

레이저 적층조형을 이용한 P21 툴 스틸과 Cu 간 기능성 경사 복합재의 제작[§]

정 종 설* · 신 기 훈**†

* 서울과학기술대학교 NID 융합기술전문대학원, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학부

Fabrication of Functionally Graded Materials Between P21 Tool Steel and Cu by Using Laser-Aided Layered Manufacturing

Jong-Seol Jeong* and Ki-Hoon Shin**†

* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received June 18, 2012 ; Revised August 17, 2012 ; Accepted August 20, 2012)

Key Words: Layered Manufacturing(적층 조형), Functionally Graded Materials(기능성 경사 복합재), P21 Tool Steel(P21 툴 스틸)

초록: 적층조형 방법의 개발로 열전도성 금형 혹은 형상적응형 냉각회로를 구비한 금형의 제작이 가능하게 되었다. 금형의 재질로 치수변화가 적은 P21 툴 스틸이 널리 사용되고 있지만, 열전도율이 낮기 때문에 냉각효율은 높지 않다. 이러한 점에서 열전달 효율을 극대화 시킬 수 있는 방법으로 P21 스틸과 구리(Cu)를 기능적으로 혼합한 기능성 경사 복합재(FGM)를 사용하는 방법이 검토되고 있다. 본 논문에서는 FGM 구조를 가지는 금형의 적층조형을 위한 예비연구로 P21-Cu 간의 1 차원 FGM 을 DMT 장비를 이용하여 제작하고, 열전달 관련 물성치를 평가하였다.

Abstract: With the development of layered manufacturing, thermally conductive molds or molds embedding conformal cooling channels can be directly fabricated. Although P21 tool steel is widely used as a mold material because of its dimensional stability, it is not efficient for cooling molds owing to its low thermal conductivity. Hence, the use of functionally graded materials (FGMs) between P21 and Cu may circumvent a tradeoff between the strength and the heat transfer rate. As a preliminary study for the layered manufacturing of thermally conductive molds having FGM structures, one-dimensional P21-Cu FGMs were fabricated by using laser-aided direct metal tooling (DMT), and then, material properties such as the thermal conductivity and specific heat that are related to the heat transfer were measured and analyzed.

1. 서 론

최근에 와서 미시간 대학의 DMD(Direct Metal Deposition),⁽¹⁾ 스탠포드 대학의 SDM (Shape Deposition Manufacturing),⁽²⁾ MIT 대학의 3DP (3-Dimensional Printing)⁽³⁾ 그리고 국내 기업인 인스텍사의 DMT(Laser-aided Direct Metal Tooling)⁽⁴⁾ 등의 금속 분말기반 적층조형 방법의 개발로 열전도성

금형 혹은 형상적응형 냉각회로 (conformal cooling channel)^(5,6)를 구비한 금형의 제작이 가능하게 되었다.

한편 금형의 재질로 열저항력이 크고, 치수변화가 적은 P21(혹은 H13) 툴 스틸이 널리 사용되고 있지만, 열전도율이 낮기 때문에 냉각효율은 그다지 높지 않아 사출주기를 단축시켜 생산성을 향상시키는 데는 한계가 있다.

이러한 점에서 열전달 효율을 극대화 시킬 수 있는 방법으로 P21 스틸과 구리(Cu)를 기능적으로 혼합한 기능성 경사 복합재(FGM)를 사용하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.⁽⁷⁻¹²⁾ Beal^(7,8) 등은 SLS(Selective Laser Sintering) 방식의 레이저

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26.-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, shinkh@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

장비를 이용하여 간단한 H13-Cu FGM 형상을 제작하고 분석하였다. 하지만 SLS 방식은 혼합분말을 미리 균일하게 도포한 층에 레이저 광을 선택적으로 조사하는 방식이기 때문에 궁극적으로는 완전한 3 차원 FGM 의 제작에는 적합하지 않다. 본 연구에서 사용한 DMT (혹은 DMD) 방식은 이론적으로 다수의 금속분말 호퍼를 구비하고 각 호퍼에서 공급되는 금속분말의 혼합비율을 실시간으로 가변하여 원하는 성분의 분말을 적층할 수 있으므로 궁극적으로는 3 차원 FGM 의 제작에 가장 적합한 방식이라고 할 수 있다.

한편 Ahn 등^(13,14)은 P21 톨 스틸, Monel 400, Ampcoloy 940 등의 3 종 재료를 각각 몰드층, 중간층, 지지층에 적용하여 FGM 과 유사한 열전도성 금속형 코어를 설계, 해석, 제작하였다. 본 연구진은 H13-Cu 간의 FGM 을 형상적응형 냉각회로 적용할 수 있는 모델링 및 해석방법을⁽¹¹⁾ 제안하였으나, 해석에 사용된 물성치는 실험에서 얻어진 것이 아니라 H13 과 Cu 의 기본 물성치를 혼합법칙으로 계산한 것이어서 정확도는 보장할 수 없었다.

본 논문에서는 FGM 구조를 가지는 금속형의 적층조형을 위한 예비연구로 P21-Cu 간의 1 차원 FGM 을 DMT 장비를 이용하여 제작하고, 사출주기 해석에 필요한 열전달 관련 물성치를 측정하고 평가하였다. 구체적으로 P21 톨 스틸과 Cu 를 각각 100:0 wt%, 80:20 wt%, 60:40 wt%, 40:60 wt%, 20:80 wt% 비율로 사전에 혼합한 금속분말을 적층하고 각 층에 대한 합금조성을 관찰하고 열전도도 및 비열 등을 측정하고 분석하였다.

2. 시험편 모델링 및 제작

2.1 시험편 모델링

기능성 경사 복합재는 n 개의 주성분 재료(primary material)로 구성되므로, 임의의 점 \mathbf{x} 에서 재질성분은 주성분 재료의 부피 퍼센트(volume fraction)로 표현된다. 이 부피 퍼센트는 n 차원 점 \mathbf{v} 로 표시되며, 이들의 집합(\mathbf{V})은 \mathbf{R}^n 공간의 부분 집합으로 아래의 식 (1)과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$\mathbf{V} = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{R}^n \mid \|\mathbf{v}\|_1 = \sum_{i=1}^n v_i = 1 \text{ and } v_i \geq 0 \right\} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 v_i 는 i 번째 주성분 재료의 부피 분율을 나타낸다. 그러므로 재질성분 함수 F 는 식 (2)와 같이 3 차원 공간에서 임의의 점 $\mathbf{x}(\in \mathbf{E}^3)$ 를

n 차원 재질성분 점 $\mathbf{v}(\in \mathbf{R}^n)$ 으로 대응시키는 일대일 매핑(one to one mapping)이 된다.

$$F(\mathbf{x}) \equiv \mathbf{v} = \{v_i\} \quad (2)$$

본 연구는 형상적응형 냉각회로를 구비한 열전도성 사출금형의 제작을 위한 예비 연구로서 P21 톨 스틸과 Cu 간의 1 차원 FGM 의 레이저 적층조형을 목표로 하고 있다. Fig. 1(a)는 본 연구진 개발하고 있는 복합재 형상모델러에서 모델링된 FGM 모델을 보여주고 있다. 2 개의 주재질성분(P21, Cu)으로 구성되어 있기 때문에, 재질성분 함수는 아래 식 (3)와 같이 다시 쓸 수 있다. 본 논문에서는 $t = 6.25\text{mm}$ 두께를 가지며 z 축을 따라 재질성분이 P21 에서 Cu 로 변화하는 FGM 제작을 위하여 식 (3)과 같은 재질성분함수를 사용하였다.

$$F(\mathbf{x}) = \mathbf{v}(\mathbf{x}) = [v_{P21}, v_{Cu}]^T = [f_1(z), 1 - f_1(z)]^T \quad (3)$$

$$f_1(z) = 1 - \frac{1}{t}z = 1 - \frac{1}{6.25}z$$

적층조형 머신들이 제작할 수 있는 재질성분비에는 한계가 있기 때문에 근사화 과정이 필요하다. Fig. 1(b)는 근사화 정도(resolution) $\gamma = 0.2$ (20%)로 근사화된 재질성분함수 $f_1(z)$ 를 보여주고 있다.

근사화에 의해 분해된 5 개 영역의 재질성분

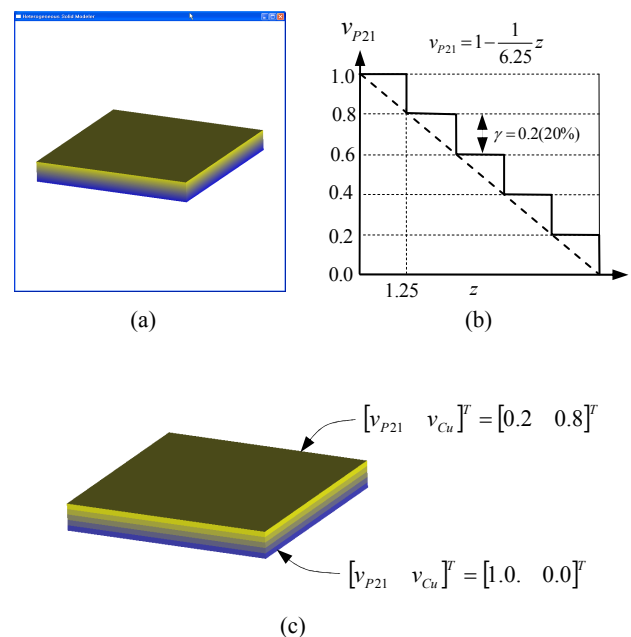


Fig. 1 Modeling of 1-dimensional P21-Cu FGM : (a) heterogeneous solid model, (b) discretization of the composition function, (c) discretized solid model

$\mathbf{v} = [v_{P21} \ v_{Cu}]^T$ 은 Fig. 1(c)와 같이 각각 $[1.0 \ 0.0]^T$, $[0.8 \ 0.2]^T$, $[0.6 \ 0.4]^T$, $[0.4 \ 0.6]^T$, $[0.2 \ 0.8]^T$ 이 된다.

2.2 시험편의 레이저 적층

적층될 FGM 시험편과의 접합을 용이하게 하기 위하여, 먼저 표면을 샌드 블라스트(sand blast) 처리하여 이물질질을 제거한 두께 26 mm, 가로 100 mm, 세로 100 mm 인 P21 지지층(substrate)을 Fig. 2(a)와 같이 준비하였다. Fig. 2(a)에는 적층조형될 각 층(layer)의 구체적인 재질성분비 및 치수가 소개되어 있다.

P21 톨 스틸의 화학적 구성성분은 Table 1 과 같다. 진술한 바와 같이 본 연구에서는 인스텍사의 MX-3(최대 출력 3 kW) DMT 레이저 적층머신을 이용하였다. 실제 적층에서는 출력이 1~1.8 kW, 빔 사이즈 (focused beam size) 1 mm 인 CO₂ 레이저가 사용되었다.

적층과정 동안 공급되는 혼합분말의 양은 여러 번의 시행착오를 3 g/min 으로, 레이저 빔의 이송 속도는 0.85 m/min 으로 최적화 하였다. 적층순서는 Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 P21 지지층 위에 P21:Cu 100:0 wt%, 80:20 wt%, 60:40 wt%, 40:60 wt%, 20:80 wt%인 혼합분말층을 순차적으로 생성하였다. 각 동일성분의 합금층은 적층 두께 (layer thickness) 0.25 mm 로 5 회 반복 적층하여 총 1.25 mm 두께가 되도록 적층하였다. 적층에 사용한 레이저 경로는 Fig. 2(b)와 같이 중앙에서 시작되는 사각형 모양의 스파이럴 경로로, 경로간격(pitch) 0.5 mm, 경로간 오버랩률(overlap ratio) 50%를 사용하였다. Fig. 2(c)는 인스텍사의 MX-3 DMT 레이저 머신으로 적층된 FGM 시험편을 보여주고 있다. Fig. 2(b)에서 설명한 사각형 모양의 스파이럴 적층경로가 비교적 뚜렷하게 관찰됨을 알 수 있다.

2.3 시험편 가공

Fig. 3 과 같이 각 층의 조직 및 물성치를 분석하기 위하여, 시험편을 세로방향으로 절단 한 후 절단면을 미세 연마하였다. 또 미세조직 사진 및 열전도도 등의 측정을 위하여 Fig. 4 와 같이 각 층에서 직경 12.7 mm, 두께 1.25 mm 로 와이어 컷팅 한 후 샌딩, 폴리싱으로 위 아래 성분이 혼합되는 일부분을 제거하여 두께 0.75mm 로 각 시험편들을 가공하여 준비하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면 조직

각 층의 조직은 ASTM E407:2007e1 규격을

Table 1 Chemical compositions of P21 (AISI B 1112)

| Material | Fe | Al | C | Cr | Mn | Ni | Si | V |
|----------|-------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| wt(%) | 93.45 | 1.2 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 4.1 | 0.3 | 0.2 |

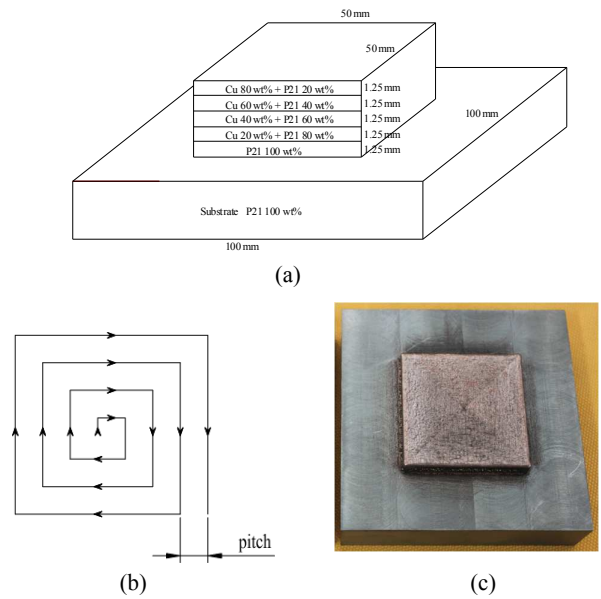


Fig. 2 Fabrication of a P21-Cu FGM part by DMT : (a) detailed dimensions of the specimen , (b) laser path on a layer, (c) fabricated FGM part

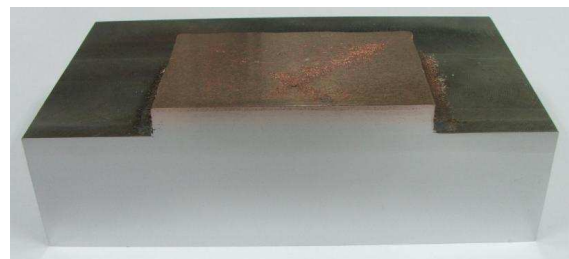


Fig. 3 Sectional image of the FGM part

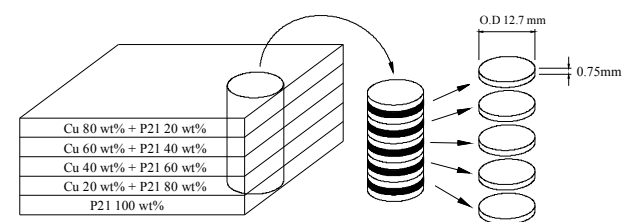


Fig. 4 Preparation of specimens for the measurement of thermal conductivity

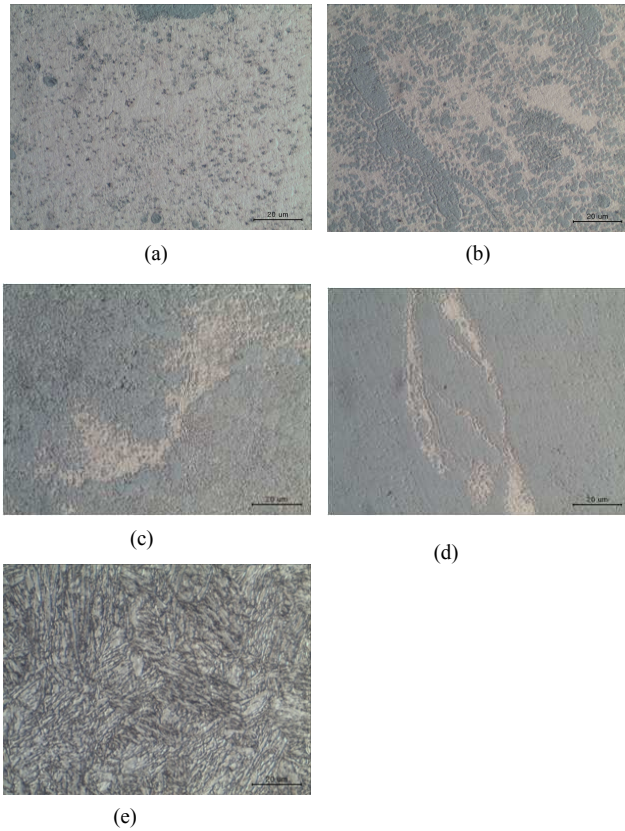


Fig. 5 Optical images of FGM layers: (a) P21 80-Cu20wt%, (b) P21 60-Cu40 wt%, (c) P21 40-Cu60 wt%, (d) P21 20-Cu80 wt%, (e) P21 100-Cu0 wt%

기반으로 $\text{FeCl}_3(0.5\text{g})+\text{HCl}(50\text{ml})+\text{H}_2\text{O}(100\text{ml})$ 에서 30 sec. Ethanol(96%)90ml+Nitric Acid(1.4) 10ml 로 에칭을 한 후 표면을 광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 5 은 각 층 표면 조직의 이미지를 보여주고 있다. 100 wt% P21 의 경우 기공(porosity)이 적으며, 고운 덴드라이트(dendrite) 조직이 관찰되는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾ 한편 Cu 의 함량이 20 wt% 정도로 비교적 작은 경우에는 균일한 미세조직이 관찰되지만, Cu 의 wt%가 60% 이상으로 증가하면 불균일한 미세조직이 관찰되는 것으로 확인되었다.

3.2 열전도도

레이저 섬광법(laser flash method)에 의한 열전도율($k=\alpha C_p \rho$)은 레이저 섬광에 의한 열확산계수(α), DSC (Differential Scanning Calorimetry)에 의한 비열(C_p), 아르키메데스의 원리를 이용한 용적 밀도(ρ)로 부터 결정된다. 따라서 각 물성치를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 열전도도를 측정은 NETZSCH 사 LFA447 장비를 사용하여 상온에서 측정하였다. Table 2 는 알려져 있는 P21 과

Table 2 Material properties of P21 and Cu

| Property | P21 | Cu |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Density ρ (g/cm ³) | 7.800 | 8.940 |
| Specific heat C_p (J/g·K) | 0.460 | 0.385 |
| Thermal conductivity k (W/m·K) | 38 | 401 |

Table 3 Material properties of specimens

| Composition(wt%) | Density (g/cm ³) | Cp (J/gK) | Diffusivity (mm ² /s) | Conductivity (W/m K) |
|-------------------------|------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|
| P21 100 wt% | 7.758 | 0.462 | 6.768 | 24.258 |
| P21 80 wt% Cu 20 wt% | 8.192 | 0.432 | 7.498 | 26.535 |
| P21 60 wt% Cu 40 wt% | 8.462 | 0.415 | 11.255 | 39.525 |
| P21 40 wt% Cu 60 wt% | 8.563 | 0.408 | 14.715 | 51.408 |
| P21 20 wt% Cu 80 wt% | 8.606 | 0.402 | 19.955 | 69.037 |

Cu 의 기본 물성치를 보여주고 있다. Table 3 은 적층된 각 층별 밀도, 비열, 열확산계수 및 열전도도의 측정값을 나타내고 있다. Table 3 에서 보는 바와 같이 P21 100 wt%의 열전도도 값을 기준으로 Cu 20wt%에서는 9.4%, Cu 40wt%에서는 62.94%, 60wt%에서는 111.92 %, Cu 80wt%에서는 184.6% 각각 증가한 것으로 나타났다. Fig. 6 과 7 은 식 (4)의 혼합법칙(Voigt rule)을 부피분율로 적용한 이론치와 실험에서 얻은 각 조성별 밀도와 열전도도를 그래프로 나타낸 것이다. 식 (4)에서 ρ 는 밀도, 비열, 열전도율 등의 물성치를 의미한다.

$$P_{mixture} = P_{P21}V_{P21} + P_{Cu}V_{Cu} \quad (4)$$

Fig. 7 에서 특이한 점은, 적층된 시편에서 측정된 열전도도 값이 단순한 혼합법칙을 적용하여 예측할 수 있는 이론적인 열전도도 값과 Cu 함량이 증가할수록 큰 차이를 보인다는 것이다. P21 100%의 경우도 적층된 시편의 열전도도(24)가 알려진 P21 의 열전도도(38)도 보다 약 37% 정도 작게 측정되는 데, 이는 금속 분말의 레이저 적층으로 인해 발생하는 미세 기공의 영향으로 추측된다. Cu 함량이 증가할수록 열전도도 차이가 커지는 것은, 미세기공의 영향뿐만 아니라 P21 과 Cu 가 전율고용체 합금이 아니기 때문에 수반되는 물성치의 변화가 다른 요인일 것으로 추정된다.

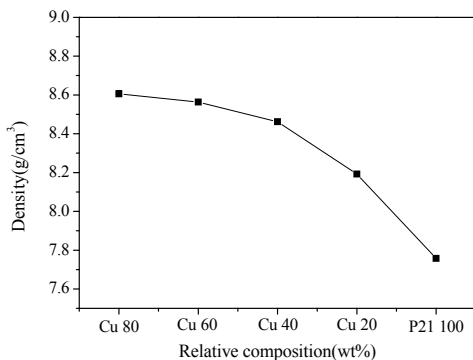


Fig. 6 Density of FGM layers

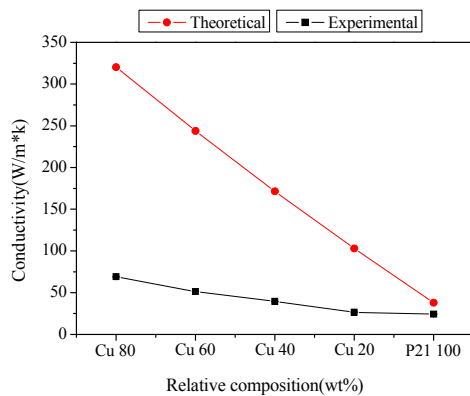


Fig. 7 Thermal conductivity of FGM layers

4. 결론

본 논문에서는 FGM 구조를 가지는 금형의 적층조형을 위한 예비연구로 P21-Cu 간의 1 차원 FGM 을 DMT 장비를 이용하여 제작하고, 사출주기 해석에 필요한 열전달 관련 물성치를 측정하고 평가하였다. 구체적으로 P21 스틸과 Cu 를 각각 100:0 wt%, 80:20 wt%, 60:40 wt%, 40:60 wt%, 20:80 wt% 비율로 사전에 혼합한 금속분말을 적층하고 각 층의 단면을 광학현미경으로 관찰하여 적층상태를 분석하고, 열전도도 측정을 통하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 100 wt% P21 의 경우 기공(porosity)이 적으며, 고운 덴드라이트(dendrite) 조직이 관찰되었고, Cu 의 함량이 20 wt% 정도로 비교적 작은 경우에는 균일한 미세조직이 관찰되지만, Cu 의 wt%가 60% 이상으로 증가하면 불균일한 미세조직이 관찰되는 것으로 나타났다.

둘째, P21 100 wt%의 열전도도값을 기준으로 Cu 20wt%에서는 9.4%, Cu 40wt%에서는 62.94%,

60wt%에서는 111.92 %, Cu 80wt%에서는 184.6% 각각 증가한 것으로 나타나, 형상적응형 냉각회로의 응용이 가능한 것으로 판단된다.

셋째, 적층된 시편에서 측정된 열전도도 값은 단순한 혼합법칙을 적용하여 예측할 수 있는 이론적인 열전도도 값과 큰 차이를 보였다. 이는 분말 재료의 적층조형에 따른 미세 기공의 형성, P21 및 Cu 합금에 따른 물성의 전반적인 변화 등의 원인을 추정할 수 있다. 향후 추가적인 실험을 통하여 정확한 원인 규명을 할 계획이다. 한편 본 연구진의 선행연구인 FGM 적용 형상적응형 냉각회로의 모델링 및 해석에 본 연구에서 얻어진 물성치를 적용하면 좀 더 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2010-0022562). FGM 시편 제작에 도움을 주신 인스텍사에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Shin, K. H., Natu, H., Dutta, D. and Mazumder, J. , 2003, "A Method for the Design and Fabrication of Heterogeneous Objects," *Materials & Design*, Vol. 24, No. 5, pp. 339~353.
- (2) Fessler, J., Nickel, A., Link, G., Prinz, F. and Fussell, P., 1997, "Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing," *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, Austin, TX, pp. 521~528.
- (3) Cho, W., Sachs, E. M., Patrikalakis, N. M. and Troxel, D. E., 2003, "A Dithering Algorithm for Local Composition Control with Three-Dimensional Printing," *Computer Aided Design*, Vol. 35, No. 9, pp. 851~86.
- (4) www.insstek.co.kr
- (5) Tang, C. and Chassapis, C. and Manoochchri, 1997, "Optimal Cooling System Design for Multi-Cavity Injection Moulding," *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 229~251.
- (6) Li, C. L., 2001, "A Feature-Based Approach to Injection Mould Cooling System Design," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp. 1073~1090.
- (7) Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P. and Ahrens, C. H., 2006, "The Effect of Scanning Strategy on Laser Fusion of Functionally Graded H13/Cu Materials," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, pp. 844~852.
- (8) Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens,

- P. and Ahrens, C. H., 2006, "Optimisation of Processing Parameters in Laser Fused H13/Cu Materials Using Response Surface Method(RSM)," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, pp. 145~154.
- (9) Bhashyam, S., Shin, K. H. and Dutta, D., 2000, "An Integrated CAD System for Design of Heterogeneous Objects," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, pp. 119~135.
- (10) Shin, K. H., 2011, "Modeling of Time-variant Heterogeneous Objects in Micro-system Packages," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, pp. 1119~1128.
- (11) Shin, K. H., 2011, "Modeling of Cooling Channels of Injection Mould Using Functionally Graded Material," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 1647~1653.
- (12) Shin, K. H., 2011, "A Method for Planar Development of Free-Form Surfaces Made of Anisotropic Materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 11, pp. 2817~2825.
- (13) Ahn, D. G., Kim H. W. and Lee K. Y., 2009, "Design of the Thermally Conductive Mould to Improve Cooling Characteristics of Injection Mould for a Mouse," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 3, pp. 201~209.
- (14) Ahn, D. G. and Kim, H. W., 2010, "Study on the Manufacture of a Thermal Management Mould with Three Different Materials Using a Direct Metal Tooling Rapid Tooling Process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. B3, pp. 385~402.