

가속수명시험과 사례

김재중 | 한양대학교, 책임연구원 | e-mail : kimjaejung@nate.com

이 글에서는 신속한 신뢰성 정보를 얻고자 시험기간을 단축하기 위한 목적으로 실시하는 가속시험인 가속수명시험과 가속열화시험의 정의, 설계 및 시험방법에 대하여 기술하였으며, 사례로서 슬라이드형 휴대폰에 적용되는 FPCB에 대한 가속수명시험법을 소개하였다.

가속시험과 가속모형

가속시험의 필요성

대부분의 현대 제품은 수년, 수십년 혹은 그 이상 고장이 없이 사용이 가능하도록 설계된다. 그러므로 통상 사용 조건에서 실용적인 시험기간 내에 적절한 고장 또는 성능 저하가 되는 제품은 거의 없다. 예를 들어, 통신 위성의 설계와 구조물은 10~15년 동안 서비스를 제공하기로 기대되는 부품을 시험하기 위하여 단지 8개월의 시험기간을 허용하고 있다. 즉, 가속시험(AT : Accelerated Testing)은 특히 단순부품과 재료의 신뢰도 정보를 신속하게 얻고자, 제조 기업에서 널리 활용되고 있다.

다양한 형태로 고장이 발생할 수 있는 복잡한 제품의 수명을 가속화하는 데는 실용적이고 통계적 측면에서 어려운 문제점들이 존재한다. 가속변수의 낮은 수준인 사용조건인 수명 혹은 장기간 성능의 추정치를 구하기 위해서는 물리적·통계적 모형을 통하여 하나 이상의 가속 변수(온도, 압력, 사용률 등)의 높은 스트레스 수준에서의 시험 결과 정보로부터의 외삽이 필요하다. 어떤 경우에는 스트레스를 시험과정 중에 증가시키거나 변경시킨다(단계-스트레스와 점진적-스트레스 가속시험). 가속시험의 결과는

부품과 하위시스템의 신뢰도 평가 또는 실증, 부품 인증, 수정 가능한 고장 모드의 발견, 경쟁품의 비교 등을 위해서 신뢰도 설계 과정에서 폭넓게 활용된다. 가속시험은 급변하는 기술, 더 많은 부품으로 이루어진 복잡한 제품, 보다 나은 신뢰도에 대한 소비자의 기대의 증대, 그리고 빠른 제품 개발에 관한 필요성 등의 이유로 점점 중요한 시험방법이 되고 있다.

최근 들어 제품의 신뢰도가 급속히 제고됨에 따라 시험 시간 단축을 위해 단일 스트레스를 이용한 가속수명시험(ALT : Accelerated Life Testing)이 주로 활용되다가 시험기간을 더 단축하기 위하여 복합 스트레스를 이용한 가속수명시험이 개발되고 있으며 더 나아가 제품의 열화자료를 이용한 가속열화시험(ADT : Accelerated Degradation Testing) 및 가상품질(VQ : Virtual Qualification)까지 개발되고 있다.

가속시험의 주요 유형

먼저 표 1에는 제품 설계 및 생산 단계별로 기업이나 연

표 1 제품단계별 가속시험

제품설계		제품 생산
재료·부품의 인증시험	(하위) 시스템의 원형시험	(하위) 시스템의 생산과 생산후 선별시험
· 가속수명시험(ALT)	· 강건설계(Robust Design)시험	· 번인시험(Burn-In) 및 스크리닝
· 가속열화시험(ADT)	· 가속스트레스시험(AST)	· 환경스트레스시험(ESS)
	· 초가속수명시험(HALT)	· 초가속스트레스시험(HASS)
	· 신뢰성성장시험(RGT)	

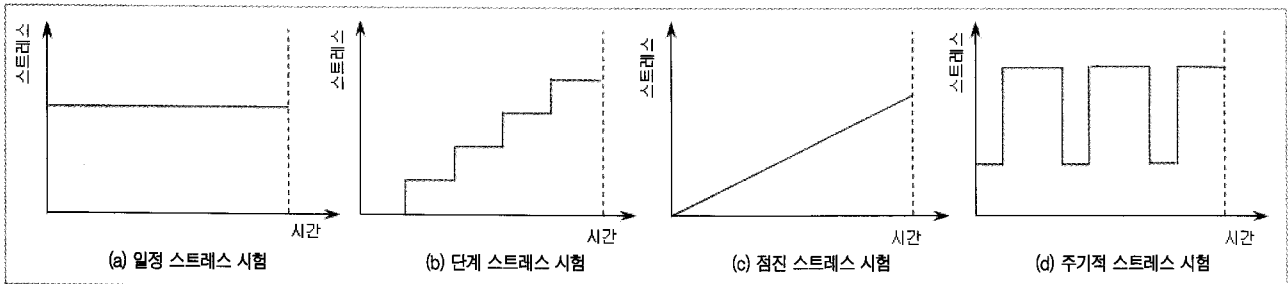


그림 1 4가지 스트레스 부과방법

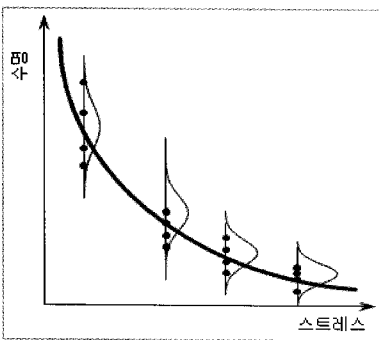


그림 2 가속수명시험

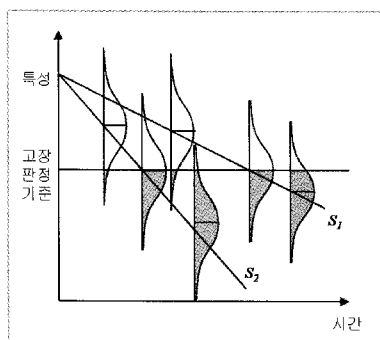


그림 3 가속열화시험

구소 등에 활용되고 있는 신뢰성 시험 중에서 가속시험을 실시하는 종류를 열거하였는데, 이 중 가장 널리 이용되는 것이 가속수명시험과 가속열화시험이다. 한편 신뢰성 시험에서 활용되는 주요 가속화 방법에는 1) 제품의 사용률 증가, 2) 제품의 노화율(aging rate) 증가, 3) 시험 단위가 운용되는 스트레스 수준의 증대 등이다. 그리고 시험단위에 부과되는 4가지 스트레스 부과방법은 그림 1에서와 같이 일정 스트레스(constant stress), 단계 스트레스(step stress), 점진 스트레스(progressive stress) 및 주기적 스트레스(cyclic stress)가 있다.

1) 가속수명시험

가속수명시험은 그림 2에서와 같이 시험기간을 단축하기 위한 목적으로 기준조건(통상 사용조건)보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험이다. 높은 스트레스 수준에서 스트레스를 인가하는 스트레스 가속과 간헐 동작 시 반복횟수를 증가시키거나 연속동작 시 지속시간을 늘이는 사용률 가속을 실시하여 제품의 고장 메커니즘을 촉진하여 수명을 측정하는 시험방법이다. 따라서 가속한 조건의 시험결

과로부터 기준조건의 수명 또는 고장률을 추정하기 위해 두 조건 사이에 존재하는 규칙성을 활용하여 가속계수를 구하며, 일반적으로 두 조건에서의 고장 메커니즘이 동일해야 한다. 즉, 고 신뢰도를 갖는 제품에 대한 적절한 신뢰성 평가 시 직면하게 되는 시간과 시험단위수의 제약을 극복하여 짧은 기간에 제품의 신뢰도와 성능을 파악하기 위해서는 가속수명시험이 절실

히 필요하다.

2) 가속열화시험

수명시험과는 달리 열화시험에서는 수명에 관련된 성능 특성치(performance characteristics)의 관측을 통해 열화자료를 획득한다. 이러한 열화자료는 다양한 열화모형을 통해 정상 사용조건에서의 고장시간을 예측하는 데 이용된다. 열화시험은 고장이 잘 발생되지 않는 고 신뢰도 제품의 신뢰성을 확인하고 보증하는 데 유용하게 사용된다. 가속열화시험은 그림 3에서와 같이 가속수명시험과 같이 정상 사용조건보다 높은 스트레스 조건하에서 성능 특성이 시간에 따라 열화되는 정도, 즉 열화량을 측정하여 시간에 따른 열화량 변화에 대한 모형(열화량 분포, 열화량의 시간과 스트레스에 대한 의존성)의 모수를 추정하고, 추정된 모형으로부터 정상 사용조건에서의 수명을 추정하는 시험방법이다.

가속수명시험의 개발절차

가속수명시험은 일반적으로 그림 4와 같이 1) 시험계획,

2) 시험실시, 3) 고장분석, 4) 통계적 데이터 분석의 순서로 수행되며 최종적으로 관심있는

신뢰성 척도값을 추정하는 절차를 따른다.

시험계획절차는 그림 5에서와 같이 필드에서의 고장모드 및 메커니즘을 파악하고 이들 정보를 바탕으로 고장을 가속시키는 데 효과적인 스트레스를 선정한다. 가속스트레스가 결정된 후에는 시험을 어떤 스트레스 수준, 시험시간 및 시료수로 실시할 것이지는 결정한다. 측정항목은 제품의 고장여부를 판단하기 위하여 어떤 측정항목을 측정하고 시험 중에 어떻게 측정할 것인지를 결정한다.

시험에서 고장이 발생하면 발생한 고장이 사용현장에서의 고장과 동일한 모드의 고장인가 확인하고, 개선 방법을 찾기 위하여 고장분석을 실시한다. 고장분석계획절차는 그림 6(a)와 같이 수립하며, 시험에서 획득한 고장자료의 통계적 데이터 분석은 그림 6(b)의 절차에 의해 수행하게 된다.

가속수명시험 모형

가속수명시험을 통하여 사용조건에서의 수명을 추정하기 위해서는 모형이 필요하다. 이 모형은 가속수명시험조건에서의 데이터를 분석하기 위한 수명분포와 가속조건에서의 신뢰성정보를 사용조건으로 외삽하기 위한 수명-스트레스 관계로 구성된다. 가속수명시험에서 사용되는 대표적인 수명-스트레스 관계식을 나타낸 표 2에서 아레니우스

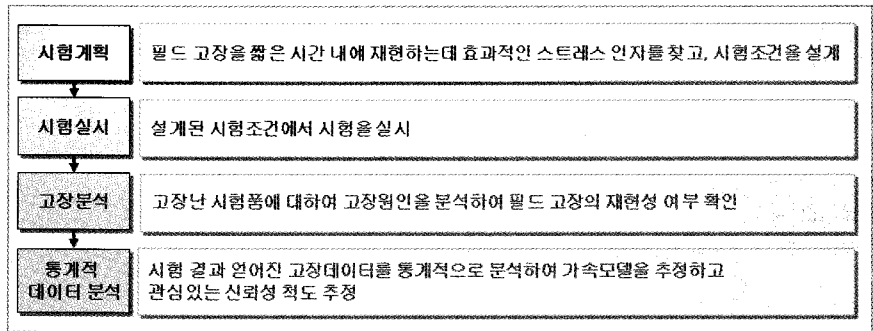


그림 4 가속시험절차

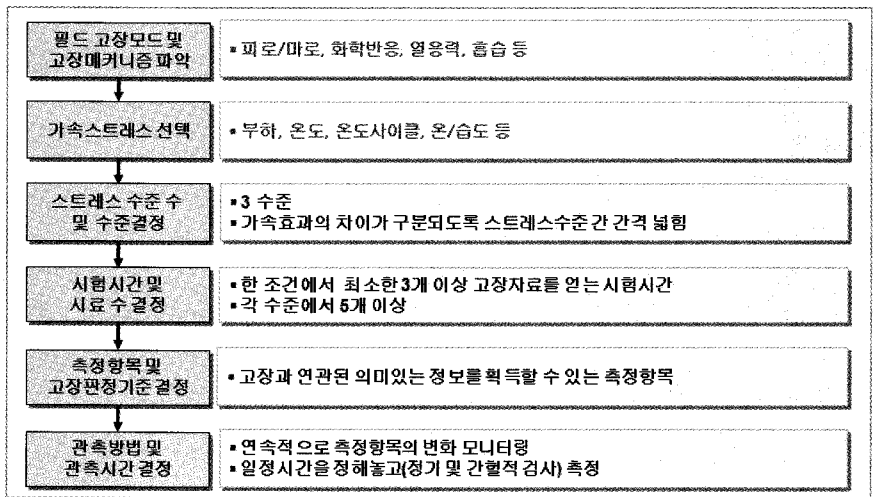


그림 5 시험계획절차

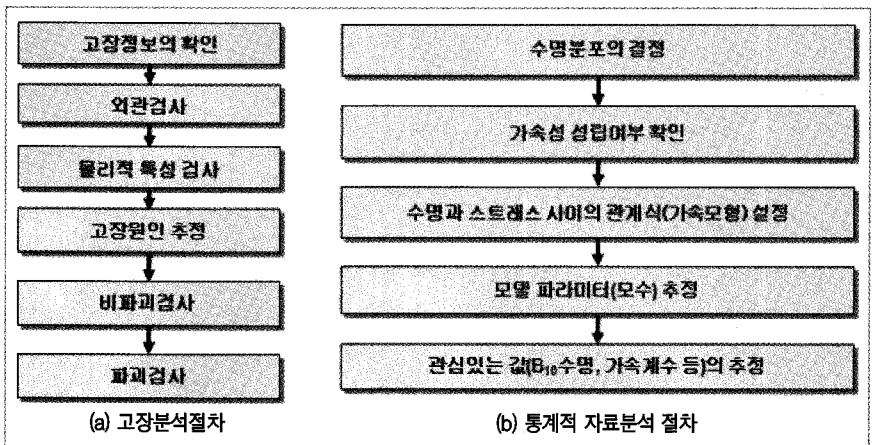


그림 6 고장분석 및 통계적 자료분석 절차

모형과 아이링 모형은 가속스트레스가 온도인 경우에 적용하고 코핀-맨슨식, 팜그린식 및 테일러 식과 같은 형태의 역승모형은 온도차, 부하 등 온도이외의 스트레스를 이

표 2 대표적인 수명-스트레스 관계식

모형명	가속스트레스	모형	적용
아레니우스 모형	온도(K)	$\tau = A \cdot \exp(E_a/kT)$	기계/전자부품의 화학반응 등
역승 모형	온도 외(S)	$N = A \cdot S^{-n}$	기계/전자부품의 수명
코핀-만슨 식	온도차(ΔT)	$N = A \cdot \Delta T^{-\beta}$	금속의 저주기 피로수명
윙그린 식	기계하중(P)	$B_{10} = (C/P)^p$	롤러 및 볼베어링의 수명
테일러의 식	절삭속도(V)	$B_{50} = A \cdot V^{-m}$	절삭공구의 중위수명
아이링 모형	온도(K)	$\tau = (A/T) \cdot \exp(B/kT)$	화학적 열화반응
일반화된 아이링 모형	온도(K)와 온도 외	$\tau = \left(\frac{A}{T}\right) \cdot \exp\left(\frac{B}{kT}\right) \cdot \exp\left(S\left(C + \frac{D}{kT}\right)\right)$	일렉트로 마이그레이션 온습도 등

=7.5 μ m), 접착물 (adhesive : hA =10 μ m)로 구성되어 총 두께(H)는 50 μ m이다.

필드 고장모드 및 메커니즘

일반적으로 휴대폰의 장기사용 시 필드에서 빈번하게 발생하는 고장 메커니즘으로는 FPCB가 끊어짐으로 발생하는 open이며, 이는 슬라이드를 개폐하는 과정에서 발생하는 상호 왕복 운동으로 인한 피로(fatigue)와 휴대폰을 떨어뜨리는 등의 물리적 충격이 가해졌을 경우 발생하는 내부 크랙(metallization crack)에 의해 일어난다. 이 피로는 FPCB 내부에 전체적으로 일어나며 적은 스트레스가 누적되어 고장에 이르게 된다.

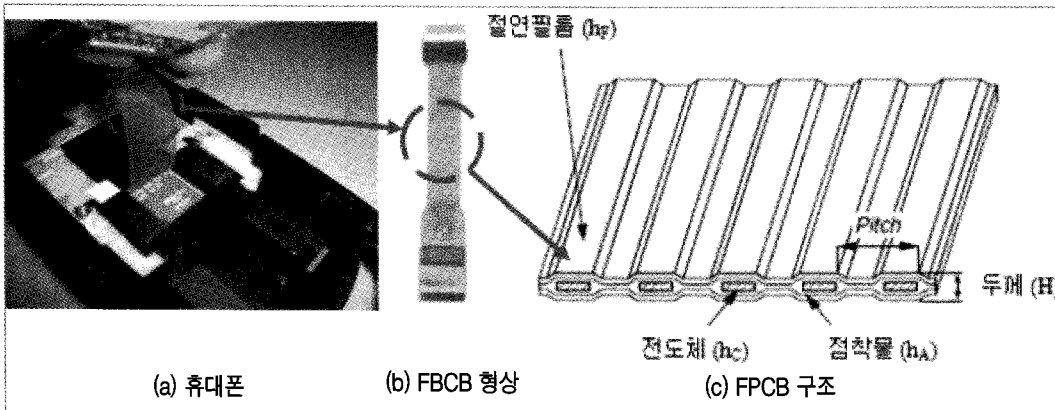


그림 7 FPCB의 형상 및 구조

용하여 베어링 등 기계류부품의 가속수명시험에 널리 사용되는 모형이다. 일반화된 아이링 모형은 가속스트레스가 온도와 더불어 온도 이외의 부하 등 다른 스트레스를 복합적으로 인가하는 가속수명시험에서 사용된다.

가속수명시험 사례

FPCB의 가속수명시험

슬라이드형 휴대폰에 적용되는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)를 대상으로 가속수명시험법을 개발한 사례이다.

FPCB의 구조 및 특성

일반적인 슬라이드형 휴대폰의 외형과 내부에 사용된 FPCB는 그림 7에서와 같이 슬라이드형 휴대폰 내부에 메인보드와 액정을 연결해주는 역할로서 구조는 크게 절연 필름(insulation film : hF=15 μ m), 전도체(conduct : hc

가속수명시험설계

효과적인 가속수명시험 방법을 결정하기 위하여 고장분석결과를 토대로 2-stage QFD(품질기능전개)를 실시한 결과 FPCB의 가속수명시험은 굽힘피로수명시험이 가장 적합한 것으로 나타났다.

1) 가속스트레스 수준 및 시험조건의 결정

FPCB의 굽힘수명시험시, 가속스트레스는 그림 8에서 보이듯이 구부러진 FPCB 사이의 간격으로, 곡률반경(R) 값을 0.25mm, 0.5mm, 1mm로 결정하였다. 이 값을 굽힘수명(N_f)을 구하기 위한 가속스트레스로 변환하기 위해, 굽힘응력 값인 ϵ (surface bending strain)으로 나타내었

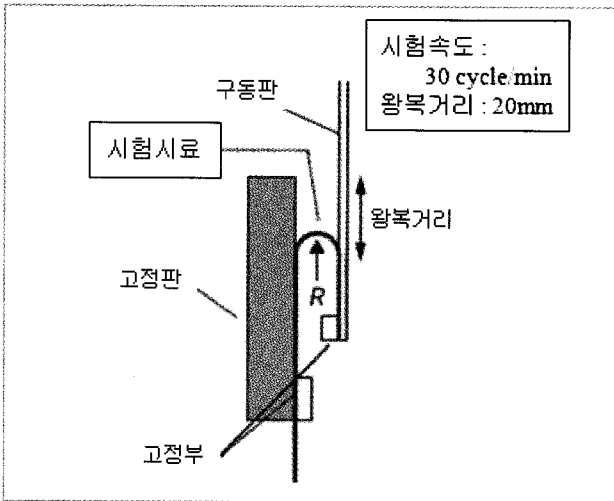


그림 8 시험지그 및 방법

으며 다음 식에 의해 계산된다.

$$\epsilon = \frac{h_c}{2R - H} \times 100\%$$

가속수명시험을 위해 곡률반경에 따른 굽힘응력 3수준을 표 3에 나타냈으며 각 수준에서의 시험 시료는 5개씩 배치하였다.

2) 시험 방법 및 측정

가속수명시험을 위해 그림 8에서와 같이 FPCB를 U자의 형태로 구부려서 한쪽 끝은 고정하고, 반대 끝은 움직이는 판에 고정하여 왕복거리 20mm를 왕복속도 30cycle/min로 반복해서 상하로 동작시키면서 FPCB 양단에 외부 리드선을 연결하여 저항값의 변화를 측정하여 고장여부를 확인하였다.

3) 시험데이터 분석

가속수명시험에서 고장이 발생한 시료의 고장분석결과 FPCB 양단의 저항값이 무한대로 나타났으며 이를 통해 관측된 FPCB의 고장은 open으로 반복 왕복운동에 의한 피로(fatigue)에 기인한 것을 알 수 있었다.

4) 가속수명시험 모델

FPCB의 반복횟수와 변수인 굽힘응력에 대하여 금속에

표 3 가속스트레스 수준 및 시험조건

조건	스트레스	곡률반경, R(mm)	굽힘응력, ε(%)	시험횟수 (ea)
1	이동속도 :	0.25	3.26	5
2	30cycle/min	0.5	1.56	5
3	왕복거리:20mm	1	0.76	5

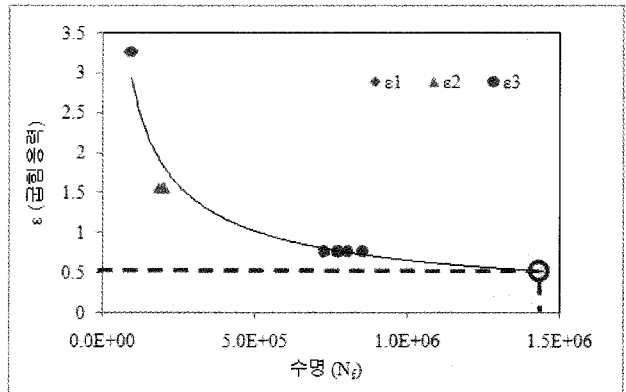


그림 9 굽힘응력에 대한 굽힘수명분포

서의 피로수명을 예측하는 코핀-만슨 모델, $N_f = A \cdot \epsilon^n$ 을 적용하였으며, A 및 n은 재료 및 시험방법 등에 따라서 결정되는 상수이다. 가속수명에서의 고장데이터를 분석하여 상수를 추정된 결과 FPCB의 굽힘수명식은 다음과 같다.

$$N_f = 509,455.8 \cdot \epsilon^{-1.548}$$

상기 굽힘수명식을 이용하여 굽힘응력에 대한 굽힘수명 분포를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 곡률반경 0.25mm($\epsilon_1=3.26$), 0.5mm($\epsilon_2=1.56$), 1.0mm($\epsilon_3=0.76$)에서 각각의 수명횟수는 81,780번, 255,950번, 779,120번으로 추정할 수 있다. 또한, FPCB의 스트레스에 대한 수명 분포의 변화를 살펴보면, ϵ 값이 감소할수록 수명은 지수함수적인 형태로 감소하는 것을 알 수 있다. 아울러, ϵ 값이 3.26에서 1.56으로 50% 감소하였을 때, 수명횟수는 81,780번에서 255,950번으로 약 3.1배 증가했으며, 3.26에서 0.76으로 약 75% 감소하였을 때, 수명횟수는 81,780번에서 779,120번으로 9.5배 증가하였다.

부가적으로, 본 연구대상 슬라이드형 휴대폰 FPCB에서 제시된 곡률반경 1.5mm(굽힘응력 $[\epsilon=0.51\%]$)에서 추정되는 수명 횟수는 1,444,700번으로 나타났다.