

SnCu계 무연솔더의 Ni, P 첨가에 따른 분극거동

홍원식^{*,**†} · 김희성^{*} · 박성훈^{*} · 김광배^{*}

^{*}한국항공대학교 항공재료공학과

^{**}전자부품연구원 신뢰성평가센터

Polarization Behaviors of SnCu Pb-Free Solder Depending on the P, Ni, Addition

Won Sik Hong^{*,**†}, Whee Sung Kim^{*}, Sung Hun Park^{*} and Kwang-Bae Kim^{*}

^{*}Department of Materials Engineering, Hankuk Aviation University, Gyeonggi, 412-791, Korea

^{**}Reliability and Failure Analysis Center, Korea Electronics Technology Institute, Gyeonggi, 463-816, Korea

(2005년 7월 12일 받음, 2005년 8월 3일 최종수정본 받음)

Abstract It is inclined to increase that use of hazardous substances such as lead(Pb), mercury (Hg), cadmium(Cd) etc. are prohibited in the electronics according to environmental friendly policies of an advanced nation for protecting environment of earth. As this reasons, many researches for ensuring the reliability were proceeding in Pb free soldering process. If the flux remains on the PCB(printed circuit board) in the soldering process or the electronics exposed to corrosive environment, it becomes the reasons of breakdown or malfunction of the electronics caused by corrosion. Therefore in this studies we researched the polarization and Tafel properties of Sn40Pb and SnCu system solders based on the electrochemical theory. The experimental polarization curves were measured in distilled ionized water and 1 mole 3.5 wt% NaCl electrolyte of 40°C, pH 7.5. Ag/AgCl and graphite were utilized by reference and counter electrodes, respectively. To observe the electrochemical reaction, polarization test was conducted from -250 mV to +250 mV. From the polarization curves composed of anodic and cathodic curves, we obtained Tafel slop, reversible electrode potential(E_{corr}) and exchange current density(I_{corr}). In these results, we compared the corrosion rate of SnPb and SnCu solders.

Key words Pb-free, SnCu, intermetallic compound, polarization, corrosion rate

1. 서 론

지구 환경보존을 위한 선진국의 환경정책에 따라 전자제품 제조에 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd) 등 유해물질 사용이 금지되고 있는 추세에 따라 유럽연합(EU)은 2006년 7월부터 자국내 사용되는 모든 제품에 대한 납, 수은, 카드뮴 6가 크롬 등 6개 물질에 대해 사용금지 조치인 유해물질 사용제한지침(RoHS)¹⁾을 발표하였다. 이러한 친환경 정책에 따라 전자제품의 제조에 사용되고 있는 솔더(solder) 중 납을 제거한 무연솔더(Pb-free solder)를 적용하는 솔더링 공정과 무연솔더를 적용한 제품의 신뢰성을 확보하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 추천되고 있는 무연솔더로 220°C 정도의 용점을 갖는 Sn-Ag-Cu계 솔더가 가장 많이 사용되고 있으며, 판매되고 있는 솔더의 형태도 cream, bar, wire의 형태로 다양하게 생산되어 리플로우(reflow), 플로우(flow) 솔더링 공

정에 사용되고 있다. 또한 플로우 솔더링 공정용으로 추천되고 있는 Sn-Cu계 솔더가 있다. 그러나 전자제품 중 인쇄회로기판(PCB)에 솔더링 공정 중 사용한 플럭스(flux)가 잔존하거나 부식성 환경에 노출되는 경우 부식에 의한 고장을 유발하는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 플럭스 도포 및 세척공정 등을 많이 사용하는 플로우 공정에 사용되고 있는 Sn-Cu계 솔더에 대한 부식특성을 기존의 유연솔더(SnPb Solder)와 비교 평가 하였다. Ni, P의 합금원소 첨가에 따른 무연솔더의 분극특성을 평가하기 위해 Sn0.7Cu0.005P 솔더와 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P 솔더를 시험용 시편으로 선정하였다. 또한 온도에 따른 솔더의 분극거동 및 미세조직의 영향을 조사하기 위해 150°C에서 15분간 그리고 180°C(SnPb), 220°C(무연솔더)에서 각각 10분간 시효처리한 후 분극특성을 측정하였다. 분극특성은 타펠(Tafel) 영역의 전기화학적 반응을 관찰하기 위해 -250 mV~+250 mV 범위에서 측정하였으며, 측정된 양극 및 음극 분극곡선으로부터 타펠 선(Tafel line)을 구하고 이로부터 타펠상수, 평형전위(E_{corr})

[†]E-Mail : wshong@keti.re.kr

와 교환전류밀도(i_{corr})를 구하였다. 이러한 결과를 기초로 유무연 솔더에 대한 부식속도(corrosion rate, mpy)를 구하였다.^{2,3)}

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 시편은 SnPb, Sn0.7Cu0.005P, Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 유무연 솔더를 사용하였으며, 시효처리하지 않은 것과 150°C에서 15분간, 180°C(SnPb)/220°C(무연솔더)에서 각 10분간 시효처리를 한 시편을 사용하였다. 광학현미경, 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 미세조직을 관찰하였고 시효처리에 따른 금속간화합물 형성을 조사하기 위해 에너지분산스펙트럼(EDS)분석, X-선회절분석(XRD)을 사용하여 성분분석과 상분석을 수행하였다. 미세경도시험을 통해 기계적 특성을 측정하였으며, 분극실험을 통해 유무연 솔더의 전기화학적 반응을 연구하였다.

2.1 시효처리에 따른 미세조직 및 경도측정

본 연구에 사용된 솔더 합금 조성은 다음의 Table 1에 나타내었으며, 유연솔더로 Sn40Pb 그리고 무연솔더로 Sn0.7Cu 합금에 0.005 wt%의 P를 첨가한 합금과 Sn0.5Cu 합금에 0.005 wt%의 P와 0.06 wt%의 Ni가 첨가된 시편을 사용하였다. 시효처리는 유연솔더인 SnPb의 경우 용점이 183°C이므로 150°C, 180°C에서 15분, 10분간, 그

리고 무연솔더인 SnCu계의 경우 용점이 227°C이므로 150°C, 220°C에서 15분, 10분간 시효처리 하였다.^{4,5)}

2.2 미세조직관찰 및 경도시험

미세조직의 관찰은 각 시편을 4 wt%의 질산(HNO₃)용액으로 에칭 후 광학현미경과 SEM으로 관찰하였다. 형성된 금속간화합물을 분석하기 위해 XRD와 EDS를 사용하여 상분석을 수행하였다. XRD 분석은 회절각도 20°~80° 범위에서, 측정속도는 0.05°/sec로 분석하였고 기계적 특성 평가를 위해 미세경도시험을 실시하였다.

2.3 분극실험

분극 실험 조건으로 전해액은 증류수 와 1 mole 3.5 wt% NaCl, 40°C, pH 7.5 수용액을 사용하였다. 표준전극으로 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을 사용하였고 보조전극으로 탄소(graphite) 전극을 사용하였다. 실험전 용액을 질소(N₂)가스로 30분간 탈기하여 안정화 처리한 후 0.166 mV/sec의 주사속도로 분극특성을 측정하였다. 타펠(Tafel) 영역의 전기화학적 반응을 관찰하기 위해 -250 mV~+250 mV 범위에서 측정하였으며, 측정된 양극 및 음극 분극 곡선으로부터 타펠영역(Tafel region)에서의 타펠 선(Tafel line)을 구하고 이로부터 타펠 상수와 기울기, 평형 부식전위(E_{corr})와 교환전류밀도(i_{corr})를 구하였다. 이러한 결과를 기초로 유무연 솔더에 대한 부식속도(corrosion rate, mpy)를 구하였다.

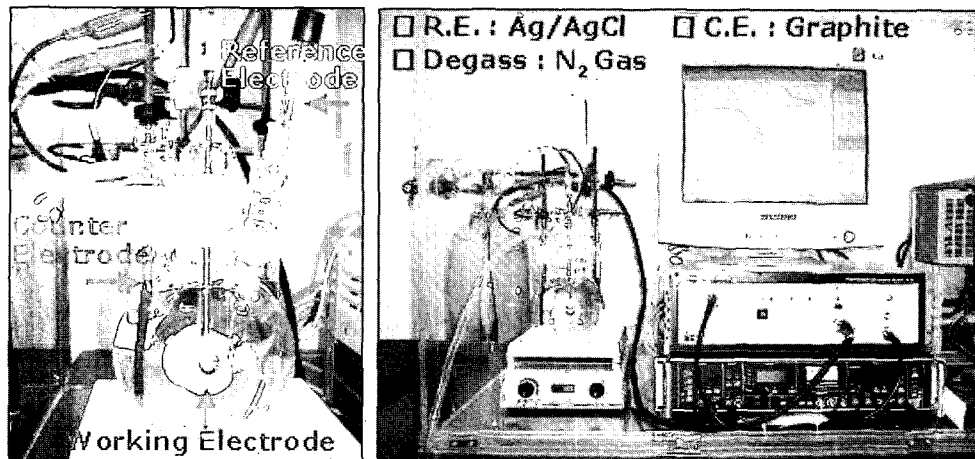


Fig. 1. Photographs of polarization test equipments.

Table 1. Chemical composition of solder materials.

Materials	Chemical composition (wt%)								
	Sn	Pb	Cu	P	Ni	Bi	Fe	As	Sb
SnPb	Bal.	39.9	0.01	-	-	-	-	-	-
Sn0.7Cu0.005P	Bal.	0.014	0.694	0.005	-	0.0041	0.001	0.0088	0.0012
Sn0.5Cu0.06Ni0.005P	Bal.	0/019	0.510	0.005	0.061	0.01	0.002	0.001	0.03

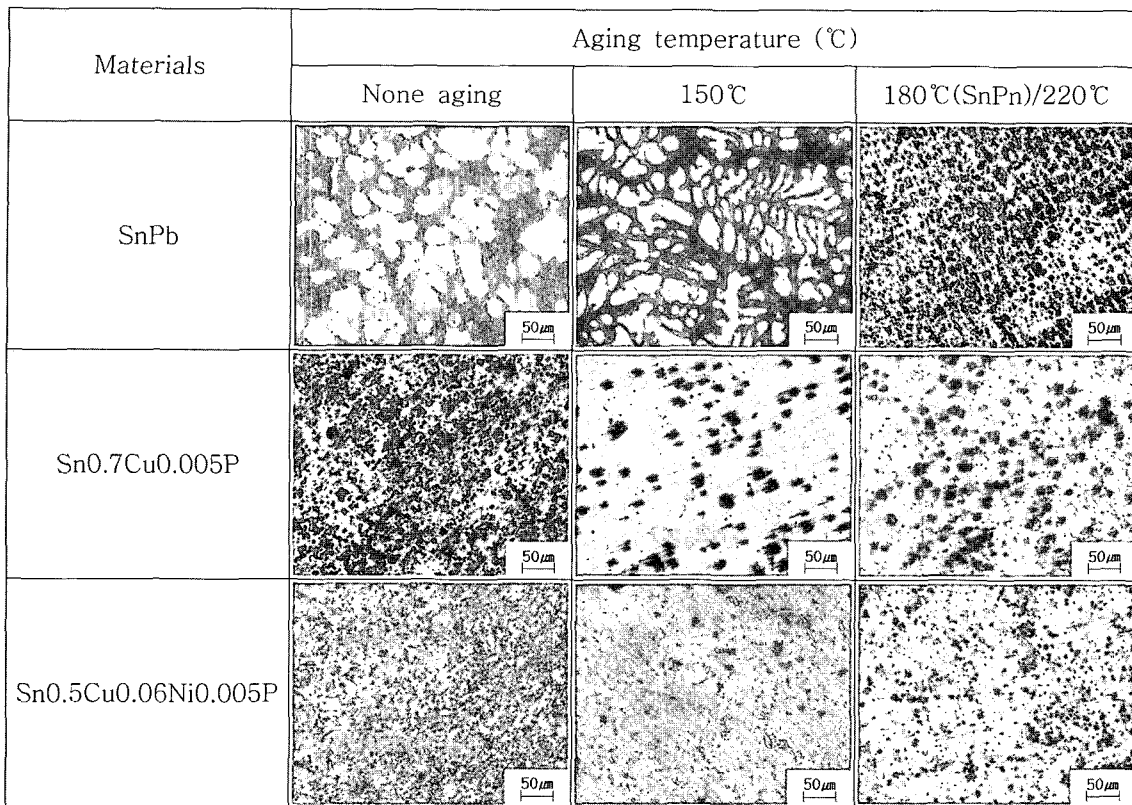


Fig. 2. Photographs of microstructures of SnPb and SnCu system solders.

3. 결과 및 고찰

3.1 시효온도에 따른 미세조직 분석

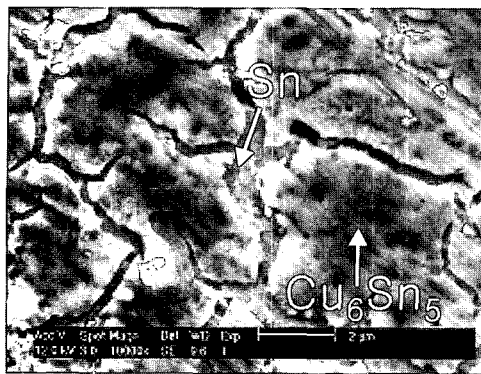
유무연 솔더에 대한 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. SnPb 유연솔더의 경우 150°C까지는 수지상정(dendrite)의 공정조직을 형성하고 있으며, 시효처리 온도가 증가함에 따라 Sn과 Pb의 공정조직은 변화하여 원소별 응집현상이 나타났다. 무연솔더인 SnCu계 미세조직은 모재인 β -Sn내에 Cu_6Sn_5 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)^{6,7)} 분산되어 형성된 것을 알 수 있다. 이것은 SnAgCu 솔더에서 나타는 Ag_3Sn 이 미세분산되어 강화조직을 형성하는 것과 유사하다. 그러나 기계적 특성에 미치는 IMC의 영향은 서로 다른 결과를 나타내며 이에 대한 실험 결과는 3.2에서 보다 자세히 언급하도록 하겠다. SnCu계 솔더 중 Sn0.7Cu0.005P의 경우 시효처리 된 시편 모두에서 Cu_6Sn_5 의 IMC가 형성된 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3의 EDS 분석결과와 Fig. 5의 XRD 분석을 통해 Cu_6Sn_5 의 IMC를 확인할 수 있었다. Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 경우 Fig. 4의 EDS 분석과 Fig. 5의 XRD 분석을 통해 SnCu계에서 생성되는 Cu_6Sn_5 이외에 Ni_3Sn_4 IMC가 형성된 것을 알 수 있었다.

Sn0.5Cu0.06Ni0.005P는 미량의 Ni 첨가로 인해 형성

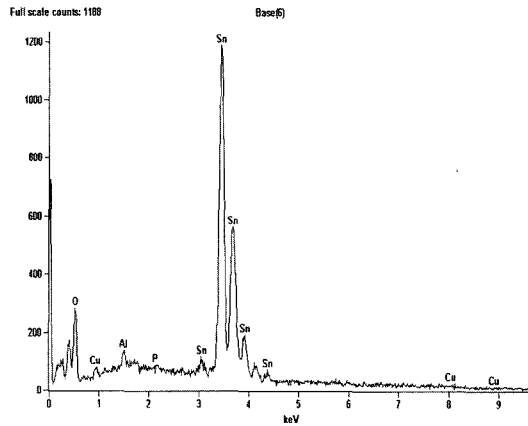
된 Ni_3Sn_4 금속간화합물은 Cu_6Sn_5 와 같은 조밀육방격자(close-packed hexagonal lattice, HCP) 구조를 갖는다. 준안정상인 Cu_6Sn_5 를 3차원적으로 보면 외부는 육각형 모양을 갖으며, 내부는 속이 빈 파이프 형태의 구조를 가진 위스커(whisker)로 생성, 성장되며, Ni_3Sn_4 은 원주형의 기둥(columnar structure) 형태로 형성된다.⁸⁾ 이러한 IMC의 형성은 합금의 고용도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, Sn에 대한 Ni의 최대 고용한도는 0.1 wt%로 SnCu계 합금 내에 Ni 첨가로 인해 IMC와 같은 중간 석출물이 미세 분산되어 형성된다.⁶⁾ 따라서 Ni 첨가로 기계적 성질과 부식 저항성이 향상되며, 본 연구에서도 경도 측정과 분극실험을 통해 얻은 결과와 잘 일치하고 있음을 다음에 언급되는 3.2와 3.4에서와 같이 알 수 있다. XRD 분석결과 SnPb의 경우 SnO_2 , Sn0.7Cu0.005P는 Cu_6Sn_5 IMC가 생성하는 것을 확인할 수 있었고, Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 경우에는 Cu_6Sn_5 와 Ni_3Sn_4 등의 금속간화합물이 형성된 것을 알 수 있었다. 이러한 금속간화합물의 형성이 기계적 성질 및 분극특성에 영향을 미치는 것을 다음의 실험 결과로부터 확인할 수 있었다.

3.2 유무연솔더의 기계적 특성 비교

일반적으로 인장강도는 SnPb가 SnCu계 보다 우수하며, 경도는 대체로 비슷하고 합금 첨가원소에 따라 다르

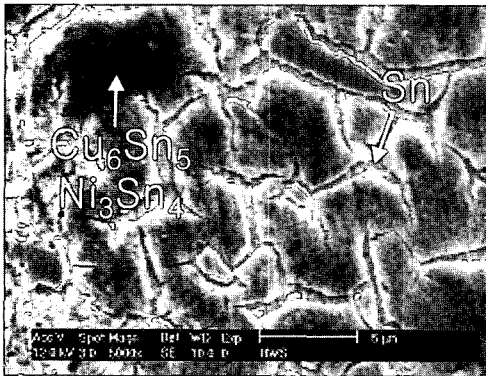


(a) Aged at 150

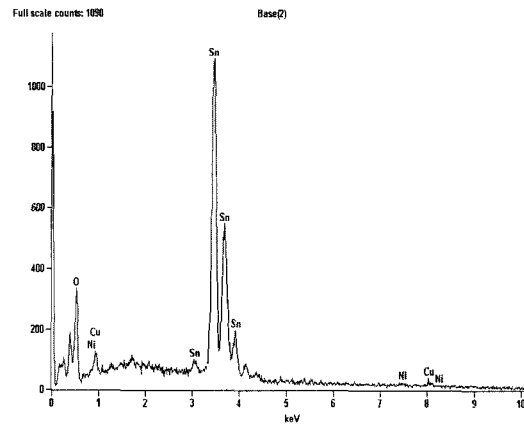


(b) EDS results of total area

Fig. 3. SEM photograph and EDS analysis results of Sn0.7Cu0.005P.



(a) Aged at 150



(b) EDS results of IMC area(Gray)

Fig. 4. SEM photograph and EDS analysis results of Sn0.5Cu0.06Ni0.005P.

게 된다. 유무연 솔더에 대한 미세경도시험을 통한 기계적 성질을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 시효처리 전 시편의 경우 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P가 13.2 Hv로 가장 높게 나타났고, 150°C에서는 SnPb가 14.2 Hv로 가장 높게 나타났으며, 150°C 이상의 시효처리 시편의 경도는 10.8~11.6 Hv로 유사하게 나타났다. SnPb는 모든 시효처리 조건에서 Sn0.7Cu0.005P보다 기계적 특성이 우수하게 나왔다. 이것은 열적 불안정한 Cu₆Sn₅ IMC의 생성으로 기계적 성질 및 부식특성이 저하되는 것으로 사료되며 실제 미세경도시험 결과와 분극실험을 통해 이러한 결과를 확인할 수 있었다.⁹⁾ Cu₆Sn₅ 금속간화합물은 부피 분율(volum fraction)이 1.7 vol%로 원자배열을 변화시켜 결정격자의 왜곡을 유발하고 이로 인해 전위(dislocation)을 생성하여 기계적 특성이 저하된다.⁷⁾ 또한, Cu₆Sn₅ 금속간화합물은 모재에 미세 분산되지만 SnAg계에서 나타나는 Ag₃Sn과 같이 판상구조가 아닌 내부가 비워있는 위스커(whisker) 상으로 형성되어 기계적

특성이 저하된다.⁹⁾ 그러나 SnCu계 합금에 Ni를 첨가한 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 경우 Sn0.7Cu0.005P보다 기계적 특성이 우수한 것으로 나타났으며, 이것은 Cu₆Sn₅ 금속간화합물 이외에 Ni₃Sn₄의 금속간화합물의 형성으로 인해 분산강화 효과에 의해 기계적 성질이 향상된 것으로 사료된다. 결국 SnCu계 솔더에 Ni 첨가로 균일하고 미세한 중간 석출물이 형성되어 기계적 성질을 향상시키고 솔더링 공정 중 유동성이나 응고균열의 발생을 감소시키는 것으로 보인다.^{6,9)} 또한, Sn0.7Cu0.005P와 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P는 150°C, 220°C에서 시효처리한 시편의 경도는 9.8~10.8 Hv, 11.3~11.6 Hv로 온도변화에 따라 경도변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 SnPb 솔더는 150°C 이후 경도가 14.2 Hv에서 10.8 Hv로 감소되어 온도에 따른 경도변화가 큰 것으로 나타났다.

3.3 타펠특성에 따른 부식속도

부식속도의 측정은 혼합전위이론(mixed potential

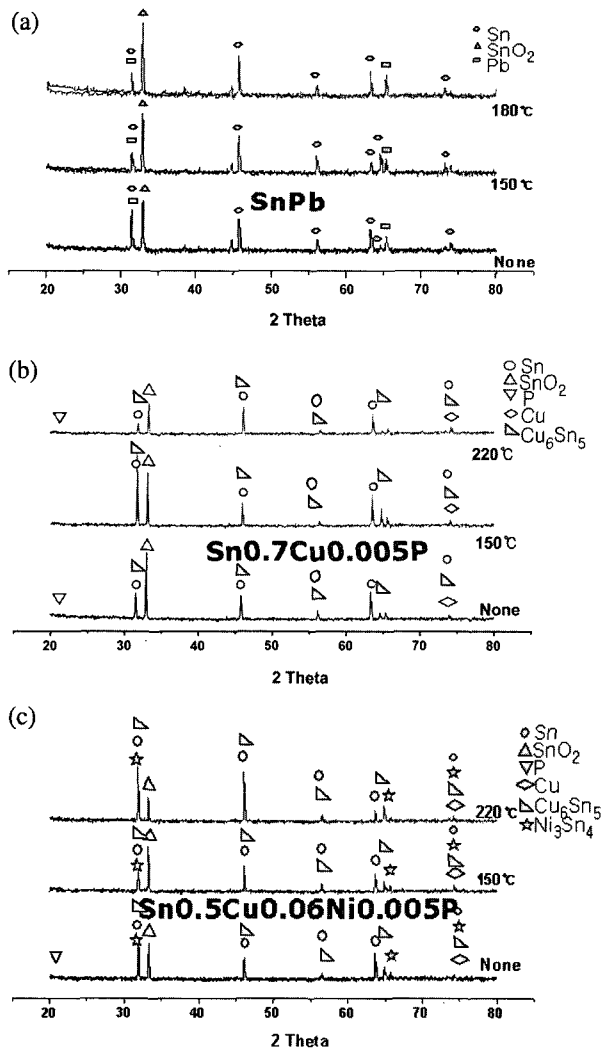


Fig. 5. XRD analysis results as follows aging temperature for SnPb and SnCu system solders; (a) SnPb, (b) Sn0.7Cu0.005P, (c) Sn0.5Cu0.06Ni0.005P.

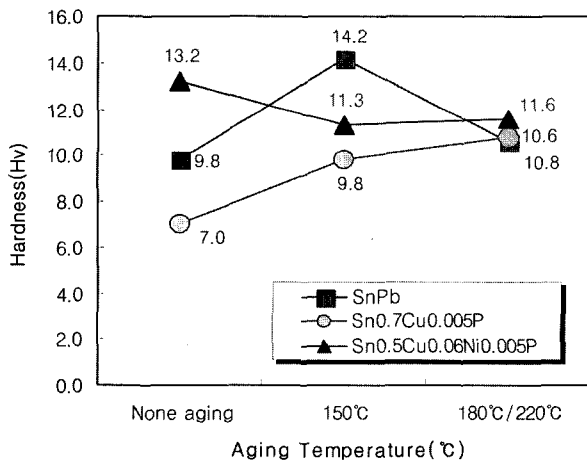


Fig. 6. Vicker's hardness(Hv) test results of SnPb and SnCu system solders.

theory)^{2,10)}을 바탕으로 실험적으로 구할 수 있다. 이것은 금속의 산화반응과 수소의 환원반응에 의해 양극 및 음극의 반전지(half-cell) 반응이 측정되는 계(system) 내에서 동시에 이루어진다는 가정 하에 분극곡선을 측정하게 된다. 일반적으로 양극반응은 금속의 양극분해(anodic dissolution)가 일어나지만 비가역적 반응으로 인해 측정하는 용액의 오염이나 금속 표면에 산화물 또는 수산화물 층(oxide or hydroxide film)의 형성을 유발할 수 있다. 그러므로 부식속도 측정에 음극분극을 이용하는 것이 보다 정확하며 용이한 방법이라 할 수 있다.^{2,11)} 본 연구에서는 이러한 이론적 근거를 바탕으로 SnPb와 Sn3Ag0.5Cu 솔더 합금에 대해 -250 mV 에서부터 +250 mV 까지 전위를 인가한 후 전기화학적 반응에 의해 발생하는 전류밀도를 측정하여 양극 및 음극 분극곡선을 구하고 이로부터 타펠 선과 타펠 상수 및 부식속도를 구하였다.

3.4 전기화학적 반응특성

SnPb와 Sn0.7Cu0.005P의 분극특성 측정 결과를 Fig. 7에 SnPb와 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P는 Fig. 8에 나타내었다. 증류수 용액에서 측정된 전기화학적 반응을 살펴보면 Fig. 9에서와 같이 평형전위(Ecorr)는 모든 범위에서 SnPb솔더가 가장 우수하게 측정되었다. 또한 SnCu계 솔더에서는 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 Ecorr 값은 시효 전, 150°C, 220°C에서 -339.14 mV, -431.13 mV, -371.42 mV 로, Sn0.7Cu0.005P의 Ecorr 값은 -407.43 mV, -424.70 mV, -395.30 mV로 나타나 전반적으로 Ni이 첨가된 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P가 우수하게 나타났다. 부식전류밀도(Icorr)는 시효온도 150°C까지 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P 솔더가 0.2320 mA/cm²로 가장 우수하게 나타났다. 그러나 150°C 이상의 시효온도에서는 SnPb가 0.1552 mA/cm²로 가장 우수하게 측정되었다. Ecorr와 Icorr의 측정값을 통해 부식환경이 아닌 증류수에서의 전기화학적 반응은 시효온도 150°C까지는 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P 솔더가 150°C 이상의 시효온도에서는 SnPb 솔더가 가장 우수한 것으로 사료되며, 이것은 Fig. 11 부식속도 비교 그래프에서 확인할 수 있었다. 부식성 환경인 1 mole 3.5 wt% NaCl에서 Ecorr 값은 유무연 솔더 모두에서 시효온도에 따른 차이가 거의 없이 유사하게 나타났지만, 시효처리 하지 않은 Sn0.7Cu0.005P 솔더의 Ecorr 값은 시효처리된 다른 솔더에 비해 가장 낮은 -448.95 mV로 나타났다. Icorr 은 모든 시효조건에서 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P 솔더가 최대 5.323 mA/cm²로 SnPb 12.72 mA/cm², Sn0.7Cu0.005P의 11.53 mA/cm²에 비해 2배 이상 우수한 것으로 나타났다. SnPb 시편의 Icorr은 시효온도 150°C까지 최대 4.532 mA/cm²로 우수하였으나 150°C 이상의 시효온도에서 12.78 mA/cm²로 부식 저항성이 급격히 감소되었다. 이것

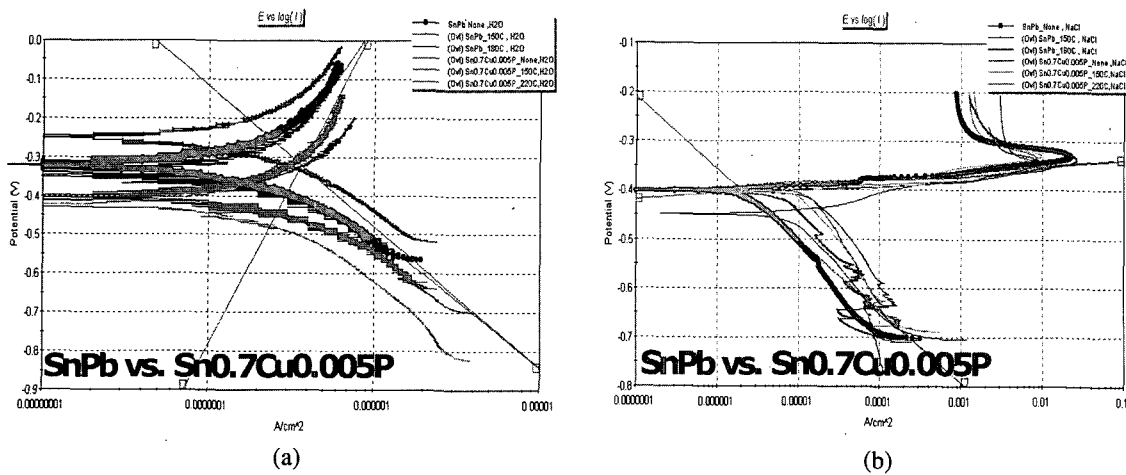


Fig. 7. Anodic and cathodic polarization test results of SnPb and Sn0.7Cu0.005P solders; (a) distilled ionized water, (b) 1 mole, 3.5 wt% NaCl electrolyte, pH 7.5, 40°C, vs. SCE.

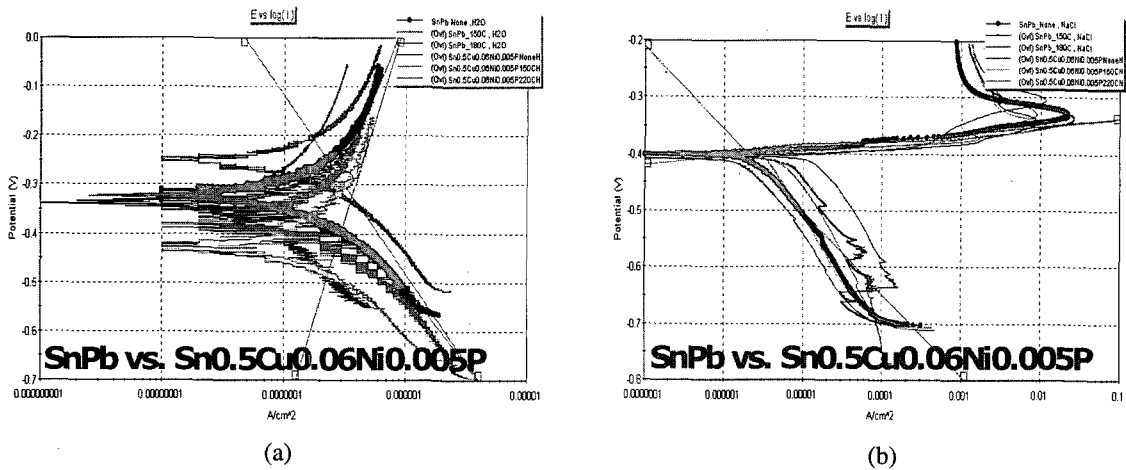


Fig. 8. Anodic and cathodic polarization test results of SnPb and Sn0.5Cu0.06Ni0.005P solders; (a) distilled ionized water, (b) 1 mole, 3.5 wt% NaCl electrolyte, pH 7.5, 40°C, vs. SCE.

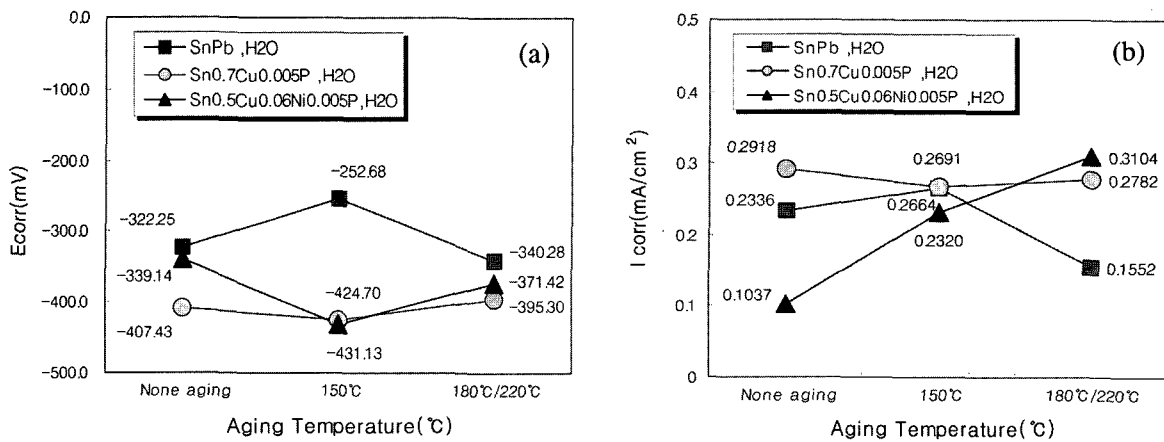


Fig. 9. Comparisons of (a) E_{corr} and (b) I_{corr} between SnPb and SnCu system solders as follows aging temperature in distilled ionized water, pH 7.5, 40°C vs. SCE.

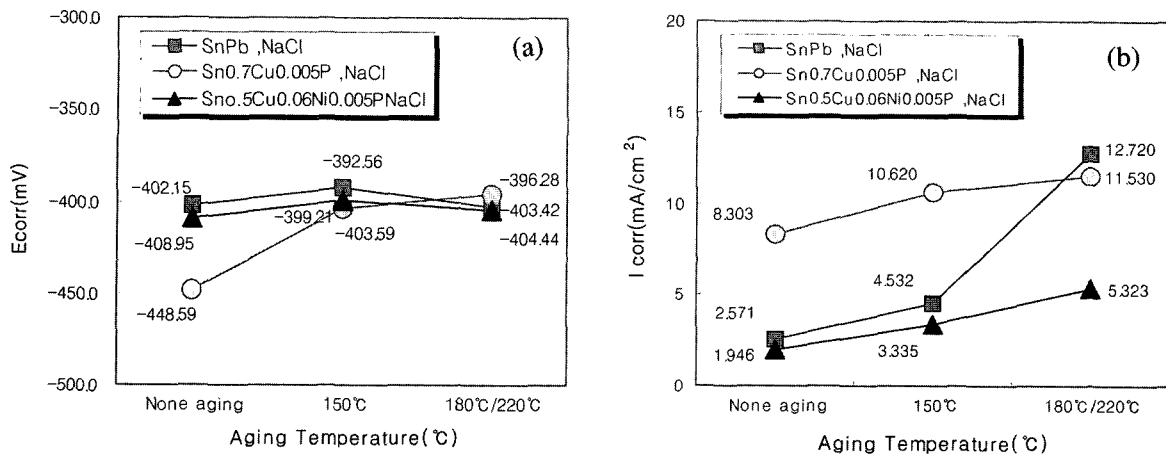


Fig. 10. Comparisons of (a) Ecorr and (b) Icorr between SnPb and SnCu system solders as follows aging temperature in 1 mole, 3.5 wt% NaCl electrolyte, pH 7.5, 40°C vs. SCE.

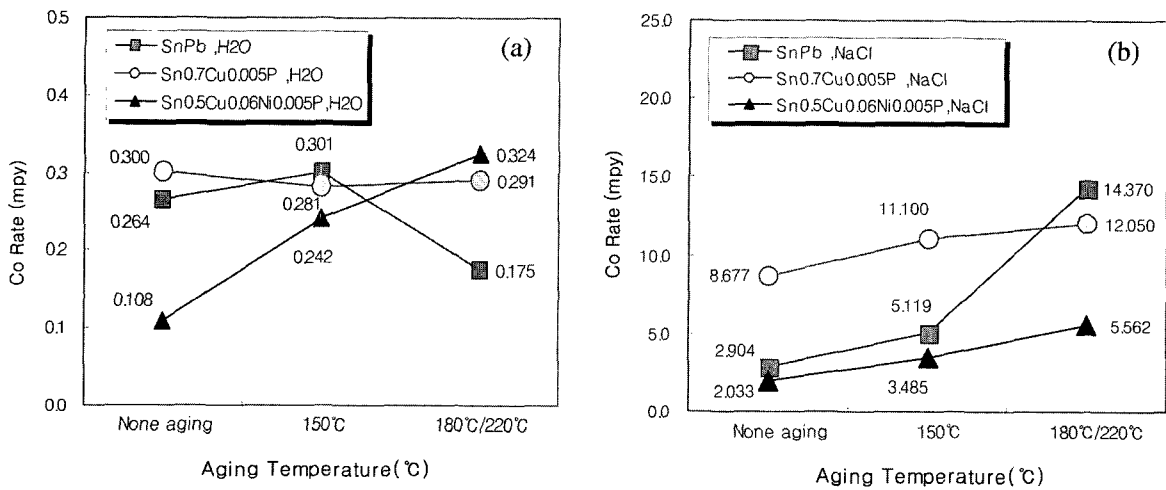


Fig. 11. Comparisons of corrosion rate between SnPb and SnCu system solders as follows aging temperature and electrolytes, pH 7.5, 40°C vs. SCE; (a) Distilled ionized water, (b) 1 mole 3.5 wt% NaCl electrolyte

은 시효온도 증가에 따라 Sn과 Pb의 수지상정으로 이루어진 공정조직으로부터 변화되어 Pb와 Sn의 응집현상에 의해 부식특성이 감소된 것으로 사료된다. Fig. 11의 부식속도 비교 결과로부터 부식 환경에서 부식 저항성은 Ecorr과 Icorr 값의 비교를 통해 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P 솔더가 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다. 전기화학적 반응에 기초하여 부식속도를 비교 평가한 결과 평균적으로 SnPb가 Sn0.7Cu0.005P 보다 우수하였으며, 이것은 열적 준안정한 Cu₆Sn₅ 금속간화합물의 생성으로 인해 SnPb가 Sn0.7Cu0.005P보다 전기화학적 반응이 발생되기 용이하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 SnCu에 Ni이 첨가된 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P는 SnPb에 비해 부식저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 Sn0.5Cu0.005P에 미량의 Ni의 첨가로 인해 β-Sn내에 Cu₆Sn₅ 이외에 Ni₃Sn₄ 금속간화합물이 형성되어 부식 저항성이 향상되는 것

로 사료된다. Ni₃Sn₄ 금속간화합물은 HCP 구조를 가지며, 미세한 중간 석출물로 유동성이나 응고 균열의 발생을 감소시키기 때문에 부식특성이 향상되는 것으로 사료된다.⁶⁾ 또한 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P가 SnPb에 비해 온도 증가에 따른 부식속도의 변화가 작고, 부식 특성이 전반적으로 우수함을 알 수 있었다. SnPb는 150°C 이상에서 Pb의 응집현상으로 인해 부식속도가 급격히 증가하는 것으로 나타났고 Sn0.7Cu0.005P는 온도증가에 따른 부식특성의 변화는 작지만 부식속도가 높게 나타났다. 결론적으로, 증류수 용액에서의 부식속도는 모든 시편에서 유사하였으나, 1 mole 3.5 wt% NaCl과 같은 부식환경에서는 시효처리 온도 증가에 따라 모든 시편의 부식속도가 증가하였으며, NaCl 수용액에서 부식특성은 시효온도 150°C까지 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P > SnPb > Sn0.7Cu0.005P 순으로, 시효온도 150°C 이상의 시효온도에서는

Sn0.5Cu0.06Ni0.005P > Sn0.7Cu0.005P > SnPb 순으로 우수하게 나타났다.

4. 결 론

유무연 솔더인 SnPb, Sn0.7Cu0.005P 및 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 솔더를 시효처리 온도에 따라 미세조직 및 성분분석을 수행하고 경도를 통한 기계적 특성을 평가하였다. 증류수와 NaCl 용액에서 분극곡선을 측정하고 이로부터 부식특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세조직 관찰 결과 SnPb의 경우 시효온도 증가에 따라 수지상정의 공정조직이 변화하여 Sn, Pb 각 원소의 응집현상이 나타났고, SnCu계의 무연솔더의 경우 Cu₆Sn₅, Ni₃Sn₄의 금속간화합물이 형성되었다. 시효온도에 따른 비커스 경도 값은 SnPb가 Sn0.7Cu0.005P 보다 높게 나타났지만, Sn0.5Cu0.06Ni0.005P의 경우 Cu₆Sn₅, Ni₃Sn₄의 금속간화합물의 형성에 의해 전반적으로 비커스 경도 값은 SnPb와 유사한 것으로 나타났다.

2. SnPb는 150°C 이상에서 공정조직의 응집현상으로 인해 부식속도가 급격히 증가하는 것으로 사료된다. Sn0.7Cu0.005P는 열적 준안정한 Cu₆Sn₅의 금속간화합물의 생성으로 인해 SnPb에 비해 부식특성은 낮으며, Sn0.5Cu0.06Ni0.005P는 Ni의 첨가로 β-Sn내에 Cu₆Sn₅ 이외에 Ni₃Sn₄의 금속간화합물을 형성하여 기계적 특성

및 부식특성이 향상되어 Sn0.5Cu0.06Ni0.005P가 SnPb, Sn0.7Cu0.005P 보다 부식 저항성이 우수한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council, Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, EU (2003).
2. D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Pub. Company, New York, (1992).
3. M. G. Fontana, Corrosion Eng., 3rd ed., McGraw-Hill Int. Ed., New York (1988).
4. S. Ganesan and M. Pecht, Lead-free Electronics, 2004 ed., p.197, CALCE ESPC Press, Maryland (2004).
5. R. Strauss, SMT Soldering Handbook, 2nd ed., p.148, Newnes, Oxford (1998).
6. K. Sugauma, Lead free soldering in electronics, Marcel Dekker Inc. New York (2004).
7. J. S. Hwang, Environment-friendly electronics: lead-free tech., Electrochemical Pub. LTD (2001).
8. Lead free soldering project final report, JEITA, Tokyo (2000).
9. JEITA, Lead Free Soldering Tech., Corona Pub. Co. Ltd., Tokyo (2003).
10. C. Wagner, W. Traund and Z. Electrochem., **44**, 391 (1938).
11. K. S. Kim, S. H. Huh and K. Sugauma, Int. Conf. on Electronics Packaging, JIEP, p.89 (2002).