

Metal Powder에 따른 증기화 증폭 시트의 개발을 통한 열 중량 분석 및 고출력 전자빔의 가공 특성 분석

김현정^{1,2} · 정성택¹ · 이주형² · 백승엽[†]

인덕대학교 융합기계공학과^{1,†}

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과²

Analysis of machining characteristics of thermogravimetric analysis and high-power density electron beam through the development of vaporized amplification sheets according to metal powder

Hyun-Jeong Kim^{1,2} · Sung-Taek Jung¹ · Joo-Hyung Lee¹ · Seung-Yub Baek[†]

Department of Mechanical Convergence Engineering, Induk University^{1,†}

Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology²

(Received March 19, 2020 / Revised March 30, 2020 / Accepted March 31, 2020)

Abstract: An electron beam was used to mainly utilize for polishing, finishing, welding, a lithography process, etc. Due to the high technical level of difficulty of high-power density electron beam, it is difficult to secure related technologies. In this study, research was carried out to improve the machinability by developing the vaporized amplification sheets to realize the electron beam drilling technology. Their vaporized amplification sheets were analyzed by using the measurement of chemical and composition, which is such as TGA, SEM. We analyzed micro-hole processing using a microscope. Also, the thermal characteristics of vaporized amplification sheets are highly significant for applying to high-power density electron beam technique. So, we finished the vaporized amplification sheets according to the process conditions and analyzed it according to the machining conditions of the electron beam. It was confirmed that the effect on the experimental results differs depending on the influence of the metal powder contained in the developed material.

Key Words: Vaporized Amplification Sheet, Material Characteristics, High-Power Density Electron Beam, TGA

1. 서 론

최근에 각종 기계 부품이 정밀한 소형제품으로 부상함에 따라 산업분야에서는 초정밀 제품으로 제작하기 위해 주목받고 있는 추세이다. 또한 제품 개발에 앞서 정밀한 표면 조도를 만족시키기 위해 수준 높은 제품을 작게 만들기 위해서는 수많은 가공 시간과 공정 작업이 필요하며, 이는 제품의 단가를 높이는데 문제를 야기하였다. 그래서 연구자들은 제작하고자 하는 쓰임에 따라 효율적인 가공기술을 확보하고자 장비개발에 대한 관심이 높은 실정이다.

특히, 자동차, 조선, 항공기의 부품은 다수의 미세 홀을 요구하기 때문에 이에 대응할 수 있는 가공 기술이 요구되고 있다. 기존 가공기술은 접촉 방식으로서 드릴링 가공이 있으며, 비접촉 방식으로는 레이저와 방전가공으로 제조공정을 대체하였다^{1,2)}. 하지만 이렇게 개발된 기술에서 한계점은 미세 홀을 다발적으로 가공하기 어려운 문제가 있다. 멀티 홀을 가공하기에는 부족하기 때문에 생산성을 높이고자 연구자들은 고세 장비를 개발하고자 전자빔 드릴링 장비를 개발하고 있다. 지난 전자빔 가공 기술은 용접 기술과 적층 기술을 이용하여 연구하였다.

연구자들은 나노초 레이저(Nanosecond Pulsed Laser)를 활용하여 Tan, B³⁾은 소재의 특성에 제한 없이 고속으로 가공이 가능하며, 고세장비를 가지는

1, † 교신저자: 인덕대학교 융합기계공학과
E-mail: sybaek@induk.ac.kr

가공기술 개발에 성공하였다. 하지만, 레이저 가공의 문제점으로 가공 홀 주변에 열 영향 부(Heat Affected Zone)를 생성시키며, 소재가 재 용고 되는 문제가 지속적으로 발생했다. 최근 들어서 레이저 분야에서 활발하게 연구가 수행되고 있는 펄초 펄스 레이저(Femtosecond Pulsed Laser) 가공방식은 고정밀도로 미세가공이 가능하지만 느린 가공속도로 인한 생산성 저감 및 광학적 구조의 한계점 등으로 인한 기술적 한계를 지니고 있다⁴⁾.

이러한 한계점을 비추어 볼 때 연구자들은 미세 홀을 가공하기 위한 다음과 같은 방법을 활용하여 연구를 수행하였다. T. V. Olshanskaya⁵⁾ 전자빔 용접 기술을 활용하여 공정조건의 주요파라미터를 가지고 회귀분석을 활용하였으며, E. G. Kang⁶⁾ 은 플라즈마 전자빔을 이용하여 가속 전압에 따라 오스테나이트의 상변화를 분석하여 경도에 대한 결과를 제시하였다. 또한, 소재에 따라 전자빔을 집중시켜 가공특성에 대하여 분석하였다.

앞선 연구사례들은 저출력 방식으로 가공을 수행하여 소재의 특성과 가공 파라미터에 대한 중요성을 제시하였다. 하지만, 단일 펄스 가공일 경우에는 생산성에 문제가 없으나, 다수의 홀을 가공할 경우에는 경제적인 부분에서 어려움이 있으므로 고출력 전자빔에 대한 활용이 절실한 실정이다.

일부 연구사례의 경우 고품질의 미세 홀을 단 시간 내에 가공 할 수 있는 공정 및 장비를 개발하였으나, 전자빔 드릴링 기술의 개발은 미비한 실정이며, 원천기술 또한 부족하다. 전자빔 드릴링의 가공 메커니즘은 전자빔에서 방출된 전자가 가속되며 소재와 충돌되면서 운동에너지가 열에너지로 변환된 후에 가공이 이루어진다.

이에 본 논문에서는 고출력 전자빔 장비를 활용하여 드릴링 가공에 대한 기술을 확보하고자 후면소재를 개발하고 금속 파우더의 성분에 따라 열 화학적 및 구조분석을 통해 기화폭발 메커니즘을 제시하고 고출력 전자빔 조사 시 미세 홀을 가공하기 위한 소재 특성과 가공성에 대하여 제시하고자 한다.

2. 드릴가공을 위한 전자빔 메커니즘

미세 홀을 가공하기 위한 메커니즘에 대해 다루고자 한다. 이 가공기술을 적용하기 위해선 공작물에 후면 소재를 고정시켜야 한다. 이 소재는 실리콘(Silicone)과 금속파우더(Metal-Powder)로 구성되어

있으며, 전자빔의 집중한계를 극복하기 위해 기화압력을 순간적으로 상승시켜 고품질 미세 홀 구현에 결정적으로 기인한다⁷⁻⁸⁾. 그러나, 후면소재가 없을 경우 기화압력이 부족하여 용융물이 홀 내부로 유입되거나 외부로 배출되어 미세 홀의 품질을 저하시키고 용융현상이 발생하게 된다.

본 연구에서는 기존의 전자빔 메커니즘을 개선시키고자 고출력 전자빔의 드릴링 가공메커니즘으로 공정연구를 수행하였다. 이를 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 전자빔 드릴링에 대한 가공모습을 보이고 있으며, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

- 전자빔을 통해 집중된 빔이 공작물에 조사되어 운동에너지가 열에너지로 변환되면서 국부적인 용융이 시작된다.
- 공작물이 용융되면서 가공영역에 증기화가 발생된다.
- 공작물이 용융되고 전자빔이 후면소재에 도달하면서 순간적으로 기화압력이 상승한다.
- 높은 기화압력으로 인해 녹은 소재들이 홀 외부로 방출되면서 미세 홀이 완성된다.

이에 대응하기 위해 후면소재를 개발하고자 폴리머(Polymer)의 성분에 따라 미세 홀의 형상 및 단면의 품질 차이가 발생하며, 이를 규명하기 위해서 3장에서는 금속파우더에 따라 증기화 증폭 시트(Vaporized Amplification Sheet)를 제작하여 후면소재에 대한 성분 및 소재특성에 대하여 다루고자 한다.

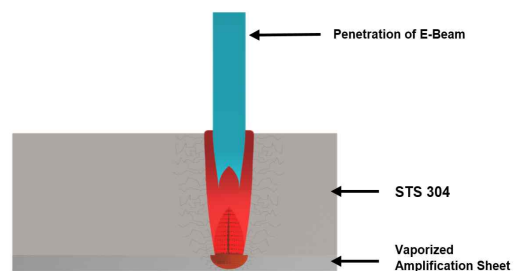


Fig. 1 Schematic illustration of manufacturing mechanism for manufacturing the micro-hole by using an electron beam

3. 증기화 증폭 시트 개발

3.1. 파우더에 따른 후면 소재 제작

전자빔 드릴링 가공에서 반드시 필요한 증기화 증폭 시트 제작에 관하여 Fig. 2에서 나타난 바와 같

이 증기화 증폭 시트 제작을 위한 공정을 나타내었다. 주원료의 경우 현재 개발 중인 후면소재의 경제성을 고려하여 시중에서 판매되고 있는 실리콘(Silicone)을 선정하였으며, 실리콘을 계량한 후 비중이 높은 중금속(Heavy Metals)의 파우더를 첨가하여 교반하였다. 본 연구에서 선정한 금속 파우더(Metal Powder)는 구리(Copper), 철(Iron), 니켈(Nickel)로 선정하였다.

금속 파우더의 비중이 낮을 경우 교반 과정에서 파우더가 뭉치는 현상이 나타나므로 적절한 비중의 금속 파우더의 함유가 필요하다. 실험에서 선정한 각각의 금속 파우더의 파티클(Particle) 사이즈는 45 μm 이며, 실리콘과 금속 파우더의 교반 공정이 이루어지면 고분자의 분자력(Molecular Force)을 높이고자 경화제(Hardener)를 첨가하고, 25 $^{\circ}\text{C}$ 의 실온 상태에서 교반공정을 수행하였다.

전자빔을 가공하기 위한 대상의 소재 STS 304 (50x50x0.5 mm)를 준비하여 고분자 시료를 STS 304 후면에 도포하였다. 도포한 시료의 두께는 2.5 mm이며, 30 min 동안 오븐을 걸쳐 증기화 증폭 시트를 제작하였으며, 이는 고분자 소재가 열 경화(Heat Curing) 타입으로 상온경화가 아닌 오븐 공정을 걸쳐 제작하였다.

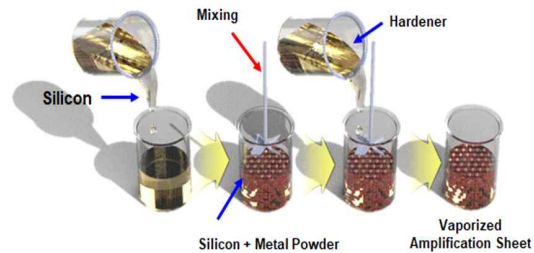


Fig. 2 Schematic illustration of vaporized amplification sheet manufacturing mechanism for machining micro hole in an high-power density electron beam

전자빔의 침투력(Penetration Force)이 빠르기 때문에 전자빔이 후면소재에 도달하였을 때, 기화압력을 향상시켜 주면서 가공성을 높여주는 역할을 한다. 각각의 금속 파우더를 달리하여 제작한 소재를 Fig. 3에서 보이고 있으며, Fig. 3(a)은 Copper Powder를 사용하여 제작한 증기화 증폭 시트와 단면을 분석하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 시료를 측정하였다. Fig. 3(a)을 참고하여 (b)와 (c)를 알 수 있듯이 금속의 파

우더 성분이 다르기 때문에 sheet의 색상이 다른 것을 알 수 있으며, 비중이 높은 금속은 파티클의 입자가 고르게 분포되어있는 모습을 알 수 있으나, 비중이 낮은 금속 파우더의 경우 뭉치거나 한쪽으로 치우친 현상을 분석하였다.

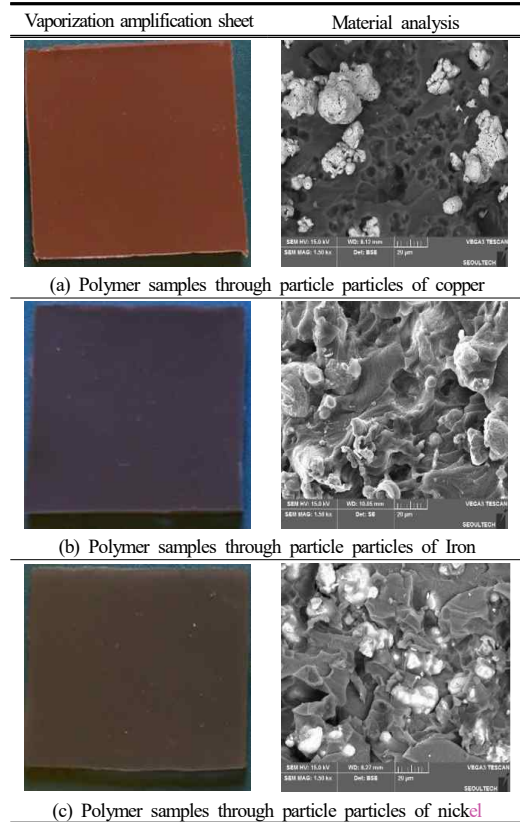


Fig. 3 SEM images of cross-sectional structure for vaporization amplification sheet; (a) condition 1 shows sheet of copper particle, (b) condition 2 shows sheet of Iron particle, (c) condition 3 shows sheet of nickel particle.

3.2. 열 화학적 분석

본 전자빔 가공기술과 관련하여 가장 큰 영향을 미치는 열 특성과 관련하여 분석을 수행하였다. 대표적인 열 중량 분석법인 TGA (Thermogravimetric Analysis)를 분석하였다. 분석을 수행하기 위해 TA Instrument Q50의 분석 장비를 사용하여 열 중량 분석을 수행하였다.

온도에 따른 소재의 중량 변화를 추적하는 방법이며, 전자빔 드릴링 가공 시 소재의 열 특성에 따

라 가공속도 및 품질이 결정된다. 이에 대한 세팅은 분당 가열 속도는 20 °C/min이며, 온도범위는 20~1,000 °C로 설정하였고, 가스 분위기는 질소(Nitrogen) 분위기에서 시료를 분석하였다.

Fig. 4에서, 금속 파우더에 따른 열 특성을 분석하였다. Fig. 4(a)는 Copper Powder로 제작한 TGA 분석 결과이며, 그래프를 보면 알 수 있듯이 온도가 상승함에 따라 시료의 수분이 증발하면서 551.87 °C의 분해 온도(Decomposition Temperature)가 측정되었다. Fig. 4(a)를 참고하여 Iron Powder가 함유된 (b)의 그래프를 분석하였을 때, 538.34 °C에서 급격하게 수분이 증발되는 것을 알 수 있었으며, Nickel Powder 또한 468.49 °C에서 시료의 수분이 급격하게 증발하는 것을 분석하였다.

2차 적으로 열분해는 비슷한 온도의 범위에서 반응하였다. 하지만, 각각의 금속 파우더를 첨가한 시료를 열 중량 분석을 수행하였을 때, 수분이 증발하는 범위는 다르게 반응하였다. 이는 Iron과 Nickel은 열전도도(Thermal Conductivity)가 낮은 반면에 Copper Powder가 함유된 소재의 경우 열전도도가 높기 때문에 다른 시료보다 수분 증발이 늦게 발생한 것으로 분석된다.

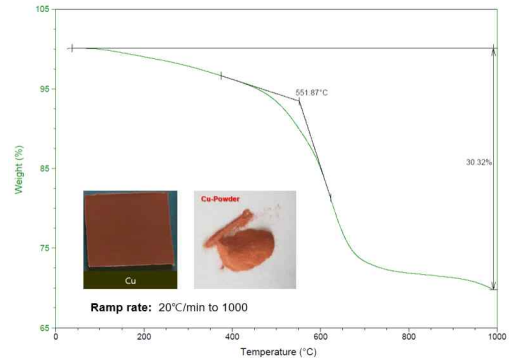
전반적으로 시료에 따라 분석 했을 때 가열속도가 증가함에 따라 Copper가 함유된 시료의 경우 전체적으로 30.32%가 감량되어 가장 높게 확인되었으며, Iron Powder로 제작된 소재는 19.67% 감소되었다. 또한, Nickel Powder로 제작한 증기화 증폭 시트의 경우 9.753%로 가장 낮게 감량되었다. 따라서 Nickel Powder가 함유된 소재가 가장 수분이 적게 증발되고 감소량 또한 작게 반응하기 때문에 전자빔 가공 시 기화압력이 낮을 것으로 판단된다.

4. 고출력 전자빔 가공실험

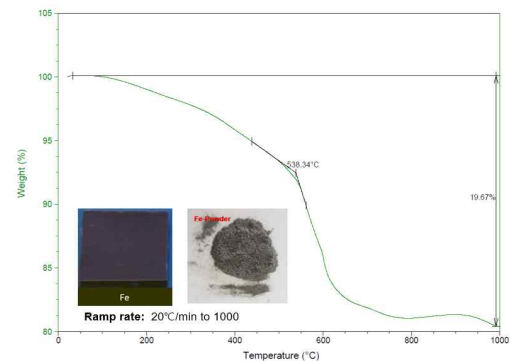
4.1. 금속 파우더에 따른 가공 실험

본 연구에서 개발한 증기화 증폭 시트를 적용하여 전자빔 드릴링 가공에 대하여 살펴보고자 한다. Table 2에서 보이는 바와 같이 120 kV의 전압(Voltage)을 고정하고 전류(Current)와 펄스(Pulse)에 변화에 따라 가공조건을 선정하였다. 고출력 전자빔 가공 장비에 대한 모습을 Fig. 5에 나타내었다. 상기의 장비 모습과 같이 Fig. 5(a)는 전자빔 장비의 전면 모습이며, Fig. 5(b)는 장비 내부 모습을 보였다. 전자빔 가공 시 미세 진동으로 인해 발생하는 문제

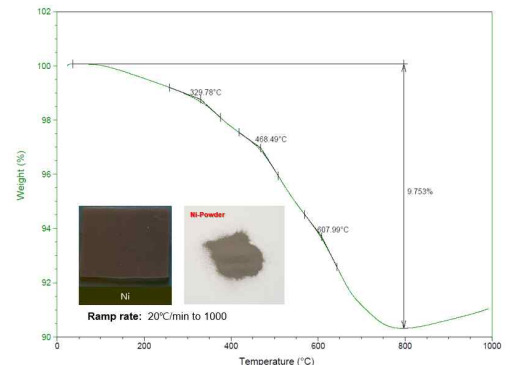
를 줄이고자 지그에 증기화 증폭시트를 고정하였고, 장비 내부에 CCD 카메라를 설치하여 실시간으로 확인하였다. 전자빔의 실험 전 시료를 설치하고 고속 진공 펌프(Vacuum Pump)를 이용하여 3~6 mbar의 진공상태에서 실험을 준비하였다.



(a) Analysis of sheet according to the copper powder



(b) Analysis of sheet according to the iron powder

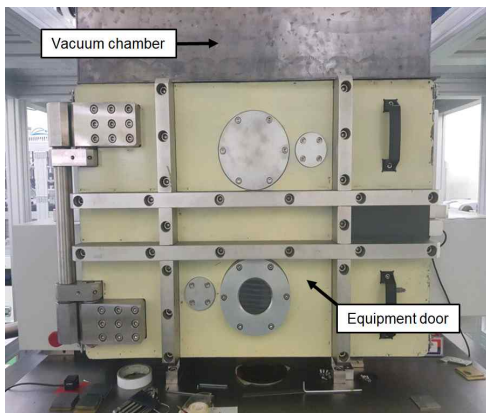


(c) Analysis of sheet according to the nickel powder

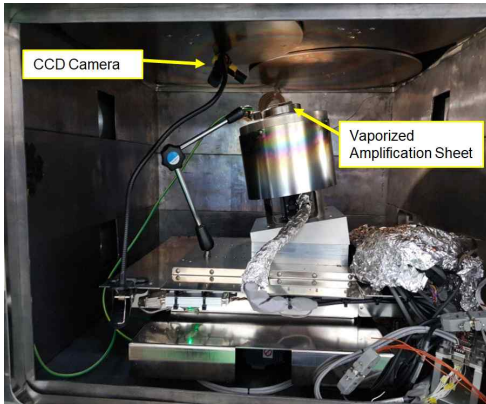
Fig. 4 Results of TGA analysis with respect to vaporized amplification sheets through metal powder; (a) copper powder, (b) Iron powder, (c) nickel powder.

Table 2 Conditions of electron beam machining

No.	Voltage (kV)	Current (mA)	Pulse (ms)
1	120	3	5
2		3.5	4.5
3		4	4
4		4.5	3.5
5		5	3
6		3	2.5
7		3.5	2
8		4	1.5
9		4.5	1
10		5	0.5



(a) Front view of equipment



(b) Inside view of electron beam equipment

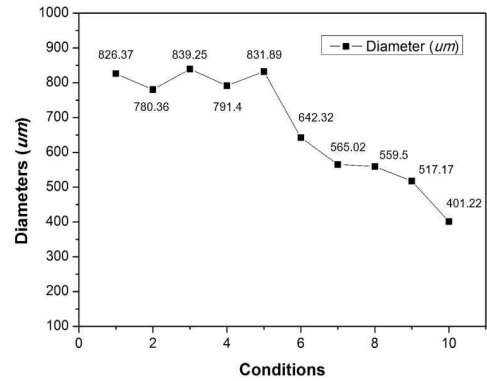
Fig. 5 Electron beam experiment equipment for fine-hole machining

4.2. 전자빔 가공 특성 분석

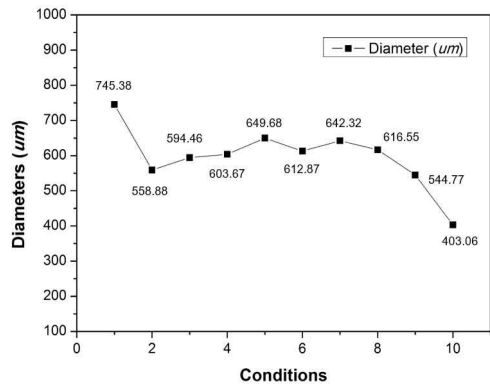
실험 분석 결과 빔 특성이 가우시안 분포 (Gaussian Distribution)를 가지고 있으며, 후면소재의 높은 기화압력으로 인해 녹은 소재가 방출되면서

넓어진 것으로 분석된다. 그러나, 이 가공품질의 변화는 후면 소재의 화학적 구조 및 첨가되는 금속 파우더의 성분에 따라서 상이하다.

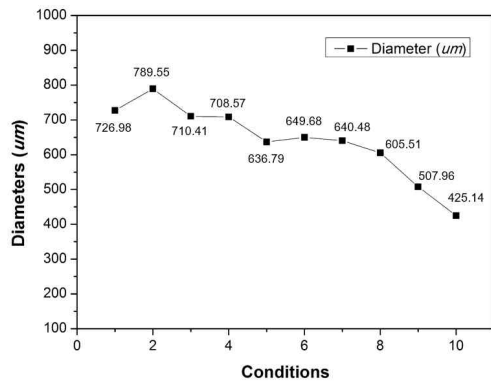
Fig. 6은 본 연구에서 제작한 금속 파우더에 따른 증기화 증폭 시트를 가공한 홀 사이즈에 대하여 나타내었다.



(a) Analysis of sheet according to the copper



(b) Analysis of sheet according to the iron



(c) Analysis of sheet according to the nickel

Fig. 6 Fine-hole result of electron beam experiment

그래프를 보면 알 수 있듯이 Fig. 6(a)은 조건 5번까지는 홀 사이즈의 변화가 없었으나, 펄스가 감소함에 따라 홀의 사이즈가 감소하는 경향을 분석하였다. 홀 사이즈가 가장 크게 보인 것은 가공 조건 3번에서 839.25 μm 가 확인되었다. 또한, 가공조건이 감소함에 따라 가공 조건 10번에서 401.22 μm 의 경향을 확인하였다.

Iron과 Nickel의 경우 대체적으로 감소되는 경향이 보이지 않았으나, 펄스가 1.5 ms 이하로 감소했을 때, 홀의 사이즈가 줄어드는 것을 분석하였다. Iron의 경우 최소 크기가 403.06 μm 가 확인되었으며, Nickel의 경우 425.14 μm 확인되었다. 따라서 전자빔 가공 시 가공조건을 중요 파라미터는 펄스로 분석되며 열전도도가 높은 Copper Powder의 작용으로 인해 가공성이 증가된 것으로 분석된다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 금속 파우더에 대한 열화학적 분석을 고찰하고, Copper, Iron, Nickel 세 가지 종류를 적용하여 증기화 증폭 시트를 제작하여 이를 통한 고출력 전자빔 가공 실험을 수행하여 금속 파우더의 작용으로 인한 홀 가공성에 대한 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 금속 파우더의 비중에 따라 증기화 증폭 시트의 품질에 영향을 미치는 것을 SEM 측정을 통해 확인하였다.
- 2) TGA 분석을 통해 세 가지 금속 파우더(Copper, Iron, Nickel) 각각의 열 특성을 분석하였으며, 1차적 열분해 시 모두 유사한 결과였으나, 2차적 열분해 시 Copper의 열전도도가 높아 수분증발이 가장 늦은 것으로 나타났다.
- 3) 금속 파우더에 따른 증기화 증폭 시트를 이용하여 고출력 전자빔 가공 실험 수행한 결과 펄스 감소에 따른 홀 가공 사이즈도 감소하는 경향을 확인하였다.

위와 같은 결과들을 바탕으로, 본 연구에서 세 가지 금속 파우더 중 열전도도가 높은 Copper Powder를 적용하여 개발한 증기화 증폭 시트의 고출력 전자빔 가공 결과의 가공성이 가장 우수하였으며, 가공 시 펄스 감소에 따른 홀 가공 사이즈의 감소 확

인을 통하여 가공조건인 중요 인자가 펄스임을 확인하였다.

앞선 연구를 통하여 금속 파우더에 따른 증기화 증폭 시트를 개발하고 고출력 전자빔 가공 실험을 수행하여 위와 같은 결과를 도출하였으나, 증기화 증폭 시트의 품질 향상과 최적의 가공 조건을 도출한다면 미세 홀이 요구되는 소형 제품 및 초정밀 제품 개발을 위한 산업에 우수한 기술로 사용될 것으로 전망되어 진다.

후기

본 연구는 기계산업핵심기술개발사업 “고출력 전자빔을 이용한 고세장비 미세홀 가공장비 및 공정 기술개발” 과제번호(10063367) 연구비 지원으로 진행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Lee, E. S., Baek, S. Y., & Cho, C. R., “A study of the characteristics for electrochemical micro-machining with ultrashort voltage pulses”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(7-8), pp. 762-769, 2007.
- 2) Kumar, K., & Agarwal, S., “Multi-objective parametric optimization on machining with wire electric discharge machining”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(5-8), pp. 617-633, 2012.
- 3) Tan, B., “Deep micro hole drilling in a silicon substrate using multi-bursts of nanosecond UV laser pulses”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.16, p. 109, 2005.
- 4) Kurt, T. H., Ferdinand, V. A., OSTENDORF, A., KAMLAGE, G., and NOLTE, S., “Micromachining of metals using ultrashort laser pulses”, International journal of electrical machining, Vol.4, pp. 1-6, 1999.
- 5) Olshanskaya, T. V., Salomatova, E. S., Belenkiy, V. Y., Trushnikov, D. N., & Permyakov, G. L., “Electron beam welding of aluminum alloy AlMg6 with a dynamically positioned electron beam”, The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, 89(9-12), pp. 3439-3450, 2017.

- 6) Kang, E. G., Kim, J. S., Lee, S. W., Min, B. K., & Lee, S. J., "Emission characteristics of high-voltage plasma diode cathode for metal surface plasma modification", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16(1), pp. 13-19, 2018.
- 7) Kim, S. H., Jung, S. T., Kim, H. J., & Baek, S. Y., "A study on machining characteristics in vaporized amplification sheets of electron beam", Korea Society of Die & Mold Engineering, 12(2), pp. 46-50, 2018.
- 8) Kim, S. H., Jung, S. T., Kim, H. J., Baek, S. Y., Kim, J. S., & Kang, E. G., "A study on the preparation method of vaporized amplification sheets and electron beam machining characteristics", Journal of Manufacturing Processes, 50, pp. 234-240, 2020.

저자 소개

김 현 정(Hyun-Jeong Kim)



- 2019년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 석사과정
- 2019년 3월~현재 : 인덕대학교 산학협력단, 연구원

< 관심분야 >

E-Beam, Laser, 초정밀나노가공

정 성 택(Sung-Taek Jung)



- 2020년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2018년 3월~현재 : 인덕대학교 산학협력단, 연구원

< 관심분야 >

스마트 팩토리, 초정밀나노가공

이 주 형(Joo-Hyung Lee)



- 2011년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 5월~2015년 8월 : 한국표준과학연구원, 선임연구원
- 2015년 8월~현재 : 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과, 조교수

< 관심분야 >

펄스 레이저, 정밀측정

백 승 업(Seung-Yub Baek)

[정회원]



- 2007년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 2월~2009년 2월 : 유한대학교 금형설계과 조교수
- 2009년 3월~현재 : 인덕대학교 융합기계공학과, 부교수

< 관심분야 >

초정밀나노가공, CAD/CAM/CAE