테마기획

신뢰성 이론상의 문제점

글 ▫ 유 동 수 / 신뢰성학회 부회장, RARC 부소장, 삼성전자 상무 e-mail ▫ dsryu@samsung.co.kr

이 글에서는 신뢰성 이론상의 문제점에 대해 설명하고 그 중에서 괴리가 큰 것들을 소개한다

2002년 4월 서울대학교 김재주 교수의 정년퇴임을 맞이하여 한국신뢰성학회 주관으로 신뢰성 Workshop이 있었다. 당시 그 분의 발표 중에 신뢰성의 중요성에 대한 강조가 있었고 선진국의 신뢰성 기술현황에 대한 발표도 있었다. 이 중에 '70년대부터 신뢰성에 대한 이론과 현실과의 괴리가 있다는 언급이 있었다. 그도 그럴 것이 과학기술이 한껏 발달된 현대사회에서 지금도 신뢰성 관련된 비행기 사고가 다발하고 있음은 우리를 슬프게 하고 있다. 또 미국기술의 상징인 포드 사의 RV(Recreational Vehicle)가 전복되어 사람이 다치고 죽는가 하면, 다우 코닝 사의 Breast Implants로 인해 젊은 여성의 건강이 해쳐지고 있음은 이를 말하여주고 있다.

신뢰성에 대한 이론과 현실의 괴리는 어찌하여 나타나는 것일까? 이러한 괴리 몇 가지를 짚어보기 위해서는 신뢰성기술 발전의 역사를 들여다 볼 필요가 있다.

2차 세계대전과 6·25전쟁 중에 미국 군사무기의 전자부품 특히 진공관의 고장이 잦았고 실전에 사용할 수 없는 지경에 이르렀다. 이를 미국 국회가 문제 삼았고 이에 대한 적극적 해결책이 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)의 활동이었다. 이 자문단은 1952년 발족되어 6년 동안 구체적 연구를 수행하였다. 신뢰성에 관한 장치, 신뢰도 측정법, 규격서 작성법, 수송이나 보관의 문제 등 아홉 그룹으로 나누어 활동하였고 1957년에 여러 개념들에 관한 기념비적인 보고서가 나왔다. 그러나 비슷한 시기에 진행됐던 비행기 부품 교환주기 즉 수명에 관련된 자료는 공개되지 않았다고 한다. 이는 신뢰성기술 중 경험적 상세기술은 선진국 일류기업의 Core Competence Technology로 관리하여 비밀로 유지하고자 함이다. 이로 인해 신뢰성기술에 관한 개념들이 상세기술과 접목되지 않아 그 개념적 발전이 다른 학문에 비해 훨씬 뒤쳐지게 되었다. 지금 우리가 신뢰성이라는 과목으로 배우는 내용 중에 많은 것들이 이때 공개된 것들로부터 정리된 것으로 보면 된다. 기본개념은 그때나 지금이나 변화가 없다. 이 내용 중에서 괴리가 큰 것들을 토픽으로 삼아 생각하여 보도록 하자.

첫째, 기계부품의 고장은 일정기간 사용

후에 집중적으로 나타나게 되고 정규분포형태(Lognormal 분포)를 따르는 반면 전자부품의 고장은 시간에 따라 일정하고 지수분포를 따른다고 했다. 필자의 주장은 이와 다르다. 전자부품의 고장도 기계부품의 고장형태와 같다. 기계부품도 산업화 초기에는 전자부품처럼 고장이 잦았다는 사실을 기억하자. 또 전자부품 중 누적 생산량이 많은 부품 예를 들면 저항류는 사용 중에 고장 나지 않고 수명 근처에 가야 모두 망가진다. 이러한 사실은 기계 기술의 역사가 200년인 반면 전자기술의 역사가 50년인 것을 염두에 두면 이해할 수 있다.

고장이란 파괴(열화)를 뜻하며, 이는 힘이 세냐 재료가 약하냐의 상관관계다. 재료가 그 힘을 감당하지 못하면 파괴(열화)가 일어나고 또 좋은 재료라도 예상할 수 없었던 큰 힘이 들어오면 재료가 터지거나 열화가 빠르게 진행된다. 따라서 힘을 줄이든지 분산시키거나 재료를 강하게 해야 한다. 그러나 스트레스(특히 환경 스트레스)는 우리가 제어하기 쉽지 않으므로 재료나 구조변경이 그 대책이 된다. 구조변경도 한계가 있으므로 재료에 관한 이해를 넓혀야 고장이 발생되지 않는다.

200년의 기계기술의 역사는 철강재료와 이의 부식을 방지하는 전처리, 도료의 역사였다고 생각할 수 있다. 이제 전자산업이 꽃을 피우고 있는 지금은 Silicon이라는 비금속 재료와 각종 Adhesive 등 고분자 화합물까지 망라해서 사용하고 있다. 우리는 현재까지도 이러한 재료에 대해 철강재료 수준만큼 연구되어 있다고 생각하지 않는다. 따라서 최근 개발된 전자부품일수록 신뢰성을 의심하고 있고 예전에 개발되어 누적 생산량이 많은 전자부품은 신뢰성문제가 적다고 간주하고 있다.

IC를 미시적으로 분해하여 들어가 보면 각종 재료의 구조물이다. 따라서 이의 신뢰성 향상은 수리통계론만으로는 해결되지 아니하고 기계공학이나 재료공학을 중심으로 이런 재료들이 주어진 환경과 동작 스트레스에서 어떻게 거동하는 것인지 이해해야 완성된다. 이제 전자부품의 고장형태가 기계부품의 그것과 같다는 것을 이해할 것이다. 이로부터 다음과 같은 중요한 결론이 도출된다.

우선, 고장률의 역수는 수명이 아니다. 그러므로 고장률이 낮아졌다고 해서 수명이 연장되는 것은 아니다. 또 그 역(逆)도 성립하지 않는다. 왜냐하면 지수분포를 따르지 않기 때문이다. 사람으로 비유해서 생각해보자. 20대 자동차 사고의 사망률을 줄이기 위해 안전벨트를 모두가 착용했다고 하자. 그렇다고 사람의 수명이 늘까. 결코 그렇지 않다. 수명은 그 원인이 암이라면 이를 해결해야 수명 연장이 가능하다. 또 암 치료제를 개발하면 수명이 늘겠지만 20대 사람의 사망률이 낮아지지 않음도 쉽게 이해될 것이다.

수명과 고장률에 관계되는 고장 메커니즘은 서로 다르므로 그 대책도 상이한 방향으로 진행하여야 한다. 그러므로 모든 부품은 수명 내에서는 마모고장 없이 우발고장이 지극히 낮은 형태로 개선되어야 하고 마모고장은 고객이 받아들이는 수명을 넘어서 발생되도록 해야 할 것이다. 이는 시간에 따른 고장률이 욕조곡선(Bathtub Curve)이 아닌 하키채선(Hockey-Stick Line)을 따라야 함을 의미한다.

둘째, MTTF(Mean Time to Failure; 평균수명)는 우리의 감각과 맞지 않는다. 가전제품 예를 들어 TV를 10년 사용한다는 사실은 10년간 약 10%쯤 망가지고 90%는 10년 넘어도 제대로 동작함을 뜻한다. 이를 B10수명 10년이라고 한다. 만약 이 제품의

고장형태가 지수분포를 따른다면 MTTF는 100년이 된다. 어림없는 일이다. 또 이 제품이 Weibull 분포를 따르고 형상모수(β)가 2라면 MTTF는 25년이 넘는다. 따라서 TV의 평균수명이 25년이라고 소비자에게 말하여 보자. 차후 고장 난 TV를 가지고 있는 사람에게 '수명 25년이라는 뜻은 25년 지나면 50%가 고장 난다는 뜻이며, 당신은 불행히 그런 제품을 받은 것'이라고 항변할 수 있을까. 불가하다. 지금 기술로 TV는 15년 넘으면 모두 고장날 것이다.

완제품 즉 가전제품이나 자동차의 경우에 소비자는 대략 10년 동안 사용하되 트러블이 없기를 기대한다. 10년 동안 20~30% 고장 난다면 비즈니스 측면에서 After-Sales Service로 인한 비용이 증가하고 이로 인해 제조사는 어려움을 겪을 것이다. 따라서 완제품의 경우에 소비자가 기대하는 수명 즉 10년 내에서는 누계고장 10% 이상의 수치가 발생하지 않도록 해야 한다. 물론 10년 넘어서면 모두 고장이 나더라도 소비자는 이해하리라는 것도 염두에 두자.

한편 부품의 경우에는 B10 수명 10년은 너무 큰 수치가 된다. 완성품의 10년 동안의 누계 고장률을 부품수로 나누어 할당 받아야 하므로 B0.01, B0.001, 또는 B0.0001 수명을 사용해야 할 것이다.(표 2 참조)

표 1 MTTF와 B10

형상모수	특성수명	MTTF	B10수명	B1수명
1.0	10,000	10,000	1,050	101
2.0	11,280	10,000	3,660	1,130
4.0	11,030	10,000	6,280	3,490

그리고 학계에 발표되는 논문에 보면 MTTF를 수명지표로 삼아 정리한다. 그러나 실 상황을 제대로 반영할 수 있는 B10수명은 MTTF가 같더라도 형상모수에 따라 표 1에 보이는 것처럼 상당히 큰 차이를 보인다. 실제감각과 괴리가 있는 MTTF보다 Bx수명으로 연구결과를 비교하고 평가하는 것이 의미가 있겠다.

셋째, 고장률(λ)과 수명(η; 특성수명)의 정의식이 달라져야 한다. 고장률의 정의는 고장개수를 총시험시간으로 나누어 표현한다. 그러나 시험 중에 고장이 발생하지 않으면 시험시간의 길이에 관계없이 고장률은 제로로 귀결된다. 이는 우리의 상식과 맞지 않는다. 따라서 고장수에 1을 더하여 계산함이 바람직하다. 마찬가지로 수명의 정의식도 총시험시간을 고장개수에 1을 더한 값으로 나누도록 함이 옳다.

우리가 다루는 고장률은 적은 값이므로 Poisson분포를 적용할 수 있다. 고장수가 r(r은 0포함 자연수)이면 Poisson분포의 모수를(r+1)로 가정할 때 r 사건 이하가 나타날 확률(α)은 약 40%이다. 여기서 모수란 평균 발생건수를 의미한다. 그러므로 r 건의 고장이 나타났을 때 미필(未畢)적 고장 하나를 더하여 (r+1)을 모수로 하여 추정한 고장률의 신뢰수준(Confidence Level ; $1-\alpha$)은 대략 60%가 된다. 이 신뢰수준 60% 근방이 바로 상식수준이 된다. 그리고 지금의 정의식 즉 (r+1)이 아닌 r로 추정하면 그 신뢰수준은 약 30%로 상당히 낮아짐을 첨언한다. 이는 현재와 같이 높은 신뢰성이 요구되고 아이템들이 이에 맞추어 가고 있는 현실을 감안하여 볼 때, 고장률이 적어서 확인시험시의 발견된 고장수가 서너 개보다 적어지기 때문이다. 수명의 경우도 같다. 아래의 식은 고장수(r)가 적고 α가 0.4 즉 신뢰수준 (1-)이 약 60%일 때 성립한다. 또 고장수가 커지면 r과 (r+1)의 차이가 크지 않음을 쉽게 이해하리라 본다.

$$\lambda \equiv (r+1)\cdot\frac{1}{n\cdot t} \cong \frac{\chi_{\alpha}^{2}(2r+2)}{2}\cdot\frac{1}{n\cdot t} \neq \frac{r}{\sum t_i} \quad (1)$$

여기서 n은 시료수, t는 시험시간, t_i는 개별 시험시간, χ^2는 카이자승 분포의 100(1-) 퍼센타일 값이다.

$$\eta^{\beta} \equiv \frac{1}{r+1} \cdot n \cdot t^{\beta} \equiv \frac{2}{\chi_{\alpha}^{2}(2r+2)} \cdot n \cdot t^{\beta} \neq \frac{\sum t_i^{\beta}}{r} \quad (2)$$

여기서 β는 Weibull함수의 형상모수이며, 이 지수가 커지면 수명근처에서 마모고장이 급격히 다발함을 의미한다.

넷째, 부품의 수명은 완성품의 수명보다 커야 하고 부품의 고장률의 합은 완성품의 고장률이 된다. 그러면 완성품의 고장률에 맞추기 위한 개개 부품의 고장률은 어느 정도로 낮아질까. 이를 표 2에 나타내었다. 같은 부품이라도 사용되는 완성품에 따라 요구되는 부품의 고장률은 차이가 많음을 이해하기 바란다.

또 여기서 중요한 것은 부품의 고장률 형태까지도 완성품의 고장률 형태가 된다는 사실이다. 즉 부품의 어느 하나라도 초기고장이 나타나면 완성품에도 그대로 전사(轉寫)된다. 완성품 고장률 형태는 부품 고장률 형태의 합이다. 그러므로 우리는 부품의 신뢰성에 관한 한 다음과 같은 조건을 만족하도록 요구해야 한다. 상호 인지된 환경과 동작조건에서 (1) 초기고장이 없을 것, (2) 고장률이 표 2의 개념대로 계산된 수치 이하일 것, (3) 수명은 완성품 목표보다 클 것, (4) 수명에 이르렀을 때 고장위치와 고장메커니즘을 밝힐 것 등이다.

다섯째, 우리는 신뢰성에 관한 시험규격을 잘 만들면 이를 차후의 개발품에 적용하여 고장 문제점을 다 찾아 내고 이를 분석하여 대책을 옳게 수립하면 신뢰성 좋은 제품이 나오리라 생각한다. 그러나 이는 우리의 기대일 따름이다. 이를 반증하는 사례가 바로 수많은 사고로 나타나고 있다. 경쟁우위를 확보하기 위해서는 제품성능의 개선이 이루어져야 하고 또 이익을 극대화를 위해 재료코스트를 줄이는 작업을 했을 것이다. 이로 인해 재료나 구조가 바뀌게 된다. 그러면 기존의 시험규격만으로는 이 부품의 신뢰성문제를 모두 찾아낼 수 없다. 고장이 발생되는 사유를 설명하는 고장메카니즘은 재료나 구조에 따라 바뀌기 때문이다. 따라서 영구불변인 규격은 없다.

이제 지금까지 정리한 이론으로 신뢰성 향상방법에 대해 논의하자. 이는 다음 세 절차를 밟는다.

1) 순간검사가 아니므로 시간을 들이고 동작/방치시험을 하여 고장모드를 발견한다.

2) 고장모드를 분석하여 고장메커니즘을 확정하고 재현시험법을 정리한다.

3) 고장메커니즘을 해결한 대책으로 설계/규격변경을 하고 이의 유효성을 재현시험법으로 확인한 다음. 다른 부작용이 없음도 확인한다.

여기서 중요한 것은 이 아이템들이 전세계 수요자 손에 들어가기 전에 지금 이곳(now and here)에서 이 일들이 정리되어야 한다는 사실이다. 이러한 절차 중 고장메커니즘을 밝히는 것이나 대책을 세우는 것도 어렵지만 고장모드를 발견하는 작업은

표 2 부품과 완성품의 고장률

항 목	가전제품(TV)	자동차	비행기
완성품의 목표 고장률	1%/년	1%/년	1%/년
연간 사용시간	2000시간	2000시간	2000시간
구성 부품수	1,000	10,000	100,000
요구되는 부품의 고장률	0.001%/년 5×10^{-9}시간	0.0001%/년 0.5×10^{-9}시간	0.00001%/년 0.05×10^{-9}시간

*1. 완성품이란 기술적 어려움이나 복잡함에 관계 없이 사용자에게는 문명의 이기(利器) 중의 하나 즉 한 개의 아이템으로 인식되므로 목표 고장률은 다 같다.
*2. 목표 고장률은 TV화재나 자동차 급발진, 비행기 추락 등 치명사고를 제외한다.
*3. 연간 사용시간 및 구성 부품수는 편의상 간략화하였음.

일의 첫 단추로서 결코 쉬운 일이 아니다. 고장모드를 발견하지 못하는 사유는 다음과 같다.

1) 고장률이 상당히 낮으므로 이러한 우발 고장을 발견할 만큼 충분한 시료수가 아니다.
2) 수명에 관련된 마모고장을 일으킬 만큼 시험시간이 충분히 경과되지 아니하였다.
3) 우발고장이나 마모고장이 나타나지 않는 조건으로 시험하고 있다.

우선 목표 고장률에 맞는 시료 수(n)는 식 (1)을 활용하면 다음과 같다.

$$n \geq (r+1) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot t} \qquad (3)$$

표 2에 보이는 TV용 부품의 고장률(5×10^{-9}시간)을 확인하기 위한 시험을 계획하여 보자. 약 60만 개를 1,000시간 시험했을 때 고장수가 두 개 이하라면 이 고장률을 확인한 것이 된다. 그것도 신뢰수준 60% 정도이다. 엄청난 일임을 짐작할 것이다.

또 Bx 수명 T를 확인하기 위한 시료 수와 시험시간은 식 (2)와 식 (4)를 활용하여 식 (5)로 주어진다.

$$T^{\beta} \equiv x \cdot \eta^{\beta} \qquad (4)$$

여기서 β는 Weibull 함수의 형상모수로서 1보다 큰 경우이며, x는 $0.01 \cdot x$이다.

$$n \geq (r+1) \cdot \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{T}{t}\right)^{\beta} \qquad (5)$$

시험시간(t)이 Bx 수명(T)에 비하여 짧을 경우 시료수가 꽤 많아진다. 이는 시험시간을 넘어서 수명을 보증하는 것이 불가능하다는 것을 암시하고 있다. 수명에 관한 한 시험시간을 초과해서 수명을 예측하는 것은 상식을 벗어난다. 실제로 수명시험이란 목표 수명을 지나서 존재해야 하는 하키채 선의 변곡점을 확인하는 일이다.

시험시간 단축을 위해 수명(T_f ; Time to Failure)에 관한 가속계수를 산정할 때는 다음과 같은 수명-스트레스(Life--Stress) 일반 식을 사용하는 것이 좋겠다. 쌍곡선함수항이 n승 법칙(Power Law)을 포함하여 몇 가지 변형이 가능하기 때문이다.

$$T_f = A \cdot \left[\sinh(aS)\right]^{-1} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \qquad (6)$$

여기서 S는 스트레스, Ea는 활성화 에너지, k는 볼츠만 상수, T는 온도, A 및 a는 계수이다.

가속시험에서 유의할 점은 가속이 크면 클수록 즉 시험시간을 줄일수록 실제와 틀어질 가능성이 많으며, 더욱 심하면 고장메커니즘이 달라져 위의 수명-스트레스 식 자체가 변한다는 사실이다. 다시 말하면 식 (6)의 스트레스나 계수 등이 바뀐다. 따라서 가혹조건에 의한 가속시험으로 부식이나 피로파괴 등의 수명을 추정할 때는 사용조건과 가속조건 사이의 충분한 상관관계를 확보할 일이다.

마지막으로 시험조건을 확실히 하기 위해서는 고장메커니즘에 관한 이해를 넓혀야 한다. 대 분류로 대략 50여 가지의 고장메커니즘이 있고 주로 고장률에 영향을 미치는 과응력고장(overstress failure)과 수명을 결정짓는 마모고장(wearout failure)의 메커니즘으로 나뉘므로 이를 잘 조사하여 시험조건을 결정할 일이다.

이제 우리는 첨단기술 IT, NT 등 6T를 발전시키면 선진국으로 진입하는 줄로 오판하고 있다. 왜냐하면 소프트웨어가 버그 없이 월등히 우수할 때 하드웨어는 빛을 발하지만 그 하드웨어 속에는 반드시 고장 즉 신뢰성 문제가 상존하기 때문이다. 이에 대해 깊이 있게 대처해야 한다. 여타 과학기술에 대한 정부노력은 많았지만 2년 전까지만 해도 신뢰성에 관한 한 우리나라는 공백상태

에 있었다. 신뢰성학회(KORAS)가 일본보다 30년 늦게, 1999년 말에 설립된 것은 이를 분명히 밝히고 있다. 세계 모든 일류 회사는 신뢰성 기술을 비밀로 다루고 있어 그 존재의 파악조차 쉽지 않았기 때문이다.

이제 40~50년 뒤쳐진 기술을 따라가느라 정부 주도로 여러가지 노력을 기울이고 있다. 부품/소재부문은 산자부의 지원하에 기술표준원의 지도로, 분야별 정부출연 연구원 18곳이 각종 부품/소재의 신뢰성 시험규격을 제정하고 시험평가 하도록 되어 있다. 이는 늦었지만 다행한 일이다. 또 고장원인을 깊게 파헤치려고 산자부지원으로 대학에 고장 분석센터를 시범적으로 설치하여 가동에 들어갔고, 앞으로 규격제정에 필수요소인 고장메커니즘 연구까지 산자부나 과기부의 지원으로 활성화되면 선진국 진입은 조기에 가능할 것이다. 덧붙여 선진국의 일류회사도 상호 교류가 없어 신뢰성향상 접근법이 회사마다 다르고 체계적이지 않고 때로는 모순도 있다는 사실을 염두에 두고 국내에서 스스로 해결할 일이다.

아무튼 신뢰성에 관한 원칙은 수명이 20년이라면 20년 동안 무슨 고장이 어디서 어떻게 일어나는지를 그 부품·제품 출하 전에 찾아내어 그 구조나 재료를 바꾸는 설계변경을 하고 그 결과 수명이 20년 넘는지 그리고 수명기간 내의 연간 고장률은 충분히 낮은지를 정량적으로 확인해야 한다는 사실이다. 이를 제대로 추진하려면 사용조건과 유사한 시험을 다양하게 실시하여야 한다.

어디가 약한지 시험하지도 않고 수명과 수명 내의 고장률도 모르면서 부품(제품을 시장에 내어놓으면 그에 상응하는 대가를 치른다는 사실을 유념해야 한다. 다우(코닝 사가 32억 달러를 변상했음을 기억하자. 기술의 역사는 사고의 역사였으며, 그 대가로 발전하여 왔다.

[참고문헌]

1. D. Ryu/고장분석개론 (03년2월)/심화교육과정/신뢰성분석연구센터/한양대학 HIT.
2. D. Ryu/제품품질과 신뢰성에 대한 이해/KOTEF 저널 (2002, 가을호), p112~128/한국산업기술재단.
3. D. Ryu/Quality, Product Quality, and Market Share Increase/ International Journal of Reliability and Applications (2001, 9월), p161~187/한국신뢰성학회.

기계용어해설

셀전압(Cell Voltage)

전기화학반응에서 생성된 전기에너지가 회로에 연결되었을 때, 화학반응을 하기 위한 활성화 손실과 회로의 저항에 의해서 생기는 전기적 손실, 그리고 연료의 농도가 낮아져서 생기는 손실 등으로 인한 접압 손실이 고려된 실제 측정 가능한 전압을 말한다.