연료전지용 금속 분리판 제작을 위한 DLM공정 특성 연구

문성민¹ · 장정환¹ · 김태현¹ · 이현종¹ · 문영훈[#]

Characterization of Direct Laser Melting Technology for the Fabrication of Fuel Cell Bipolar Plate

S. M. Mun, J. H. Jang, T. H. Kim, H. J. Lee, Y. H. Moon

(Received November 3, 2010 / Revised November 29, 2010 / Accepted November 29, 2010)

Abstract

Manufacturing of the bipolar plate of a direct methanol fuel cell (DMFC) by direct laser melting technology (DLM) was attempted. The DLM technology is highly influenced by process parameters such as laser power, scan rate and layering height. Therefore, an analysis of the DLM technology was performed under various conditions. The bipolar plates were fabricated using the DLM process with 316L stainless steel (STS 316L) plates and powder. Powder melting trials at various energy density were performed in order to select a feasible melting range for a given laser power. The melting line height increases and eventually saturates when the energy density increases, but decreases when the laser power increases at a given energy density. For the estimation of the potential performance of the bipolar plate, the surface roughness and contact resistance of the DLM layer were also analyzed. The changes of line height and thickness are useful information to report when manufacturing bipolar plate of fuel cell through the DLM process.

Key Words: Direct Laser Melting, Fiber Laser, Laser Parameter, Bipolar Plate, 316L Stainless Steel Powder

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 및 환경오염 등과 같이 에너지 사용에 관한 문제가 대두되면서 대안으로 신 재생에너지가 각광받고 있다. 특히 연료전지는 고효율, 무공해성, 저소음 및 부지선정의 용이성과 같은 장점을 가지고 있다. 또한 수소, 천연가스, 메탄올 등과 같이 다양한 연료를 에너지원으로 사용할 수 있기 때문에 차세대 대체 에너지기 기술로서 많은 기대를 모으고 있다[1~2]. 연료전지가 상용화되기 위해서는 전지의 제조가격을 줄이고 스택의 부피 및 무게를 낮추어야 한다. 이러한 방안으로 스택의 핵심부품인 분리판을 경량화시키고 제조단가를 낮출 수 있는 제조 방법이 필요하다. 연료전지에서 분리판은 양극(anode)쪽에서

생성된 전자를 음극(cathode)쪽으로 전도해 주는 역할과 동시에 연료 및 산화제를 공급해주는 통로 역할을 한다. 기존의 연료전지 분리판은 전기전도성 및 내부식성이 뛰어나고 밀도가 낮은 흑연(graphite) 소재를 사용하였다. 하지만 기계적 충격이나 진동에 취약할 뿐만 아니라 분리판에 연료 및 공기주입 유로를 가공하기 위해서는 일정 이상의 두께가 요구된다. 분리판의 두께는 스택의 부피 및 무게에 영향을 끼치므로 이를 극복하기 위해 금속분리판 제작에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[3]. 현재 분리판은 CNC 밀링, 스탬핑/엠보싱, 하이드로포밍, 예칭 등과 같은 다양한 가공공정들이 사용되고 있지만 가공단가 및 가공한계 등으로 새로운 가공공정에 대한 많은 연구가 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 미세성형분야

1. 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구소
교신저자: 부산대학교, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

에 적용되고 있는 직접 레이저 공정을 금속 분리판에 적용하고자 한다. 직접 레이저 용융공정(Direct laser melting: DLM)은 금속분말을 얇은 층으로 도포한 후 국부적으로 레이저 빔을 조사하여 금속 분말을 완전 용융 원하는 강도와 인성을 가진 시켜 조형물을 얻는 기술이다. 직접 레이저 용융공정은 미세성형을 통한 고기능성 부품의 제조에 유용하게 이용될 수 있다[4~6]. 직접 레이저 용융공정 시 레이저 출력, 주사속도, 분말도포 높이 등과 같은 공정변수가 분말거동에 직접적으로 영향을 끼친다[7~8]. 본 연구에서는 직접 레이저 용융공정 시 에너지 밀도(레이저 출력, 주사속도)에 따른 용융 특성을 분석하여 용융 높이를 예측하였다. 제작된 분리판의 표면조도 및 접촉저항을 분석하여 금속 분리판 제작을 위한 직접 레이저 용융공정 적용성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 직접 레이저 용융 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 열원으로 최대 출력 200W, 빔 직경 80 μ m, 파장 1.07 μ m인 IPG사의 화이버(fiber) 레이저 YLR-200을 사용하였다. 분말도포를 위한 레이어 바(layer bar)가 설치되어 있으며, 빌드 실린더(build cylinder)의 Z축 방향으로 최소 10 μ m단위의 정밀한 이동에 의해 분말 도포 높이를 제어할 수 있다. 표면 산화방지를 위해 취입 가스로 N₂가스를 사용하였다. Fig. 2는 DLM 공정 과정을 나타낸 것이다. 분말적재, 분말도포, 분말 용융 순서로 공정이 진행되며, 이를 반복적으로 수행하여 3차원 형상의 제품을 얻을 수 있다.

2.2 에너지 밀도에 따른 용융 특성 분석

연료전지 분리판 제작을 위한 DLM 용융 특성에 대해 알아보기 위한 적층 실험을 수행하였다.

Table 1은 DLM 용융 특성 분석을 위한 적층 실험 조건을 나타낸 것이다. 통상적으로 유로 높이 및 폭은 0.1 $\times$ 0.1mm² 크기로 사용되고 있으므로 분말 도포 높이를 0.1mm로 10층 선형상 적층 실험을 수행하여, 에너지 밀도 변화에 따라 레이저 출력 별로 적층되는 용융 높이 및 두께를 분석하고, 에너지 밀도에 대한 적층 높이를 레이저 출력 별로 예측하였다. 식(1)은 에너지 밀도 식으로써, 본 연구에서는 펄스 조사시간(pulse duration), 펄스

Fig. 1 Schematic drawing of direct laser melting (DLM) system

Fig. 2 Schematic drawing of DLM process

Table 1 Experimental condition of line melting test

Power (W)	100, 150, 200
Scan rate (mm/s)	14.64 ~ 65.88
Layering thickness (mm)	0.1
Number of layering (unit)	10

진동수(pulse frequency), 빔 직경(spot size)을 각각 0.02s, 50kHz, 0.08mm로 고정하였다.

Table 2 Chemical compositions of stainless steel 316L

powder (wt. %)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	10~14	16~18	2~3

$$E = \frac{P \times \gamma \times f}{D \times v} \quad (1)$$

E = Energy density (J/mm^2)

P = Laser power (W)

γ = Pulse duration (s)

f = Pulse frequency (kHz)

D = Laser spot size (mm)

v = Scan rate (mm/s)

실험에 사용된 소재는 STS 316L (stainless steel 316L)로 0.15mm 크기의 분말을 사용하였으며, Table 2에 화학성분을 나타내었다.

2.3 DLM공정 특성 분석

DLM공정을 통하여 제작된 분리판의 특성을 평가하기 위하여 공정조건 별 표면조도특성과 압력 변화에 따른 접촉 저항 특성을 분석하였다. Fig. 3은 표면조도와 접촉저항의 측정에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 표면조도는 레이저 진행 방향으로 3 지점, 수직 방향으로 2 지점의 표면조도를 측정하여 평균 값을 제시하였다. 접촉저항 측정은 스택에서의 체결조건과 유사하도록 두 개의 가스 확산 층(gas diffusion layer; GDL) 사이에 시편을 놓고 상부에서 압력을 가하였다. 접촉저항은 전체 저항 값에서 두 개의 GDL의 저항 값을 뺀 값을 ($R_{total} = 2 \times R_{GDL} + R_{SS\ 316L}$) 접촉 저항 값으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 에너지 밀도에 따른 용융특성

3.1.1 레이저 출력에 따른 적층 범위

에너지 밀도에 따라 레이저 출력 별로 적층이 가능한 범위를 Fig. 4에 나타내었다. 균일한 높이로 적층이 가능한 범위는 레이저 출력 별로(100, 150, 200W) 각각 14.23~85.38, 17.08~128.07, 20.09~170.77 J/mm^2 으로 레이저 출력이 증가함에 따라 적층이 가능한 범위가 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 낮은 에너지 밀도 영역에서는 충분한 에너지가 공급되지 않아 분말의 미결합(unconnected)

Fig. 3 Schematics of test; (a) surface roughness and (b) interfacial contact resistance

Fig. 4 Process window for various laser powers

Fig. 5 Side shape and schematics of three different surface pattern; (a) unstable/balling, (b) stable and (c) unstable/unconnected

현상이 나타났고, 높은 에너지 밀도 영역에서는 과도한 에너지로 인해 볼링(balling) 현상이 나타났다.

앞서 설명한 바와 같이 에너지에 따라 발생할 수 있는 세가지 현상에 대해 대표적인 시편과 모식도를 Fig. 5에 나타내었다. 볼링이나 미결합 현상으로 인한 불균일한 형상은 분리판 체결 시 GDL을 파손시킬 수 있기 때문에 분리판 제작 시 균일한 높이로 적층해야 한다.

Fig. 6 Measuring points of line height and width

Fig. 7 Line properties for various laser energy densities; (a) line height and (b) line width

3.1.2 에너지밀도에 따른 높이 및 폭 변화

Fig. 6은 10회 반복 적층에 따른 용융 높이 및 폭의 측정 방법을 나타낸 것이다. 각 조건에서 적층된 시편의 5개의 지점에서 높이와 폭을 측정하여 평균 값을 적층 높이와 폭으로 간주하였다.

Fig. 7은 10회 반복 적층에 따른 용융 높이 및 폭을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 에너지 밀도에 따른 적층 높이를 레이저 출력 별로 나타낸 것이다. 에너지 밀도가 증가할수록 적층 높이도 증가하였으며, 에너지 밀도가 85.38J/mm²일 때, 레이저 출력 별(100, 150, 200W) 적층 높이가 각각 0.994, 0.988, 0.970mm로써 1.0mm에 근접하게 수렴하였다. Fig. 7(b)는 에너지 밀도에 따른 적층 폭을 레이저 출력 별로 나타낸 것이다. 에너지 밀도가 증가할수록 적층 폭도 증가하지만, 적층 높이의 경향과는 달리 적층 폭은 레이저 출력 별로 유사하게 증가하였다. Fig. 7에 보인 바와 같이 동일에너지 밀도에서, 레이저 출력이 높을수록 적층높이는 낮고, 폭은 넓게 형성되었다. 이는 레이저 출력이 높을수록 레이저 강도(laser intensity)가 저출력일 때에 비해 상대적으로 높아서 분말 및 모재에 미치는 영향이 크기 때문이다.

Fig. 8은 레이저 출력에 따른 분말 용융 형태 및 실제 단면 형상을 나타낸 것이다. 레이저 출력이 높을 경우 에너지가 모재까지 침투하여 분말이 용융되면서 표면과의 접촉각이 커지게 된다. 따라서 적층 높이가 낮고 폭이 넓게 형성된다. 레이저 출력이 낮을 경우 모재까지 전달되는 에너지에 비해 분말을 용융시키는데 많은 에너지를 소비하게 된다. 모재로 전달되는 에너지가 낮아지게 되면서 표면과의 접촉각이 작아져 적층 높이는 높고 폭은 좁게 형성된다[9].

Fig. 8 Schematic drawings of powder melting for different laser powers; (a) 200 W and (b) 100 W

Fig. 9 Surface roughness for laser power

Fig. 10 Interfacial contact resistance for laser power

3.2 DLM공정조건에 따른 특성 평가

분리판을 제작하기에 앞서 DLM공정에 따른 특성(표면조도 및 접촉저항)에 대해 알아보았다. Fig. 9에 표면조도의 측정 결과를 나타내었다. 평균표면조도 (average surface roughness; R_a)는 레이저 출력 별로(100, 150, 200W) 각각 9.3, 9.9, 11.1 μm 로 나타났다. 레이저 출력이 증가함에 따라 표면조도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에 압력에 따른 레이저 출력 별 접촉저항을 나타내었다. 일반적으로 스택 체결 시 이용되는 압력인 150 N/cm^2 에서 레이저 출력 별로 (100, 150, 200 W) 각각 78.38, 50.88, 36.99 $\text{m}\Omega$ 로 나타났다. STS 316L plate에 비해 낮은 접촉저항을 나타내었으며, 레이저 출력이 증가할수록 접촉저항은 감소하였다. 레이저 출력이 증가할수록 낮은 접촉저항을 나타내는 것은 표면조도에 기인한다.

Fig. 11 Fabricated bipolar plate by using DLM process

이는 표면조도가 높을수록 압력증가에 따라 접촉되는 표면적이 넓어지기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 DLM 공정을 이용한 분리판 제작

Fig. 11에 DLM 공정을 이용하여 제작된 시험용 분리판을 나타내었는데 미세유로를 포함하는 분리판이 원하는 치수와 형상으로 만족스럽게 제작되었다. 적층 시 가장 우수한 적층형상을 나타내었던 레이저 출력 150W, 주사속도 36.6 mm/s 의 조건으로 10회 반복 적층을 통해 유로 높이 및 폭이 $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 의 활성면적 $30.0 \times 30.0 \text{ mm}^2$ 인 내부 분리판을 제작하였으며, 이러한 연구 결과는 연료전지용 미세분리판의 제작에 DLM공정이 성공적으로 적용 가능함을 보여준다 하겠다.

4. 결 론

(1) 에너지 밀도(레이저 출력 및 주사속도)에 따른 적층 높이 및 두께의 경향을 파악하고 레이저 출력 별 적층 가능 범위를 제시하였다.

(2) 에너지 밀도가 증가함에 따라 적층 높이는 분말 도포 높이에 수렴하였다. 동일한 에너지 밀도에서 레이저 출력이 높을수록 적층 높이는 낮게 나타났고, 에너지 밀도가 낮아질수록 레이저 출력에 따른 적층 높이 차이는 크게 나타났다.

(3) 동일 에너지 밀도에서 레이저 출력이 높을수록 적층 폭은 두껍게 나타났고, 에너지 밀도의 변화에 따른 적층 폭의 차이는 레이저 출력에 따라 유사하게 나타났다.

(4) DLM 공정을 통하여 제작된 시편은 레이저 출력이 증가할수록 표면조도가 거칠게 형성되었다. 이는 과도한 에너지 출력으로 표면에 미세한

불링현상이 발생한 것으로 판단된다.

(5) 레이저 출력이 증가할수록 낮은 접촉저항을 나타내었다. 레이저 출력이 증가할수록 표면조도가 높아져 압력의 증가에 따른 접촉면적이 넓어지면서 접촉저항이 감소하는 것으로 판단된다. GDL이 파손되지 않는 범위 내에서 표면조도는 분리판의 성능향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

(6) 얻어진 DLM 공정특성을 이용하여 시험용 미세분리판을 성공적으로 제작함으로써 DLM 공정의 적용가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004, Fuel Cell Hand Book (Seventh edition), EG&G Technical Services. Inc.
- [2] J. P. Chio, K. S. Kim, Y. H. Seo, B. S. Ku, J. H. Jang, B. H. Kim, 2008, Development of Synthetic Jet Micro Air Pump, Trans. Metal. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 594~599.
- [3] B. R. Padhy, R. G. Reddy, 2006, Performance of DMFC with SS 316 bipolar/end plates, J. Power Sources, Vol.153, No.1, pp. 125~129.
- [4] B. Vandenbrouche, J. P. Kruth, 2007, Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts, J. Rapid Prototyping, Vol.13/4, pp. 196~203.
- [5] K. A. Mumtaz, P. Erasenthiran, N. Hopkinson, 2008, High density selective laser melting of Waspaloy, J. Mater. Process. Technol., Vol. 195, pp. 77~87.
- [6] B. D. Joo, J. H. Jang, H. S. Yim, Y. M. Son, Y. H. Moon, 2009, Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Selective Laser Sintered Fe-Ni-Cr Powder, Trans. Metal. Process., Vol. 18, No.3, pp. 262~267.
- [7] I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Parametric analysis of the selective laser melting process, Appl. Surf. Sci., Vol. 253, pp. 8064~8069.
- [8] A. Simuchi, F. Petzoldt, H. Pohl, 2001, Direct Metal Laser Sintering: Material Considerations and Mechanisms of Particle Bonding, Int. J. Powder Metall., Vol. 37, No. 2, pp. 49~61.
- [9] D. Suman, 2003, Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals, Adv. Eng. Mater, Vol. 5, No.10, pp. 701~711.