

인공시효시간에 따른 Ni 기판 Pb-free 솔더접합부의 기계적 물성평가[§]

박소영* · 양성모** · 유효선*

* 전북대학교 기계시스템공학부

Evaluation of Mechanical Property for Pb-free Solder/Ni Plate Joints with Artificial Aging Time

So Young Park *, Sung Mo Yang ** and Hyo Sun Yu *

* School of Mechanical System Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received March 5, 2014 ; Revised February 9, 2015 ; Accepted February 28, 2015)

Key Words: Pb-free Solder Joint(무연솔더 접합부), SP Test(Shear-Punch Test ; SP 시험), Artificial Aging(인공시효), Shear Strength(전단강도), Total Fracture Energy(총파괴에너지)

초록: 최근까지, 전자제품에 사용되는 솔더는 납성분이 남아 있으며, 전자부품 및 시스템의 무연 (Pb-free) 솔더에 대한 관심은 반도체 및 전자산업에서 증가하고 있다. 본 논문에서 사용된 솔더접합부는 Sn-37Pb, Sn-4Ag 및 Sn-4Ag-0.5Cu / Ni 기판 이다. 인공시효처리는 150℃에서 각각 0hr, 100hr, 200hr, 400hr, 600hr 그리고 1000hr 동안 수행되었으며, SP 시험을 이용해 30℃와 50℃에서 접합강도를 평가했다. 전단강도는 인공시효시간과 온도가 증가함에 따라 전반적으로 감소하였다. 무연솔더는 Sn-37Pb 보다 총파괴에너지가 높았으며, Sn-4Ag-0.5Cu/Ni 접합부는 고온에서 기계적 물성치가 가장 우수하였다.

Abstract: Thus far, solders used in electronics remain lead-based. Pb—free solutions in electronic components and systems are receiving increased attention in the semiconductor and electronics industries. Pb—free materials currently in used are Sn-37Pb, Sn-4Ag and Sn-4Ag-0.5Cu/ Ni plate joints. In this study, solder alloys were used at high temperatures for artificial aging processing that was performed at 150℃ for 0hr, 100hr, 200hr, 400hr, 600hr and 1000hr. The SP test was conducted at 30℃ and 50℃. As a result, the maximum shear strength of all the specimens decreased with the increase in artificial aging time and temperature of the SP test. In addition, Pb-free solders showed higher total fracture energy compared with Sn-37Pb at high temperatures. The mechanical properties of Sn-4Ag-0.5Cu solder/Ni plate joints remained in excellent conditions in electronic parking systems at high temperatures.

1. 서 론

기존의 전자 기판으로는 주로 가격경쟁력이 우수하며 대중적인 Cu 계 기판(Plate)이 사용되고 있다. 하지만 이러한 Cu 계 기판은 다량의 Sn 을 함유하는 Pb-free 솔더와 함께 사용할 경우 다른 금속에 비해 Cu 가 Sn 과 비교적 빠른 속도로 반응

하여 금속간화합물(IMC : Intermetallic Compound)을 형성하는 것으로 알려져 있다. 일정한 IMC 의 두께는 기계적 신뢰성을 높여주는 중요한 화합물이지만 지나치게 두꺼운 IMC 는 취성의 성질로 인해 오히려 기계적 신뢰성을 급격히 감소시키는 것으로 잘 알려져 있다.⁽¹⁾ 반면에 Ni 계 기판은 솔더와 기판 사이에서 낮은 확산계수로 금속의 과도한 확산을 방지할 뿐 아니라 부식, 산화 및 오염을 막아주는 보호막 역할을 한다. 또 치환형 금도금층과 밀착력이 우수하여 우수한 내마모성과 경도를 요구하는 제품에 사용이 용이하다.⁽²⁾

전자기기 소형화 및 경량화가 매년 급속도로 진행됨에 따라 현재 국내에서는 대기업을 비롯한 여

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계 학술대회(2014. 4. 3.-4., 서귀포 KAL 호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, yangsm@jbnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

러 산업체와 관련 연구원 및 학계에서 Pb-free 솔더에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 그러나 현재 국내에 보고된 연구내용 중 Pb-free 솔더 합금의 장기적 사용에 따른 수명평가에 대한 연구와 솔더와 Ni 기판 접합부의 젖음성과 기계적 특성의 연관성에 관한 연구가 부족한 실정이다.

최근에 들어서는 환경 친화적 Pb-free 솔더 합금의 개발 요구와 계속적으로 경박 단소화 및 미세화 되어가고 있는 전자부품에 대한 마이크로 신뢰성에 대한 연구가 선진국을 중심으로 매우 활발하게 진행되고 있는 실정이다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 장시간 사용된 전자 기판은 시간이 지남에 따라 취성이 강한 IMC가 과도하게 형성돼 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이로 인해 인공시효시간에 따른 기계적 물성 평가가 요구되고 있다.^(11,12)

따라서 본 연구에서는 Sn-Pb 계 솔더 합금을 대체할 Pb-free 솔더 중에서 젖음특성, 접합강도 및 피로강도가 우수한 것으로 알려진 Sn-Ag 계 솔더와 용점과 젖음성 개선을 고려하여 미량의 Cu 를 첨가한 Sn-Ag-Cu 계 솔더를 이용해 전단-편치시험에 의한 인공시효시간과 시험온도에 따른 전단강도 변화와 파괴에너지 특성에 대해서 연구하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서 사용된 솔더 합금은 기존에 사용되고 있던 Sn-37Pb 와 무연 솔더로서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Sn-4Ag 솔더 그리고 미량의 Cu 를 첨가한 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더를 이용해 각각 솔더 접합부의 전단강도 평가를 실시하였다. 각 솔더의 화학적 조성 및 용점 그리고 접합부 형성에 적용된 리플로우 온도와 시간은 Table 1 과 2 에 나타내었다. Pb-free 솔더용 기판으로 적합 하려면 솔더와 젖음성이 우수하면서 적절한 반응성을 보여야 하므로 Ni 기판을 사용하였다.

2.2 인공시효

솔더 접합부의 장기 신뢰성 평가와 관련하여 준비된 시험편을 대상으로 인공시효 처리를 실시하였다. 이때 인공시효 온도는 상온보다 높게 설정돼야만 하며, 금속의 리플로우 온도보다는 낮게 설정돼야 한다.

본 연구에서 실시한 인공시효 처리는 150℃에서 각각 0hr, 100hr, 200hr, 400hr, 600hr 그리고 1000hr 동안 수행되었으며, 이때 사용된 시험장치(AJ-SB4/SiC Box/9908)는 200V, 7KW 그리고 최대 작동 온도 1200℃인 장치를 사용하였다.

Table 1 Composition of Pb-free and Sn-Pb solder alloys

Element	Chemical Composition (%)		
	Sn-37Pb	Sn-4Ag	Sn-4Ag-0.5Cu
Sn	62~64	96	95.5
Pb	bal.	0.050	0.050
Cu	0.030	0.030	0.500
Ag	0.002	4.000	4.000

Table 2 Melting point and reflow conditions of Pb-free and Sn-Pb solders

System	Melting Point Temperature Range (°C)	Reflow Temperature (°C)	Reflow Time (sec)
Sn-37Pb	183	200	30
Sn-4Ag	221	240	
Sn-4Ag-0.5Cu	217	240	

2.3 전단-편치시험

시효처리된 기존 Sn-37Pb 솔더합금과 Pb-free 솔더합금(Sn-4Ag, Sn-4Ag-0.5Cu)의 접합부 전단강도를 Fig. 1, 2 와 같은 미소 전단-편치시험(SP 시험) 장치를 이용하여 평가하였다. 본 시험장치는 본 대학에서 자체 구성하여 제작된 것으로 10×10×0.5t(mm) 미소시험편을 이용하여 솔더 접합부 강도를 평가하므로 사이즈 효과(Size Effect)의 영향을 최소화 할 수 있다. 또한 다양한 온도에서의 전단시험이 가능하여 연성 및 취성의 특성 및 파괴인성 평가가 가능하다.

시험에서 이용된 전단시험온도는 30℃, 50℃로 설정하였고, 하중부하속도는 0.2mm/min, 전단편치 직경은 2.8mm 로 하였다. LVDT 시스템을 이용하여 시험편의 중앙변위(Central Displacement : δ)는 최소 1 μ m까지 정밀 계측하였다.⁽¹³⁾

미소전단-편치 시험 중 솔더 접합부 시험편에서 발생하는 응력종류 및 그에 대한 전단응력, 전단 변형률을 산출하고, 발생하는 주응력은 전단응력이므로 본 연구에서는 최대 전단강도를 분석하고, 이를 통해 파괴에너지를 도출하였다.

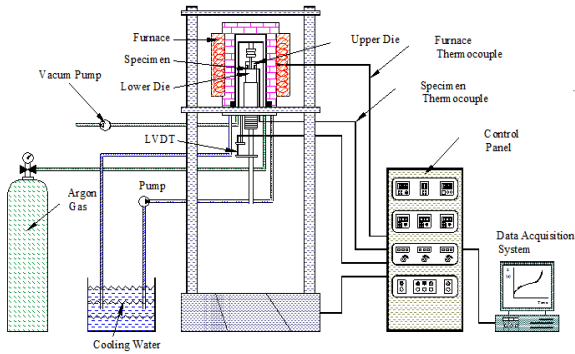


Fig. 1 Schematic diagram of shear-punch test equipment

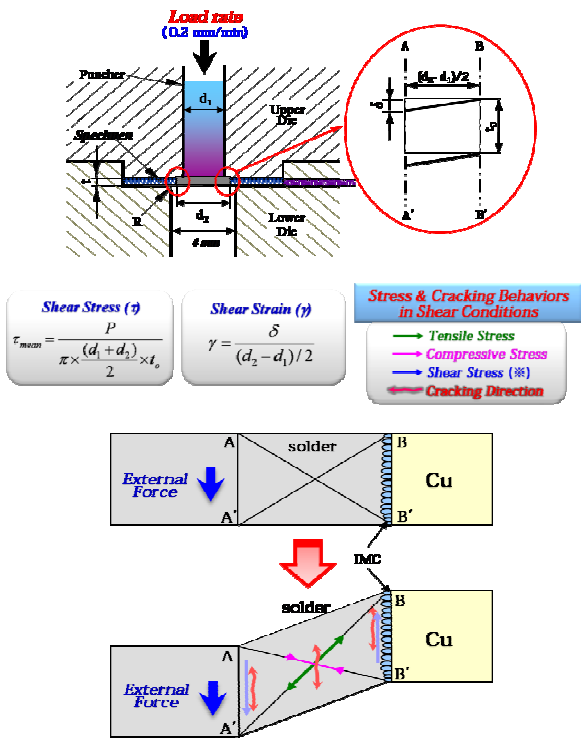


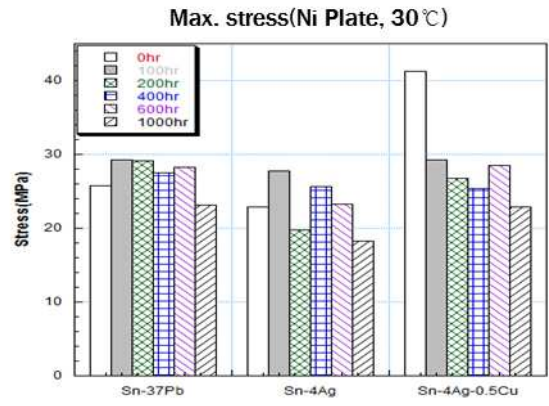
Fig. 2 Stress behaviors of shear-punch test specimen

3. 고찰

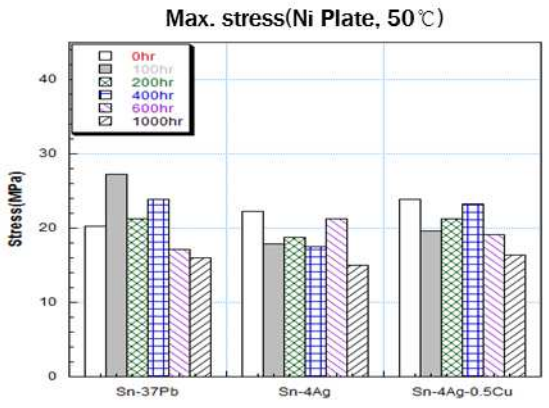
3.1 전단강도

Fig. 3 은 두 시험온도에서 각 솔더 접합부의 인공시효 시간에 따른 전단응력 특성을 나타낸 그래프로서 시험온도가 30℃에서 50℃로 증가함에 따라 전단응력 값은 전반적으로 감소하는 거동을 보였다. 또한 50℃에서 전단응력은 최대 약 50% 감소한 것으로 나타났다. 이는 솔더 접합부가 고온에 취약하다는 것을 의미한다.

또, 그래프를 보면 무연솔더의 대부분 경우 초기 0hr 시험편이 가장 높은 최대 전단응력 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 미량의 Cu 함유로 인



(a) 30℃



(b) 50℃

Fig. 3 Max. shear strength behavior for Pb-free and Sn-37Pb solder/Ni plate joint

해 시험온도가 30℃인 시험편에서는 인공시효 시간 증가에 따른 전단강도 변화율을 감소시켰다. 미량의 Cu 첨가로 인해 Sn-4Ag 솔더 접합부와 비교해서 모든 조건에서 최대 전단응력 값이 커졌으며, 이는 미량의 Cu 첨가가 IMC 생성 및 전단강도에 영향을 끼쳐 최대 전단응력 값을 높이는 결과에 영향을 미친 것으로 사료된다.

3.2 파괴에너지

Fig. 4 는 SP 시험을 통해 얻은 응력-변형률 그래프를 이용해서 도출한 솔더 접합부의 단위면적 당 파괴에너지 그래프이다. 기존의 강도평가는 변형률이 고려되지 않은 최대 전단강도만 분석됨에 따라 솔더 접합부의 신뢰성 평가나 수명평가를 진행하기에는 미흡한 부분이 있었다. 하지만 이에 비해 파괴에너지 분석은 하중에 따른 변위를 최대 전단강도가 발생하는 구간까지의 면적으로 도출함으로써 기존의 수명평가에 신뢰성을 향상시키는데 도움을 준다.

우선, Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 30℃와 50℃ 시험온

도에서 인공시효 시간의 증가에 따른 파괴에너지 거동을 나타낸 그래프이다. 먼저 인공시효시간별 파괴에너지 거동을 살펴보면 시효시간별 일정한 경향을 보이지는 않았지만 전반적으로 시효시간이 증가함에 따라 감소하는 거동과 함께 특히 1000hr의 경우에 무연솔더의 파괴에너지 거동은 가장 작은 값을 보였다. 또한 솔더에 미량의 Cu가 함유된 경우 시효시간 증가에 따른 파괴에너지 거동을 살펴보면 앞서 설명한 전단강도 거동과는 다르게 파괴에너지 변화율의 증가와 함께 다소 복잡한 거동을 보였다.

특히, 시험온도가 50°C인 경우보다 30°C인 경우가 시효시간 증가에 따른 민감도가 큰 것으로 나타났다. 이는 고온의 시험온도에서는 온도의 영향도 같이 받게 돼 시효시간 증가에 따른 민감도가 작지만, 시험온도가 상온인 경우에는 온도의 영향은 거의 받지 않아 솔더 접합부의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 것이 시효시간 증가인 것으로 사료된다.

또, 미량의 Cu가 함유된 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더가 Sn-37Pb나 Sn-4Ag보다 파괴에너지가 대부분 비

교적 높은 것으로 나타났다. 이는 Cu의 첨가가 인공시효 시간의 증가와 시험온도 증가에 따른 파괴에너지 거동에 안정적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그러나 이상의 실험결과들을 종합해 볼 때 솔더 합금별 Ni기판의 솔더 접합부에 대한 기계적 물성평가를 위해서는 새로운 평가인자가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

Fig. 5는 솔더별 각 인공시효시간에서의 파괴에너지 값을 모두 더해 얻은 총 파괴에너지(Total Fracture Energy) 값을 도출한 그래프이다. 모든 조건에서 Pb-free 솔더의 총파괴에너지 값이 기존 Sn-37Pb 솔더보다 큰 것으로 나타났으며, 50°C에서 총파괴에너지는 Pb-free 솔더가 Sn-37Pb 솔더에 비해 44% 더 우수한 특성을 보였다.

또, 시험온도가 30°C에서 50°C로 상승하면 Sn-4Ag 솔더는 거의 변화가 없었으나 Sn-37Pb 솔더와 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더는 각각 31.4%와 20.0%씩 총 파괴에너지는 감소하였다.

한편, 미량의 Cu가 함유된 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더 접합부를 Sn-4Ag 솔더 접합부와 비교해보면 30°C의 시험온도에서는 확연하게 Sn-4Ag-0.5Cu가 Sn-4Ag에 비해 우수한 것으로 나타났다. 또한 전반적 살펴볼 때 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더가 모든 솔더 중에서 그리고 시험온도 중에서 가장 높은 총파괴에너지 거동을 보여 본 연구결과의 파괴에너지 측면에서 최적화된 솔더는 Sn-4Ag-0.5Cu로 결론지어진다. 또한 Fig. 5에서 사용된 총파괴에너지 특성은 시험온도 및 인공시효 시간에 따라 다소 복잡하게 나타나는 솔더 접합부의 기계적 물성을 평가하는데 유용한 평가인자임을 알 수 있다.

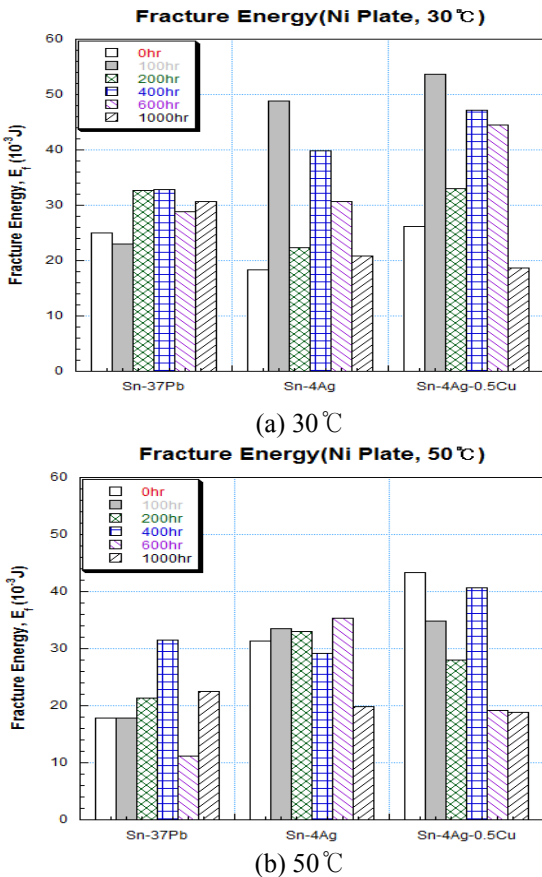


Fig. 4 Fracture energy for Pb-free and Sn-37Pb solder/ Ni plate joint

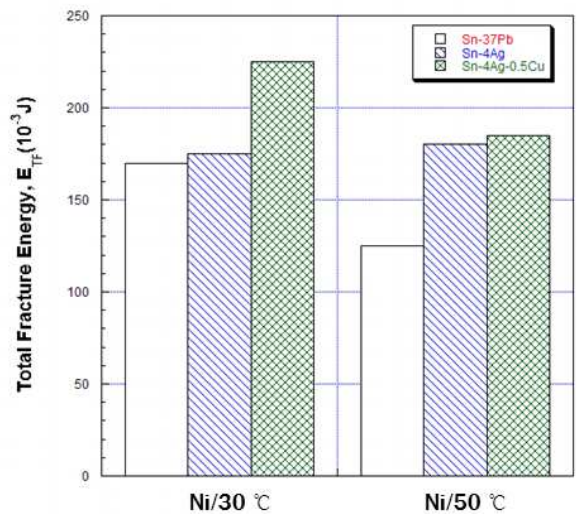


Fig. 5 Total Fracture energy for Pb-free and Sn-37Pb solder/ Ni plate joints

4. 결 론

본 논문에서는 인공시효 시간에 따른 Pb-free 솔더/Ni 기판 접합부의 기계적 특성을 분석하였다. 이때 인공시효 처리는 150°C에서 각각 0hr, 100hr, 200hr, 400hr, 600hr 그리고 1000hr 동안 수행되었으며, 전단-편치시험장치를 이용하여 솔더 접합부의 기계적 특성을 평가하였다.

(1) 솔더 접합부의 전단응력은 온도와 인공시효 시간 증가에 따라 전반적으로 감소하였으며 50°C에서 전단강도는 최대 약 50% 감소하였다.

(2) 시효시간별 파괴에너지는 일정한 경향을 보이지는 않았으나 1000hr의 경우에 무연솔더의 파괴에너지 거동은 가장 작은 값을 보였다.

(3) 파괴에너지는 30°C에서 인공시효시간에 큰 영향을 받았고, 50°C에서는 인공시효시간과 온도 효과가 동시에 나타났으며 총파괴에너지는 Pb-free 솔더가 Sn-37Pb 솔더에 비해 44% 더 우수하였다.

(4) 미량의 Cu가 함유된 솔더가 전단강도와 총 파괴에너지 증가에 도움을 주는 것으로 사료되어 Sn-4Ag-0.5Cu 솔더 사용이 추천된다.

후 기

본 연구 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2010-0023724)입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Yang, Chaoran., Song, Fubin. and Ricky Lee, S.W., 2014, "Impact of Ni Concentration on the Intermetallic Compound Formation and Brittle Fracture Strength of Sn-Cu-Ni (SCN) Lead-free Solder Joints," *Microelectronics Reliability*, Vol. 54, pp. 435~446.
- (2) Yang, S. T., Chung Y. C. and Kim, Y. H., 2002, "Intermetallic Formation Between Sn-Ag Based Solder Bump and Ni Pad in BGA Package," *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, Vol. 9, No. 2, pp. 1~9.
- (3) Ha, B. R., 2012, "Evaluation of Mechanical Property for Pb-free Solder/Ni and Cu Plate Joints with Reflow Time," A Master's Thesis, Chonbuk National University.
- (4) Choi, S. K., Yang, S.M. and Yu, H. S., 2011, "A Study on Evaluation of Shear Strength for Pb-free Solder Joint with Ni-P/Au UBM," *KSMTE*, Vol. 20, No. 2.
- (5) Choi, W. K. and Lee, H. M., 2002, "Prediction of Primary Intermetallic Compound Formation During Interfacial Reaction Between Sn-based Solder and Ni Substrate," *Scripta Materialia*, 46, pp. 777~781.
- (6) Seo, S. K., Kang, S. K., Shin, D. U. and Lee, H. M., 2009, "The Evolution of Microstructure and Microhardness of Sn-Ag and Sn-Cu Solders During High Temperature Aging," *Microelectronics Reliability*, pp. 246-251.
- (7) Sharif, A., Islam, M. N. and Chan, Y. C., 2004, "Interfacial Reactions of BGA Sn-3.5%Ag-0.5%Cu and Sn-3.5%Ag Solders During High-temperature Aging with Ni/Au Metallization," *Materials Science and Engineering B* 113, pp.184~189.
- (8) Chen, W. M., Closkey, P. M. and Mathuna, S. C., 2006, "Isothermal Aging Effects on the Microstructure and Solder Bump Shear Strength of Eutectic Sn37Pb and Sn3.5Ag Solders," *Microelectronics Reliability*, pp. 155~160.
- (9) Hiroshi, N., Akira K. and Tadashi T., 2006, "Joint Strength Between Sn-Ag Based Lead-free Solder and Cu Pad by Ball Shear Test," *Transaction of JWRI*, Vol. 35, No. 2.
- (10) Bi, Jinglin., Hu, Anmin., Hu, Jing., Luo, Tingbi., Li, Ming. and Mao, Dali., 2011, "Effect of Cr Additions on Interfacial Reaction Between the Sn-Zn-Bi Solder and Cu/electroplated Ni Substrates," *Microelectronics Reliability*, pp. 361~369.
- (11) Kim, S. A., 2012, "Establishment of Optimal Design Conditions Through Artificial Aging and High-temperature Strength Evaluation of Pb-free Solder Joints for Electronic Components," A Master's Thesis, Chonbuk National University.
- (12) Li, G. Y., Chen, B. L., Shi, X. Q., Wang, C. K. and Wang, Z. F., 2006, "Effects of Sb Addition on Tensile Strength of Sn-3.5Ag-0.7Cu Solder Alloy and Joint," *Thin Solid Films* 504.
- (13) Yang, Z., 2012, "The Evaluation of Creep Property for Lead-free Solder Joints of Sn-Ag and Sn-Ag-Cu Alloy System," A Master's Thesis, Chonbuk National University.