

## 국방 전자장비의 무연솔더 접합 신뢰성 검증기준 개발 가이드라인

홍 원 식<sup>\*†</sup> · 구 기 영<sup>\*\*</sup> · 황 운 희<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>전자부품연구원 부품소재물리연구센터<sup>\*\*</sup>국방기술품질원 유도전자기술팀

## Verification Guideline of Pb-free Solder Joint Reliability for Military Electronics

Won Sik Hong<sup>\*†</sup>, Gi-Young Goo<sup>\*\*</sup> and Un Hee Hwang<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>Components and Materials Physics Research Center, Korea Electronics Technology Institute<sup>\*\*</sup>Missile and Electronics Research Team, Defense Agency for Technology and Quality

†Corresponding author : wshong@keti.re.kr

## 1. 서 론

전기전자분야의 무연솔더(Pb-free solder)의 적용은 유럽의 특정 유해물질 사용제한 지침(RoHS)<sup>1)</sup>과 폐기물 처리지침(WEEE)<sup>2)</sup>에 따라, 규제 예외조항의 품목을 제외하고 일반적으로 적용되고 있다. 최근에는 규제 예외조항에 포함된 제품 및 부품에 대해 규제대상으로 포함하는 RoHS II 규제가 진행되고 있다.

이러한 환경관련 규제는 모든 전자부품에 대해 무연화를 가속화 시키고 있다, 그 예로써, 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB)의 표면처리에 대한 무연화, 칩(chip) 부품과 같은 수동부품의 전극 표면처리

재료에 대한 무연화 뿐만 아니라 BGA(ball grid array) 패키지와 같은 IC 패키지 부품의 솔더 볼 및 리드 도금 재료도 무연화가 도입되었다.

그러나 국방, 우주항공 및 의료기기 분야에 대해서는 현재 RoHS 예외조항으로 분류되어 있어 무연화 적용 대상이 아니다. 의료기기 분야의 경우, 2014년부터 RoHS 적용대상으로 포함됨에 따라, 의료용 전자기기에 대한 무연솔더 적용방안 및 제품개발에 따른 안전적 확보가 요구되고 있다. 국방 및 우주항공용 전자장비에 대해서는 현재까지 무연화 적용을 위한 논의가 이루어지지 않고 있다. 그러나 국방분야에 대한 무연솔더 적용방안을 논의하는 이유는 전자부품의 수급이 불가능하게 됨에 따라 문제가 대두되기 시작하였다. 그리고 민

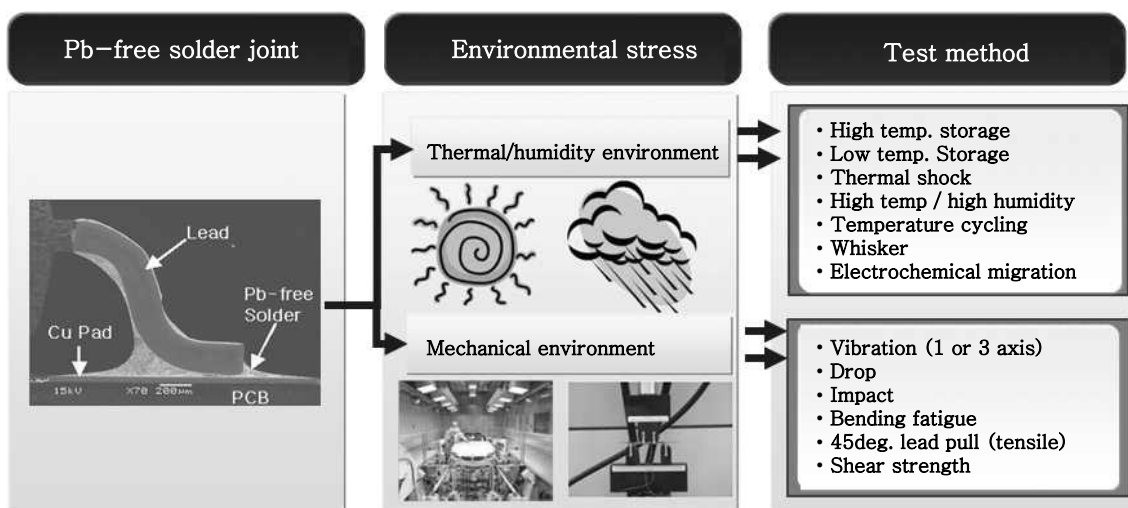


Fig. 1 Relationship between environmental stress condition and test method of Pb-free solder joint

군규격 부합화에 따라 민수 및 국방분야 전자기기용 전자부품의 공통 사용이 일반화 되고 있다.

현재 우리나라의 국방규격은 납(Pb)이 함유되어 있는 SnPb 솔더를 적용하는 것으로 되어 있다. 그러나 민수분야의 대다수 전자부품은 이미 무연화가 완료됨에 따라 부품의 표면처리, BGA용 솔더 볼 및 PCB 표면처리 등 모든 부품이 무연화가 이루어져 있다. 이러한 민수분야의 무연화에 따라 일부 납이 함유된 유연 전자 부품의 단종 및 수급 불가능에 따라 국방분야에서 유무연 부품이 혼재 사용되고 있으며, 이에 따른 솔더 접합부 수명검증 방안 및 혼재사용 타당성 검증이 요구되고 있다. 이러한 현상은 세계적으로 전자산업의 무연화 생산체제로 전환이 가속화 되고 있는 시점에서, 향후 국방분야에서 요구되는, 납이 포함된 유연부품의 수급이 불가능해질 것으로 판단된다. BGA 부품의 경우 이미 유연부품 수급 불가능에 따라 무연부품이 일부 적용되고 있는 실정이다. 이러한 경우, 가장 문제로 대두되는 것이 SnPb 솔더 페이스트와 무연솔더 볼의 접합관련 부분이다. 이러한 유무연 혼재 사용에 대한 솔더 접합부는 제품이 목표수명 주기 동안 안정적으로 사용되기 어렵다. 유무연 솔더가 혼재하여 사용된 접합부에서는 솔더링 후 장시간 사용기간 후 유연솔더 및 무연솔더이상 분리(phase partition)가 발생되며, 유연솔더 부분에서는 Pb-rich 지역이 형성됨에 따라 접합강도가 감소하여 접합부 파괴가 발생된다. 또한 솔더링 공정 온도가 유연솔더 조건에 설정되어 있어, 무연솔더 합금의 완전한 용융 및 응고가 이루어 지지 않고 있어, 공정불량을 유발하는 원인이 되고 있다. 접합공정 온도를 증가시키는 경우, 다양한 IC 부품, 플라스틱 사출물 및 PCB 등의 전자부품에 대한 내열온도 보증여부를 확인하여야 한다. 따라서 단순히 공정온도 증가로만 이러한 문제점을 해결할 수 없는 것이 공정개선의 어려운 점이다.

결국 유무연 솔더가 혼재 적용된 제품의 접합공정 온도를 증가시키거나 완전한 무연화를 적용한 경우, 솔더 접합부에 대한 신뢰성 및 접합수명을 검증하는 것이 요구되고 있다. 그러나 다양한 사용환경을 가지고 있는 국방 전자장비의 경우, 일률적으로 한 종류의 신뢰성 검증 시험규격을 적용할 수 없는 문제점이 이 있다. 국방분야의 경우, 육·해·공군의 작전 환경이 다르며, 이에 따라 전자장비의 사용환경 또한 서로 상이하다. 따라서 산업체 및 규격관리 측면에서의 접합신뢰성 검증 기준을 만들 수 있는 가이드라인의 개발 및 보급이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 국방분야에 대한 무연솔더 적용 전자장비의 무연솔더 접합신뢰성 검증방법을 수립하기 위한 절차 및 방법을 제시하였다.

## 2. 민수 및 국방 전자장비의 사용환경 분석

국방용 전자장비가 민수용 일반 전자제품과 가장 다른 차이점 중 하나가 제품이 사용되는 환경 및 목표수명일 것이다. Table 1은 국방 및 민수용 전자장비의 여러 가지 차이점을 비교한 결과이다. 국방용 전자기기는 10년 이상의 장시간 목표수명을 요구하고 있으며, 사용환경 또한 실외의 가혹한 환경에서 높은 온도, 습도, 진동 및 충격에 의한 스트레스를 받고 있으며, 각각의 스트레스 인자가 복합된 복잡한 스트레스 인자 상황에서 사용되고 있다. 사용 중 제품이 겪는 온도범위는 최저  $-55^{\circ}\text{C}$ 에서 최대  $150^{\circ}\text{C}$  범위까지 사용되고 있어 온도편차( $\Delta T$ )는 최대  $175^{\circ}\text{C}$ 까지 발생된다. 이러한 사용환경에서 제품에 요구하는 평균 고장률(failure rate)은 일반적으로 0.1% 수준이며, 통상 0%를 요구하기도 한다<sup>3,4)</sup>. 결국 무연솔더가 적용된 민수용 전자제품의 요구성능 보다 훨씬 가혹한 조건의 성능을 요구하고 있어, 무연솔더가 적용되거나 유무연 솔더가 혼재 적용된 경우, 반드시 접합부에 대한 수명 및 신뢰성 검

Table 1 Comparison for use environment of military electronics with consumer electronics<sup>3)</sup>

	Military electronics	Consumer electronics
Stress factors	Complex & combined high stress (high temperature, high humidity, high vibration, high impact)	Simple combined low stress (temperature, humidity, vibration, dropping)
Use temperature	$-55 \sim (125 \sim 150)^{\circ}\text{C}$	$-20 \sim +85^{\circ}\text{C}$
Lifetime	10~20 years (over 10 years warranty)	5~10 years (1 year warranty)
Use environment	Outdoors (mountains, seashore, in the water, a high altitude)	Indoors, office
Failure rate	near Zero (~0%)	< 10%

증이 요구된다.

### 3. 국방 무연솔더 적용 가이드 개발 절차

#### 3.1 무연화 전자장비의 솔더 접합수명 검증기준 수립 절차

국방 전자기기에 대한 무연솔더 접합수명 검증을 위한 일반적인 시험기준 설정 절차는 Fig. 2와 같다. 첫 번째 단계로, 제품의 실제 사용환경 및 저장환경에 대한 분석이다. 이것은 제품이 필드에서 경험하게 되는 다양한 종류의 스트레스에 가장 큰 영향을 미치는 것으로, 실제 제품이 사용되는 환경을 정량적으로 구별할 수 있도록 환경조건을 조사하고 분류하는 단계이다. 분류되는 항목은 온도, 습도, 전압, 전류, 진동, 충격 등의 단위 조건으로 분류한다. 분류된 항목에 따라 제품이 받는 최대 및 최소값을 조사한다. 이 데이터는 이후 시험조건 설정의 기본적인 범위설정의 근거가 된다. 두 번째 단계는 실제 사용환경에서 발생하는 국방 전자기기의 주요 고장 모드 및 메커니즘을 조사하여 분류하는 것이다. 사용환경 중 발생된 고장이력을 조사하고 분류함으로써 주로 발생하는 고장 및 파괴현상을 정리하는 단계이다. 세 번째 단계는 앞의 기초 확보된 자료를 기반으로 무연 또는 유무연 혼재 사용된 솔더 접합부의 신뢰성 검증을 위한 시험항목 및 시험조건 결정이다. 이때 동시에 고려할 사항으로는 신뢰성평가 중 고장 유무를 판단하기 위한 성능평가 및 특성평가 항목과 기준 값의 결정이다. 이 단계까지 완성되면, 이후

시험 진행을 위한 시험계획을 수립하고, 시험을 진행한 후 데이터 분석 및 해석을 통해 제품의 신뢰성 검증을 완료하게 된다.

#### 3.2 주요 고장모드 및 고장 메커니즘 도출

일반적으로 나타나는 전자장비의 고장모드는 특성변화(parameter drift), 단선(open), 단락(short) 및 전기적 특성 불안정(electric instability)의 4가지 형태로 나타난다. 또한 고장이 발생하는 형태는 2가지로 구별할 수 있는데, 과도한 스트레스(overstress) 인가와 마모(wear-out)에 의한 고장으로 분류한다. Overstress는 제품의 설계한계를 초과한 외부 스트레스가 인가되는 경우 고장이 발생하는 것이며, wear-out은 제품이 목표수명까지 도달함에 따라 발생하는 고장 발생이다.

고장 메커니즘(failure mechanism)이란 솔더 접합부의 파괴를 유발시키는 기계적, 전기적, 화학적, 물리적 또는 복합된 스트레스의 결합과정으로 정의한다. 이러한 잠재적인 고장 메커니즘의 원인과 스트레스 인자가 결합하여 특정 형태의 고장모드를 유발하게 된다<sup>10-13</sup>. 따라서 스트레스 인자, 고장 메커니즘 및 고장모드를 분류하고 그 원인을 규명하는 과정이 솔더 접합수명 검증을 위해서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. Fig. 4는 일반적인 나타나는 전자부품의 고장형태에 따라 스트레스 인자와 고장 메커니즘을 분류한 사례이다. 사용환경에서 인가되는 스트레스 인자에 따라 여러가지 고장현상이 유발될 수 있음을 알 수 있다.

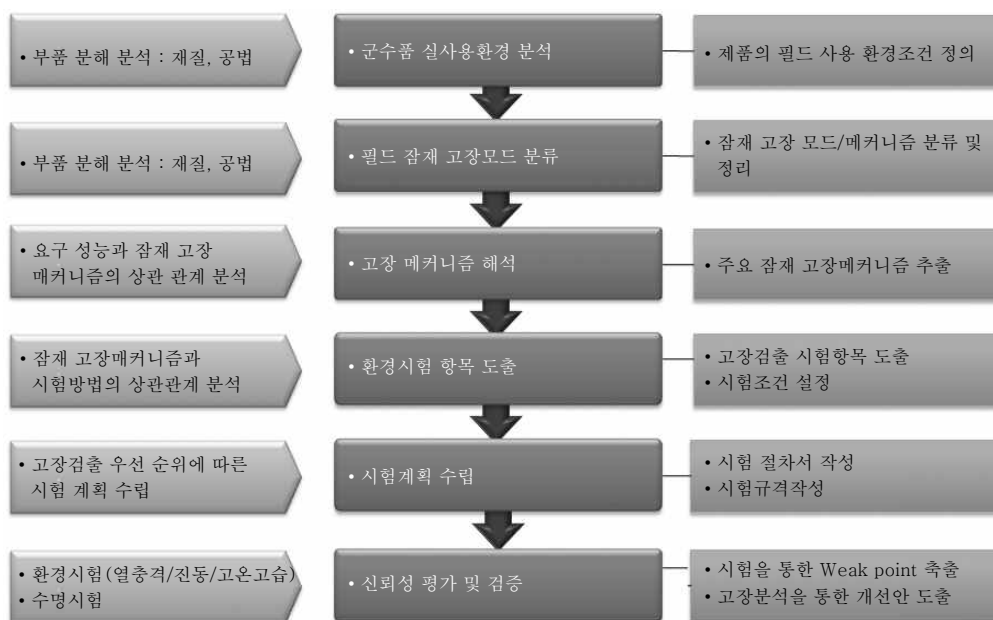


Fig. 2 Verification procedure of Pb-free solder joint reliability for military electronics

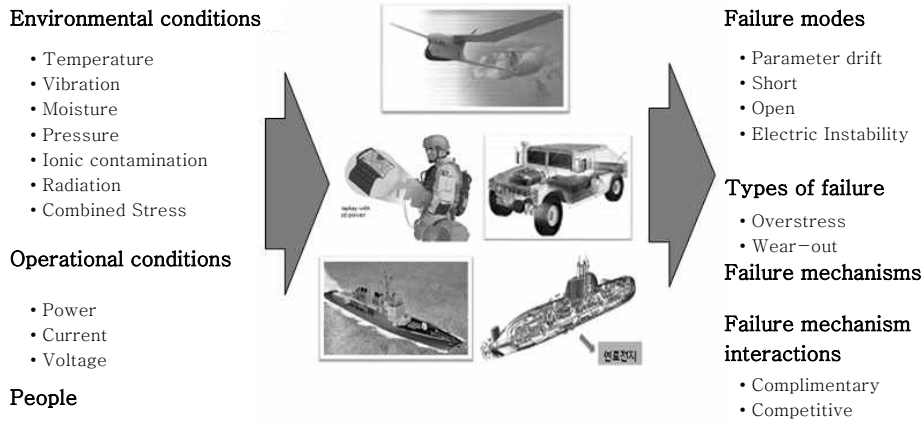


Fig. 3 Identification of failure mode and mechanism for Pb-free solder joints of military electronics

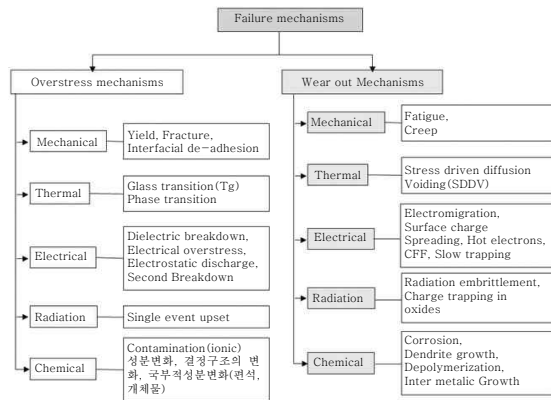


Fig. 4 General classification of failure mode and mechanism in electronic assemblies

Table 2 Various stress factors led to failure mode of electronic assemblies in use environment

Stress	Failure factors
Physical stress	Temperature, humidity
Mechanical stress	Vibration, fatigue, creep, shock, abrasion, tensile, compression, impact
Electrical stress	Over voltage/current, surge, spike, electrostatic discharge, EMI, power
Chemical stress	Electrochemical reaction, corrosion
Radiation stress	Nuclear, ionizing, heavy ion

Table 2는 사용환경 중 인간되는 다양한 스트레스 인자들로 인해 발생 가능한 고장모드의 유형에 대한 사례이다. 물리적 인자로는 온도, 습도 및 온습도 복합인자에 의해 열팽창계수(CTE)의 차, 박리(delamination), 전기화학적 이온 마이그레이션(electro-chemical ion

migration)<sup>5)</sup> 및 부식<sup>6,7)</sup> 등의 고장형태가 나타날 수 있다.

기계적 스트레스에 의한 고장으로는 기계적 반복응력, 진동, 충격, 마찰 등에 의해 솔더 접합부의 균열을 유발함으로써 고장형태를 유발할 수 있다. 또한 전기적 스트레스로는 과전압(over voltage), 과전류(over current), 정전기(electrostatic discharge), 간섭(interference) 등에 의한 전기적 고장형태가 나타난다.

그러므로 제품의 실사용 환경에서 스트레스 인자를 명확히 분류해 내는 것이 이후 신뢰성검증을 위한 가장 중요한 부분이라 할 것이다. 대표적으로 이러한 고장모드와 메커니즘을 고장을 유발하는 스트레스 인자를 기준으로 정리한 사례를 Table 3에 나타내었다<sup>8)</sup>. 이러한 고장인자에 따른 분류를 통해 주요 고장을 유발하는 스트레스 인자를 도출할 수 있게 된다.

### 3.3 고장 메커니즘 기반의 신뢰성평가 항목 도출

실사용 환경조건으로부터 도출된 주요 고장모드와 고장메커니즘을 분류하면, Table 3와 같이 고장을 유발하는 주요 인자(스트레스)를 구별할 수 있게 된다. 이러한 고장유발 인자를 실험적으로 인가할 수 있도록 실험 항목 및 조건을 설정하는 것이 신뢰성평가 항목 도출 단계이다. 예를 들어, 솔더 접합부의 주요 필드고장을 조사한 결과 접합부의 균열이란 결론이 도출되었다면, 균열의 원인이 무엇인지를 분석하는 것이 고장메커니즘 분석이다. 고장원인이 CTE에 의해 발생할 수 있으며, 크립(creep) 또는 열적/기계적 피로파괴에 의해 발생할 수도 있다. 이러한 원인이 열적 피로파괴라고 한다면, 실험방법으로 우리는 열사이클시험(thermal cycling test)을 선정하게 된다. 고온과 저온의 반복적 열사이클시험을 통해 솔더 접합부의 반복적인 피로 스

트레스를 인가할 수 있기 때문이다. 그 다음으로는 실험조건을 설정하여야 한다. 실제 제품의 사용환경 조건에서의 최저 및 최고 사용온도를 조사하여, 실험조건으로 사용하게 된다. 일반적으로 군수용 전자장비는 최저 -55°C에서부터 최고 125-150°C범위에서 사용되고 있으며, 제품이 최저/최고 온도를 경험하는 주기가 1년에

100-265 cycles 정도 반복 사용되고 있다<sup>7)</sup>. 따라서 시험조건을 -55-150 °C, 최소 1000 cycles을 반복시험 한다면, 빈도가속의 개념으로 볼 때, 10년의 사용주기를 경험하게 되는 것이다. 이러한 제품의 사용주기, 목표수명(lifetime) 및 사용환경을 분석한 데이터를 기반으로 솔더 접합부의 신뢰성평가 항목 및 조건을 설정할 수 있다. 시험항목의 예는 다음 절에서 자세히 기술하였다.

Table 3 The relation among failure modes, mechanism and factors<sup>8)</sup>

Failure Factors	Failure Mechanisms	Failure Modes	
Diffusion	Substrate	Crystal defect	Decreased breakdown voltage
Junction	Diffused junction	Impurity precipitation	Short circuit
	Isolation	Photoresist mask misalignment	Increased leakage current
Oxide film	Gate oxide film	Mobile ion	Decreased breakdown voltage
		Pinhole	Short circuit
	Field oxide film	Interface state	Increased leakage current
		TDDB	$I_{leak}$ and/or $V_a$ drift
		Hot carrier	
Metallization	Interconnection	Scratch or void damage	Open circuit
	Contact hole	Mechanical damage	Short circuit
	Via hole	Non-ohmic contact	Increased resistance
		Step coverage	
	Weak adhesion strength		
	Inproper thickness		
	Corrosion		
Electromigration			
Passivation	Surface protection film	Pinhole or crack	Decreased breakdown voltage
		Thickness variation	Short circuit
	Interlayer dielectric film	Contamination	Increased leakage current
		Surface inversion	$I_{leak}$ and/or $V_a$ drift
Die bonding	Chip-frame connection	Die attachment	Noise deterioration
		Die crack	Open circuit
Wire bonding	Wire bonding connection		Short circuit
			Unstable/intermittent operation
	Wire lead		Increased thermal resistance
		Off-center wire bonding	Open circuit
		Damage under wire bonding contact	Short circuit
Sealing	Resin		Increased resistance
	Sealing gas	No sealing	Open circuit
		Water penetration	Short circuit
		Peeling	Increased leakage current
Input/output pin	Static electricity	Surface contamination	
		Insufficient airtightness	
Others	Alpha particles	Impure sealing gas	
		Particles	
	High electric field	Diffusion junction breakdown	Open circuit
		Oxide film damage	Short circuit
Noise	Metalization defect/destruction	Increased leakage current	

### 3.4 무연솔더 접합부 신뢰성평가 항목 사례

앞의 내용에 따라 솔더 접합부에 대해 순차적으로 정립된 접합신뢰성 검증항목의 사례를 보면 다음 Table 4와 같다. 환경적, 기계적 그리고 전기적 환경으로부터 야기되는 고장 메커니즘에 따라 각기 시험항목이 다르게 된다. 따라서 시험항목을 결정할 때, 품질기능 전개 (quality function development, QFD)를 활용한 FMEA(failure mechanism & effective analysis) 도표를 활용하면 효과적이다.

Table 5는 솔더 접합부에 대해 FMEA 도표를 활용하여 정리한 예 이다. 가로축에는 고장을 유발하는 주요 메커니즘이 중요도 순으로 배열되며, 세로축에는 스트레스 인자(stress factors or failure factors)가 나열되게 된다. 메커니즘에 가장 많은 영향을 미치는 인자의 중요도에 따라 각각 구별될 수 있도록 기호나, 숫자 등으로 분류한다. 그렇게 되면 가장 중요도가 많은 메커니즘과 그 메커니즘에 영향을 미치는 인자를 중요도 순으로 도출할 수 있게 된다. 이러한 중요 인자에 따라 시험항목을 결정하면 된다. 주요인자는 가장 기본적인 물리적 값인 온도, 습도, 전압 등으로 나타남으로, 이를 인가할 수 있는 시험방법을 결정하면 된다. 솔더

Table 4 Reliability test conditions based on failure mode and failure mechanism

Stresses	Test methods	Test methods related to failure mechanism
Environmental	Thermal cycling test	Thermal fatigue, thermo-mechanical fatigue, whisker growth, diffusion,
	Thermal shock test	CTE mismatch
	High temperature storage test High temperature & high humidity test	Diffusion, IMCs growth, corrosion, electrochemical migration, whisker growth
Mechanical	Bending fatigue test	Board warpage, repeatable stress
	Creep test	Creep deformation: temperature, constant stress, time
	Drop/Impact test	stress during transformation and handling
	Vibration test	use environment or handling etc
Electrical	Operation condition	Applying full function, electrically
	Stand-by condition	Applying constant voltage and current

Table 5 Example of failure mechanism & effective analysis

Failure mechanism \ Stress	Diffusion	Thermo-mechanical fatigue	EOS	Creep
Temperature	◎	○	○	◎
Humidity	◇	◇	◇	
Temp. change	○	◎	-	
Voltage	-	◇	◎	-
◎ very important, ○ important, ◇ normal, - none				

접합부의 신뢰성검을 위해 사용되는 시험종류는 열충격 시험, 열사이클시험, 고온고습시험이 환경시험으로 주로 활용되고 있다. 기계적 시험항목으로는 인장강도, 전단 강도, 굽힘피로시험, 낙하시험, 진동시험 및 충격시험 등이 활용되고 있다. 또한 일정하중에서 장시간 고온에 노출되는 솔더 접합부에서는 크립시험도 활용되고 있다.

### 3.5 시험 샘플 수 결정

시험항목과 시험조건이 결정되었다면, 그 다음으로는 시험 샘플 수를 결정하여야 한다. 일반적으로 금속분야에서 사용되는 샘플 수는 5-10개 정도를 사용하여 얻은 데이터의 최소 및 최대 값을 제외한 8개의 산술적 평균 값이 사용되고 있다. 그렇지만, 이 경우 산술적 평균의 값은 얻을 수 있지만, 데이터의 신뢰도, 실험적 오차수준, 데이터의 산포 및 분산정도를 정확히 파악하기는 어렵다. 물론 적은 양의 데이터를 이용하여 통계적 데이터를 확보할 수 있지만, 신뢰도 측면에서 낮은 수준으로 도출될 것이다. 따라서 정량적인 데이터 분석을 위해 정확한 샘플 수가 우선적으로 정의되는 것이 필요하다.

시험대상 제품의 고장분포 및 고장률을 모를 경우, 일반적으로 이중 정규분포를 가정하여 다음 식(1)에 의해 샘플 사이즈를 결정할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$N = \ln \beta / \ln [1 - (p+)] \tag{1}$$

여기서, N은 시험 시편 수, β는 (1-신뢰수준)이고, p+는 고장률 또는 신뢰수준 상한 값이다.

예를 들어, 고장률이 0.1(10%)이하 이고, 신뢰수준이 90% 수준인 경우, 시험시편의 수는 어떻게 결정할 것인지 정량적 도출이 요구된다. 이 경우를 식(1)에 대입하면 다음 식(2)와 같이 계산되며, 최종적으로 시편

의 수는 22개가 도출된다.

$$N = [\ln(1 - 0.9) / \ln(1 - 0.1)] = \ln(0.1) / \ln(0.9) = -2.3 / -0.105 = 21.8 = 22 \tag{2}$$

22개의 샘플 수가 갖는 의미는 제품의 신뢰수준을 모르는 경우, 시험자는 특정 신뢰수준을 정의하고 정규 분포의 고장분포를 갖는 것으로 가정함으로써, 샘플 사이즈에 제한되지 않는 고장률을 구할 수 있게 된다. 이것을 역으로 이용하면 신뢰수준에 독립적인 샘플 사이즈, 즉 시험 시편의 수량을 결정할 수 있게 된다.

따라서 일반적으로 신뢰되는 수주의 샘플 수는 22개를 적용하는 것이 이론적으로 적합할 것으로 판단된다. 그러나 샘플의 가격이 고가이고, 수량에 제한을 받을 경우, 샘플 수량을 5개 이내로 조정하기도 한다. 그러나 이 경우에는 신뢰수준이 낮아지는 것은 피할 수 없다. 그러나 개발 초기단계에서 높은 신뢰수준을 설정하고 실험하기는 현실적으로 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 초기에는 낮은 신뢰수준의 샘플 사이즈를 가져가며, 개발 완료단계에서는 최종적으로 신뢰수준을 단계적으로 높이는 방향으로 실험이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

국방분야의 무연솔더는 현재까지 적용되고 있지 않다. 그러나 유연부품의 단종으로 민수용 전자부품을 일부 사용함에 따라, 무연솔더가 적용된 부품이 일부 적용되고 있다. 이런 경우 유무연 솔더가 혼재 적용된 부품의 접합수명 검증이 요구된다. 다양하며 가혹한 전장 환경에서 사용되는 국방 전자기기는 단일화된 신뢰성 평가기준을 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 다양한 사용환경에 의해 인가되는 스트레스 인자에 따라 솔더 접합수명을 검증하기 위한 시험 항목 및 조건을 결정하는 절차와 방법에 대해 체계적으로 분석하고 정형화 하였다. 이러한 접합신뢰성 개발 가이드라인은 국방 무기 및 비무기 체계의 무연솔더 적용을 위해 선행적으로 확립되어야 할 부분으로써, 본 연구 결과는 국방분야 무연화 대응을 위한 기초자료로 활용될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 민군규격통일화사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council, Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, EU (2003)
2. Commission of the european communities, directives of the european parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (2008)
3. IPC 9701, Performance test methods and qualification requirements for surface mount solder attachments (2002), 4
4. Jaesseong Jeong, Chulmin Oh, Gi-Young Goo, Young-Ho Yoon, Un Hee Hwang and Won Sik Hong, "Reliability Validation Methodology for Implementation Pb-free Solder to Military Electronics", Journal of KWJS, 29-4 (2011) 373-382 (in Korean)
5. W. S. Hong, S. B. Jung and K. B. Kim : Analysis Method of Metallic Ion Migration, Journal of KWJS, 23-2 (2005), 138-146 (in Korean)
6. W. S. Hong and K. B. Kim : Tafel Characteristics by Electrochemical Reaction of SnAgCu Pb-Free Solder, Korean Journal of Materials Research, 15-8 (2005), 536-542 (in Korean)
7. W. S. Hong, W. S. Kim, S. H. Park and K. B. Kim : Polarization Behaviors of SnCu Pb-Free Solder Depending on the P, Ni, Addition, Korean Journal of Materials Research, 15-8 (2005), 528-535 (in Korean)
8. Shahrzd Salemi et all, Physics-of-Failure Based Handbook of Microelectronic Systems, RiAC & University of Maryland (2008), 84
9. IPC/JEDEC-9703, Mechanical Shock Test Guidelines for Solder Joint Reliability, Annex D-suggestions for Selecting Sample Size (2009), 28
10. C. Handwerker, J. Bath, E. Benedetto, E. Bradley, R. Gedney, T. Siewert, P. Snugovsky, J. Sohn: NEMI Lead-Free Assembly Project: Comparison Between PbSn and SnAgCu Reliability and Microstructures, SMTAi Conference Proceeding, (2003), 664-669
11. K. suganuma : Lead-free soldering in electronics, ISBN 0824741021, Marcel dekker Inc, USA, (2004)
12. P. L. Martin, "Electronic Failure Analysis Handbook", McGRAW-HILL, New York (1999)
13. W. S. Hong, W. S. Kim, N. C. Park and K. B. Kim, "Reliability Assessment for Electronic Assemblies with Electrical and Electrochemical Properties Measurement", Journal of KWS, 25-2 (2007), 184 (in Korean)



·홍원식  
·1968년생  
·전자부품연구원  
·Pb-free Solder, Life Prediction  
·e-mail: wshong@kети.re.kr



·황운희  
·1958년생  
·국방기술품질원  
·국방 전자통신  
·e-mail: uhhwang@chol.com



·구기영  
·1970년생  
·국방기술품질원  
·국방 전자통신  
·e-mail: kiyoung89@korea.com