

☒ 연구논문

가속수명시험을 이용한 은도통홀 인쇄회로기판의 신뢰성연구

전영호 · 권이장

홍익대학교 산업공학과

Accelerated Life Test and Data Analysis
of the Silver Through Hole Printed Wiring Board

Young Ho Chun · Lee Jang Kwon

Dept. of Industrial Engineering, Hong Ik University

Abstract

This paper describes a highly accelerated life test (HALT, USPCBT) method for rapid qualification testing of STH PWB(Silver Through Hole Printed Wiring Boards). This method was carried out to be an alternative to the present time-consuming standard 1344 hours life testing(THB). The accelerated life test conditions were 121°C/95%R.H. at 50V bias and without bias. Their results are compared with those observed in the standard 1344 hours life test at 40°C /95%R.H. at 50V bias and without bias.

The studies were focused on the samples time-to-failure as well as the associated conduction and failure mechanisms. The abrupt drop of insulation resistance is due to the absorption of water vapour. And the continuous drop of insulation resistance is due to the Ag migration. The ratios of time-to-failure of HALT(USPCBT) to THB were 25 and 11 at 50V bias and without bias respectively.

1. 서론

인쇄회로기판의 신제품 개발에 있어 제품 시험제작과 함께 중요한 것이 신뢰성 평가이다. 설계한 대로 제조가 가능한 것인가, 설계에서 누락된 결함 또는 재료 및 제조상의 문제가 없는가를 판별하기 위해 열적, 전기적, 기계적 스트레스를 가함으로써 통상 사용되는 상태를 가속하여 시험을 행한다. 물론 신재료, 신기술, 신환경, 하중 등에 대처하기 위해 기존의 신뢰성 평가방법을 이용하는 한편 새로운 신뢰성 평가방법도 도입해야 한다. 왜냐하면 인쇄배선기판 제조업체들이 애로를 느끼고 있는 것은 새로운 조건에 적합한 신뢰성 보증방법과 신뢰성 시험의 합리적인 가속방법이기 때문이다 [7].

기존에는 인쇄회로기판을 납품하기 전에 일본의 공업규격인 JIS C0022 고온고습시험 방법(THB : 40°C×95%R.H)인 1,344시간의 장기 신뢰성시험을 행하여 신뢰성을 보증해 주었으나, 시간 및 많은 비용이 따르게 마련이다. 그래서 이에 대한 대안으로 빠른 시간내에 제품의 수명 즉 신뢰성에 대한 정보를 얻기 위하여 수명에 영향을 줄 수 있는 높은 정도의 스트레스를 가하는 가속수명 시험이 행하여진다. 즉 온도, 습도, 진압, 압력등을 이용하여 현재의 사용 조건보다 더 가혹한 조건으로 변화시켜 합리적인 가속수명방법을 도출하고자 한다.

본 시험에서는 종이 - 페놀재료를 사용한 양면 은도통홀(STH : Silver Through Hole) 인쇄회로기판의 신뢰성 시험으로 원판의 수지재료, 페이스트의 구성재료, 제조 공정, 품질관리 기술등의 진보에 의해 매년 향상되고 있다. 이와 같은 부품 자체의 신뢰성향상은 물론 제품 사이클의 단기화에 의한 시험 방법에도 종래의 고온고습 시험보다 단기간에 평가 가능한 합리적인 시험방법이 필요로 하게 되었다.

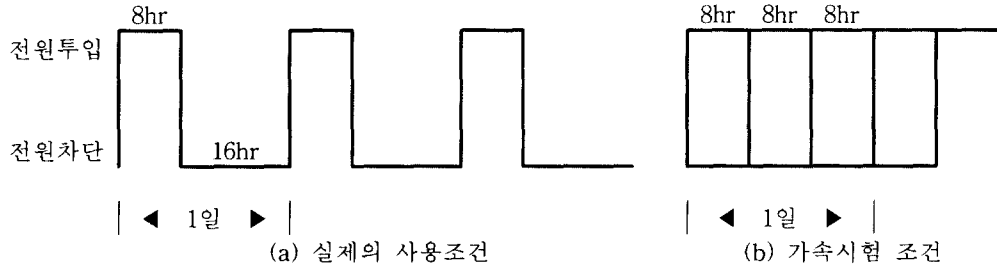
따라서 본 시험에서는 고온고습 시험에 대해 보다 가속시킬 수 있는 가압시험기를 이용한 프레스 쿠키시험(Pressure Cooker Test)을 시도하였다. 이때 고습으로 인한 시료 표면에 수분의 응결로 인한 변수를 줄이고, 실험의 재현성을 확보하기 위하여 일본 전자기계 공업회 규격인 ED-4701의 규격에 준하여 습도제어가 가능한 불포화형 가압시험기를 사용하였다.

2. 연구배경

2.1 시간 가속의 방법

<그림 1>에 표시한 바와 같이 실제의 사용환경에 있어서 1일 8시간 전원을 투입하는 제품, 즉 동작 시간의 가속으로서 1일 24시간 전원투입을 하면 3배의 가속이 된다.

전원의 ON - OFF를 고려하면 1일 1회의 ON - OFF가 된다. 이러한 영향을 평가하기 위해 이것을 1분에 1회씩 하게 되면 실제로 1,440배의 가속이 된다. 이와 같이 연속 동작으로 하든가, 간헐 동작의 회수를 증가시키는 것이 시간 가속의 방법이라 한다 [7].



< 그림 1 > 시간 가속의 방법

2.2 스트레스 가속의 방법

제품의 환경조건, 예를들면 온도나 습도를 상정한 고장 모드에 대해 가혹하게 하여 고장율을 높인다든지 수명을 단축하는 가속방법을 스트레스 가속이라고 말한다. 시간적으로 스트레스 레벨을 변화시키는 스텝 스트레스 시험도 이러한 종류의 가속방법이 된다. 제품의 시간과 스트레스의 관계는 여러 연구가 되고 있고 아레니우스나 아이링과 같은 대표적인 모델이나 경험식이 가속시험에 이용되고 있다[1, 7].

2.3 판정가속의 방법

제품의 열화 특성치의 고장 판정점을 실제보다 엄격하게 함으로써 단시간에 고장을 판정하는 가속조건을 판정가속의 방법이라고 한다. 가속계수는 시간함수으로써, 여기에서 주의해야 할 것은 스트레스를 엄격하게 하는 것에 의해 고장 메카니즘이 변화하지 않을 것, 고장시간 분포에 규칙성이 보장되는것이 필요하다. 이와 같은 것을 확인하는 방법에서는 와이블 해석 등이 이용되기도 한다[8]. 본 연구에서는 스트레스 가속의 방법을 동원하여 현장에서 빠른시간에 신뢰성의 결과를 획득하여 개발기간의 단축을 시도하였다.

3. 시험방법 및 측정

3.1 시편준비

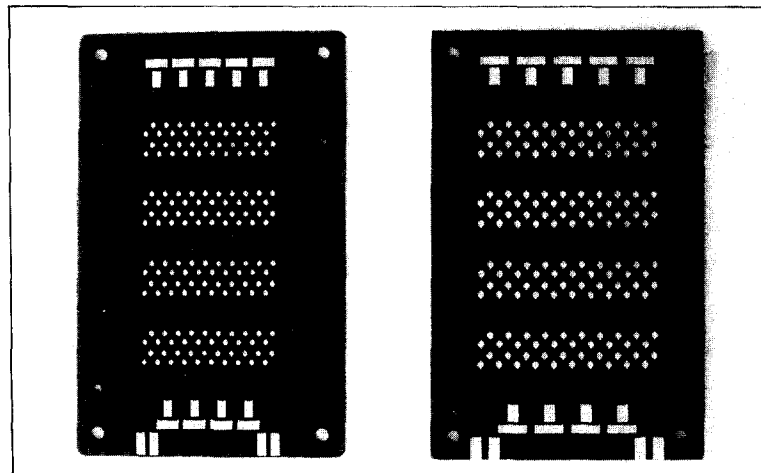
본 연구에서 시편의 재질은 현재 국내에서 은도통용 인쇄배선판으로 가장 많이 사용되는 S 업체의 1.6mm 두께의 동장 적층판을 사용하여, 연구시험용 시료를 준비하

였다. 시료의 수는 MIL 규격 MIL - STD - 690B(혹은 JIS C 5003)에 나와있는 신뢰수준이 60%인 M수준(고장을 1%/1000Hrs)에 따르는 샘플수를 산출하여 본 시험에 적용하였다.

$$n = \frac{T}{t} + C \quad (C : \text{허용고장수}, T : \text{누적단위 시험시간}, t : \text{시험시간})$$

$$n = \frac{0.202 \times 10^6}{1,344} + 1 = 151.3$$

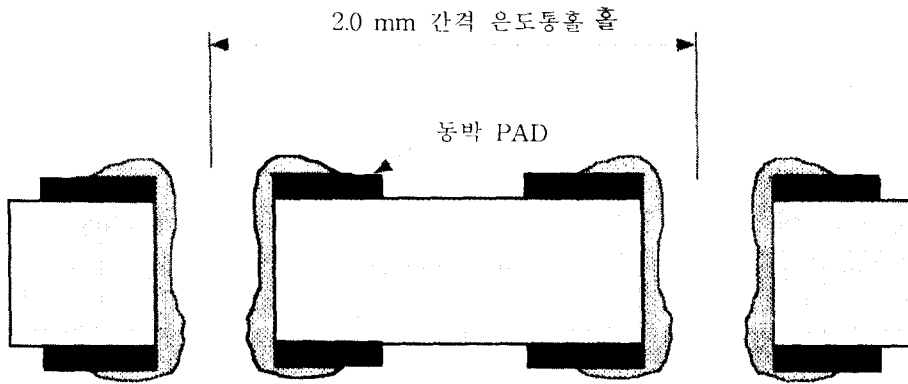
산출결과 샘플수(n)는 152개였다. 실험용 시료는 은도통 인쇄배선판의 제조공정과 동일한 방법으로 시편을 제작하였으며, 시험의 편의를 도모하기 위해 시편의 사양은 2.0mm 간격으로 200개홀로 구성된 <그림 2>, <그림 3>과 같은 최종 시험용 시료를 152개를 준비하였다[1]. 이때 직류전압 50V를 인가하기 위해 리드선을 사용하였으며, 특히 $Pb = Pb^{2+} + 2e$ (전위 -0.126), $Cu = Cu^{2+} + 2e$ (전위 -0.337)인 관계로 Pb 자체의 전도를 방지하기 위해 전극간 간격을 3mm 이상 유지하여 신뢰도를 높였다.



↑↑

절연저항 측정점(사각형 동박위)

< 그림 2 > TEST 시편 사진



< 그림 3 > TEST 시편 구조도

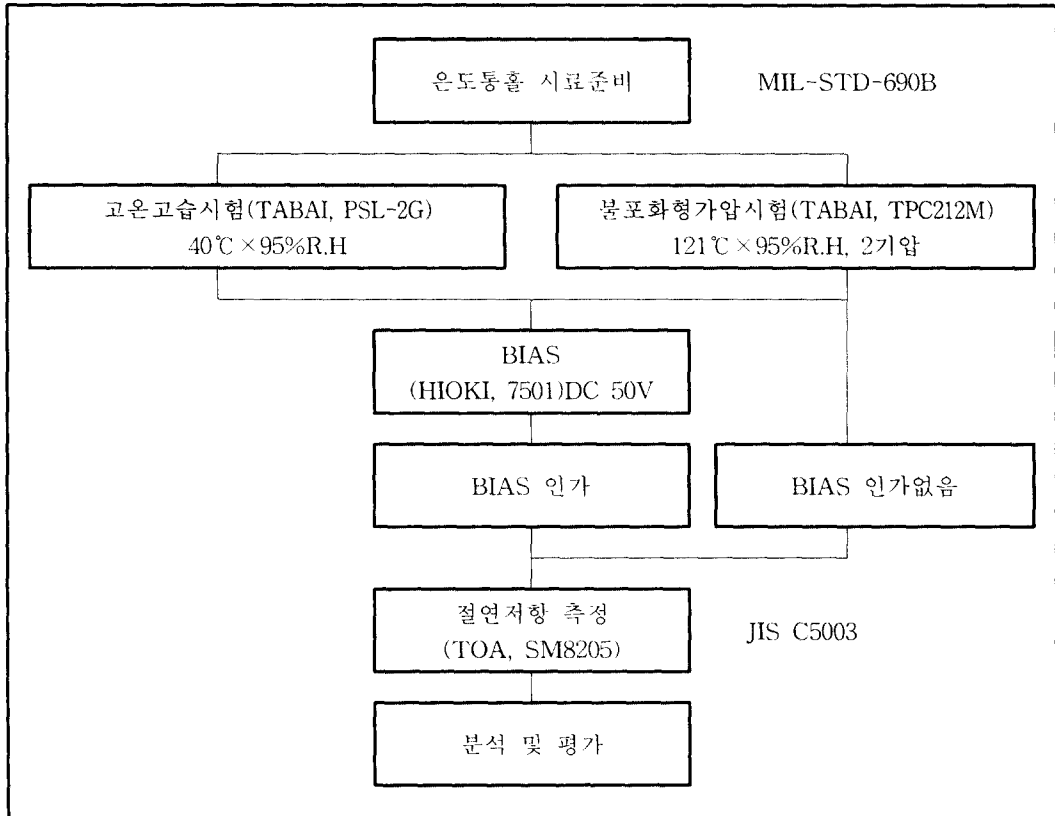
3.2 시험방법

신뢰성 항목중 은 마이그레이션을 좌우하는 요인으로는 온도·습도 및 인가전압을 들 수가 있다. 이러한 3가지 요인을 조절할 수 있는 실험장비로써 항온항습기는 TABAI사의 PSL-2G 기기를, 가압시험기는 용기내 설정된 프로펠러 팬으로 내부의 온습도 분포를 일정하게 하는 공조방식의 불포화형 PCT인 TABAI사 TPC-212M 기기를 사용하였다.[8] 본실험 조건으로서는 습도를 95%R.H로 일정하게 유지하고, 고온 고습시험방법과 불포화형 가압시험의 상관성을 검토하기 위해 불포화형 가압시험은 121℃, 95%R.H, 2기압으로 하고, 고온고습시험은 40℃, 95%R.H로 실험을 실시하였다.

여기서 불포화형 가압시험의 조건으로 121℃로 선택한 것은 온도와 습도에 의한 기압 설정을 2기압으로 가압하기 위한 것이고, UL 796 규격중 본 시험에 사용한 종이 페놀재질의 정격온도는 105℃이지만 실제 실험온도는 150℃로 되어 있기때문에 121℃ 조건이라면 종이 페놀 재료를 가속시키는데 고장 메카니즘이 변화하지 않는 충분한 온도라고 판단되었기 때문이다. 또한 BIAS 인가 여부에 따른 전압 의존성 효과 및 STH 절연저항 특성치 변화에 미치는 영향을 조사하기 위해 HIOKI사 7051기기를 이용하였으며, 절연저항은 JIS C 5003 규격에 준하여, 실험이 끝난 시편에 대하여 실험실조건 온도23℃, 습도 55%R.H에서, 시편 양극단에 DC-100V를 1분간 인가한후 절연저항을 TOA사 SM 8205 기기를 이용하여 측정한 후 분석 및 평가를 행하였다. 이상의 실험방법에 대한 흐름을 그림으로 그려보면 <그림 4>와 같다.

절연저항 측정법은 JIS C 5003 규격에 준하여 행하였으며, 일반적으로 인쇄회로기판에서의 고장이라 정의함은 신호를 전달하는 회로간에 신호간섭을 서로 유발하지 않는 부도체 영역인 절연저항 $1 \times 10^6 \Omega$ 을 경계로하여 그이하인 경우에는 고장모드로 분류하고 있다. 따라서 본실험에서의 불량판정 기준을 $1 \times 10^6 \Omega$ 이하로 규정하고 분석 및

평가를 하였다. 특히 절연저항 측정시 측정변수로서 중요한 것은 실내온·습도를 들 수 있다. 따라서 본실험에서는 항온 항습이 가능한 클린룸에서 측정을 행하였기 때문에 온·습도 및 외부의 이물질로 인하여 야기되는 실험오차를 최소화시켰다.



< 그림 4 > 실험공정 흐름도

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절연저항과 흡수율의 관계

JIS C6481 규격의 절연저항 및 흡수율 시험방법으로[12] 측정시 초기 절연저항은 $1 \times 10^{10} \Omega$ 이었으나, 점차적으로 <그림 5>, <그림 6>에서와 같이 급격하게 떨어지는 것은 은도통홀 인쇄회로기판용 동장적층판의 흡수율에 기인된 것이라고 생각되어진다. 수분은 동박이 없는 페놀부위로 쉽게 흡수되며, 이는 페놀에 수산기(OH)가 존재하기 때에 더욱 흡착이 용이해진다. 따라서 고온고습 및 불포화형 가압시험조건에서 시간 별 방치한후 무게증감비로서 계산한다. 즉 JIS C6481 규격으로 흡수율을 구했을 경우

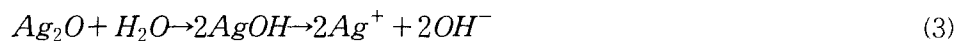
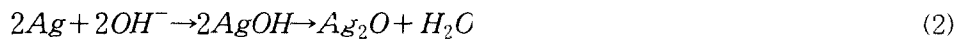
0.85% 수준이나, 고온고습시험 및 불포화형 가압시험과 동일한 실험조건으로 흡수율을 구한 결과는 <표 1>과 같다. <표 1>에서 알 수 있는 것은 고온고습시험 및 불포화형 가압시험 조건이 JIS C 6481규격보다 흡수가 쉽게 일어나며, 이러한 관계가 초기 절연저항을 급격히 감소시키는 원인으로 추정할 수 있다.

< 표 1 > 고온고습시험 및 불포화형 가압시험 조건에서 흡수율 측정자료

구분	시간 (Hrs)	고온고습시험 (40℃, 95%R.H)	불포화형 가압시험 (121℃, 95%R.H, 2기압)
1	24	1.32 %	2.93 %
2	48	1.86 %	3.10 %
3	72	2.40 %	3.85 %
4	96	2.95 %	4.44 %
5	120	3.02 %	5.07 %
6	240	3.53 %	5.72 %
7	504	3.86 %	5.78 %

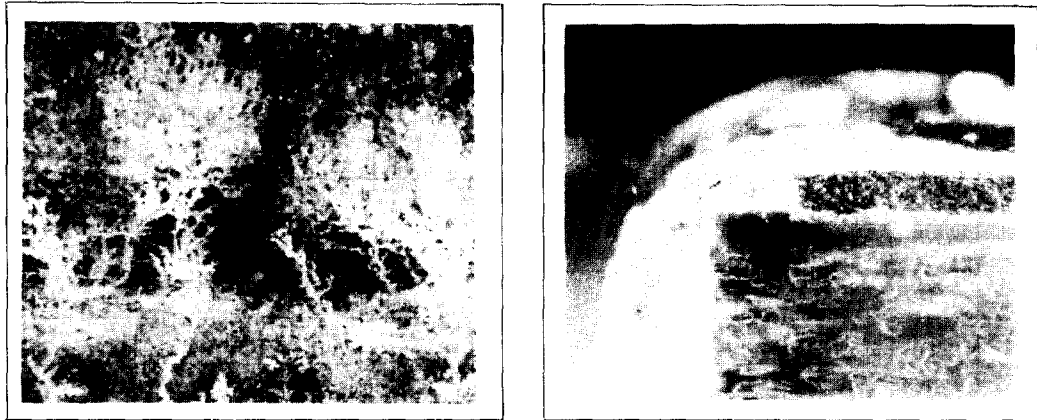
4.2 DC-50V, BIAS를 인가한 고온고습시험 및 불포화형 가압시험의 결과

불포화형 가압시험의 121℃, 95%R.H, 2기압조건에서 48시간 이전에는 흡수로 인한 절연저항이 급속히 감소하고, 그이후에는 감소폭이 다소 둔화됨을 <그림 6>에서 잘 알 수 있다. 또한 흡수로 인한 절연저항의 감소구간 이후에는 DC-50V, BIAS 인가전압에 의한 은전도현상이 시작되어 절연저항의 감소를 야기하는 것으로 판단된다. 은전도현상은 전기 화학반응에 의해, 양극에서 금속의 이온이 용해하면서 일어 난다고 볼수 있다[2, 3, 4, 5].



따라서 양극면에서는 산화반응이 일어나 Ag와 Ag₂O의 콜로이드 상태로 되고, 음극면에서는 양극에서 석출한 금속이온이 음극에 도달하여, 전자를 받아 수지상으로 환원석출하는 환원반응이 진행되는 것으로 생각되어지며, 이러한 현상을 도식적으로 <그림 7>에 나타내었다. 본실험에서도 수지상으로 성장하는 은전도현상을 관찰할 수 있었으며, 2.0mm 간격 은도통홀 양극간에 은이 전도하며, 전로를 형성, 절연저항이 불포화형

가압시험의 121℃, 95%R.H, 2기압조건에서는 90시간 후에 JIS C 6485규격의 $1 \times 10^6 \Omega$ 이하로 저하 된다고 생각되어진다[12].



(표면상태)

(내부상태)

< 그림 7 > 은전도 현상 상태

본 실험에서 고온고습시험의 조건인 40℃, 95%R.H인 경우 역시, 상기 내용과 동일한 현상을 나타내며, 불포화형 가압시험과는 달리 100시간 이후부터는 절연저항의 감소가 안정적으로 나타나고 있음을 <그림 7>에서 알 수 있다. 이는 은 전도 발생으로 미소전류가 흐르면서 자유전자의 진동으로 JOULE열이 발생하여, 흡수된 수분을 증발 시키기 때문인 것으로 생각되어진다. 즉 흡수는 은 전도를 촉진시키며, 이때 JOULE 열이 발생되어, 흡수된 수분의 증발 및 건조과정의 반복으로 절연저항이 다소 안정적으로 되나, 임계점을 지나면 SPARK 발생 및 탄화로 절연과괴에 도달하는 것으로 추정된다.

$$H = \frac{1}{J} I^2 R t = 0.24 I^2 R t \quad (4)$$

(J : JOULE열, H : 열량, I : 전류, R : 저항, t : 시간)

즉 (4)식에서와 같이 절연저항이 떨어져 전류가 흐르면, 전류의 제공에 비례하고, 저항 및 시간에 비례하는 것을 알 수 있다[8]. 불포화형 가압시험과 고온고습시험사이에는 물론 40℃와 121℃라는 온도 요인의 차가 있으며, 불포화형 가압시험의 기압이 고온고습시험보다 상대적으로 1기압 높기 때문에 압력에 의한 수분 증발 정도가 고온고습시험보다 억제된다고 볼 수 있다. 이로 인하여 수분증발 및 건조과정이 억제됨으

로, 온 전도 및 흡수의 영향으로 전류의 흐름이 증가하여, 고온고습시험보다 불포화형 가압시험이 더 절연저항을 더 감소시킨다고 볼 수 있다.

<그림 5>, <그림 6>에서 절연저항에 대한 방정식을 도출하기 위해 온도변수에 따른 Arrhenius Model을 적용하였다. 일반적으로 고온 가속수명시험에서의 고장 결과로부터 실제 사용온도에서의 수명추측에 Arrhenius Model이 사용되어진다. 즉 수명 분포가 지수함수일 경우 Arrhenius 모델로서 고장율을 계산한다.

$$\gamma = A \exp(-E_A/KT) \quad (5)$$

여기서 γ : 고장율 E_A : 활성화 에너지
 T : 절대온도(K) K : 볼츠만 상수
 A : 상수

평균수명이 고장율에 역비례한다고 가정하면 상기식은

$$LT = C \exp(E_A/KT) \quad (6)$$

여기서 LT : 평균수명 C : 상수

실제 사용 온도에서의 평균수명(LTR)과 가속온도에서의 평균수명(LTA)은

$$LTR = C \exp(E_A/KTR) \quad (7)$$

$$LTA = C \exp(E_A/KTA) \quad (8)$$

결과적으로 LTR/LTA은

$$LTR/LTA = \exp[E_A/K(1/TR - 1/TA)] \quad (9)$$

위식을 풀어서 쓰면

$$LTR = LTA \exp[E_A/K(1/TR - 1/TA)] \quad (10)$$

실제 사용조건에서의 평균수명(MLT)과, 수명 분포가 지수함수로 계산되어지면, 고장율 γ 는

$$\gamma = (1/MLT) = (1/LTR) \quad (11)$$

가속수명시험에서의 가속계수(ALTf)는

$$ALTF = LTR / LTA \quad (12)$$

식 (7)과 (8)를 식 (12)에 대입하면

$$ALTF = \exp[EA/K(1/TR - 1/TA)] \quad (13)$$

로된다. 가속수명 시험 분석시 시험 스트레스 범위내에서 고장메카니즘이 변하지 않는다고 가정하였다. 이러한 가정하에서 시간대별로 측정된 각152개씩의 데이터를 이용한 그래프에서, 즉, 식(5)~식(13)에 적용하여 구한 가속계수를 최소제곱법으로 구한 식(14, 15)을 얻었다. 고온고습시험의 40℃, 95%R.H조건에 DC-50V, BIAS를 인가한 경우 (14)식, 불포화형 가압시험조건인 121℃, 95%R.H, 2 기압에 DC-50V, BIAS를 인가한 경우 (15)식을 도출하여 나타내었다.

$$y=10617736e^{(-t+189.8)/887.1} \quad (14)$$

$$y=795431269e^{(-t+7.31)/12.35} \quad (15)$$

(14), (15) 식을 이용하여 고장판정기준인 절연저항이 $1 \times 10^6 \Omega$ 이하까지 도달하는데 걸리는 시간을 추정하여 계산하면, 고온고습시험은 2,285시간, 불포화형 가압시험은 90시간임을 알 수가 있다.

< 표 2 > 고장판정시간 (BIAS 인가시)

구분	시험종류	고장까지 도달하는 시간
1	고온고습시험	2,285 시간
2	불포화형 가압시험	90 시간

즉 고온고습시험은 DC-50V, BIAS 조건에서 고장판정 평균시간까지는 2,285시간인데 반하여, 불포화형 가압시험은 90시간으로 약 25배의 가속효과가 있음을 알 수 있다. 즉 간단히 요약하면, DC-50V, BIAS를 인가한 경우, 온도 및 기압의 요인에 의해 기존의 고온고습시험의 1,344시간 실험을 실온에서 제품을 10년간 사용한 조건과 동일하다고 가정하면 불포화형 가압시험은 약 54시간 시험으로 제품의 수명을 10년 사용한 것과 동일한 효과를 나타낸다고 볼 수 있다.

< 표 3 > 고온고습시험과 불포화형 가압시험의 가속계수[6]

구분	시험종류	실온사용 10년 조건	BIAS 인가시 가속계수
1	고온고습시험	1,344 시간	25배
2	불포화형 가압시험	54 시간	

4.3 인가전압이 없는 경우

불포화형 가압시험은 121℃, 95%R.H, 2기압조건에서 8시간후의 절연저항은 $3.4 \times 10^8 \Omega$ 이며, 이에 비하여 고온고습시험은 40℃, 95%R.H에서 100시간후의 절연저항이 $2.1 \times 10^8 \Omega$ 으로 10배 이상의 가속이 되는 것을 알 수 있다.

<그림 5>, <그림 6>에서 절연저항에 대한 그래프에서 최소제곱법으로 구한 방정식을 산출한 결과, 고온고습시험의 40℃, 95%R.H, BIAS가 없는 조건은 (16)식에, 불포화형 가압시험의 121℃, 95%R.H, 2기압, BIAS가 없는 조건은 (17)식에 각각 나타내었다.

$$y = 188377166e^{\left(\frac{-t+145.861}{421.028}\right)} \quad (16)$$

$$y = 302982341e^{\left(\frac{-t+9.14}{37.07}\right)} \quad (17)$$

(16), (17)식을 이용하여, 고장판정기준인 절연저항이 $1 \times 10^6 \Omega$ 까지 도달하는데 걸리는 시간을 각각 계산해 보면, 고온고습시험은 2,351시간, 불포화형 가압시험은 221시간이 소요됨을 알 수 있다. 이는 흡수에 의한 절연열화와 온도 및 압력에 의한 차이로 고온고습시험의 고장판정 평균시간에 도달하는 시간과 불포화형 가압시험을 비교해 보면 11배의 가속이 됨을 알 수 있다. 이는 실온에서 제품을 10년간 사용한 조건과 동일하다고 가정한 고온고습시험에서 1,344시간을 기준으로 할때, 불포화형 가압시험에서 약 122시간 TEST로 신뢰성을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 실험시간을 1,222시간을 단축할 수 있다는 의미이기도 하다.

< 표 4 > 고장판정 기준시간 (BIAS가 없는경우)

구분	구 분	고장까지 도달하는 시간
1	고온고습시험	2,351 시간
2	불포화형 가압시험	221 시간

< 표 5 > 고온고습시험과 불포화형 가압시험의 가속계수 [6]

구분	시험종류	실온사용 10년 조건	BIAS가 없는 경우 가속계수
1	고온고습시험	1,344시간	11배
2	불포화형 가압시험	122시간	

4.4 고온고습시험과 불포화형 가압시험의 상관성 및 전압의존성

첫째, 불포화형 가압시험의 121℃조건은 UL 796 인장강도 시험조건인 최고온도 130℃에 대한 실제 실험온도인 154℃보다 낮은온도로써, 재질의 열화발생이 없는 조건이라 할 수 있다.

둘째, 고온고습시험에 대한, 불포화형 가압시험의 DC-50V, BIAS유무에 따라서 전압의존성이 10배이상으로 크게 나타났으며, 동일 조건에서는 전압의존성이 낮게 나타났다.

셋째, BIAS가 없는 경우, 고온고습시험보다 불포화형 가압시험이 1,222시간, DC-50V, BIAS 인가한 경우 1,290시간의 실험시간을 단축할 수 있었다. 이는 실온에서 제품을 10년간 사용한 조건과 동일하다고 가정한 고온고습시험 1,344시간을 기준으로 할때, DC-50V, BIAS 조건에서 불포화형 가압시험에서는 약 54시간, BIAS가 없는 조건에서는 122시간 시험만으로 신뢰성을 충분히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 실험결과 고온고습시험 및 불포화형 가압시험의 상관관계와 전압인가 여부에 따른 효과에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초기 절연저항의 급속한 감소는 온도통홀용 동장적층판의 흡수에 의해 기인하여 발생된 것으로 판단된다.
2. 인가전압이 직류 50V일경우 양극(+) 근처에서 전위-평형도에 있어, 급속의 이온화로 은입자의 마이그레이션 촉진 및 열화로 인한 절연저항이 상대적으로 저하된 것으로 사료된다.

3. 기존의 고온고습 시험조건인 40℃, 95%R.H보다 불포화형 가압시험 조건인 121℃, 95%R.H, 2기압의 조건에서 더욱 가속됨을 알 수 있었다. 즉 전압을 직류 50V를 인가한 경우에는 25배, 인가하지 않은 경우에도 11배의 가속효과를 나타내었다.
4. 1,344시간동안의 고온고습시험은 실제품을 상온에서 10년간 사용한 환경과 동일하다고 볼 때, 불포화형 가압시험조건에서 전압을 인가한 경우 54시간과 일치함으로 1,290시간을, 전압을 인가하지 않은 경우는 122시간과 같은 효과이므로, 1,222시간을 각각 절약할 수 있는 실험결과를 도출하였다.

향후 연구 진행방향은 본실험의 결과를 토대로 하여, 불포화형 가압시험에서 온도에 대한 가속 계수를 구하여, 현재보다 더빠른 시간안에 인쇄회로기판의 신뢰성을 보증하고, 나아가 고객의 요구에 부응할 수 있는 납기단축 실현 및 기술 변화에 대처하는 실험을 진행하고자 한다.

참고문헌

- [1] B.A. Kaplan., J.P. Mitchell(1986), "Use of Technology Test Vehicles for Accelerated Life Testing of Printed Circuit Products," *Electronics Packing Conf.*, pp. 745-756, 882.
- [2] Dimitri Kececioglu. D, Julie A. Jacks(1984), "The Arrhenius Eyring, Inverse Power Law Combination Models in Accelerated Life Testing," *Reliab. Eng.(GB)*, vol. 8, No. 1, pp. 1-9.
- [3] G.T. Kohman et al.(1995), "Silver Migration in Electrical Insulation," *Bell System Tech. J.*, vol. 34, pp. 299.
- [4] Rh. Dumoulin et al.(1982), "Metal Migration Outside the Package During Accelerated Life Tests," *32nd IEEE Electron Component Conf.*, pp. 229.
- [5] T. Kawanobe, K. Otsuka(1982), "Metal Migration in Electronic Component," *32nd IEEE Electron Component Conf.*, pp. 220-228.
- [6] Wayne Nelson(1990), "*Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*," John Wiley & Sons, New York.
- [7] 高久清外 4人(1992), *デバイス・部品の 信頼性試験*, 日科技連出版社.
- [8] 高久清外 2人(1992), *デバイス・部品の 故障解析*, 日科技連出版社.
- [9] 植草源三(1991), *機器・部品の 壽命と超加速試験法*, 日刊工業新聞社.
- [10] JIS 핸드북(1995), *高溫高濕試驗 JIS C 0022*.
- [11] JIS 핸드북(1974), *電子部品の故障率試驗方法通則 JIS C 5003*.
- [12] JIS 핸드북(1990), *PRINT 配線板專用 銅張積層板 試驗方法 JIS C 6481, C 6485*.