Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 28, No. 4 (2018) 175-178
https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2018.28.4.175

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Fabrication and characterization of Cu_{50}-Fe_{50} alloy

Jung-Il Lee, Dilli Lam, Jong Min Paeng, Hyun Su Cho, Su Min Yang and Jeong Ho Ryu†

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received July 30, 2018)
(Revised August 17, 2018)
(Accepted August 20, 2018)

Abstract Copper is a well know material for use as heat sink or heat exchanger. However, copper has a considerable low tensile strength and temperature limit. A material that has a good thermal conductivity, low cost, but also excellent mechanical properties are desired. In order to identify the mechanism for the material properties of cast Cu-Fe alloys, Cu_{50}-Fe_{50} (wt.%) alloy was produced by using a high-frequency induction furnace, a typical metal casting process. The Cu-Fe alloy consists of Cu, α-Fe, γ-Fe with dendrite structures. The crystal structure and microstructure of the prepared Cu_{50}-Fe_{50} alloy were systematically examined using XRD, FE-SEM, EDS and XRF for electrical devices.

Key words Cu_{50}-Fe_{50} alloy, Crystal structures, Microstructure, EDS mapping

Cu_{50}-Fe_{50} 합금의 제조 및 특성평가

이정일, 딜리람, 팽종민, 조현수, 양수민, 류정호†

한국교통대학교 신소재공학전공, 충주, 27469

(2018년 7월 30일 접수)
(2018년 8월 17일 심사완료)
(2018년 8월 20일 게재확정)

요 약 구리 금속은 높은 열전도도로 heat sink 혹은 heat exchanger로 널리 사용되고 있다. 그러나 이에 반하여 낮은 인장강도와 사용온도 한계를 가지고 있다. 따라서 높은 열전도도, 낮은 제작비와 함께 우수한 기계적 특성이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위하여 동철합금(Cu_{50}-Fe_{50} alloy)를 고주파 가열로를 이용하여 제조하고 그 특성을 조사하였다. 제조된 동철합금은 Cu, α-Fe, γ-Fe 결정구조를 기진 dendrite 미세구조를 보여주었다. 제조된 동철합금은 XRD, FE-SEM, EDS 및 XRF를 이용하여 결정구조 및 미세구조를 분석하였으며 전력공급 접점용 소재로서의 적합성을 확인하고자 하였다.

1. 서 론

금속가공산업은 광범위한 산업에 필요한 융 · 복합 기술 분야로 산업수요가 점차 증가하고 있는 전통 제조산업과 첨단 산업의 중간단계에 위치해 있으며, IT산업을 포함한 전자산업과 항공우주 및 수송기계 산업관련 고부가가치 시장의 수요증가가 전체 금속가공산업의성장을 견인하고 있다. 제품군으로는 소성가공 및 절삭가공을 기반으로 하는 기계, 자동차, 철도, 에너지, 플랜트, 항공, 조선분야에 활용되는 볼트, 너트, 베어링, 기어, 밸브, 단조 부품류, 절삭 부품류, 프레스, 금형 재품 등이다.

이러한 금속 중 동철합금(Copper-Ferro Alloy(CFA))은 철(Fe) 5 wt.%부터 90 wt.%까지 구리(Cu)와 함께 합금화된 소재로, 조성에 따라 도전성, 열전도, 전성, 탄성 등의 구리의 성질과 내마모성, 인장강도, 경도, 자성 등의 철의 성질이 조절 가능한 특성을 보여주어 산업계에 큰 관심을 받고 있다[1, 2]. 특히 구리가 90 wt.% 이상 함유된 동철합금의 경우 순수 구리에 비해 훨씬 우수한 전자파 차폐 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있으며, 전자파 차폐는 전자·통신기기의 사용 증가에 따른 전자파의 간섭 문제와 전자파의 인체 유해성 문제가 대두됨에 따라서 제품 설계의 필수적인 요인으로 부각되고 있다[3, 4].

기존의 전자기파 차폐기술은 동 테이프나 알루미늄 테이프를 피복하는 방식으로 통신케이블에 일부 적용되고 있으나, 일반적인 금속으로는 차폐가 어렵고 비철이 아닌 철을 사용했을 경우, 단심케이블은 전자기유도에 의한 열이 발생되어 케이블의 수명 단축이나 노후화가 빠르게 진행되는 문제점이 있을 뿐 아니라 내식성이 약해

†Corresponding author
E-mail: jhryu@ut.ac.kr

www.kci.go.kr

추가로 도금공정이 필요한 단점이 있다. 최근에는 철 및 구리를 각각 감는 방식을 통해 기존의 단점을 보안하고 있으나, 열이 발생되거나 이중 작업으로 인한 케이블 생산비용의 증가, 철의 부식을 방지하기 위한 도금비용의 증가에 따른 문제점을 수반하고, 전자파 차폐효과도 30 dB 이하의 수준으로서, 전신 제어용케이블이나 10 μm 정도의 극압/연박을 사용하는 차폐재로는 생산이 불가능한 단점이 있다[5-8].

동철합금은 높은 도전율과, 전계와 자계를 모두 차폐할 수 있는 유일한 고기능 소재로 소재제조기술에 관련된 연구가 다양하게 진행되고 있는데, 현재까지 보고된 동철합금은 전도율 및 전자기파 차폐 효율이 충분하지 않으며, 모합금을 2차 용융하는 이원화 공정으로 제조함에 따라 제조비용이 높고 다량의 플럭스 유입에 의한 제품의 일관된 품질의 보장이 어려운 단점이 있었다[9-11]. 따라서 본 연구는 동철합금을 진공분위기하에서 고주파를 이용한 용해주조법으로 Cu_{50}-Fe_{50}(wt.%) 조성비의 동철합금을 제조하였으며, 제조된 동철합금의 결정구조 및 미세구조를 분석함으로써 전력공급 접점용 소재로서의 적합성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 동철합금을 제조하기 위해, 고주파 유도가열 장치를 이용하여 Cu_{50}-Fe_{50}(wt.%)의 조성을 갖는 합금 제조하였다. 동철 합금을 제조하기 위한 조성의 모체 재료로 고순도의 구리(Cu, 99.99 %)와 전해철(Fe 99.99 %)을 사용하였으며, 이때 구리보다 융점이 높은 철을 먼저 알루미나(Al_2O_3) 도가니에 장입 후 코일 내부로 이송하여, 30°C/min의 승온 속도로 1,550°C까지 가열 하였다. 순동의 경우 300°C에서 예열을 통해 내부의 수분이 제거된 상태에서 철 용탕에 추가 장입하였으며, 용탕의 교반 및 유동성 확보를 위하여 철의 융점보다 높은 160°C 높은 1700°C에서 10분간 유지 후 물리적 교반 없이 스테인리스 스틸 몰드(Stainless steel mold)에 틸팅 후 공냉하여 샘플을 제조하였다.

제조된 동철합금의 결정상 분석을 위해 XRD(X-Ray Diffraction)를 이용하여 2°/min의 scan speed로 회절 스펙트럼을 얻었다. 미세조직은 주물의 길이 방향의 아랫부분에서 0.5 cm 부분에서 시편을 채취하여 마운팅 후 SiC 연마지를 사용하여 #2000까지 연마하고, 0.05 μm 알루미나를 사용하여 경면으로 준비하였다. 에칭은 질산 80 ml + 아세트산 5 ml + 증류수 10 ml + 에틸알콜 100 ml의 혼합용액을 사용하여 선택적으로 부식시켰다. 후처리로 초음파 세척을 행한 후 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy) 관찰을 위하여 경면으로 연마한 시편을 5 mm로 절단하여 준비하였으며 EDS를 통하여 주조합금의 국부적인 농도 분포를 확인하였으며, bulk 시편의 전반적인 원소 정량분석을 위하여 XRF(X-ray Fluorescence) 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 제조된 Cu_{50}-Fe_{50} 합금의 결정구조 분석을 위한 XRD 결과를 보여주고 있다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 Cu_{50}-Fe_{50} 합금에는 금속간 화합물이나 2차상의 생성 없이 면심입방격자(FCC) 구조의 Cu 상과 체심입방격자(BCC) 구조의 α-Fe 상만이 관찰되고 있다. 일반적으로, 전기적 특성을 향상시키기 위하여 Fe의 함유량이 감소할수록 전체적으로 Cu peak의 intensity가 증가하는 거동을 나타낼 것으로 판단되며, 아래에서 언급하고 있는 미세조직 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 2의 광학현미경 사진들은 고주파 유도가열공정을 통해 제조된 Cu_{50}-Fe_{50} 합금의 대표적인 이미지 및 단면을 나타낸 것으로, 용탕의 주입속도는 40 g/sec으로 낮은 속도를 부여하여 샘플의 냉각이 서서히 이루어질 수 있도록 제어하였다. 조직사진으로 알 수 있듯이, 동철합금 내부는 기공 및 기타 주조 결함들이 관찰되지 않고 있으며, 샘플 전반적으로 이론밀도 대비 98 % 이상의 고밀도 합금을 얻을 수 있었다. 그러나, 주조시 일반적으로 발생되는 수축공(shrinkage cavity)이 관찰되고 있으며, 이는 주형에 주입된 용탕이 외벽으로부터 냉각, 응고되기 시작하여 점차 내부와 상부로 응고가 진행되어 수축에 의해 용탕이 부족하여 나타나는 현상이라고 판단할 수 있었다.

Fig. 3은 고주파 유도용해 설비로 제조된 Cu_{50}-Fe_{50} 합금의 FE-SEM 이미지를 보여주고 있다. 전반적으로 응

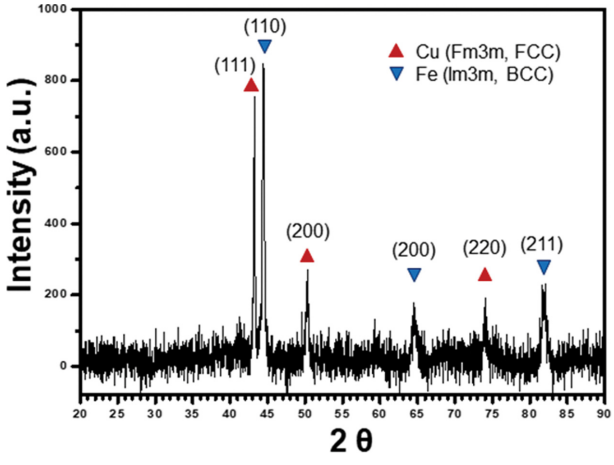

Fig. 1. XRD patterns of the Cu_{50}-Fe_{50} alloy sample prepared by casting.

www.kci.go.kr

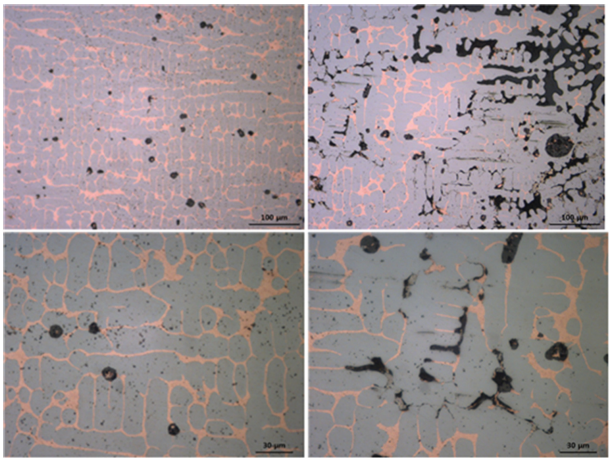

Fig. 2. Optical microscope pictures of Cu_{50}-Fe_{50} alloy sample prepared by casting.

고 선단과 액상간 과냉 상태에서 나선형(spike) 형태의 응고가 이루어져 있으며, 주형벽에 얇은 응고층이 형성된 후 점차 두꺼워지는 경향을 나타내고 있다. 즉, 몰드와 인접해 있는 외각의 경우 빠른 냉각속도에 기인하여 미세한 수지상 조직이 형성되어 있는 것을 알 수 있고, 경우에 따라 중심부 액상이 삼투압에 의하여 표면으로 나올 경우 표면부분의 용질 농도가 높아지는 경우도 있으나, 응고되어지는 중심부가 초기에 응고되는 표면 부분보다 용질 농도가 높아 거대편석(macro segregation)이 일어나 있는 것을 알 수 있었다.

따라서, 균일한 미세조직을 확보하기 위해서는 시편의 형상 제어를 통한 보다 빠른 냉각속도를 부여해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 기존의 연구결과에 따르면 동철합금내부에 Fe_2O_3 및 Fe_3O_4와 같은 철 산화물이 비금속 개재물로 존재하며[5-7], 이러한 개재물들은 압출 압연 인발과 같은 2차 성형 시 취성파괴의 원인이 되기

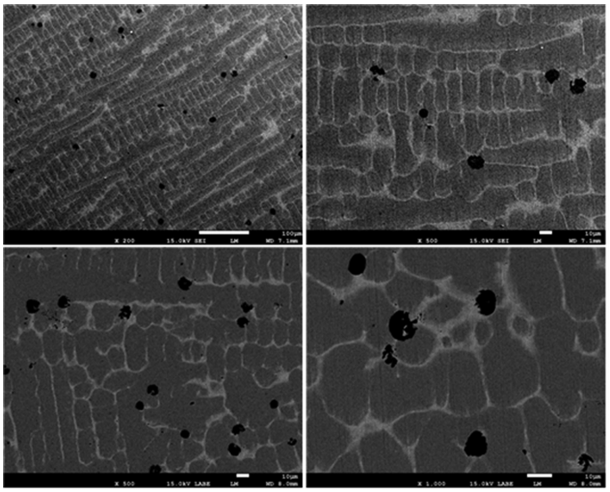

Fig. 3. FE-SEM images of Cu_{50}-Fe_{50} alloy sample prepared by casting.

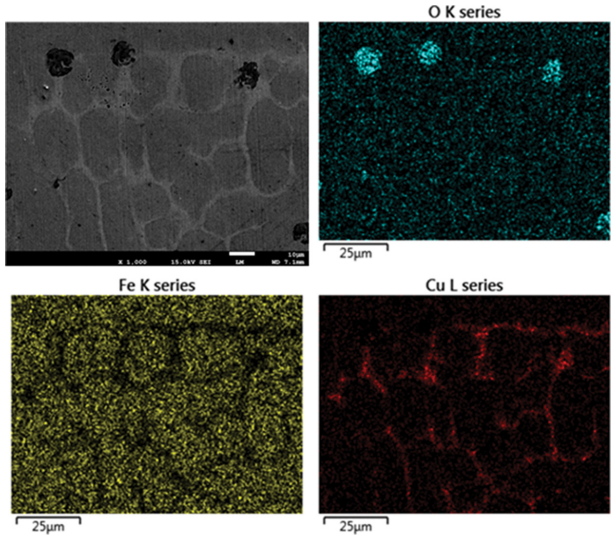

Fig. 4. FE-SEM and EDS mapping images of Cu_{50}-Fe_{50} alloy sample.

때문에 주조 시 철의 산화를 막기 위해 무수붕사 또는 빙정석을 이용한 용탕표면 피복 공정이 필수 불가결하다고 보고되었다[8-10].

Fig. 3의 FE-SEM 이미지에서 각 영역의 성분 분석을 위하여 EDS mapping 분석을 실시하였다. Fig. 4의 EDS mapping 이미지에서 확인할 수 있듯이 수지상 형태의 2개 영역이 확인되며 Cu_{50}-Fe_{50} 샘플의 국부적인 부분에서 원형 형태의 2차상이 부분적으로 관찰되었다. Cu_{50}-Fe_{50} 합금의 내부는 전형적인 3상의 구조(Dark gray: α-Fe, γ-Fe, White Gray: Cu 고용체)로 이루어진 조직을 볼 수 있었다.

Fig. 4는 Cu_{50}-Fe_{50} 합금 내부의 미세조직과 원소분포를 EDS 맵핑(mapping)을 통해 관찰한 것으로, 조성 분석 결과 dark-gray 부분은 α-Fe 및 γ-Fe 영역으로 확인되며, white-gray 영역은 Cu 고용체의 영역으로 확인되었다. 또한 상기 FE-SEM에서 부분적으로 확인되는 원형 형태의 2차상에서는 산소가 다량 확인되는 것으로 보아 Fe_2O_3 혹은 Fe_3O_4 산화물임을 예상할 수 있었다. 상기 FE-SEM 사진의 원형형태의 국부적인 원소분석 결과 Fe = 70.68, O = 23.81, Cu = 1.4 at.%로 정량 분석되었다.

본 연구에서 제조한 Cu_{50}-Fe_{50} 합금 샘플을 이용한 전기전자 소자의 성공적인 구동은 샘플 전체적인 성분분석이 진행되어야 확인 가능하다고 판단된다. EDS 분석의 경우에는 샘플의 국부적인 성분분석은 가능하나 샘플 전

Table 1
XRF result of the Cu_{50}-Fe_{50} alloy sample

Component	C	O	Fe	Cu
Result (mass%)	1.09	1.08	47.30	50.6

www.kci.go.kr

체적인 비율은 확인하기 어려우므로, 본 연구에서는 아래와 같이 X-ray 형광분석을 통하여 bulk 시편의 전체적인 원소분석을 실시하였다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 본 실험에서 제조한 Cu_{50}-Fe_{50} 합금 샘플이 디자인 조성과 유사함을 확인할 수 있으며, 특이한 불순물은 관찰되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 동철합금을 진공분위기하에서 고주파를 이용한 용해주조법으로 Cu_{50}-Fe_{50}(wt.%) 조성비의 동철합금을 제조하였으며, 제조된 동철합금의 결정구조 및 미세구조를 분석함으로써 전력공급 접점용 소재로서의 적합성을 확인하고자 하였다. 제조된 Cu_{50}-Fe_{50} 합금에는 금속간 화합물이나 2차상의 생성 없이 면심입방격자(FCC) 구조의 Cu 상과 체심입방격자(BCC) 구조의 α-Fe 상만이 관찰되었다. Cu_{50}-Fe_{50} 합금 내부는 기공 및 기타 주조 결함들이 관찰되지 않고 있으며, 샘플 전반적으로 이론밀도 대비 98 % 이상의 고밀도 합금을 얻을 수 있었다. EDS 조성 분석 결과 α-Fe, γ-Fe 영역 및 Cu 고용체의 영역으로 구분되었으며, FE-SEM에서 부분적으로 확인되는 원형 형태의 2차상에서는 산소가 다량 확인되어 Fe_2O_3 혹은 Fe_3O_4 산화물임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학연협력 기술개발사업(C0515455010046869)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

[1] Max Hansen, “Constitution of Binary Alloys” (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1958) p. 353.
[2] M. Perez, F. Perrard, V. Massardier, X. Kleber, A. Deschamps, H. de Monestrol, P. Pareige and G. Covarel, “Low-temperature solubility of copper in iron: experimental study using thermoelectric power, small angle X-ray scattering and tomographic atom probe”, Philos. Mag. A 85 (2005) 2197.
[3] P.J. Othen, M.L. Jenkins and G.D.W. Smith, “High-resolution electron microscopy studies of the structure of Cu precipitates in α-Fe”, Philos. Mag. A 70 (1994) 1.
[4] L.S. Darken and R.W. Gurry, “The system iron-oxygen II. Equilibria and thermodynamics of liquid oxide and other phases”, J. Am. Chem. Soc. 68 (1946) 798.
[5] T. Gladman, “Precipitation hardening in metals”, Mater. Sci. Technol. 15 (1999) 30.
[6] G. Bockstiegel, “Nature and causes of volume changes in the sintering of iron-copper and iron-copper-graphite powder compacts”, Translated from Stahl Und Eisen 17 (1959) 1187.
[7] N. Wanderka, U. Czubayko, V. Naundorf, V.A. Ivchenko, A.Ye. Yermakov, M.A. Uimin and H. Wollenberger, “Characterization of nanoscaled heterogeneities in mechanically alloyed and compacted CuFe”, Ultramicroscopy 89 (2001) 189.
[8] O. Drbohilav and A.R. Yavari, “Mechanical alloying and thermal decomposition of ferromagnetic nanocrystalline f.c.c.-$Cu_{50}Fe_{50}$”, Acta Metall. Mater. 43 (1995) 1799.
[9] J.Z. Jiang, C. Gente and R. Bormann, “Mechanical alloying in the Fe-Cu system”, Mater. Sci. Eng. A 242 (1998) 268.
[10] Y. Yang, Y. Zhu, Q. Li, X. Ma, Y. Dong, G. Wang and S. Wei, “Mechanical alloying, fine structure and thermal decomposition of nanocrystalline FCC-$Fe_{60}Cu_{40}$”, Physica B 293 (2001) 249.
[11] J. Xu, G.S. Collins, L.S.J. Peng and M. Atzmon, “Deformation-assisted decomposition of unstable $Fe_{50}Cu_{50}$ solid solution during low-energy ball milling”, Acta Mater. 47 (1999) 1241.

www.kci.go.kr