

유연성 기판에 사용되는 전해 동박의 절곡 및 굴곡 피로 파괴와 인장 특성과의 관계

김병준¹ · 정명혁² · 황성환¹ · 이호영¹ · 이성원³ · 전기도³ · 박영배² · 주영창^{1,†}

¹서울대학교 재료공학부, ²안동대학교 신소재공학부, ³LG이노텍 소재부품연구소

Relationship between Tensile Characteristics and Fatigue Failure by Folding or Bending in Cu Foil on Flexible Substrate

Byoung-Joon Kim¹, Myeong-Hyeok Jeong², Sung-Hwan Hwang¹, Ho-Young Lee¹, Sung-Won Lee³,
Ki-Do Chun³, Young-Bae Park² and Young-Chang Joo^{1,†}

¹School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

²School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

³R&D Center, LG Innotek Co., Ltd. Ansan 426-791, Korea

(2011년 2월 28일 접수: 2011년 3월 23일 게재확정)

초 록: 유연성 기판 상의 동박의 반복 굽힘 변형에 따른 절곡 및 굴곡 신뢰성과 인장 특성과의 관계를 규명하기 위해 4종류의 동박 시편의 절곡 신뢰성 실험, 굴곡 신뢰성 실험과 인장 실험을 실시하였다. 절곡 신뢰성 실험은 동박에 5.3%의 굽힘 변형률을, 굴곡 신뢰성 실험은 동박에 2.0%의 굽힘 변형률을 반복적으로 인가하면서 전기 저항 변화를 관찰하고 피로 수명을 평가하였다. 또한, 4가지 시편의 인장 실험을 통해 탄성 계수, 항복 강도, 인장 강도, 인성 등의 재료 물성을 구한 결과, 연성과 인성이 우수한 시편의 경우 절곡 및 굴곡 신뢰성이 크게 우수한 것으로 나타났다. 반면, 탄성 계수, 항복 강도의 경우 절곡 및 굴곡 신뢰성과 큰 연관성을 보이지 않았다. 이는 절곡 및 굴곡 변형에 의한 금속의 피로 파괴 거동은 재료의 파괴 인성과 밀접한 관계를 가지기 때문으로 판단된다.

Abstract: Folding endurance, bending fatigue and monotonic tensile tests of 4 kinds of Cu foil on flexible substrate was performed to investigate the relationship between folding or bending endurances and tensile characteristics. The repeated 5.3 or 2.0% strain was applied to Cu foil in folding endurance test or bending fatigue test while monitoring the electrical resistance. Elastic modulus, yield strength, ultimate tensile strength, ductility, and toughness were obtained by monotonic tensile test on the same samples. The Cu foil with higher toughness and ductility showed higher reliabilities in folding or bending fatigue. However, elastic modulus and yield strength did not show any relationship with folding and bending reliability. This is because the failures of Cu foil by folding or bending fatigue were closely related to the fracture energy of metal.

Keywords: Flexible, folding endurance test, bending endurance test, electrical resistance

1. 서 론

최근 핸드폰, 노트북과 같은 전자 제품에는 사용 중 편의성과 소형화를 위해 접거나 굽히는 기계적 움직임을 갖는 부분이 많이 사용되고 있다.¹⁾ 이러한 기계적 변형이 일어나는 부분은 유연성 기판 위에 저항이 낮은 동박을 이용해 배선을 형성하여 전기적 연결을 한다. 기계적 변형이 반복적으로 가해질 경우, 유연성 기판의 경우 풀리며 물질이기 때문에 기계적 변형에 크게 영향을 받지 않는 반면, 유연성 기판위의 금속 배선의 경우 기계적 변형에 상대적으로 취약하므로 전기적, 기계적 신뢰성 문제가 발생하고 있다.

재료에 반복적인 기계적 응력이 가해질 경우 상대적으로 작은 변형에서도 재료의 파괴가 일어나는 것을 피로 파괴라고 한다.^{2,3)} 금속의 피로 현상은 주로 응력과 변형률 간의 관계를 통해 기계적 성질 변화 관점에서 많은 연구가 이루어졌다.^{4,5)} 반면, 전자 소자에 사용되는 금속 재료의 경우 반복적인 변형이 가해질 경우 전자 소자의 오작동을 유발하므로 반복 변형에 따른 전기적 성질 변화에 대한 연구가 필요한 실정이다.

전자 소자의 피로 파괴를 유발하는 반복적인 변형으로는 인장(tensile), 뒤틀림(twisting), 굽힘(bending) 변형 등이 있다. 이러한 변형 중 현재 핸드폰과 노트북 등에서 실제로 사용되고 있는 기계적 변형은 굽힘 변형이다.

[†]Corresponding author
E-mail: ycjoo@snu.ac.kr

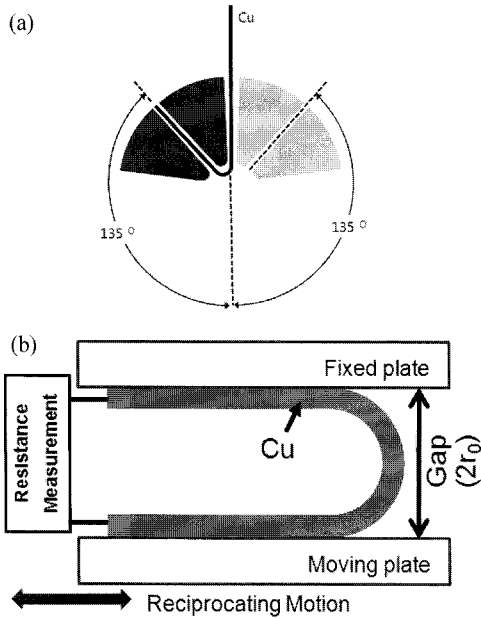


Fig. 1. Schematic illustrations of (a) folding endurance test and (b) bending endurance test.

굽힘 변형에는 절곡(folding)과 굴곡(bending) 두 가지 경우가 있다. 절곡이란 금속막의 일부분이 큰 각도로 접어지는 변형을 의미하며, 이러한 변형은 금속막의 한 끝이 고정되고 다른 한 끝이 좌우로 회전 운동을 반복하는 상황에서 발생한다. 폴더형 핸드폰, 노트북의 모니터와 본체 사이의 연결 부분 등이 절곡 변형에 해당한다. 절곡 신뢰성 실험은 Fig. 1(a)와 같이 금속막의 작은 영역에 반복 접힘 변형을 인가하면서 전기 저항 변화를 관찰한다.⁶⁾ 굴곡이란 금속막의 일부분이 작은 각도로 굽혀지는 변형을 의미하며, 이러한 변형은 금속막의 한 부분이 고정되고 다른 한 부분이 왕복 운동을 반복할 경우 발생한다. 슬라이드 핸드폰의 움직임이 이에 해당한다. 굴곡 변형의 경우 절곡 변형에 비해 굽힘부의 반경이 더 크기 때문에 금속막에는 상대적으로 작은 변형률이 가해지게 된다. 굴곡 신뢰성 실험은 Fig. 1(b)와 같이 굽혀진 금속막의 한쪽 부분에 왕복 운동을 인가하면서 금속막의 전기적, 기계적 변화를 관찰한다.⁷⁾

유연성 기판 상의 금속 배선의 반복적인 변형에 의한

전기적 파괴는 주로 변형률과 피로 파괴 사이클에 대한 연구가 진행되었다.⁸⁻¹⁰⁾ 하지만, 굴곡 및 절곡 신뢰성과 재료의 물성과의 관계에 대한 연구는 많이 진행되지 않은 실정이다.

본 실험에서는 절곡 및 굴곡 실험을 통해 금속 배선의 절곡 신뢰성을 평가함으로써 반복 굽힘 변형이 금속 배선의 전기 저항 변화에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 각 시편의 인장 실험을 통해 탄성 계수, 항복 강도, 인장 강도, 인성, 연성 등의 재료 물성을 구한 후, 이러한 재료 물성과 절곡 신뢰성을 비교하고 연관 관계를 연구하였다.

2. 실험방법

유연성 기판 상의 동박의 절곡 신뢰성을 평가하기 위해 각기 다른 4가지의 시편을 준비하였다. 상이한 제조 공정을 거친 다른 제조사의 4가지 시편을 준비하였고, 이들의 인장 특성 비교를 통해 절곡 및 굴곡 특성에 가장 큰 영향을 미치는 중요인자를 확인하였다. 4가지 시편 각각의 단면 모습을 관찰하기 위해 사포와 연마천을 통해 정밀 연마하였고, 이를 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용해 관찰하였다. Fig. 2에서 보듯이 시편은 Cu/polyimide(PI)/Cu의 총 3가지의 층으로 이루어져 있고, 동박은 모두 전해 동박을 유연성 기판은 모두 PI를 사용하였다. A 시편의 총 두께, 가운데 PI 두께, 양쪽 Cu 두께는 각각 41.12, 14.86, 13.42 μm 였다. B 시편의 경우는 각각 38.52, 16.55, 11.90 μm , C 시편의 경우 38.84, 17.62, 10.88 μm , D 시편의 경우 38.44, 14.18, 12.19 μm 였다. 이와 같은 4가지 시편의 절곡 신뢰성과 굴곡 신뢰성을 Japanese Industrial Standard (JIS)-C6471⁶⁾와 Institute for Interconnecting and Packaging Electronics Circuits Standard (IPC)-TM-650⁷⁾를 통해 각각 평가하였다 (Fig. 1(a), (b)). 절곡 실험 시 JIS규격에 따른 변형 반경은 0.38 mm이고, 중립축에서 동박까지의 거리는 18~20 μm 이므로 양쪽의 동박에는 모두 약 5.3%의 변형률이 반복적으로 인가되게 된다. 굴곡 실험 시의 굽힘 변형의 반경은 IPC 규격에 의하면 1.5 mm이므로 동박에는 약 2.0%의 변형률이 가해지게 된다. 굴곡 실험시 아래 판의 이동 거리는 20 mm 였고 60 Hz의 주기로 이동하였다. 이와 같이

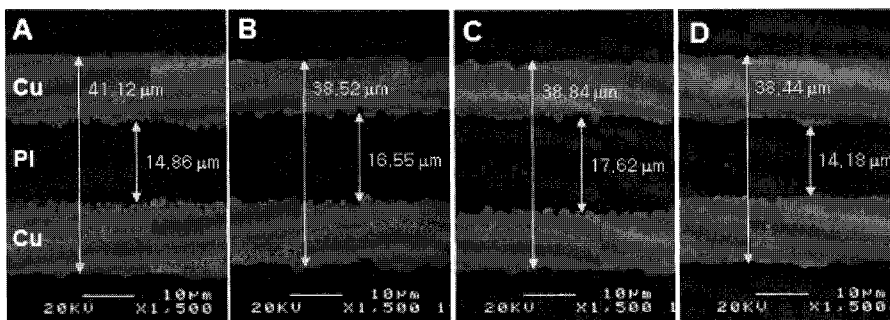


Fig. 2. Cross-section SEM images of 4 kinds of Cu/PI/Cu samples.

절곡 실험과 굴곡 실험을 진행하면서 저항 변화를 실시간으로 관찰하였다. 절곡 실험과 굴곡 실험 모두 10개 이상의 시편을 시험하였고, 전기 저항이 초기 저항에 비해 20% 증가한 사이클을 피로 파괴 사이클로 정의하였다.

절곡 신뢰성과 재료 물성과의 관계를 살펴보기 위해 각 시편의 인장 시험을 실시하였다. 시편은 판상 형태의 표준 인장 시편 형태로 정밀 커팅기를 이용해 절삭하였다. 시편의 총 길이는 50 mm, 넓이는 5 mm, 가운데 변형 부분의 초기 길이는 30 mm였다. 인장 실험을 통해 얻은 하중-변위 곡선을 각 시편의 단면적을 고려하여 응력-변형률 그래프로 변환하였다. 인장 시험 조건은 상온에서 인장 속도 0.2 mm/min으로 시행하였다.

3. 연구 결과

네 가지 시편의 절곡 실험을 통해 얻은 피로 파괴 사이클을 Fig. 3(a)에 나타내었다. A, B, C, D 네 가지 시편의 절곡 피로 파괴 사이클은 각각 561, 599, 678, 1123의 값을 나타냈다. A, B, C 세 가지 시편은 비슷한 수준의 절곡 파괴 수명을 나타낸 반면 D 시편의 경우 다른 시편에 2 배 가까운 절곡 파괴 수명을 나타내었다. 절곡 실험의 경우 굽힘 변형 부분에서 시편이 좌우로 굽혀짐에 따라 5.3%에서 -5.3%에 이르는 반복적인 변형이 일어나게 되고 이와 같은 반복 변형은 동박에 균열 형성을 유발하고, 이와 같은 균열은 전자의 이동을 방해하므로 전기 저항의 증가를 가져온 것이다.²⁾ 특히, 실험의 경우 국부적인

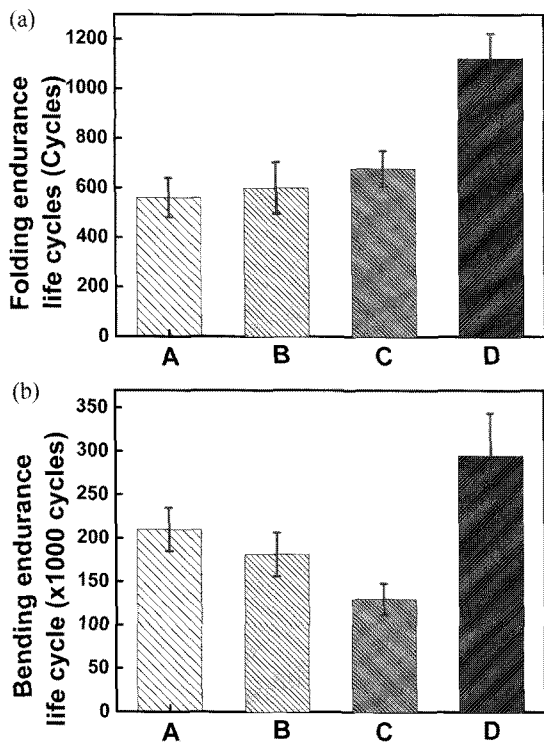


Fig. 3. Failure cycles defined by 20% electrical resistance increase in (a) folding endurance test and (b) bending endurance test.

부분에서 반복적으로 변형이 일어나게 되는데 이와 같은 국부적인 손상이 전체 저항의 20%를 증가시켰다는 것은 국부적으로 극심한 기계적, 전기적 손상이 일어났다는 것을 의미한다.

Fig. 3(b)는 네 가지 시편의 굴곡 실험을 통해 얻은 굴곡 수명 값을 보여주고 있다. 굴곡 수명은 A, B, C, D 시편의 경우 각각 210,000, 181,000, 130,000, 295,000 사이클로 D 시편이 굴곡 신뢰성이 가장 좋은 것으로 나타났다. 굴곡 실험의 경우 좌우 20 mm에 걸쳐 넓은 영역에 2.0%에 해당하는 변형률이 반복적으로 가해지게 되고 이에 따라 동박에 균열이 형성되고 저항이 증가한 것으로 해석된다. 굴곡 실험의 경우 절곡 실험에 비해 변형률이 더 낮기 때문에 모든 시편이 상대적으로 더 큰 수명을 나타내었다.

네 가지 시편의 구조가 Fig. 1과 같이, 두께, 표면 처리, 동박 제조 공정 등에서 큰 차이를 보이지 않기 때문에, 위와 같은 피로 파괴 수명의 차이는 재료의 성질, 특히 구리 박막의 물성에 큰 영향을 받은 것이라 예상된다. 따라서 각 시편의 인장 실험을 실시하였고 인장 실험을 통해 얻은 각 동박 시편의 응력-변화율 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 네 가지 시편은 응력-변화율 곡선에서 각각 다른 양상을 나타내었다.

초기 약 5% 이하의 변형률에서는 네 시편 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 탄성 영역에서의 물성값을 대표하는 항복 강도(yield strength)를 일반적으로 사용하는 0.2% offset 방식을 이용해 각각의 시편에서 구하였고, 그 값을 Fig. 5(a)에 나타내었다. 각 시편 A, B, C, D의 경우 항복 강도는 각각 122.5, 121.5, 100.1, 113.1 MPa로 측정되었다. 즉 네 시편의 항복 강도의 경우 유의차를 보이지 않았으며 이는 재료의 항복 강도와 반복 굽힘에 의한 피로 파괴와는 큰 관련이 없는 것으로 나타났다.

각 시편 A, B, C, D의 탄성 계수(elastic modulus)는 각각 43.2, 45.4, 43.8, 42.0 GPa로 측정되었고 이를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 탄성 계수의 경우에도 각 시편 간에 인지할만한 차이를 보이지 않았으며 피로 파괴와는 상관성이

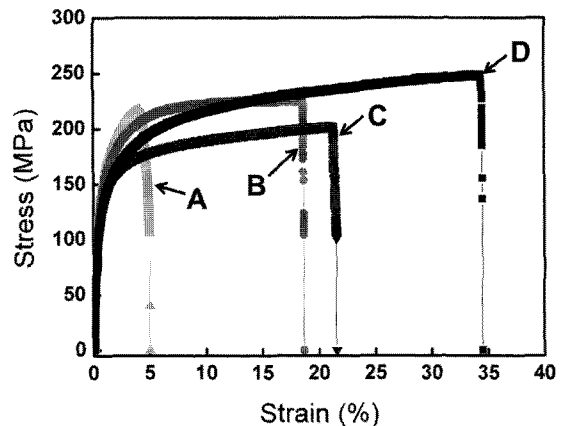


Fig. 4. Strain-stress curves of Cu/PI/Cu samples.

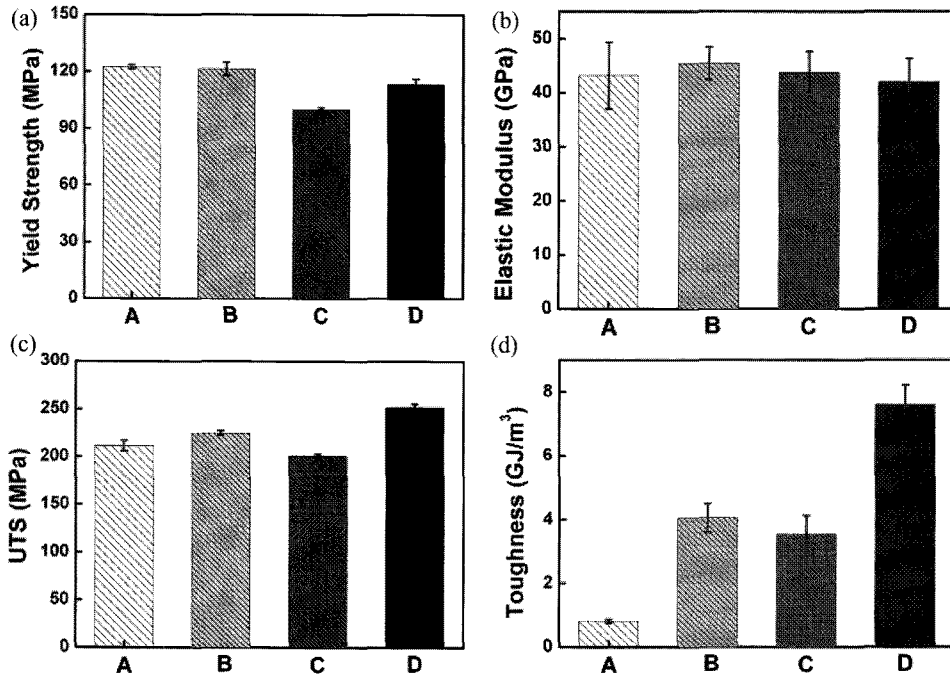


Fig. 5. Material properties of Cu/PI/Cu samples; (a) yield strength, (b) elastic modulus, (c) ultimate tensile strength (UTS), and (d) toughness.

Table 1. Material properties of Cu/PI/Cu samples and failure cycles by folding or bending endurance test (σ_y : yield strength, E: elastic modulus, UTS: ultimate tensile strength, N_f : failure cycles).

sample	σ_y (MPa)	E (GPa)	UTS (MPa)	Toughness (GJ/m ³)	N_f by folding test (Cycles)	N_f by bending test ($\times 1000$ Cycles)
A	122.5±1.1	43.2±6.2	211.5±5.4	0.81±0.06	561±79	210±25
B	121.5±3.5	45.4±3.0	224.8±2.3	4.0±0.45	599±104	181±26
C	100.1±1.0	43.8±3.8	201.0±2.1	3.5±0.58	678±72	130±18
D	113.1±2.9	42.0±4.3	251.9±3.7	7.6±0.62	1123±100	295±49

없는 것으로 나타났다. 금속의 피로 파괴의 경우 변형이 적을 경우 일반적으로 탄성 영역의 성질을 따르게 되고 변형이 큰 경우에는 소성 영역의 성질에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 본 연구의 절곡 실험에서 가해진 변형률은 5.3%로 이는 탄성 영역보다 큰 값이므로, 재료의 탄성 영역의 성질 보다는 소성 영역의 성질이 금속의 피로 파괴 거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 해석된다. 또한 굴곡 실험의 경우도 2.0%의 변형률 조건으로 재료의 탄성 영역보다 더 큰 변형률이 인가되었기 때문에 굴곡 실험 결과도 항복 강도와 탄성 계수와는 큰 연관성을 보이지 않은 것으로 해석된다.

재료의 파괴가 일어나기 전까지 가장 큰 응력을 나타내는 인장 강도(ultimate tensile strength: UTS)를 구해보면 A, B, C, D의 경우 각각 211.5, 224.8, 201.0, 251.9 MPa로 D 시편에서 약간 큰 값을 나타낸 것을 확인하였다. 이를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 또한, 재료가 파괴되는 변형률 즉, 연성(ductility)를 구해보면 A, B, C, D의 경우 각각 5, 18, 22, 34%로 D 시편이 다른 시편에 비해 높은 연성 값을 나

타냈다. 이는 연성과 절곡 신뢰성은 서로 비례하는 상관 관계를 가지는 것을 의미한다.

네 가지 시편의 응력-변화율 곡선에서 아래 면적을 적분하여 각 시편의 인성(toughness)을 구했다. Fig. 5(d)에 나타낸 A, B, C, D 각 시편의 인성 값은 각각 0.81, 4.0, 3.5, 7.6 GJ/m³을 나타내었다. D 시편의 경우 A, B, C 시편에 비해 더 큰 인성 값을 나타내었고, 연성이 높은 재료의 경우 인성도 높은 결과를 나타냈다. 이처럼 D 시편의 경우 다른 시편에 비해 큰 인성 값을 가졌고, 절곡 및 굴곡 수명도 Fig. 3(a), (b)과 같이 다른 시편에 비해 길게 나타났다. 이는 절곡 및 굴곡 수명과 인성이 밀접한 연관성을 갖는다는 것을 의미한다. 특히 인성 결과와 굴곡 실험 결과를 비교해보면 시편 A를 제외하고 굴곡 수명과 인성 값이 큰 유사성을 나타냈다. Table 1에는 4 가지 시편에 대해 이상에서 구한 항복 강도, 탄성 계수, 인장 강도, 인성, 절곡 피로 수명, 굴곡 피로 수명을 나타내었다. 재료의 인성은 재료가 파괴되기 전까지 흡수하는 에너지를 의미하는 값으로 일반적으로 인성이 큰 재료의 경우

기계적 파괴에 대한 저항성이 더 큰 것으로 알려져 있다. 재료의 피로 현상에서도 파괴에 저항하는 정도가 클수록 수명이 커지게 되므로 인성이 좋은 재료가 절곡 및 굴곡 신뢰성도 높게 나타난 것으로 해석된다. 이와 같은 상관관계는 인장 실험과 피로 파괴의 경우 서로 다른 기구에 의해 재료의 파괴가 일어나지만, 재료의 인성을 이용해 피로 파괴 저항성을 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 재료의 인성과 절곡 신뢰성 및 굴곡 신뢰성 간의 관계를 이용해 재료의 피로 파괴 수명 예측한다면 피로 시험에 소모되는 시간과 비용을 크게 절감할 수 있을 거라 사료된다.

4. 결 론

유연성 기판 상의 동박의 굽힘 변형에 따른 절곡 및 굴곡 신뢰성과 인장 실험에서 얻은 물성과의 관계를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 유연성 기판 상의 동박의 탄성 계수, 항복 강도와 절곡 및 굴곡 피로 수명과는 상관 관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 피로 시험의 변형률이 탄성 구간을 넘어서 충분히 클 경우 탄성 영역의 재료의 거동은 피로 파괴에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 재료의 인성과 연성은 절곡 및 굴곡 신뢰성 즉, 피로 수명과 비례하는 관계를 나타냈다. 이는 인장 실험에서 재료가 파괴되기까지 흡수하는 에너지를 의미하는 인성이 재료의 피로 현상에 대한 저항성에도 밀접한 관계를 가지는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (0417-20100022)을 밝힙니다.

참고문헌

1. T. H. Lee, K. H. Shin and Y. J. Kim, "Flexible and Embedded Packaging of Thinned Silicon Chip", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 11(1), 29 (2004).
2. G. E. Dieter and D. Bacon, *Mechanical Metallurgy*, pp.375 McGraw-Hill, London (1990).
3. K. O. Lee and J. Yu, "Effects of Surface Finishes on the Low Cycle Fatigue Characteristics of Sn-based Pb-free Solder Joints", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 10(3), 19 (2003).
4. S. Suresh, *Fatigue of materials*, 2nd Ed., p. 92, University press, Cambridge (1998).
5. M. Klesnil and P. Lukas, *Fatigue of metallic materials*, pp.161, Elsevier, New York (1992).
6. Japanese Industrial Standards (JIS), C5016 (1999).
7. The Institute for Interconnecting and Packaging Electronics Circuits (IPC) Standards, TM-650 (1996).
8. K.Okada, M. Arai and N. Tanabe, "High fatigue resist flexible printed circuit for HDD", *Fujikura Technical Rev*, 31, 36 (2002).
9. H. Yamanobe, M. Tagami, T. Komori and M. Ito, "Reliability of flexible flat cables with excellent bending property", *Hita-chi Cable Rev*, 19, 43 (2000).
10. T. Hatano, Y. Kurosawa and J. Miyake, "Effect of material processing on fatigue of FPC rolled copper foil", *J. Electron. Mater.* 29, 5 (2000).