

Fe/Ni 합금전착에 의한 다공성 그물구조 방열재료의 제조 연구

이화영[†] · 이관희 · 정원용

한국과학기술연구원 금속공정연구센터

(2002년 5월 14일 접수: 2002년 7월 15일 채택)

Fabrication of Porous Reticular Metal by Electrodeposition of Fe/Ni Alloy for Heat Dissipation Materials

Hwa-Young Lee[†], Kwan-Hyi Lee and Won-Young Jeung

Metals Processing Research Center, Korea Institute of Science & Technology, P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

(Received May 14, 2002: Accepted July 15, 2002)

초 록

다공성 그물구조 금속을 반도체 칩 방열재료로써 활용하기 위한 실험을 실시하였다. 이를 위해 다공성 그물구조 구리와 반도체 칩 사이의 열팽창 차이를 최소화하기 위한 시도로써 다공성 구리에 대한 Fe/Ni 합금전착을 수행하였다. Fe/Ni 합금전착 실험으로 표준 Hull Cell을 구성하고 전류밀도 분포에 따른 Fe/Ni 합금층 내의 조성변화를 관찰하였으며, 실험 결과 합금전착시 이상공석현상으로 인하여 전해질의 교반정도에 따라 합금층 조성이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 paddle type 교반기를 사용하여 전해질의 확산을 제어하는 방법으로 원하는 조성의 Fe/Ni 합금층을 얻을 수 있었으며, 얻어진 Fe/Ni 후막을 대상으로 TMA 열분석을 실시한 결과 구리에 비해 훨씬 낮은 열팽창율을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 본 실험에서 Fe/Ni 합금전착을 통하여 제작한 다공성 그물구조 금속을 대상으로 방열성능을 측정 한 결과 구리 평판 대비 최대 2배 이상의 방열성능을 보여 반도체 칩 방열재료로의 활용 가능성을 높여 주었다.

Abstract : An attempt was made for the application of porous reticular metal to a heat dissipation material in semiconductor process. For this aim, the electrodeposition of Fe/Ni alloy on the porous reticular Cu has been performed to minimize the thermal expansion mismatch between Cu skeleton and electronic chip. Preliminary tests for the electrodeposition of Fe/Ni alloy layer were conducted by using standard Hull Cell to examine the effect of current density on the composition of alloy layer. It seemed that mass transfer affected significantly the composition of Fe/Ni layer due to anomalous codeposition in the electrodeposition of Fe/Ni alloy. A paddle type stirring bath, which was employed to control the mass transfer of electrolyte in the work, was found to allow the electrodeposition Fe/Ni with a precise composition. TMA result showed that the thermal expansion of Fe/Ni alloy layer was much lower than that of pure copper. From the tests of heat dissipation by using the apparatus designed in the work, the heat dissipation material fabricated in the work showed the excellent heat dissipation capacity, namely, more than two times as compared to that of pure copper plate.

Key words : heat dissipation, porous reticular metal, electrodeposition, Fe/Ni layer

1. 서 론

최근들어 다공성 금속을 전기화학적 방법으로 제조하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세에 있으며, 향후 IT산업의 급속한 발달이 기대됨에 따라서 각종 기능성 재료로써의 다공성 금속이용이 보다 다양해질 것으로 예상된다. 주지하는 바와 같이 다공성 금속재료는 내부에 미세한 개구공(open pore)을 가지고 metal skeleton이 그물구조의 형태로 어우러져 있기 때문에 각종 전극재료 및 방열재료로써의 특성이 매우 뛰어나며,

pore size와 porosity를 사용목적에 따라 임의로 제어할 수 있다. 다공성 금속의 제조법으로는 여러 가지가 있을 수 있으나, pore size와 porosity가 큰 다공성 금속의 경우 polyurethane foam 등을 모재로 사용한 전기화학적 전착법이 많이 활용되고 있다¹⁻⁵⁾.

다공성 금속재료의 주요 용도중의 하나로서 넓은 표면적과 우수한 통기성을 이용한 방열재료 혹은 방열체로의 활용이 주목 받고 있는바, 최근에는 high power의 반도체 패키징용 방열재료로의 활용이 시도되고 있다. 즉, 반도체의 고집적화에 따라 발생하는 열량도 급속히 증가하고 있는데 예를 들면 Intel사의 MPU(micro-processor unit) 모델을 기준으로 1995년 까지는 5-10 W에 불과하던 열량이 1997년에는 34 W, 또한 현재에는 최

[†]E-mail: hylee@kist.re.kr

고 40 W 수준에 이르는 등 발열량이 크게 증가함에 따라서 칩 구동시 방열문제가 반도체칩 설계의 bottle neck이 되고 있다. 이를 해결하기 위한 하나의 방법으로 다공성 금속을 칩에 장착하여 칩 내부의 열을 외부로 방출시키는 방법이 있는데, 이때의 문제로는 열전도율이 우수한 금속이어야 하고 열팽창율이 가능한 작아야 한다는 점으로써 단일 금속으로는 두 가지 물성을 모두 만족시키기가 극히 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에는 Cu/SiC, Cu/AlN, Cu/W, SiC/Al 등의 다양한 복합재료를 방열재료로 사용하기 위한 연구개발⁶⁻¹⁰⁾이 진행되고 있기도 하나, 제조방법이 복잡하고 가격이 비싸기 때문에 일부 재료를 제외하고는 아직까지 상용화 수준에 도달하지 못하고 있다.

본 저자들은 최근 polyurethane foam을 모재로 사용한 다공성 그물구조 구리의 제작실험을 수행한 바가 있으며, 논문발표^{1,2)}를 통해 이를 소개하기도 하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 재료는 넓은 표면적과 우수한 통기성을 가지고 있다는 특성으로 인하여 새로운 방열재료로 관심을 끌고 있다. 그러나, 반도체 칩 소자에 접합을 위해서는 열팽창계수가 6 ppm 이하로 작아야 하기 때문에 구리를 그대로 사용할 수는 없으며 구리와 소자사이에 열팽창율이 매우 작은 접합층이 존재하여야만 한다. 본 실험에서는 이를 해결하기 위한 새로운 시도로써 다공성 그물구조 구리에 Fe/Ni 합금전착¹¹⁻¹⁵⁾을 통하여 코팅하는 방법으로 반도체 칩의 방열재료를 제조하고자 하였다. 이를 위해서 우선 Hull Cell을 구성하여 Fe/Ni 합금전착 특성을 조사하고 이를 토대로 다공성 그물구조 구리에 대한 Fe/Ni 합금전착 실험을 수행하였으며, 제조한 방열재료를 대상으로 방열성능을 측정하여 궁극적으로 반도체 칩 방열재료로서의 활용 가능성을 타진하였다.

2. 실험 방법 및 시료

2.1. 다공성 그물구조 음극에 대한 Fe/Ni 합금전착실험

본 실험에서는 다공성 그물구조 음극에 대한 Fe/Ni 합금전착 실험에 앞서 우선 평판에 대한 Fe/Ni 전착특성을 조사하기 위하여 Hull Cell을 구성하고 동일 전해질에서의 전착실험을 실시하였다. Fe/Ni 합금 도금층의 철함량은 전류밀도, 온도, 교반속도 및 pH 등의 전착조건에 따라 변화하지만 전착변수의 조절만으로 음극상의 위치에 따른 조성 균일화를 이루기는 어려우며, 조성 균일화에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 anomalous codeposition으로 인한 Fe 이온의 확산을 제어할 수 있는 교반속도와 전류밀도라고 할 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 교반속도와 전류밀도를 제외한 다른 변수는 고정하였으며, 이에 대한 전착조건은 Table 1에 요약하였다.

한편, 전류밀도의 영향을 조사하기 위하여 구성된 Hull Cell

Table 1. Electrodeposition conditions for Fe/Ni alloy employed in the work.

Composition of Electrolyte	Nickel sulfamate	242.2 gr/L
	Ferrous chloride	30 gr/L
	Boric acid	30.9 gr/L
	Sodium dodecyl sulfate	0.5 gr/L
	Ascorbic acid	1 gr/L
	Sodium saccharin	2 gr/L
Temperature	50 ± 5°C	
pH	2.5	

은 267 mL 표준 Hull Cell을 사용하였으며, 시험편인 음극은 0.8 mm 두께의 STS316을 표면 연마하여 평탄하게 한 것을 사용하였고 양극은 두께 1 mm의 니켈판을 표면 산화층을 제거한 후 사용하였다. 인가해 준 전류는 1 A이었고, 총 전착시간은 3 시간이었다(Potentiostat, 273 A, EG&G). 일반적인 Hull Cell 시험과 마찬가지로 별도의 교반은 실시하지 않았으며, 전착이 끝난 다음 시험편의 고전류밀도 끝단에서 10 mm 떨어진 지점에서부터 10 mm 간격으로 저전류밀도 끝단 쪽으로 EDS 분석을 하여 Fe/Ni 함량변화를 측정하고 EDS분석을 실시한 각 지점마다 Hull equation에 따른 전류밀도를 이론적으로 계산하여 전류밀도 변화에 따른 전착층의 조성변화를 조사하였다. 또한, 각 지점에서의 SEM(Hitachi, 2400) 분석을 통하여 전착층 표면의 morphology를 관찰하였다.

한편, 전류밀도와 교반속도의 영향을 조사하기 위한 Fe/Ni 합금전착실험은 20 × 20 mm 정사각형 STS304를 작업전극으로 사용하고 양극으로는 Ti basket에 ball type의 양극 니켈을 담아 음극과 평행하게 설치하고 paddle type 교반기를 이용하여 paddle의 왕복속도를 변화시키면서 얻어진 Fe/Ni 합금 후막에 대한 조성과 열팽창 특성을 조사하였다. 마지막으로 이와 같은 기초실험 결과를 토대로 다공성 그물구조 구리를 대상으로 한 Fe/Ni 합금전착실험은 전류밀도 20 mA/cm², Paddle cycle 1.1 Hz로 하고 양극으로는 양극 니켈과 iron ball을 4:6의 비율로 Ti basket에 담아 전착을 실시하였다. 작업전극으로 사용한 다공성 그물구조 구리의 제조는 이미 보고한 방법^{1,2)}을 사용하였다.

2.2. 다공성 그물구조 방열재료의 방열성능 시험

앞에서 제작한 다공성 그물구조 방열재료에 대한 방열성능 시험은 Fig. 1의 측정장치를 제작하여 실시하였다. 방열재료인 다공성 그물구조 금속(skeleton metal)의 한 면을 열전도율이 우수한 알루미늄으로 molding 하고 이 시편을 실험장치에 맞게 설계된 holder에 고정시키고 틀에 끼워 장착하였다. 한편, 방열재료 이외의 방열을 최소화하기 위해 chamber 전체를 단열재로 보온하였다. 측정 방법은 주어진 시편을 설명한 바와 같이 장착하고 chamber에 물을 넣은 다음 온도조절기와 heater를 이용하여 chamber내의 수온을 80°C로 맞추고 heater를 끄는 것과 동시에 냉각공기를 정해진 유량으로 방열재료 전면으로 분사시켰다. 냉각시간이 경과하면서 시작되는 수온변화는 기록계(Yokogawa, DR1400)에 기록하였으며, 측정 중에는 지속적인 교반을 통해 chamber내의 수온이 균일하도록 하였다.

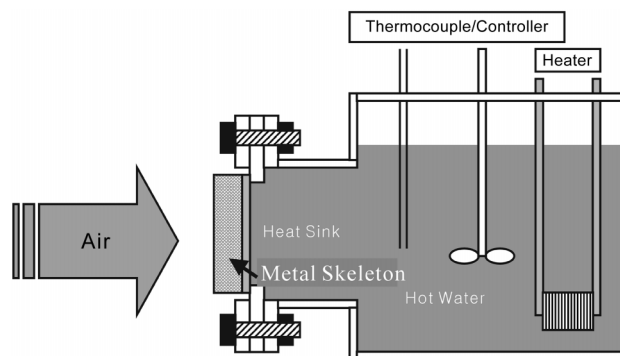


Fig. 1. Experimental apparatus for measurement of heat dissipation of metal skeleton.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Hull Cell을 이용한 Fe/Ni 합금전착

Fig. 2는 Hull Cell 작업전극의 고전류밀도 끝단부터 일정 거리 간격으로 EDS분석을 통해 전착층내의 Fe 함량변화를 도시한 결과이다. Hull Cell 작업전극의 한쪽 끝은 geometry 상 양극과 가까워서 전류밀도가 집중되므로 고전류밀도이고 반대쪽 끝은 반대로 가장 저전류밀도를 나타내게 된다. 그림에서 보면, 고전류밀도 끝단에서 12 mm 떨어진 지점에서의 Fe 함량은 약 5%로 가장 낮았고 이후 저전류밀도 쪽으로 갈수록 2차함수의 형태로 Fe 함량이 증가하는 추세를 보이고 있다. 특히, 마지막 저전류밀도 끝단부분에서는 Fe 함량이 23%까지 증가하였다. 한편, Hull Cell에서의 전류밀도 분포를 잘 알려진 다음의 Hull equation을 이용하여 계산할 수 있는데,

$$i = I(C_1 - C_2 \log L) \quad (1)$$

여기에서, i 는 각 위치에서의 전류밀도, I 는 인가해 준 총 전류밀도, L 은 고전류밀도쪽 끝에서부터 음극상의 거리, C_1 , C_2 는 전해액의 성질에 따른 상수이다. 본 실험에서는 $C_1 = 5.10$,

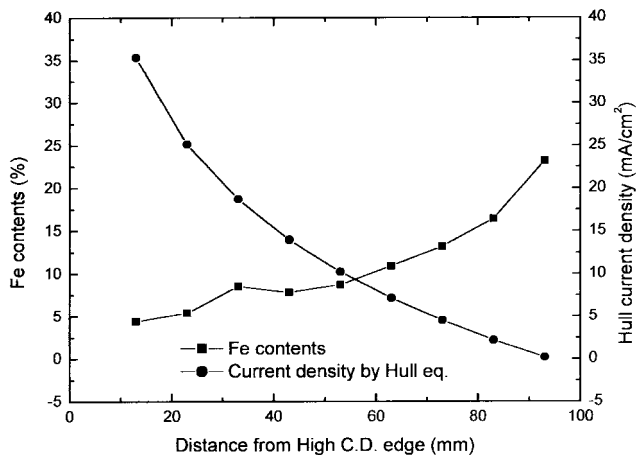


Fig. 2. Variation of Fe content and current density with distance from high C.D. edge in Hull Cell.

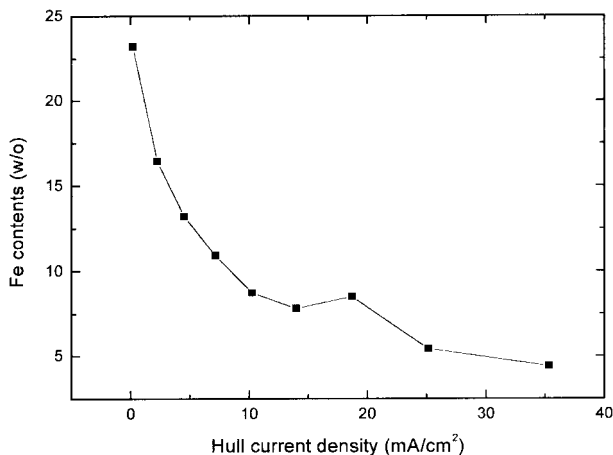


Fig. 3. Effect of Hull current density on Fe content in Fe/Ni layer.

$C_2 = 5.24$ 의 값을 대입하여 계산한 결과를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 결과를 토대로 하여 Hull current density 변화에 따른 전착층내의 Fe 함량 변화를 나타낸 것으로, 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 전류밀도의 증가에 따라 Fe 함량은 지속적인 감소 추세를 보이고 있다. 이 같은 결과는 30 mA/cm^2 이하의 저전류밀도에서 전류밀도가 증가함에 따라서 전착층의 Fe 함량이 동시에 증가하는 경향을 보인 Horkans¹¹⁾ 나 Nakamura¹²⁾의 결과와는 다르게 나타났다. 이것은 본 실험의 Hull Cell에서 별도의 교반없이 전착이 수행되었기 때문에 mass transfer 제약에 따른 농도분극이 발생하여 저전류밀도 영역임에도 불구하고 Hull Cell 전극 전역영역에서 전류밀도가 증가함에 따라 Fe 함량이 감소하는 것으로 사료된다. 실제로 Djokic¹³⁾의 실험에서 착이온이 강하게 형성되어 분극이 증가하는 경우 전류밀도 증가에 따른 지속적인 Fe 함량의 감소가 관찰된 바 있다. 따라서, Fe/Ni 합금전착시 전착층의 효과적인 조성제어를 위해서는 전해액의 교반이 반드시 필요하다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 4는 Hull Cell 실험을 실시하여 얻은 전착시편의 양쪽 끝 부분과 중앙부의 표면 morphology를 SEM을 사용하여 관찰한 사진으로써, 저전류밀도일 때에는 표면이 고르고 치밀한 조직으로 전착되다가 점차 전류밀도가 증가하면서 입자가 크고 거칠게 전착되는 현상을 관찰할 수 있었다. 이것은 일반적인 전착 실험에서 나타나는 경향과 동일한 현상으로써, 따라서 표면이 고른 Fe/Ni 합금전착층을 얻기 위해서는 가능한 한 전류밀도가 낮은 영역에서 전착을 실시하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

3.2. 다공성 그물구조 방열재료의 제조

Hull Cell 실험결과를 토대로 Paddle type 교반조에서 평판에 대한 Fe/Ni 합금전착을 실시하였다. Fig. 5는 전류밀도를 10 mA/cm^2 로 고정하고 전해액의 교반속도를 변화시키면서 일정 시간 합금전착을 실시한 후 각 단계별로 전착이 끝난 전해액을 채취하여 Fe 및 Ni 이온농도를 측정된 결과이다. 그림 (a)에서 보는 것처럼 전해액중의 Fe 이온은 교반속도가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보이다가 0.8 Hz (paddle 왕복속도 0.8 회/sec)를 기점으로 더 이상 감소하지 않고 그대로 유지되는 현상을 보였다. 반면, 그림 (b)에서 보이는 것처럼 Ni 이온농도는 교반속도 0.8 Hz 까지 큰 변화없이 유지되거나 약간 증가하는 현상을 보이고 있다. 이것은 본 실험에서 사용한 양극이 Ti basket에 Ni ball만을 넣어 사용하였기 때문에 Ni의 경우 전착이 진행되면서 양극 용해에 따라 전해액 내에 Ni 이온이 꾸준히 공급되어 소모되는 만큼 보충하기 때문이다. 그러나, Fe 이온의 경우 Ni과는 달리 양극에서 공급되는 부분이 없기 때문에 전착이 진행됨에 따라 전해액 중의 농도는 계속해서 감소하게 된다. Fig. 5에서 교반속도 0.8 Hz 까지 Fe 이온농도가 감소되다가 그 이후에는 거의 일정하게 유지되는 현상으로부터 교반속도 0.8 Hz 까지는 mass transfer가 전체 전착속도를 지배하는 율속단계이며, 그 이후부터는 용액 교반이 충분하여 charge transfer가 오히려 율속단계가 되고 있다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 또한, Ni의 경우 교반속도가 증가하면서 전해액 중의 이온농도가 증가하는 추세를 보이는 이유는 인가해 준 총 전류가 일정하기 때문에 양극에서 용해되는 Ni 양은 일정한데 반하여 교반속도가 증가하면서 Fe 전착량은 꾸준히 증가하고 Ni 전착량은 상대적으로 감소하였기 때문으로 풀이된다.

Fig. 6은 Hull Cell 시험과 교반속도의 영향실험을 통하여

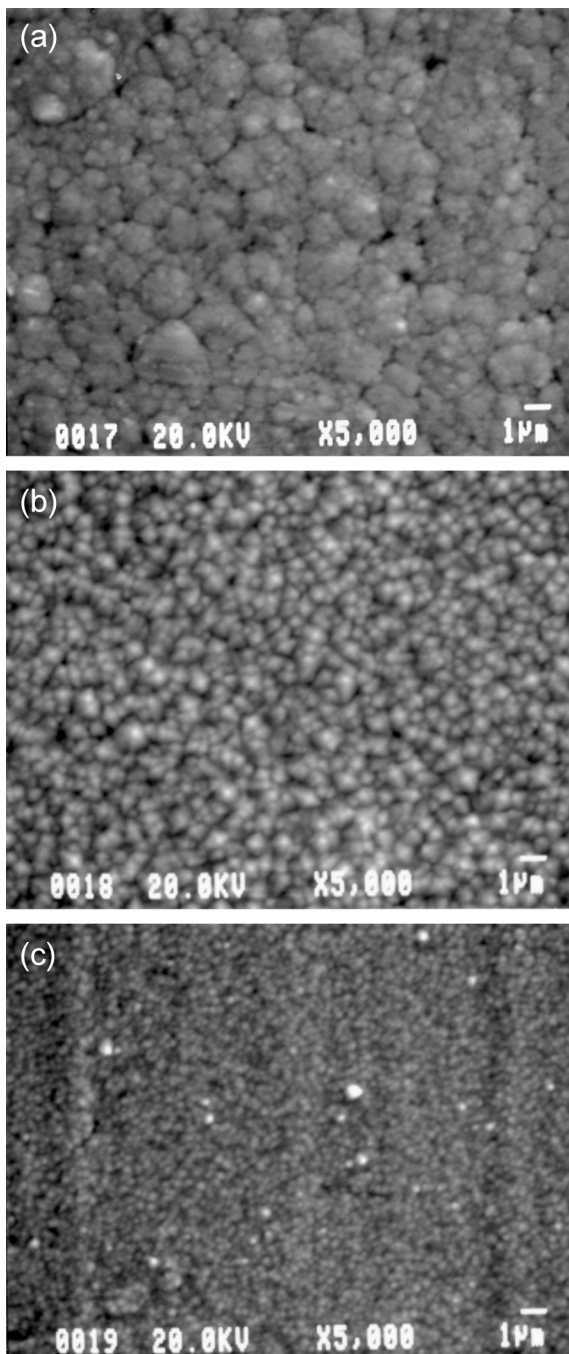


Fig. 4. SEM observation of surface morphology of Fe/Ni layer from Hull cell test. (distance from high C.D. edge : (a) 12 mm, (b) 52 mm, (c) 92 mm)

얼어진 조건으로 Fe 함량 60%인 Fe/Ni 합금 후막을 제조하여 열팽창율을 측정한 결과로써, TMA(Thermo Mechanical Analysis, Perkin Elmer, TMA7) 분석을 통해 얻은 data를 normalizing하여 순수 구리의 팽창율과 비교한 결과 본 실험에서 제작한 Fe/Ni 합금층의 열팽창율이 현저히 낮게 나타나 다공성 그물구조 구리에 이와 같은 Fe/Ni 합금전착을 실시함으로써 칩 소자와의 열팽창율 차이를 극복할 수 있을 것으로 사료되었다.

한편, Fig. 7은 Fe/Ni 합금층이 전착된 다공성 그물구조 구

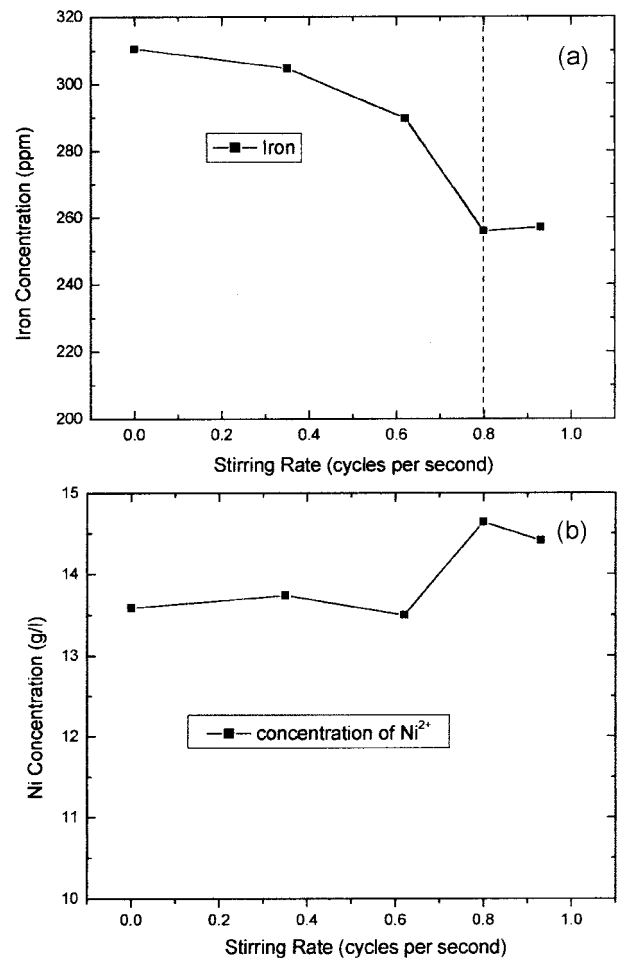


Fig. 5. Variation of Fe and Ni concentration in electrolyte with stirring rate.

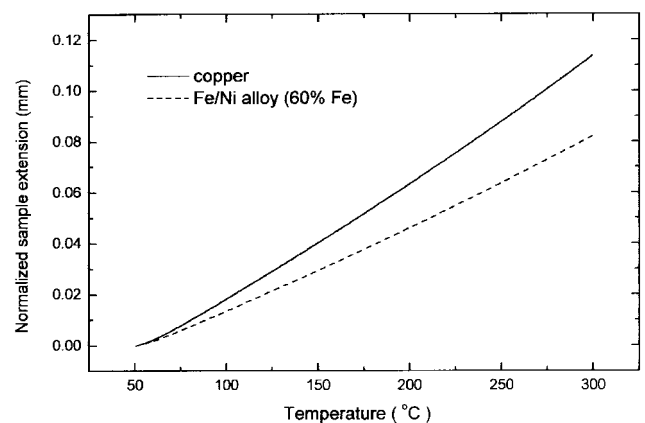


Fig. 6. TMA analysis of Fe/Ni layer obtained by electrodeposition.

리의 단면을 관찰한 전자현미경 사진으로 사진 속의 백색 선은 두 층의 성분을 확인하기 위해 조사한 Cu 함량 profile을 보여 주고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 구리층과 전착된 Fe/Ni 합금층이 경계가 명확하게 상호 분리된 상태를 확인할 수 있었으며, 따라서 전착과정에서의 두 층간의 상호확산현상은 거의 없는 것으로 생각되었다.

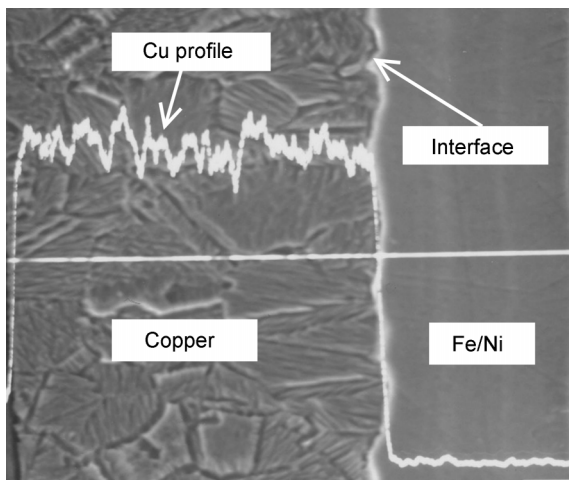


Fig. 7. SEM and EDS analysis of Cu skeleton electrodeposited with Fe/Ni.

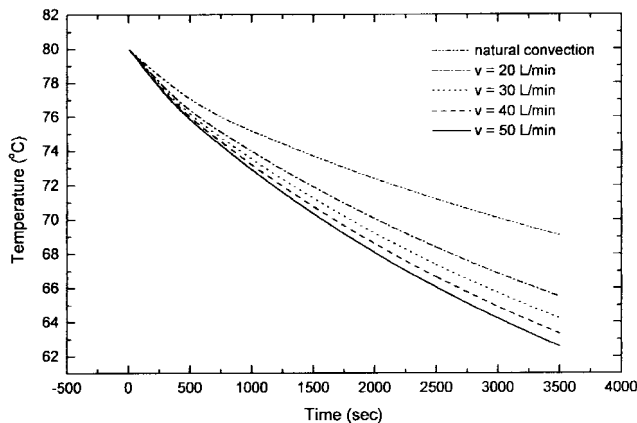


Fig. 8. Heat dissipation profile of Cu skeleton depending on flow rate of cooling air. (45 ppi, porosity 91%)

3.3. 다공성 그물구조 방열재료의 방열성능

본 실험에서 제작한 다공성 그물구조 방열재료의 방열특성은 재료의 기공크기(ppi, pores per inch), 공극율, 냉각공기의 유량 등에 따라서 달라지게 되며, 일반 벌크재료와는 달리 열전도를 측정이 곤란하기 때문에 본 실험에서는 자체 제작한 방열성능 측정장치를 사용하여 상대적인 평가법으로 방열특성을 조사분석하였다.

Fig. 8은 기공크기 45 ppi, 공극율 91%의 다공성 그물구조 구리(Cu skeleton)를 시편으로 하여 냉각공기의 유량변화에 따른 chamber 내 수온변화를 측정한 결과로써, 예상한 바와 같이 공기 유량이 증가할수록 수온강하 속도도 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 이때, 각 곡선의 평균 기울기를 계산하여 시편 단위면적당 방열량을 $[W/m^2 \cdot K]$ 의 단위로 표시할 수 있으며, 이 방법으로 측정한 알루미늄 평판의 방열량은 $88 W/m^2 \cdot K$ 이었고, 구리 평판의 방열량은 $124 W/m^2 \cdot K$ 로 나타났다.

Fig. 9는 기공크기를 45 ppi로 고정하여 제작한 다공성 그물구조 구리에 Fe 함량 60% Fe/Ni 합금층을 전착코팅하여 얻은 방열재료를 시편으로 방열특성을 조사한 결과이다. 이때, Fe/Ni 전착시간은 모든 시편에 대하여 2시간으로 동일하게 유지하였

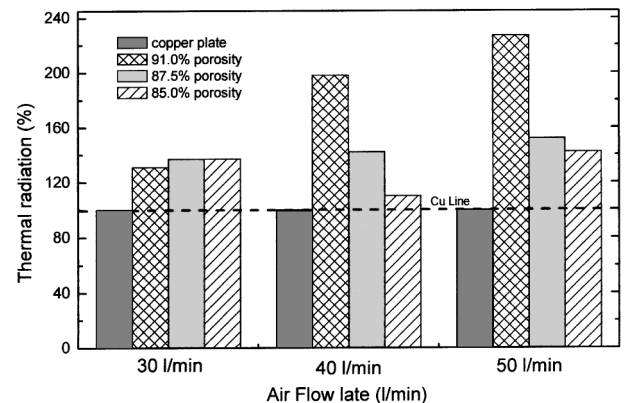


Fig. 9. Heat dissipation of Cu skeleton electrodeposited with Fe/Ni depending on porosity and flow rate of cooling air.

으며, 공극율은 85%, 87.5% 및 91%로 제어하여 제작하였다. 구리 평판의 방열량을 100% 기준으로 하여 각 시편의 상대적 방열량을 살펴 보면 그림에서 보는 것처럼 본 실험에서 제작한 방열재료 모두가 구리 평판에 비해 높은 방열성능을 보이고 있으며, 특히 공극율 91% 시편은 냉각공기 유량 50 L/min 일 때 구리 평판의 230%에 해당하는 방열특성을 나타냈다. 전반적으로 동일 시편의 경우 냉각공기 유량이 클수록 구리 평판에 대한 상대적 방열량이 큰 것으로 나타나 본 실험의 방열재료가 가지는 특징, 즉 내부 통기성이 좋기 때문에 방열성능을 향상시킬 수 있다는 예상을 확인시켜 주었다. 또한, 공기 유량 30 L/min 인 경우를 제외하고는 시편의 공극율이 증가할수록 우수한 방열성능을 보이고 있어 앞에서 언급한 바와 같이 방열재료의 금속부분에 의한 열전도보다는 주로 통기성에 의해 방열성능이 좌우됨을 알 수 있었다. 결론적으로 본 실험에서 제작한 다공성 그물구조 구리에 Fe/Ni 합금을 전착코팅한 방열재료를 high power 반도체 칩의 방열재료로 사용할 경우 칩 소자와의 열팽창을 차이를 최소화할 수 있고 기존의 알루미늄 혹은 구리 평판 방열재료에 비해 매우 효과적으로 방열문제를 해결할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

다공성 그물구조 구리에 Fe/Ni 합금전착법을 사용하여 코팅한 방열재료의 제조 및 방열성능평가 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 267 mL 표준 Hull Cell을 구성하여 전류밀도 분포에 따른 Fe/Ni 합금전착특성을 조사한 결과 고전류밀도 부분에서 전착층의 Fe 함량은 낮고 저전류밀도 쪽으로 갈수록 Fe 함량이 증가하는 경향을 보였다.

(2) Hull current density 변화에 따른 전착층내의 Fe 함량 변화를 살펴 보면 전류밀도의 증가에 따라 Fe 함량이 지속적으로 감소하였으며, 이것은 Hull Cell 전극 전영역에서 농도분극에 의한 mass transfer 저항때문으로 사료되었다. 또한, Fe/Ni 합금전착의 효과적인 조성제어를 위해서는 전해액의 교반이 필수적인 것으로 나타났다.

(3) Paddle type 교반기를 사용한 교반속도의 영향을 조사한 결과 교반속도가 증가하면서 율속단계가 mass transfer step으로부터 charge transfer step으로 전환되는 현상을 관찰할 수 있었으며, 본 실험에서는 이의 경계 지점이 paddle 왕복속도 0.8

Hz 부근에서 나타났다.

(4) 다공성 그물구조 구리에 Fe/Ni 합금전착을 실시하여 제작한 방열재료를 대상으로 방열성능 평가를 수행한 결과 구리 평판 대비 최대 230%의 방열량 증가를 관찰할 수 있었으며, 또한 시편 공극율이 증가할수록 방열량이 증가하는 현상을 보였다.

참고문헌

1. K. H. Lee, H. Y. Lee and W. Y. Jeung, *J. Kor. Electrochem. Soc.*, **3**, 152 (2000)
2. K. H. Lee, H. Y. Lee and W. Y. Jeung, *J. Kor. Electrochem. Soc.*, **4**, 41 (2001)
3. S. H. Lee, S. H. Choo and M. H. Rhee, *Metall. Trans. A*, **28**, 2773 (1997)
4. C. L. Chien and K. Vafai, *Adv. Appl. Mech.*, **27**, 225 (1990)
5. B. V. Antohe, J. L. Lage, D. C. Price and R. M. Weber, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **17**, 594 (1996)
6. D. L. Ellis and D. L. McDanel, *Metall. Trans. A*, **24**, 43 (1993)
7. B. R. Henriksen, *Composites*, **21**, 333 (1990)
8. D. P. H. Hasselman and L. F. Johnson, *J. Comp. Mater.*, **21**, 508 (1987)
9. A. Mortensen et al., *Metall. Trans. A*, **20**, 2535 (1989)
10. T. W. Clyne and J. F. Mason, *Metall. Trans. A*, **18**, 1519 (1987)
11. J. Horkans, *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 45 (1981)
12. N. Nakamura and T. Hayashi, *Plat. Surf. Finish.*, **72**, 42 (1985)
13. S. S. Djokic and M. D. Maksimovic, *Modern Aspects of Electrochemistry*, No. 22, edited by J. O'M. Bockris et al., Plenum Press, New York, pp. 417-566 (1992)
14. S. Hessami and H. White, *J. Electrochem. Soc.*, **136**, 3611 (1989)
15. J. J. Kelly, C. Y. Tian and A. C. West, *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 2540 (1999)