초박형 FPCB의 유연 내구성 연구

정훈선¹ · 은경태¹ · 이은경¹ · 정기영² · 최성훈³ · 좌성훈^{1,†}

¹서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원, ²뉴프렉스, ³LS 엠트론

Flexible Durability of Ultra-Thin FPCB

Hoon-Sun Jung¹, Kyoungtae Eun¹, Eun-Kyung Lee¹, Ki-Young Jung, Sung-Hoon Choi and Sung-Hoon Choa^{1,†}

¹Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

²Newflex, 425-839, 603BL 4LOT, Banwol Industrial Complex, Ansan-City, Kyonggi-Do, Korea

³LS Mtron, 555 Hoge-dong, Anyang-si, Kyonggi-Do, Korea

(2014년 11월 11일 접수: 2014년 12월 24일 수정: 2014년 12월 26일 게재확정)

초 록: 본 연구에서는 스퍼터링 공정으로 제작된 FCCL(flexible copper clad laminate)을 이용하여 초박형 FPCB를 개발하였다. 또한 구리 박막과 폴리이미드 기판의 접착력을 향상시키기 위한 NiMoNb 접착층을 적용하였다. 개발된 초박형 FPCB의 기계적 내구성과 유연성은 인장, 비틀림 및 굽힘 피로 수명시험을 이용하여 검증하였다. 인장 시험 결과 초박형 FPCB는 약 7% 까지 인장이 가능하였으며, 비틀림 각도 120° 까지의 내구성과 유연성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 또한 초박형 FPCB는 10,000회의 굽힘 피로시험에도 파괴가 발생하지 않았다. 수치해석에 의한 응력 및 변형률의 계산 결과, 인장 시에 초박형 FPCB에 걸리는 최대 응력 및 변형률은 기존 FPCB에 비하여 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 결론적으로 초박형 FPCB의 강건성은 기존 FPCB에 비하여 약간 열세이나, 제품에 적용하기에는 충분한 강건성과 신뢰성을 갖고 있다고 판단된다.

Abstract: In this study, we developed an ultra-thin flexible printed circuit board(FPCB) using the sputtered flexible copper clad laminate. In order to enhance the adhesion between copper and polyimide substrate, a NiMoNb addition layer was applied. The mechanical durability and flexibility of the ultra-thin FPCB were characterized by stretching, twisting, bending fatigue test, and peel test. The stretching test reveals that the ultra-thin FPCB can be stretched up to 7% without failure. The twisting test shows that the ultra-thin FPCB can withstand an angle of up to 120°. In addition, the bending fatigue test shows that the FPCB can withstand 10,000 bending cycles. Numerical analysis of the stress and strain during stretching indicates the strain and the maximum von Mises stress of the ultra-thin FPCB are comparable to those of the conventional FPCB. Even though the ultra-thin FPCB shows slightly lower durability than the conventional FPCB, the ultra-thin FPCB has enough durability and robustness to apply in industry.

Keywords: FPCB, FCCL, Durability, Stretching, Fatigue

1. 서 론

최근 연성회로기판(flexible printed circuit board, FPCB)이 스마트 기기, 에너지 기기 및 플렉서블 디스플레이 등에 다양하게 적용됨에 따라 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 휴대폰, lap-top 컴퓨터 및 디스플레이 등을 비롯한 전자제품에서는 입력부(keypad)와 출력부(display panel) 간 전기적 신호가 연성회로기판의 FCCL(flexible copper clad laminate)을 통하여 전달된다. 최근 스마트폰, 태블릿 PC와 같은 전

자기기의 소형화, 경박화, 다기능화가 급속하게 진행되면서 전자제품의 주요 부품소재로 사용되고 있는 FPCB도 배선 패턴의 미세화가 요구되는 실정이다. 특히 차세대 디스플레이 분야에서 해상도가 높아지면서 FPCB를 사용하는 디스플레이 모듈에서도 고속/고용량 신호전송의 요구가 커지고 있다. 이러한 차세대 디스플레이 모듈용 FPCB는 종래의 기술에 비해 세 가지 기술이 요구되고 있다. 첫 번째로는 초고속/대용량 정보 전송이 요구되면서 회로의 임피던스 및 고속전송을 위한 회로 etching factor

[†]Corresponding author
E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

개선 및 회로 폭의 균일성이다. 두 번째는 고밀도 회로 배선을 위한 소구경 비아(via)를 형성하는 기술이다. 마지막으로 슬림화 경쟁에 있는 스마트폰 또는 휴대용 기기의 요구에 따른 초박형 FPCB의 개발이 요구되고 있다. 특히 반도체 패키지의 초박형화, 고밀도화, 고속 전송을 요구하는 추세에 맞춰, 초박형화를 위한 기존의 rigid PCB에서 FPCB로 개발이 전환되는 추세이다.

FPCB의 핵심은 FCCL로서 FCCL에서 사용되는 구리 박막(copper thin-foil)은 압연공정(rolled process)과 전해 공정(electrodeposited process)에 의해 주로 생산되었다.⁴⁾ 초박형의 FPCB를 제작하기 위해서는 얇은 구리 박막을 구현할 수 있는 초박형의 FCCL을 적용해야 하나, 현재까지는 casting 공법의 FCCL을 사용하기 때문에 얇은 구리 박막을 구현하기 힘들었다. 그러나 스퍼터링(sputtering) 공법을 이용한 FCCL을 적용할 경우 구리 두께를 자유자재로 형성할 수 있기 때문에 초박형의 FCCL의 제작이 가능하다. 따라서 스퍼터링 공정을 적용한 초박형 FCCL 개발이 기술적으로 중요하며, 특히 최근 스퍼터링 공정을 roll-to-roll 공정에 적용함으로써 대량 생산이 가능하도록 하는 기술이 적용되기 시작하고 있다.⁵⁾ 또한 현재의 에칭 기술로는 회로가 조밀하게 밀집되어 있는 부분과 회로가 독립되어 있는 부분에서의 에칭액 등이 반응하는 차이가 발생된다. 따라서 현재의 기술로는 회로가 밀집된 부분과 독립되어 있는 부분에서 회로 폭의 차이가 발생되어 고밀도의 미세회로 형성이 어렵지만, 스퍼터링 기술로 제작된 초박형 FCCL을 적용하면 이러한 문제점의 극복이 가능하다.

FPCB는 굽힘(bending) 및 인장(stretching) 등의 외부적인 변형에 대한 파괴가 발생할 가능성이 매우 많기 때문에 rigid PCB에 비하여, 유연성과 함께 기계적인 내구성 혹은 신뢰성이 매우 중요한 요소이다. FPCB의 신뢰성을 결정하는 재료는 구리 박막으로서 구리 박막의 피로 특성이 매우 중요하다. 또한 FPCB의 유연성도 매우 중요하며 가능한 곡률 반경이 작으면서 신뢰성에 문제가 없도록 설계되어야 한다. 초박형 FPCB의 경우 구리 및 폴리이미드(polyimide, PI) 기판 등의 재료가 매우 얇기 때문에 기계적인 강건성에 대한 검증이 필요하다. FPCB의 피로에 대한 강건성은 주로 굴곡성 시험^{6, 7)}에 의하여 수행되었으나, FPCB의 사용 시의 변형은 주로 인장, 굽힘, 비틀림(twisting) 등 다양한 형태의 응력을 받을 수 있다. 특히 FPCB가 웨어러블 기기에 사용될 경우에는 이러한 다양한 변형 및 응력에 대한 신뢰성 시험이 필수적이다. 그러나 현재까지 이러한 다양한 응력에 대한 연구는 거의 없었다.

또한 FCCL을 제작하기 위하여 PI 기판에 구리박막을 스퍼터링으로 증착을 하는데, 이 경우 증착된 구리 회로선의 저항과 폭을 줄이기 어려운 점이 있다. 이는 PI 기판과 증착된 구리 박막의 접착력(adhesion)이 나쁘기 때문이다.⁸⁾ PI 기판과 구리 박막의 접착력이 낮을 경우 인

장, 굽힘 및 비틀림 등의 외부 변형 시, 접착된 계면에서 응력 집중이 발생하여 FCCL의 파괴가 발생한다. 낮은 접착력은 폴리머 기판인 PI의 특성 때문이라고 알려져 있다.^{9, 10)} 따라서 본 연구에서는 스퍼터링을 이용하여 초박형 FPCB를 제작하였고, 초박형 FPCB의 접착력을 증가시키고자 새로운 접착 박막(adhesion layer)을 개발하였다. 또한 개발된 초박형 FPCB에 대하여 인장, 비틀림 및 굽힘 피로 수명시험 등의 시험을 통하여 다양한 응력에 대한 FPCB의 강건성 및 유연성을 연구하였으며, 수치해석을 통하여 검증하였다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

2.1 초박형 FPCB의 제작

Fig. 1(a)는 본 연구에서 제작된 초박형 FPCB의 개략도를 나타내고 있다. PI 기판은 Kapton PI 필름이며(Toray DuPont), 두께는 20 μm 이다. FCCL 구조는 구리박막과 접착층(또는 buffer layer), 그리고 PI 필름으로 구성되어 있다. 우선 PI 필름의 접착성을 향상시키기 위하여 roll-to-roll 공정에서 RF 상온 플라즈마 처리 공정을 이용하여 PI 표면을 플라즈마 처리하였다. 플라즈마 처리 공정 후에 PI 기판 위에 접착층을 DC magnetron 스퍼터링 공정을 이용하여 증착한다. 이 때 접착층의 두께는 20 nm이다. 접착층의 증착이 완료된 후 seed layer로서 구리를 Ar 환경 하에서 스퍼터링 공정으로 증착하였다. 이때 구리 seed layer의 두께는 0.2 μm 이었다. 스퍼터링 공정이 완료된 후 electroplating 공정을 이용하여 구리 도금을 수행하고 FPCB를 제작하였다. 제작된 최종 초박형 FPCB의 두께는 98 μm 이었으며, 그 중 FCCL의 두께는 23 μm 이었다.

접착층의 종류는 총 4개의 접착층을 사용하여 시험하였다. 기존에 잘 알려진 Ni, Ni-Cr³⁾ 및 최근에 소개된

Fig. 1. (a) Schematic drawing of the ultra-thin FPCB with the total thickness of 98 μm (b) Schematic drawing of the conventional FPCB with the total thickness of 130 μm .

NiMoNb¹¹⁾를 사용하여 FCCL을 제작하였다. Ni-Cr 층의 경우 Ni 및 Cr의 두께비를 각각 다르게 증착한 2 가지 접착층을 사용하였다. 즉 Ni-Cr의 두께비를 93:7 및 8:2의 두께비를 사용하여 각각 증착하였다. NiMoNb의 조성비는 85.0:12.3:2.7 이었다. FCCL의 접착력 측정은 90° peel test를 사용하여 측정하였으며, peeling 속도는 10 mm/min 이었다. 접착력 시험을 위한 시편의 길이는 195 mm이며, 접착력 측정을 위한 측정 간격은 10초로 진행하였다. 접착력은 총 10개의 샘플에 대해서 수행하여 평균값을 산출하였다. 한편 제작된 초박형 FPCB의 특성 및 기계적 신뢰성을 비교하기 위하여, 기존에 사용되고 있는 FPCB를 제작하여 비교 분석하였다. 기존 FPCB의 두께는 130 μm 이며, 그 중 FCCL의 두께는 48 μm 이었다. Fig. 1(b)에 기존에 사용되고 있는 FPCB의 개략도가 나타나있다.

2.2. FPCB의 기계적 내구성 및 유연성 시험

FPCB의 굽힘 및 굽힘 수명에 대한 시험은 주로 industrial standard IPC-2223⁶⁾에 근거하여 주로 sliding bending 시험¹²⁾이나 굴곡성(flexure tester)⁷⁾에 의하여 수행되었다. 그러나 본 연구에서는 FPCB에 걸리는 다양한 응력에 대한 내구성 및 유연성을 시험하기 위하여 다양한 신뢰성 시험을 수행하였다. FPCB의 기계적 수명 및 파괴에 대한 연구는 인장(stretching), 비틀림(twisting), 굽힘 피로수명(bending cyclic fatigue) 시험을 이용하여 진행되었다. 굽힘, 인장, 비틀림 및 피로수명 시험을 진행하기 위해 자체 제작된 시험기를 개발하였으며, Fig. 2는 인장 및 굽힘 시험 장비의 사진을 보여주고 있다. 굽힘 및 인장 시험 중에 FPCB의 파괴 유무를 알기 위하여 멀티미터로 FPCB의 저항의 변화를 관찰하였으며, 동시에 광학현미경으로 FPCB 표면의 크랙 유무를 관찰하였다. 저항이 급격히 크게 변하거나, FPCB의 표면에 크랙이 발생할 경우 및 FPCB가 절단 혹은 파손된 시점을 파괴 시점이라고 간주하고 시험을 중단하였다.

굽힘 시험에서는 시편의 전체 길이 L 을 변화시킴으로써 곡률반경을 변화시켰다. dL 만큼 변화시켰을 때 발생

되는 곡률 반경(r)은 아래의 식으로 계산되었으며¹³⁾

$$\text{Bending Radius}(r) = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (1)$$

여기서 L , dL/L 그리고 h_s 는 기관의 초기 길이, 기관의 전체 길이에 대한 기관의 이송거리, 그리고 기관의 두께를 각각 나타낸다. 또한 굽힘 시에 발생한 변형률은 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.¹⁴⁾

$$\text{strain} = \frac{(h_f + h_s)}{2r} \quad (2)$$

여기서 h_f 는 박막의 두께를 나타낸다.

비틀림 시험은 회전축이 서로 마주보고 있는 상태에서 x_{rot} 방향으로 각각 1° 단위로 움직이게 된다. 또한 비틀림 시험기에 고정되어 있는 샘플은 인장 응력의 영향을 최소화 하고자 LM guide를 설치하여 축 방향으로 자유롭게 움직일 수 있게 제작하였다. 비틀림 시험기는 초기 상태인 0°에서 최대 180° 까지 진행이 가능하며, 속도 조절이 가능하도록 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초박형 FPCB의 기계적 내구성 및 유연성 실험

초박형 FPCB의 기계적 내구성을 관찰하기 위해 인장(stretching) 즉, uni-axial tensile 시험을 수행하였다. 인장 시험은 인장되는 방향이 FPCB의 수평 방향과 수직방향으로 각각 달리 하여 시험을 진행하였다. 이는 FPCB의 방향이 인장 강도에 미치는 영향을 알아보기 위함이다. 기존 FPCB는 두께가 비교적 두껍기 때문 인장 방향에 따른 기계적 내구성이 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단된다. 그러나 초박형 FPCB의 경우 구리층 및 PI 층의 두께가 얇아지면서 인장 방향에 따른 기계적 내구성에 차이가 발생할 수 있다. Fig. 3은 인장 시험에서 인장 방향

Fig. 2. Lab-made stretching and bending fatigue tester.

Fig. 3. Pictures of FPCB samples for stretching test. (a) Stretching with longitudinal direction to the copper line (b) Stretching with perpendicular direction to the copper line.

(a)

(b)

Fig. 4. (a) Stretching test results for the ultra-thin FPCB with longitudinal direction to the copper line. (b) Failed image of FPCB after the stretching test.

에 대해 FPCB(또는 회로선)가 수평방향인 경우와 수직인 방향의 경우를 나타내고 있다. 기계적 내구성 시험을 위한 FPCB 시편은 길이 및 폭이 15 mm×30 mm 인 크기로 제작되었다. 저항 측정은 FPCB 회로선 위에 납땜을 하였고, 초기 저항 및 인장 시험 중에 발생하는 저항을 실시간으로 측정하였다.

Fig. 4(a)는 초박형 FPCB에 대해서 인장방향에 대해 회로선이 수평일 때의 인장 시험결과로서 변형량에 따른 FPCB의 저항 변화를 보여주고 있다. 그림에서 FPCB의 저항의 변화는 $\Delta R (=R-R_0)$ 로 표시하였으며, R_0 은 초기 FPCB의 저항이며, R 은 인장 시험 후의 저항의 변화값이다. 시험 결과 인장 변형율(strain) 7.6%에서 FPCB 기판의 파괴가 발생하였다. Fig. 4(b)는 FPCB 기판의 인장 후에 파괴된 모습을 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 인장방향에 대해 FPCB가 수직일 때의 인장 시험 결과를 보여주고 있다. 인장 시험결과 변형률 2.8%에서 FPCB 기판의 파괴가 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 FPCB 기판의 파괴된 상태를 나타내고 있다. FPCB 기판을 살펴보면 두께가 가장 얇은 영역, 즉 주로 PI 기판이 있는 부분에서 파괴가 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 기존 FPCB (두께: 130 μ m) 샘플에 대하여 인장 시험을 한 결과이다. Fig. 6(a)는 인장 방향에 대해 FPCB가 수평 방향인 시편의 인장 시험을 진행하면서 측정한

(a)

(b)

Fig. 5. (a) Stretching test results for the ultra-thin FPCB with perpendicular direction to the copper line. (b) Failed image of FPCB after the stretching test.

(a)

(b)

Fig. 6. Stretching test results for the conventional FPCB with (a) longitudinal direction to the copper line. (b) perpendicular direction to the copper line.

Fig. 7. (a) Twisting test results for the ultra-thin FPCB. (b) Failed image of FPCB after the twisting test of the twisting angle of 120 degree.

저항의 변화를 보여주고 있다. 변형율 10% 까지 인장 하였을 때 전기적 특성에 대한 변화는 없었으며, FPCB의 파괴는 발생하지 않았다. 또한 FPCB의 표면 및 FPCB 내의 비아 구멍의 모습은 초기에 상태에 비해 타원 형태로 변형되었으나 미세 크랙은 발생하지 않았다. Fig. 6(b)는 인장방향에 대해 FPCB가 수직인 방향에 대해 인장 시험을 진행한 결과를 보여주고 있다. 변형율 4.6%에서 FPCB의 파괴가 발생하였다. 파괴된 FPCB 기판의 상태를 살펴보면, 비교적 두께가 얇은 부분, 즉 PI 기판에서 파괴가 발생한 것을 알 수 있었다. 인장 시험 결과를 종합하면, 초박형 FPCB의 수평방향의 인장 변형율은 약 7%이며, 수직 방향의 인장 변형율은 약 2.8%로서 기존 두께 130 μm 의 FPCB에 비하여 인장 내구성은 약간 열세에 있다. 그러나 FPCB가 사용되는 실제 환경을 고려하여 볼 때, 변형율이 7%가 되는 사용 환경이 거의 없다. 또한 수직 방향의 인장도 크게 발생하지 않는 경우가 대부분이다. 따라서 초박형 FPCB의 인장에 대한 내구성은 실제 제품에 적용되기 위한 충분한 내구성을 지녔다고 할 수 있다.

Fig. 7은 초박형 FPCB에 대해서 비틀림 시험한 결과를 보여주고 있다. 비틀림 각도가 120° 일 때 까지 시험한 결과 전기적인 특성에 대한 변화는 발생하지 않음을 알 수 있다. 이 때 FPCB의 기판에 미세 크랙이나 기판의 파괴는 발생하지 않았다. Fig. 8은 기존 두께 130 μm 의 FPCB 샘플에 대한 비틀림 시험 결과를 보여주고 있다. 비틀림 시험은 최대 150° 까지 진행되었다. 비틀림 시험결과 최

Fig. 8. Twisting test results for the conventional FPCB.

Fig. 9. Outer bending fatigue results of 10,000 cycles for (a) ultra-thin FPCB (b) conventional FPCB.

대 150° 까지 저항변화는 발생하지 않았다. 비틀림 각도가 150° 임에도 불구하고, 회로선이나 FPCB 기판에는 미세 크랙이나 파괴가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 본 연구에서 비틀림 각도를 150° 이상 실험하지 않은 이유는 실제 FPCB 적용에 있어서 FPCB가 150° 이상 비틀림 되는 경우가 거의 없을 것으로 판단하여 그 이상의 각도에 대해서는 시험을 수행하지 않았다.

Fig. 9(a)는 초박형 FPCB에 대해서 굽힘 피로 수명 시험을 진행한 결과이다. 굽힘 수명 시험은 곡률 반경을 5 mm로 고정한 후 총 10,000회를 수행하였다. 굽힘 수명

Table 1. Peel strength of various seed materials

Seed material	Peel strength (Kgf/cm)
Ni	0.49
NiCr (93:7)	0.63
NiCr (8:2)	0.79
NiMoNb	0.91

시험을 10,000회 진행 후에도 저항의 변화는 없었으며, 회로선 및 FPCB 기판에 미세 크랙은 발생하지 않았다. Fig. 9(b)는 기존 FPCB 샘플에 대한 굽힘 피로 시험 결과이다. 초박형 FPCB의 결과와 마찬가지로 굽힘 시험을 10,000회 진행결과 저항 변화는 발생하지 않았으며 회로선 및 FPCB 기판에 미세 크랙이나 파괴는 발생하지 않았음을 알 수 있다.

Table 1은 4 종류의 접착층에 대한 peel 강도(접착력) 측정 결과이다. Ni 접착층을 사용할 경우가 0.49 Kgf/cm로 접착력이 가장 낮음을 알 수 있었다. Ni-Cr 접착층의 경우 Ni-Cr의 두께비를 8:2로 한 경우가 두께비 93:7의 Cr-Ni 접착층에 비하여 접착력이 약간 높음을 알 수 있다. NiMoNb의 접착층을 사용할 경우 약 0.92 Kgf/cm로 가장 큰 접착력을 얻었으며 이는 양산에 적용하기에 충분한 접착력이었다. 한편 Bang 등¹¹⁾의 결과에 의하면 NiMoNb 접착층을 사용한 경우에 상온 플라즈마 처리의 효과는 표면의 거칠기 증가로 인한 접착력의 향상 보다는, 오히려 PI 기판 표면의 functional group의 변화로 인한 접착력의 향상 효과가 더 크다고 보고하였다. 따라서 상온 플라즈마 조건 및 플라즈마 처리 후의 표면의 상태에 대한 보다 세밀한 연구가 향후 필요하며, 이를 통하여 접착력을 좀 더 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 수치해석 결과

본 연구에서 초박형 FPCB 및 두께 130 μm 의 기존 FPCB에 대하여 인장 되었을 때의 FPCB에 걸리는 응력 및 변형률을 계산하여, 초박형 FPCB 샘플이 기존 FPCB

Fig. 10. Schematic drawing used in FEM analysis for (a) ultra-thin FPCB (b) conventional FPCB.

에 비하여 어느 정도의 응력에 대한 강건성이 있는지를 수치해석을 이용하여 분석하였다. Fig. 10에 FEM 해석에 사용된 FPCB 구조의 개념도를 볼 수 있다. Fig. 10(a)은 두께 96 μm 인 초박형 FPCB에 대한 모델링이며, Fig. 10(b)는 두께 130 μm 의 기존 FPCB에 대한 모델링이다. FPCB의 크기는 두 샘플 모두 550 μm 의 폭과 1,100 μm 의 길이를 갖는다. 유한요소 해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS 14.5를 사용하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점 3차원 요소인 SOLID185를 사용하였으며, 해석 결과의 정확성을 높이기 위해 mapped mesh 하였다. 유한요소 해석에 사용된 각 재료의 물성은 기존 문헌에서 사용된 대표 값을 사용하였으며¹⁵⁾, Table 2에 명시하였다. Cu의 탄성계수는 75 GPa이며, 항복 응력은 85 MPa이다. 변위 경계는 모델의 한쪽 옆면의 X, Y, Z 방향을 모두 구속하였으며, 변위 경계가 적용되는 면의 반대쪽에 35 N의 인장 하중을 적용하였다. 35 N은 인장 하중은 FPCB의 굴곡성을 평가하는 MIT 시험⁷⁾의 하중 중에서 가혹한 조건인

Table 2. Material properties used in FEM analysis

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (ν)	Yield strength (MPa)
Polyimide	4	0.35	-
Adhesive	0.69	0.4	33
Cu	75	0.34	85

Fig. 11. Strain distribution during stretching test with longitudinal direction (a) the ultra-thin FPCB (b) the conventional FPCB.

Fig. 12. Strain distribution during stretching test with perpendicular direction (a) the ultra-thin FPCB (b) the conventional FPCB.

Fig. 13. von Mises stress distribution during stretching test with longitudinal direction (a) the ultra-thin FPCB (b) the conventional FPCB.

5 Kgf의 하중에 해당하는 조건이다. FEM 모델은 초기 응력 및 변형이 없는 stress-free 상태로 가정하였으며, 인장 방향이 FPCB 구조의 수평방향인 경우와 수직방향인 경우 모두 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 초박형 FPCB와 기존 FPCB를 35 N의 힘으로 수평 방향, 즉 구리선과 일치되는 방향으로 인장하였을 때 FPCB의 변형량을 보여주고 있다. 35 N의 힘을 가했을 때 초박형 FPCB는 3.8%의 변형량이 발생하였으며, 기존 FPCB는 약 4.3%의 변형량이 발생하였음을 알 수 있었다. 두께가 얇은 초박형 FPCB가 역시 인장 변형율이 많음을 알 수 있다. 한편 Fig. 12는 수직 방향으로 인장을 하였을 때 FPCB의 변형량을 보여주고 있다. 수직 방향의 인장의 경우, 구리의 변형에는 큰 영향이 없고, 주로 PI 기판에 영향이 많기 때문에 인장 시에는 변형이 많이 되며, 초박형 FPCB의 경우 약 3.8%의 인장 변형율을 보여주고 있으며, 기존 FPCB의 경우는 약 4.4%의 변형율을 나타내고 있다. 기존 FPCB와 초박형 FPCB에 대해서 구리와 PI 기판의 volume ratio는 동일하게 설정하였다. 따라서 수직 방향의 경우 대부분 PI 기판에서 변형이 발생한 것으로 판단되며, 따라서 변형량의 차이는 거의 없다. Fig. 13은 초박형 FPCB와 기존 FPCB를 수평 방향으로 인장하였을 때 발생하는 최대 von Mises 응력을 보여주고 있다. 최대 von Mises 응력은 초박형 FPCB는 428 MPa이며, 기존 FPCB의 경우 약 408 MPa로서, 초박형 FPCB가 약간 큰

Fig. 14. von Mises stress distribution during stretching test with perpendicular direction (a) the ultra-thin FPCB (b) the conventional FPCB.

응력이 발생하지만 큰 차이는 없다고 하겠다. Fig. 14는 초박형 FPCB와 기존 FPCB를 수직 방향으로 인장하였을 때의 최대 von Mises 응력을 보여주고 있다. 최대 von Mises 응력은 초박형 FPCB의 경우 219 MPa, 기존 FPCB의 경우 218 MPa를 나타내고 있으며, 응력은 거의 동일함을 알 수 있었다. 결론적으로 두 개의 샘플이 인장 시에 걸리는 응력 및 변형량을 해석한 결과 큰 차이를 보이지는 않고 있으며, 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 초박형 FPCB의 강건성이 확보되었음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께 98 μm 의 초박형 FPCB를 개발하였으며, 이를 위하여 스퍼터링 공정을 이용한 FCCL 개발 및 접착력을 향상을 위한 NiMoNb 접착층을 적용하였다. 개발된 초박형 FPCB의 기계적 유연성 및 강건성은 인장, 비틀림 및 굽힘 피로 수명 시험을 통하여 관찰하였으며, 수치해석을 이용하여 검증하였다. 수평 방향 인장 시험 결과 초박형 FPCB는 인장 변형률 7.6%, 기존 FPCB는 변형률 10% 까지 인장이 가능함을 알 수 있었다. 초박형 FPCB가 인장 변형률 면에서 열세이지만, 실제 사용 환경에서 FPCB가 7% 이상 인장되는 경우가 거의 없기 때문에 충분한 인장강도를 갖고 있다고 판단된다. 수직 방향으로 인장 시에 파괴 인장 변형률은 초박형 FPCB는 2.8%, 기존 FPCB는 4.6%로 관찰되었다. 비틀림 시험 결과 초박형 FPCB 및 기존 FPCB는 비틀림 각도 120° 이상의 비틀림 강건성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 굽힘 수명시험을 10,000회 진행 후에도 초박형 FPCB의 저항의 변화는 없었으며, 회로선 및 FPCB 기판에 미세 크랙은 발생하지 않았다. 접착층의 경우 NiMoNb 접착층을 사용할 경우가 가장 큰 접착력을 얻었으며 이는 양산에 적용하기에 충분한 접착력이었다. 인장에 의한 변형률과 응력을 수치해석을 이용하여 계산한 결과, 35 N의 힘을 가했을 때 수평 방향의 경우 초박형 FPCB의 변형률은 3.8% 그리고 기존 FPCB의 변형률은 4.3%으로 초박형 FPCB의 인장 변형률이 약간 큼을 알 수 있다. 이때 발생하는 최대 von Mises 응력은 초박형 FPCB는 428 MPa이며, 기존 FPCB의 경우 약 408 MPa로서 최대응력의 크기는 유사하였다. 수직 방향으로 인장을 하였을 경우는 변형률 및 최대 von Mises 응력의 크기는 두 가지 샘플에 대해서 유사한 값을 보여주고 있다. 결론적으로 제작된 초박형 FPCB는 충분한 기계적 유연성과 내구성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원

으로 수행되었습니다.

References

1. E. Menard, R. G. Nuzzo and J. A. Rogers, "Bendable Single Crystal. Silicon Thin Film Transistors Formed by Printing on Plastic Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 86, 093507 (2005).
2. W. Chen, T. L. Alford, T. F. Kuech and S. S. Lau, "High Electron Mobility Transistors on Plastic Flexible Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 98, 203509 (2011).
3. J. S. Eom and S. H. Kim, "Plasma Surface Treatment of Polyimide for Adhesive Cu/80Ni20Cr/PI Flexible Copper Clad Laminate", *Thin Solid Films.*, 516, 4530 (2008).
4. I.-S. Kang, Y.-S. Koo and J.-H. Lee, "The Effects of Levelers on Electroplating of Thin Copper Foil for FCCL", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 67 (2012).
5. B. I. Noh, J. W. Yoon and S. B. Jung, "Effect of Laminating Parameters on the Adhesion Property of Flexible Copper Clad Laminate with Adhesive Layer", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 30, 30 (2010).
6. IPC Standard, "IPC-2223B Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards"(2008).
7. ASTM D2176 MIT Folding Endurance Test Method.
8. B.-I. Noh, J.-W. Yoon and S.-B. Jung, "Effect of Ni-Cr Seed Layer Thickness on the Adhesion Characteristics of Flexible Copper Clad Laminates Fabricated using a Roll-to-Roll Process", *Met. Mater. Int.*, 16, 779 (2010).
9. B.-I. Noh, J.-W. Yoon and S.-B. Jung, "Fabrication and Adhesion Strength of Cu/Ni-Cr/polyimide Films for Flexible Printed Circuits", *Microelectronic Engineering*, 88, 1024 (2011).
10. K.-J. Min, S.-C. Park, J.-J. Lee, K.-H. Lee, G.-H. Lee and Y.-B. Park, "Interfacial Fracture Energy between Electroless Plated Ni Film and Polyimide for Flexible PCB Application", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 14(1), 39 (2007).
11. S.-H. Bang, K.-K. Kim, H.-Y. Jung, T.-H. Kim, S.-H. Jeon, J.-B. Seol, "Application of NiMoNb Adhesion Layer on Plasma-treated Polyimide Substrate for Flexible Electronic Devices", *Thin Solid Films.*, 558, 405 (2014).
12. W. C. M. Filho, S. Hameau and M. Brizoux, "Evaluation of Very Low Bending Radius of Flexible Circuits Beyond the Standard Design Rules", 13th. Int. Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 1 (2012).
13. S.-I. Park, J.-H. Ahn, S. Wang, Y. G. Huang and J. A. Rogers, "Theoretical and Experimental Studies of Bending of Inorganic Electronic Materials on Plastic Substrates", *Adv. Funct. Mater.*, 18, 2673 (2008).
14. Z. Suo, E. Y. Ma, H. Gleskova, and S. Wagner, "Mechanics of Rollable and Foldable Film-On-Foil Electronics", *Appl. Phys. Lett.*, 74, 1177 (1999).
15. A. Pchelintsev, "Automated Modeling and Fatigue Analysis of Flexible Printed Circuits", 7th. Int. Conference on Thermal, Mechanical and Multi-physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 1, (2006).