

전기, 전자 부품, 제품 및 시스템의 신뢰성평가 및 기술동향

함 중걸
산업기술시험원

1. 신뢰성 이론

1.1 신뢰성의 개념

신뢰성이란 의도된 용도로 주어진 기간동안 사용되어 충족하게 가동될 확률로서 기능이나 임무를 수행하는 것이다. 즉 신뢰성이란 성과를 측정하는 척도이다.

1.2 신뢰성의 평가척도

1.2.1 고장평균수명

- MTTF(Mean Time To Failure): 수리가 불가능한 제품에 있어서 고장날 때까지의 평균 시간.
- MTBF(Mean Time Between Failure): 수리가 가능한 제품에 있어서 고장과 다음 고장사이의 평균 간격.

1.2.2 제 p 백분위수

- t_p
- 제품 총 수의 p%가 고장나는 시간.

1.2.3 고장확률

- $F(T)$
- 제품이 정해진 시간 T내에 고장이 발생할 확률.
- 초기 시료수를 N, t 시각에 고장나지 않고 남아 있는 시료수를 $n(t)$ 라고 하면 고장확률 $F(t)$ 는

$$F(t) = (N - n(t)) / N.$$

1.2.4 신뢰도

- $R(T)$
- 제품이 정해진 시간 T까지 정상적으로 동작할 확률.
- 초기 시료수를 N, t 시각에 고장나지 않고 남아 있는 시료수를 $n(t)$ 라고 하면 신뢰도 $R(t)$ 는

$$R(t) = n(t) / N.$$

1.2.5 고장률

- $h(t)$
- 시간 t까지 고장나지 않은 제품 중 다음 순간 고장날 제품의 비율.
- 단위: %/1000시간(= 10^{-5} /시간), 10^{-6} /시간, FIT(10^{-9} /시간, Failure unit)
- 초기 시료수를 N, t 시각에 고장나지 않고 남아 있는 시료수를 $n(t)$ 라고 하면 시간 간격 $t_i < t \leq t_i + \Delta t_i$ 에서의 고장률 $h(t)$ 는

$$h(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / n(t_i)}{\Delta t_i}$$

- ※ 초기 시료수를 N, t 시각에 고장나지 않고 남아 있는 시료수를 $n(t)$ 라고 하면 시간 간격 $t_i < t \leq t_i + \Delta t_i$ 에서의 확률밀도함수 $f(t)$ 는

$$f(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / N}{\Delta t_i}$$

그러므로 고장률함수 $h(t)$ 는 다음과 같이 표현됨.

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / n(t_i)}{\Delta t_i} \\ &= \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / N}{\Delta t_i \cdot n(t_i) / N} = f(t) / R(t) \end{aligned}$$

1.3 수명분포

1.3.1 지수분포

- 확률밀도함수(pdf, probability density function): $f(t) = (1/\theta) \exp(-t/\theta)$
- 누적분포함수(cdf, cumulative distribution function): $F(t) = 1 - \exp(-t/\theta)$
- 신뢰도함수: $R(t) = \exp(-t/\theta)$
- 고장률함수: $h(t) = 1/\theta$
- 평균수명: θ
- 제 p 백분위수: $-\theta \ln(1-p)$

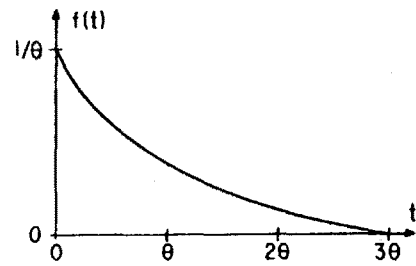


그림 1. 확률밀도함수

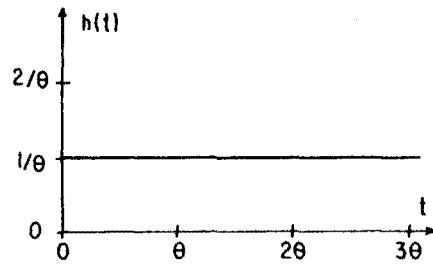


그림 2. 고장률함수

1.3.2 와이블 분포

- 확률밀도함수:(pdf, probability density function)
 $f(t) = (\beta/\alpha^\beta) t^{\beta-1} \exp[-(t/\alpha)^\beta]$
- 누적분포함수:(cdf, cumulative distribution function)
 $F(t) = 1 - \exp[-(t/\alpha)^\beta]$
- 신뢰도함수: $R(t) = \exp[-(t/\alpha)^\beta]$
- 고장률함수: $h(t) = (\beta/\alpha)(t/\alpha)^{\beta-1}$
- 평균수명: $\alpha \Gamma[1 + (1/\beta)]$
- 제 p 백분위수: $\alpha [-\ln(1-p)]^{1/\beta}$

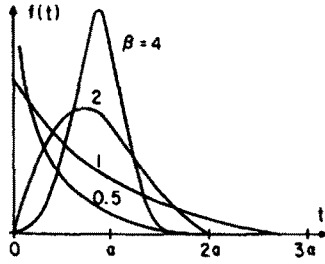


그림3. 확률밀도함수

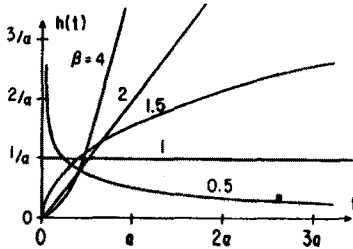


그림4. 고장률함수

1.3.3 대수정규분포

- 확률밀도함수(pdf, probability density function):
 $f(t) = \{0.4343 / [(2\pi)^{1/2} t \sigma]\} \exp \{-[\log(t) - \mu]^2 / (2\sigma^2)\}$
- 누적분포함수(cdf, cumulative distribution function): $F(t) = \Phi\{[\log(t) - \mu] / \sigma\}$
- 신뢰도함수: $R(t) = 1 - \Phi\{[\log(t) - \mu] / \sigma\}$
- 고장률함수: $h(t) = f(t) / R(t)$
- 평균수명: $\text{antilog}[\mu + 1.151 \sigma^2]$
- 제 p 백분위수: $\text{antilog}[\mu + z_p \sigma]$

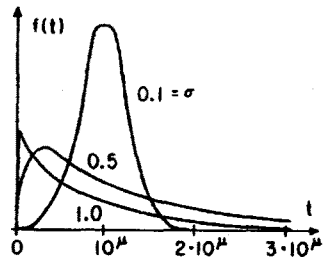


그림5. 확률밀도함수

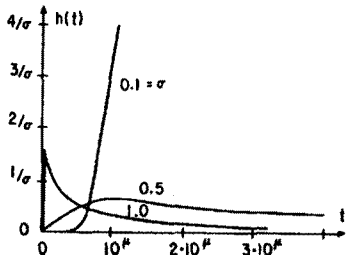


그림6. 고장률함수

1.3.4 목조곡선

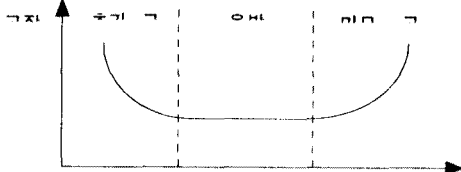


그림7. 목조곡선

1.4 안전, 품질 및 신뢰성평가의 차이

안전(Safety)	품질(Quality)	신뢰성(Reliability)
1. 화재, 감전 등의 안전을 평가	1. 특성 및 성능을 평가	1. 성능에 수명을 고려함
2. 품질시험은 고려하지 않음	2. 불량률을 얻기 위해 많은 시험 데이터가 요구됨	2. 제품의 수명, 고장률, 신뢰도등 평가
3. 형식시험(Type Test)에 의한 시료 수 한정	3. 수명개념이 없음	3. 정확한 자료 확보가 어려움

2. 신뢰성 설계

2.1 신뢰성 배분(Reliability Allocation)

신뢰성 배분은 제품의 목표 신뢰성을 만족시킬 수 있도록 제품의 하위 구성 부품에 신뢰성을 배분하여 하위 구성 부품의 목표 신뢰성을 정하는 작업이다.

2.2 부하경감(Derating)

부하경감은 제품의 신뢰성을 높이기 위하여 부품에 가해지는 최대 스트레스(온도, 전압, 전류 등)가 부품의 정격보다 낮게 되도록 설계하는 작업이다. 전기, 전자 부품의 환경조건에 따른 부하경감 비율을 표. 1에 나타낸다.

2.3 중복설계(Redundancy)

중복설계는 제품의 중요도에 따라서 고장 및 정지시간을 없애기 위해 동일한 기능을 하는 부품, 제품 및 회로를 중복(이중, 삼중 등)으로 설치 사용하는 방법으로 병렬(Parallel)연결방법과 대기(Stand-by)연결방법이 사용된다.

3. 신뢰성 평가방법

3.1 고장유형 및 영향 분석(FMEA:Failure Mode Effects Analysis)

고장유형 및 영향분석은 제품의 구성부품이 고장나는 경우 제품에 어떠한 영향을 미칠 것 인가를 체계적으로 분석하는 것으로 다음과 같다.

- (1) 대상 시스템에 대해서 각 부품과 구성요소의 기능을 조사하고 그 중에서 위험한 것을 찾아낸다.
- (2) 각 부품이 고려된 모든 고장모드를 알고 그 원인을 조사한다.
- (3) 고장모드에 따라 시스템의 손해도를 평가한다.
- (4) 또한, 고장의 확률을 추정하고 (3)의 결과를 종합하고 종합한 평가치를 구한다.
- (5) (4)에 의한 우선도에 따라서 기획, 설계상의 개선시책을 고려한다.

3.2 결점나무분석(FTA:Fault Tree Analysis)

결점나무분석은 제품의 고장이 발생하는 경우 가능성이 있는 고장원인들을 체계적으로 찾을 수 있도록 제품의 고장형태와 그 고장형태에 대한 가능성 있는 고장원인들을 나무가지 모양으로 나열하는 작업이다.

3.3 설계심사(Design Review)

설계심사는 신뢰성관리 부분의 전문가뿐만 아니라 제조, 검사, 영업, A/S 등 각 분야의 전문가들이 모여 개발제품의 설계에 대하여 심사하고 결함을 찾아내어 개선하는 작업이다.

3.4 신뢰성시험

3.4.1 신뢰성시험시 주의점

a) 대상이 부품, 재료의 경우와 대규모시스템에서는 요구되는 기능이 다르게되고 신뢰성시험의 목적도 다르게 된다. 부품, 재료에서는 어디까지 견디는가의 한계정보가

표.1 부하경감 비율

Part Type	Derating Parameter	Environment	
		Severe	Benign
Capacitors	DC Voltage Temperature from Max. Limit	60% 10°C	90% NA
Circuit Breakers	Current	80%	80%
Connectors	Voltage, Current, Insert Temperature from Max. Limit	70% 25°C	90% 90% NA
Diodes	Power Dissipation Max. Junction Temperature	70% 125°C	90% NA
Fiber Optics	Bend Radius Cable Tension	200%	200% 50%
Fuses	Current	50%	70%
Inductors	Operating Current Dielectric Voltage Temperature from Hot Spot	60% 50% 15°C	90% 90% NA
Injection Laser	Power Output	70%	90%
Lamps	Voltage	94%	94%
Memories	Supply Voltage, Output Current, Max. Junction Temperature	±5% 80% 125°C	±5% 90% NA
Microcircuits	Supply Voltage, Fan Out Max. Junction Temperature	±5% 80% 125°C	±5% 90% NA
Microcircuits GaAs	Max. Junction Temperature	135°C	NA
Microprocessors	Supply Voltage, Fan Out Max. Junction Temperature	±5% 80% 125°C	±5% 90% NA
Photodiode	Reverse Voltage Max. Junction Temperature	70% 125°C	70% NA
Phototransistor	Max. Junction Temperature	125°C	NA
Relays	Resistive Load Current Capacitive Load Current Inductive Load Current Contact Power	75% 75% 40% 50%	90% 90% 50% 60%
Resistors	Power Dissipation Temperature from Max. Limit	50% 30°C	80% NA

필요하다. 그러나 시스템에서는 몇 개의 각각 독립한 역할을 수행하는 구성품, 독립한 기능을 발휘하는 하위 시스템으로 구성되고 그 상호관계 및 종합적인 시험이 필요하다.

b) 신뢰성시험은 부품, 재료등의 성능을 시험하고 그 신뢰도를 확인하는 것이고 그것에 의해 설계를 평가해서 요구사항을 입증하려는 것이다. 새로 개발한 구조, 요소 또는 처음 사용하는 부품 등에 대해서는 충분한 시험을 행할 필요가 있다.

c) 산성비의 영향, 장거리 수송에 의한 진동, 충격 및 고저온도 등, 사용환경 조건에 의한 온도, 습도, 기계적, 전기적 스트레스 등이 제품에 얼마나 영향을 미치는가를 예측해서 시험을 실시한다. 시험결과에 대한 판단은 얻어진 데이터가 다른 제품과 용도에도 적용할 수 있다고 생각하면 위험하다. 예를 들면 장치에 따라서는 열냉각 특성에 의해 통풍설계가 좋은 것과 나쁜 것이 있다. 이와 같은 경우 동일한 내열특성 데이터를 이용하는 것은 위험하다.

d) R, C, L 및 스위치, 콘넥터, 프린트기판에 있어서도 소형화, 고밀도화, 고집적도화 및 고기능화등 복잡한 문제가 많고 마이그레이션, 쇼트 혹은 변형, 기구부재료의 피로파괴, 접촉불량 등이 발생한다.

3.4.2 환경조건과 그 영향

조건은 다를 뿐만 아니라 제품 그 자신에 의한 스트레스 발생도 있다. 이 때문에 출하전에 상정되는 각각의 스트레스에 요구되는 기간, 기능, 성능이 유지 되는가 또 그 안전성도 충분히 확보할 수 있는가 등을 확인, 검증할 필

표.2 환경시험의 목적 및 시험 영향

환경 시험	목적	영향
온도 내한성	전자부품, 기기의 내한성을 조사한다. 결빙에 의한 체적팽창 특성열화, 기능 특성열화.	팽창 수축에 의한 열적, 기계적 비틀림 및 연화, 약화의 촉진, 응축수의 저하, 크랙, 함유수분의 결빙.
내열성	전자부품, 기기의 열적변화를 조사한다. 기능소자의 경우는 고온에서 동작 또는 통전해서 열화 특성을 조사하는 것이 많다. 전자부품.	산화, 확산등의 화학반응, 수축, 팽창, 연화, 증발, 점도저하, 크랙, 확산, 수축에 의한 비틀림, 떨어짐.
온도 사이클	기기의 내열성 스트레스를 조사한다. 자동차, 항공기 용도의 부품에 대해서 스크리닝에 이용된다.	크랙, 내부수분의 증발에 의한 크랙, 피로, 표면이 터진 기계적 변위에 의한 전기 특성 변화.
열충격	열용량이 큰 액체를 이용해서 열팽창계수의 차이에 의한 치수변화 와 그에 따른 특성변화를 본다.	물드 부품 등의 크랙, 단자결부분의 기계적 변형 등 거의 위와 동일함.
온도 내습성	전자부품, 기기의 온도에 의한 열화 특성을 조사한다. 절연재의 흡습 특성 평가.	절연저하, 부식 및 전해의 촉진, 결로, 팽창, 링 전류증대.
온도 사이클 결과	위와 동일	호흡작용, 결로, 결빙, 이온마이그레이션, 부식, 단락, 절연불량, 도장피막 이탈.
사이클 PCT	내습성특성의 가속시험 습도의 침투, 확산의 영향을 본다.	IC 등의 물드 크랙, 밀폐 불량, 박리.
진동, 충격	전자부품의 피로시험, 제품의 가진 시험에 이용도 같은 목적으로 전자부품, 재료, 장치의 포장물 운반 및 취급중의 충격에 대한 구조적강도를 본다.	기계적 열거움, 피로파손, 단선, 공진에 의한 파손, 소켓 접촉불량, 접합부 마모, 공진파괴, 리드단 소용, 이상진동 발생.
인장굴곡	부품, 재료의 기계적 강도를 본다.	절단, 구부림, 변형, 단락.
공평이	공평이 발육조성, 공평이의 발생에 따른 재료의 특성열화.	절연저하, 단락, 부식, 녹, 침식, 오염, 광학계의 투과율 저하.
기압	고공, 진공중 고압부품, 재료 및 니트의 내전압 등의 특성을 본다.	전기적 내압 저하, 기밀불량, 점접 수명저하, 재료의 유전율 변화, 열전도율 감소.
염수분무	전자부품 리드부분의 녹, 부식 및 내식성의 가속시험 및 피복, 도장 및 도금을 본다.	부식, 녹, 절연저하, 접촉저항 증대, 박리.
내후성 시험	자외선 및 그외의 방사선에 의한 부품, 재료의 특성 열화를 본다.	퇴색, 취약화, 고분자재료의 크랙, 변형, 기밀불량.
유독가스 H ₂ S/SO ₂	대기오염 등의 내환경성을 조사한다.	부식성가스 등에 의한 부식, 녹, 절연저하, 접촉불량, 단선, 접촉저항 증대.
산성비	산성비에 의한 영향을 본다.	부식, 녹, 절연저하, 접촉불량, 단선, 접촉저항 증대.
모래, 먼지	균열, 접촉부, 가동부로의 침입, 접촉불량 등의 기능, 성능의 열화를 본다.	오동작, 부식, 표면의 마모, 막힘, 대전, 절연저하, 마멸.
오존	부품, 재료, 제품의 특성 열화.	산화, 유기재료의 취약화.
땀내열	전자부품의 내 땀내산, 강도 및 내열성을 본다.	땀남크랙, 권선단자부의 헐거운 부품의 열특성 변화, 절연물의 연화.
대전, 전자유도 정전기	건조시 정전기장해 전자부품, 장치의 내정전특성, 내노이즈 마진 특성.	전파방해, 절연파괴, 오동작, 반도체파괴 및 그 외의 부품파괴, 릴레이의 수명평가.

요가 있다 표.2 에 각 환경시험과 목적 및 시험의 영향에 대해서 설명한다.

3.4.3 신뢰성시험의 분류

a) 사용되는 환경의 범위를 측정한다. 환경의 종류는 다음과 같다.

- 온도
- 습도 + 온도
- 온도변화
- 가스
- 빛
- 진동, 충격

b) 일정한 환경조건에서 수명측정

c) 룯드의 고장률, 판정

d) 잔여수명 측정

e) 고장재현시험 등으로 분류된다.

3.5 고장수명의 산출방법

3.5.1 예측(Prediction)

Mil-HDBK-217에 의한 고장수명 예측방법은 일반적인 환경하에서 일반적인 부품의 고장률 데이터를 근거로 이론적인 계산에 의해 부품, 제품 및 시스템의 고장률을 산출하기 때문에 실제 사용할 때 얻어지는 고장률과는 차이가 있을 수 있지만 효과적일 수 있다. Mil-HDBK-217에서는 미국방성에서 축적한 부품의 고장률 데이터를 이용하여 시스템에 대한 고장률을 예측하는 방법을 제시하고 있다. 여기서 제시하고 있는 방법으로는 부품수분석(Parts Count Method)과 부품부하분석(Parts Stress Analysis)의 두가지 방법이 있으며 특히, 부품부하분석은 부품에 대한 부하분담등의 상세한 데이터의 수집에 의해 고장률의 예측을 할 수 있다.

3.5.2 가속수명시험(Acceleration Test)

가속수명시험은 고장수명시간의 확인 시험방법으로 시험시간을 단축하기 위해 시료의 정상사용 조건보다 높은 스트레스 조건에서 시험한 후 수명과 스트레스 사이의 관계식을 통해 정상사용조건 수명을 추정하는 방식이다. 가속수명시험을 하기 위한 스트레스와 가속계수 산정을 위한 모델 관계식은 표.3과 같이 나타난다.

표 3. 대표적인 수명과 스트레스 사이의 관계식

스트레스의 종류	모델명	모델
온도	아레니우스(Arrhenius) 모델	$L = a \cdot \exp(E/(kT))$, 단, L은 수명, T는 절대온도(K), E는 활성화에너지(eV), k는 볼츠만상수($8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$), a는 상수.
온, 습도	펙(Peck) 모델	$L = a \cdot \exp(E/(kT)) \cdot H^{-n}$ 단, L은 수명, T는 절대온도(K), E는 활성화에너지(eV), k는 볼츠만상수, H는 상대습도(%RH), a와 n은 상수.
전압	역자승모델	$L = a \cdot V^{-n}$ 단, L은 수명, V는 전압(V), a와 n은 상수.
온도, 전류밀도	블랙(Black) 모델	$L = a \cdot \exp(E/(kT)) \cdot J^{-n}$ 단, L은 수명, T는 절대온도(K), E는 활성화에너지(eV), k는 볼츠만상수, J는 전류밀도(A/cm ²), a와 n은 상수.
온도변화	코핀-맨슨(Coffin-Manson) 모델	$L = a \cdot (\Delta T)^{-n}$ 단, L은 수명, ΔT는 온도차, a와 n은 상수.

3.5.3 현장데이터의 이용

고장수명을 예측하기 위한 방법으로 현장에서 발생한 고장데이터를 이용한 방법으로 고장분포는 다음과 같은 확률밀도함수(Probability Density Function)를 따른다고 하면 $f(t) = (1/\theta) e^{-t/\theta}$ 여기서 고장수명 θ (MTBF)를 추정할 수 있다.

4. 결론

선진국에서는 개발제품에 대해 신뢰성평가가 보편적으로 활용되어 왔으나 국내에서는 근래에 와서 전기, 전자부품, 제품 및 시스템차원에서 다음과 같은 방법을 적용해서 신뢰성 및 경제성을 보증하기 위한 방법으로 사용되고 있다.

1 MTBF에 의한 고장예측 및 예비모듈 확보

고장수명의 예측으로 인한 예비모듈의 적정한 확보로 제품 및 시스템의 단중에 의한 사용중단을 사전에 예방할 수 있으며, 주기적인 예방정비 기간을 설정하여 기기설비의 효과적인 운용이 용이하다. 그러므로, 사용기간동안 신뢰성을 가지고 운용할 수 있을 뿐만 아니라 소모품에 대한 균등한 지출로 경제적인 효과를 나타낼 수 있다.

2 소프트웨어의 신뢰성평가

소프트웨어의 신뢰성평가 문제는 초창기로 하드웨어의 신뢰성평가 방법과는 다른점이 많이 있다. 특히, 소프트웨

어는 휴먼 인터페이스, 설계검토를 위한 기록의 불일치 등의 문제점이 있다. 또한 소프트웨어의 신뢰성 향상은 하드웨어의 신뢰성과 함께 시스템으로서의 기능과 성능을 완수해야 한다. 즉, 소프트웨어의 에러는 그 영향이 매우 크기 때문에 임의적인 에러에 대해 예방/대응하는 것이 매우 어려우며, 정보화사회가 될수록 통신과 결합한 시스템에 대해 고 신뢰성이 요구되므로 이에 대한 꾸준한 검토와 연구가 이루어져야 한다.

3 시스템차원의 신뢰성 및 경제성평가 활용

운용중인 시스템의 잔여수명을 예측하고 그에 따라 교체되어야 할 부품 및 모듈 등의 예비수량을 결정해서, 사용기간 동안 시스템이 신뢰성을 유지할 수 있는 보수, 개조 및 교체시기를 결정함으로써 시스템운용의 경제적인 효과를 극대화 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 박경수 (1986), 신뢰도공학 및 정비이론, 회중당.
- [2] 윤상운(1993), 가속화 신뢰도분석, 자유아카데미.
- [3] 신뢰성 기법 개발과 실무적용에 관한 WORKSHOP (1992), 한국통계학회 공업통계연구회와 서울대학교 통계연구소 주최.
- [4] Wayne Nelson (1982), Applied Data Analysis, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [5] Wayne Nelson (1990), Accelerated Testing, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [6] 塩見弘 외, 日科技連 信頼性工学 시리즈, 日科技連, 1994.
- [7] 松下電子工業株式会社(1988), 半導體デバイスの信頼性技術, 日科技連.
- [8] 日科技連 (1997), Reliability Handbook, 日本信頼性學會編