

기계시스템 신뢰성 평가

권영일 · 청주대학교 산업공학과, 교수

_e-mail : yikwon@cju.ac.kr

이 글에서는 기계류 시스템이나 부품에 대한 신뢰성 평가척도, 신뢰도 예측 및 시험방법 등 신뢰성 평가와 관련된 주제들을 간단한 사례를 곁들여 소개하고자 한다.

신뢰성이란?

신뢰성(reliability, dependability)이란 용어는 개인의 품성, 단체나 기관의 이미지를 비롯하여 장비, 기기 등의 특성을 표현할 때 종종 사용되는 용어로서 매우 긍정적인 의미를 내포하고 있다. 사전적 의미로서 '신뢰성 있는 사람'이란 "정직하고 일관성이 있으며, 믿고, 의지할 수 있는 사람"을 말한다. 우리가 자동차나 가전제품, 산업용 기기를 구입할 때도 이 제품을 과연 사용기간(service life) 동안 믿고 사용할 수 있을지를 판단하게 된다. 여기서 믿을 수 있다는 것은 곧

'신뢰성이 있는 제품'임을 의미하며 "제품이나 기기가 고장(failure) 없이, 초기의 우수한 성능을 일관성 있게 유지함"을 뜻한다.

신뢰성의 척도

수리 가능한 시스템 예를 들어 사용자의 입장에서 신뢰성 있는 자동차란 사용기간 동안 가능한 한 고장이 없어야 하며, 고장이 나더라도 적은 비용으로 신속히 수리할 수 있는 자동차를 말할 것이다. 여

기서 '고장'이란 운행이 불가능하거나 안전한 운행에 지장을 주는 '갑작스런 부품의 고장이나 기능의 상실뿐 아니라, 구입초기의 우수한 성능들이 규정된 수준 이하로 저하되는 현상'도 고장에 해당한다. 이러한 의미에서 신뢰



그림 1 갑작스런 기능의 상실뿐 아니라 초기의 성능들이 규정된 수준 이하로 저하 되는 현상도 고장이다.

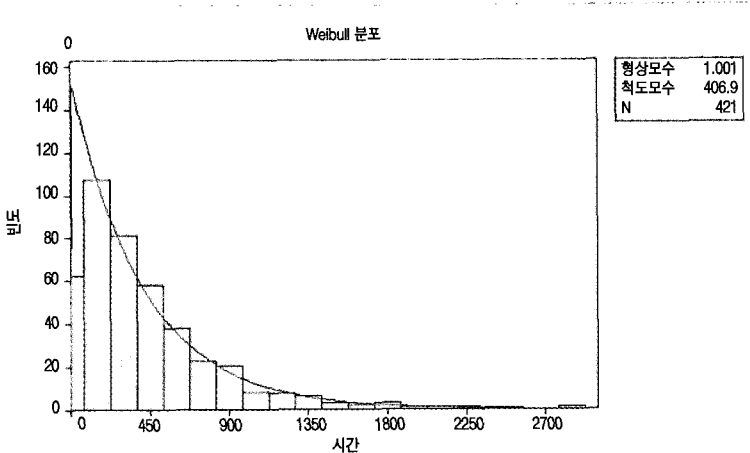


그림 2 건설용 중장비의 고장시간 분포

성이란 먼저 '고장이 잘 나지 않는 특성과 고장이 나더라도 신속히 수리되는 성질'을 포함하는 개념으로 정리할 수 있다. 여기서 고장이 나지 않는 특성을 좁은 의미의 신뢰성(reliability)이라고 하고 신속히 수리되는 특성을 보전성(maintainability)라고 부른다. 버스나 택시 또는 트럭 운송 업체들의 경우 신뢰성이 있는 차량을 구입, 사용해야 고장이 적고 고장이 나더라도 신속히 수리되어 결과적으로 차량의 운용률이 높아져 전반적인 수익률도 향상될 것임은 자명하다. 고장이 적고 수리시간이 짧아 높은 운용률을 확보한다는 것을 신뢰성에서는 높은 가용도(availability)를 유지한다고 말한다. 즉 자동차나 산업용기기, 설비 등과 같이 수리하면서 사용하는 시스템(repairable system)의 신뢰도는 가용도로써 나타낼 수 있다. 고장 날 때까지의 가동시간이 길수록, 수

리시간은 짧을수록 가용도는 높아진다.

한편 동일한 재료로 제작된 동일한 시스템이나 부품이라 할지라도 재료 자체의 산포와 제조과정의 산포, 그리고 사용환경의 차이로 말미암아 각 개체의 고장시간은 다를 수밖에 없다. 이러한 현상을 반영하기 위해 각 개체의 고장시간을 확률 분포로써 표현하게 된다. 마찬가지로 수리시간 역시 고장부위나 고장모드, 작업자나 수리장치에 따라 산포를 가지므로 수리 시간의 분포로써 표현하게 된다. 왼편의 그림은 한 건설용 중장비 421대에 대한 실제 고장시간 분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 시스템의 평균 고장시간 간격(mean time between failure)을 MTBF, 고장시 평균 수리시간(mean time to repair)을 MTTR이라 표현하며, 시스템의 가용도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{가용도(Availability)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

예를 들어 산업용 설비의 MTBF=1,500시간, MTTR=20시간이면 설비의 가용도는

$$\text{가용도(Availability)} = \frac{1500}{1500 + 20} = 0.9868$$

즉, 98.68%의 가용도를 갖게 된다.

수리 불가능한 시스템

베어링이나 핀, 밸브, 스프링 등 기계류 부품의 경우 고장이 나면 수리하여 사용할 수 없거나 수리가 가능하다고 해도 경제성 면에서 폐기하는 편이 더 유리한 경우도 있다. 이와 같이 수리가 불가능한 장치나 부품의 신뢰성을 표현할 때에는 통상 특정한 시간 동안 고장 없이 작동할 확률, 즉 신뢰도로써 나타낸다. 예를 들어 한 자동차의 원도 모터가 10년간 90% 이상이 고장 없이 작동한다면 이 모터의 10년째 신뢰도는 90%가 되는 것이다. 그런데 확률로 표현되는 신뢰도의 개념이 일반인들에게는 다소 생소하게 느껴질 수도 있다. 사용자 또는 소비자의 입장에서 구입하는 기기나 부품의 사용수명이 얼마나 되는지가 더 명확하고 이해하기 쉬울 것이다. 여기서 사용수명이란 고장 없이 사용할 수 있는 기간을 말하며, 기계류 부품의 경우 일반적으로 전체 제품의 90% 이상이 고장 없이 작동하는 기간 또는 전체의 10%

이내가 고장 나는 기간으로 표현한다. 이 기간을 B_{10} 수명이라고 부르며, “ B_{10} 수명이 10년”이라는 의미는 이 부품을 구입할 경우 “10년간 고장 없이 사용하게 될 확률이 90%”임을 뜻한다. 따라서 소비자는 10년간 사용 시 신뢰도가 90%라는 것을 믿고 이 제품을 구입하게 되는 것이다.

사용수명과 보증기간

신뢰성 시험이나 보증과 관련하여 가끔 혼동을 일으키는 두 가지 개념이 사용수명과 보증기간이다. 사용수명이란 그 제품을 개발, 생산할 때 필드에서 고장 없이 사용할 수 있는 기간으로 설정된 설계수명(design life)을 말한다. 한 자동차 부품을 10년(또는 16만 km)간 고장 없이 사용하도록 설계하였다면 이 부품의 사용수명은 10년(16만 km)이며 개발자와 제조 기술자들은 이 사용수명을 충족시키도록 노력할 것이다. 동일하게 생산된 부품이라 할지라도 각 개체의 수명은

확률분포로써 나타나므로 현실적으로는 고장확률이 낮은 기간(높은 신뢰도가 유지되는 기간) 동안을 사용수명으로 설정하게 된다. 기계류 부품의 경우 통상 B_{10} 수명을 사용수명으로 설정하며, 원자력 발전소에 사용되는 기기나 자동차 브레이크 등과 같이 고장발생 시 안전상에 문제를 초래하거나 상대적으로 큰 손실을 유발하는 부품에 대해서는 고장확률이 매우 낮은 기간, 즉 신뢰도가 매우 높은 기간 동안을 사용수명(예: B_{1} 수명, $B_{0.1}$ 수명)으로 설정하게 될 것이다.

보증기간이란 생산자가 소비자에게 제공하는, 고장 발생 시 무상 또는 최소한의 비용으로 수리를 보장하는 기간으로서 자회사 제품의 신뢰성을 홍보하고 보증하기 위해 정책적으로 결정되는 기간이라고 할 수 있다. 예를 들어 사용수명(설계수명)이 10년/16만 km인 자동차에 대해 3년/5만 km 동안 모든 고장에 대해 무상으로 수리해주는 보증기간을

제공할 수 있으며 신뢰성이 높은 제품일수록 경쟁회사보다 긴 보증기간을 제공할 수 있을 것이다. 일반적으로 보증기간은 고장이 거의 발생하지 않는 기간으로서 경쟁관계에 있는 제품의 보증기간을 고려하여 결정하게 된다.

왜 신뢰성이 높아야 하는가?

앞에서 신뢰성이 높은 차량을 구입, 운용하는 운송업체가 높은 가용도를 유지할 수 있고 결과적으로 경제성 있는 운영이 가능하다는 사실을 살펴보았다. 신뢰성이 좋아야 국내나 세계시장에서 경쟁력을 가질 수 있다는 것은 공작기계나 산업용 설비 등 모든 시스템, 장치, 기기에 공통적으로 적용되는 사실이다.

표 1은 미국시장에서 한국의 대표적 수출차종과 비슷한 사양과 소비자층을 갖고 있는 일본, 미국 차량들의 연식별 중고차 가격 변화추이를 나타낸 것이다.

해마다 엔진배기량을 비롯해

표 1 미국시장에서의 한국, 미국, 일본 차량의 연식별 중고차 가격 변화 추이

제조국	모델명	가 격 (US\$)					감소율 (%)
		2002	2000	1998	1996	1994	
한국	OOO GLS SEDAN 4D V6 2.7	14,280	10,900	7,030	5,310	3,520	75
미국	FORD TAURUS LX SEDAN 4D V6 3.0	11,350	8,150	6,120	5,610	4,485	60
일본	TOYOTA CAMRY LE SEDAN 4D 4Cyl 2.4	15,985	12,215	9,435	8,400	6,650	58
일본	HONDA ACCORD DX SEDAN 4D 4Cyl 2.3	13,900	11,050	8,625	7,550	5,950	57

다소의 모델변경이 있어 정확한 가격을 반영하는 것은 아니지만 전체적인 추이는 의미 있는 결과를 나타낸다고 생각된다.

구입 후 8년이 경과된 중고차량의 가격이 새 차에 비해 일본차의 경우 약 43%, 미국차의 경우 40%가 유지되는 반면 국산차의 경우는 25% 수준으로 떨어짐을 볼 수 있다. 차량 가격 역시 구입가와 무관하게 가장 낮은 가격이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 결국 차량의 내구성능인 신뢰성의 차이에 기인한 것이라고 판단된다. 오래 사용하더라도 고장 없이 신차와 별 차이 없는 성능이 유지된다면 소비자는 중고차라 할지라도 높은 가격을 지불하고 구입하게 되는 것이다. 굴착기, 지게차, 각종 공작기계 등 국산 기계류 시스템이나 장치

에 있어서도 신뢰성이 제품의 경쟁력에 미치는 영향이 자동차의 경우와 유사할 것이라고 추측할 수 있다. 신뢰성이 좋은 제품을 개발하고 생산한다면 세계시장에서 소비자의 좋은 평판을 기대할 수 있으며, 소비자의 좋은 평판은 매출 증대와 좋은 가격의 유지라는 두 마리 토끼를 잡을 수 있는 기회를 창출할 것이다.

신뢰성을 어떻게 측정하고 평가할 것인가?

높은 신뢰성의 제품이나 부품을 개발하고 생산하기 위해서는 여러 가지 종합적인 기술과 체계적인 노력이 필요하다. 신뢰성을 확보하고 유지, 관리하기 위해서는 먼저 현재의 신뢰성 수준을 측정할 수 있어야 한다. 현재 사

용 중인 공작기계의 MTBF가 얼마나 되는가? 새로 개발한 굴착기용 유압실린더의 B_{10} 수명은 얼마인가? 또한 이들 값을 어떻게 구할 것인가가 신뢰성의 측정과 평가에 해당하는 문제이다. 신뢰성 분야에서는 여러 부품이나 서브시스템들로 구성되는 시스템으로부터, 장비나 기기, 조립체, 최종 부품 등을 모두 총칭하여 아이템(item)이라 부른다. 아이템의 신뢰도를 예측하거나 평가하기 위한 방법으로서 다음과 같은 것들이 있다.

- 수명시험 및 데이터 분석
- 필드 고장 데이터 분석
- 유사 아이템의 자료 사용
- 예측을 위한 데이터베이스 사용
- 고장물리

신뢰성 평가방법은 대상 아이템이 '수명주기(life cycle) 상의 어느 지점에 있는가'와 '동일하거나 유사한 아이템의 신뢰성에 대한 과거 데이터(historical data)가 존재하는가'에 따라 선택될 수 있다.

수명시험

현재 개발 단계의 아이템으로서 동일 또는 유사한 제품의 개발경험도 없는 최초의 아이템이라면 그 신뢰도 평가방법도 제한적일 수밖에 없다. 이러한 아이템에 대해서는 시제품 또는 소량의 시험용 샘플을 대상으로 수명시험(life test)을 실시하여 그 결과

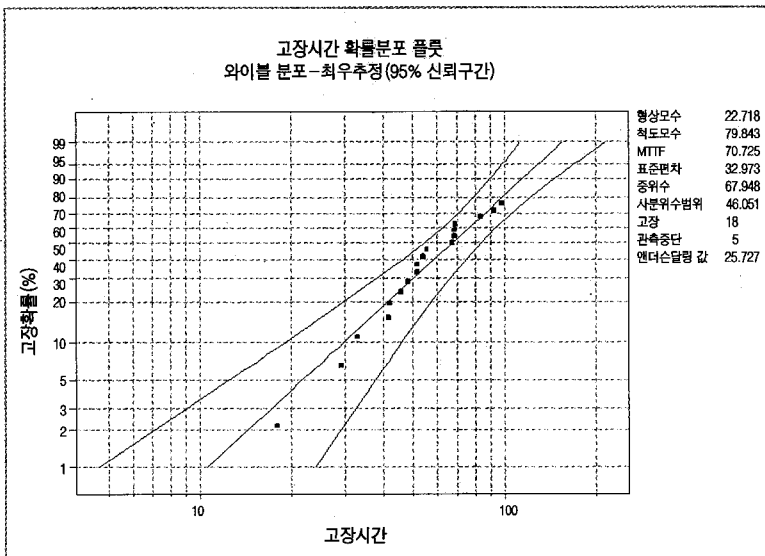


그림 3 볼베어링의 수명데이터 분포(와이블 분포)

로부터 수명이나 MTBF 등 신뢰성을 추정할 수 있다. 사용조건에서의 수명시험에는 오랜 시간이 소요되므로 고장시간을 단축시키기 위해 가속시험(accelerated test)을 적용하는 경우가 많다. 가속시험이란 실제 필드의 사용조건인 스트레스(적용압력, 온도, rpm, 토크 등)보다 가혹한 스트레스를 적용하여 인위적으로 수명을 단축시킴으로써 조기에 수명데이터를 얻는 시험방법이다. 가속시험을 적용할 때 주의할 점은 필드에서와 동일한 고장메커니즘과 고장모드를 갖도록 가속시험을 설계하고 실시해야 한다는 것이다. 고장메커니즘이란 고장원인으로부터 고장에 이르기까지의 물리적, 화학적 과정을 말한다. 수명시험 자료를 사용하여 수

명분포나 신뢰성을 추정할 수 있는 여러 가지 소프트웨어(Minitab, Weibull++, ALTA 등)가 개발되어 있으므로 이들을 활용하면 시험 데이터의 통계적 분석을 수월하게 수행할 수 있다. 위 그림은 23개의 볼 베어링을 수명시험한 데이터를 분석하여 추정한 수명분포(와이블 분포)와 그 파라미터들(형상모수, 척도모수, 평균수명 등)을 나타내고 있다.

과거 데이터에 기초한 신뢰도 예측

개발단계의 아이템이라 하더라도 재질이나 설계, 제조나 사용환경이 동일하거나 유사한 아이템의 신뢰성 데이터가 존재한다면 이들 자료를 사용하여 대상 아이템의 신뢰도를 예측할 수 있다.

부품 유형별로 실제로 시험한 자료를 사용하여 각 부품의 고장을 또는 MTBF와 같은 신뢰도를 산출한 Database를 활용하여 부품이나 시스템의 신뢰도를 예측하는 방식이다. 기계류 부품의 신뢰도 예측을 위한 대표적인 방법이나 데이터베이스로서 표 2와 같은 것들이 있다.

데이터베이스에 의한 신뢰도 예측방법을 사용할 때 유의할 점은 현재 대상 아이템의 재료, 설계기술, 제조환경 등이 제각기 다를 수 있으므로, 과거 데이터에 기초한 예측결과가 실제와는 다를 수도 있다는 것이다. 실제로 특정 부품의 경우 Database에 의한 고장을 예측치와 실제 시험 결과 간에 수십배 이상의 차이가 나는 경우도 보고되고 있다.

표 2 기계류 부품의 신뢰도 예측을 위한 대표적 방법 및 데이터 베이스

데이터 출처	제 목	출판사 및 날짜
NPRD-3	Nonelectronic Parts Reliability Data	Reliability Analysis Center, 1985
GIDEP	Government Industry Data Exchange Program	US Dept. of Commerce
DEFSTAN 0041, Part3	MOD practices and procedures for reliability and maintainability, Part3, Reliability Prediction	Ministry of Defense, 1983
MIL-HDBK 217	Military Handbook - Reliability prediction of electronic equipment	US Department of Defense, 1995
PRISM	Reliability Prediction and Database for Electronic and Nonelectronic Parts	Reliability Analysis Center, 2003
OREDA 92	Offshore Reliability Data, 2nd Ed.	DnV Technica, Norway, 1992
NSWC-98	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment	Naval Surface Warfare Center, 1998

필드데이터 분석

만약 아이템이 양산단계에 있고 필드에서의 고장데이터가 수집되고 있다면 필드데이터를 분석하여 아이템의 신뢰도를 추정할 수 있다. 시험실에서의 수명시험에는 높은 비용과 시간이 소요되며 시험 가능한 시료수도 소량으로 제한적이지만, 필드에서의 자료는

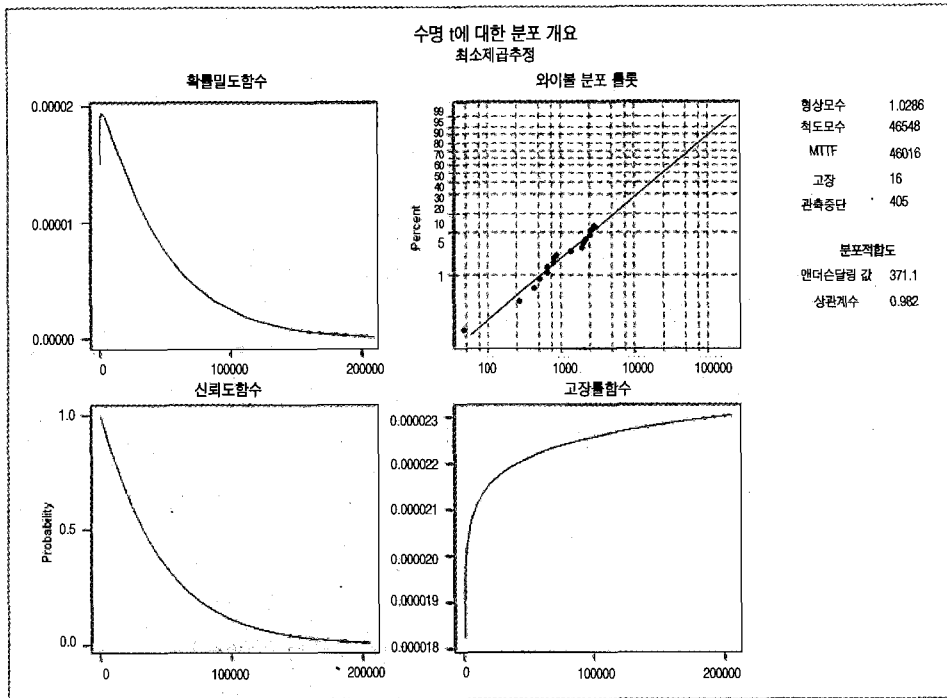


그림 4 굴착기 붐 실린더의 필드고장자료 분석사례

실제 사용환경에서의 정보가 대량으로 얻어지므로 신뢰성 평가를 위해 매우 유용하고 중요한 자료라 할 수 있다. 필드데이터 역시 그 유형별로 적합한 소프트웨어를 활용하여 분석이 가능하다. 위 그림은 굴착기 붐 실린더의 필드고장데이터를 분석하여 고장밀도함수, 신뢰도함수, 고장률함수 및 수명분포 등 신뢰성 자료를 산출한 결과를 보여주고 있다.

고장물리

고장물리(physics of failure)란 각 부품에 대한 고장 메커니즘을 모델링하고, 각 고장메커니즘과 확률밀도함수를 조합하여 부품의 신뢰도를 결정하는 방식

이다. 고장물리의 목적은 특정한 사용환경에서 언제 특정한 고장 메커니즘이 발생할지를 결정하기 위한 것이다. 고장물리에 의한 예측은 electromigration, 용접부위 크래킹 등 개개의 고장메커니즘을 관찰하여 제품의 사용 기간 내 부품 마모(wearout)의 확률을 추정함으로써 이루어진다. 이 방법을 사용하기 위해서는 각 재료의 특성, 형상, 그리고 사용환경 조건에 대한 상세한 이해가 요구된다. 고장물리는 재료, 구조, 기술의 평가를 위한 과학적 근거를 수립함으로써 아이템의 설계단계에서 초기에 신뢰도문제를 해결하기 위해 사용된다. 고장물리의 접근방법은 다음과 같다.

- 가능한 고장메커니즘(고장을

유발하는 물리적, 화학적, 열 관련, 구조적, 기계적, 전기적 과정), 고장부위, 고장모드를 규명한다.

- 적절한 고장 모델과 그 파라미터들을 규명한다. 파라미터 들로는 재료특성, damage 속성, 고장부위의 형상, 제조 결함과 불량, 그리고 환경 및 운용 부하 등이 있다.
- 가능하다면 각 설계 파라미터들의 산포를 파악한다.
- 신뢰도 함수를 산출한다.
- 산출된 신뢰도가 지정된 기간 동안 요구되는 신뢰도를 충족하면 그 설계(design)를 채택한다.