

Study on the Fabrication of Electrical Conductive Ni-Based Alloy for IC Semiconductor Test Socket

In-Ho Kim

R&D Center NATM Co. Ltd, Cheonan 31027, Korea

Kyung-Sik Kim, Tae-Heng Lee, and Chang-Bin Song*

Div. of Materials Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

(Received 8 December 2020, Received in final form 22 December 2020, Accepted 22 December 2020)

Recently, pure Ni powder, used as conductive powder material for semiconductor test sockets, has disadvantage of decreasing the life cycle of test sockets because of its low hardness ($H_v = 100$). This study was carried out composition design of the Ni-(0.1~30)wt%X binary alloys and the Ni-3wt%Fe-0.3wt%X ternary alloys, ingot manufacturing, heat treatment, polishing, microstructure observation and characteristic evaluation to develop new Fe-based Electric Conductivity alloy with excellent hardness to replace pure nickel powder. As a result, although the Ni-5wt%Co(Fe) binary alloys with Co and Fe elements is more conductive and magnetic than other alloys, in order to improve hardness, it was found that the adding B and C element is more effective. Meanwhile, it was found that the electrical resistance of alloys depended on Matthiessen's rules and mixing rules, the magnetism of alloys is enhanced in proportion to the increase addition of Co and Fe elements. Furthermore, the hardness was found that the presence of solid solution (or intermetallic compound) according to the chemical composition of the alloy, and the precipitation hardening caused by heat treatment were combined.

Key words : semiconductor test socket, electric conductivity powder, electrical resistance, magnetism, hardness

IC 반도체 테스트 소켓용 전도성 니켈기(Ni-Based) 합금제조에 관한 연구

김인호

엔테크네(주) 기술연구소, 충남 천안시 서북구 입장면 연곡길 172-24, 31027

김경식 · 이태행 · 송창빈*

공주대학교 공과대학 신소재공학부, 충남 천안시 서북구 천안대로 1223-24, 31080

(2020년 12월 8일 받음, 2020년 12월 22일 최종수정본 받음, 2020년 12월 22일 게재확정)

최근 반도체 테스트 소켓용 전도성 분말소재로 사용되는 순 니켈분말(pure Ni powder)은 경도($H_v = 100$ 정도)가 낮기 때문에 테스트 소켓의 수명이 저하하는 단점이 있다. 본 연구는 이러한 순 니켈분말을 대체할 수 있는 경도가 우수한 새로운 합금을 개발하기 위해 Ni-(0.1~30)wt%X 2원계 및 Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원 합금의 조성설계, 잉곳제조, 열처리 및 연마 후, 미세조직 관찰 및 물성(전기저항, 자성 및 경도)을 조사하였다. 그 결과, Co 및 Fe 원소를 첨가한 Ni-5wt%Co(Fe) 2원계 합금이 다른 합금에 비해 전도성 및 자성이 비교적 우수한 것으로 나타났지만, 경도 향상을 위해서는 B 및 C의 미량 첨가하는 것이 효과적인 것으로 조사되었다. 한편 합금의 전기저항은 마시젠의 규칙(Matthiessen's rule)과 혼합법칙(rule of mixture)에 의존하며, 합금의 자성은 Co 및 Fe의 첨가량 증가에 비례하여 향상되었다. 또한 경도는 각 합금원소의 화학적 조성에 따른 고용체(혹은 금속간화합물)의 존재여부 및 열처리에 의한 석출경화 등이 복합적으로 작용함을 알 수 있었다.

주제어 : 반도체 테스트 소켓, 전기전도성 분말, 전기저항, 자성, 경도

I. 서 론

최근 IC 반도체 소자는 스마트폰/태블릿PC 등 각종 모바일 통신용 기기는 물론, IT, BT, 자동차 및 가정용/산업용/의료용/국방용 등의 각종 다양한 전기·전자부품이 증가함에 따라 그 수요 또한 증가하고 있다.

한편 IC 반도체 공정에 의해 완성된 반도체 패키지는 출하 전 최종적으로 전기적 및 성능 테스트를 위해 반도체 패키지 회로와 검사장비의 회로단자와 연결하는 테스트 소켓을 사용하고 있으며, 용도 및 제조사에 따라 다양한 실용 특허기술 제안과 함께 제조 및 판매되어 사용되고 있다[1-9]. 특히 이러한 테스트 소켓의 전기적 회로의 소재로 사용되는 전도성 분말은 소켓의 전기적 특성 향상을 위해 우수한 전도성뿐만 아니라, 소켓 제조의 용이성 및 수명 향상을 위해 적당한 자성 및 경도가 요구되므로 그에 적합한 소재개발이 필요한 상황이다[10-14]. Fig. 1은 반도체 테스트 소켓 제조공정에 관한 모식도 및 상용 제품사진을 나타낸 것이다.

현재 이러한 테스트 소켓의 전도성 분말소재로 사용되는 순 니켈분말은 원래 경도(Hv = 100 정도)가 낮아 테스트 소켓의 수명이 저하하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 니켈분말을 대체하기 위한 일환으로 경도가 우수한 새로운 Ni기 합금조성 설계, 전기저항, 자성 및 경도 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 시도한 전도성 합금조성 범위는 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 및 Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원계이며, 단, X=Ag, Cu, Al, Be, Ca, Mg, W, Co, Mo, Fe, Sn, Cr, Zr, Mn, B, C 원소를 사용하였다. 합금시료의 제조는 상용 시약

급 순도 99% 이상의 원료금속을 전자저울로 천평하여 알루미늄(혹은 마그네시아) 도가니에 장입하여 고주파 유도 진공 용해로를 이용하여 용해하고 수냉 동물드에 냉각한 후, 절단(25 mm × 25 mm × 6 mm), 열처리(250~800 °C, Ar 분위기), 연마 및 버핑하였다. 준비된 합금잉곳의 전기저항은 4 point 표면저항기, 자속밀도(Bs)는 진동시료자성측정기(VSM), 경도는 마이크로 비커스 경도기(Hv)로 측정하였으며, 일부의 합금시료는 미세조직을 관찰하기 위해 SEM/EDS로 분석하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. Ni-(0.5-30)wt%X 2원계 합금

본 연구에서는 새로운 합금설계를 위해 사용한 원소는 우선 주기율표로부터 비교적 비저항이 작고, 합금의 자성 및 경도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 공업적 입수(入手)성과 경제성을 고려하여 선택하였으며, 이들 원소를 비저항이 작은 순으로 나열하면 다음과 같다.

$$\text{Ag} < \text{Cu} < \text{Au} < \text{Al} < \text{Be} < \text{Mg} < \text{W} < \text{Co} < \text{Mo} < \text{Ni} < \text{Pt} < \text{Fe} < \text{Sn} < \text{Cr} < \text{Ta} < \text{Nb} < \text{Zr} < \text{B} \quad (1)$$

Table I은 본 연구에서 시도한 Ni-(0.1~30)wt%X 2원계 합금시료의 전기저항, 자성 및 경도, 그리고 열처리 조건을 나타낸 것이다. 우선 Cu, Al, Be, W, Co 원소는 순 Ni 원소보다 전도성이 우수한 원소이기 때문에 합금의 전기저항 감소효과에 기여할 것으로 예상되었지만, 모두 전기저항이 크게 증가하였으며, Al, Be, W 원소보다 Cu 및 Co 원소를 첨가한 합금의 전기저항 증가가 비교적 적은 것으로 나타났다. 또한 Fe, Sn, Cr, Zr, B, C 원소는 순 Ni 원소보다 원래 비저항이 큰 원소들이기 때문에 합금의 전도성 및 자성보다 경

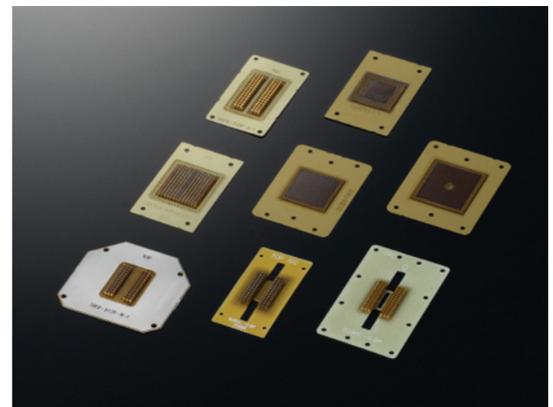
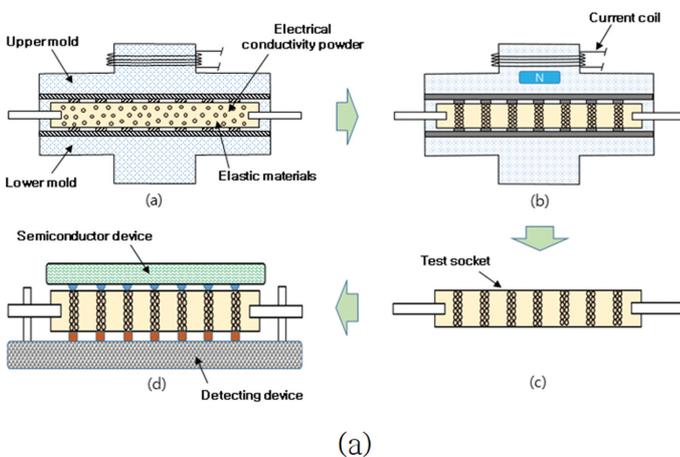


Fig. 1. (Color online) A schematic diagram of the manufacturing process (a) and a commercial product photograph (b) for semiconductor test socket.

Table I. Results of electrical resistance, magnetic property and hardness, and heat treatment conditions of Ni-(0.1-30)wt%X (X = Ag, Cu, Al, Be, W, Co, Fe, Sn, Cr, Zr, B, C) binary alloy samples attempted as a previous research in this study.

Alloy composition (wt%)	Heat treatment and properties				Alloy composition (wt%)	Heat treatment and properties			
	Electric resistance ($10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$)	Saturation magnetic flux density (Wb/m^2 , T)	Hardness (HV)	Heat treatment condition		Electric resistance ($10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$)	Saturation magnetic flux density (Wb/m^2 , T)	Hardness (HV)	Heat treatment condition
pure Ni	6.8	0.52	105.6	500 °C × 5 h	Ni-5.0Fe	9.2	0.68	107.8	500 °C × 5 h
pure Co	5.7	1.38	253	"	Ni-10.0Fe	11.4	0.84	120.7	"
pure Fe	10.7	1.94	150	"	Ni-15.0Fe	13.3	0.93	121.5	"
Ni-5.0Cu	11.5	0.49	101.9	"	Ni-22.0Fe	15.0	1.06	123.3	"
Ni-3.0Al	26.0	0.37	115.4	"	Ni-3.0Sn	11.0	0.54	99.3	"
Ni-5.0Al	50.5	0.14	102.3	"	Ni-5.0Cr	55.0	0.18	108.4	"
Ni-1.0Be	17.2	0.50	132.9	"	Ni-3.0Zr	15.2	0.47	135.8	"
Ni-5.0W	18.0	0.41	107.8	"	Ni-3.0B	17.0	0.27	429.6	"
Ni-5.0Co	9.0	0.66	104.3	"	Ni-3.0C	11.5	0.49	110.0	"
Ni-10.0Co	11.3	0.76	112.5	"	-	-	-	-	"
Ni-20.0Co	12.1	0.82	120.2	"	-	-	-	-	"
Ni-30.0Co	13.0	0.89	128.0	"	-	-	-	-	"

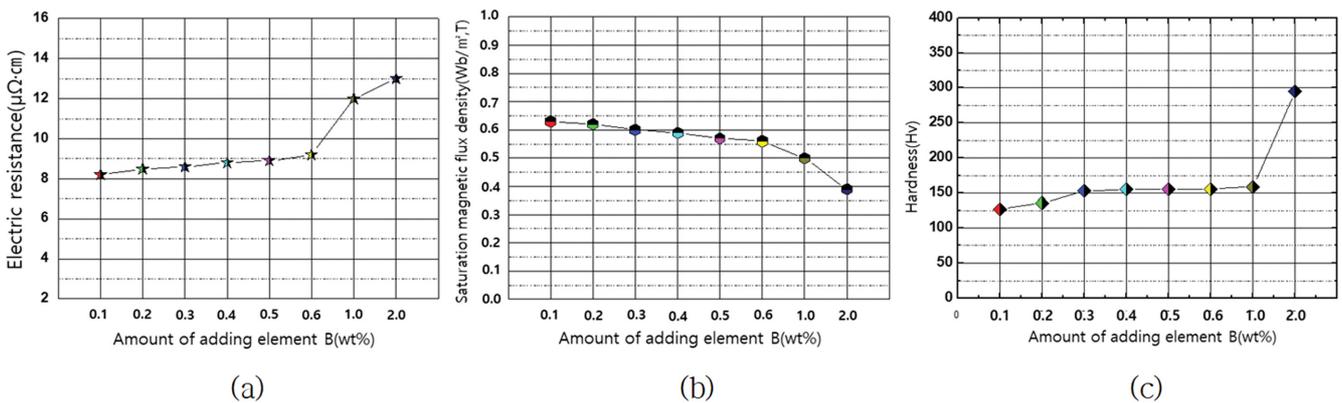


Fig. 2. (Color online) Comparison of characteristics according to the addition of element B in Ni-(0.1~2.0)wt%B binary alloys prepared by heating at 500 °C for 5 h; (a) electrical resistance, (b) magnetic property and (c) hardness.

도향상에 기여할 것으로 예상되었지만 효과는 미미하였다. 특히 Fe의 경우 첨가량 증가에 따라 자성 및 경도 특성이 향상되지만 전기저항이 증가하였으며, Sn 원소는 전기저항이 비교적 낮지만 경도가 순 Ni보다 낮았고, Zr은 경도 증대효과가 비교적 크지만 전기저항이 크게 증가함을 알 수 있다.

한편 준금속(metalloid) B 및 비금속 C는 경도 증대가 예상되었던 원소로서, B는 예상대로 Hv = 429.6로 크게 증가하였지만, C는 Hv = 110으로 순 Ni보다 약 4% 정도 증가하였으며, 전기저항 증가와 함께 자성은 크게 낮아짐을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이와 같은 Ni-(0.1~30)wt%X 2원계 합금의 선행연구 결과, Table I에서 알 수 있는 바와 같이, Co 및 Fe 원소를 첨가한 Ni-5.0wt%Co 및 Ni-5.0wt%Fe계의 2종류 합금시료가 다른 합금에 비해 전도성이 비교적 우수할 뿐만

아니라, 경도 및 자성도 비교적 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 2는 전술한 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금에 대한 실험결과를 토대로 하여 Ni 중에 B 원소의 첨가량을 변화시킨 Ni-(0.1~2.0)wt%B 2원계 합금의 전기저항, 자성 및 경도 특성을 조사한 것이다. Fig. 2(a)에서 알 수 있는 바와 같이, B의 첨가량 증가에 따라 전기저항은 선형적으로 증가하여 질량비로 1.0% 이상 첨가하면 $12.0(10^{-8} \Omega \cdot \text{cm})$ 이상으로 크게 증가하였으며, 반면에 자성(포화자속밀도)은 감소하여 0.6% 이상 첨가하면 순 니켈(0.52T)보다 크게 감소하였다. 한편 경도는 B의 첨가량에 따라 증가하여 2.0%에서는 Hv = 294.8로 크게 증가함을 알 수 있다.

이러한 실험결과로부터 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금의 전기전도성, 자성 및 경도에 대해 고찰해 보면 다음과 같다. 첫째, 합금의 전도성(전기저항)은 다음과 같은 3가지 규칙에 따

라 변화하는 것으로 추측되었다.

① 마시젠의 규칙(Matthiessen's rule)

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (2)$$

단, ρ_t , ρ_i , ρ_d 는 각각 열진동, 불순물 및 냉간가공 정도에 따른 비저항($\Omega \cdot m$) 값이다.

② 고용체(S.S.) 생성

$$\rho_i = AC_i(1 - C_i) \quad (3)$$

단, ρ_i 는 고용체의 비저항, A 는 상수, C_i 는 불순물 농도를 나타낸다.

③ 2상 합금(2 phase alloy) 형성 => 혼합법칙(rule of mixture)

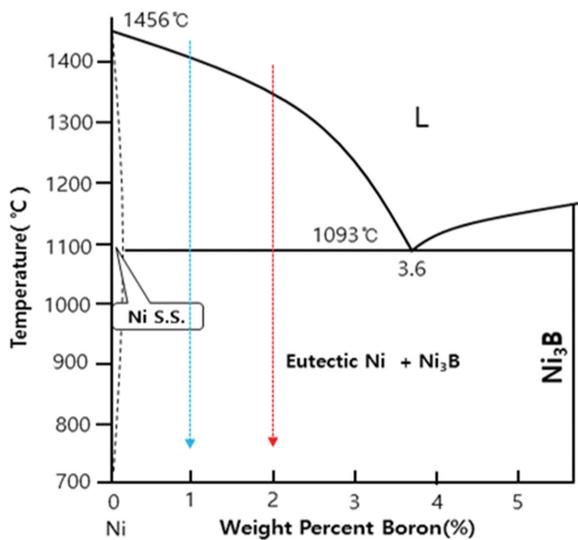
$$\rho_i = \rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta \quad (4)$$

여기서, V 와 ρ 는 각각 상에 대한 체적 분율과 비저항 값이다.

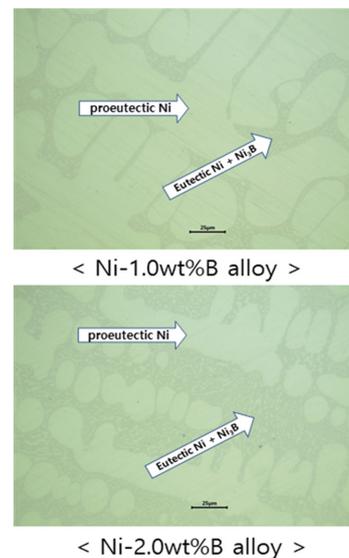
둘째, 합금의 자성은 Table I에서 알 수 있는 바와 같이, 코발트(Co) 및 철(Fe)은 Ni과 같이 대표적 강자성 금속원소로서, 첨가량 증가에 따라 합금의 포화자속밀도(Bs)가 크게 증가함과 동시에 경도도 함께 증가하여 유리하지만, 전기저항이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 보론(B)은 준금속(metalloid) 원소로서, 보통 비정질 연자성 합금의 형성능 증대와 함께 비저항이 크기 때문에 철손 감소효과를 위해 애용되는 원소이다. 하지만 Ni 중에 B첨가는 후술하는 바와 같이, 금속간화합물 Ni₃B 상의 출현으로 경도 향상에 유리하지만, 전기저항과 함께 자성이 크게 감소한다.

셋째, Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금의 경도는 모든 원소의 첨가에 따라 다소 증가하였지만, 특히 B 원소의 첨가효과가 큰 것으로 확인되어 보다 더 상세하게 설명하면 다음과 같다. Fig. 3은 Ni-B 2원계 부분 평형상태도 및 합금잉곳의 미세조직을 OM으로 관찰한 결과이며, Fig. 2(b)에서 알 수 있는 바와 같이, Ni에 B의 첨가량에 따른 경도 증가의 주요 원인은, Ni-B 2원계 부분 평형상태도[15]로부터 예측할 수 있는 바와 같이, Ni 중에 B의 고용범위는 비교적 적지만 Ni-rich 측에 Ni 고용체(S.S.) 존재뿐만 아니라, B 성분이 공정조성 3.6% 이하일 경우에 공정반응에 의한 초정(primary) Ni, 공정(eutectic) Ni 및 금속간화합물 Ni₃B 3상이 공존하는 공정합금(eutectic alloy) 조직의 생성에 기인하는 것으로 판단되며, B 원소의 증가됨에 따라 공정 Ni과 Ni₃B 혼재된 상의 분율이 증가하기 때문인 것으로 확인되었다. 특히 Ni₃B의 증가는 금속간 화합물이므로 경도를 증가시키지만, 전기저항이 크게 증가하므로 B 원소 첨가는 제한적으로 첨가는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

이상과 같이, 본 연구에서는 니켈(Ni)을 주성분으로 하는 Ni-(0.1~30)wt%X(x = Ag, Cu, Al, Be, W, Co, Fe, Sn, Cr, Zr, B, C)계 및 Ni-(0.1~2.0)wt%B 2원계 합금에 대한 전기저항, 자성 및 경도 특성에 대하여 조사하였다. 그 결과, 대부분 합금의 비저항은 마시젠의 규칙(Matthiessen's rule)과 혼합법칙(rule of mixture)에 의존함을 알 수 있었다. 그러나 자성은 Co 및 Fe의 함유량 증가에 비례하며, 특히 경도는 각 합금원소의 화학적 조성에 다른 고용체 혹은 금속간화합물의 존재여부, 열처리에 의한 석출경화 및 분산효과 등이 복



(a) Ni-B 2원계 부분 평형상태도[15]



(b) Ni-B alloy

Fig. 3. (Color online) Partial equilibrium diagram of Ni-B binary alloy and OM image of Ni-B alloy sample prepared by heating at 500 °C for 5 h.

합적으로 작용하는 것으로 추정되었지만, B 원소의 첨가효과가 더욱 큰 것으로 조사되었다.

2. Ni-3Fe-0.3X 3원계 합금

Fig. 4~Fig. 5는 전절에서 시도한 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금의 특성평가 결과 중, Ni-Fe계 합금이 비교적 우수한 것으로 확인되어, 특히 경도 특성을 향상시키기 위해 제 3원소로 Ag, Al, Be, Mo, Sn, Cr, Zr, B, C, Nd를 질량비로 0.3% 첨가하여 제조한 합금시료의 특성을 조사한 결과이다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, Ag, Al, Be, Mo 원소는 원래 순 Ni보다 비저항이 적은 원소들로서, 특히 Ag는 합금의 전기저항 감소를 위해 효과적인 것으로 예상되었지만 첨가효과는 미미하였으며, Al 및 Be 원소의 첨가는 크게 증대하였다. 반면에 자속밀도와 경도는 다소 증가하지만 그 효과는 미약한 것으로 나타났다. 또한 Sn, Cr, Zr 원소 첨가의 경우, 모두 합금의 전기저항이 크게 증가하였으며, 경도 증가 효과는 Cr 원소가 Hv = 123.6로 순 Ni보다 약 15% 증가하여 비교적 크지만, Sn 및 Zr의 첨가효과는 10% 이하로 다

소 낮은 것으로 확인되었다.

한편 B, C 및 Nd 원소의 경우, 전술한 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금과 마찬가지로, 특히 B와 C를 첨가한 경우에 경도는 순 Ni 원소에 비해 각각 약 30% 및 42%로 증가하였다. 반면에 전기저항은 각각 약 42% 및 58%로 크게 증대하는 것으로 나타났다.

또한 Nd는 희토류 원소(Sc, Y 외 15종) 중 하나로서, 특히 Nd는 비저항이 $0.646 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 순 Ni보다 10배정도 적기 때문에 합금의 전기저항 감소효과가 클 것으로 예상되었지만 그 효과는 미미하였으며, 합금의 자속밀도 및 경도의 상승효과도 다른 원소에 비해 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5는 전술한 Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원계 합금 중, Ni-3wt%Fe-0.3wt%B 3원계 합금의 전기저항 및 자성 및 경도의 특성이 비교적 우수한 것으로 확인되어 B의 첨가량을 0.2~1.0% 범위로 변화시켜 실험한 결과이다. 특히 전기저항은 Fig. 2(a)에 나타난 것과 유사하게 B의 첨가량 증가에 따라 크게 증가는 것으로 확인되었다. 또한 자성(Bs)은 예상대

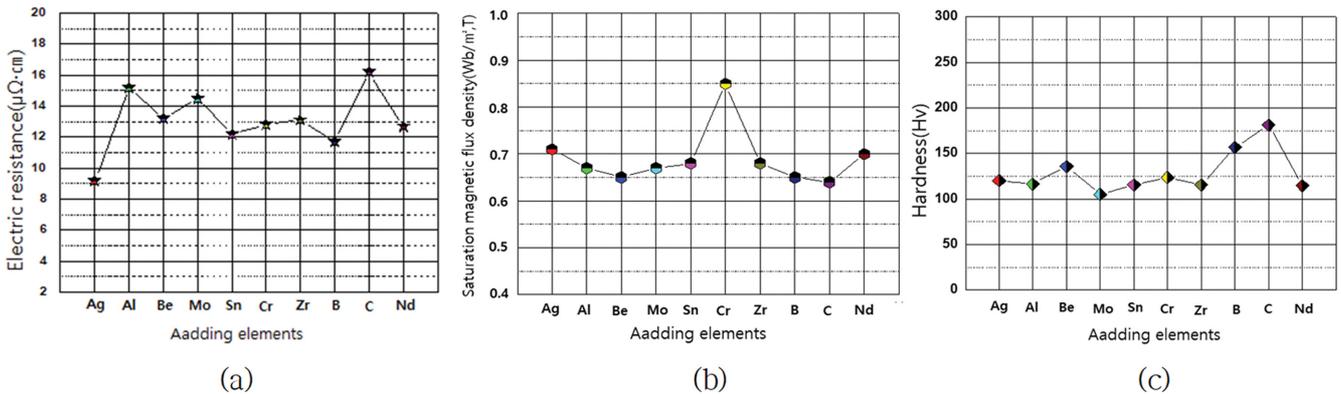


Fig. 4. (Color online) Comparison of characteristics according to the addition of element X in Ni-3wt%Fe-0.3wt%X (x = Ag, Al, Be, Mo, Sn, Cr, Zr, B, C, Nd) ternary alloys prepared by heating at 500 °C for 5 h; (a) electrical resistance, (b) magnetic property and (c) hardness.

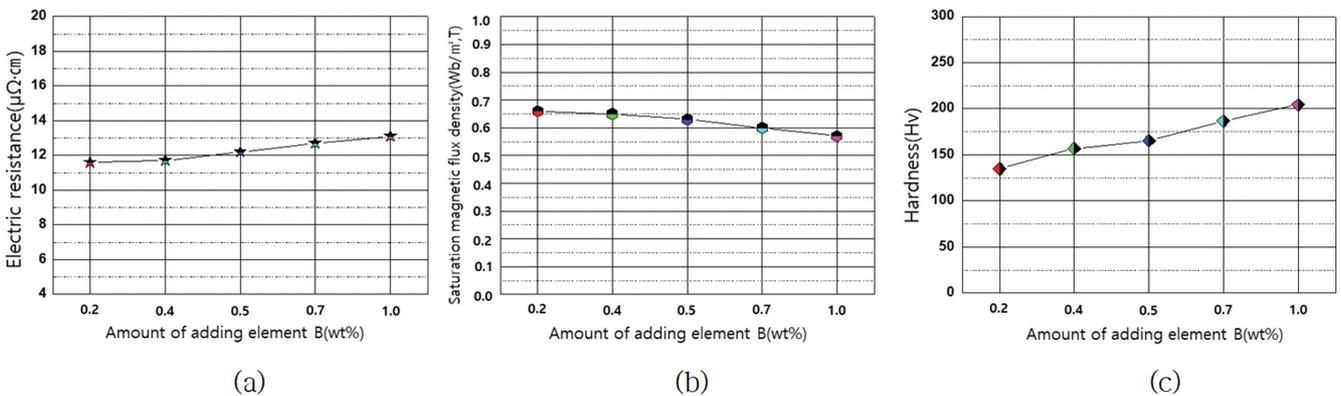


Fig. 5. (Color online) Comparison of characteristics according to the addition of element B in Ni-3wt%Fe-(0.2~1.0)wt%B ternary alloys prepared by heating at 500 °C for 5 h; (a) electrical resistance, (b) magnetic property and (c) hardness.

로 B의 첨가량 증가에 따라 크게 감소하였지만, 경도는 크게 증가하였다.

IV. 결 론

본 연구는 IC 반도체 테스트 소켓의 전기적 특성 향상을 위해 우수한 전도성뿐만 아니라, 테스트 소켓 제조의 용이성 및 수명 향상 요구에 부합하는 자성 및 경도를 갖는 새로운 니켈 기(Ni based) 합금개발을 위해 합금조성은 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 및 Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원계(단, X = Ag, Cu, Al, Be, W, Co, Mo, Sn, Cr, Zr, B, C)로 한정하였으며, 고주파 유도로 용해에 의한 합금잉곳 제조, 열처리 및 물성 평가(전기저항, 자성 및 경도) 등을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

[1] Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금의 경우, Cu, Al, Be, W, Co 원소는 순 Ni 원소보다 전도성이 우수한 원소이기 때문에 합금의 전기저항 감소효과에 기여할 것으로 예상되었지만, 오히려 모두 전기저항이 크게 증가하였다. 그러나 Co 및 Fe 원소를 첨가한 Ni-5Co(Fe) 2원계 합금이 다른 합금에 비해 전도성뿐만 아니라, 자성 및 경도가 비교적 우수한 것으로 나타났다. 한편 Ni-B 2원계 합금은 예상대로 B의 첨가량 증가에 따라 합금의 경도가 크게 증가하지만, 전기저항은 첨가량 증가에 따라 크게 증대함과 동시에 자성이 크게 감소하므로 첨가량을 1.0% 이하로 제한하는 것이 중요한 것으로 사료된다.

[2] Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원계 합금의 경우에, 우선 전기저항은 Ni-(0.5~30)wt%X 2원계 합금과 마찬가지로 첨가원소의 종류에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 특히 Ag를 첨가한 시료가 $9.2(10^{-8} \Omega \cdot \text{cm})$ 로 가장 낮았지만 순 Ni보다 26% 증가하였다. 또한 이들 합금의 자성은 순 Ni보다 모두 우수하였으며, 경도는 B 및 C 원소를 첨가한 합금이 예상대로 증가하여 순 Ni보다 각각 약 30% 및 42% 증가하였다.

[3] 이와 같이, 본 연구에서 시도한 Ni-(0.1~30)wt%X 2원계 및 Ni-3wt%Fe-0.3wt%X 3원계 합금의 전기저항은 마시젠의 규칙과 혼합법칙에 크게 의존하여 대부분 순 Ni보다 큰 값이 얻어졌다. 그러나 자성(Bs)은 Co 및 Fe의 첨가량 증가에 따라 증대하며, 경도는 각 합금원소의 화학적 조성에 다

른 고용체 혹은 금속간화합물의 존재여부, 열처리에 의한 석출경화 등이 복합적으로 작용하는 것으로 사료된다.

[4] 이상과 같이, 본 연구에서 개발된 2 종류 합금 중, 자성 및 경도는 모두 순 Ni보다 우수하지만, 특히 전기저항이 다소 높기 때문에 기존 사용되고 있는 순 Ni 분말소재를 대체하기 위해서는 향후 보다 다양한 소재개발이 필요한 것으로 사료되며, 실제로 현재 테스트 소켓에 사용되는 전도성 분말의 전기저항은 테스트 소켓을 제조할 때 후 공정에 도입되는 Ni, Ag 및 Au의 도금 두께 등의 영향이 큰 것으로 알려져 있기 때문에 대체(적용) 여부의 판단은 어려운 상황이다.

감사의 글

본 논문은 공주대학교 2019년도 교내학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Korean registration patent, No.10-1266124, 2013.
- [2] Japanese Patent Application Laid-Open, No. 2014-538736 (P2014-538736).
- [3] Japanese Patent Application Laid-Open, No. 2015-550320 (P2015-550320).
- [4] Japanese Patent Application Laid-Open, No. 2015-513956 (P2015-513956).
- [5] Korean registration patent, No.10-1672935, 2016.
- [6] Korean registration patent, No.10-1735774, 2017.
- [7] Korean publicized patent, No.10-2020-0110012, 2020.
- [8] Korean registration patent, No.10-1823004, 2018.
- [9] Korean registration patent, No.10-1823006, 2018.
- [10] C. M. Lin, W. C. Chen, and W. Fang, *J. Micromech. Microeng.* **17**, 2461 (2007).
- [11] C. Cho, S. Kim, D. Kong, J. Nam, and B. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 6S (2011).
- [12] B. Tunaboylu, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **14**, 580 (2014).
- [13] A. Boudenne, Y. Mamunya, V. Levchenko, B. Garnier, and E. Lebedev, *Eur. Polym. J.* **63**, 11 (2015).
- [14] M. J. Che, J. A. Yoo, S. M. Kim, T. H. Lee, and C. B. Song, In *proceedings of Materials Research Society of Korea for Spring Conference*, (2019) pp. 5~6.
- [15] T. B. Massalski, *Binary alloy Phase Diagram 2nd Edition* ASM 1, Ohio (1986) pp. 509.