

## 분말야금으로 제작된 M2 공구강과 Cu 간 기능성 경사 복합재의 물성 평가<sup>§</sup>

정 종 설\* · 신 기 훈\*\*†

\* 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원, \*\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

### Property Estimation of Functionally Graded Materials Between M2 Tool Steel and Cu Fabricated by Powder Metallurgy

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 April 14, 2014 ; Revised June 2, 2014 ; Accepted June 2, 2014)

**Key Words:** Functionally Graded Materials(FGMs, 기능성 경사 복합재), M2 Tool Steel(M2 공구강), Powder Metallurgy(분말야금), Thermal Conductivity(열전도도), Coefficient of Thermal Expansion(CTE, 열팽창계수)

**초록:** 형상적응형 냉각회로를 구비한 사출금형 및 히트 싱크를 가지는 절삭공구 (혹은 냉각 장치) 등과 같은 많은 응용 분야에서 기능성 경사 복합재(FGM)를 사용하여 필요한 강성을 약화시키지 않으면서 열전도 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 M2 공구강과 Cu 간의 FGM 히트 싱크를 가지는 절삭 공구 제작을 위한 기초연구로, M2 와 Cu 를 각각 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100 wt% 비율로 사전에 혼합한 금속분말을 분말야금법으로 가압성형 및 소결 제작 하였다. 각 시편의 단면을 광학현미경으로 관찰하여 소결 상태를 분석하였으며, 열전도도, 비열 및 열팽창계수 등 열전달 관련 물성을 측정하고 분석하였다.

**Abstract:** The use of functionally graded materials (FGMs) may enhance thermal conductivity without reducing the desired strength in many applications such as injection molds embedding conformal cooling channels and cutting tools with heat sinks (or cooling devices). As a fundamental study for cutting tools having FGM heat sinks between M2 tool steel and Cu, six FGM specimens (M2 and Cu powders were premixed such that the relative compositions of M2 and Cu were 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, and 0:100 wt%) were fabricated by powder metallurgy in this study. The cross sections of these specimens were observed by optical microscopy, and then the material properties (such as thermal conductivity, specific heat, and coefficient of thermal expansion) related to heat transfer were measured and analyzed.

### 1. 서 론

형상적응형 냉각회로(conformal cooling channel)를 구비한 사출금형<sup>(1,2)</sup> 및 히트 싱크를 가지는 절삭공구(혹은 냉각 장치) 등과 같은 많은 응용

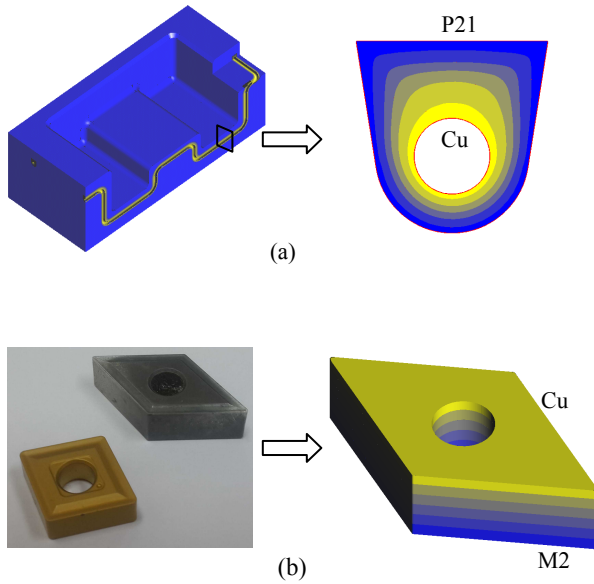
분야에서 기능성 경사 복합재(Functionally Graded Materials, FGMs)를 사용하여 필요한 강성을 약화시키지 않으면서 열전도 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되어, 많은 연구가 진행되고 있다.

미시간대학의 DMD(Direct Metal Deposition),<sup>(3)</sup> 그리고 국내 기업인 인스텍사의 DMT(Laser-aided Direct Metal Tooling)<sup>(4)</sup> 등의 금속 분말기반 적층조형 방법의 개발로 Fig. 1(a)와 같은 H13/Cu (혹은 P21/Cu) FGM 구조<sup>(5,6)</sup>의 형상적응형 냉각회

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, shinkh@seoultech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers



**Fig. 1** Functionally Graded Materials: (a) an injection mold with FGM conformal cooling channels,<sup>(1,2)</sup> (b) cutting tool with an FGM heat sink

로를 구비한 금형 및 열전도성 금형<sup>(7-10)</sup>의 제작이 가능하게 되었다(Fig. 1(a)). 그러나 레이저 적층 방식은 공정이 매우 까다롭고 고가의 장비를 사용할 뿐 아니라 적층제조 과정에서 생기는 편석, 이물질의 혼합, 기공, 크랙 등의 결함이 발생하는 단점이 있어, 결함의 요인을 제거하고 제조공정을 단축하는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 간단한 공정으로 균일하고 결함이 없는 재료의 생산이 가능한 분말야금법에 의한 기능성 경사 복합재 제작<sup>(11,12)</sup>을 위한 기초연구를 수행하였다.

응용 분야로 FGM 구조의 히트 싱크를 가지는 절삭공구(혹은 냉각 장치)를 염두에 두고 있다(Fig. 1(b)). 절삭공구의 경우 고성능화를 위해 코팅을 포함한 복합화가 가속화되고 있다. 최근에는 나노분말(nano-powder)을 이용한 기능성 경사 복합재의 응용이 확대되고 있다.<sup>(13)</sup> 예로 금속 생크에 세라믹 공구날을 직접 접착하지 않고 FGM 층을 추가하는 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(14-16)</sup>

금속절삭에서 공정에 투입된 동력은 주로 열로 변하여 칩, 공작물과 공구의 온도를 높인다. 특히 공구의 경우 온도가 상승하면 재료절삭에 필요한 경도를 상실하게 된다.<sup>(17)</sup> 그러므로 본 연구에서는 절삭 공구에 필요한 강성을 약화시키지 않으면서 열전도성을 향상시킬 수 있도록 M2 고속도 공구강과 Cu 간 FGM 히트 싱크를 가지는 절삭공구 제작을 위한 기초연구를 수행하였다. 구체적으로 M2 와 Cu 분말을 각각 100:0, 80:20, 60:40, 40:60,

**Table 1** Chemical compositions of M2(ASTM A 600)

Material	C	Cr	Fe	Mn	Mo	P	Si	S	W	V
wt(%)	0.78~1.05	3.75~4.5	81.58	0.15~0.40	4.5~5.5	0.03 max	0.20~0.45	0.03 max	5.5~6.75	1.75~2.2

**Table 2** Material properties of M2 and Cu

Property	M2	Cu
Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	8.14	8.940
Melting point (F)	2600	1982.5
Specific heat $C_p$ (J/g.K)	0.116	0.385
Thermal conductivity $k$ (W/m.K)	28.1	401
CTE ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ @ 25 $^{\circ}\text{C}$ )	11	16.5

20:80, Cu 100 wt% 비율로 사전에 혼합한 금속분말을 분말야금법으로 가압성형 및 소결 제작 하였다. 각 시편의 단면을 광학 현미경으로 관찰하여 소결 상태를 분석하였으며, 열전도도, 비열 및 열팽창계수(CTE) 등 열전달 관련 물성을 측정하고 분석하였다.

## 2. 시험편 제작

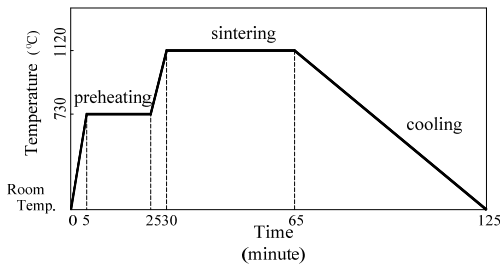
### 2.1 가압성형 및 소결

본 연구에서 사용된 M2 고속도 공구강의 화학적 구성 성분은 Table 1 과 같다. Table 2 는 M2 고속도 공구강과 Cu 의 기본 물성치를 보여주고 있다. 본 논문에서는 FGM 구조를 가지는 부품의 가압성형 및 소결을 위한 기초연구로 M2 와 Cu 간의 재질성분함수를 20 wt%로 근사화한 6 종의 FGM 시편(100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100 wt%)을 제작하였다. M2 분말의 입자 크기는 45~150  $\mu\text{m}$  이며, Cu 는 100  $\mu\text{m}$  이하의 분말을 사용하였다. 초정밀 저울로 무게를 측정한 금속 분말을 V 형 혼합기에서 30 분 동안 회전시켜 성분 별 혼합분말을 준비하였다.

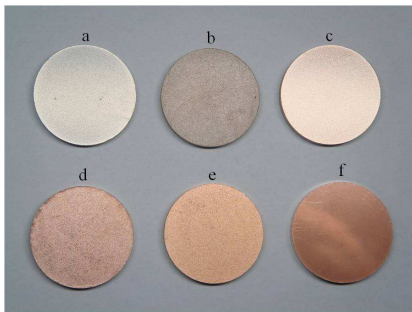
가압성형 및 소결 시편의 최종치수는 직경 30 mm, 두께 4 mm 로 하였다. 초기 혼합 분말의 양과 압력을 조절하여 시편의 밀도와 성형 최종 치수에 적합한 분말의 양과 압력을 여러 번의 시행착오를 거쳐 찾아내었다. 또한 두 금속의 혼합비와 용융점의 관계를 고려하여 최종 성형치수와 형상을 유지할 수 있는 적정 소결 온도를 찾아내었다.

**Table 3** Process conditions for specimens

Composition(wt%)	Press load(ton)	Sintering temperature(°C)
M2 100 wt%-Cu 0 wt%	40	1120
M2 80 wt%-Cu 20 wt%	45	1120
M2 60 wt%-Cu 40 wt%	50	1020
M2 40 wt%-Cu 60 wt%	43	950
M2 20 wt%-Cu 80 wt%	40	900
M2 0 wt%-Cu 100 wt%	40	880



**Fig. 2** Sintering cycle of M2/Cu alloy

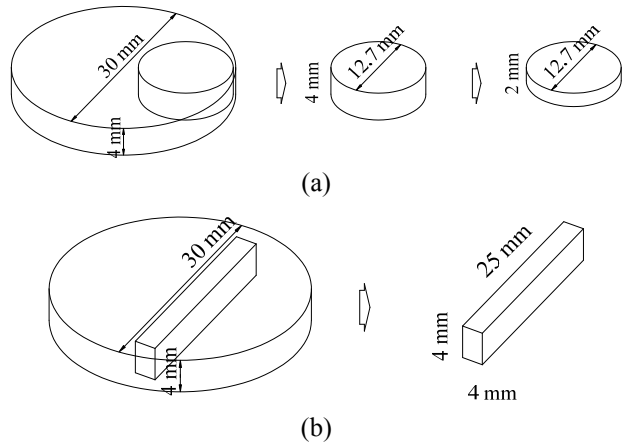


**Fig. 3** Images of specimens: (a) M2 100 wt%, (b) M2 80-Cu 20 wt%, (c) M2 60-Cu 40 wt%, (d) M2 40-Cu 60 wt%, (e) M2 20-Cu 80 wt%, (f) Cu 100 wt%

Table 3 은 M2-Cu wt%별 성형하중 및 소결온도를 나타내고 있다. Fig. 2 는 소결 온도와 시간 사이클을 보여주고 있으며, Fig. 3 은 가압성형 후 소결에 의해 최종적으로 제작된 6 종의 시편을 보여주고 있다.

2.2 시험편 가공

열전도도 시험을 위한 시험편은 직경 12.7mm 로 Fig. 4(a)와 같이 와이어 커팅 한 후 두께 2mm 로 절삭 가공하였다. 시험편의 표면은 1000 번 사포로 샌딩한 후 폴리싱하였다. 열팽창계수 시험을 위한 시험편은 한 변의 길이가 4 mm 이고 길이가 25 mm 인 정사각 봉의 형태로 Fig. 4(b)와 같이 와이어



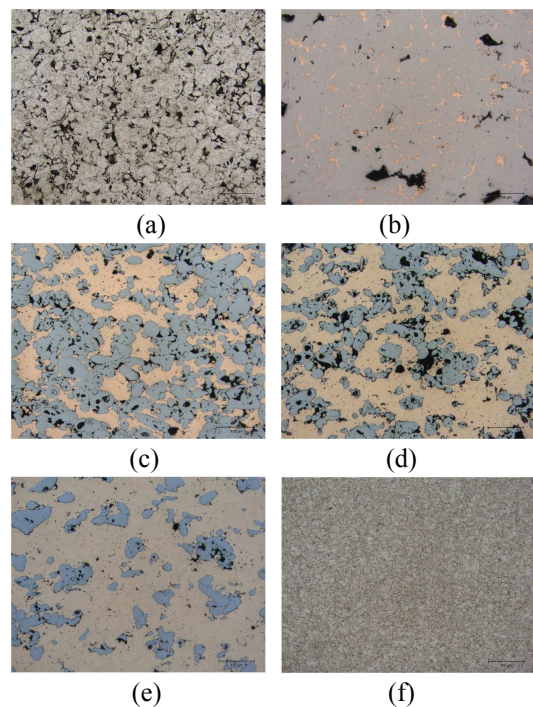
**Fig. 4** Preparation of specimens for the measurement of (a) thermal conductivity, (b) coefficient of thermal expansion

커팅한 후 표면을 1000 번 사포로 샌딩한 후 폴리싱하여 준비하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면 조직

ASTM E407-07 규격을 기반으로 중크롬산 칼륨(potassium dichromate)으로 각 시편의 표면에 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 5 는 각 시편의 표면 조직 이미지를 보여주고 있다.



**Fig. 5** Optical images of specimens: (a) M2 100%-Cu 0%, (b) M2 80%-Cu 20%, (c) M2 60%-Cu 40%, (d) M2 40%-Cu 60%, (e) M2 20%-Cu 80%, (f) M2 0%-Cu 100%

**Table 4** Material properties of specimens

Composition(wt%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cp (J/gK)	Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	Conductivity (W/m K)
M2 100 wt%-Cu 0 wt%	6.227	0.479	2.907	9.138
M2 80 wt%-Cu 20 wt%	7.145	0.443	5.438	17.448
M2 60 wt%-Cu 40 wt%	7.484	0.444	7.974	25.590
M2 40 wt%-Cu 60 wt%	7.590	0.436	16.637	54.149
M2 20 wt%-Cu 80 wt%	7.727	0.409	33.688	105.446
M2 0 wt%-Cu 100 wt%	7.924	0.391	82.140	253.627

Cu 100 wt% 시편에서는 비교적 기공이 적고 균일한 미세조직이 관찰되었으나, 나머지 시편에서는 불균일한 미세조직이 관찰되었다.

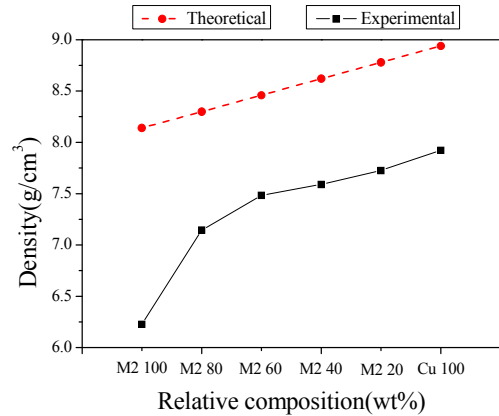
3.2 열전도도

레이저 섬광법(laser flash method)에 의한 열전도율(  $k = \alpha C_p \rho$  )은 레이저 섬광에 의한 열확산계수(  $\alpha$  ), DSC (Differential Scanning Calorimetry)에 의한 비열(  $C_p$  ), 아르키메데스의 원리를 이용한 용적 밀도(  $\rho$  )로 부터 결정된다. 열전도도 측정은 NETZSCH 사 LFA447 장비를 사용하여 상온에서 측정하였다. 밀도는 가압성형 후 소결한 시편을 초정밀저울로 무게를 구하여 측정하였다. Table 4 는 제작된 각 시편 별 밀도, 비열, 열확산계수 및 열전도도의 측정값을 나타내고 있다.

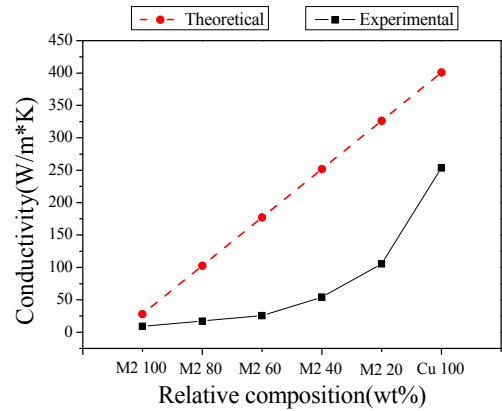
Table 4 에서와 같이 M2 100 wt% 기준으로 열전도도 값이 각각 Cu 20wt%에서는 90.940%, Cu 40wt%에서는 180.039%, 60wt%에서는 492.569%, Cu 80wt%에서는 1053.929%, Cu 100wt%에서는 2675.520% 증가한 것으로 나타났다. 밀도 측정 결과를 살펴보면 이론적인 밀도와 비교하여 Cu 100wt%에서는 11.4%, M2 100wt% 에서는 23.5% 감소하였다. M2 100 wt%의 경우 시편 밀도가 이론값 보다 비교적 큰 차이로 작다는 것은 성형압력(40 ton)이 충분하지 않아 결국 더 많은 미세 기공이 시편에 남게 되어 최종물성에 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

Fig. 6 과 7 은 식 (1)의 혼합법칙(Voigt rule)을 부피분율로 적용한 이론치와 실험에서 얻은 각 조성별 밀도와 열전도도를 그래프로 나타낸 것이다. 식 (1)에서  $p$  는 밀도, 비열, 열전도율 등의 물성치를 의미한다.

$$P_{mixture} = P_{M2}v_{M2} + P_{Cu}v_{Cu} \quad (1)$$



**Fig. 6** Density of FGM specimens



**Fig. 7** Thermal conductivity of FGM specimens

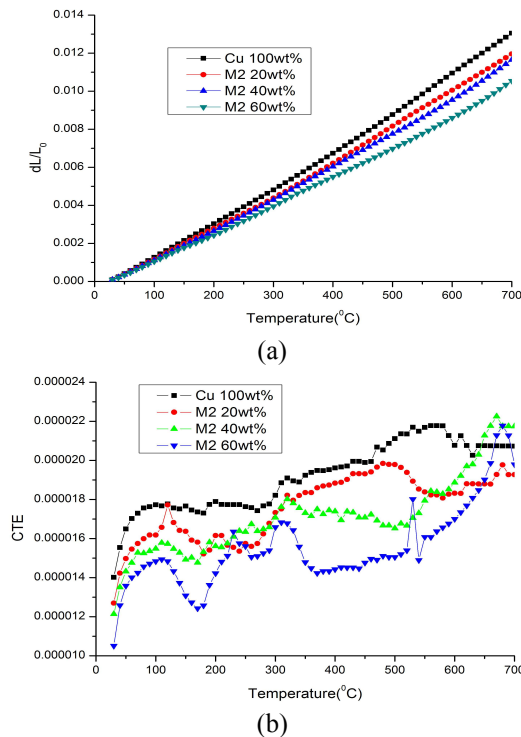
Fig. 7 에서 특이한 점은, 측정된 열전도도 값과 단순한 혼합법칙을 적용하여 예측할 수 있는 이론적인 열전도도 값의 차이가 Cu 함량이 증가할수록 증가하다 다시 감소한다는 것이다. M2 100%의 경우도 소결된 시편의 열전도도(9.138)가 알려진 M2 의 열전도도(28.1) 보다 약 67.5% 정도 작게 측정되는 데, 이는 금속 분말의 가압성형 소결 시 발생하는 미세 기공의 영향으로 추측된다. 또한 M2 와 Cu 가 전율고용체 합금이 아니기 때문에 수반되는 물성치의 변화가 다른 요인일 것으로 추정된다.

3.3 열팽창계수(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)

FGM 을 사용하는 목적은 성분 별 CTE 값 차이에 의해 발생하는 열응력을 최소화하여 재료의 파괴를 막는 것이다. 그러므로 광범위한 사용 온도 범위에서 재료의 CTE 값을 측정하는 것이 필요하다. CTE 값은 ASTM E228-11 을 기반으로 NETZSCH 사 DIL 402C 장비를 사용하여

Table 5 CTE of specimens ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

Composition (wt%)	@ 25°C theoretical	@ 30°C	@ 200°C	@ 400°C	@ 600°C	@ 733°C
M2 100 wt%-Cu 0 wt%	11.0	12.7	17.0	14.0	16.8	11.4
M2 80 wt%-Cu 20 wt%	12.1	13.4	18.4	19.2	13.9	15.8
M2 60 wt%-Cu 40 wt%	13.2	10.5	14.2	14.4	17.0	14.8
M2 40 wt%-Cu 60 wt%	14.3	12.1	15.6	17.4	18.9	19.8
M2 20 wt%-Cu 80 wt%	15.4	12.7	16.1	18.8	18.3	20.2
M2 0 wt%-Cu 100 wt%	16.5	14.0	17.9	19.6	20.8	21.2

Fig. 8  $dL/L_0$  and CTE vs. Temperature

측정하였다. 가열조건은  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 측정온도범위는  $25^{\circ}\text{C} \sim 830^{\circ}\text{C}$ , 표준 물질로는 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 사용하여 측정하였다.

온도  $23.6^{\circ}\text{C}$  에서의 초기 시편 길이를  $L_0$  값으로 온도에 따른  $dL/L_0$  측정하여 CTE 값을 계산하였다. Table 5 는  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $733^{\circ}\text{C}$  일 때의 CTE 계산값을 보여주고 있다.

가압성형 소결 시편의 CTE 값은 Cu 함량 및 온도에 비례하여 증가할 것으로 예측된다. Table 5 에서와 같이, Cu 40wt% ~ 100wt% 범위에서는 CTE 값이 Cu 함량 및 온도 증가에 뚜렷이 비례하는 경향을 관측할 수 있었다. 하지만 M2

100 wt%~ 80 wt% 시편에서는 CTE 계산값에서 일정한 경향을 파악할 수 없었다. 이 또한 다른 시편보다 M2 100 wt%, 80 wt% 시편에 더 많은 미세 기공이 존재하기 때문으로 추측된다.

Fig. 8 은 4 종 시편(Cu 100wt%, M2 20-Cu 80 wt%, M2 40-Cu 60wt%, M2 60 -Cu 40wt%)의 온도에 따른  $dL/L_0$  측정값과 CTE 계산값을 각각 보여주고 있다. Fig. 8(a)에서와 같이 Cu 함량이 높을수록  $dL/L_0$  곡선의 기울기가 크음을 확인할 수 있다. Fig. 8(a)의 그래프를 온도에 대해서 미분(접선)하면 Fig. 8(b)의 CTE 그래프를 얻을 수 있다. 즉  $dL/L_0$  곡선을 n 차 함수로 근사화하면, n-1 차의 CTE 곡선을 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 M2 고속도 공구강 분말과 Cu 를 각각 100:0 wt%, 80:20 wt%, 60:40 wt%, 40:60 wt%, 20:80 wt%, Cu 100wt% 비율로 사전에 혼합한 금속분말을 가압성형하고 소결하였다. 각 시편의 단면을 광학현미경으로 관찰하여 소결상태를 분석하고, 열전도도, 비열, 열팽창계수 등의 측정을 통하여 절삭공구에 FGM 구조의 히트 싱크를 적용할 수 있는 가능성에 대한 기초연구를 수행하였으며, 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, Cu 100wt% 시편에서는 비교적 기공이 적고 균일한 미세조직이 관찰되었으나, 나머지 시편에서는 불균일한 미세조직이 관찰되었다.

둘째, M2 100 wt%를 기준으로 열전도도 값이 각각 Cu 20wt%에서는 90.940%, Cu 40wt%에서는 180.039%, 60wt%에서는 492.569%, Cu 80wt%에서는 1053.929%, Cu 100wt%에서는 2675.520% 증가하는 것으로 나타나, FGM 히트 싱크의 적용 가능성을 확인 하였다.

셋째, 압축성형 소결 시편에서 측정된 열전도도 값은 단순한 혼합법칙을 적용하여 예측할 수 있는 이론적인 열전도도 값과 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 분말재료의 압축성형 소결에 따른 미세 기공의 형성, M2 및 Cu 합금에 따른 물성의 전반적인 변화 등의 원인을 추정할 수 있다. 향후 추가적인 실험을 통하여 정확한 원인 규명을 할 계획이다.

넷째, 가압성형 소결 시편에서 측정된 CTE 값은 Cu 40 wt% ~ 100 wt% 범위에서는 Cu 함량 및 온도 증가에 뚜렷이 비례하는 경향을 관측할 수 있었다. 하지만 M2 100 wt% ~ 80 wt% 에서 변화가 일정하지

않게 나타났다. 이는 다른 시편보다 M2 100 wt%, 80 wt% 시편의 성형압력이 충분하지 못하여 더 많은 미세 기공이 남기 때문으로 판단된다. 향후 M2 분말 입자 크기의 산포를 줄이고, 성형 압력을 개선한 추가적인 실험을 통하여 정확한 원인 규명을 할 계획이다.

### 후 기

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

### 참고문헌 (References)

- (1) Shin, K. H., 2011, "Modeling of Cooling Channels of Injection Mould Using Functionally Graded Material," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 12, pp. 1647~1653.
- (2) Jeong, J. S. and Shin, K. H., 2013, "Fabrication of Functionally Graded Materials Between P21 Tool Steel and Cu by Using Laser-Aided Layered Manufacturing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 61~66.
- (3) 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.
- (4) [www.insstek.co.kr](http://www.insstek.co.kr)
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Tang, C. and Chassapis, C. and Manoochehri, 1997, "Optimal Cooling System Design for Multi-Cavity Injection Moulding," *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 229~251.
- (10) Li, C. L., 2001, "A Feature-Based Approach to Injection Mould Cooling System Design," *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp. 1073~1090.
- (11) Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H., 2003, "Processing Techniques for Functionally Graded Materials," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 362, pp. 81~105.
- (12) Nemat-Alla, M. M., Ata, M. H., Bayoumi, M. R. and Khair-Eldeen, W., 2011, "Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural Investigations of Aluminum/Steel Functionally Graded Material," *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2, No. 12, pp. 1708~1718.
- (13) Ghosh, A., Miyamoto, Y., Reimann, I. and Lannutti, J., 1997, "Functionally Graded Materials: Manufacture, Properties, and Applications," *Ceramic Transactions*, Vol. 76.
- (14) Cho, J. R. and Park, H. J., 2002, "High Strength FGM Cutting Tools: Finite Element Analysis on Thermoelastic Characteristics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 351~356.
- (15) Cho, J. R., 2006, "Optimum Material Composition Design for Thermal Stress Reduction in FGM Lathe Bit," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 10, pp. 1568~1577.
- (16) Duran, A. and Nalbant, M., 2005, "Finite Element Analysis of Bending Occurring While Cutting with High Speed Steel Lathe Cutting Tools," *Materials and Design*, Vol. 26, pp. 549~554.
- (17) Degarmo, E. P., Black, J. T. and Kohser, R. A., 2003, *Materials and Processes in Manufacturing 9<sup>th</sup> Edition*, John Wiley & Sons, New York.