

HALT 시험을 통한 HASS 시험의 설계 “HALT” Test with “HASS” Test of the Design

유 성 규* · 조 재 립** · 강 보 철***

Soung-Kyu Yoo* · Jai-Rip Cho** · Bo-Chul Kang***

Abstract

Through the process of HALT (Highly Accelerated Life Test) between 2003 to 2008, we are about to research on the design method for minimum test for all error modes that are classified and analyzed to obtain more margin able product.

1. 서론

1.1. HALT 시험의 도입 배경

기술의 발전 속도가 빨라짐에 따라서 소비자는 점점 높은 품질에 낮은 시장가격을 가진, 그리고 새로운 제품을 요구하고 있다. 이로 인하여 기업은 빠른 시장의 변화와 소비자의 욕구에 맞추기 위해 충분히 검증 되지 않은 기술과 부품을 적용하게 되고 이로 인하여 개발 위험이 증대되어 가고 있다. 또한 짧아져 가는 개발 사이클로 인하여 발생하는 신뢰성 검증의 부족은 기업을 좀 더 짧은 기간 짧은 시간에 제품의 평가를 할 수 있는 가속 수명시험을 생각하게끔 유도하고 있다. 그중 주어진 시간 내에서 더 많은 제품의 성능 정보와 잠재 고장모드, 설계 취약점 등의 신뢰성관련 정보를 빠르게 얻으면서 동시에 필드 고장에 대한 예방적인 효과를 볼 수 있는 HALT 시험은 상당히 매력적으로 볼 수 있다.

미국 Hughes 연구에서 1988년 Gregg K. Hobbs 에 의해서 발표되어 현재 국내외 우수 메이커에서 이를 활용하고 있는 HALT (Highly Accelerated Life Test) 시험은 비교적 그 개발된 시점이 다른 가속 수명시험에 비하여 짧은 편이다. 국내 최초 적용된 시기는 1990년대이나 이후 체계화된 품질개선 시스템의 한 파트로 적용된 시점은 2000년도를 넘어서라고 볼 수 있다.

* 경희대학교 산업공학과

** 경희대학교 공학대학

*** 전자부품연구원

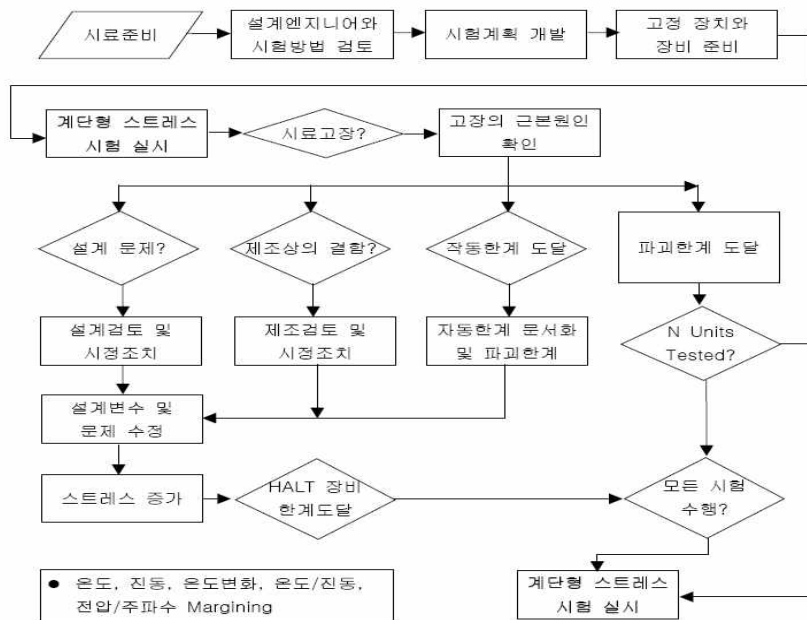
HALT 시험의 도입 배경은 짧은 시간 내에 Temperature step, Thermal cycle step, Vibration step, Combination cycle step Test에서 검출된 문제를 개선하고 그로인한 제품의 잠재적인 결함을 제거, 좀 더 높은 Margin의 제품을 만들기 위하여 있다고 볼 수 있다.

1.2. HALT 시험 동향

국내에 알려져 있는 HALT 시험의 일반적인 절차는 구)산업자원부 2003년 12월 발행한 ‘가속수명시험 설계 Guideline’ 을 인용하자면 <그림 1> 과 같이 이루어진다.

최근의 신뢰성 시험은 기존 부품 단위의 가속수명 시험을 생략하고 세트 단위의 HALT 시험을 통한 제품의 검증 후 이후 HASS (Highly Accelerated Stress Screen) 시험을 활용하여 어느 걱정 레벨 수준만을 통과 하는 형식 즉 HALT 시험과 HASS 시험만으로 신뢰성 평가를 대체하는 추세로 진행되어지고 있는 것을 느낄 수 있었다.

이것은 기본적으로 제품을 구성하는 부품 단위에서 이미 충분한 신뢰성 평가가 이루어 졌다는 가정 하에 개발단계에서는 HALT 시험을 통하여 발생하는 고장 현상에 대한 데이터를 수집, 이를 활용하여 개발 또는 양산중인 제품의 산포성 잠재 결함을 HASS 시험을 통하여 Screening 하는 시스템으로 변화 되어 가는 것이다. 물론 이렇게 얻어진 데이터를 모든 제품에 적용하기는 어렵지만 짧은 기간에 동일 전자부품 및 세트 제품에 적용하여 상대적으로 적은 비용과 시간을 투자하여 제품의 품질비용 (Quality cost)을 줄이는 결과를 만들 수 있다는 장점이 있다.



<그림 1> 일반적인 HALT 시험 절차1)

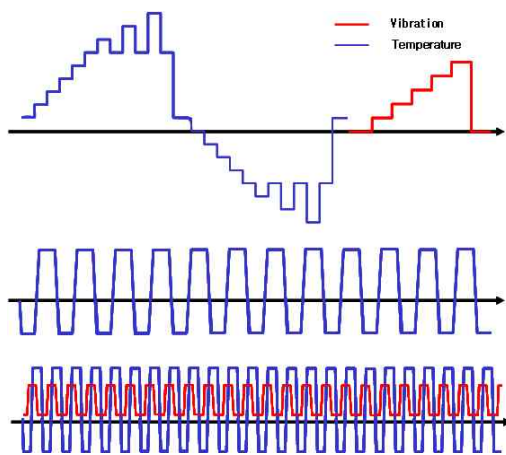
* 1) : 2003년 12월 구)산업자원부 ‘가속수명시험 설계 Guideline’ 발췌

1.3. 연구의 목적

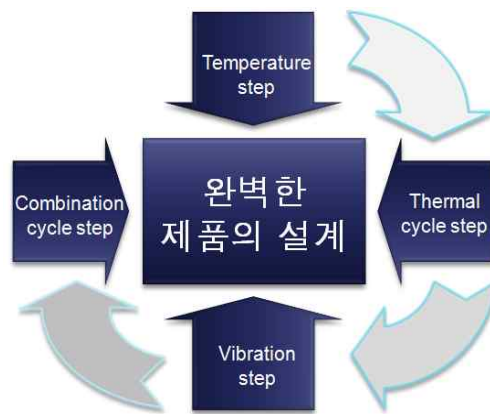
HALT와 HASS 시험을 통하여 얻어지는 제품의 강건 설계와 개발 또는 양산단계 제품의 지속적인 Screening을 실시하여 얻어지는 시장 불량률의 감소는 기업에게는 이윤을, 소비자에게는 만족스러운 신뢰도를 가져다준다. 이러한 시험 방법에 있어서의 가장 큰 문제는 적정 레벨수준의 기준을 정하는 데 있다. 적정 레벨의 수준이 기대 신뢰도 보다 낮은 경우 제품의 잠재적인 결함을 걸러내지 못하는 문제가 발생되며, 그 수준이 지나치게 높을 경우 발생한 문제가 잠재적인 불량률이 아닌 제품 한계를 벗어나 발생하는 즉 신뢰도를 높이는데 있어 불필요한 데이터가 만들어지므로 그 시험 목적에 의미가 없어진다. 국내외 우수 기업에서는 이미 자체적인 실험 데이터를 오랜 기간 축적하여 제품에 맞는 상황별 적정 레벨을 가지고 그 수준을 공개하고 있으나 근본적인 데이터 시험에 적당한 레벨을 정하는 근거 데이터는 공개를 하고 있지 않다. 이로 인하여 새로이 이러한 시스템을 적용하려는 기업에서는 HALT 및 HASS 시험에 접근하기가 상대적으로 어려워진다. 이번 연구에서는 HALT 시험을 통하여 얻어진 데이터를 근거로 HASS 시험을 진행함에 있어 최소한의 시험 레벨에 대한 설명을 하고자 한다.

2. HALT & HASS 시험

2.1. HALT 시험 절차



<그림 2> 연구에 활용된 HALT 시험 방법



<그림 3> HALT 진행 절차

국내외 시행되는 몇 가지 HALT 시험 방법 중 이번 연구에 사용된 시험 방법은 <그림 2>와 같다. 국내 A사에서 진행 하고 있는 대표적인 시험 방법이며 이 외 다른 진행 방식의 시험 방법은 시험의 수가 적어 여기에 포함하지 않았다.

시험 목적은 <그림 3> 와 같으며 세부적인 내용은 <표 1>과 같다. 시험에 사용된

Sample 은 15개의 랜덤하게 추출한 샘플을 사용하며 각 시험 파트별 3개의 샘플을 사용하여 2개 이상의 샘플에서 동일한 문제점일 발견되는 시점을 기준으로 이상 유무를 체크 하였다.

우선적으로 Normal Temperature에서 전체 샘플의 이상 유무를 확인 하고 Thermal Step Stress Test에서는 저온 및 고온 동작 한계에서 발생하는 취약 증상 및 부위를 알아보기 위해 LN2(액화질소) 및 Heat Control 을 이용하여 ±10 ℃ 씩 온도를 하강 및 상승 시켜 각 15분간 유지하며 시험품의 정상 동작 유무를 확인 하였다.

<표 1> HALT 시험 진행

Test	Sample	UOL	LOL	UDL	LDL
Thermal [°C]	Low Step	3	N/A	N/A	
	High Step	3	N/A	N/A	N/A
Vibration Step [Grms]	3		N/A		N/A
Thermal cycle step	3	Cycle	N/A	Cycle	N/A
		Cycles	Temp [°C] Low / High	Vibration [Grms]	Voltage [V]
Combined Thermal Shock & Vibration Test	3		/		

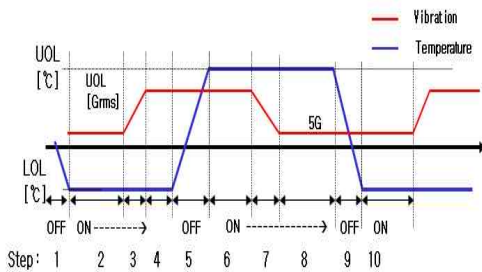
- UOL : Upper Operating Limit (동작상한)
- UDL : Upper Destruct Limit (파괴 상한)
- LOL : Lower Operating Limit (동작 하한)
- UOL : Lower Destruct Limit (파괴 하한)

Vibration Step Stress Test에서는 6축 (Linear : 3축, Rotation : 3축) Random 진동 (주파수 가진 범위 : 3 ~ 5 000 Hz)을 순차적으로 인가 역시 각 단계별로 15분간 유지하며 정상 동작 유무를 확인 하였다.

Thermal cycle step Test 에서는 Thermal Step Stress Test에서 얻어진 데이터를 기준으로 온도를 32℃/min 변화시켜 UOL, LOL 각각의 구간에서 15분간 유지하며 급격한 온도변화 에서의 정상 동작 유무를 확인하였다.

Combined Thermal Shock & Vibration Test에서는 복합 스트레스 하에서 제품의 취약부위 검출과 열화 발생 여부를 알아보기 위해 Thermal Step Stress Test와 Vibration Step Stress Test에서 설정된 동작 한계 마진 범위 내 온도와 진동을 이용하여 동시에 Stress를 인가한다. 이에 대한 설명은 <그림 4>, <표 2>와 같다.

<표 2> Step Condition



구간.	
1. Ramp Rate 32 °C/min	6. Dwell time 6 minutes
2. Dwell 6 minutes	7. Ramp Rate 8.3 g/min
3. Ramp Rate 8.3 g/min	8. Dwell 6 minutes
4. Dwell 6 minutes	9. Ramp Rate 32 °C/min
5. Ramp Rate 32 °C/min	

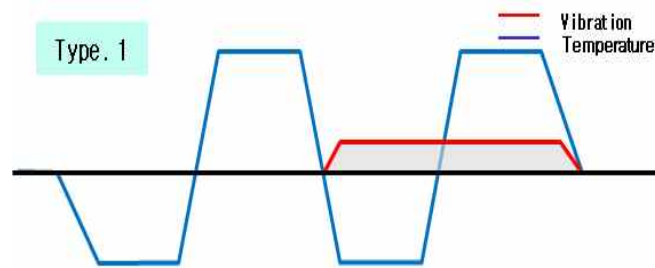
<그림 4> Combined Thermal Shock & Vibration Test

정상 동작 확인을 위한 Function Test는 시험품의 기본적인 기능동작 위주로 구성 되었으며 실 사용조건 하에서 발생할 수 있는 모든 경우의 수에 해당하는 기능 동작 을 포함 하여야 하나 시험품의 동작 한계보다 주변 장치의 동작한계가 낮아 동작 확 인이 불가능한 경우 주변장치에 인가되는 Stress를 차단하고 그렇지 못할 경우 그 기 능에 대한 동작은 생략 하여 진행 한다.

2.2. HASS 시험 절차

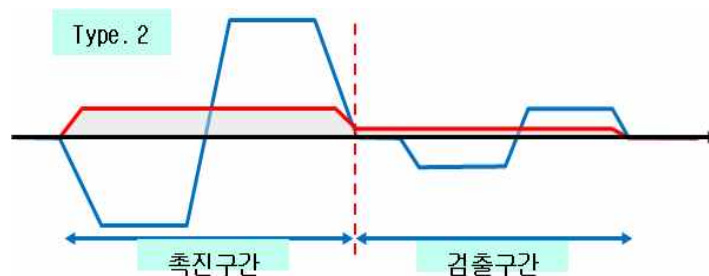
우선 HASS 시험의 목적은 앞서 말한 것과 같이 개발 또는 양산중인 제품의 산포성 잠재 결함을 Screening 하기 위하여 실시한다. 시험 방법에 대한 설정 중 동작한계 확 인시험 절차는 HALT 시험과 크게 다른바가 없으나 동작 한계를 기준으로 검출 구간 을 설정, 스트레스 레벨을 정하는 기준은 신뢰성 Engineer의 판단에 따라 다양 하게 구성 할 수 있다. 양산중인 제품, 양산단계가 아닌 개발단계에서의 제품, 양산중 문제 가 발생하여 그 고장에 대한 분석이 필요한 제품 등의 분류에 따라 검출 및 촉진구간 의 설정이 달리 할 수 있다.

<그림 5> 양산중인 제품인 경우이며 제품의 손상을 최소화 하면서 불량률 효과적으 로 검출하는데 유리하다고 할 수 있다.



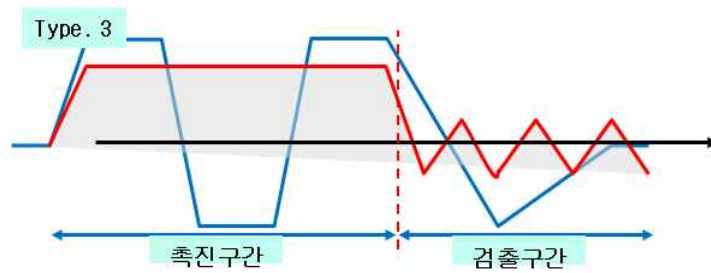
<그림 5> 양산중인 제품

<그림 6> 양산단계가 아닌 개발 단계에 있는 제품인 경우에 해당되며 이 경우 산포 성 결함을 충분히 확인 할 수 있도록 설정 하여야 한다.



<그림 6> 개발단계의 제품

<그림 7> 문제가 이미 발생된 경우에 해당되며 이미 양산중 문제가 발생된 제품의 경우에는 다양한 Stress를 인가하며 고장에 원인이 실질적으로 시험 품에서 발생된 것인지 시험지그 및 방법의 오류로 인하여 발생된 것인지에 대한 검증도 병행 하여 이루어져야 한다. 기본적인 검출구간의 설정은 ‘온도는 동작 한계에서 15 ~ 20 % 이상, 진동은 50 ~ 70 %이상, 전원은 고온구간 고전압, 저온구간 저전압’1) 의 수준으로 레벨을 정하며 촉진 구간의 경우 먼저 온도의 경우 ‘동작한계와 파괴한계가 동일한 경우 약 10 ℃ 감소, 그 외의 경우 동작한계 혹은 10 ℃ 증가하여 인가하며 진동의 경우 동작 한계에서 30 % 감소하여 인가한다. 전원은 검출구간과 동일하게 적용한다.’2)



<그림 7> 양산 중 문제점 검출 제품

* 1), 2) : 2004년 삼성전자 'HASS 전사 공통 규격' 발췌

2.3. HALT 데이터의 분석

HALT 시험과 HASS 시험에 대한 연구를 진행하면서 HASS 시험의 검출 구간 및 촉진 구간 설정 방법에 대한 관련 자료는 통계 데이터에 의한 경험적인 판단이며 관련 통계 데이터는 기업의 사정상 공개를 하지 않고 있어 그 근거를 찾을 수가 없었다.

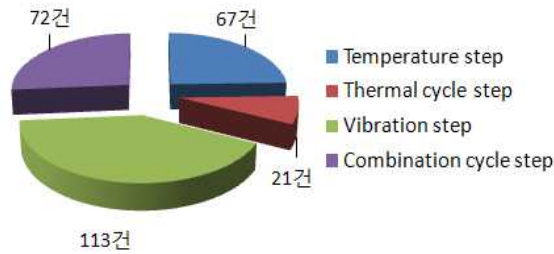
그 외에 HALT 시험에 있어서도 Combination Cycle Step의 최소 Cycle 기준에 대한 근거도 같은 실정이다. 이 부분에 대한 근거 데이터가 없는 관계로 기존 HALT 시험의 결과를 토대로 정리하여 보았다.

다음은 기존의 HALT 시험의 결과를 정리하여 나온 결과이다.

<표 3> HALT 시험 진행시 검출되는 고장 빈도

리드의 단락 및 파손			기능 상실				기타	
커패시터	릴레이	디스플레이 연결부	보호센서 파손	출력 값 저하	동작 중지	화면 이상	폭발	잘못된 시험방법으로 인한 고장
82	30	33	3	14	29	43	2	37

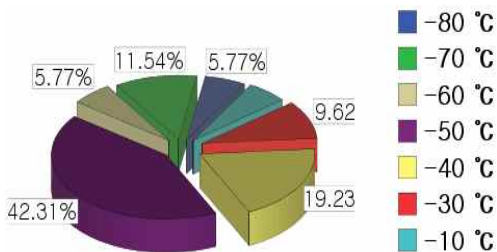
※ 총 108건 시험 진행 중 273개의 고장 부품 발생



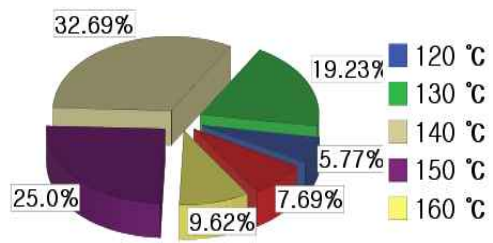
<그림 8> Stress 별 고장 검출 빈도

<표 3>, <그림 8>에서 얻어진 데이터를 비교하여 보면 주로 열화 (Degradation)로 인한 기능 상실과, 피로 (Fatigue)로 인한 리드의 단락 및 파손이 발생됨을 알 수 있었다. 열화는 주로 Thermal Stress 및 Thermal cycle에서 주어지는 Stress로 인해 촉진되며 주로 트랜지스터, IC, 마이콤, OLED, 센서, 마이크로폰, 커패시터, 튜너, 필터 등이 그 영향을 가장 많이 받는다. 피로는 주로 Vibration 에서 주어지는 Stress로 인해 촉진되며 주로 저항, 커패시터, 다이오드, 릴레이, 트랜지스터 등에 리드의 단락, 크랙 및 파손 등의 모드로 나타내어진다.

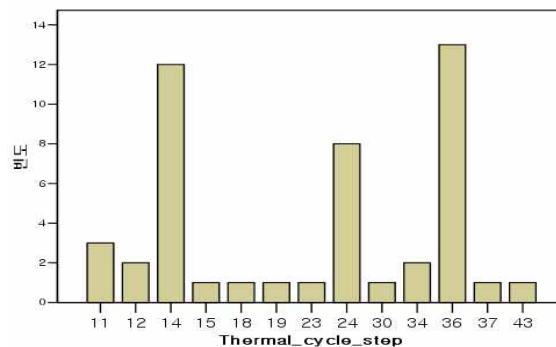
실험 데이터를 좀 더 세분하여 정리하여 문제점이 검출되는 Stress 수준을 정리하면 다음과 같다.



<그림 9> Low Temperature Step

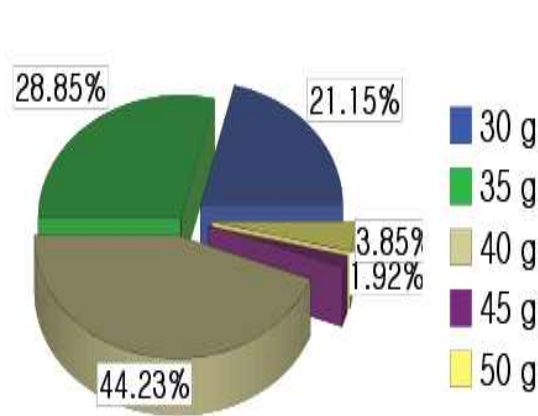


<그림 10> High Temperature Step

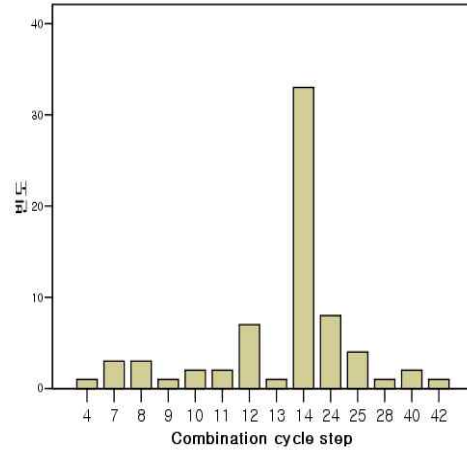


<그림 11> Thermal Cycle Step

먼저 <그림 9>, <그림 10>을 보면 주로 Low Temperature Step에서의 최초 문제가 검출되는 온도대의 비율은 (-40 ~ -50) °C 가장 많이 몰려 있고, High Temperature Step의 경우 (130 ~ 150) °C 사이에 몰려 있으며 <그림 11>을 보면 Thermal Stress Margin을 기준으로 Thermal Cycle Step을 진행 하였을 때 최초 문제점이 검출 되는 시점은 주로 14, 24, 36 cycle 임을 알 수 있다.



<그림 12> Vibration Step



<그림 13> Combination Cycle step

<그림 12>은 Vibration Step에서의 최초 고장 검출 결과이며 주로 경우 (30 ~ 40) g 사이에서 가장 많이 검출이 되는 것을 알 수 있다.

<그림 13>은 각 Step 진행 후 얻어진 동작한계 마진을 기준으로 Combination Cycle Step을 진행하여 최초 불량 검출되는 시험까지의 반복 횟수 분포이다. 여기서 발생되는 대부분의 고장 모드는 기존 Step Stress Test에서 발생된 고장 모드와 일치하였다.

2.4. 시험 데이터의 추가적인 해석 및 결론

<표 4> 가전제품 컨트롤 PCB 구성 부품

부품	구성개수	부품	구성개수
저항	23 ~ 31	릴레이	1 ~ 8
스피커	1	트랜지스터	1 ~ 2
IC	3 ~ 6	배리스터	2 ~ 42
필터	1	커패시터	4 ~ 9
다이오드	5 ~ 14	마이콤	1
퓨즈	0 ~ 2	디스플레이	0 ~ 1
커넥터	1 ~ 5	반도체	1 ~ 4
기타	4 ~ 6		

상기의 HALT 데이터만으로는 HASS 시험의 적절한 수준의 레벨을 결정하는 근거로 활용하기에는 부족한 부분이 많다. 그러나 위의 데이터 중에서 눈여겨 본 부분은 Step Stress 상에서 가장 많이 문제가 검출 되는 Stress 수준과 그 고장 증상이다.

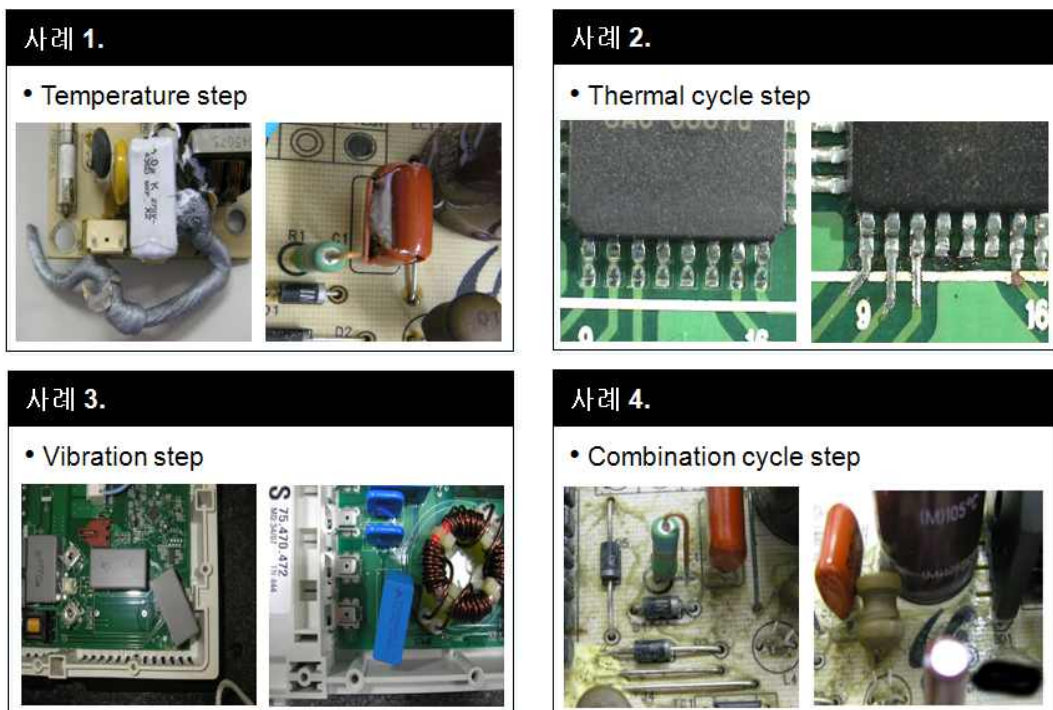
시험에 사용된 샘플은 가전제품의 컨트롤 PCB로서 그 구조는 각 모델에 따라 차이가 있지만 일반적으로 <표 4> 와 같은 구성의 부품으로 이루어져 있다.

이중 최초 문제가 가장 많이 검출되는 수준을 정리하면 먼저 Temperature Step에서는 (-40 ~ -50) °C 와 (130 ~ 150) °C에서 문제가 발생 되며 주요 고장 부품은 커패시터 이며 발생하는 현상은 커패시터의 정전 용량이 온도가 증가 또는 변화됨에 따라서 Flex crack 및 Dry-out 등의 그 기능을 상실 하는 열화 가속 패턴이 주로 발생 된다.

Thermal Cycle Step에서 최초 문제의 검출 시험이 가장 많은 14, 24, 36 cycle 에서는 주로 반도체, 트랜스 및 커패시터이며 주요 고장 현상은 본딩의 균열 및 열팽창에 의한 단선 이 발생 된다.

Vibration Step에서 최초 문제 검출이 가장 많이 되는 (30 ~ 40) g 사이에서는 주로 다이오드, 커패시터, 커넥터에 집중 되어 문제가 나타나며 발생하는 주요증상은 솔더의 피로, 파괴 및 단선의 마모(마멸) 고장이 주로 발생 된다.

Combination Cycle Step에서 최초 문제 검출이 가장 많이 되는 14 cycle 에서는 주로 커패시터, 커넥터 이며 주요 고장 현상은 앞서 진행한 Step Stress test 의 고장 현상과 거의 일치 하였다.



<그림 14 > 각 Step 에 따른 고장모드 사례

<표 5> Step Stress 발생된 고장 메커니즘

고장 관련 요소	고장 메커니즘
커패시터	<ul style="list-style-type: none"> · Dry-up로 인한 정전용량 감소 · 내압 상승으로 인한 방폭변 동작 · 리드의 기계적 스트레스로 인한 단락 · 유전체피막 및 층간절연지의 파괴 · 소자 내부의 균열로 인한 개방용량 감소
반도체	<ul style="list-style-type: none"> · 다이본딩의 열피로 및 균열 · 와이어 본딩의 피로에 의한 단선
트랜스	<ul style="list-style-type: none"> · 기계적 스트레스에 의한 단선 · 온도변화에 의한 케이스 균열
커넥터	<ul style="list-style-type: none"> · 진동 마모에 의한 접촉면의 산화막 형성

각 Step에서 보이는 고장 부품과 그 고장메커니즘을 정리하면 <표 5>와 같으며 주로 문제가 발생 되는 고장 요소는 4개 정도로 한정되어 있으며 그 고장메커니즘도 비교적 일치함을 알 수 있었다. 이 한정된 부품들이 HASS 시험의 수준을 결정하는 근거로 활용하기 위해서는 이들 부품을 선별하여 이에 대한 개별적인 가속수명 시험을 진행하여야 하며 수명시험의 결과 열화 혹은 고장 패턴의 동일성하게 나타난다면 그 율속과정 (Rate controlling step)을 도출하여 HASS 시험에 있어서 촉진구간과 검출구간의 수준을 정하는 근거로 사용 할 수 있을 것으로 예상 된다. 정리하자면 HASS 시험에서의 촉진구간은 산포성 잠재결함을 Screening 하기 위하여 설정한다. 이러한 촉진구간의 수준은 시험품의 손상을 최소화 하여야 하면서도 잠재적인 불량을 검출하여야 하기 때문에 그 수준의 결정은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 잠재적인 불량을 검출하기 위한 수준은 현재로서는 알 수 없다. 다만 HALT 시험의 주요 고장인자의 가속수명시험을 통한 율속과정의 도출을 통한 접근으로 시험품의 손상을 최소화 하는 한계는 알 수 있을 것이며 이를 근거로 촉진구간의 수준을 추정하는 것은 가능 할 것으로 예상 된다.

3. 추가적인 연구과제

실제로 고장은 단일 물리·화학반응에 발생하는 경우는 드물다고 할 수 있다. 몇 개의 반응이 조합되어 발생하는 경우가 대부분 이며 이때 반응 속도를 결정하는 과정을 율속과정 이라고 한다. 즉 율속과정이 존재하여야 시험시간을 가속할 수 있다. 또한 동일한 스트레스를 인가하더라도 조건에 따라 서로 다른 고장 메커니즘이 발생하지 않고 실 사용조건에서와 동일한 고장메커니즘을 재현하는 것이 가속수명시험의 기본 원칙이다. 그러나 HALT 시험은 그 시험의 시작이 Field 환경을 재현하는 것이 아닌 부하를 증가시켜 최소한의 시료와 시간으로 단기간에 잠재적인 고장모드를 찾아내고 개선하는데 그 목적이 있어 일반적으로 정량적으로 파악이 어려운 것이 사실이다. 그

러나 고장률을 개선하는 데에 있어서는 다른 시험 방법에 비하여 그 효과가 매우 뛰어나기에 때문에 이러한 접근방법을 사용하여 HALT 시험을 통하여 얻어진 데이터로 HASS 시험을 진행하는 최소한의 시험 레벨을 구하고자 하는 것이다. 추후의 연구에서는 앞으로 진행하는 HLAT 시험 데이터에 각 고장요인에 대한 개별적인 수명평가를 병행하여 진행 하여야 할 것이다. 기존의 시험에서는 이번 연구와 같은 접근을 고려하지 않아 관련된 데이터가 많이 부족한 현실이다. 이후 진행되는 HALT 시험 데이터와 고장요인에 대한 수명평가 시험 결과를 고려하여 진행하고 여기서 얻어진 데이터를 축적하여 이를 활용할 수 있는 연구가 추가로 진행 되어야 할 것이다.

4. 참 고 문 헌

- [1] 류성규, 조재립, 강보철, “HALT 시험 중 발생하는 고장모드에 대한 연구” 한국 품질 경영학회 춘계 학술 대회, (2008)
- [2] 윤양기, 천성일, “초가속 수명시험(HALT) 기술 동향” 전자부품 연구원, 전자정보센터, (2005)
- [3] 삼성전자, “HASS 전사 공통 규격”, (2004)
- [4] 산업자원부, “가속수명시험 설계 Guideline”, (2003)
- [5] Harry W. Mclean, “HALT, HASS, And HASA Explained”, (2000)
- [6] KS A 3004, “용어-신인성 및 서비스 품질”, (2002)