

# 고장률 함수

김 명 수 | 수원대학교 산업정보공학과, 교수 | e-mail: mskim@suwon.ac.kr

고장률 함수(failure rate function)는 신뢰성 공학(reliability engineering)에서 가장 먼저 접하게 되는 내용 중 하나이다. 이 글에서는 고장률 함수를 중심으로 고장의 원인과 대책, 신뢰성 향상의 의미, 신뢰성 시험의 종류와 목적 등을 소개한다.

## 고장률 함수의 정의

특정 시점에서의 고장률은 그 시점까지 고장나지 않은 제품이 순간적으로 고장날 확률로 정의된다. 예를 들어 1,000시간에서의 고장률이 0.1%라면, 이는 1,000 시간까지 살아 있는, 즉 고장이 나지 않은 제품 중에 0.1%가 1,000시간이 되는 순간에 고장날 가능성이 있음을 의미한다. 고장률은 시점에 따라 달라지는 시간의 함수로 표현되며, 이를 고장률 함수라고 한다.

필드(field)에서 전형적으로 나타나는 고장률 함수는 그림 1과 같이 욕조곡선(bathtub curve)의 형태를 따르는 것

으로 알려져 있다. 그림에서 고장률이 감소하는(DFR: Decreasing Failure Rate) 구간을 초기고장(early failure), 고장률이 일정한(CFR: Constant Failure Rate) 구간을 우발고장(random failure), 고장률이 증가하는(IFR: Increasing Failure Rate) 구간을 마모고장(wearout failure) 기간이라고 부른다. 고장률 함수의 수학적 정의는 다음과 같다:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

여기서  $f(t)$ 는 고장밀도함수,  $R(t)$ 는 신뢰도함수,  $F(t)$ 는 분포함수를 나타낸다.

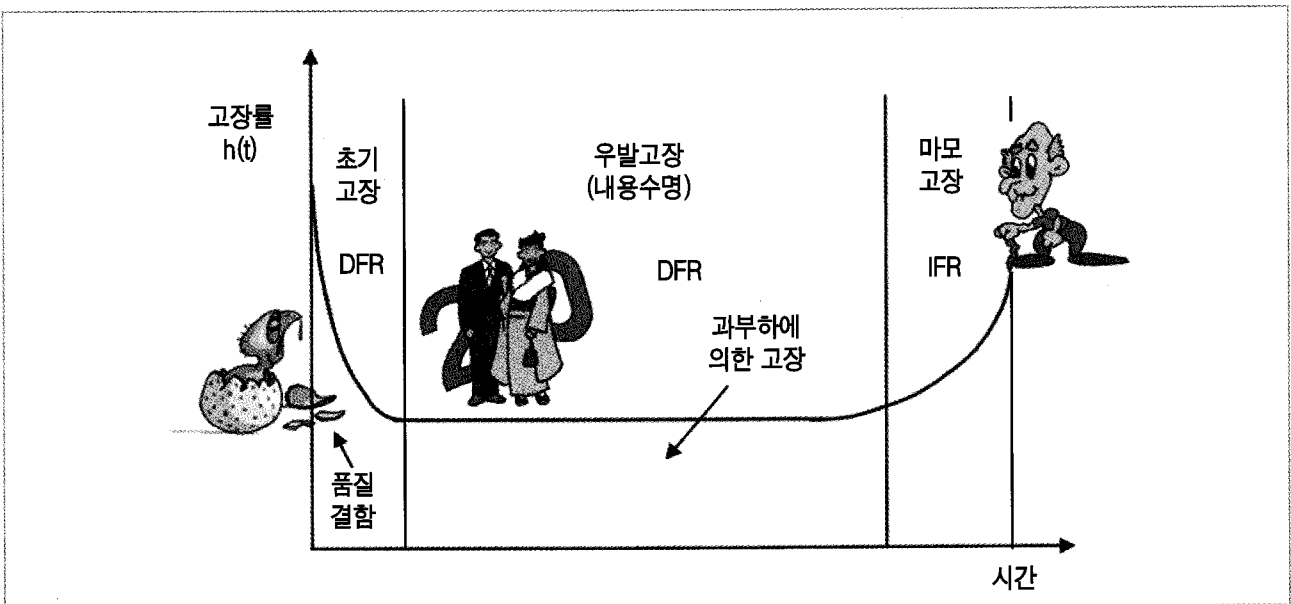


그림 1 욕조곡선

## 고장의 원인과 대책

### 초기고장

개발과정에서 제품의 신뢰성을 보증하기 위해 응력해석, 열해석, 설계심사, 신뢰성시험 등 많은 활동을 수행하지만, 일반적으로 설계 또는 제조상의 결함을 완벽하게 제

표 1 초기고장, 우발고장 및 마모고장의 주요 원인과 대책

	고장의 원인	대책
초기고장	<ul style="list-style-type: none"> <li>설계 및 제조상의 결함</li> <li>불충분한 디버깅</li> <li>부적절한 포장, 운송 및 설치 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>품질관리</li> <li>번인/ESS/HASS</li> </ul>
우발고장	<ul style="list-style-type: none"> <li>과부하(overstress)</li> <li>오사용</li> <li>모르는 원인</li> <li>천재지변 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>안전계수 확보 또는 디레이팅</li> <li>사용자 과오 방지</li> <li>내스트레스 설계</li> </ul>
마모고장	<ul style="list-style-type: none"> <li>고장 메커니즘 : 피로, 부식, 마멸, 크리프, 열화, 마이그레이션 등</li> <li>부적절한 정비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고장 메커니즘 발생을 예방 또는 지연할 수 있는 설계 및 제조기술</li> <li>예방정비</li> </ul>

연령	사망률	연령	사망률
0세	407.6	45~49	275.4
1~4	28.0	50~54	412.2
5~9	15.6	55~59	598.8
10~14	14.5	60~64	893.3
15~19	30.2	65~69	1500.4
20~24	41.5	70~74	2483.5
25~29	53.0	75~79	4381.7
30~34	66.0	80~84	7924.7
35~39	102.6	85 +	15674.4
40~44	171.3		

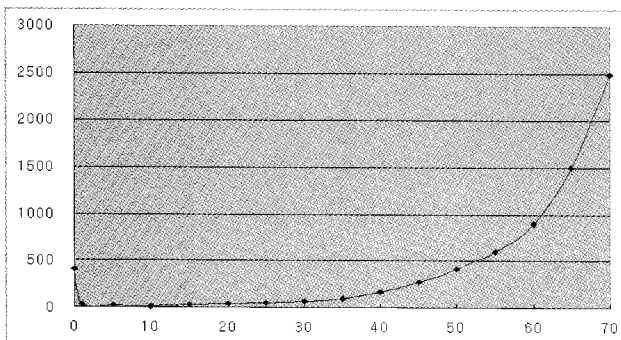


그림 2 2006년도 남녀 전체 사망률  
[출처] 사망원인통계(2006년)의 표 1. 성·연령별 사망자수 및 사망률(19개 장 분류)

거하지 못하고 제품이 출하된다. 결함이 있는 제품은 보관, 물류, 설치 및 소비자 사용에 이르는 과정에서 경시변화를 일으켜 얼마 사용하지 못하고 고장이 발생한다. 결함이 있는 제품들이 조기에 고장나서 제거됨에 따라 남아있는 제품 중에 결함이 없는 제품의 비율이 높아지고, 따라서 고장률은 감소하게 된다. 초기고장은 주로 설계나 제조상의 결함에 기인하며, 따라서 설계 완성도를 높이거나 공정 품질관리를 강화함으로써 해결할 수 있다.

### 우발고장

설계나 제조상의 결함이 제거되어 품질이 안정화되면 고장률이 일정하게 되며, 이 기간을 우발고장 기간이라 한다. 우발고장은 말 그대로 고장이 우발적으로 발생하며, 이는 고장의 발생을 미리 알 수 없고 확률적으로만 예측이 가능하다는 의미를 갖고

있다.

우발고장은 설계과정에서 예상하지 못한 과부하(overstress)와 사용자 실수 또는 우리가 모르는 원인에 의하여 발생한다. 과부하에 의한 고장은 디레이팅(derating), 안전계수 확보 등을 통해 대책을 마련할 수 있고, 사용자 실수는 사용자 매뉴얼, 교육/훈련 등을 통하여 예방할 수 있다. 그러나 우리가 모르는 원인에 의하여 발생하는 고장은 고장의 근본원인을 찾기 위한 노력이 뒷받침되어야만 가능하다. 디지털 전자제품에서 NTF(No Trouble Found) 또는 NDF(No Defect Found)라고 부르는 고장이 이에 해당한다고 할 수 있다.

### 마모고장

제품을 어느 기간 이상 사용하면, 재료나 부품이 열화되어 고장률이 증가하게 되며(이를 마모고장이라고 부른다), 마모고장 발생 전까지 기간을 유용수명(useful life) 또는 내구수명이라 부른다. 마모고장은 피로, 크리프, 부식, 마이그레이션 등의 고장 메커니즘에 의해 발생한다. 마모고장을 예방하기 위해서는 신뢰성이 높은 소재 또는

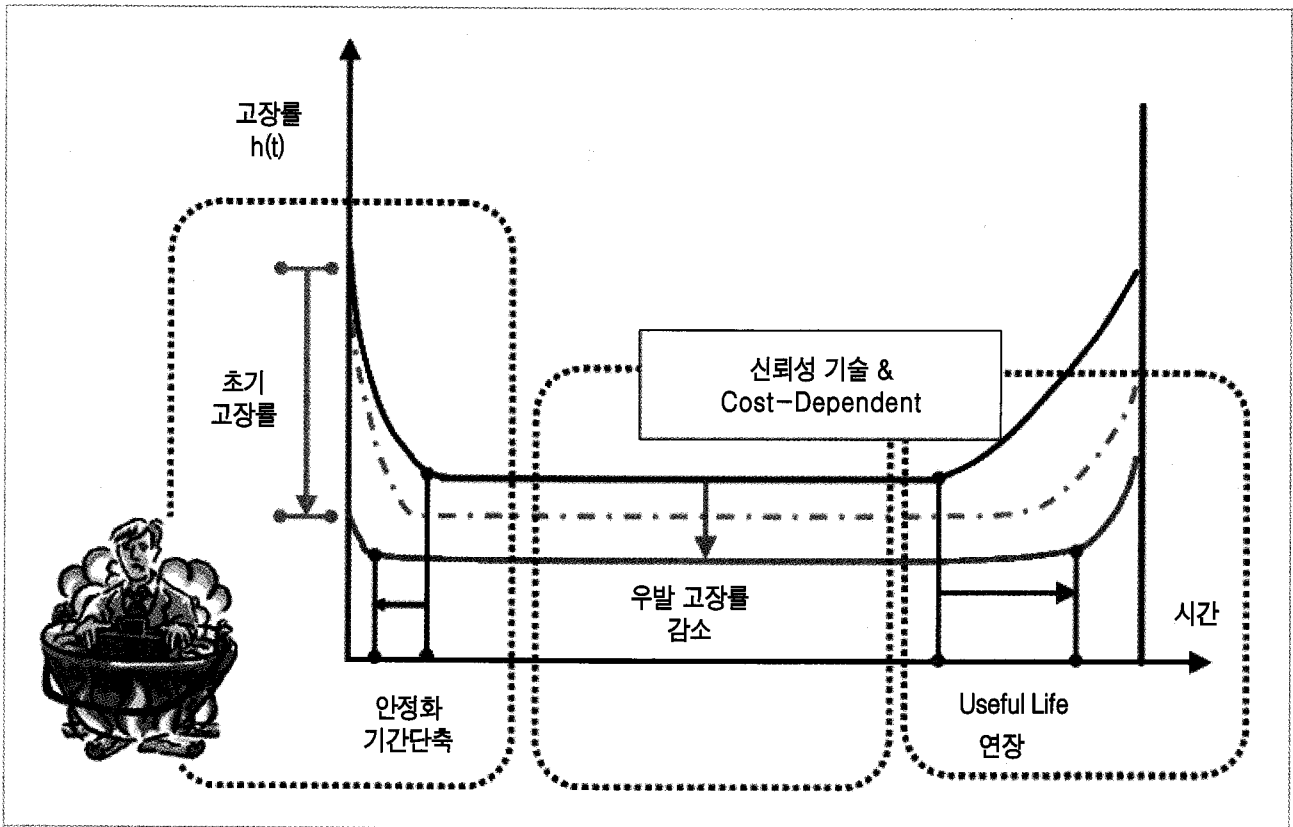


그림 3 고장률 함수와 신뢰성 향상

부품을 사용하거나 도금, 열처리 등을 통하여 고장 메커니즘의 발생을 예방하거나 진행을 지연시키며, 그래도 안 되면 엔진 오일을 교환하거나 브레이크 라이닝을 교환하는 것과 같이 예방정비를 한다.

앞에서 설명한 고장률은 사람의 사망률<sup>1)</sup>과 동일한 개념이라 할 수 있다. 이는 초기고장을 영아사망(infant mortality)이라고 부르는 것만 보더라도 알 수 있다. 다음은 2006년도 남녀전체 사망률(단위: 명, 인구 10만 명당) 자료이다. 한 살 미만의 영아사망률은 407.6으로 높게 나타났다. 한 살 이후에는 사망률이 감소하여 30대까지 어느 정도 일정하게 유지되다가, 40대 이후부터 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 40대 이후의 건강관리가 중요하다는 것을 단적으로 보여주는 육조곡선이 아닌가 싶다.

우리는 모두 사망에 관해 관심이 있고, 또한 의학 전문가 정도는 아닐지라도 사망 원인과 수명연장을 위한 대책에 어느 정도 지식을 갖고 있다. 사망률과 고장률의 정의가 동일하단 점만 보더라도 신뢰성 공학은 우리와 매우 가까운 학문분야 아닌가?

### 고장률 함수와 신뢰성 향상

고장률 함수에서 신뢰성 향상의 의미를 쉽게 이해할 수 있다. 우리가 신뢰성을 향상시킨다는 것은 초기 고장률과 우발고장률을 감소시키고, 마모고장이 발생하는 내구수명을 연장시키는 것이다. 그림 3은 최초 고장률 함수와 신뢰성이 향상된 고장률 함수를 나타낸다. 초기고장은 결함이

1) 인구학에서 인구집단의 사망빈도를 나타내는 용어. 보통사망률은 1년간의 총사망수를 당해연도의 총인구로 나눈 수치를 1,000분비로 나타낸다.

없도록 설계하고 제조함으로써 개선할 수 있다. 그러나 우발고장과 마모고장은 신뢰성 설계 기술과 비용 증가를 필요로 한다.

많은 기업들이 무상수리, 리콜, 클레임 등 비용으로 나타나는 보증기간 동안에 발생하는 초기고장을 중요시 하고 있다. 그러나 냉장고의 핵심 부품인 컴프레서의 보증기간은 5~6년이고, 미국시장에서 국내자동차의 동력전달계통(power train) 고장은 10년 10만 마일을 보증하고 있지 않은가? 보증기간이 증가하면 초기고장만 문제가 되는 것이 아니다. 우발고장과 마모고장도 가능한 수준까지 개선하여야 한다. 단, 마모고장이 발생할 때까지의 내구수명은 소비자들이 요구를 만족하는 수준에서 결정된다. 내구수명이 10년이면 충분한 제품을 20년 이상 고장나지 않도록 설계할 필요는 없다.

## 신뢰성 시험

마지막으로 고장률 함수에서 초기, 우발 및 마모고장을 예방 또는 검증하기 위한 신뢰성시험에 대하여 간단히 소개한다. 개별 신뢰성 시험에 대한 자세한 내용은 관련 서적을 참조하기 바란다.

### 초기고장

개발단계에서 설계상의 결함을 찾아 개선하기 위한 시험(신뢰성성장시험, HALT<sup>2)</sup> 등)과 양산단계에서 결함이 있는 제품을 선별하기 위한 시험(변인, ESS<sup>3)</sup>, HASS<sup>4)</sup>)이

초기고장과 관련되어 있다. 어쩌면 내환경성을 확인하기 위한 일련의 환경시험도 설계상의 결함을 확인하기 위한 시험으로 볼 수 있다.

### 우발고장

과부하에 의한 우발고장을 예방하거나 안전계수를 확인하기 위한 시험(HALT; 한계시험 등)과 고장률(또는 MTTF)을 보증하기 위해 통계적으로 설계된 인증시험이 우발고장과 관련되어 있다. 부품·소재 신뢰성 향상 사업에서 개발된 신뢰성인증시험 기준도 이에 해당하며, 이 시험은 개발단계와 양산단계에서 모두 적용할 수 있다.

### 마모고장

마모고장의 경우는 마모현상이 나타날 때까지 장시간 시험을 하여야 언제부터 마모현상이 발생하는지, 수명분포 형태는 어떻게 되는지, 고장률은 어떻게 증가하는지 등을 확인할 수 있다. 수명시험(통상 이를 내구시험이라고 부름) 또는 가속수명시험이 마모고장과 관련되어 있다.

## 맺음말

고장률 함수는 우리에게 매우 친숙하면서도 신뢰성 공학의 기본이 되는 개념이다. 아무쪼록 대한기계학회 회원들이 신뢰성공학에 대한 이해와 관심을 높이는 데 이 글의 내용이 조금이나마 도움이 되길 기대한다.

2) HALT : highly accelerated life test

3) ESS : environmental stress screening

4) HASS : highly accelerated stress screening