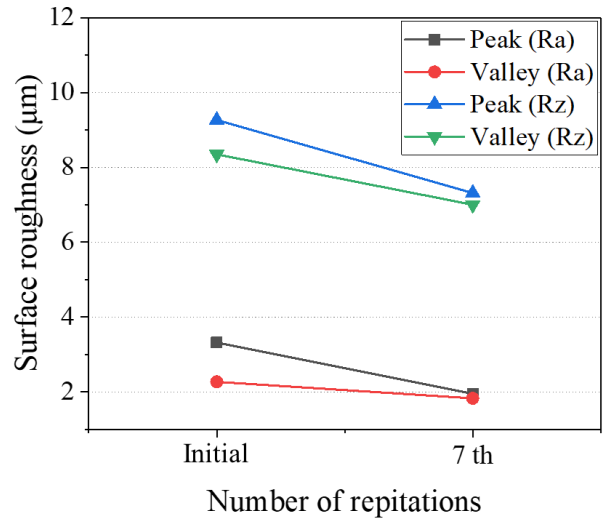


Fig. 7 Change in surface roughness of imprinting mold after 7 times pressing

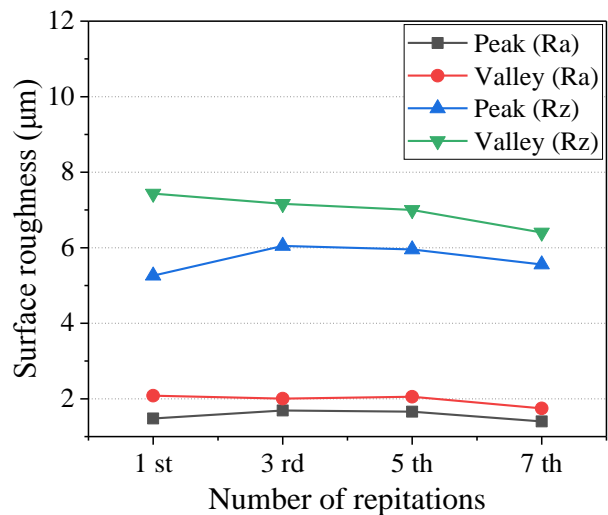
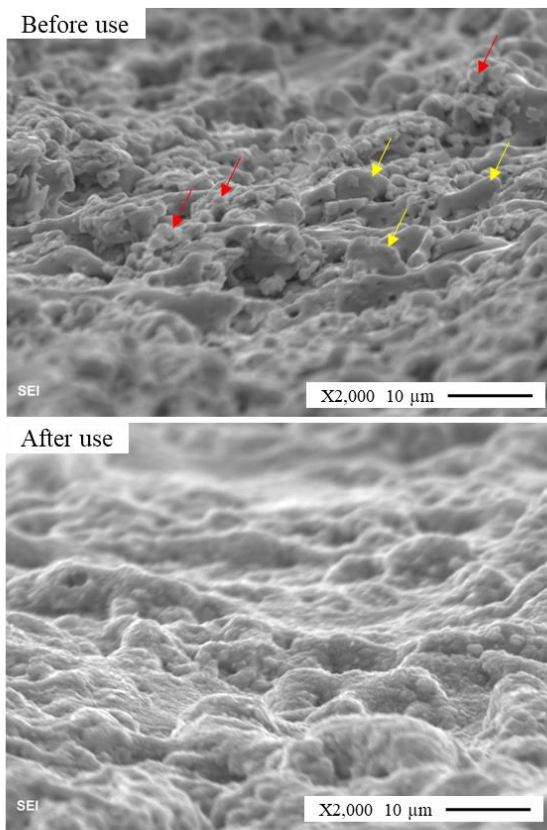
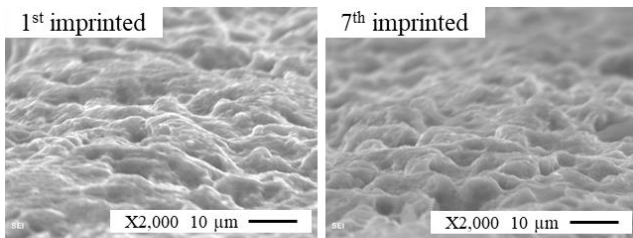


Fig. 8 Surface roughness variation of Al plates according to the number of repetitions



(a)



(b)

Fig. 9 SEM images depicting (a) the valley of imprinting molds before and after use, (b) the peak of imprinted Al plates according to number of repetitions (yellow and red arrows indicate the primary and secondary discharge craters, respectively)

4. 결론

본 논문에서는 정현파와 방전면으로 이루어진 마이크로/나노 패턴을 고온 임프린팅을 통하여 금속 표면에 복제하는 공정에 대해 연구하였다. 와이어 방전가공을 통하여 금형 표면에 계층적 패턴을 제작

하였으며 이를 임프린팅의 금형으로 사용하였다. 임프린팅 공정을 수행한 후 정현파의 진폭 변화를 분석한 결과, 금형의 진폭에 비해 알루미늄 시편의 진폭이 미미하게 증가됨을 확인하였다. 방전면의 복제의 경우 표면 거칠기를 측정하여 복제 효율을 분석하였다. 그 결과 금형 표면의 거칠기 대비 시편의 표면 거칠기가 약 0.59에서 0.84정도의 복제율을 보임을 알 수 있었다. 더 나아가 금형의 반복적 사용에 따른 변형 영향을 분석하기 위해 반복 횟수에 따른 금형 및 시편의 표면 거칠기 변화를 측정하였으며, 그 결과 금형의 변형에 비해 시편의 거칠기 변화는 미미하게 발생됨을 확인하였다. 이에 따라 향후 금속 소재를 이용한 마이크로/나노 구조의 계층적 표면 텍스처링 기술에 본 연구에서 개발된 고온 임프린팅 공정이 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 재료연구소 주요사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] B. Park, W. Hwang, 2018, Fabrication of Superhydrophobic Surface on Various Metals using Abrasive Blasting and Self-Assembled Monolayer Coating, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 35, No. 2, pp. 197~201.
- [2] C. Lee, J. Kim, 2014, Surface Modification Method of Stainless Steel using Electrochemical Etching, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 4, pp. 353~358.
- [3] Z. Lian, J. Xu, P. Yu, Z. Yu, Z. Wang, H. Yu, 2019, Oil-Repellent and Corrosion Resistance Properties of Superhydrophobic and Superoleophobic Aluminum Alloy Surfaces Based on Nanosecond Laser-Textured Treatment, Met. Mater. Int., <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00382-4>.
- [4] R. Zhou, J. Cao, Q. J. Wang, F. Meng, K. Zimowski, Z. C. Xia, 2011, Effect of EDT Surface Texturing on Tribological Behavior of Aluminum Sheet, J. Mat. Process. Technol., Vol. 211, No. 10, pp. 1643~1649.
- [5] W. G. Bae, D. Kim, K. Y. Song, H. E. Jeong, C. N. Chu,

- 2015, Engineering Stainless Steel Surface via Wire Electrical Discharge Machining for Controlling the Wettability, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 275, pp. 316~323.
- [6] I. Y. Moon, B. H. Kim, 2013, Micro Machining of Titanium Alloy Using Polycrystalline Diamond Tools, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 3, pp. 284~291.
- [7] T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, N. Kinoshita, 1985, Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, *CIRP Annals*, Vol. 34, No. 1, pp. 431~434.
- [8] W. G. Bae, K. Y. Song, Y. Rahmawan, C. N. Chu, D. Kim, D. K. Chung, K. Y. Suh, 2012, One-Step Process for Superhydrophobic Metallic Surfaces by Wire Electrical Discharge Machining, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 4, No. 7, pp. 3685~3691.
- [9] I. Y. Moon, H. W. Lee, Y. S. Oh, S. J. Kim, S. H. Kang, 2019, Characterization of microfibril development on PTFE surface during hot imprinting process and its application for oil-water separation, *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 102, No. 5~8, pp.1871~1883.
- [10] I. Y. Moon, B. H. Kim, H. W. Lee, Y. S. Oh, J. H. Kim, S. H. Kang, 2019, Superhydrophobic Polymer Surface with Hierarchical Patterns Fabricated in Hot Imprinting Process, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-GTechnology*, <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00094-5>.