



THEME 01

신뢰성이란 무엇인가?

김 선 진 | 부경대학교 기계자동차공학과, 교수 | e-mail : sjkim@pknu.ac.kr

이 글에서는 기계·구조물의 구조상 기능에 관한 신뢰성을 효과적으로 활용하기 위한 구조신뢰성공학의 관점에서 신뢰성의 개념, 신뢰성·신뢰도의 정의와 의미, 신뢰성의 척도 그리고 신뢰성공학의 발전 동향에 관하여 기술하고자 한다.

들어가며

일반적으로 ‘신뢰성(reliability)’ 이라고 하는 단어는 공학적 정의를 떠나서 ‘믿을 만하다 혹은 믿음이 간다’ 는 공통적 의미를 내포하고 있다. 따라서 오늘날 우리의 생활 전반, 즉 정치, 경제, 사회, 문화 등에서 일상적으로 신뢰성이란 용어를 부담 없이 사용하고 있다. 공학자가 아닌 사람도 상식적으로는 ‘신뢰성’ 이 질(quality)을 표현하는 언어라고 생각한다. 그러나 그 질을 수량적 혹은 객관적으로 표현하는 것은 아니다. “A회사의 제품이 B회사의 제품보다 신뢰성이 높

다고 생각 한다” 고 할 때, 이것은 그 나름의 이유가 있다고 할 수 있다. 그러나 반드시 이러한 것이 객관적 사실을 이야기 한다고는 할 수 없다. 물론 아주 객관적인 경우도 있다. 예를 들어, 고품질의 재료를 사용하여 사양 변경 등을 행한 경우 등이다. 그런데도 이러한 표현은 정성적이고 신뢰성이 얼마만큼 향상되었는가를 논하는 것은 아니다. 정성적이라 하여 의미가 없는 것은 아니나, 이러한 표현을 보다 이론적, 정량적(수량적)으로 논하려는 것이 신뢰성공학의 입장이다.

제품의 신뢰성은 소비자가 제품을 구매하거나 비교

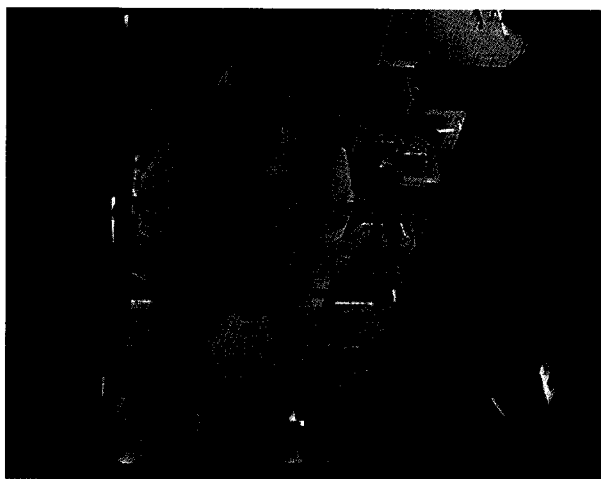


그림 1 NASA(미국항공우주국)는 세계 최고 수준의 신뢰성평가 기술을 보유하고 있다.(사진은 www.nasa.gov에서 발췌)

평가 할 때 고려하는 중요한 인자 중의 하나가 되었다. 이러한 관점에서 신뢰성을 다루는 신뢰성공학은 공학자에게는 매우 중요하게 인식되어 오래전부터 현재까지 많이 연구되고 또한 활용되고 있는 실정이다. 고전적으로 신뢰성공학은 복잡화된 시스템을 어떤 정하여진 기간 동안 그 기능을 유지하기 위한 기술로써 발전하였다. 시스템을 구성하는 각각의 요소를 분해하여 각각의 요소에 대한 신뢰성(신뢰성의 정의는 뒤에 기술하기로 함)을 정하여 시스템의 신뢰성을 합성하는 방법이다. 이러한 신뢰성공학은 전기·전자 등의 시스템에 관련한 분야에서 발전하기 시작하였다. 이것이 구조물 혹은 재료강도에 대하여 응용되면서 구조분야의 문제점이 점차 해결되었다.

이 글에서는 기계나 구조물의 구조상 기능에 관한 신뢰성을 달성하기 위해서도 충분히 효과적으로 취급할 수 있기 때문에, 이것을 목적으로 하는 구조강도신뢰성공학 혹은 구조신뢰성공학이라고 하는 입장에서 신뢰성을 기술하고자 한다.

구조신뢰성공학의 특색은 하중(넓은 의미의 사용환경; load)과 재료강도(구조 부재의 강도; strength)가 모두 큰 불확실성 내지 변동(혹은 산포)을 가지기 때문에 이 양자를 고려해서 파손확률(failure probability)이나 구조물의 강도를 구한다는 것이다. 구조물의 안전성·신뢰성을 확보하려고 할 때 종래부터 경험에 기초한 안전계수(safety factor)라는 것이 사용되고 있다. 이것에는 많은 설계 파라미터가 도입되어 수치로써 주어지고 있다. 이것은 비록 불충분하지만 구조물 등의 안전성·신뢰성을 표현하는 하나의 척도임에는 틀림없다. 안전계수라고 하는 것은 어떤 이론에 따라서 설계했을 때 결과에 보증을 하기 위한 것이다. 이렇게 하는 이유는 구조물의 설계, 제작, 사용의 각 단계에 있어서 많은 불확실성(uncertainty)의 요인이 있다는 것을 알고 있기 때문이다. 이러한 불확실성의 원인은 어떤 것은 공학이 충분히 발전하지 못했기 때

문에 잘 모르는 것이 있는 경우도 있을 것이고, 또 어떤 것은 본질적으로 확률론적 현상이기 때문일 경우도 있을 것이다. 이와 같이 공학자는 재료의 강도나 하중 등의 환경조건이 결정론적으로는 취급할 수 없다는 것을 잘 알고 있다. 구조신뢰성공학에서는 이러한 불확실성의 요인을 확률·통계론을 이용하여 취급하고 안전계수적 접근보다도 보다 이론적, 정량적으로 이들의 문제를 고찰하려고 하는 것이다. 구조신뢰성공학의 초기에는 결정론적 파괴기구, 확률적 구성(확률분포 등) 등을 개지로 하여 파괴확률(혹은 파손확률)이나 수명의 확률분포 등이 어떻게 구해지는지 등에 중점을 두어 왔다. 또 그와 같은 방법을 기초로 해서 구조물의 안전성에 중대한 영향을 미치는 인자의 인식과 최적화의 문제 등이 연구되었다. 이와 같은 방법을 고전적 신뢰성이론(classical reliability theory)이라 부르는 경우도 있다. 그 이유는 현실에 신뢰성이론을 적용하려고 하면 데이터의 부족 때문에 문제가 생기고 그 때문에 공학자의 경험과 지식에 기초한 주관적인 요소를 도입하려는 시도가 나타났다. 이러한 이론은 고전적 신뢰성이론에 대해서 베이지안(bayesian) 신뢰성 이론, 퍼지(fuzzy) 신뢰성 이론이라 부른다.

구조신뢰성공학은 신재료(new materials)를 이용한 제품이나 새로운 가혹한 환경 하에서 사용하는 제품을 설계하는 경우에 시행착오를 최소한으로 하고 제품화하기까지의 기간 단축 문제, 비용을 줄이는 경제성의 문제, 예기치 않은 파괴사고에 대한 안전계수의 상승 필요성 문제, 그리고 인간, 사회의 신뢰성 보증 문제 등을 해결하는 데 유력한 수단이 된다. 특히 기계·구조물의 높은 신뢰성을 실현하기 위해서는 외력, 재료역학, 파괴역학, 재료강도학, 통계학, 확률론 및 확률과정론 등의 모든 공학적 지식을 활용한 구조신뢰성공학적 취급이 필요하다. 이하에서는 기계공학도의 관점에서 신뢰성의 정의와 의미, 신뢰성의 척도

그리고 신뢰성공학의 발전 동향에 대하여 지면관계상 간략히 기술한다.

신뢰성 · 신뢰도의 정의

신뢰성이나 신뢰도는 다같이 영어로는 'reliability'라고 한다. 영어의 reliability는 rely와 ability의 합성어에서 유래된 말로 추상적으로는 인간 혹은 물건을 신뢰할 수 있는가 없는가 하는 하나의 믿음의 징표라 생각할 수 있다. 일반적으로 신뢰성이란 시스템 또는 부품이 주어진 환경에서 고장 없이 일정기간 원래 성능을 유지하는 특성으로 선진국과 후진국의 설계기술 수준을 비교하는 핵심요소라 할 수 있으며, 브랜드 이미지와 함께 수요자의 만족도를 평가하는 데 중요한 요인이라 할 수 있다. 그러나 신뢰성공학에서 정의하는 신뢰성의 개념은 현재 그 대상이 계(system), 기기(device), 장치(equipment) 등만이 아니고 소프트웨어, 인간-기계 시스템에까지 확대되고 있다. 일반적으로 신뢰성공학에서 말하는 신뢰성(reliability)은 "아이템(item)이 주어진 조건하(under a specified conditions)에서 규정된 기간(a specified period of time) 중 요구되는 기능(its function)을 수행하는 성질(property)"이라 정의하고 있다. 여기서, 아이템이라고 하는 것은 시스템, 부 시스템, 기기, 장치, 구성품, 부품, 소자, 요소 등의 총칭을 의미한다. 신뢰성이 높다고 하는 것은 고장이 잘 일어나지 않는다고 할 수 있다. 또한, 여기서 고장(failure)이란 구조체의 요구된 기능의 상실을 의미하고, 구조체의 파손(rupture) 혹은 파괴(fracture)도 고장 중에 포함하는 것으로 한다. 우리나라에서도 신뢰성에 대한 용어가 KS A 3004에 수록되어 있으며, 동일한 내용이 일본에는 JIS Z 8115로, 영국에는 BS 4778, 미국에는 미국방성 규격 MIL-STD-721 등이 있다.

상술한 신뢰성의 척도로서 확률(probability)을 이

용한 신뢰도가 있다. 이것은 신뢰성을 가능한 한 객관성을 갖게 하고 이론적, 수량적으로 취급하기 위한 것이다. 신뢰도도 영어로는 reliability로 신뢰성의 reliability와 같은 영어 단어를 사용하고 있으며, 그 정의는 "계, 기기, 부품 등(일명 아이템)이 주어진 조건하에서 규정된 기간 중 요구되는 기능을 수행하는 확률(probability)"이라 하고 있다. 이것 외에도 대상(예를 들어 시스템이나 제품)에 의해서 적당히 정의되지만, 이 정의에서 매우 중요한 것은 다음과 같다.

- ① 주어진 조건(conditions)
- ② 요구되는 기능(function)
- ③ 규정된 기간(시간)(period of time)
- ④ 확률(probability)을 척도(measure)로 한다.

특히, 신뢰성을 수식을 이용해서 취급하기 위해서는 네 번째 신뢰성의 척도로서 확률을 이용한다는 것이다.

첫 번째, 주어진(규정된) 조건이란 구조물의 사용 조건(환경 상태)을 말하는 것으로 통상의 상태만이 아니고 극한적인 상태도 고려하는 것이 보통이다. 예를 들면, 태풍, 지진 등, 혹은 어떤 부분에 손상이 생겨 부하가 증대하는 것 등이다. 사용 조건을 정확히 규정해 두는 것은 고장의 책임이 사용자에게 있는가 아니면 설계자 혹은 제작자에 있는가를 결정할 수 있는 기준도 될 수 있다.

두 번째, 요구되는(규정의) 기능은 쉽게 정할 수 있겠지만, 그러나 그 기능을 상실한다는 것, 즉 고장을 정의하는 것은 매우 곤란한 경우가 있다. 구조물이 외부의 작용에 대해서 응답하고 그것이 한계치를 넘었을 때, 어떤 불합리한 것을 발생시키고 그 기능을 잃는다고 하자. 어떠한 불합리한 것이 어떠한 조건에서 발생하는가를 명확히 하지 않는 한은 고장을 정의하기 어렵고 실제로 발생하는 현상을 확률을 이용해서 논하는 것도 불가능하다. 사용되는 환경조건이 복잡하면, 또 구조물이 복잡하면 고장의 종류도 많아지게 되

어 이들 모두를 고려하지 않으면 안되는 경우도 있다. 손상 혹은 고장의 직접적 원인이 되는 외적 요인이 별개의 것으로 각각 독립한 경우에는 각각의 손상에 대해서 별개로 취급하여 고찰하는 것이 가능하다. 그러나 구조물에 생기는 손상, 예를 들어 좌굴, 취성파괴, 연성파괴 등은 모두 과도한 하중에 의해서 일어나는 것이므로 이들의 발생을 독립한 것으로 취급하는 것은 타당하지 않는 경우가 많다.

세 번째는 시간의 규정이지만, 이것은 본래 경제적 요청 등에 의해서 정해진 것으로서, 공학적으로 정해진 것이 아니다. 그러나 일반적으로 신뢰성은 시간과 함께 변화하는 것이기 때문에 그 변화의 정도를 공학적으로 파악하고 사용 기간 동안 충분한 신뢰성을 유지하도록 하지 않으면 안된다. 신뢰성은 시간과 함께 감소하는 것이라 생각해도 좋지만 적당한 보수관리, 검사 및 수리 등에 의해서 어느 정도 회복시키는 것도 가능하다. 시간의 규정에서 시간은 대상에 따라서는 횟수, 사이클 수, 거리 등의 시간 상당량을 이용하는 경우도 있다.

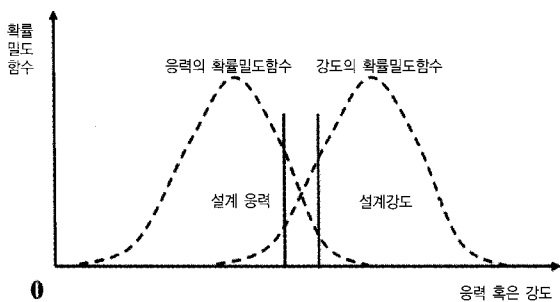
이들 '조건', '기능', '기간' 등이 각종의 기계·구조물에 대해서 적절히 정의되고, 또한 그곳에 나타나는 변수 중, 확률변수라 생각되는 것을 특정지어 그들에 따르는 확률 법칙이 주어진다면 구조물의 신뢰도를 계산하는 것이 가능하다. 예를 들면, 피로파괴의

경우에 신뢰도를 구하는 것은 피로파괴 수명의 확률 분포를 구하는 것이다.

신뢰도의 척도로서 확률

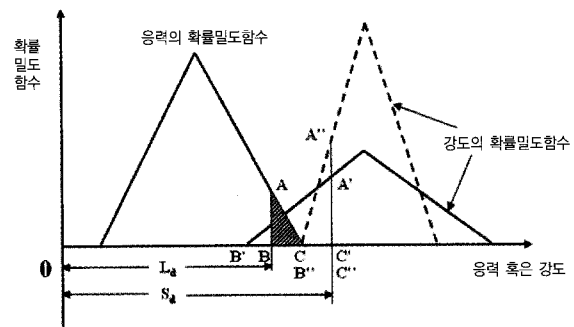
신뢰도를 어떤 기계 혹은 구조물이, 규정의 조건하에서, 의도하는 기간 중 규정의 기능을 수행하는 확률이라 하면, 신뢰도는 0~1의 수치만으로 주어진다. 신뢰도(reliability)를 R이라 하면, 'R = 0'는 반드시 그 기능을 상실하는 것을 의미하고, 'R = 1'은 결코 그 기능을 잃지 않는 것을 의미한다. 파손확률 혹은 불신뢰도(unreliability)를 F라 하면, 기능을 하고 있다는 사상(R)과 고장이 있다고 하는 사상(F)은 여사상(complementary event) 관계에 있다.

신뢰도를 구한다는 것은 수명의 확률분포를 결정한다는 것에 지나지 않는다는 것을 알 수 있다. 기계 혹은 구조물의 강도를 취급하는 구조강도신뢰성분야에서는 수명이라 하면, 피로, 크리프, 또는 응력부식균열 등의 시간 의존형 파괴(time-dependent fracture)를 우선 생각할 수 있다. 그러나 여기서 말하는 수명이라고 하는 것은 반드시 이와 같은 파괴에 한정하는 것만은 아니다. 어떤 한계하중을 넘으면 파괴하는 현상, 극한 강도, 좌굴강도 등을 대상으로 하는 경우에도 수명을 생각하지 않으면 안되는 경우가 있다. 그것은 정해진



(a) 안전계수

그림 2 안전계수의 개념과 파손확률의 개념



(b) 응력과 강도의 확률밀도함수

기간에 그 구조물이 만나는 최대의 하중이 그 기간의 전체의 함수인 경우가 많기 때문이다.

신뢰성공학의 발전 동향

신뢰성공학의 역사를 거슬러 올라가면 그 기원은 전기·전자계와 기계·구조계의 두 가지로 나눌 수 있다. 그러나 일반적으로 전자의 전기·전자계가 신뢰성공학의 주된 기원이 되고, 후자의 기계·구조계는 구조신뢰성공학 혹은 구조강도신뢰성공학(structural reliability engineering)이라 부르는 역사를 가지고 있다.

통상의 신뢰성공학이라 함은 전기·전자계와 더불어 품질관리·품질경영 등의 신뢰성을 다루는 학문으로 인식되어 왔다. 뉴톤(Newton)이 나무에서 사과가 땅에 떨어지는 것을 보고 하나의 영감을 느껴 만유인력을 발견했다고 하듯이, 신뢰성이라는 개념을 탄생시키는 데에는 하나의 진공관(vacuum tube)이 있었다는 상징적인 표현이 있다. 세계 제2차 대전과 한국전쟁 중 미국에서는 군용기 전자기기의 고장 때문에 많은 골치를 앓고 있었다. 이것에 대한 본격적 활동이 1952년 미국무성의 고문위원회에 설치되어 군, 학계, 기업 등이 한뜻이 되어서 여러 가지 연구 그룹 활동을 실시하였으며, 1957년에 유명한 전자기기신뢰성고문위원회, 일명 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)의 연구 보고서가 나오으로써 대강의 신뢰성공학의 방향이 결정되었다. 이들의 연구를 통해서 신뢰성을 고장의 통계수리에 기초해서 정량적·객관적으로 취급하려는 방법이 전자기기가 아니고 미항공우주국(NASA)의 인공위성, 로켓 시스템 등 여러 가지 기기 및 시스템에 파급되어 1960년대부터 신뢰성공학에 관한 서적이 출판되기 시작하였으며, 1962년에는 제1회 신뢰성 및 보전성 국제학술대회(ICOSAR) 등이 개최되면서 신뢰성공학의 골격이

더욱 탄탄해졌다. 일본에서는 AGREE보고서가 나온 이듬해인 1958년에 일본과학기술연맹에 신뢰성 연구 위원회가 구성되어 약 10년 후에는 신뢰성에 대한 인식이 전과되어 최초로 “신뢰성공학입문(1967)”이 출판되었고, 구조계의 신뢰성공학 명저인 “강도의 통계적 취급=구조강도신뢰성공학”이 1976년도에 출판되었다. 이를 전후해 영국, 프랑스, 독일 등의 유럽에서도 활발히 신뢰성 활동이 전개되었다.

우리나라의 신뢰성 연구는 1970년대에 도입된 신뢰성의 이론과 기법이 산업공학, 응용통계 등 학계와 전기·전자 등 산업체 및 연구소에서 부분적으로 진행되어 이 분야의 학회인 한국신뢰성학회가 1999년 12월에 창립되었다. 또한 기계·구조계 분야에 대한 신뢰성 이론과 기법이 1980년대 후반부터 뜻있는 학자들에 의하여 연구가 진행되었으며, 1990년대부터는 일부 대학의 기계구조계열의 학과에서 신뢰성공학의 강의를 개설하였다. 이 분야의 연구는 초창기 대한기계학회 재료 및 파괴부문에서 활발히 연구되었으며, 근년에는 이 분야의 중요성이 인식되어 대한기계학회의 신뢰성부문이 늦은 감은 있지만 2007년에 탄생되었다. 근년에 이르러 외국의 안전성 요구에 부응해서 외국 규격을 수집 획득하는 소극적 자세에서 출발해서 점차 정부, 기업으로까지 확대 발전되고 있는 추세이다. 이에 따라 지식경제부는 1,000여 개 핵심 부품·소재에 대한 신뢰성 평가 인증을 위해 세계 수준의 신뢰성평가 인프라를 구축하고, 주요 완제품의 고장률 및 내구수명을 선진국 수준으로 올리기 위해서 ‘신뢰성 향상사업’을 적극적으로 추진하고 있다.

신뢰성하면 학문적으로 Reliability(신뢰성), Availability(가용성), Maintainability(정비도 또는 유지보수성), Safety(안전성)의 첫 글자를 딴 RAMS가 대표적으로 사용되며, RAMS는 단순한 협의의 신뢰성뿐만 아니라 가용성, 정비도, 안전성을 합친 광의의 신뢰성으로 대표되어 불리고 있다. RCM이란 Reliability

Centered Maintenance의 약어로 이를 적용하여야 하는 이유는 기존의 예방정비 위주의 유지보수는 과잉 정비로 인한 비용의 낭비요소가 많고 부품이나 정비 주기에 대한 신뢰도가 부족한 측면이 있기 때문이며, 과학적이고 체계적인 신뢰성 개념의 정비 체계를 갖추어야 시스템의 고장 내용이나 부품의 교환 등 정비 내용을 정확하게 기록/유지하여 그 자료를 분석하고 그 결과를 정비정책에 반영해 감으로써 안전성확보, 가용성 향상을 보장하는 신뢰성개념의 정비를 할 수

있기 때문이다. 우리나라도 1995년부터 한국표준협회가 RCM 적용체제 구축에 나선 후 원자력발전소, 고속철도(KTX)를 중심으로 RCM에 대한 관심이 고조되고 있다. RCM의 R이 의미하듯이 신뢰성에 대한 기본 개념은 RCM의 기초와 그 이행 방법에 핵심적인 역할을 할 뿐 아니라 향후 공업자산관리(Engineering Asset Management) 분야에 있어서도 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.



기계 용어해설

웨지 브레이크(Wedge Brake)

썰기를 오일 실린더 또는 에어 체임버로 밀어붙이고 브레이크 슈를 열어 브레이크를 작동시키는 방식의 대형 차량용 브레이크의 일종.

썰기(Wedge)

나무나 쇠붙이를 깎아 만들며, 물건 사이나 틈새에 박아 사개가 물리나지 못하게 하거나 나무 같은 것을 빼낼 때 쓰이는 끝이 뾰족한 조각.

역전축(Weighbar Shaft)

각변위를 준 이 축에 고정된 암을 통하여 스프링 장치의 작용을 전진 또는 후진으로 변환하는 것으로, 역전장치를 구성하는 일부분.

미니멈 플로우(Minimum Flow)

유체기기 또는 이것과 접속하여 운전하는 기기를 과열이나 소음, 진동 등의 문제없이 연속으로 안전하게 운전하는 데 필요한 최소의 유량.

단면계수(Modulus of Section)

보의 중립축에서 외표면까지의 길이로 단면의 중립축에 관한 단면 2차 모멘트의 값을 나눈 단면계수를 Z, 단면에 작용하는 휨 모멘트를 M, 외표면의 최대 휨 응력을 σ 라 하면 $\sigma = M/Z$ 의 관계가 있는 것.

미그용접(MIG Welding)

용접 와이어 자체가 소모전극이 되어 용착되는 방식으로, 불활성 가스 속에서 이루어지는 이너트 가스 아크 용접의 일종.

최소 선회반경(Minimum Turning Radius)

최대 스테어링각으로 자동차를 서행하여 선회시켰을 때, 가장 바깥쪽 타이어의 집지면 중심이 그리는 원형 궤적의 반경.

점화기(Igniter)

가솔린 기관용인 전기점화기, 디젤 기관 시동용인 가열선 점화기, 가스 터빈 시동용인 전기불꽃 또는 토치식 점화기 등의 총칭.

점화지연(Ignition Delay)

디젤 기관에서 압축된 고온의 공기 속에 연료를 분사하면 즉시 점화되지 않고 폭발이 일어나기까지 약간 지연되는 것.

함침(含浸; Impregnation)

수지를 직물, 목재, 종이 등의 구조 속의 틈새에 채워 넣은 것과 같이, 공동조직에 액상의 물질을 흠뻑 채워 넣을 때에 쓰이는 것.