

레이저 직접 용융 시 금속분말의 함량조정을 통한 경사물성 부여

한상욱¹ · 지원종¹ · 이철환¹ · 문영훈[#]

Functionally Graded Properties Induced by Direct Laser Melting of Compositionally Selected Metallic Powders

S. W. Han, W. J. Ji, C. H. Lee, Y. H. Moon

(Received April 24, 2014 / Revised June 18, 2014 / Accepted July 11, 2014)

Abstract

Functionally graded properties are characterized by the gradual variation in composition and structure through the volume of the material, resulting in corresponding gradation in properties of the material. Direct laser melting (DLM) is a prototyping process whereby a 3-D part is built layer-wise by melting metal powder with laser scanning. Studies have been performed on the functionally graded properties induced by direct laser melting of compositionally selected metallic powders. For the current study, quadrangle structures were fabricated by DLM using Fe-Ni-Cr powders having variable compositions. Hardness and EDX analysis were conducted on cross-sections of the fabricated structure to characterize the properties. From the analysis, it is shown that functionally graded properties can be successfully obtained by DLM of selected metallic powders with varying compositions.

Key Words : Force Functionally Graded Materials(FGM), Powder Processing, Mechanical Properties, Hardness Test, Direct Laser Melting(DLM)

1. 서 론

경사기능성(functionally graded property)은 미세구조나 화학적 조성을 점진적으로 변화시킴으로써 열적-기계적 물성을 점진적이고 복합적으로 만드는 것을 의미하며, 고온, 부식, 마모 및 충격환경 등과 같은 가혹한 조건에서 장시간 사용되는 부품에 유리한 물성이다. 경사기능재료의 제조방법으로는 세라믹 분말과 금속분말 등을 여러 분율로 섞고, 혼합비율 별로 적층 가압한 후 소결하는 분말 적층법이 많이 적용되어 왔으나 여러 복잡한 제조공정을 거쳐야 하는 단점이 있으므로 경사기능재료의 제조방법을 개선하고 간편화하는 방법에 대한 다양한 연구가

필요한 실정이다[1]. 3D 프린팅 기술은 시제품의 디자인 검증과 조립성 평가를 위한 캐속조형(rapid prototyping)기술로 널리 사용되어 왔으며 근래에는 금속계 분말을 이용하여 원하는 강도와 인성을 갖는 복합형상의 부품을 직접 제작하는 연구가 확대되고 있다[2~5]. 2D 프린터는 2축 운동으로 움직임에 제약이 있지만 3D 프린터는 상하 움직임을 더한 3축 운동을 통해 움직임에 구속이 없으며 3D CAD, 모델링 프로그램, 3D 스캐너 등에서 제품을 직접 만들 수 있어 정확도가 높고 제작 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다[6~8]. 이러한 캐속 조형 공정 중의 하나인 레이저 직접 용융(Direct Laser Melting: DLM) 공정은 금속분말을 레이저로 용융시켜 조형물을 제

1. 부산대학교, 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering/ ERC for Net Shaping and Die Manufacturing, Pusan National University, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

조하는 원리로서, 얇은 층으로 금속분말을 고르게 도포한 후 레이저 빔을 국부적으로 주사하여 분말을 순식간에 용융온도까지 상승시켜 하부층과 용융 결합시킨 후 그 위에 새로운 층을 쌓으면서 원하는 형상을 신속하게 제작하는 기술이다[9~11].

본 연구에서는 두 가지 기준분말(Fe-16Ni-4Cr 분말, Fe-21Cr-8Ni 분말)을 다양한 질량비율로 기계적 합금화를 통해 얻어진 여러 가지 조성의 분말의 적층을 통해 원하는 경도 및 Ni 과 Cr 의 함량을 선택적으로 조절이 가능하다. 이러한 선택적으로 배열된 다양한 성분 계의 분말을 DLM 공정의 쾌속성과 3 차원 성형 자유도를 활용하여 경사기능성 부품을 신속하게 제작하는 방법과 그 특성을 분석함으로써 제조공정에 대한 타당성 연구를 실시하였다.

DLM 공정은 반복적인 적층으로 제품을 만들기 때문에 만약 에너지 입력량이 과할 경우 용융된 분말이 표면장력으로 인하여 구형의 형태를 가진 상태에서 응고되는 볼링(balling) 현상이 발생해 표면이 불규칙하며 다음 분말도포에 어려움이 발생하게 된다[12~14]. 이 밖에도 레이저 출력, 주사 속도, 분말도포 높이, 선간 간격, 보호 분위기[15] 등과 같은 레이저 공정 변수[16]에 따라서 용융부 거동에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 공정 변수들간의 상호 관계를 사전에 파악하여 가장 최적의 조건으로 성형하는 것이 중요하며 본 연구에서는 다양한 공정 조건하에서 예비시험을 통해 적정 DLM 공정 조건을 선정한 후 사각형상의 경사기능성 시료를 제작하여 경사기능성을 분석하였다[17~19].

2. 실험 방법

2.1 실험장치 및 소재

Fig. 1은 본 연구에 사용된 레이저 직접용융 시스템의 개략도를 나타내었다. 레이저 직접용융 시스템의 열원으로는 IPG사의 파이버(fiber) 레이저 YLR-200을 사용하였으며 파이버 레이저는 최대 출력 200W, 파장 1.07 μm , 빔 직경 80 μm 의 사양을 가지고 있다. 레이저의 집속 및 이송을 담당하는 스캐너(scanner)는 SCANLAB사의 hurrySCAN™ 을 사용하였다. 분말 도포를 고르게 할 수 있는 레이어 바(layering bar)가 설치 되어 있으며, 레이저빔 주사 방향으로 최소 10 μm 로 이동이 가능해 분말의 도포를 정밀하게 제어 할 수가 있다. DLM 실험 시 고열로

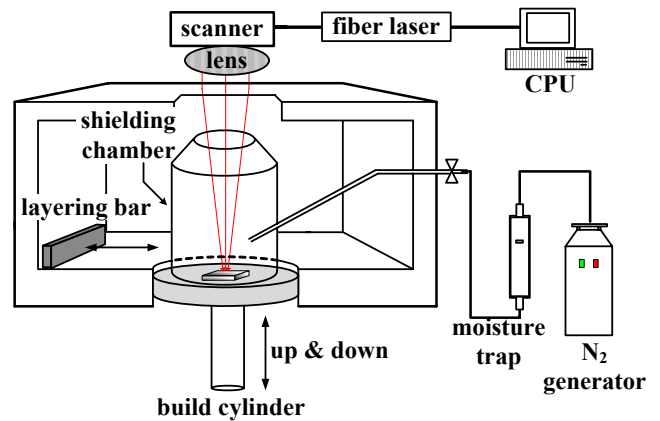
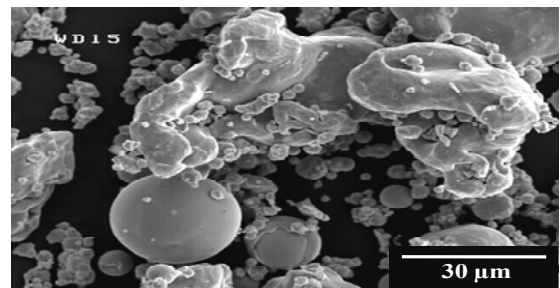
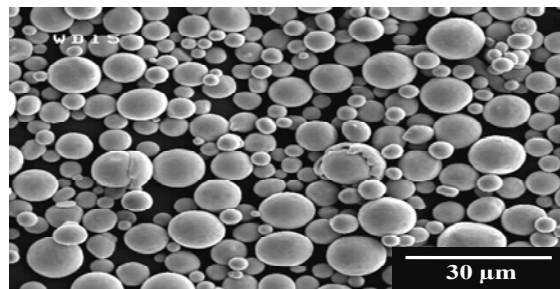


Fig. 1 Schematic drawing of the direct laser melting system



(a)



(b)

Fig. 2 SEM image of powders used for DLM: (a) Fe-16Ni-4Cr, (b) Fe-21Cr-8Ni

인한 산화방지를 위해 차폐용 챔버 내에 N₂가스를 8L/min의 유량으로 공급하며 수행하였으며, 고순도의 N₂를 얻기 위해 N₂발생장치에서 얻어진 N₂가스는 산소 및 수분제거 필터를 거쳐 공급하였다.

레이저 적층을 위한 모재로는 우수한 내마모성, 높은 압축강도 및 경화능을 보유한 냉간 가공용 금형강인 AISI D2를 사용하였으며 12%Cr, 1.5%C, 1%Mo, 0.45%Mn, 0.35%V, 0.25%Si의 화학적 조성을 가지고 있다. Fig. 2는 DLM의 용융재료로 사용한 분말로써, 입자크기가 약 20-30 μm 직경을 가지는 Fe-

Table 1 Chemical composition(wt. %) of powders: (A) Fe-16Ni-4Cr, (B) Fe-21Cr-8Ni

I.D.	Mixing Ratio	Fe	Ni	Cr	Al	Si	Cu	S	Mo	Mn
Fe-16Ni-4Cr	100%A: 0%B	Bal.	15.69	3.96	0.76	0.72	0.32	0.24	0.12	-
Fe-14Ni-8Cr	75%A: 25%B	Bal.	13.83	8.26	0.64	0.74	0.31	0.21	0.15	0.50
Fe-13Ni-10Cr	67%A: 33%B	Bal.	13.21	9.70	0.60	0.74	0.30	0.20	0.15	0.67
Fe-12Ni-13Cr	50%A: 50%B	Bal.	11.97	12.57	0.52	0.76	0.29	0.18	0.17	1.01
Fe-11Ni-15Cr	33%A: 67%B	Bal.	10.73	15.43	0.44	0.77	0.28	0.16	0.18	1.35
Fe-10Ni-17Cr	25%A: 75%B	Bal.	10.11	16.87	0.40	0.78	0.28	0.15	0.19	1.51
Fe-21Cr-8Ni	0%A: 100%B	Bal.	8.25	21.17	0.28	0.79	0.26	0.12	0.21	2.02

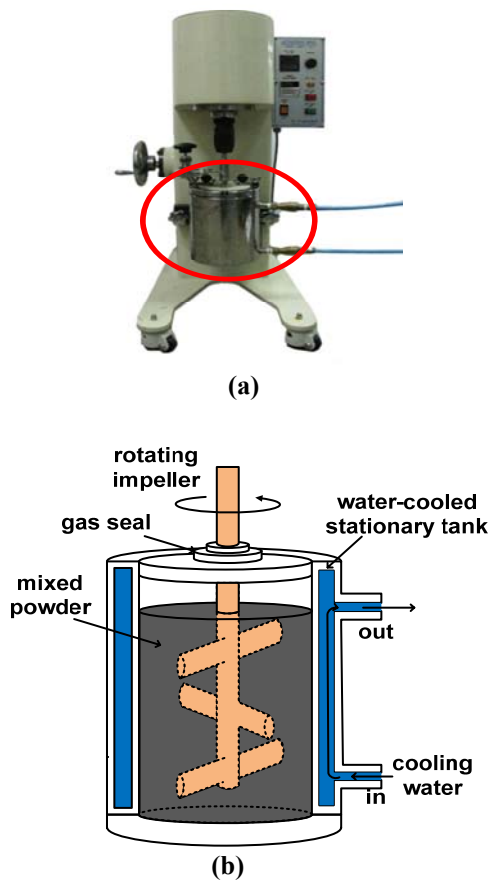


Fig. 3 Milling machine for mechanical mixing(alloying):
 (a) attritor milling(KMD-1B), (b) schematic drawing of powder mixing

16Ni-4Cr 분말과 입자크기가 약 8-14 μm 인 Fe-21Cr-8Ni 분말을 기준 분말로 이용하였다. 2가지 기준분말을 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3의 다양한 질량비율로 기계적 교반(mechanical mixing)시켜 여러 가지 조성의 분

말을 얻고 이를 이용하여 DLM 시험을 수행하였다. 기계적 교반은 Fig. 3(a)에 나타난 분쇄밀링기(KMD-1B)를 이용하여 수행하였다. Fig. 3(b)는 기계적 합금화 방법의 모식도를 나타낸 것으로 분말의 단순 혼합을 위해 밀링용 지르코니아 볼(zirconia ball)을 제거하여 단순 교반을 실시하였다. 교반 시간은 30분으로 하였으며 교반 회전 속도는 600rpm으로 고정하여 실험을 수행하였다. 밀링 중 온도 상승으로 인한 분말 오염을 최소화하기 위하여 냉각수로 순환 냉각 하였다. 최종적으로 얻어진 혼합분말의 최대입도는 17~23 μm 수준이었으며, 혼합비율 별로 제작된 분말의 이론적 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 사각형상 예비 적층 실험

원료분말 및 각각의 혼합비대로 제작한 분말의 DLM 용융 특성을 파악하기 위해 사각형상 적층 실험을 실시하였다. Fig. 4는 사각형상 적층 시 분말의 용융 패턴을 나타내었다. 단일방향으로 레이저를 조사할 경우 시작지점과 끝지점의 비정상부 용융층 두께가 상대적으로 높아지므로, 단일방향으로 지속적인 적층을 수행하게 되면 시작지점과 끝지점의 편평도 불량으로 인해 적층 한계에 부딪히게 된다. 따라서 시작점을 0°, 90°, 180°, 270°로 회전시키는 크로스 해칭 주사(cross hatching scanning)방식을 이용하여 적층을 수행하였다[20,21].

제작된 사각형상의 단면부는 표면 연마를 통해 이미지 분석 프로그램(TDI Plus 5.0)을 이용하여 단면부의 형상을 라벨링(labeling)하여 내부 충진율을 분석하였으며, 충진율 결과를 바탕으로 DLM 공정을 위한 적정 조건을 선출하여 사각형상 적층에 적용

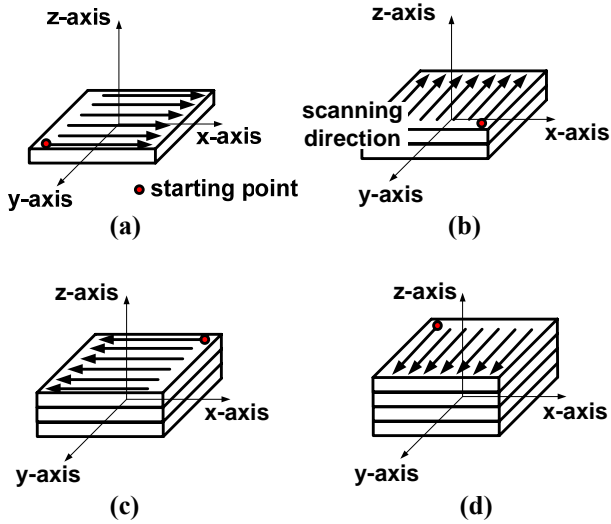


Fig. 4 Schematic of cross hatching scanning technique: (a) first layer(0°), (b) second layer(90°), (c) third layer(180°), (d) fourth layer(270°)

Table 2. Processing condition for DLM tests

Laser power (W)	200
Scan rate (mm/s)	110, 150
Powder layer thickness (μm)	40
Fill spacing (μm)	60

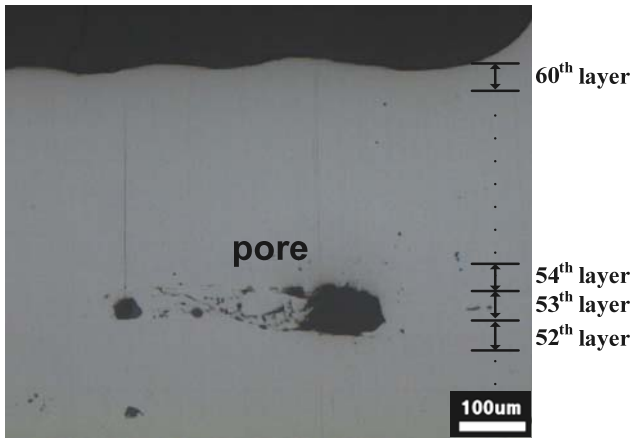


Fig. 5 Cross sectional view showing process-induced pores(scan rate 150mm/s)

하였다. 세부적인 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

적층을 위한 적정 조건을 선정하기 위해 Fe-16Ni-4Cr 분말을 이용하여 레이저 출력 200W, 주사속도 110, 150mm/s에서 적층 두께 40μm로 반복적인 적층을

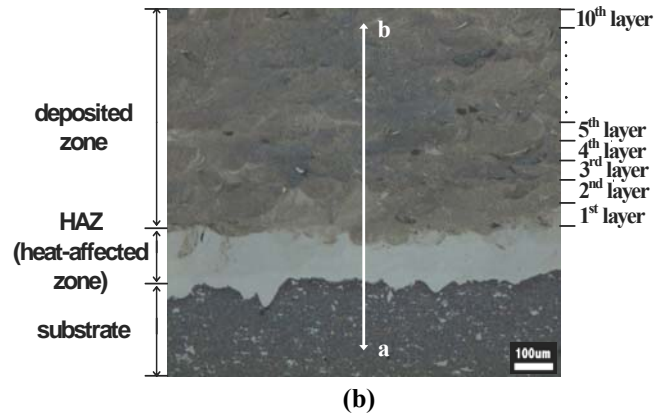
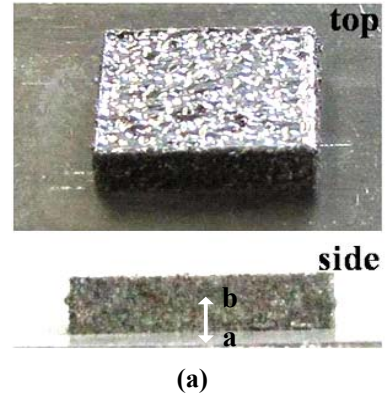


Fig. 6 Deposited simple quadrangle structure from scan rate 110mm/s: (a) fabricated quadrangle shape, (b) cross-sectional microstructures

통해 60층 구조물인 높이 3mm의 사각형상 제작을 실시하였다. 적층부의 성형 건전성을 평가하기 위해 적층 단면의 충진율을 측정해 본 결과, 주사속도 110mm/s 에서는 99.8%의 높은 충진율을 보인 반면 주사속도 150mm/s의 경우 내부 충진율은 99.5%로 낮게 나타났다. 분말 적층 시 하부층과의 결합을 위해 깊은 범위까지 에너지가 전달 되어야 하지만 주사속도 증가로 인해 레이저 빔이 도포된 분말층을 충분히 용융시키지 못해서 150mm/s의 경우 미충진부가 발생한 것으로 판단된다. 150mm/s 적층시편의 단면분석시 52~54층 사이에서 관찰된 약 100μm 크기의 미충진부를 Fig. 5에 나타내었다. 따라서 이후의 DLM 시험에서는 주사속도를 110mm/s로 설정하여 시험을 실시하였다.

Fig. 6은 레이저 출력 200W, 주사속도 110mm/s 조건에서 제작된 사각구조물의 형상을 나타낸 것으로 우수한 형상 치밀도 및 내부 충진율을 보였다.

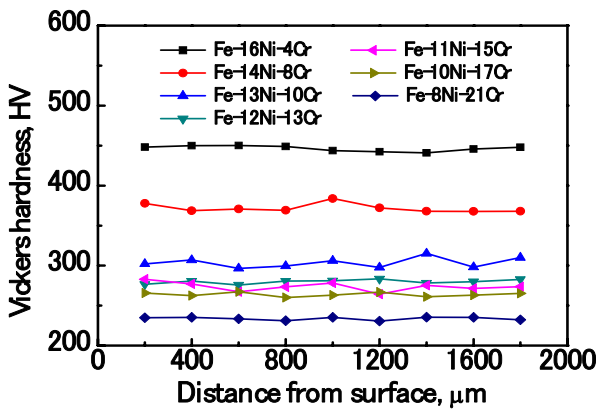


Fig. 7 Vickers hardnesses of various powders

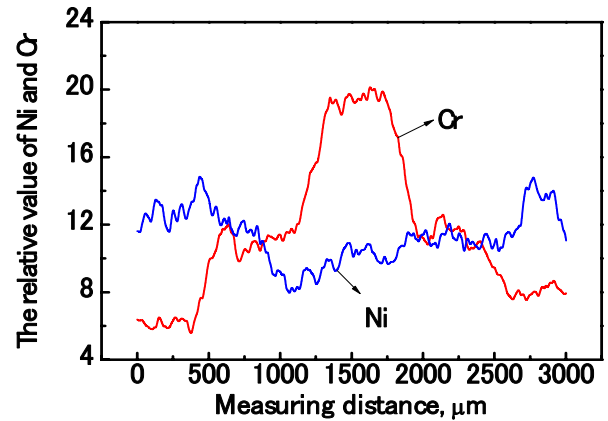


Fig. 9 Variations of Ni and Cr contents measured along z-axis direction

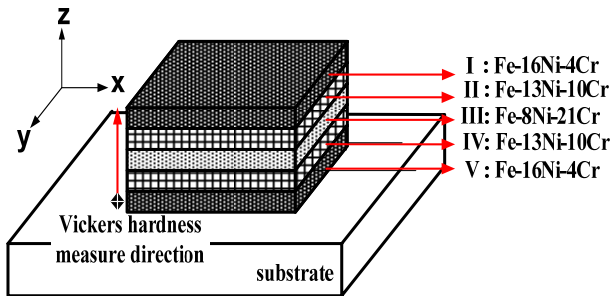


Fig. 8 Schematic drawing of functionally graded quadrangle along z-axis direction

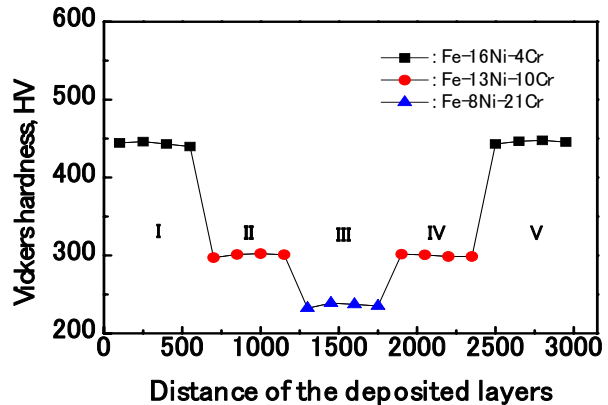


Fig. 10 Vickers hardness distribution of functionally graded quadrangle along z-axis direction

3. 결과 및 고찰

3.1 단일사각형상 적층을 통한 물성평가

예비 적층 시험에서 얻어진 DLM 공정 변수인 레이저 출력 200W, 주사속도 110mm/s 의 공정조건 하에서, 다양한 혼합비율로 제작된 분말을 각각 레이저로 용융시켜 단일사각형상 적층 실험을 수행하였다. Fig. 7은 DLM 공정을 통해 형성된 적층부의 경도 분포를 나타낸 것으로 경도는 모재에서 적층부 방향으로 200 μ m 간격으로 측정하였다. Fe-16Ni-4Cr 용융층의 평균 경도 값은 446.4HV로써 가장 높은 경도 분포를 보였으며 Fe-21Cr-8Ni 층은 233.7HV 가장 낮은 경도 분포를 보였다. Fe-16Ni-4Cr 분말과 Fe-21Cr-8Ni 분말의 혼합비 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3으로 제작된 분말의 용융층은 각각 303.6, 279.9, 273.7, 263.8HV의 평균경도를 보였다. 혼합비율 중 Ni분말의 상대분율이 높을수록 높은 경도를 보였고, 반면에 Cr 분말의 상대분율이 높을수록 경도가 낮았다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8의 경도분

포를 토대로 다양한 분말을 임의의 선택하여 적층을 수행함으로써 원하는 경사 물성을 갖는 구조물을 제작하였다.

3.2 복합성형 된 사각형상의 경사기능성 분석

단일사각형상 적층의 결과를 바탕으로 분말별 차이에 따른 차등적 물성을 부여한 두 가지 경우의 복합사각형상 적층 실험을 수행하였다. Fig. 8은 z축 방향으로 경사기능을 부여하기 위해 적층 방향으로 조성을 달리하는 분말을 레이저 적층시키는 개략도를 나타내고 있다. 그림에 보인 바와 같이 Fe-16Ni-4Cr, Fe-21Cr-8Ni, 각각의 분말을 2:1로 혼합한 Fe-13Ni-10Cr 분말을 이용하여 각층의 높이가 600 μ m인 5층 사각구조물(총 높이 3,000 μ m)을 제작하였다.

Fig. 9는 적층된 사각구조물에 대한 EDX 분석

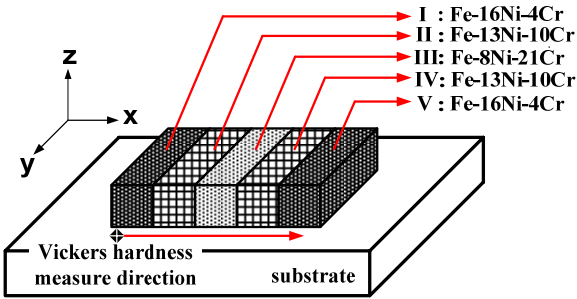


Fig.11 Schematic drawing of functionally graded quadrangle along x-axis direction

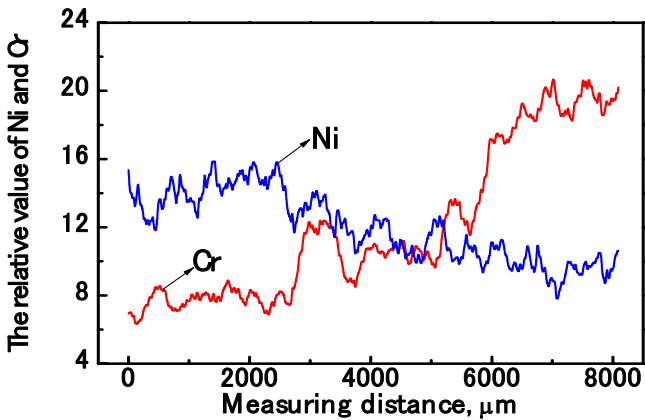


Fig.12 Variations of Ni and Cr contents measured along x-axis direction (half section)

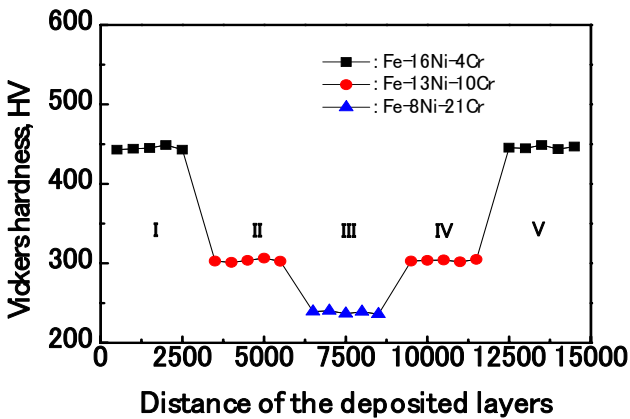


Fig.13 Vickers hardness distribution of functionally graded quadrangle along x-axis direction

(HORIBA사의 7593-H)을 통해 얻어진 Ni 과 Cr성분의 상대함량을 나타내고 있다. 적층 시 사용된 분말의 함량에 상응하는 차등적 조성을 갖는 구조물이 의도한 형태로 제작되었음을 잘 보여주고 있다.

Fig. 10은 z축 방향으로 각층마다 차등적 조성을 갖는 분말을 이용하여 적층한 사각 구조물의 단면부 경도분포를 150 μ m 간격으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fe-16Ni-4Cr 분말을 이용하여 적층한 I, V 층은 약 450HV, Fe-13Ni-10Cr 분말을 이용한 II층과 IV층은 약 300HV, Fe-21Cr-8Ni 분말을 이용하여 적층한 III층은 약 230HV로 단일사각형상 적층에서 얻은 경도 결과와 유사한 평균경도분포를 보였다.

Fig. 11은 x축 방향으로 차등적 조성을 갖는 분말을 사용하여 적층을 수행한 복합사각구조물을 나타낸 것이다. Fig. 12의 EDX 분석 결과에서 보인 바와 같이 x축 방향으로 Ni 과 Cr성분의 함량이 적층시 사용된 분말의 함량에 상응하는 차등적 조성을 보임을 알 수 있다.

Fig. 13에 나타난 경도는 x축 방향으로 I층의 용융층 끝단부에서 안쪽으로 500 μ m 지점을 경도 측정시작점으로 하여 V층까지 500 μ m의 일정간격으로 측정하였다. I층의 Fe-16Ni-4Cr 층인 500~2500 μ m 구간에서는 약 450HV의 일정한 분포를 보이다가 II층의 Fe-13Ni-10Cr층인 3500 μ m지점에서는 약 300HV로 감소한 후 5500 μ m까지 일정한 경도분포를 보였다. III층의 Fe-21Cr-8Ni 층인 6500~8500 μ m 구간에서는 230HV로 감소하다가 IV층에서 V층으로 갈수록 평균경도가 각각 300, 450HV 수준으로 증가하였다.

이상의 단순 및 복합 사각형상 적층 실험 결과를 볼 때 여러 조성의 분말을 선택적으로 사용하여 각층마다 차등적인 물성을 가지는 구조물을 DLM 공정을 통해 제작할 수 있으며, 분말의 혼합 비율을 선택적으로 조절하여 원하는 경사물성을 제한 없이 구현할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 DLM 공정의 쾌속성과 3 차원 성형 자유도를 활용하여 경사기능성 부품을 제작하는 방법에 대한 타당성 연구를 실시하였다. 다양한 조성의 시험용 분말은 Fe-21Cr-8Ni, Fe-16Ni-4Cr 기준분말을 일정 혼합비율로 기계적으로 혼합하여 얻을 수 있었으며 이 분말을 이용하여 경사물성 구조물을 DLM 공정으로 제작하였다. 단일사각형상의 적층을 통해서 각 분말의 적층된 층의 경도를 파악하고 Fe-16Ni-4Cr, Fe-21Cr-8Ni, 각각의 분말을 2:1 로 혼합한 Fe-13Ni-10Cr 인 세 가지 분말을 이용하여 복합사각

형상의 적층을 수행한 결과 구조물에 대한 EDX 분석이 Ni 과 Cr 이 단일사각형상 적층 구조물과 같은 상대비율을 가지고 있고 각 적층된 층의 경도측정을 통해 단일사각형상 적층실험에서 측정되었던 경도와 동일한 값을 가졌다. 이러한 결과로 경사성 물성을 선택적으로 얻을 수 있음을 확인하였으며 적층분말의 함량과 적층 순서를 선택적으로 조절한 DLM 공정은 고신뢰성의 경사물성을 구현하는데 타당한 공정임을 제시하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. Zhao, X. Ai, J. Deng, Z. Wang, 2004, A Model of the Thermal Shock Resistance Parameter for Functionally Gradient Ceramics, *Mater. Sci. Eng., A* 382, pp. 23~29.
- [2] A. Butscher, M. Bohner, N. Doebelin, S. Hofmann, R. Muller, 2013, New Depowdering-friendly Designs for Three-dimensional Printing of Calcium Phosphate Bone Substitutes, *Acta Biomater.*, Vol. 9, No. 11, pp. 9149~9158.
- [3] G. N. Levy, R. Schindel, J. P. Kruth, 2003, Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives, *CIRP Ann. Mfg Technol*, Vol. 52, No. 2, pp. 589~609.
- [4] J. H. Jang, Y. H. Moon, 2012, Laser Processing Technology Using Metal Powders, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 50, No. 3, pp. 191~200.
- [5] E. Vorndran, M. Klarner, U. Klammert, L. M. Grover, S. Patel, J. E. Barralet, U. Gbureck, 2008, 3D Powder Printing of β -Tricalcium Phosphate Ceramics Using Different Strategies, *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 10, No. 12, pp. 67~71.
- [6] K. Lu, W. T. Reynolds, 2008, 3DP Process for Fine Mesh Structure Printing, *Powder Technol.*, Vol. 187, No. 1, pp. 11~18.
- [7] A. Budding, T. H. J. Vaneker, 2013, New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques, *Procedia CIRP* 6, pp. 527~532.
- [8] M. Turker, D. Godlinski, F. Petzoldt, 2008, Effect of Production Parameters on the Properties of IN 718 Superalloy by Three-dimensional Printing, *Mater. Charact.*, Vol. 59, No. 12, pp. 1728~1735.
- [9] J. H. Jang, S. M. Mun, T. H. Kim, Y. H. Moon, 2012, Process Analysis of Direct Laser Melting to Fabricate Layered Hybrid Beads, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 813~819.
- [10] Y. Pupo, J. Delgado, L. Serenó, J. Ciurana, 2013, Scanning Space Analysis in Selective Laser Melting for CoCrMo Powder, *Procedia Eng.*, Vol. 63, pp. 370~378.
- [11] J. H. Jang, B. D. Joo, S. M. Mun, M. Y. Sung, Y. H. Moon, 2011, Application of Direct Laser Melting to Restore Damaged Steel Dies, *Met. Mater. Int.*, Vol. 17, No. 1, pp. 167~174.
- [12] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. Bültmann, 2011, High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts, *Physics Procedia*, Vol. 12, Part. A, pp. 271~278.
- [13] X. Su, Y. Yang, 2012, Research on Track Overlapping during Selective Laser Melting of Powders, *J. Mater.Process.Technol.*, Vol. 212, No. 10, pp. 2074~2079.
- [14] J. H. Jang, B. D. Joo, S. M. Mun, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon, 2011, Application of a Direct Laser Melting Process for Fabricating a Micropattern in Bipolar Plates used in Direct Methanol Fuel Cells, *IMEchE, Part B, J. Eng. Manuf.*, Vol. 225, No. 10, pp. 1784~1791.
- [15] S. W. Han, S. G. R. Shin, B. D. Joo, C. H. Lee, Y. H. Moon, 2013, The Effect of Shielding Gas on Forming Characteristics for Direct Laser Melting, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 6, pp. 334~339.
- [16] J. H. Song, Y. Zhang, J. S. Lee, S. J. Park, D. S. Choi, G. A. Lee, 2012, Bending Characteristics of DP980 Steel Sheets by the Laser Irradiation, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 6, pp. 378~383.
- [17] J. D. Majumdar, I. Manna, A. Kumar, P. Bhargava, A. K. Nath, 2009, Direct Laser Cladding of Co on Ti-

- 6Al-4V with a Compositionally Graded Interface, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 5, pp. 2237~2243.
- [18] B. D. Joo, J. H. Jang, J. H. Lee, Y. M. Son, Y. H. Moon, 2010, Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 26, No. 4, pp. 375~378.
- [19] D. Gu, Y. Shen, S. Fang, J. Xiao, 2007, Metallurgical Mechanisms in Direct Laser Sintering of Cu-CuSn-CuP Mixed Powder, *J. Alloys Compd.*, Vol. 438, No. 1-2, pp. 184~189.
- [20] J. Sun, Y. Yang, D. Wang, 2013, Parametric Optimization of Selective Laser Melting for Forming Ti6Al4V Samples by Taguchi Method, *Opt. Laser Technol.*, Vol. 49, pp. 118~124.
- [21] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. V. Humbeeck, J. P. Kruth, 2010, A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V, *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 9, pp. 3303~3312.