

## Sn 표면처리된 FR-4 재질 PCB에서의 이온마이그레이션 가속시험

황순미\* · 정용백\* · 김철희\* · 이관훈\*\*

전자부품연구원\* · 광운대학교\*\*

### Acceleration Test of Ion Migration in FR-4 PCB Plated with Sn

Soon-Mi Hwang\* · Young-baek Jung\* · Chul-hee Kim\* · Kwan-Hun Lee\*\*

Korea Electronic Technology Institute\* · Kwang Woon University\*\*

#### Abstract

Recently, as a electronic components are becoming more high-density, so that electronic circuits have smaller pitches between the leads and are more vulnerable to insulation failure. And the reliability of electric insulation has become an ever important issue as device contact pitches and print patterns shrink. Ion migration occurs in highly humid environment as voltage is applied to an installed print circuit. Under highly humid and voltage applied circumstances, electronic components respond to applied voltages by electrochemical ionization of metals, and a conducting filament forms between the anode and cathode across a nonmetallic medium. This leads to short-circuit failure of the electronic component.

In thesis, we study acceleration test of ion migration in FR-4 PCB plated with Sn. Voltage applied test of FR-4 PCB circuits plated with Sn was tested in the temperature and humidity environments. As a result of this test, equation of acceleration model was derived.

Keywords : Acceleration test, Ion migration, Ion migration in FR-4 PCB plated with Sn, PCB reliability test.

## 1. 서론

PCB가 흡습이나 결로 등 수분이 흡착한 상태에서 전계가 인가된 경우, PCB 회로 패턴의 한쪽 금속 전극으로부터 다른 쪽 금속전극으로 금속이온이 이동하여 쌓이게 되는데 이런 현상을 이온 마이그레이션(Ion-migration)이라고 한다. 이온 마이그레이션 현상은 PCB의 외부 표면, 내부 층간 계면 또는 페이퍼 페놀 적층판(Paper phenolic laminate)의 복합재료 등에서 관찰되며, 수지상의 성장은 양극에서 용해된 금속이온을 포함한 용액으로부터 전기분해(Electro deposition)에 의해 성장한다 (Rudra and Jennings(1994), 홍원식 외2(2005)). 이러한 이온 마이그레이션은 전자기기가 소형화 및 고밀도, 고집적화 됨에 따라 PCB의 절연특성을 저하시키고 이로 인한 고장을 발생시키는 주요한 요소이다 (Peixoto et al(1988), Yeung and Chan(1994)).

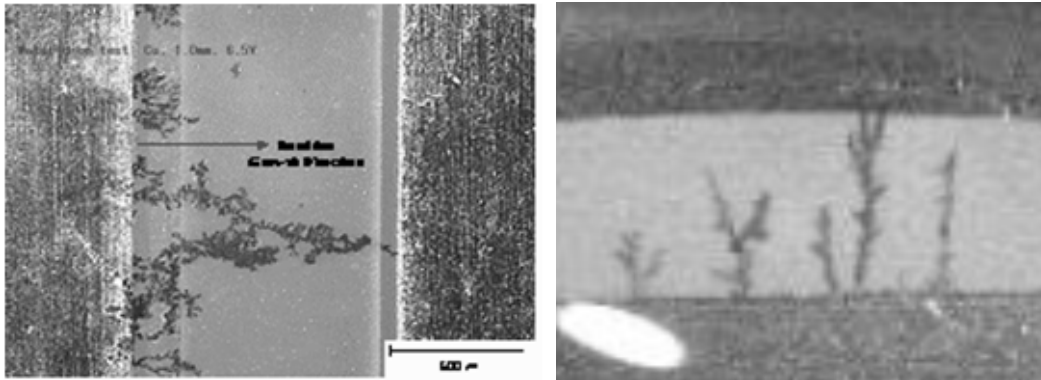
가속시험은 실 사용조건보다 가혹한 스트레스 조건(온도, 습도, 진동, 전압, 전류 등) 또는 사용률을 높여서 시험하여 빠른 시간 내에 설계 완성도를 평가하거나 수명을 평가하기 위한 시험이다. 제품 개발기간 단축에 따라 기존의 신뢰성평가 방식으로는 신뢰성 확보에 장시간의 기간이 소요됨에 따라 단기간에 제품 수명을 예측할 수 있는 가속시험법 개발이 절실히 요구된다 (김종걸과 송정무(2001)).

본 논문에서는 전자 회로 기판으로 널리 사용되고 있는 Sn도금 처리된 FR-4 PCB 재질 회로에서의 이온마이그레이션 가속시험을 실시하였고, 가속모델식을 도출하였다.

## 2. 가속시험 설계

### 2.1 이온 마이그레이션의 고장모드 및 고장 메커니즘

PCB 표면에 습기나 오염물질이 존재할 경우, 인가된 전압 하에서 양극쪽 전하가 이탈되어 음극 쪽으로 쌓이면서 음극에서 양극으로 이온 브리지가 형성된다. PCB 회로패턴의 재료가 SnPb 솔더 전도체인 경우 침상(Tree-like dendrite, tin coated needles)의 Pb가 형성되며, 바이어스(Bias)가 클 경우 양극과 음극 간에 브리지(Bridge)가 형성되어 결과적으로 전기적 단락을 야기 시킨다. 이러한 이온마이그레이션을 발생시키는 주요 고장 스트레스는 온도, 습도, 전압이며 주요 고장으로는 단선, 절연저항 변화 등이다. <그림 1>은 이온 마이그레이션 발생 모습이며 <표 1>, <표 2>는 각각 PCB에서 발생하는 주요 고장 스트레스와 고장 메커니즘과 고장 모드에 따른 시험방법이다.



<그림 1> 이온 마이그레이션 발생 사례 사진

<표 1> PCB의 주요 고장스트레스와 고장메커니즘

Failure Modes/Mechanisms	Open	Short	휨과 꼬임	절연저 항불량	뜬 랜드	부풀음 층간분리
Stresses & Performance						
o Thermal shock	◎		◎		◎	○
o Humidity		◎		◎		◎
o Temperature	○	○		◎	○	○
o Vibration	○					
o Voltage		◎		◎		

\* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통  
\* Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄

<표 2> PCB의 고장 모드에 따른 시험방법

Test Methods	열충격시험	항온항습시험	이온 마이그레이션 시험	진동시험
Failure Modes/Mechanisms				
o Open	◎			○
o Short		◎	◎	
o 휨과 꼬임	◎			
o 들뜬 랜드	◎			
o 층간분리, 부풀음	○	◎		
o 절연저항 불량		◎	◎	

\* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통  
\* Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄  
\* Test Methods는 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법을 나타냄

## 2.2 가속모델 선정[6-7]

전기화학적 이온 마이그레이션에 의한 절연저항 열화는 아레니우스 반응속도론을 기반으로 습도, 전압, 온도 이외의 스트레스의 영향도 고려한 아이링(Eyring)식을 가정한다. 이때 스트레스로 온도, 습도를 고려하면 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 여기에서  $\phi$ 은 온도 계수,  $b$ 는 습도 계수,  $A$ 는 재료 상수,  $T$ 는 절대온도,  $H$ 는 상대습도이다.

$$L(T,H) = Ae^{\frac{\phi}{T} + \frac{b}{H}} \quad (1)$$

식(1)로부터 가속계수(AF)를 도출하면 다음의 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$A_F = \frac{L_{field}}{L_{accelerated}} = \frac{Ae^{\frac{\phi}{T_f} + \frac{b}{H_f}}}{Ae^{\frac{\phi}{T_a} + \frac{b}{H_a}}} = e^{\phi(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_a}) + b(\frac{1}{H_f} - \frac{1}{H_a})} \quad (2)$$

기본적인 아이링 모델은 여러 스트레스 인자를 포함할 수 있게 된다. 식(1)에서 주요스트레스 인자를 온도, 습도에 전압을 추가할 경우 이온 마이그레이션에 의한 수명  $t_f$ 는 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 여기에서,  $A$ 는 scaling constant,  $E_a$ 는 활성화에너지,  $k$ 는 Boltzmann's constant ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K),  $T$ 는 온도,  $\alpha$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ 는 스트레스관련 상수,  $S_1$ ,  $S_2$ 는 습도, 전압 등의 스트레스관련 상수를 나타낸다.

$$t_f = AT^\alpha \exp\left\{\frac{E_a}{kT} + \left(B + \frac{C}{T}\right)S_1 + \left(D + \frac{E}{T}\right)S_2 + A\right\} \quad (3)$$

재료의 수명은 특성과파라미터의 열화가 되는 한계를 극복할 때 수명특성은 반응속도의 역수에 비례하게 되며, 수명은 다음 식 (4)과 같이 표현될 수 있다. 여기서  $L$ 은 고장시간,  $C$ 는 비례정수,  $E$ 는 활성화에너지,  $R$ 은 볼츠만 정수,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다.

$$L = C \exp(-E/RT) \cdot \exp(-f(R.H.)) \cdot V^{-1} \quad (4)$$

스트레스 시험과 실사용 조건에서 부여된 스트레스의 비율, 가속계수(AF)는 고장 시간의 비율이고, 실사용 조건하에서의 제품의 사용 시간 수  $L_{field}$ 에 해당하는 스트레스 시간은 다음 식 (5)과 같이 표현된다. 이 식으로부터 이온 마이그레이션에 대한 수명  $L$ 과 AF의 관계식은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$L_{lab} = \frac{L_{field}}{AF} \quad (5)$$

식(4)로부터 각각의 습도 및 온도에 의한 상수를 구하기 위해 실사용 조건과 시험조건을 동일하게 할 경우 다음과 같은 온도계수를 도출하는 식 (6)과 및 습도계수를 구하기 위한 식 (7)을 도출 할 수 있다.

$$K = \exp(f \cdot RH) \quad (6)$$

$$K = \exp\left(\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_{Field}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right) \quad (7)$$

### 2.3 가속시험 설계

이온 마이그레이션은 전자부품 내부 또는 부품 및 PCB의 전극 사이(음극, 양극)에서 수지 상정이 발생하여 회로의 단락을 유발하는 것으로써, 이러한 이온마이그레이션의 발생과 성장 속도는 습도, 온도, 전극 간격 사이에 작용하는 전기장 등과 같은 환경적 요소들에 의존한다.[8] 따라서 본 실험에서는 주요 스트레스 인자로써 표면처리 재료, 도체간격, 인가전압, 온도, 습도를 선정하였다. PCB 재질에 대한 영향을 조사하기 위해 FR-4재질을 선정하였고 표면처리 재료에 대한 이온 마이그레이션의 민감도를 조사하기 위해 Sn 표면처리를 선정하였다. 또한 고온고습조건에서 마이그레이션 발생을 촉진시키기 위해 인가전압은 150V로 높게 설정하였으며, 도체간격에 대한 영향을 조사하기 위해 회로 간격을 0.1mm, 0.318mm, 0.5mm의 3가지 조건을 선정하였다. <표 3>은 이온 마이그레이션 가속시험 조건이다.

<표 3> 이온 마이그레이션 가속시험 조건

PCB재질	FR-4		
표면처리	Sn		
인가전압	150 V		
도체간격	0.1mm	0.318mm	0.5mm
시험샘플수	30개	30개	30개
온도, 습도	60℃, 85%RH		
	85℃, 85%RH		
	95℃, 85%RH		
	85℃, 60%RH		
	85℃, 90%RH		

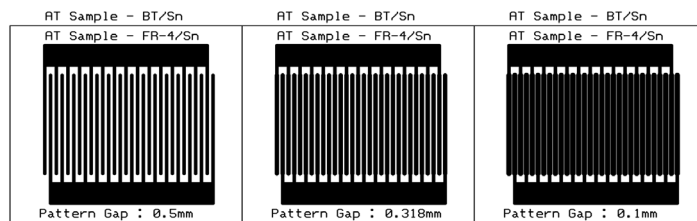
전기화학적 이온 마이그레이션 평가는 물방울시험방법, 향온향습법, DuPont사, Siemens사 시험 방법 등 여러 시험방법이 제안되고 있지만 가장 중요한 것은 제품의 사용 환경 조건에 적절히 맞아야 한다. 본 연구에서는 향온향습법에 의한 가속시험을 실시하였다. 향온향

습법에 의한 시험방법은 IPC-TM 650, Method 2.6.14에서 제안하는 시험방법으로 향온향습 시험기를 사용하여 민감도를 평가하는 방법이다. 이 시험은 높은 인가전압을 사용함으로 전압이 가속되는 조건이며, 물방울시험방법에 비해 장시간 시간이 소요되고, 향온향습에 의한 습도 인가는 PCB 표면의 실제 수분 층의 두께가 시험 중 변화 가능하고, 정의하기 곤란하므로 해석하기 어렵다는 한계가 있다. 하지만, 실제적으로 실험실에서 비교적 정확하고 안정적으로 마이그레이션 현상을 측정할 수 있기 때문에 본 연구에서는 향온향습법에 의한 시험법을 사용하였다. <표 4>는 IPC-TM 650, Method 2.6.14의 향온향습 시험 방법이다.

<표 4> IPC-TM 650, Method 2.6.14의 향온향습 시험 방법

항 목	내 용
시험목적	고분자 솔더 마스크에서 전기화학적 이온 마이그레이션에 대한 저항성 평가
시험조건	i) Class T - 85±2℃, 90%RH, 500h, 10V bias, limiting resistor(1mA) ii) Class H - 85℃, 85%RH, 168h
시 료	IPC B-25A PCB
평가기준	누설전류를 저항으로 변환하여 발생시간을 측정
평가방법	누설전류를 측정하여 평가하고, 육안검사로 필라멘트 성장을 검사하는 것으로 장시간 시험이 필요함

실험용 쿠폰은 JIS 및 IPC의 규격을 참고하여 빗살무늬(Comb Pattern) 형태로 제작되었다. 향온향습챔버를 사용하여 고온고습 환경을 설정하였으며 이온마이그레이션 측정시스템 SIR 장비(ETAC, 일본)를 사용하여 실시간 절연저항 변화를 측정하였다. 이온마이그레이션 발생 판정 기준은 JIS 3197에 따라서  $10^6\Omega$ 로 설정하였다. <그림 2>는 가속시험용 쿠폰 디자인 및 실제 제작 제품 모습이며 <그림 3>은 이온 마이그레이션 시험장비 및 시험모습이다.

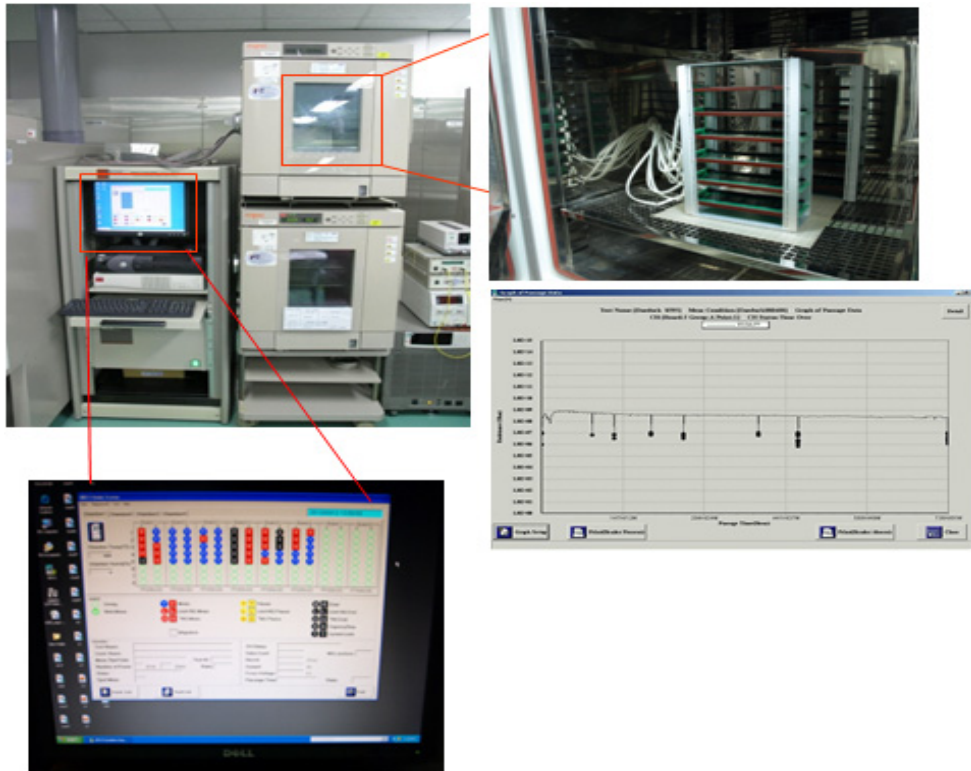


(a) 샘플도면



(b) FR-4 시험샘플

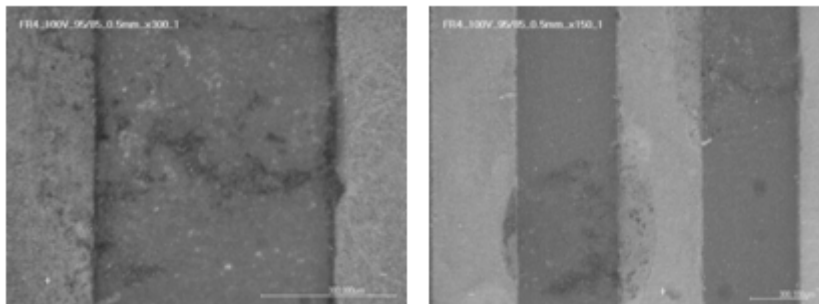
<그림 2> 가속시험용 쿠폰 디자인 및 제작 제품 모습



<그림 3> 이온 마이그레이션 실험장비 및 시험모습

### 3. 가속시험결과

항온항습시험 조건을 수행하는 동안 40msec 시간마다 도체 회로간 절연저항을 측정하였다. 절연저항이 고장 정의 기준 이하로 감소되는 경우를 이온 마이그레이션 발생시간으로 기록하였다. <그림 4>는 이온 마이그레이션이 발생한 샘플에 대한 고장분석 결과이며, 수지상적의 발생모습을 확인할 수 있었다.



<그림 4> 이온 마이그레이션 발생 모습

가속시험의 결과는 상용소프트웨어인 Weibull ++과 ALTA를 이용하여 분석하였다. Weibull

++을 사용하여 수명분포를 분석하고 ALTA를 사용하여 고장데이터의 고장분포에 대한 모델 적합성 검증을 하였다. 분석한 결과, 수명분포는 와이블 분포가 적합한 것으로 검증되었다. <표 5>는 최대우도법(Maximum Likelihood Method) 적합도 검증 결과이다. 온도조건 및 인가전압을 고정시키고 습도조건만 변화시켜 시험할 경우 시험결과에서 습도계수를 구할 수 있으며 그 결과는 <표 6>과 같다. 반대로, 습도조건 및 인가전압을 고정시키고 온도조건만 변화시켜 시험할 경우 시험결과에서 온도계수를 구할 수 있으며 그 결과는 <표 7>과 같다. <그림 5>, <그림 6>, <그림 7>은 각각 도체간격 0.1mm, 0.318mm, 0.5mm의 이온 마이그레이션 수명분포이다.

<표 5> 최대우도법(Maximum Likelihood Method) 적합도 검증

실험조건		와이블분포	대수정규분포	지수분포
FR4 150V 60°C 85%	0.10mm	-15.1674	-15.4312	-23.8896
	0.318mm	-17.4449	-17.7341	-18.0524
	0.5mm	-20.6093	-20.9891	-28.4825
FR4 150V 85°C 85%	0.10mm	-4.6337	-4.8645	-8.0361
	0.318mm	-6.4485	-6.5750	-11.2784
	0.5mm	-13.0129	-13.8680	-16.3269
FR4 150V 95°C 85%	0.10mm	-3.1153	-3.1216	-10.6133
	0.318mm	-0.1968	-0.5462	-7.5352
	0.5mm	-3.2843	-3.1603	-10.6133
FR4 150V 85°C 60%	0.10mm	-22.1903	-23.0397	-24.5245
	0.318mm	-16.9977	-17.3187	-26.4759
	0.5mm	-22.6437	-22.8461	-29.6241
FR4 150V 85°C 90%	0.10mm	-3.3666	-3.4198	-6.9414
	0.318mm	-0.1370	-0.6101	-6.1357
	0.5mm	-6.1049	-6.1360	-9.3923

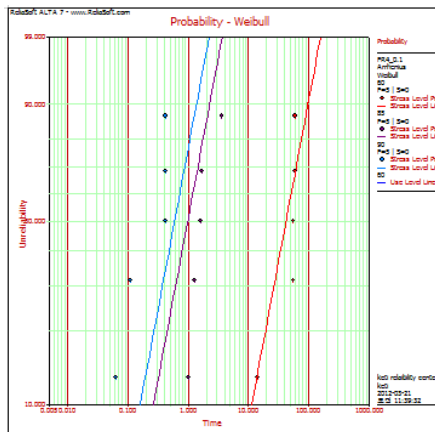
<표 6> FR-4재질 PCB의 습도계수

구 분		습도계수(f)	유효성검증(신뢰수준 90 %)	
			T	Chi-Square
FR4(0.1mm), 150V	f(60%/85%/90%)	0.0660	1.503379	4.605171
FR4(0.318mm), 150V	f(60%/85%/90%)	0.0560	3.497316	4.605171
FR4(0.5mm), 150V	f(60%/85%/90%)	0.0520	2.154878	4.605171

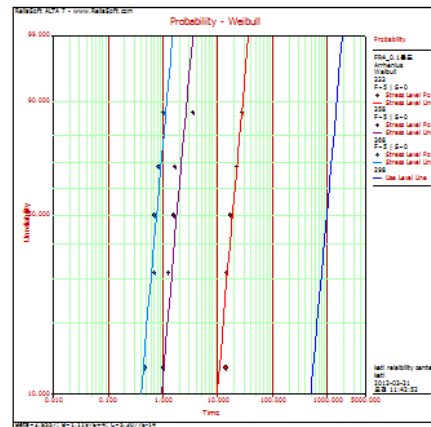
<표 7> FR-4재질 PCB의 온도계수



구 분		온도계수(Ea)	유효성검증(신뢰수준 90 %)	
			T	Chi-Square
FR4(0.1mm), 150V	Ea(60°C/85°C/95°C)	0.9649	3.055207	4.605171
FR4(0.318mm), 150V	Ea(60°C/85°C/95°C)	0.9949	2.119780	4.605171
FR4(0.5mm), 150V	Ea(60°C/85°C/95°C)	1.0290	4.176839	4.605171

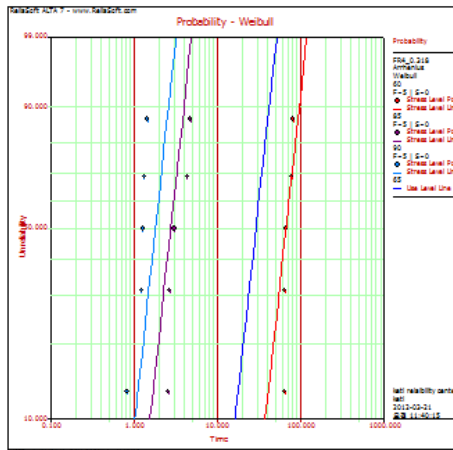


(a) 습도

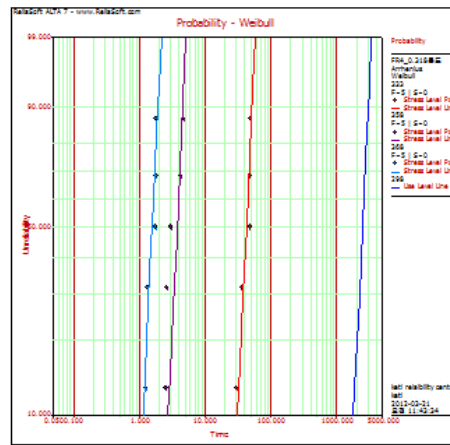


(b) 온도

<그림 5> 도체간격 0.1mm의 이온 마이그레이션 ALT

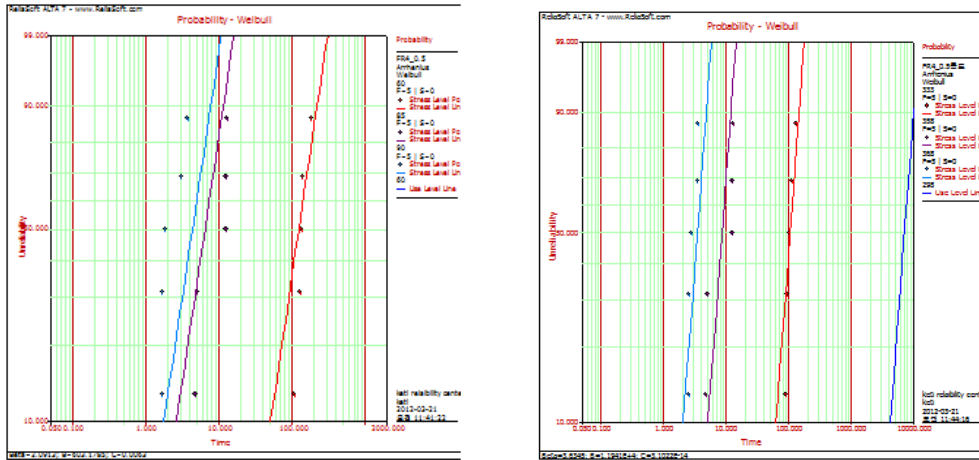


(a) 습도



(b) 온도

<그림 6> 도체간격 0.318mm의 이온 마이그레이션 ALT



(a) 습도

(b) 온도

<그림 7> 도체간격 0.5mm의 이온 마이그레이션 ALT

도출된 온도계수와 습도계수를 일반화된 아일링모델에 대입하여 수명모델을 유추할 수 있게 된다. 결국 아래의 이온 마이그레이션에 대한 가속수명 식에 각 시험조건으로부터 유도된 Ea, f 각각 대입하면 최종 가속수명 모델을 구하게 된다. 여기서 L은 고장시간, C 비례정수, Ea는 온도계수, f는 습도계수, R 볼츠만 정수 그리고 T는 절대온도, H는 상대습도를 나타낸다. <표 8>은 도출된 Sn으로 표면처리된 FR-4 재질 PCB의 이온 마이그레이션 가속모델이다.

$$L = C \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \cdot \exp(-f \times (R.H.)) \cdot V^{-1} \quad (8)$$

<표 8> Sn 표면처리된 FR-4재질 PCB의 이온 마이그레이션 가속모델

구 분		습도계수(f)	온도계수(Ea)
가속모델1	FR4(0.1mm), 150V	0.0660	0.9649
가속모델2	FR4(0.318mm), 150V	0.0560	0.9949
가속모델3	FR4(0.5mm), 150V	0.0520	1.0290

## 4. 결론

본 논문에서는 PCB에서 발생하는 주요 고장원인 중 하나인 이온 마이그레이션에 대한 가속모델을 도출하였다. 이를 위해, Sn 표면처리된 FR-4 재질 PCB에 온도-습도-전압인가 시험을 실시하였다. 각각의 실험 결과로부터 이온 마이그레이션 발생에 의한 고장을 확인하였으며, 수명분포를 도출하였다. 가속수명예측을 위해 아일링 모델을 적용하였으며, 이때 가속모델의 미지수 값인 온도계수( $E_a$ )와 습도계수( $f$ )를 각각 구하였다. 가속시험의 결과는 상용 소프트웨어인 Weibull ++과 ALTA를 이용하여 분석하였다.

본 논문 결과는 Sn 표면처리된 FR-4 재질의 PCB의 이온마이그레이션에 의한 고장 및 신뢰성평가를 위한 중요 자료로 활용이 가능할 것이다.

## 참고문헌

- [1] B. Rudra, D. Jennings (1994), "Failure-Mechanism for Conductive-Filament Formations", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, Issue 3, pp. 354-360.
- [2] 홍원식, 정승부, 김광배 (2005), "금속 이온 마이그레이션의 해석적 방법", 대한용접접합학회지, Vol. 23, Issue. 2, pp. 32-40.
- [3] C.A.O. Peixoto, L. Pargamin, G. Marrone, G. Carrara (1988), "Failure of Transmission Line Cap and Pin Insulators under DC Stresses", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Issue. 2, pp 777-782.
- [4] F. Yeung, Y. C. Chan (1994), "Electrical failure of multilayer ceramic capacitors caused by high temperature and high humidity environment", Proceedings of 44th Electronic Components and Technology Conference, pp. 847-853, 1-4 May.
- [5] 김종걸, 송정무 (2001), "고 신뢰성 확보를 위한 가속시험의 연구동향 분석", 대한안전경영과학회, pp. 419-432.
- [6] Meeker William Q., Escobar Luis A. (1998), "Statistical Method for reliability Data", John Wiley & Sons, New York.
- [7] Nelson, Wayne (1990), "Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans and Data Analyses", John Wiley & Sons, New York.
- [8] 이덕보, 김정현, 강수근, 장석원, 임재훈, 유동수 (2005), "PCB 전기적 신뢰성평가를 위한 이온 마이그레이션 가속시험", 한국동력기계공학회지, Vol. 9, Issue. 1, pp.64-69.