

비정질 합금의 마이크로 패턴 레이저 가공

김한*[#], 박종욱**

*동양미래대학교 기계공학과, **동양미래대학교 기계설계공학과

Micro-pattern Fabrication of Amorphous Alloy by Laser Beam Machining

Haan Kim*[#], Jong Wuk Park**

*Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, **Department of Mechanical Design Engineering, Dongyang Mirae University

(Received 13 January 2022; received in revised form 14 February 2022; accepted 02 March 2022)

ABSTRACT

Amorphous alloys exhibit excellent mechanical properties; therefore, application technology development is being attempted in various fields. However, industrial use of application technology is limited owing to the limitations in fabrication. In this study, micropattern fabrication of an amorphous alloy was conducted using laser beam machining. Although microhole fabrication is possible without the deformation of the amorphous phase through nanosecond pulsed laser beam machining, there are limitations in the generation of recast layers and spatters. In cover plate laser beam machining (c-LBM), a cover plate is used to reduce the thermal deformation and processing area. Therefore, it is possible to fabricate holes at the level of several micrometers. In this study, it was confirmed that recast layers are hardly generated in c-LBM. Furthermore, square-shaped micropatterns were successfully fabricated using c-LBM.

Keywords : Amorphous Alloy(비정질 합금), Laser Beam Machining(레이저 빔 가공), Metallic Glass(금속유리), Micro Patterning(마이크로 패터닝)

1. 서 론

대부분의 고체 재료는 미세 결정의 집합체로서, 3차원 공간에서 각 원자는 장범위 병진 주기성을 가지고 결정격자에 있다. 용융된 금속을 고속으로 급냉하여 고체화시키면 응고된 금속은 원자가 규칙적으로 배열되지 못하고, 액체의 구조를 갖는 무질서 상태로 고체가 되는데 이러한 상태를 비정

질이라 한다^[1]. 비정질 형성능을 높이기 위하여 일반적으로 3가지 성분 이상을 포함하는 다성분계 시스템을 갖춘 비정질 합금의 형태로 제조되며 금속 유리(liquid metal, metallic glass)로도 불린다^[2].

비정질 합금은 결정질 재료에 비하여 우수한 강도 및 내식성을 나타내고 있어 차세대 금속 소재로 주목받고 있다. 비정질 합금은 조성이 균일하고 결정학적으로 이방성이 존재하지 않기 때문에 강도와 경도가 높고, 내부식성, 내마모성이 우수하며 밀도에 비하여 높은 탄성을 갖는다. 이러한 비정질 합금의 우수한 특성은 MEMS, 의료용기기,

Corresponding Author : haan86@dongyang.ac.kr

Tel: +82-2-2610-1847, Fax: +82-2-2610-1852

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

마이크로 연료전지, 투명전극 등 다양한 분야에서 활용이 시도되고 있다^{2~4)}.

비정질 합금의 우수한 기계적 특성은 가공에 있어서는 오히려 큰 제약으로 작용하였다. 높은 강도와 경도로 인하여 일반적인 절삭가공의 적용이 어려우며, 우수한 내부식성으로 식각 공정의 적용 또한 어렵다^{5,6)}. 펄스 초 레이저 빔을 이용한 가공 연구 또한 시도되고 있으나 비정질 상 유지 및 재응고층 형성의 한계를 보인다⁷⁾. 가공을 위하여 느린 스캔 속도나 높은 에너지 밀도로 레이저 가공 시에는 발생하는 열로 인하여 비정질 상을 유지하지 못하고 결정 구조가 생성되었으며, 가공 주변부의 재응고층이 두껍게 형성되었다. 결정 구조 및 재응고층 생성을 억제하기 위해 스캔 속도를 높이거나 낮은 에너지 밀도로 가공 시에는 정상적인 가공이 이루어지지 않았다.

덮개판 레이저 빔 가공(cover plate laser beam machining, c-LBM)은 박판 소재의 레이저 빔 미세 가공을 위해 제안된 가공법으로 소재 위에 덮개판을 두고 레이저 빔을 조사하여 수 마이크로미터 수준으로 가공할 수 있게 함과 동시에 열변형을 억제하게 한다⁸⁾. 가공 소재 위의 덮개판이 일차적으로 레이저 빔 에너지를 흡수하게 되어 소재에 전달되는 열에너지를 축소 시켜 열변형 억제 효과를 가져오는 것이다. 이러한 특성을 비정질 합금 가공에 활용하면 비정질 상을 유지하면서 미세 가공이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 나노초 펄스 레이저 빔 가공을 활용한 비정질 합금의 미세 가공 연구를 수행하고자 한다. 미세 홀 레이저 빔 가공을 수행하여 가공 인자에 대한 가공 변형, 비정질 상 유지 여부를 분석하고자 한다. 또한 덮개판 레이저 빔 가공(cover plate laser beam machining, c-LBM) 방식을 비정질 합금의 가공에 적용하여 기존의 레이저 빔 가공 방식의 한계를 개선하고, 마이크로 패턴 제조에 적용해 본다.

2. 실험방법

실험에 사용된 비정질 합금은 스트립 타입으로 Vacuumschmelze 사의 Co 기반 비정질 합금인

Table 1 Properties of amorphous alloy

Characteristic	Value
Composition	Co ₅₆ Fe ₄ Mo ₂ B _{11.5} Si _{16.5}
Type	Strip
Thickness	20 μm
Vickers hardness Hv 0.05	800 ~ 1000
Young's modulus	100 ~ 150 GPa
Tensile strength	1000 ~ 1700 MPa
Crystallization temperature	530 °C

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Value
Wavelength	1064 nm
Peak power density	7.0 ~ 55.7 J/cm ²
Repetition frequency	20 kHz
Pulse duration	100 ns
Scan speed	258.6 mm/s

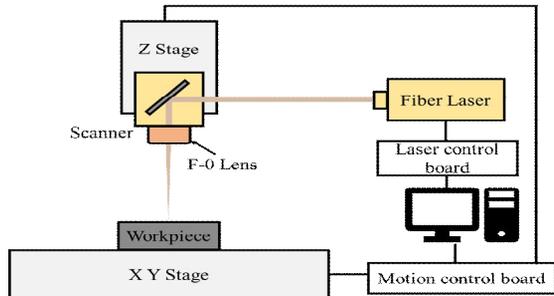


Fig. 1 Schematic diagram of the laser beam machining system

VITROVAC® 제품을 사용하였다. 자세한 물성값은 Table 1과 같다.

레이저 빔 가공에 사용된 장비는 IPG Photonics 사의 Yb-doped fiber laser로 파장 1064nm, 펄스폭 150ns, 최대출력 20W, 최고펄스반복율 80kHz의 특성을 가진다. 레이저 빔은 갈바노미터 스캐닝 시스템(galvanometer scanning system, Scanlab scancube 10)에 의해 원하는 위치로 이동된다. Fig. 1과 같이 레이저 빔 스캐너드 장치부를 3축 스테이지의 Z축 이동 스테이지에 부착하여 초점거리

160mm를 맞추었으며, 빔 스팟 사이즈는 가우시안 빔의 $1/e^2$ 기준 $43\mu\text{m}$ 이다. XY축 이송 스테이지 위에 공작물 또는 c-LBM을 위한 고정지그를 장착하여 Table 2의 가공 조건으로 레이저 빔 가공 실험을 수행하였다.

가공된 홀의 직경이나 가공 주변부의 변형은 주사전자현미경(Scanning electron microscope, JEOL JSM-6360) 이미지를 활용하여 분석하였다. 비정질 상 유지 분석에는 Bruker 사의 D8 advance 장비를 활용하여 XRD 분석을 수행하였다.

3. 비정질 합금의 레이저 빔 가공

3.1 미세 홀 가공

미세 홀 가공을 통해 비정질 합금에 대한 레이저 빔 가공에 관한 분석을 수행하였다. 나노초 펄스 레이저를 이용하여 미세 홀 가공 수행하고 레이저 빔 가공의 주요 인자인 에너지 밀도, 조사 횟수에 따른 가공된 홀의 직경 및 가공 주변부의 변형을 분석하였다.

Fig. 2는 레이저 에너지 밀도에 따른 비정질 합금의 미세 홀 가공 결과이다. 레이저 조사 횟수는 2회로 고정하고 레이저 빔의 에너지 밀도를 13.9, 27.8, 55.7J/cm²로 증가시켰다. 공작물이 20 μm 의 박판이기 때문에 13.9J/cm²의 낮은 에너지 밀도에서도 홀 가공이 가능했으나 동시에 재용고층이 두껍게 형성되고, 가공된 홀 주변에 스페터가 다수 발생하였다. 홀 직경은 입구 기준으로 작게는 43 μm 로 가공되었으며, 에너지 밀도가 증가함에 따라 홀 직경도 증가하였다. 재용고층은 직경 주변으로 고리 형상으로 발생하였으며, 13.9, 27.8, 55.7J/cm²로 에너지 밀도가 증가함에 따라 고리의 두께가 각각 평균 15, 17, 22 μm 로 증가하였다.

레이저 조사 횟수에 따른 미세 홀 레이저 빔 가공 결과는 Fig. 3과 같다. 레이저 빔의 출력을 27.8J/cm²로 고정하고 조사 횟수를 1, 2, 4회로 증가시키며 미세 홀 가공 양상을 확인하였다. 1회 조사만으로는 20 μm 의 소재를 관통하여 가공하지 못하였으나, 2회 이상부터는 관통하였다. 입구 기준 홀 직경과 재용고층 고리의 폭은 횟수와 무관하게 직경 60 μm , 폭 22 μm 수준이었다.

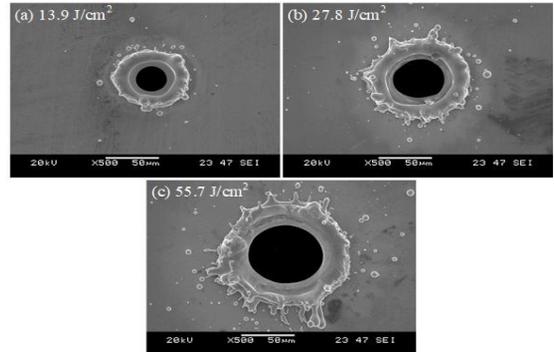


Fig. 2 Laser beam machining result of amorphous alloy as laser peak power density

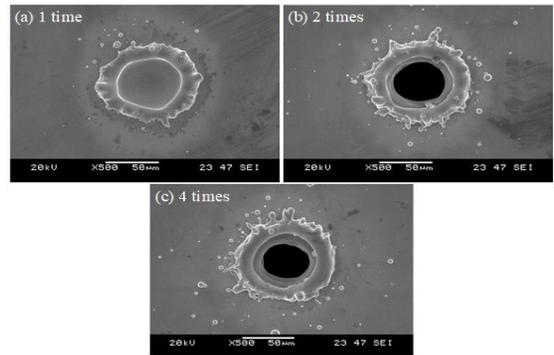


Fig. 3 Laser beam machining result of amorphous alloy as number of laser beam irradiation

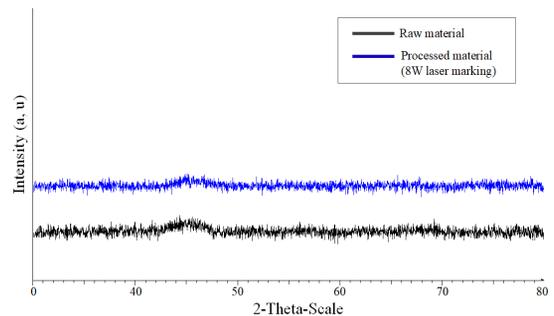


Fig. 4 XRD patterns of raw amorphous alloy and laser marking processed amorphous alloy

가공 후에도 비정질 합금의 특성을 유지하고 있는지를 파악하기 위하여 XRD 분석을 수행하였다. XRD 분석에 사용된 시편은 15 × 15mm 비정질

합금 시편 중앙에 레이저 빔 에너지 밀도 $27.8\text{J}/\text{cm}^2$, 펄스반복율 20kHz , 스캔 속도 $258.6\text{mm}/\text{s}$ 로 길이 10mm 마이크로 채널을 간격 $40\mu\text{m}$, 너비 10mm 로 패턴 가공하여 XRD 분석을 수행하였다. 비정질 합금의 경우 특정 피크가 존재하지 않는 무정형 패턴을 가지는 것으로 알려져 있다^[8]. Fig. 4와 같이 XRD 분석 결과, 레이저 빔 가공 전후에 따른 패턴의 변화가 없이 비정질 상을 유지하고 있음을 확인하였다.

나노초 펄스 레이저를 이용하여 비정질 합금 가공 시에는 가공을 위한 에너지 흡수가 충분히 이루어져 미세 홀 가공이 가능하였다. 가공 시 발생한 열로 인한 재응고층이 가공된 직경에 비하여 두껍게 형성되었으나, 열로 인한 결정화는 이루어지지 않았다. 이는 미세 홀 가공 특성상 가공량이 적고 가공시간이 짧아 발생한 열이 결정화를 이루기에는 부족한 것으로 보인다.

3.2 덮개판 레이저 빔 가공

레이저 빔 가공을 통해 비정질 합금의 특성을 유지하며 미세 가공이 가능함이 확인되었으나, 재응고층 형성과 같은 가공 주변부의 변화를 동반하였다. 레이저 출력 $27.8\text{J}/\text{cm}^2$, 조사 횟수 2회의 가공 조건으로 제조된 미세 홀의 경우, 생성된 재응고층 고리의 두께는 가공된 홀의 직경 대비 37% 수준으로 가공으로 인한 변형 영역이 넓었다. 일반적으로 1mm 이하의 박판 형태로 제조되는 비정질 합금의 특성상 가공 부의 변형이 소재 전체의 변형으로 이어질 수 있다. 이러한 부분을 해결하기 위하여 덮개판 레이저 빔 가공법을 비정질 합금 가공에 적용하였다.

Fig. 5와 같이 c-LBM 방식을 이용하여 STS 304 0.1t를 덮개판으로 사용하고 알루미늄으로 제작된 홀더에 볼트를 사용하여 고정해 비정질 합금의 미세 홀 가공을 수행하였다. 알루미늄 홀더는 덮개판과 소재를 밀착시키는 역할을 하며, 가공 부는 열어두어 레이저 빔 조사를 위한 영역을 확보하였다. 소재와 지그 사이에는 0.1t의 유리판을 두어 가공 후, 박판의 소재가 지그에 압착되는 것을 방지하였다.

레이저 조사 횟수 200회로 하고 레이저 출력

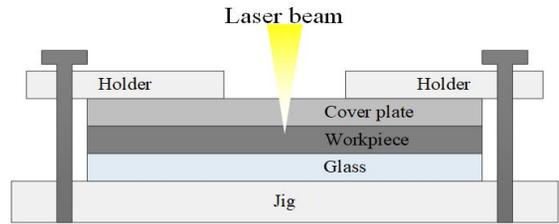


Fig. 5 Schematic of cover plate laser beam machining

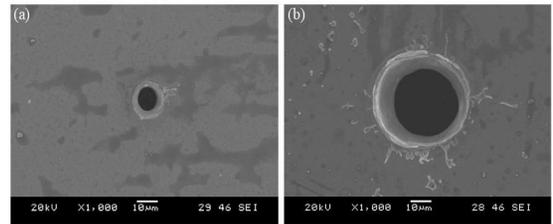


Fig. 6 c-LBM result of amorphous alloy (a) peak power density $13.9\text{ J}/\text{cm}^2$, (b) peak power $27.8\text{ J}/\text{cm}^2$

$13.9, 27.8\text{J}/\text{cm}^2$ 에 따른 미세 홀 가공을 수행하였다. $13.9, 27.8\text{J}/\text{cm}^2$ 의 레이저 출력으로 c-LBM을 수행하면 Fig. 6과 같이 각각 9, $30\mu\text{m}$ 직경의 홀이 가공되었다. Fig. 6에서 확인 할 수 있듯이 재응고층이 거의 생성되지 않았다. $27.8\text{J}/\text{cm}^2$ 가공의 경우 스패터가 발생하였으나, 가장 긴 길이의 스패터조차 $10\mu\text{m}$ 수준으로 극히 작은 크기이다.

덮개판이 희생 층 역할을 하며 먼저 가공이 되고 난 후에 소재가 가공됨에 따라, 금속 박판을 가공하였던 기존 c-LBM 연구와 같이 레이저 스팟 사이즈보다 작은 직경의 홀이 가공되었다. 또한 덮개판이 우선 가공되는 과정에서 소재에 직접적으로 전달되는 열에너지가 감소하게 되어 재응고층 생성, 재결정화 같은 열변형이 발생하지 않을 수 있었다.

4. 마이크로 패턴 가공

사각형 형상의 금속 메시 제작을 목표로 하여 마이크로 패턴 가공 실험을 진행하였다. Fig. 7과 같이 직선의 레이저 조사 경로를 일정 간격으로 진행하여 면적 가공이 이루어지도록 하였다. Fig.

8은 덮개판을 사용하지 않은 레이저 빔 패턴 가공 결과이다. 단일 홀 가공 수행 시에는 덮개판 없이 가공하여도 소재의 손상 없이 가공할 수 있었으나, 패턴 가공의 경우 정상적인 가공이 이루어지지 않았다. Fig. 8(a)와 같이 레이저 출력을 작게 하고 조사 횟수를 많이 한 경우, Fig. 8(b)와 같이 레이저 출력을 크게 하고 조사 횟수를 적게 하는 경우로 나누어 실험을 수행하였으나, 두 가지 경우 모두 패턴 가공이 완료되기 전에 소재가 손상되었다. 반면 Fig. 9와 같이 덮개판을 사용한 c-LBM의 경우 선폭 96 μm , 간격 168 μm 의 사각형 마이크로 패턴이 소재의 손상 없이 제작되었다. 그러나 점선으로 표시된 부분과 같이 레이저 조사 경로 종료 지점인 좌측 모서리 부분의 가공이 과도하게 진행되어 비대칭 형상을 지고 있다. K. Kwon, et al. 의 연구에 의하면 갈바노미터 스캐닝 시스템에 의해 레이저 빔의 경로가 제어되는 경우, 한 지점에서 가공이 종료되고 다음 시작 지점으로 이동할 때의 지연으로 인하여 레이저 빔 에너지에 영향을 주게 된다는 것이 밝혀졌다^[10]. 레이저 빔 가공은 조사된 레이저 빔 에너지가 소재에 흡수되며 가공이 진행된다. 따라서 가공량은 레이저 빔 조사 시간에 비례하게 된다. 더욱이 c-LBM의 경우 레이저 조사 횟수가 많고, 가공영역이 수 마이크로미터 수준으로 작으므로 에너지 차이에 의한 가공 결과 변화가 두드러지게 나타나게 된다. 한 줄의 레이저 빔 조사가 종료되고 다음 줄로 넘어가기 위하여 갈바노미터 스캐닝 시스템이 지연되는 동안 지속된 레이저 빔 에너지 공급으로 조사 경로의 종료 지점이 다른 부분에 비하여 추가 가공이 진행된 것이다.

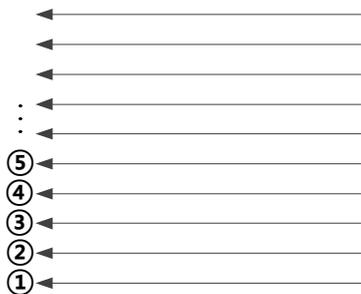


Fig. 7 Scanning path for micro pattern fabrication

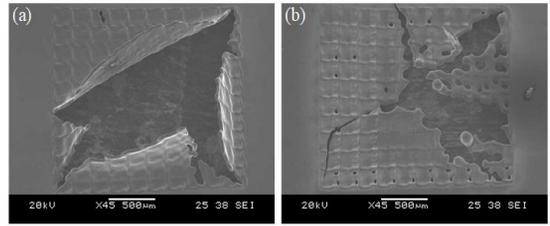


Fig. 8 Micro pattern machined by laser beam machining (a) peak power 7.0 J/cm², 100 times laser beam irradiation, (b) peak power 27.8 J/cm², 2 times laser beam irradiation

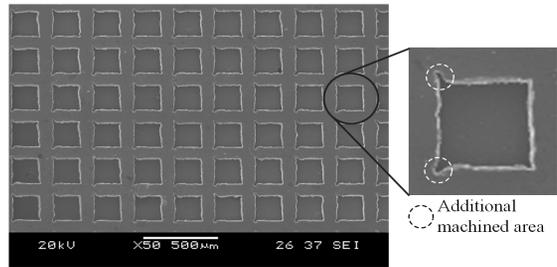


Fig. 9 Micro pattern machined by c-LBM with line scanning path

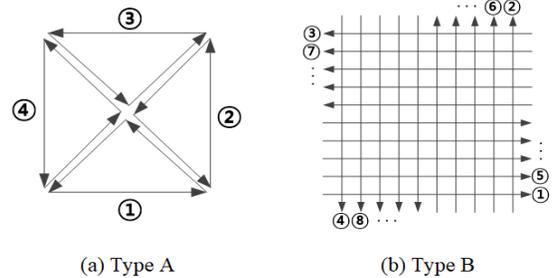


Fig. 10 Types of scanning path for square pattern

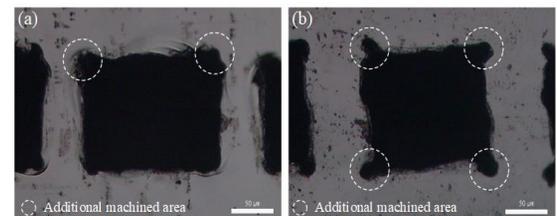


Fig. 11 Square pattern machined by c-LBM with different scan path (a) type A, (b) type B

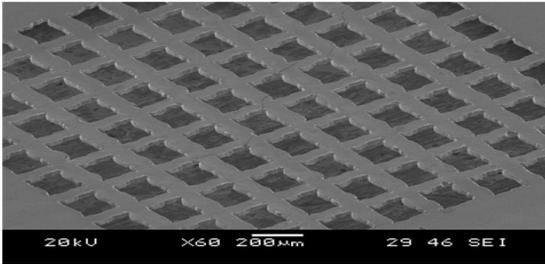


Fig. 12 Micro pattern machined by c-LBM with complex scanning path

동일한 사각 형상이지만 Fig. 10과 같이 다른 가공 경로로 가공한 결과, Fig. 11에 점선으로 표시된 부분과 같이 여전히 조사 경로의 종료 지점이 시작 지점과 비교해 가공이 더 되어 있었다. 갈바노미터 스캐닝 시스템이 가지고 있는 한계로 인하여 조사 경로 종료 지점의 과도한 가공은 해결할 수 없지만, 추후 후속 연구를 통해 조사 경로 설정을 통해 그 영향을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 최종적으로 제작된 마이크로 패턴 형상의 안정성을 위하여 대칭 형상에 초점을 둔 가공을 Fig. 12와 같이 수행하였다. Type B 조사 경로를 사용하여 레이저 출력 27.8W, 조사 횟수 200회로 비정질 합금을 가공한 결과, 선폭 76µm, 간격 169µm의 사각형 마이크로 패턴을 가공할 수 있었다.

5. 결론

비정질 합금은 우수한 기계적 성질을 지니고 있기에 다양한 분야에서 응용 기술개발이 시도되고 있으나, 가공의 한계로 인하여 산업적 활용이 미비하다. 본 연구에서는 비정질 합금의 활용도를 높이기 레이저 빔 가공을 활용한 마이크로 패턴 가공에 관한 연구를 수행하였다.

미세 홀 가공을 통해 비정질 합금의 레이저 빔 가공 특성을 분석한 결과, 레이저 출력이 증가함에 따라 가공량이 증가하여 홀 직경이 증가하게 되지만, 재용고층의 두께도 증가하였다. 레이저 조사 횟수의 증가는 홀 직경이나 재용고층 두께의 영향을 주지 않고 가공 깊이에만 영향을 주

었다. 덮개판을 이용하여 열변형과 가공영역을 감소시키는 c-LBM의 경우 최소 직경 9µm 수준의 홀 가공이 가능하였으며, 재용고층은 거의 생성되지 않음을 확인하였다.

가공량이 많은 마이크로 패턴 가공의 경우 일반적인 레이저 빔 가공에서는 가공 진행 중 소재가 변형되었으나, c-LBM을 적용하면 선폭 76µm, 간격 169µm의 사각형 마이크로 패턴의 제작이 가능함을 확인하였다. c-LBM을 통한 비정질 합금의 가공은 소재의 형태와 결정질 구조의 변형 없이 미세 가공이 가능하므로 비정질 소재를 활용한 관련 응용 분야 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 동양미래대학교 2019 교내 학술연구 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Park, E.-S., “Series I: Foundation and Application of Amorphous Metals,” Journal of Korea Foundry Society, Vol. 29, pp. 53-58, 2009.
2. Park, K. H. and Kim, Y. S., “Trend in Application Technology of Metallic Glass,” KIC News, Vol. 19, No. 4, pp. 1-11, 2016.
3. Inoue, A. and Takeuchi, A., “Recent development and application products of bulk glassy alloys,” Acta Materialia, Vol. 59, Issue. 6, pp. 2243-2267, 2011.
4. Kumar, Golden, et.al., “Bulk Metallic Glass: The Smaller the Better,” ADVANCED MATERIALS, Vol. 23, pp. 461-476, 2011.
5. Yeo, S. Ho. et.al., “Processing of Zirconium-Based Bulk Metallic Glass(BMG) Using Micro Electrical Discharge Machining(Micro-EDM),” Materials and Manufacturing Processes, Vol. 24, pp. 1242-1248, 2009.
6. Koza, J. A., et al., “Electrochemical micro-machining of a Zr-based bulk metallic glass using a micro-tool electrode technique,”

- Intermetallics, Vol. 19, pp. 437-444, 2011.
7. Lin, Hsuan-Kai, et al., "Pulse laser micro-machining of Mg-Cu-Gd bulk metallic glass," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, Issue. 6, pp. 883-886, 2012.
 8. Körösy, G., et al., "Evaluation of XRD Analysis of Amorphous Alloys," Materials Science Forum, Vol. 729, pp. 419-423, 2012.
 9. Ha, K.H. et al., "Fabrication of a micro-hole array on metal foil by nanosecond pulsed laser beam machining using a cover plate" Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 25, No. 2, pp. 27001, 2015.
 10. Kwon, K., et al., "Precise glass microstructuring with laser induced backside wet etching using error-compensating scan path," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 291, 2021.