

환경물질을 제외한 전자부품의 신뢰성평가 방법 연구 - Reliability Assessment Methods for Electronic Component Removed Environmental Materials -

이종범 *

Jong-Boem Lee

조재립 **

Jai-Rip Cho

Abstract

Recently, all kind of 21C-typed electronic goods show the tendency of hightechnology and digital convergence rapidly. Also, failure mechanism which differs from original goods concept presents.

Today, failure mechanism which differs from one that was happened by restricted harmful environment material before adapted the raw of environment material is changing the paradigm of reliability engineering.

Thus, when applied the environment matter of original and secondary material at the electronic goods were removed, reliability assessment method and prediction stay into low level.

This study suggests as solution to overcome these phenomenon. The study on the management method of environmental restriction substances which is recognized as important element in the reliability assessment about environment material of electronic goods and the study on reliability assessment method of PWB without environment material are progressed.

Keywords : 환경물질, ALT, FMEA, FMECA, HALT

* 한국표준협회 신뢰성기술경영센터 수석전문위원

** 경희대학교 테크노공학대학

1. 서 론

본 연구를 진행하게 된 배경은 환경과 신뢰성 문제의 중첩된 영역의 대안을 강구하지 못한 결과, 환경물질의 제조단계 신뢰성 문제와 더불어 사용단계 신뢰성 영역의 문제점을 구분하여 관리할 수 있는 대체수단의 개발 및 운용 체계 미비가 현실적인 환경문제를 유발시켜 왔다는 것이다.

본 연구와 깊은 연관을 가지는 위험물질 사용금지지침의 주요내용을 살펴보면 2006년 7월 1일부터 EU시장에 판매되는 전기 및 전자제품에서 1)납, 2)수은, 3)카드뮴, 4)6가 크롬, 5)폴리브로미네이티드 비페닐(PBB), 6)폴리브로미네이티드 디페닐 에테르(PBDE)등의 6개 주요 규제대상 물질의 적용이 금지되고 있다. (Official Journal of the European Union.(2003. 2. 13)[21])

환경물질에 대한 세계 각국의 규제현황을 분석한 결과 첫째, 유럽의 경우는 전자, 전기기기의 폐기에 관한 EU지령에 의한 유해물질사용제한(Restriction on the use of Certain Hazardous Substances; RoHS)과 생산자 폐전기, 전자제품회수, 재생의무(Waste Electric and Electronic Equipment; WEEE)에 의한 유해 화학 물질의 사용을 규제(2006년 7월 1일~)한다. 규제되는 환경물질은 납, 수은, 카드뮴, 6가 크롬, 할로겐 난연제(PBB, PBDE)이며, 해당되는 적용제품은 대형가전, 소형가전, IT, 통신기기, 일반 민생기기, 조명, 전동공구, 완구, 레저기기, 의료기기, 모니터 기기, 자동판매기가 주요대상이다.

둘째, EU의 환경물질규제 대상에서 제외시키는 제품의 범위는 고온솔더, 브라운관, 형광등의 납이나 수은, 전자부품의 납유리, 압전부품, 전화교환기 등으로 환경물질 규제대상에서 제외 되고 있다.

셋째, 미국의 경우는 연방법과 함께 각 주별로 환경법이 있으며 전기·전자제품에 대한 환경규제 조치로 오존층 파괴물질규제, 에너지효율규제, 제조와 도장 및 포장에서의 유해물질 사용규제, 전자파규제 등이 있고, 캘리포니아의 경우는 EU의 RoHS와 동일한 환경물질 규제를 시행(2007년~)한다.

넷째, 일본의 경우는 행정부가 “순환형 사회 형성추진 기본법”을 마련하여 순환형 사회형성과 관련된 시책을 종합적으로 추진하여 국민건강과 문화적 생활 확보를 목적으로 환경물질에 대한 규제정책을 진행하고 있으며, 폐기물 발생 억제에 정책 우선순위를 두고 있고 각종 폐기물 배출량 감량화, 재활용 확대 및 불법거래방지를 목표로 포장용기, 가전리싸이클법, PC 리싸이클법 등 관련법 시행과 함께 업계에 폐제품의 회수, 처리의무를 부과하는 등 폐기물 처리대책을 대폭 강화하고 있다.

다섯째, 중국의 경우는 최근 전자정보제품 생산관련 오염방지 및 처리규정(Regulations for Prevention and Cure of Pollution from Electronic Information Product Production)이 수립되어 2003년 7월 1일 법규를 제정하였으며, 법제화를 추진하여 『전자정보제품 생산오염방지법』을 제도화 하고 있다. 소관부서는 국무원 신식산업부(國務院 信息産業部)이며, 이법에 의한 규제 및 사용을 금지(2006년~)하고있다. 규제대상물질은 Pb, Cd, Hg, Cr+6, PBB, PBDE등 EU의 RoHS에서 부가된 규제내역과 동일하다.

또한 전자정보제품(電子情報製品)에 안전 사용기한(安全使用期限)의 명기를 요구할 것이며, 전자정보제품(電子情報製品)에 유독유해물질(有毒有害物質)의 명시 및 함량표시, 회수-재이용-불가 마크를 명기하도록 강제하고 있다. 제조사는 폐전자제품 회수처리비용을 부담하여야 한다.(國定企業에 회수, Recycle, 처리의뢰)

환경물질 분류에 따른 기업의 해당분야별 신뢰성기술의 적용은 다양한 형태로 나타나고 있다. 현재 전기 및 전자산업에서 가장 핵심적인 사안으로 대두되는 무연 soldering에 관한 사례를 본다면, 선진국에 해당되는 일본과 미국의 무연(lead-free)부품 개발형태에서 이미 1997년을 전후해서 고온 soldering이 가능하고 저온(여기서 저온은 solder의 용점 180도~190도 수준을 의미함)에서도 부품의 조립이 가능한 부품 개발이 이루어졌으며, 대표적으로는 미국의 코일크라프트(coilcraft)사라고 할 수 있겠다. 이 회사는 현재 자사생산 제품의 상당부분을 인터넷으로 마케팅하는 과정에서 RoHS COMPLIANT라는 캠페인을 통하여 유럽 지역의 환경물질 규제에 능동적으로 대처하고 있다. 일본의 경우도 교세라(Kyocera)와 무라다(Murata)등의 부품회사들은 이미 오래전부터 세라믹 소재를 이용한 친환경부품 및 원가절감형 부품의 생산을 하고 있으며, 최근 들어 이러한 추이가 가속화 되고 있는 상황에 있다.

국내 부품업체의 경우는 2002년을 기점으로 환경물질 규제에 대응하려는 움직임이 있었으나, 소극적인 활동으로 인하여 무연(lead-free) 부품의 생산체제로 전환하는데 상당한 문제가 발생되고 있는 실정이다. 무연solder 뿐만이 아니라 육가크롬 제거부품의 신뢰성기술과 “폴리비페닐 및 폴리디페닐에텔”이 제거된 부품의 생산을 위한 신뢰성기술의 국내기업의 적용현황은 대기업 중심으로 적용되고 있는 상황이다.

따라서 전자부품 및 ASS'Y의 환경규제물질을 제거한 상태에서 신뢰성을 어떻게 확보할 것인가에 대한 연구가 더욱더 필요하며, 무연(lead-free) 솔더의 현업적용 상황을 신뢰성기술 측면에서 조사한 결과 다음과 같이 조성 비율별로 다른 특성을 보이고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

Sn96.5/Ag3.5의 경우 솔더링(soldering) 온도가 221℃이며, 현재 적용하고 있는 기업군은 FORD, MOTOROLA, TI JAPAN등의 제조공정에서 사용하고 있는 것으로 알려져 있다.

Sn99.3/Cu0.7의 경우 솔더링(soldering) 온도가 227℃이며, 현재 적용하고 있는 기업군은 NORTEL 및 통신회사들이 적용하고 있으나, 신뢰성에 다소 문제가 예상된다.

Sn/Ag/Cu의 경우 솔더링(soldering)온도 217℃에서 솔더링을 원하고 있으나, 성분조성 비율에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 더 많은 실험과 연구가 요구되고 있으며 성분조성 비율에 따른 특성은 다음과 같다.(Ning-Cheng Lee,(1999)[20])

- Sn93.6/Ag4.7/Cu1.7(216℃~218℃, AMES)
- Sn95/Ag4.0/Cu1(217℃~219℃, AMES)
- Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5(Harris Brazing Co.)
- Sn95.5/Ag4.0/Cu0.5(217℃~219℃)
- Sn95.5/Ag3.8/Cu0.7(217℃~219℃)
- Sn96.3/Ag3.2/Cu0.5(217℃~218℃)

따라서 전기·전자 업계에 있어서 Soldering 공정중에 적용되는 Pb(납)를 제거한 무연soldering 이후의 신뢰성 평가를 위한 시험 및 평가모델 연구가 절실히 필요한 실정이다. 특히 PWB에서 환경규제물질이 제거된 상태에서의 전자 및 전기제품이 어떤 스트레스 조건에서 가장 취약한가를 분류하고 각종 스트레스에 반응하는 제품의 특성을 FMEA(failure mode and effect analysis; 잠재고장형태에 대한 영향분석) 혹은 FMECA(failure mode and effects critical analysis; 잠재고장형태에 대한 영향의 치명도 분석)방법을 통하여 분석한 다음 신뢰성평가를 위한 모델링과 환경물질에 대한 신뢰성시험의 적용 가능성과 분석결과를 제시한다.

신뢰성평가방법 연구에서는 가속수명시험에 의한 수명예측 방법론과 PWB에서 환경물질을 제거한 이후의 제품특성 및 수명유지 여부를 검증하고 확인할 수 있는 방법론을 가속모델식의 응용과 초가속시험을 통하여 실행할 수 있는 가능성을 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 환경물질 신뢰성 평가의 이론적 고찰

선진국의 환경물질 관리 형태는 이미 신뢰성기술의 현장적용으로 광범위 하게 적용 영역을 넓혀가고 있으며, 점진적으로 첨단화 대량화 되고 있는 환경물질의 합리적인 분류체계를 통하여, 효율적인 환경개선으로 연결되고 있는 것이 현실이다. 즉, 제품은 고부가 가치 있게 생산하고 관련된 부품 역시 친환경적인 부품의 개발을 촉진 시키되 제조 및 사용측면에서 고 신뢰성 제품의 생산을 장려하여, 제품의 LIFE CYCLE을 최대화함으로써 사용 후 환경오염에 대한 제 2차 혹은 제3차 오염을 차단하고 있는 것이 선진국 환경정책 및 제품 품질에 대한 전략적인 접근 방법론이다.

그러므로, 기존의 환경부 중심의 환경정책 개념에서 전(全)방위적인 개념의 환경물질 관리 체계로 시급히 전환해야 할 시점에 있으며, 공업기반의 근간이 되는 기초과학 분야 및 공업의 골격에 해당되는 중공업 및 첨단 분야 까지 모든 분야가 환경물질의 관리체계를 시스템적으로 재구축하여야 할 상황이다.

근래에 들어서 환경부 중심으로 토지피복지도를 구성하고 연구하려는 움직임이 본격화 되고 있으나, 공업기반사회의 속성으로 볼 때 환경물질의 신뢰성 확보는 토지를 비롯한 공기, 수질, 인체영향, 전자과등의 다양한 영역에서 평가되고 근본적인 대책이 수립되어야 하므로 기존의 환경부 일변도의 제한된 환경물질 관리 체계로는 한계가 있으며, 그 실효성도 대단히 한정적일 수밖에 없다는 것이다.

소관부처에서 화학물질 관련법을 통하여 관리를 하고 있으나, 어디까지나 이것은 특정물질에 제한적인 법적인 조치일 뿐이며, 적극적인 환경물질 관리 측면의 관리체계가 아니라는 한계가 있다.

환경물질은 신뢰성평가를 통하여 수명과 가용성과 보전성 및 안전성이 확보되어야 하며, 적합한 신뢰성 평가를 기반으로 하여, 문제의 본질을 개선해나가야 하며, 근본적인 대책을 수립하고, 개선해 나갈 때 지속가능한 발전 모델을 창출해 나갈 수 있다고

판단한다. 환경물질의 신뢰성 평가는 제품뿐만 아니라, 시설물을 포괄하는 각종 건축물에도 적용되는 공학적이고 통계적인 평가 방법론이며, Reliability(신뢰성), Availability(가용성), Maintainability(보전성), Safety(안전성)을 포괄하여 평가할 수 있는 대안이기도 하다.

특히, 전 세계적인 환경위해물질의 규제는 우리나라처럼 수출의존도가 높은 국가에서는 대단히 위협적인 무역장벽으로 작용할 것으로 판단되므로, 환경물질의 위해성에 대한 신뢰성 평가 방법론 가운데 가속화 평가 방법론의 미적용으로 인한 기업의 연구개발 및 제품생산을 저하는 심각한 경제적인 손실을 유발시키기 때문에 빠른 시일 내에 기업이 자생적으로 가속신뢰성 시험방법의 현장적용이 광범위하게 이루어질 수 있도록 체계화 하여야 하나, 기업현장의 여러 가지 문제로 인하여 가속신뢰성시험법의 개발과 적용이 곤란하거나 지엽적으로 적용되고 있는 실정이다.

따라서, 이러한 문제점을 제거하고, 나아가서는 환경물질평가에 대한 경제성을 동시에 확보하기 위해서는 본 연구에서 제안하는 신뢰성 평가모형을 참조 하여 경제적인 환경물질관리 방법론을 구축해 나가야 할 시점에 있다.

그러므로 경제성을 고려한 환경물질 관리 방안으로는 ;

- (1) 환경위해성 정보의 Data Base구축
- (2) 환경물질에 대한 FMECA(Failure Mode and Effects Critical Analysis)실시
- (3) 환경위해물질의 FTA(Fault Tree Analysis)실시
- (4) 환경물질에 대한 SHA(System Hazard Analysis)실시
- (5) 경제성 확보를 위한 ALT(Accelerated Life Test)실시
- (6) 경제성 확보를 위한 HALT(Highly Accelerated Life Test)실시

본연구의 목적인 환경물질을 제거한 PWB의 신뢰성평가 방법연구에 있어서 중요한 핵심사항으로는 ;

첫째, 환경물질자체의 규제는 이미 돌이킬 수 없는 국면으로 진입한 상황이기 때문에 더 이상 확대피해를 유발하지 않도록 하는 것이 중요하다고 판단되며, 이미 오염된 환경의 재활영역은 별도의 장기적인 관점에서 접근해야 할 것으로 판단된다.

둘째, 급격한 지구온난화로 인한 해수온도 상승은 기상이변을 가속화 시키고 있으며, 한반도의 구조물 및 각종 공공시설물의 시스템 변경을 강요하고 있는 실정이다.

셋째, 환경물질에 대한 신뢰성 평가를 요구함과 동시에 환경물질 그 자체를 사용함으로써 발생 할 수 있는 영역에서의 사용신뢰성의 평가방법에 관한 대책과 대응을 요구하고 있다.

환경물질에 대한 신뢰성 평가를 실현하고, 빠른 기간내에 문제점을 검출 및 평가함으로써 원·부자재의 신뢰성을 개선함과 동시에 부품설계 및 제품설계의 오류를 단기간 내에 개선하여 부품과 제품의 신뢰성을 동시에 높이는데 역점을 두고 다음과 같이 환경물질에 대한 신뢰성 평가 기법을 전개해야 한다.

따라서 신뢰성평가기법의 다양한 분야 가운데서도 가속모델의 적용이 중요하며, 다음과 같은 가속모델을 적용할 수 있다.

가속이론의 기본적인 개념은 적용분야에 따라서 조금씩 다르게 나타나고 있고 이론적 기초는 Stress로부터 출발하기 때문에 환경물질의 핵심적인 Stress Factor가 어떤 것이 존재하는가를 명확하게 이해하고 적용할 필요가 있다.

따라서, 정상적인 환경물질의 일반적인 환경에서의 생분해 혹은 자연으로 회귀하는데 소요되는 각종 시간 및 반응한계를 짧은 기간내에 가속화 시험을 통하여 문제점을 파악하고 확인함으로써 향후 인류에게 닥칠 각종 재앙 및 환경문제로부터 안전영역을 확보 하고자 한다.

이러한 관점에서 본다면 아레니우스의 10도칙이나, Eyring Model식, Robinson의 선형누적손상식, Miner의 선형손상칙, n승 k도칙, Coffin-Manson의 관계식 Larson-Miler의 식, 1/2승칙, Griffith의 식, Electro-migration현상 등은 가속시험기법을 보다 구체화하고 논리적으로 접근하는데 있어 많은 도움을 주었으며, 이론적인 바탕이 되고 있다.(Elsayed A. Elsayed,(1996)[18])

특히 온도에 대한 의존성이 있는 경우의 가속은 일반적으로 식 (3.6) 및 (3.7)의 Arrhenius's model과 Eyring's model에 따르는데 다음과 같다.(Elsayed A. Elsayed,(1996)[18])

$$L_2 = L_1 \exp\left\{-\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_A}\right)\right\} \text{-----}(2.1)$$

$$L_2 = L_1 \left(\frac{T_N}{T_A}\right) \exp\left\{-\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_A}\right) + \left[C(S_N - S_A) + \frac{D}{k}\left(\frac{S_N}{T_N} - \frac{S_A}{T_A}\right) \right]\right\} \text{-----}(2.2)$$

여기서 E, D 는 활성화 에너지(Activation Energy; Ea)값을 의미하며, C는 재질의 상수, k는 Boltzmann정수 $8.6159 \times 10^{-5} eV/^\circ k$ 를 의미한다. L1은 절대온도273.16°+사용 온도TN에서의 수명이고 L2 는 절대온도273.16°+가속시험온도TA에서의 수명이다. TN은 절대온도 273.16°+정상사용온도를 의미하며, TA는 절대온도 273.16°+가속시험온도를 의미한다. SN은 정상사용 스트레스를 의미하며, SA는 가속시험 스트레스조건을 의미한다.

n승 k도 모델은 (2.3)의 수식으로 정의하고, 여기서 V1은 정상사용조건에서의 전압 값을 의미하고, V2는 가속시험조건에서의 전압 값을, T1은 절대온도 273.16°+정상사용 온도를 의미하며, T2는 273.16°+가속시험온도, k는 볼츠만 상수 값으로 $8.6159 \times 10^{-5} eV/^\circ k$ 를 의미한다.

$$L_2 = L_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \times \frac{2(T_1 - T_2)}{k} \text{-----}(2.3)$$

주로 종이프라스틱 마일러 콘덴서 (n = 4 ~ 6), 세라믹 콘덴서 (n = 3, k = 10), Glass콘덴서 (n = 2.5, k = 20), 박형Tantal콘덴서 (n = 5, 10), 고체Tantal콘덴서 (n = 4 ~ 5 , k = 10), 마이카 콘덴서 (k = 50) 등으로 확인되고 있으며, 주로 전압과 온도에 의존하는 경우에 적용되는 것으로 되어있다.(越川清重,(1990)[23])

Eyring's model은 주로 수지, 반도체 수명의 온도 및 Stress에 의존하는 경우에 적용되는 것으로 되어있으며, 현업 적용 단계에서는 각각의 상이한 재질에 대한 문제점을 도출하기위한 대안으로서 적용하고 있으나 실제로는 Arrhenius's Model과 결합한 형태의 가속 Model식을 더 많이 적용하고 있다.(Elsayed A. Elsayed,(1996)[18])

$$L_2 = L_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \exp \left\{ \begin{array}{l} \frac{-E}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + \\ + C(S_1 - S_2) + \\ + \frac{D}{k} \left(\frac{S_1}{T_1} - \frac{S_2}{T_2} \right) \end{array} \right\} \text{-----}(2.4)$$

여기서 E, C, D는 각각 다른 물질을 의미하며, 수식의 기본 형태는 Arrhenius Combination Model과 유사하나 수식의 전개와 물질의 구성에서 상당한 차이를 보이고 있으므로, 각기 다른 환경물질들에 대한 유해성 및 유효수명 평가에 도움이 될 것으로 본다.

Larson - Miler의 식은 (2.5)의 형태로 정의하고 주로 정가속도에 대한 응력변화에 기인한 가속성의 평가에 적용하고 있으나 현실적으로는 진동시험이나 복합환경시험에 의한 가속시험을 더욱더 많이 적용하고 있는 실정이다.

$$T(20 + \ln t_3) = \sigma \text{에 대해 일정-----}(2.5)$$

1 / 2 승칙은 \sqrt{t} 의존성의 형태로 정의하고 주로 습도 및 온도에 대한 가속성의 평가에 적용하고 있으나 현실적으로 대부분 아레니우스식이나 Eyring's Model을 더 많이 활용하고 있는 실정이다.

Arrhenius Combination Model의 경우는 수식(2.6)의 형태로 정의되며, 온도, 습도 및 전압 스트레스에 대한 가속 factor를 산출하는 목적으로 활용되는 수식이다. 1984년 Kececioglu와 Jacks의 Inverse power rule 모델, 1983년 Gunn, Camenga, and Malik의 상대습도 및 전압조건 모델식과 Arrhenius 반응속도론 모델을 조합한 Combination Model로써 환경물질이 온도와 전압의 조합에 의해 반응할 때 발생하는 각종 문제점을 규명하고, 개선하는데 유용한 가속모델식이 될 것으로 판단된다.

$$A_F = \frac{t_N}{t_A} = \frac{v_N}{v_A} e^{\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_A} \right] - \beta \left[\frac{1}{RH_N} - \frac{1}{RH_A} \right]} \text{-----}(2.6)$$

물론 기본 모델식은 (2.7)식으로부터 도출된 것이며, 여기서 LN는 정상작동조건 수명, LA는 가속스트레스조건에서의 수명, VN는 정상작동전압, VA는 가속스트레스 전압, TN는 정상작동온도, TA는 가속스트레스온도를 의미한다.

$$\frac{L_N}{L_A} = \left(\frac{V_N}{V_A} \right)^{-n} \exp \left[E_a / k \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_A} \right) - \beta \left(\frac{1}{RH_N} - \frac{1}{RH_A} \right) \right] \dots(2.7)$$

< 표 1 > 제조단계 신뢰성 확보를 위한 업무 Process

No	제조단계 신뢰성 추진절차	세부업무내역	비 고
1	제조규격의 구간추정	제품규격의 적합성 여부 및 규격설계	위해물질 및 제품규격의 적합성 규격범위 결정
2	추정결과의 검정	제품규격 구간의 검정 및 규격 적합성 평가	
3	Xbar-R관리도 작성	규격값을 근거로 하는 제조단계 안정성 평가	
4	Cp, Cpk, Pp, Ppk 도출	제조공정능력의 평가	
5	공정FMEA실시	공정FMEA실시	
6	RPN값 도출	위험우선순위 결정	RPN: Risk Priority Number
7	Ln값 도출	정상수명값의 도출	Ln: Normal Life
8	Stress 한계치 추정	Stress/Strength 평가	
9	Af값 도출 (Af=Ln/La)	가속계수산출	Af: Acceleration Factor
10	ALT조건 설정 및 수명추정	가속수명시험조건도출	
11	HASS에 근거한 출하검사	초가속스크리닝 실시	HASS: Highly Accelerated Stress Screening

<표 1>에서 보는 바와 같이 제조상의 신뢰성평가 방법은 그 절차가 복잡하고 까다로운 특성을 보이고 있지만 환경물질이 제거된 상태의 제조단계 신뢰성 확보 및 환경물질을 제거하기 위한 제조단계 신뢰성 확보 방안으로서 적합하다고 본다.

우리기업의 기술경영 형태를 감안해 보면 이미 FMEA를 현장에서 많이 사용하거나 적용을 고려하고 있는 단계이므로, FMEA+ALT +HALT의 개념적인 전환이 비교적 용이할 것이다.

2.2 초가속수명시험(HALT)이론연구

2.2.1 초가속수명시험(HALT)방법론

HALT(Highly Accelerated Life Test)란 초(超)가속수명시험 혹은 고(高)가속수명시험이라고 불리며, 일반적인 ALT(가속수명시험)모델식을 통하여 도출된 스트레스 요인을 근거로 하는 수명예측을 토대로 시험기간을 단축하고 신뢰성 평가에 소요되는 각종 낭비요인을 제거하는데 목적이 있는 신뢰성 시험 평가방법이다.

HALT의 특징은 환경물질이 가지는 정성적인 특징을 잘 평가 할 수 있는 장점이 있으며, 정성적 시험일 경우에 하나의 가혹한 스트레스 수준이나 몇 개의 스트레스 조합, 또는 시간에 따라 변동하는 스트레스 환경조건에서 적은양의 샘플로 시험을 수행할 수 있어서, 시험결과 해당 샘플 중에 시험전에 전처리를 실시한 결과와 비교해서 환경물질이 얼마나 잔류하느냐, 잔류하지 않느냐에 따라 환경물질의 유해성을 평가하는 체계를 구축하기가 간편하다는 장점이 있다.

HALT를 실시함으로써 환경물질이 지니고 있는 잠재적인 위해물질이 얼마나 잔류할 수 있겠는가를 추론함으로써 잠재적인 위해가 발생하는 메커니즘을 예측하여 잠재적 위태모드를 노출시키는 것이다. 따라서 사용조건에서 발생 가능한 위태성 모드를 신속히 탐지해 낼 수 있는 시험설계가 중요하다.

2.2.2 초가속수명시험(HALT) 프로파일 형태

HALT(Highly Accelerated Life Test)프로파일(Profile)의 실행형태는 ALT 분석결과를 근간으로 한다. 먼저 파괴영역을 파괴상한(UDL; Upper Destructive limit)과 파괴하한(LDL; Low Destructive Limit)으로 구분하고, 동작조건 설정시 파괴한계를 넘지 않도록 설정한다. 따라서 <표 2>의 시험설계 Profile에 나타낸 것은 시험장비의 성능과 해당 PWB ASS'Y의 파괴한계를 고려한 경험적인(수없이 현장에서 반복적인 시행착오를 통하여 결정한) 시험Profile임을 밝혀둔다.

PWB의 특성이 저온 스트레스에 취약하며(이것은 PCB기판이 수축에 의해 휨이 발생하면서 크랙이 발생되기 때문) 저온 이후에 고온step stress로 이행할 경우 문제발생이 명확해지기 때문에 두 번째 step으로 결정하였다. step1,2를 만족하는 경우 급속 열충격 cycle에서 생존할 확률이 높아지며, 진동시험을 견딜 경우 최종 복합 열충격 및 진동시험에서 생존하게 된다.

HALT 장비의 특성상 짧은 시간에 고온 및 저온영역의 이동이 자유롭고, 부하인가 등이 용이한 특성이 있으므로 이러한 점을 활용한다면 환경물질이 어떤 환경조건의 임계값에서 문제를 유발하는지에 대한 명확한 결론을 도출 할 수 있다.

<표 2>HALT시험설계 프로파일 형태

Test Step	시험설계조건	시험조건
Step 1	저온 Step Stress	+10℃ → -65℃
Step 2	고온 Step Stress	+40℃ → +175℃
Step 3	급속 열충격 Cycle	-65℃ → +175℃, (60℃/min 조건) 10Cycle시험 실시 단, Monitoring은 실시간 진행
Step 4	진동 Step Stress	가속도 0g → 30g, 주파수 3~10KHz
Step 5	복합 열충격 & 진동	급속열충격Cycle 시험 + 진동 20g

3. 환경물질제거 PWB의 Lee-Eyring Model과 실무적용 방법론

본 연구에서는 PWB에서 환경규제물질을 제거한 이후에 복합적으로 작용되는 환경 스트레스에서의 PWB의 신뢰성을 평가하기 위한 방법으로 기존의 가속 모델 식에서 규명하기가 난해하였던 복합 환경(온도, 습도, 물리 및 화학적 스트레스, 물리 및 화학적 스트레스×온도)에 대한 가속성을 나타내는 부품 및 제품에서의 가속계수를 산출하기 위한 수식의 전개 및 현장검증을 하였으며, 기존의 R.E.Thomas의 Eyring응용 모델 식의 한계성을 극복하기 위한 목적으로 습도부분을 정상수명환경조건에서의 습도와 가속수명시험조건에서의 습도로 구분하여 적용하고 수식전개에 이러한 습도부분을 추가하여 Lee-Eyring을 개발하여 (3.4)수식의 형태로 실무 적용을 실행한 결과 현장문제에 대한 재현성이 실증되었으며, 수식의 전개는 다음과 같다.

아이링 모델은 양자역학원리에서 도출되었으며, 아레니우스 모델과 유사성을 가지는 모델로 알려져 있는데 먼저 아레니우스 모델을 전개한 뒤에 아이링 모델을 전개하면 다음과 같은 수식의 전개를 확인 할 수 있다.(Elsayed A. Elsayed,(1996)[18])

아레니우스 모델을 전개하면 다음과 같다.

$$r = Ae^{-(Ea/kT)} \text{-----}(3.1)$$

여기서 r은 반응속도, A는 미지의 비열상수(nonthermal constant)값, Ea는 활성화 에너지(eV), k는 볼츠만(Boltzmann)상수 값(8.623×10⁻⁵eV/K), T는 절대 온도(Kelvin) 273.16도를 의미한다.

활성화 에너지값은 온도와 관련된 반응률 기울기(slope)로 부터 구할 수 있으며, 아레니우스 모델에서는 온도에 의한 가속성이 인정될 경우에 적용되고 단위는 eV로 표

현한다. 부품의 수명은 공정의 역반응율과 비례하는데 이경우의 수식 모델은 (3.2)수식과 같이 전개된다.

$$\frac{L_n}{L_a} = \frac{e^{(E_a/kT_n)}}{e^{(E_a/kT_a)}}$$

여기서 L_n 은 정상작동온도에서의 수명을 의미하고, L_a 는 가속온도조건에서의 수명을 의미한다.

$$L_n = L_a \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \text{-----}(3.2)$$

상기 (3.2)식에서 L_n 은 정상작동시 수명을 의미하는데 이때 고장률은 다음과 같이 전개되며, 열적 가속계수 산출은 수식(3.3)와 같다.

$$\lambda_n = \frac{1}{L_n}$$

$$A_T = \frac{L_n}{L_a}$$

$$A_T = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \text{-----}(3.3)$$

Eyring Model의 응용식을 근거로 Lee-Eyring 모델을 개발할 수 있었다. 물론 Arrhenius Combination Model 수식(3.15)에서 습도 부분을 R.E.Thomas-Eyring Model 수식(4.5)에 추가 적용함으로써 환경물질을 제거한 이후의 PWB에서 발생하는 전기적 혹은 기계적 스트레스, 온도스트레스, 습도스트레스, 온도×전기적 혹은 기계적 스트레스에 대한 복합 가속신뢰성 시험 및 평가를 진행 할 수 있었다. 이러한 복합 스트레스 요인에 의한 가속신뢰성 시험의 필요성은 기존의 전자부품에서 환경물질을 제거한 이후에 발생하는 고장형태분석에 근거한 것이며 환경물질을 제거한 PWB에서 난연성의 유지와 흡습성 평가 및 전자 부품의 접합부 강도 평가를 동시에 수행하기 위한 방법론으로서 복합 스트레스에 근거하는 가속평가 모델을 구성하였다.

따라서, Lee-Eyring 모델의 전개를 수식(3.4)과 같이 전개할 수 있으며, 습도 스트레스의 추가 형태는 습도에 의한 부하경감 특성을 고려하여 적용한 결과 “ $-C\left(\frac{1}{RH_1} - \frac{1}{RH_2}\right)$ ”의 형태로 적용할 때 습도에 의한 디레이팅(Derating; 부하경감 현상)이 명확하게 나타남을 확인 할 수 있었다.

$$L_2 = L_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \exp \left\{ \begin{aligned} & \frac{-B}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + \\ & + \left(-C \left(\frac{1}{RH_1} - \frac{1}{RH_2} \right) \right) + \\ & + D(S_1 - S_2) + \\ & + \frac{E}{k} \left(\frac{S_1}{T_1} - \frac{S_2}{T_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.4)$$

- L_1 : 정상수명환경조건에서의 수명
- L_2 : 가속수명시험조건에서의 수명
- B : 활성화 에너지
- T_1 : “절대온도273.16도+정상사용온도”
- T_2 : “절대온도273.16도+가속수명시험온도”
- k : Boltzmann정수($8.61 \times 10^{-5} eV / ^\circ k$)
- RH_1 : 정상수명 환경조건에서의 습도
- RH_2 : 가속수명시험조건에서의 습도
- C, D, E : data로부터 추정되는 계수치(재질상수, 활성화 에너지 등)
- S_1 : 정상사용 스트레스
- S_2 : 가속수명시험조건에서의 스트레스

수식 (3.4)으로부터 가속계수를 산출하기 위한 수식으로 변환을 하면 (3.5)과 같은 수식형태로 전개되며, (3.5)의 수식을 근거로 가속시험을 실시하였다.

$$Af = \frac{L_1}{L_2} = \frac{T_2}{T_1} e^{\left\{ \begin{aligned} & \frac{B}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) - \left(-C \left(\frac{1}{RH_1} - \frac{1}{RH_2} \right) \right) - \\ & - D(S_1 - S_2) - \frac{E}{k} \left(\frac{S_1}{T_1} - \frac{S_2}{T_2} \right) \end{aligned} \right\}} \dots\dots\dots(3.5)$$



<그림 1> 전자부품의 환경물질 잔류형태 및 현장적용 상황

현재 사용하고 있는 PWB에서 환경규제물질인 Pb, 수은, 카드뮴, 6가 크롬, PBB, PBDE 등을 제거한 상태의 부품 및 제품의 신뢰성 및 내구성을 유지한다는 것은 전자 부품 혹은 전자제품 분야에서는 매우 난해하고 어려운 일이 아닐 수 없다. 특히, 납의 사용량이 절대적으로 많은 전자부품 분야에서는 매우 어려운 일이다.

PWB에 적용되는 전자 부품 가운데 납(Pb) 성분을 많이 사용하는 부품은 수동소자인 메탈필름저항(R-M-Film), 카본필름저항(R-C-Film), 메탈옥사이드저항(R-M-Oxide), 권선저항(R-Wire-Wound), 탠탈콘덴서, 전해콘덴서, 세라믹커패시터, fuse 등과 유도소자인 초크코일, 필터코일, 동조코일, 발진코일, 고주파 발생코일, 전원트랜스, matching 트랜스, 하이브리드 코일 등이 있으며, 능동소자(Active component)로는 범용 다이오드, FET등이 있다. 물론 고온에 견디기 위한 고온발열부위에 적용되는 플라스틱의 경우에는 PBB, PBDE 등이 적용된다. 무연 Solder 전자제품의 초가속수명시험(HALT)을 실행하기 위한 방법론의 설계에 대한 기본조건은 <표 2>의 시험조건을 적용하기로 한다.

단, 전자제품의 신뢰성 수준을 평가하기 위한 Parts Stress Analysis를 시험前 단계 및 시험後 단계에 분석함으로써 스트레스 분포가 시험 前, 後에 어떻게 변화하였는가를 평가하여야 하며, 이러한 스트레스 분포의 평가결과를 근거로 시험결과에 대한 합부판정을 내려야 할 것으로 판단된다.

3.1 HALT에 의한 무연 Solder 전자제품의 신뢰성평가

3.1.1 파괴영역의 분류

파괴영역-A(전자부품을 구성하는 부품의 접합부 영역): A영역의 적절한 형태는 CERAMIC CAPACITOR의 경우와 같이 진극형성을 위해 세라믹 소체의 양쪽단면에 Ag Paste를 형성한 이후에 Ag Paste와 리더와이어를 soldering하게 되는데 이때 Pb(납)성분이 제거된 soldering을 실행 할 경우 고온 soldering에 의한 열 충격으로 인하여 세라믹 소체에 micro crack이 발생함으로써 solder bridge현상에 의한 전기적인 short가 발생하는 형태로서 이러한 영역의 파괴 영역을 A영역으로 분류하였다. 이러한 형태의 파괴현상은 전자부품에서는 가장 보편적인 파괴영역으로 분류해야 할 것으로 판단된다.

파괴영역-B(전자부품을 구성하는 부품의 발열부 영역): B영역의 적절한 형태는 범용 DIODE의 경우와 같이 반도체CHIP에 전극을 형성하는 과정에서 반도체CHIP과 다이오드의 FIRST HEAD와의 사이에 soldering되는 preforming solder가 다이오드의 전기적인 STRESS요인으로 인해 순간적인 발열에 의한 용융현상으로 burnt되면서 부품내부에서 short를 발생시키는 현상이 발생하는 영역을 B영역으로 분류하였다.

파괴영역-C(전자부품을 구성하는 조립체의 구동부 영역): C영역의 적절한 형태는 모터류에서 찾아 볼 수 있는데, 모터를 조립하는 과정에서 모터와 PWB 기판사이의 기구적인 결합상태 및 Matching 형태가 부적절 할 경우에 진동에 의한 결합부 파손이 발생하는 경우와 PWB의 동박면을 soldering 하는 과정에서 Pb(납)성분이 제거된 soldering을 실행 할 경우 접합부의 연신율이 떨어지는 문제로 인하여 지속적인 진동발생시 crack이 발생함으로써 제품동작에 오류를 발생시키는 등의 문제를 유발시키는 영역을 C영역으로 분류하였다.

3.1.2 파괴영역의 재료적 특성

파괴A영역의 재료적 특성(전자제품을 구성하는 부품의 접합부 영역): 접합부를 형성하는 solder의 경우 기존의 Pb Solder에서 Pb Free Solder로 전환하는 특성을 보이고 있으며, Pb Free Solder의 경우에는 대부분이 고온계로 분류되고 있고 고온계의 경우 온도분포가 230℃~280℃에 분포하고 있어서 신중한 온도 프로파일 관리와 준비가 필요한 상황이다. 따라서, 이러한 재료적인 특성을 감안한 신뢰성 평가가 필요한 상황이다.

파괴B영역의 재료적 특성(전자제품을 구성하는 부품의 발열영역): 부품의 발열부 영역에 해당하는 경우는 주로 반도체 부품에 해당되는 특성을 보이며, 주로 반도체chip의 접합부 영역에서 발생하는 속성을 가지고 있는 경우가 대부분이다. 특히, substrate와 반도체 사이의 접합부(soldering)영역에서 Pb Free Solder를 실시할 경우 고온특성으로 인하여 접합면의 De-Lamination 현상이 발생하는 직접적인 원인이 된다. 물론 Diode의 경우는 접합면의 과도한 열(Thermal)저항을 초래하여 Solder가 용융되면서 Burnt를 유발시키는 현상을 초래하기도 한다.

파괴C영역의 재료적 특성(전자제품을 구성하는 조립체의 구동영역): 부품의 조립체 영역에 해당하는 경우는 주로 모터를 포함하여 와이어 Harness, 각종 단자, Transformer의 단자부등이 해당되며, 각종 기구적인 조립체등도 해당이 되나 어느 특정부위에 국한된 것이 아니며 다양한 기구적인 결합 특성을 가진다.

전자제품에서 결합의 형태는 단자 혹은 Wire Harness 혹은 Clip등을 통하여 접속이 진행되며, 이때 Pb Free Solder에 의한 접속이 진행되는 경우 접촉 저항값이 높게 나오거나 접촉력이 나빠지는 속성으로 인하여 접촉불량이 발생하는 특성이 있으며, PWB 기관사이의 기구적인 결합상태 및 Matching형태가 부적절 할 경우에 진동에 의한 결합부 파손이 발생하는 경우와 Pb(납)성분이 제거된 soldering을 실행 할 경우 접합부의 연신율이 떨어지는 문제로 인하여 지속적인 진동발생시 crack이 발생하는 특성을 나타낼 수도 있다.

3.1.3 무연 Solder 전자부품의 초가속수명시험 방법의 설계

무연 Solder 전자제품의 초가속수명시험(HALT)을 실행하기 위한 방법론의 설계에 관한 기본조건은 스트레스 수준을 근거로 설정한 시험조건을 적용하기로 한다.

단, 전자제품의 신뢰성 수준을 평가하기 위한 Parts Stress Analysis를 시험前 단계 및 시험後 단계에 분석함으로써 스트레스 분포가 시험 前, 後에 어떻게 변화하였는가를 평가하여야 하며, 이러한 스트레스 분포의 평가결과를 근거로 시험결과에 대한 합부판정을 내려야 할 것으로 판단된다.

HALT시험조건에 대한 동작영역 및 작동조건은 다음과 같다.

- 하한동작한계(LOL: Low Operating Limit)
; -40℃
- 상한동작한계(UOL: Upper Operating Limit)
; +85℃

- 하한파괴한계(LDL: Low Destructive Limit)
; -48°C (LOL × 1.2배)
- 상한파괴한계(UDL: Upper Destructive Limit)
; +102°C (UOL × 1.2배)
- 전원인가조건은 정격전압의 1.2배로 POWER ON, OFF를 반복적으로인가 함으로써 전자제품 작동시점에 인가되는 전압 및 전력스트레스에 대한 신뢰성을 평가하였다.

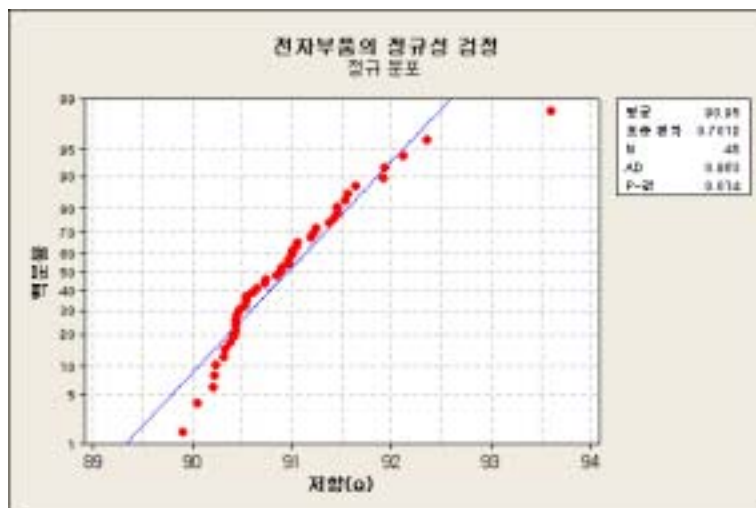
3.1.4 무연 Solder 전자부품의 정규성과 비정규성 검정

무연Solder 전자제품과피 및 작동영역의 정규성과 비정규성을 검정하기 위해 현장에 서 많이 적용하고 있는 방법은 Parts Stress Analysis(PSA)방법에 근거하는 특성치 평가를 기준으로 정규성 혹은 비정규성을 확인하는 것이며, PSA는 MIL-HDBK-217 D와 F를 근간으로 발전한 평가기법이지만, 현재는 전자제품의 설계단계 문제점을 검증하거나 제품 시스템의 안정성을 평가하고 스트레스를 측정하기 위한 방법으로서 활용되고 있는 기법중의 하나이다.

무연Solder가 적용된 전자제품의 경우 가장 취약한 스트레스의 관리요소는 CTE(열 팽창계수)가 될 것으로 판단되며, CTE에 가장 많은 영향을 미치는 요인으로는 내열특성의 차이가 높은 이종물질의 결합인 것으로 파악되고 있다.

열적 스트레스의 수준이 높을수록 이종(異種)간 금속물질간의 열팽창계수는 높게 나타나며, 이로 인한 전자제품의 파괴현상은 가속될 것으로 판단된다.

이러한 특성값들을 전제로 하는 전자제품의 PSA 결과를 해당제품별로 스트레스 특성값을 기준으로 분포를 조사할 경우 대부분의 경우(多數시료일 경우) 정규분포를 하게 되며 이러한 정규분포 특성값을 근거로 신뢰성 시험의 재현성 및 DATA의 특성값을 평가하게 된다.



<그림 2> 전자부품 측정Data의 비정규성 검증형태

단, 시료수가 적을 경우에는 비정규 특성을 나타낼 수 있으나, 비정규 특성을 나타낸다고 해서 신뢰성 시험의 재현성이 없다고 판단하기에는 부적합하기 때문에 PSA 평가결과를 반영한 재현성 평가가 이루어져야 한다고 본다.

무연Solder로 작업된 전자제품에 적용된 전자부품의 경우 기본고장률 λ_b (basic failure rate; MIL-HDBK-217의 기본고장률 sheet에 근거함)값의 판정시 전기적 스트레스와 열적(온도)스트레스의 분포곡선 형태는 기존의 Pb Solder와 기본적인 메커니즘에서 차이가 없기 때문에 동일한 적용이 가능하다고 판단되며, 유효수명에 대한 분석은 기존의 MTTF 혹은 MTBF적인 수명예측 방법에서 벗어나서 Bx 수명 예측이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

그러나 신뢰성시험에서 실시하는 보편적인 샘플링 방식인 LTPD(lot tolerance percentage defective; 계수발체1회 샘플링)를 적용하는 경우 현업에서 가장 많이 활용하는 LTPD 5%조건하에서 $c=0$ (불량 0개일때 합격조건)일 경우 시료수는 45개를 취하게 되는데 이러한 정상적인 샘플링 조건하에서는 Bx 수명 예측을 반드시 하여야 하나, 시료수가 적을 경우에는 기존의 MTTF 혹은 MTBF적인 방법에 의한 수명예측을 취하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구 역시 시료의 제한성 때문에 MTTF를 적용하여 유효수명을 예측하였으며, 수명예측과 관련된 RSM(반응표면분석)은 Minitab 프로그램을 사용하였음을 밝혀둔다.

3.1.5 무연 Solder 전자부품 HALT 신뢰성평가의 재현성 검정

PWB ASS'Y에 대한 시험을 실시하기 위해서 먼저 Sampling 계획을 수립하는데 이때 수식에 의존하는 방법과 통계 소프트웨어를 이용하는 방법 등을 활용하였다.

PWB ASS'Y를 대량으로 Sampling 할 수 없는 현실로 인하여 5개 시료를 1000시간 동안 시험하되 AC 220V, AC 242V, AC 264V 등 3개 전압 스트레스 군을 기준으로 통계적 접근방법에 의한 방법론을 취한 결과는 다음과 같다.

3.1.5.1 가속수명시험을 위한 스트레스 선정

HALT시험을 위한 시험조건의 설정은 파괴 Stress범위를 아래와 같이 설정 하였으며, 스트레스 factor는 전압 및 온도 스트레스를 기준으로 시험을 실시하였다.

3.1.5.2 스트레스 factor가 전압의 경우:

- AC 220V 정격전압조건: 정상적인 사용조건에서의 스트레스 수준이며, 실제 사용기간 15년을 기준으로 볼 때 MTTF조건으로 결정 함.
- AC 242V 전압선정조건: 정격전압의 110% 조건으로 스트레스 수준을 결정 하였으며,

3.1.5.3 스트레스 factor가 온도의 경우

- 통상사용조건 35℃조건: 정상적인 제품사용기간을 기준으로 할 때 사용시간은 131,400hrs,이며 이것은 15년을 기준으로 한 것이다.

- 가속사용조건 85℃조건: 정상사용조건보다 가속시킨 조건이며, 단순히 아레니우스 모델을 적용할 경우 가속계수가 67.38로 정상조건보다는 가속된 조건인 시험시간 1,950hrs가 됨을 확인 할 수 있었다.

- 가속사용조건 120℃조건: 정상사용조건보다 가속시킨 조건이며, 단순히 아레니우스 모델을 적용할 경우 가속계수가 678.75로 정상조건보다는 가속된 조건인 시험시간 193.59hrs가 됨을 확인 할 수 있었다.

3.1.5.4 스트레스 factor가 습도의 경우

- 통상사용조건 65%RH 조건: 정상적인 제품사용기간을 기준으로 할 때 사용시간은 131,400hrs,이며 이것은 15년을 기준으로 한 것이다.

- 가속사용조건 85%RH 조건: 정상사용조건보다 가속시킨 조건이며, 단순히 아레니우스 응용모델을 적용할 경우 가속계수가 3.005로 정상조건보다는 가속된 조건인 시험시간 43,727hrs가 됨을 확인 할 수 있었다.

- 가속사용조건 95%RH 조건: 정상사용조건보다 가속시킨 조건이며, 단순히 아레니우스 응용모델을 적용할 경우 가속계수가 4.379로 정상조건보다는 가속된 조건인 시험시간 30,006hrs가 됨을 확인 할 수 있었다.

3.1.5.5 스트레스 factor가 복합적인 stress의 경우: 전압, 온도, 습도

Eyring 응용 Model 적용수식을 적용하였으며, 적용 수식의 형태는(4.8)과 같다. 전압스트레스는 S1, S2를 지정하였으며, 습도에 반응을 보이는 경우는 재질 상수값을 B를 취하였고, 전압 및 온도스트레스를 동시에 받는 경우는 재질 상수값을 D를 취하였다.

- 통상사용조건 65%RH, 정격전압, 35℃ 조건: 정상적인 제품사용기간을 기준으로 할 때 사용시간은 131,400hrs,이며 이것은 15년을 기준으로 한 것이다.(가속계수는 1이며 정상사용조건을 상징한다)

- 가속사용조건 85%RH, 정격전압×110%(1.1), 85℃ 조건: 정상사용조건보다 복합조건으로 가속시킨 것이며, Eyring 응용모델에 적용하였을 경우 가속계수가 138.67로 정상조건 보다는 가속된 947.57hrs으로 시험시간이 단축되는 것을 확인 할 수 있었다.

- 가속사용조건 100%RH, 정격전압×120%(1.2), 100℃ 조건: 정상사용조건 보다 복합조건으로 가속시킨 것이며, Eyring 응용모델에 적용하였을 경우 가속계수가 2867.34로 정상조건 보다는 가속된 45.826hrs으로 시험시간이 단축되는 것을 확인 할 수 있었다.

3.1.5.6 PWB ASSY 전처리: 시험을 위한 전처리 실시조건

전자부품의 환경물질에 대한 신뢰성 평가를 위한 방법론으로서 ALT에 근거하는 HALT 시험을 전제로 시험을 진행하였고, 이때 시험 전(前) PWB ASSY의 Soldering 조건을 확인하였으며, 전자제품 선택을 특정 제품에 국한한 것이 아닌 다수의 제품(3개 가전제품; 에어컨 콘트롤러, 세탁기 콘트롤러, 밥솥 등)을 근간으로 시료를 선택하

였으며, 시험을 위한 사전 처리 조건으로서 Pb의 잔류유무를 확인하는 것을 전제로 하였으며, RoHS에서 규제하는 규제물질들의 잔류유무도 확인하였다.

전자제품의 컨트롤PWB ASS'Y의 환경규제물질 잔류는 아직까지는 상당부분 잔류하고 있는 것이 현실이었으며, 점진적인 대체설계를 기대하는 수준에 있음을 확인하였다.

전처리를 위해서 각 컨트롤러의 전기적인 특성값 및 작동특성과 동작에 이상이 없는지를 측정하였으며, 시험에 적용된 PCT(PRESSURE COOKER TESTER ; 증기압 시험 장비)장비의 가동조건은 순수의 경우 절연저항값이 $10M\Omega$ 이상을 사용하였고, 전압인가를 위해서는 스라이더스 전(前)단계에 전압안정장치(AVR)를 설치하여 전기적인 노이즈 및 서어지(surge)전압 및 전류로 인한 컨트롤러의 특성변화를 사전에 방지할 수 있도록 조치하였다.

시험시 온도상승에 대한 분석을 위해서 J급 THERMO-COUPLE을 사용하였으며, 실시간으로 측정이 가능하도록 조치하였다.

RoHS의 규제물질에 대한 사항은 FTIR과 SEM-EDS 분석 장비에 의한 환경규제물질 잔류유무를 확인 하였으며, 다음과 같은 결과를 근거로 시험을 진행 하였다.

(1) 무연 유무 ; ICP((Inductive Coupled Plasma)분석장비에 의한 pb잔류유무의 확인 및 cl기의 잔류가 0.01wt/%를 초과하는지를 확인 하였으나, 잔류 물질이 없음을 확인 함.

(2) Bromide(브롬계 화합물질)유무 ; 난연성 플라스틱 및 난연성 패키지 부품과 PWB원판인 PCB에 잔류 가능한 물질로서 PBB, PBDE가 해당되며, 분석한 결과는 아직은 대부분의 난연성 물질에 잔류하는 것으로 나타나는 것으로 확인됨.

전자부품의 전기 및 온도적인 스트레스 수준은 상당부분이 MIL-HDBK -217 관리 기준에는 못 미치는 상황이었으며, DATA는 비정규성이 있는 것으로 검증 되었다. 시료가 적을 경우에 이러한 특성이 나타나며, 이러한 문제를 보완하기 위한 조치로서 부품스트레스분석(PSA; Parts Stress Analysis)의 실행에 의해 고장의 재현성을 평가 하였다.

<표 3> 전자부품의 전기 및 온도 Stress Margin 측정기준 및 결과

부품의 종류	전기적 Stress Margin
1. R-Carbon film	- 소비전력×50% - 소비전압×60%
2. R-Metal film	- 소비전력×50% - 소비전압×60%
3. R-Metal Oxide	- 소비전력×50% - 소비전압×60%
4. R-Solid	- 소비전력×50% - 소비전압×60%
5. R-Chip	- 소비전력×50% - 소비전압×60%
6. 전해 콘덴서	- 소비전압×70%
7. 세라믹 커패시터	- 소비전압×60%
8. Tantal 콘덴서	- 소비전압×70%
9. film 콘덴서	- 소비전압×60%
10. paper 콘덴서	- 소비전압×60%
11. Metallized film capacitor	- 소비전압×60%
12. Transformer류	- 소비전류×60%
13. 범용 diode	- 소비전류×50%
14. Zener diode	- 소비전력×50%
15. Bridge diode	- 소비전류×50%
16. 범용 Transistor	- 소비전력×50%
17. FET	- 소비전력×50%
18. POWER TR	- 소비전력×50%
19. 온도 FUSE	- 소비전류×70%
20. 통형 FUSE	- 소비전류×70%
21. chip fuse	- 소비전류×70%
22. IC 류	- 소비전력×50%
23. Network 저항	- 소비전력×50%

3.1.5.7 가속신뢰성 시험 모델 선정:

시험단계에서 Lee-Eyring Model (4.21)식을 적용한 이유는 PWB의 가속FACTOR가 온도, 습도, 전기적인 STRESS, 온도×전기적인 STRESS등의 복합환경적인 STRESS에 노출되어 있고, 전자제품의 속성으로 볼 때 고(高)신뢰성을 유지해야 하는 어려움이 있으며, 이러한 상황을 극복하기 위해서 Lee-Eyring model에 의한 가속계수의 산출과 시험을 실시하였다.

특히, 가속신뢰성 시험의 모델은 종류와 적용형태의 다양성으로 인하여 매우 한정적인 적용형태를 보이고 있으며, 이러한 문제점들이 현업적용을 어렵게 하고 있다.

3.1.5.8 HALT시험을 위한 가속계수 산출:

가속사용조건 100%RH, 정격전압×120%(1.2), 100℃ 조건: 정상사용조건 보다 복합조건으로 가속시킨 것이며, Eyring 응용모델에 적용하였을 경우 가속 계수가 2867.34로 정상조건보다는 가속된 45.826hrs으로 시험시간이 단축되었다.

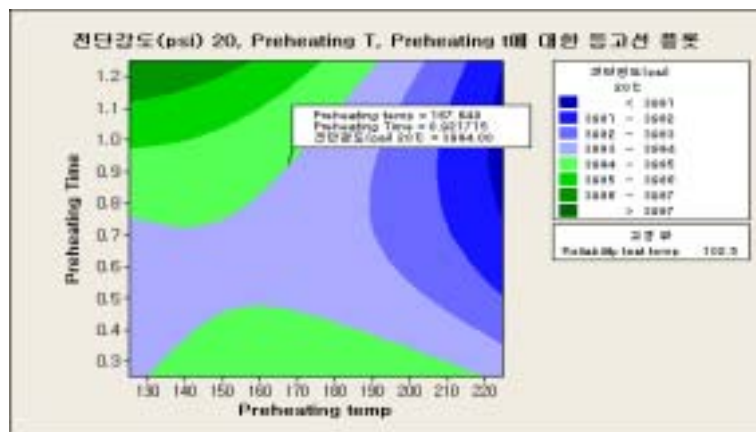
3.1.5.9 가속신뢰성시험실시:

가속신뢰성시험을 단시간에 진행시키기 위해서 HALT조건으로 45.83시간 시험을 진행하였으며, 적용한 시험장비는 PCT(Pressure Cooker Tester)를 채용하였고, 시험실시를 위한 전제조건으로서 전압인가를 위한 시험JIG의 구성과 DI WATER(순수; 절연저항18MΩ 이상의 절연성을 가진 증류수)를 적용하였으며, 시험JIG의 구성은 PWB가 활전 상태를 유지할 수 있는 조건에서 온도 및 습도를 인가 할 수 있는 PCT 장비를 사용하여 시험을 진행하였다.(PCT+bias시험조건으로 시험실시)시험에 적용된 PWB는 세탁기,에어컨,밥솥 등 일상생활과 밀접한 연관을 지닌 제품을 기준으로 하였다.

3.1.5.10 후처리 및 DOE(반응표면분석)분석

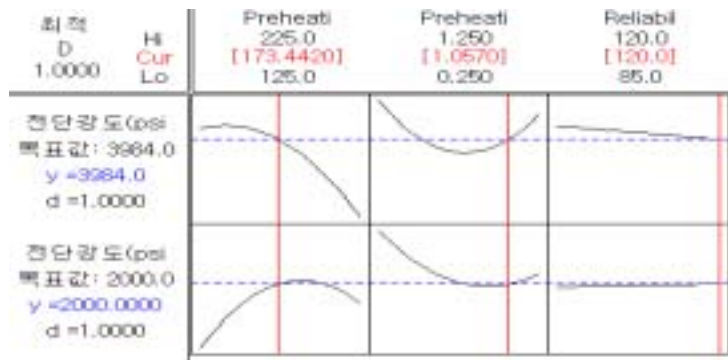
후처리는 시험완료 후 상온에서 24시간이상 방치한 이후에 환경물질로 분류된 납성분이 제거된 Soldering의 특성이 과연 PWB ASS'Y에서 해당 특성 값을 유지하는가에 대해 집중적인 분석을 하였다.

<그림 3> Soldering과 신뢰성 시험온도, 전단강도와의 DOE 모델에서 주변온도 20℃ 조건을 근거로 미니탭 프로그램에서 반응표면분석을 실행한 결과의 그래프이며, 최적 상태에서 전단강도값이 3984psi를 보여주고 있다.



<그림 3> 반응표면분석 결과 등고선 플롯상의 최적 조건검출

<그림 4> Soldering과 신뢰성 시험온도, 전단강도와의 DOE 모델을 근거로 미니탭 프로그램에서 반응표면분석을 실행한 결과의 그래프이며, 주변온도20℃에서 최적전단강도값은 3984psi, 주변온도100℃에서 최적전단강도값이 2000psi를 나타내고 있다.



<그림 4> 반응표면분석 결과 최적 전단강도의 도출

3.1.5.11 시험결론

환경물질이 제거된 상태에서 전자제품에 적용되는 PWB ASS'Y의 신뢰성이 얼마나 유효할 것인가라는 관점에서 볼 때 상당히 의미 있는 시험이었으며 납성분이 제거된 무연Solder가 전자제품의 내구수명을 떨어뜨리는 것은 사실로 입증되었으며, 그 원인은 다음과 같다.

고온soldering으로 인한 과도한 열충격 발생: 무연솔더의 특징이라고 볼 수 있는 고온solder는 soldering과정에서 다른 부품에 많은 기계적인 충격을 가하게되며, 이로 인한 피로현상으로 제품의 내구성과 기계적인 강도가 현저히 떨어지는 결과를 초래하였다.

무연솔더로 인한 CTE(열팽창계수)의 과도 현상 발생: 무연솔더로 인한 이종(異種)금속간의 과도한 열팽창은 금속간 특히, 동박과 solder사이의 심한 인장 및 압축현상을 촉발시킴으로서 동박들뜸 현상과 각종 Crack현상을 유발하였으며, 대부분의 전자부품(IC, TR, Diode, Relay, SCR, Tantal 전해컨덴서, Ceramic 컨덴서,저항 류 등)의 wire 단과 PWB동박 접합부에서 열적피로현상으로 인한 Crack과 Short현상들이 다발하였다.

무연solder의 적용에 대응하지 못한 PWB의 탑재부품: 무연 solder를 적용하는 과정에서 고려해야 할 PWB전반의 내열특성을 평가하여야 하나 현실적인 이유로 인하여 내열특성을 과소평가한 결과로 내열 특성이 낮은 부품들이 열적피로현상(soldering 시점의 열적 피로)으로 인하여 특성값이 열화되는 현상을 나타내었다.

상기의 원인들을 기준으로 볼 때 환경물질에 대한 대체설계의 과정이 결코 쉬운 일은 아니나, 설계단계에서 환경물질 관련한 부품과 제조공정에 대한 대체설계를 강구한다면 충분히 문제점을 개선할 수 있다는 결론에 도달하였다. 향후에 이런 현상을 제거하고 보완하기위한 다양한 개선작업이 이루어져야 할 것으로 판단되며, Pb free solder의 적용 혹은 환경물질이 배제된 PWB의 신뢰성을 확보하기 위해서는 부품과 부품간의 Matching 특성을 보다 면밀하게 분석하여 현장에 적용하여야 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 환경물질을 제거한 PWB의 신뢰성평가 방법에 대해 연구하였다. 최근 들어 환경물질에 대한 세계 각국의 규제현황은 유럽의 전자, 전기기기의 폐기에 관한 EU지령에 의한 유해물질사용제한(Restriction on the use of Certain Hazardous Substances; RoHS)과 생산자 폐 전기, 전자제품회수, 재생의무(Waste Electric and Electronic Equipment; WEEE)에 의한 규제환경물질인 납, 수은, 카드뮴, 6가 크롬, 할로겐 난연제(PBB, PBDE)로 집중되는 현상이 발생되고 있으며, 해당되는 적용제품은 대형가전, 소형가전, IT, 통신기기, 일반 민생기기, 조명, 전동공구, 완구, 레저기기, 의료기기, 모니터 기기, 자동판매기가 주요대상이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 대상 제품에 공통적으로 적용되는 PWB에서 환경물질을 제거한 이후에 발생될 신뢰성 문제의 예방을 위한 방법으로서 신뢰성평가 방법을 연구하였다.

연구결과로서 FMEA 혹은 FMECA의 실행을 근거로 PWB(환경물질이 제거된 PWB)의 주요 스트레스 요인을 분석하였으며, 이러한 분석결과를 토대로 하여 가속수명시험(ALT)을 위한 구체적인 가속모델을 설계 할 수 있었다.

물론 과거의 가속모델 수식 자료를 근거로 진행하였으나, 대다수 가속모델 수식의 경우 대부분이 현장의 경험식을 기초로 전개되는 특성으로 인하여 수식부분의 검증체계가 타 부분에 비해 허술하지만, 선진 기업과 수많은 석학들의 경험식을 기업현장에서 그대로 사용하고 있는 실정이다. 이러한 현상의 원인은 재료 및 부품의 복잡성 때문으로 추정하고 있다.

본 연구에서 제안하는 환경물질을 제거한 PWB의 신뢰성평가방법 가속 모델 수식은 R.E.Thomas가 제안한 Eyring Model식에 습도 가속성 부분을 추가 적용함으로써 복합 가속수명시험을 통해 환경물질이 제거된 PWB의 신뢰성을 평가 할 수 있었으며, 평가 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 온도 스트레스에 의한 PWB(환경물질이 제거된 PWB)의 고장발생 원인은 열팽창계수 문제로 밝혀졌으며, 이것은 PWB내부의 PCB와 납성분이 제거된 각종 부품의 리더 와이어와의 접합성 문제로부터 발생된 것으로 판단된다.

둘째, 가속모델식을 설계하는 단계에서 예견되었던 습도스트레스에 의한 PWB(환경물질이 제거된 PWB)의 고장발생 원인은 각종 부품의 package의 내열성을 높이기 위한 bromide성분이 환경물질로 규제됨에 따라 non-bromide계 에폭시로 전환하는 과정에서 흡습성이 높은 에폭시가 형성됨으로 인한 에폭시내부의 popcorn 현상으로 인하여 부품내부의 micro-crack을 유발시키는 문제를 발생시켰다. 따라서 습도스트레스의 고장재현성을 확인 할 수 있었다.

셋째, 전압 스트레스에 의한 PWB(환경물질이 제거된 PWB)의 고장발생 원인은 부품의 전압에 의한 부하경감(derating)특성으로 인하여 전기적인 서어지(surge)전류(current)에 의한 부품내부 번트(burnt)등의 문제가 발생되는 것을 재현 할 수 있었다.

넷째, 온도×전압 스트레스에 의한 PWB(환경물질이 제거된 PWB)의 경우는 전압 및 온도의 복합적인 부하경감특성으로 인하여 반도체 부품류의 솔더 접합부 온도의 급격

한 상승으로 인하여 micro-crack 및 electro-migration 현상의 재현이 검증되었다.

환경규제물질이 PWB에서 제거된 이후의 제품신뢰성에 대한 평가방법을 기존의 경험식에 의존해서는 곤란하며, 본 연구에서 도출된 경험식의 적용에 근거하는 신뢰성평가 및 시험이 필요하다고 판단된다.

특히, 솔더링 이후의 전단강도의 비교에서 상당한 차이를 나타내고 있으며, 이러한 차이로 인하여 납 성분이 제거된 이후의 문제점은 강도가 약해지는 약점을 어떻게 보완 할 것인가라는 것이다. 플라스틱 재질의 부품류는 이미 난연성에 대한 문제가 발생되고 있으며, 대체물질로 제시되고 있는 플라스틱의 경우 원가상승문제로 인한 비용적인 부담으로 작용하고 있다.

선진기업들은 이미 장기간에 걸쳐서 다양한 환경물질규제 정책에 대비하여 왔으나 우리기업의 경우 이제 시작단계에 있으며, 세계적인 환경물질규제정책의 정보관리체계 또한 미흡한 수준이다. 기업의 제조공정을 송두리째 바꾸어야 할 정도로 제조단계의 환경물질대응체계는 복잡하고 비용이 많이 수반되는 프로세스임에도 불구하고 현재 우리가 처한 현실은 어려운 상황에 있다.

대규모적인 공정개선이나 설계변경을 실행하지 않는 범위에서 환경물질규제 정책을 지혜롭게 극복해야 하겠다.

본 논문에서 응용한 Eyring모델은 아직까지는 경험식에 의존한 모델 수식이므로 이론적인 규명이 더 필요하며, 현장에서 더욱더 많은 시험데이터의 분석과 연구를 통하여 수식적인 규명과 이론적인 보완을 하여야 할 것으로 본다.

그리고, 각종 재료, 소재, 부품에 대한 활성화 에너지 값에 대한 데이터 베이스 구축도 강화하여야 하겠다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 박성현 · 박영현 (1997), “통계적 품질관리”, 민영사, pp. 514~526.
- [2] 박성현 (2003), “현대실험계획법”, pp. 521~564.
- [3] 이근철 (1992), 「FTA안전공학」, 기전연구사.
- [4] 이종범 (1995), “전자기기용 Plastic Film Capacitor에 대한 가속시험기법 연구”, 한국신뢰성연구회(한국표준협회,공업진흥청), 신뢰성 · 보전성 심포지엄
- [5] 이종범 · 조재립 (2003), “환경물질에 대한 사용 신뢰성평가 방법에 관한 연구”, 대한품질경영학회지, Vol. 31, No. 4 pp.226~238.
- [6] 이종범 · 조재립 (2000), “자동차 전장부품의 초 가속신뢰성 수명시험방법에 관한 연구”, 대한품질경영학회지, Vol. 28, No. 4 pp. 16~28.
- [7] 이치우 · 김선진 · 이성우 · 정상영 (1993), “신뢰성공학”, 원창출판사, pp. 21~79.
- [8] 윤호규 · 김환건(2001), 「고분자 전자 재료」, 문운당.
- [9] 윤창인 (2000), “OECD의 권고이행평가 및 향후과제”, 내외경제연구원.
- [10] 조재립 (1995), “선형비용모델을 이용한 계수선별형 검사방식의 최적설계”, 대한품질경영학회지, 제23권, 제4호, pp. 74~89.

- [11] 조재립 (2001), 「품질경영」, 청문각.
- [12] 표면실장기술 (1996), Vol.6 No.1.
- [13] 환경부(2003), 「환경백서」
- [14] BRYAN DODSON & DENNIS NOLAN(1998), “The Complete Guide to the CRE”, Quality Publishing, pp. 291~369.
- [15] BRYAN DODSON & DENNIS NOLAN (1999), “Reliability Engineering Hand-book”, Quality Publishing, pp. 320~403.
- [16] D.H, Stamatis(1995), “Failure Mode and Effect Analysis” ASQC Quality Press, pp. 25~247.
- [17] E.E. LEWIS(1994), “Introduction to Reliability Engineering”, WILEY, pp. 142~244.
- [18] Elsayed A. Elsayed(1996), “Reliability Engineering”, ADDISON_WESLEY pp. 378~409.
- [19] GERALD SMITH.(1995). “Statistical Process Control and Quality Improvement” Prentice Hall, pp. 137~148.
- [20] Ning-Cheng Lee. (1999). “lead-free soldering -where the world is going” IEEE.
- [21] Official Journal of the European Union.(2003. 2. 13). “Restriction on the use of Certain Hazardous Substances.” RoHS, EU.
- [22] Wayne Nelson.(1990). “Accelerated Testing” Statistical Models, Test plans, and Data Analyses. John Wiley & Sons, pp. 77~94, 99~106.
- [23] 越川清重(1990), “電子部品の信頼性試験”, 日科技連, pp. 156~169.