

# 슬라이드형 휴대폰 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)의 수명예측

최진영<sup>†</sup> · 장석원\* · 곽계달\*\*

## Lifetime Estimation for FPCB of Slide mobile phone

Jin-Young Choi, Seog-Weon Chang and Kae-Dal Kwack

Key Words: FPCB(연성회로기판), Insulator(절연물), Conduct(도체), Adhesive(접착제), Bending Strain(굽힘응력), Coffin-Manson's law(코핀-맨슨 모델)

### Abstract

The FPCB is used as the important component of the sliding mechanism of mobile phones. FPCB have been used as jumper cables(fixed wiring) in various types of circuits because of their flexibility and bending property. The dominant failure mode of the FPCB is open that was caused by fatigue. The fatigue is repeated whenever the sliding is open, so it is a mainly cause of FPCB fatigue. We examined the bending-fatigue lifetime of FPCB. we focused on observing the contact resistance degradation of FPCB of mobile phones according to different test condition of bending strain. As a result, it has proved that lifetime decreased by increasing bending strain.

### 1. 서 론

오늘날 휴대폰은 현대인들이 살아가는데 필수품이 되고 있으며, 최근 전자제품의 소형화, 경량화 추세에 맞춰 휴대폰의 디자인도 슬림화되고 경량화 되고 있다. 하지만 소형화됨에 따라 휴대폰 내부 부품의 신뢰성문제가 대두되고 있다. 2006년 휴대폰 이상 관련 서비스 8634건 중 70%가 FPCB 연결선과 액정균열 등 인 것으로 나타났다.<sup>(1)</sup> 슬라이드 형 휴대폰은 메인 바디에 결합되어 있는 메인 플레이트와 슬라이드 바디에 결합되어있는 슬라이드 플레이트의 상호 왕복 운동을 통해서 구동된다. 두 개의 플레이트를 연결하는 선이 FPCB이다.

슬라이드형 휴대폰이 구동될 때 FPCB는 반복적으로 구부러진다. FPCB는 아주 얇은 두께의 절연필름(polyimide) 위에 동박을 붙인 회로기판으로, 두께가 얇고 굴곡성이 뛰어나 휴대폰, 디지털 카메라, 노트북PC, 캠코더 등 중소형 전자부품에 많이 사용되고 있으며, 현재 다층구조가 상용화되고 있다. FPCB는 단독으로 3차원 배선이 가능하며, 기기의 소형화, 높은 내구성 등의 장점이 있는 반면, 기계적 강도가 낮고 찢어지기 쉬운 단점이 있다. FPCB는 슬라이드형 휴대폰이 구동될 때 반복적으로 구부러진다. 최근 휴대폰의 소형화로 인해 FPCB간 간격이 줄어들어 반복 굽힘현상으로 인해 단선(open)현상이 늘어나고 있다.

지금까지의 휴대폰 신뢰성에 관한 연구들은 hinge부분 및 낙하시험 등에 관한 연구가 대부분이었고 FPCB에 관련된 연구는 미진하였다. 그러므로 본 연구에서는 일반적인 슬라이드형 휴대폰에 사용되는 FPCB를 대상으로 가속수명시험을 실시하여 FPCB의 고장 모드 및 고장 메커니즘을

<sup>†</sup> 최진영, 한양대학교, 전자통신컴퓨터공학부

E-mail : cgy0820@hanmail.net

TEL : 010-2351-1172

\* 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

\*\* 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

규명하고 수명-스트레스 관계를 추정하고자 한다.

## 2. FPCB의 고장분석

### 2.1 FPCB의 구조 및 특성

본 연구의 연구대상이며, 일반적인 슬라이드형 휴대폰의 외형과 내부에 사용된 FPCB형상을 Fig. 1 (a), (b)에 나타내었다. 그림 (a)의 슬라이드형 휴대폰 내부에 메인보드와 액정을 연결해주는 역할을 그림 (b)의 FPCB가 맡고 있다. FPCB는 Fig. 2에서 보이듯이 크게 절연물(insulator), 도체(conduct), 접착제(adhesive)로 구성되어 있다.<sup>(2)</sup>

그림에서 FPCB는 Polyimide 필름(PI)으로 된 절연물과 동박(Cu)로 구성된 도체부분으로 이루어져 있으며 접착제(adhesive)를 통해 그들을 접합하고 있다. 또한, FPCB는 PI 필름위에 Cu로 회로(pattern)를 형성하여 도통하는 방식을 갖는다. FPCB의 베이스 필름에는 Polyimide와 PET 필름이 사용되고 있으며, 이들은 치수 변형이 적고, 내굴곡성 및 내열성이 우수하고 유연성이 월등한 재료들로 구성되어 있다.

### 2.2 고장모드 및 메커니즘

슬라이드용 휴대폰 FPCB의 고장에 가장 큰 영향을 미치는 3가지 요인으로 첫째, 메인 플레이트와 슬라이드 플레이트의 상호 왕복운동에 의한 반복 충격(repeated stress)과 둘째, 휴대폰을 떨어뜨리는 등의 외부 자극에 의한 물리적 충격(physical stress)<sup>(3)</sup>과 셋째, 고온을 들 수 있다.

일반적으로 빈번하게 발생하는 고장 메커니즘으로는 FPCB가 끊어짐으로 발생하는 open이며, 이는 슬라이드를 개폐하는 과정에서 발생하는 상호 왕복운동으로 인한 피로(fatigue)와 휴대폰을 떨어뜨리는 등의 물리적 충격이 가해졌을 경우 발생하는 내부 크랙(metallization crack)에 의해 일어난다. 이 피로는 FPCB 내부에 전체적으로 일어나며 적은 stress가 누적되어 고장에 이르게 된다. FPCB는 외부 온도가 높을수록 더 빨리 고장이 발생한다는 선행 연구 결과에도 있듯이,<sup>(2)</sup> 온도의 변화에 의해서도 open이 발생한다.

간헐적으로, FPCB에서 크랙으로 인한 계면으로 누설전류(leakage current)가 생겨 전기적 특성 저하(electrical degradation)현상이 나타나기도 한다.



(a) Figure of Mobile Phone (b) Figure of FPCB  
Fig. 1 Typical FPCB

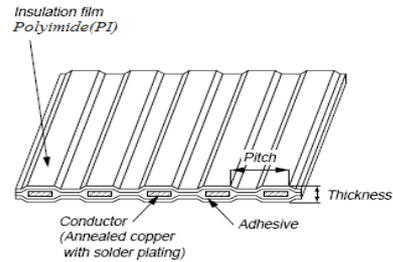


Fig. 2 Structure of FPCB

앞서 언급된 슬라이드용 휴대폰 FPCB의 대표적인 고장모드와 메커니즘을 Fig. 3의 FTA(Fault Tree Analysis)에 나타내었다.

## 3. FPCB의 가속수명시험

### 3.1 2단계 품질기능전개(2-Stage Quality Function Deployment)

FPCB의 수명예측을 위한 적절한 시험방법을 정하기 위하여 2-stage QFD를 수행하여 Fig. 4 (a), (b)에 나타내었다.<sup>(4)</sup> 그림 (a)에서는 요구환경 및 조건과 고장 메커니즘의 관계를 분석하고, (b)에서는 고장모드 및 메커니즘과 시험 방법과의 관계에 대하여 분석하였다. 그리고 각 항목에 대한 상호관계를 비교하여 효과적인 가속수명시험 방법을 결정하였다. QFD 분석결과에 따라 굽힘수명시험(bending-fatigue life test)을 통한 수명평가를 시행하는 것이 가장 적합하다고 판단되었다.

### 3.2 시료선정 및 고장판정기준

시험에 사용된 시료의 특성 및 고장판정기준을 Table 1에 나타내었다. 표에서 시료는 단면 FPCB(single side)이며, 도체 저항, 절연체 강도 및 peeling strength가 각각 0.2Ω/m, 5KV 및 1.2kgf/cm 이다. 아울러 고장판정 기준은 FPCB가 올바르게 도통 할 수 없는 open이 발생하였을 경우로 선정하였다. 부가적으로 시험에 사용된 시

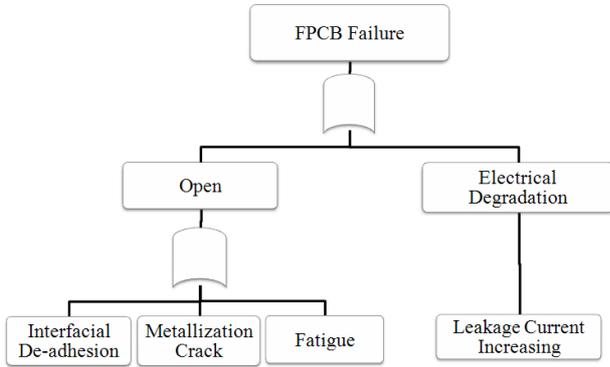


Fig. 3 Failure mode / mechanism of FPCB using FTA

Requirements/Stresses	Mechanisms			
		Interfacial De-adhesion	Metalization Crack	Fatigue
Δ - 1 ○ - 3 ⊙ - 5				
Bending-fatigue lifetime: 100,000 times		⊙	⊙	⊙
Operating Temperature: -30℃~80℃		○	Δ	○
Tensile Strength: 3.5Kg/mm <sup>2</sup>			○	○
score		8	9	11

(a) Matrix1 – Mode/Mechanism

		Bending-fatigue life test	High Temperature	Drop test
Fatigue	11	○	Δ	Δ
Metalization Crack	9	○	Δ	Δ
Interfacial De-adhesion	8	Δ	○	○
<b>Score</b>		68	44	44

(b) Matrix 2 – Test Method

Fig. 4 2-Stage QFD

료의 각 부분에서의 두께를 측정하여 Table 2에 나타내었다. 표에서 FPCB 전체 두께, conductor 두께, 필름 두께 및 adhesive 두께는 각각 50 μm, 15 μm, 7.5 μm 및 10 μm이다.

3.3 가속인자 및 수준의 결정

FPCB의 굽힘수명시험시, 가속 수준은 구부러진 FPCB사이의 간격으로, 곡률반경(R) 값을 0.25mm, 0.5mm, 1mm로 결정하였다. 이 값을 굽힘수명(N<sub>f</sub>)을 구하기 위한 가속인자로 변환하기 위해, 굽힘응력 값인 ε (bending strain)으로 나타

Table 1 FPCB Specification & Criteria

Parameter	Spec	Criterion
Conductor Resistance	0.2Ω <sub>1</sub>	Malfunction of FPCB
Dielectric Strength	5KV	
Peeling Strength	1.2kgf/cm	

Table 2 Specimens Tested

FPCB	Conductor	Film	Adhesive
Thickness H(μm)	Thickness h <sub>c</sub> (μm)	Thickness h <sub>F</sub> (μm)	Thickness h <sub>A</sub> (μm)
50	15	7.5	10

Table 3 Test Matrix

Run	Factor	Bending radius R(mm)	ε (%)	No. of Sample
1	1s On/Off	0.25mm	3.26	5
2		0.5mm	1.56	5
3		1mm	0.76	5

내었으며, 이를 Table 3에 나타내었다. 또한, 표에서 각 수준에서의 시험 시료는 5개이다.

굽힘수명은 conductor의 굽힘응력에 영향을 받으며, ε 은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\epsilon = \frac{h_c}{2R - H} \times 100\% \tag{1}$$

여기서,

ε = surface bending strain (%)

h<sub>c</sub> = conductor thickness

H = FPCB thickness

R = outer bending radius of FPCB

3.4 시험 장치 및 시험 방법

FPCB의 가속수명시험을 수행하기 위한 시험 장치를 Fig. 5에 나타내었다. 그림 (a)에서 시험 장치는 공기압축기, 전압측정기, 전자동 On/Off용 Jig로 구성되어 있다.<sup>(5)</sup>

FPCB에 충분한 개폐를 위하여 timer & counter

를 1초에 On, 1초에 Off동작을 하고 On/Off 1cycle마다 카운트 할 수 있도록 구성하였으며 다른 조건들은 일정하게 유지하도록 하였다.

그림 (b)에서  $\varepsilon$ 의 특성을 알아보기 위해 실온에서 테스트 장비를 가동시켰다. 시료들은 U자의 형태로 구부러졌으며, 한쪽 끝은 고정되어 있고, 나머지 끝은 움직이는 판에 고정되어 반복해서 위아래로 움직인다.

FPCB양단에 외부 리드선을 연결하여 전압측정기로 저항값을 측정할 수 있도록 하였고, 저항값의 변화를 통해 고장을 확인할 수 있었다. 고장 판정이 난 시료는 Jig에서 제거하였다.

### 3.5 시험결과

#### 3.5.1 시험의 관측 결과

가속수명시험에서 고장이 발생한 시료에 대하여 고장분석을 실시하였다. 그 결과 FPCB 양단의 저항이 무한대로 나타났으며 이를 통해 관측된 FPCB의 고장은 open인 것을 확인 할 수 있었다. FPCB의 open이 일어난 곳에서는 필름이 끊어지는 것을 확인 할 수 있었으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 또한, 각 곡률반경에 따른 5개 시료의 굽힘수명시험에 대한 고장횟수를 Table 4에 나타내었다. 곡률반경이 줄어들수록 더 빨리 고장이 발생함을 알 수 있다.

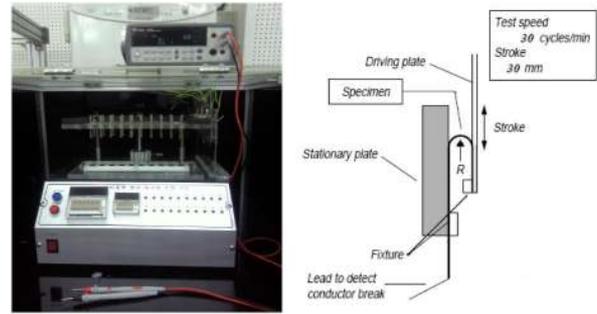
곡률반경에 따른 굽힘수명을 Fig. 7에 나타내었다. 수명은 곡률반경이 늘어날수록 증가함을 알 수 있었다. 굽힘수명과 굽힘응력 사이의 관계를 식 (1)로부터 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 굽힘응력이 감소함에 따라 굽힘수명은 늘어나는 것을 알 수 있었다.

#### 3.5.2 가속수명시험 모델

FPCB의 굽힘수명을 예측하기 위해 금속에서의 피로수명을 예측하는 방법인 코핀-맨슨 모델(Coffin-Manson's law)을 적용하고자 한다. 코핀과 맨슨은 Fig. 9에서 보이듯이, 실험적으로  $\log \varepsilon$  과  $\log N_f$ 사이의 관계가  $\log \varepsilon_p$ 와  $\log N_f$  사이의 선형적 합과  $\log \varepsilon_e$ 와  $\log N_f$  사이의 선형적 합으로서 표현됨을 증명하였다.<sup>(2)</sup>

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \tag{2}$$

여기서  $\varepsilon_e$ 와  $\varepsilon_p$ 는 각각 탄성응력(elastic strain)



(a) External form of Jig (b) Structure of Jig  
Fig. 5 Experimental Jig



Fig. 6 FPCB Failures

Table 4 Failure lifetime of FPCB [unit : cycles]

R(mm)	$\varepsilon_1$ (0.25)	$\varepsilon_2$ (0.5)	$\varepsilon_3$ (1)
#1	85,400	202,600	767,600
#2	95,100	184,000	775,800
#3	97,300	201,500	855,400
#4	84,900	201,100	802,300
#5	102,300	198,000	728,700

및 소성응력(plastic strain)이다.

$$\varepsilon_p = A_p \cdot N_f^{-\alpha}$$

$$\varepsilon_e = A_e \cdot N_f^{-\beta}$$

여기서,  $A_p, A_e, \alpha, \beta$ 는 실험적으로 얻을 수 있는 상수이다. 코핀-맨슨 모델은 구리와 알루미늄에 대해  $10^7$ 까지 굽힘 횟수에 유효하고 FPCB에서는  $10^8$ 까지 굽힘 횟수에 유효함이 증명되어 있다. 일반적으로 FPCB는 굽힘 횟수가 많은 제품들에서 쓰이기 때문에 굽힘 횟수가  $10^6$ 을 넘는다. 이에 탄성응력이 지배적이기 때문에 소성응력은 무시된다. 그 결과, 식 (2)는 근사적으로 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\varepsilon = A_e + N_f^{-\beta} \tag{3}$$

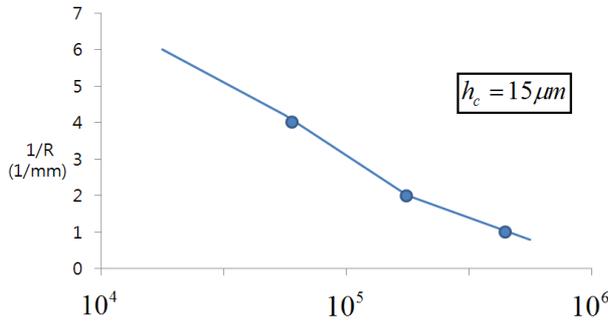


Fig. 7 Relation between bending radius and bending-fatigue lifetime( $N_f$ ) of FPCB

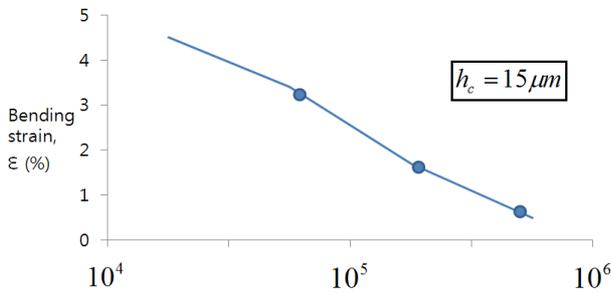


Fig. 8 Relation between bending strain and bending-fatigue lifetime( $N_f$ ) of FPCB

따라서, FPCB의 굽힘응력과 변수인 굽힘횟수에 대하여 코핀-맨슨 모델이 적합하며, 본 연구에서는 아래의 식 (4)와 같이 굽힘응력, 굽힘수명 사이의 관계식을 코핀-맨슨 모델로 적용하였다.

$$\epsilon = A \cdot N_f^{-n} \quad (4)$$

여기서, A 및 n은 재료 및 시험방법 등에 따라서 결정되는 상수이다.

### 3.5.3 수명-스트레스 관계

가속수명에서의 고장데이터를 분석한 결과, 식 (4)에서의 상수 추정치는 각각 다음과 같다.

$$A=4861.4, n=0.646$$

따라서, FPCB의 수명-스트레스 관계식은 식 (5)와 같으며, 굽힘수명식으로 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\epsilon = 4861.4 \cdot N_f^{-0.646} \quad (5)$$

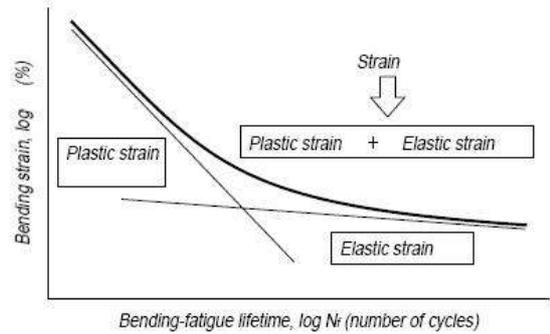


Fig. 9 Concept of bending-fatigue lifetime( $N_f$ ) based on Coffin-Manson's law

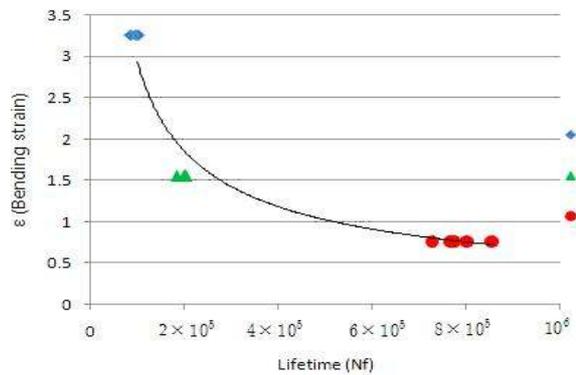


Fig. 10 lifetime estimation

$$N_f = 509,455.8 \cdot \epsilon^{-1.548} \quad (6)$$

### 3.6 시험결과의 해석

굽힘응력에 대한 굽힘수명분포를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 곡률반경 0.25mm( $\epsilon=3.26$ ), 0.5mm( $\epsilon=1.56$ ), 1.0mm( $\epsilon=0.76$ )에서 각각의 수명 횟수는 81,780번, 255,950번, 779,120번으로 추정할 수 있다. 또한, FPCB의 수명-스트레스 관계식 및 수명분포의 변화를 살펴보면,  $\epsilon$  값이 감소할수록 수명은 지수함수적인 형태로 감소하는 것을 알 수 있다. 아울러,  $\epsilon$  값이 3.26에서 1.56으로 50% 감소하였을 때, 수명횟수는 81,780번에서 255,950번으로 약 3.1배 증가했으며, 3.26에서 0.76으로 약 75% 감소하였을 때, 수명횟수는 81,780번에서 779,120번으로 9.5배 증가하였다. 이를 통하여 곡률반경이 FPCB의 수명에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

부가적으로, 본 연구대상 슬라이드형 휴대폰 FPCB에서 제시된 곡률반경 1.5mm(굽힘응력( $\epsilon=0.51\%$ ))에서 추정되는 수명 횟수는 1,444,700번으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 슬라이드 핸드폰용 FPCB에서 주로 발생하는 고장에 대한 가속수명 시험을 수행하였다. FPCB의 고장분석 결과 FPCB의 고장은 슬라이드의 반복적인 개폐에 따른 필름의 피로에 의한 open으로 확인되었고, 이러한 고장 메커니즘을 재현하기 위해 굽힘응력( $\varepsilon$ )을 가속인자로 선정하였다. 시험에서 얻은 데이터들에 대하여 분석한 결과 코핀-맨슨 모델(Coffin-Manson's law)이 수명식으로 적합함을 알 수 있었고, 이를 통해, 실사용 슬라이드형 휴대폰 FPCB의 수명을 예측할 수 있었다. 본 연구대상 슬라이드형 휴대폰 FPCB에서 제시된 곡률반경 1.5mm(굽힘응력( $\varepsilon=0.51\%$ ))에서 추정되는 수명 횟수는 1,444,700번으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) [http://www.dailian.co.kr/news/n\\_view.html?id=64601](http://www.dailian.co.kr/news/n_view.html?id=64601)
- (2) H. Yamanobe, M. Tagami, T. Komori and M. Ito, 2000, "Reliability of Flexible Flat Cables with Excellent Bending Property," *Hitachi Cable Review No.19*.
- (3) Luciano Arruda and Germano Freitas, "Effect of Surrounding Air on Board Level Drop Tests of Flexible Printed Circuit Boards," Nokia Technology Institute.
- (4) Coombs' Jr, Clyde F., Coombs' Printed Circuits Handbook, McGraw Hill (2001), pp.56.3-56.6
- (5) Lee, T. H., Chang, S. W. and Jhang, K. Y., 2004, "Reliability Evaluation for Hinges of Folder Devices Using ESPI," *International journal of Reliability and Applications*, Vol. 5 , Part 1, pp. 15-24