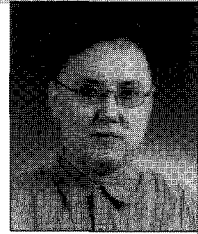


신뢰성과 연구 동향

Reliability and the Research Trends



손영갑*

*안동대학교 기계자동차공학과 조교수

오늘날 다양한 산업계 및 국방분야에서 신뢰성에 관한 관심과 연구가 급속히 증가되고 있다. 신뢰성 분야는 기계/전기/전자/화학/통계 등 여러 분야의 기술이 융합된 대표적인 융합 분야이다. 세계시장에서 경쟁하고 있는 제품들의 투자 수익률은 저품질-저가격의 경우 투자수익율은 평균 15%이며, 고품질-고신뢰성의 제품판매 수익률은 35%에 이르기 때문에 신뢰성 기술은 국제 경쟁력을 확보하는데 필요한 핵심기술이다. 이에 본 기사를 통해 신뢰성 개념과 신뢰성 시험의 발전 동향, 열화데이터를 이용한 신뢰성 연구 동향, 신뢰성 향상을 위한 활동 관련 국내외 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다.

신뢰성 개념의 변화

신뢰성(reliability)이란 일반적으로 아이템이 주어진 기간 동안 주어진 조건에서 요구 기능을 수행할 수 있는 가능성(probability)을 나타낸다. 최근에는 규격(specification)에 대한 순응도(conformance)로 정의되는 품질 개념이 확장되어, 그림 1과 같이 시간과 스트레스, 그리고 품질을 포함하는 의미로, 신뢰성을 스트레스 조건에서 임의 시점까지의 규격에 대한 순응도로 정의하며 해외에서는 신뢰성을 장기간의 품질로 평가되고 있다. 따라서 기존의 구조 변화(topology change)만을 고려했던 신뢰성 개념이 확장되어 제품의 성능(performance)

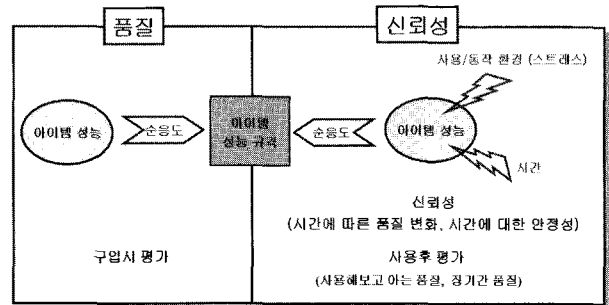


그림 1 품질과 신뢰성

까지 포함한다. 일반적으로 강도가 응력보다 작은 경우에 발생하는 시스템의 구조 변화는 hard failure로 정의될 수 있으며 이러한 고장은 기계적 신뢰성(mechanical reliability)과 관련된다. 시스템의 성능 변화는 구조 변화를 초래하기 전에 soft failure를 초래하며, 이러한 고장은 성능 신뢰성(performance reliability)과 관련된다.

그림 2은 부품과 시스템 성능, 그리고 성능 신뢰도에 대한 관계를 나타낸다. 제품의 성능에 변화를 유발하는 인자는 크게 변량과 열화로 구분할 수 있다. 변량은 공차설계 및 생산공정에서의 재료물성, 그리고 하중의 변화에 의하여 나타나고 일반적으로 확률분포함수로 변량을 표현한다. 부품 수준의 변량과 열화로 인해 시스템 수준의 신뢰도 및 누적고장확률의 변화를 그림 2와 같이 표현할 수 있는데

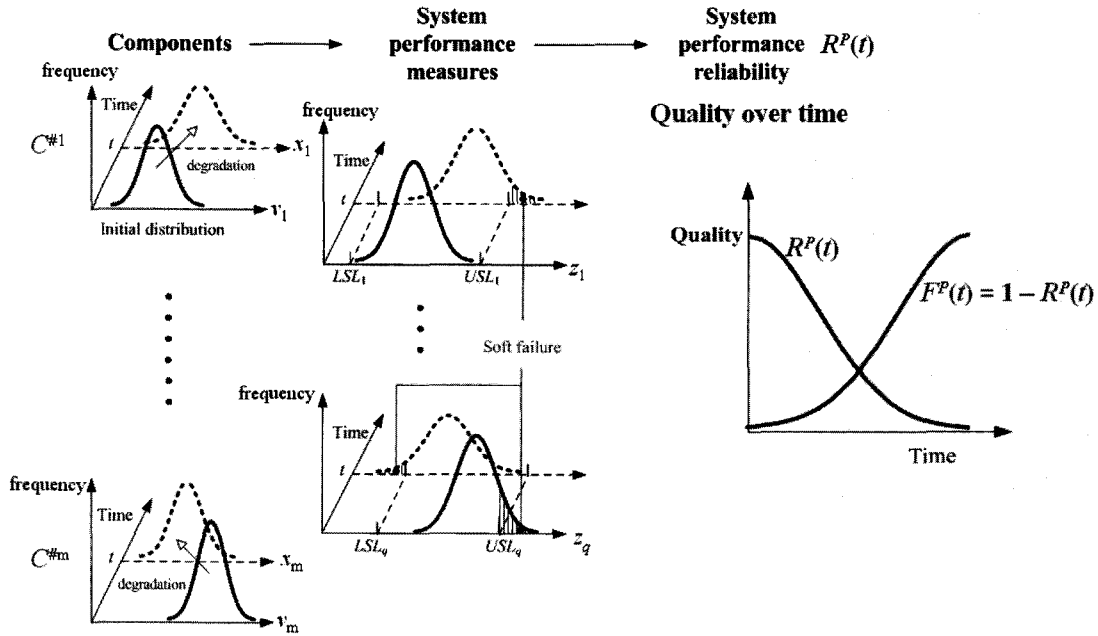


그림 2 변량과 열화에 의한 시스템 신뢰도 변화

검은 선은 변량과 관련된 품질적인 측면을, 파란 선은 열화와 관련된 성능신뢰도를 나타낸다.

보다 더 일반적인 신뢰성 개념은 고장이 없는 것을 나타내는데, 규격에 대한 순응도 뿐만 아니라 고장 발생을 예방하는 전사적인 관리기법을 필요로 한다. 신뢰성 분야에서 앞서가고 있는 일본 회사들은 규격에 대한 순응에만 국한되지 않고 TQM(Total Quality Management) 개념을 신뢰성에 접목하고 있다.

신뢰성 시험의 발전 동향

제품에 대한 신뢰성 시험은 시험에 소요되는 시간 및 비용을 줄이기 위하여, 중도절단(Censoring) 데이터 분석에서부터 시작하여 단일 스트레스를 이용한 가속수명시험(Accelerated Life Testing, ALT)이 주로 수행되어 왔다. 그러나 제품의 신뢰도가 높아짐에 따라 복합 스트레스를 이용한 가속수명시험에 대한 연구가 진행되고 있다. 가속수명시험이란 시험 시간이나 비용을 감소시키기 위하여 정상 사용조건보다 열악한 환경조건에서 시험하여 짧은 시간 내에 고장데이터를 얻은 후 수명과 스트레스 사이의 관계를 이용하여 정상 사용조건에서의 수명을 추정하는 방법이다. 그러므로 수명과 스트레스 관계식에 대한 정확한 모델 설정이 수명평가의 정확성을 결정한다. 온도에 관한 아레니우스 모델(Arrhenius model), 기계적 하중에 관한 팜그린(Palmgren) 모델이 수명과 스트레스의 관계를 나타내는 모델이다. 가속열화시험(Accelerated Degradation Testing, ADT)은 가속수명시험과 동일하게 높은

스트레스 조건에서 시험하여 얻은 데이터로부터 정상 사용조건에서의 수명을 추정하는 방법으로서 가속수명시험과의 차이는 가속수명시험에서는 수명데이터를 분석하는 반면 가속열화시험에서는 시간에 따른 물리적/화학적 특성의 변화를 나타내는 열화데이터를 분석한다. 최근 LED 소자를 포함하여 다양한 분야에서 가속열화시험에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한 기존에 시험을 통해 확보된 신뢰성 정보를 이용하여 수명 평가를 수행하는 가상보증(Virtual Qualification, VQ)에 대한 연구가 해외에서 반도체 및 구조, 자동차 분야에서 수행되고 있다.

열화데이터를 이용한 신뢰성 연구동향

열화 데이터를 이용한 시스템 신뢰도에 대한 연구 동향은 그림 3과 같이 신뢰도 추론 및 분석, 그리고 신뢰성 향상 설계로 분류할 수 있다. 신뢰도 추론(Reliability Inference)은 대상 시료의 시간에 대한 물리량의 변화를 시간의 함수로 모델링하는 열화경로모델, 전체 시료에 대하여 각 시점에서의 물리량의 변화를 시간에 따른 물리량 분포의 모수 변화로 모델링하는 열화분포모델, 그리고 시간에 따른 열화를 확률과정(stochastic process)으로 모델링하는 방법으로 나눌 수 있다. 신뢰도 분석(Reliability Analysis)은 역학적 모델을 근거로 하여 stochastic loading을 받는 시스템의 신뢰도를 예측할 때 사용되는데, 스트레스와 시간에 따라 변화하는 하중에 의한 강도(strength) 열화가 주요한 관심사이다. 구조 분야에서는 이러한 연구분야가 time-variant reliability분야로 분류되며 많은

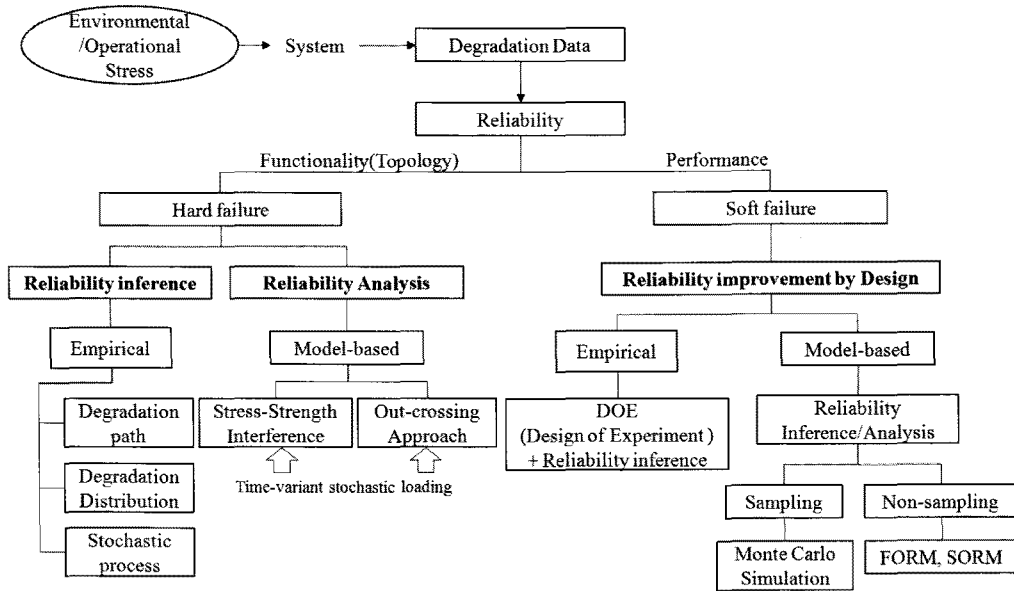


그림 3 열화데이터를 이용한 신뢰성 연구 동향

연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 해양 구조물 (ocean structure)에 대한 적용연구가 진행되고 있다. 신뢰성 향상 설계는 성능신뢰도(performance reliability) 혹은 drift reliability을 최적화할 지표로 정의하고 실험계획법 또는 Monte Carlo simulation 및 FORM/SORM을 이용하여 설계변수의 조합에 따른 시간에 따라 변화하는 신뢰도를 예측하고 신뢰도를 최적화할 수 있는 설계변수를 선정하는 연구이다. 현재 Monte Carlo simulation을 이용한 drift reliability 최적화 연구가 반도체 설계 분야에서 활발히 진행되고 있다.

신뢰성 향상을 위한 활동

신뢰성을 향상하기 위해서는 설계와 생산 과정에서 고장 예방에 중점을 둔 고장 예방(failure prevention)에 집중해야

한다. 고장 예방과 고장 관리(failure management)의 차이는 그림 4에 제시된 것처럼 제품 개발단계의 어느 시점에서 고려하느냐에 따라 분류할 수 있다. 설계 단계에서부터 고장예방을 수행하는 것이 중요하며, 무엇보다도 효율적인 고장예방을 위해서는 가능한 고장의 원인들을 이해하고 예상하는 것이 필수적이다.

우수한 신뢰성을 보유하는 제품들을 생산하는 Airbus, National Instrument, NASA 등은 HALT(Highly Accelerated Life Testing)와 스트레스에 대한 제품의 강건성(robustness)을 고려한 설계를 통해 설계와 생산과정에서 고장을 예방하는데 중점을 두고 있다. HALT는 여러 가지 복합 스트레스를 동시에 인가하여 단계적으로 스트레스를 높여서 제품의 약한 부분을 찾는 시험이다. 최근 신뢰성 향상 설계의 유용한 방법으로 스트레스에 대한 강건설계(robust design)에 관

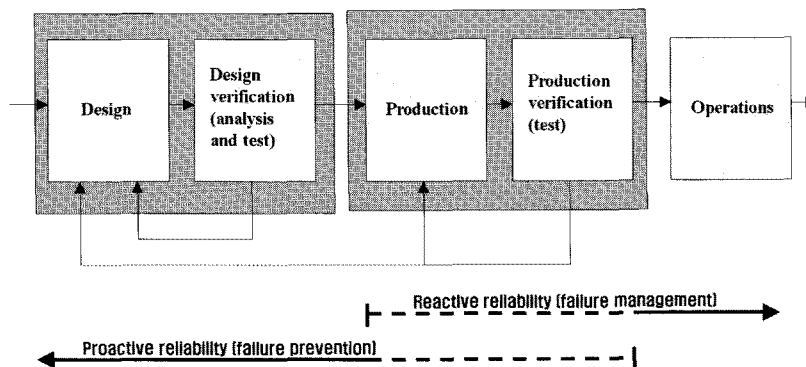
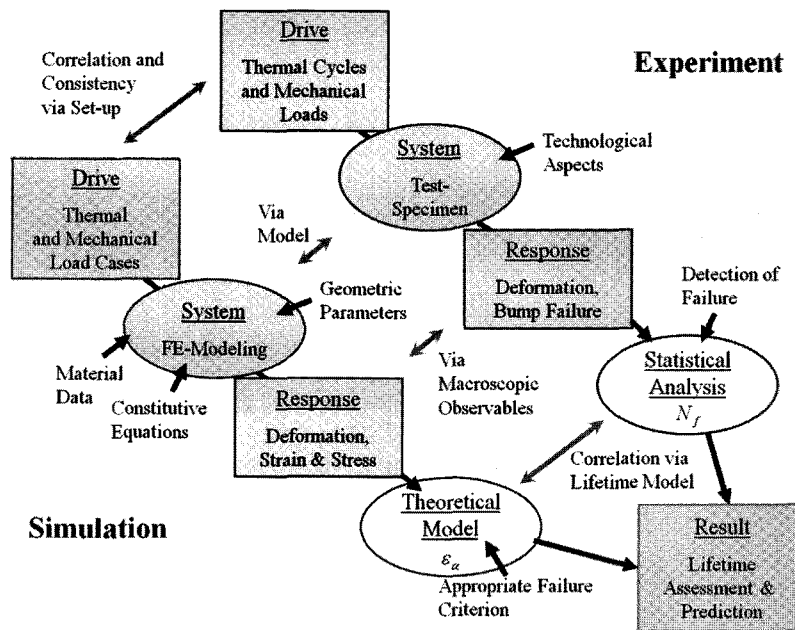


그림 4 신뢰성 향상을 위한 활동

[Systematic procedure for lifetime prediction for solder joint bump fatigue]



[B. Wunderle and B. Michel 2006, Microelectronics Reliability 46, 1685-1694]

그림 5 Solder joint bump에 대한 수명평가

심이 증가하고 있는 추세이다. 신뢰성 향상 설계를 위해서는 신뢰성 시험/분석이 필요하지만, “고장 분석”과 “신뢰성 특성 정량화”가 신뢰성 분야의 모든 영역에서 핵심 요소이다. 정확한 신뢰성 분석을 위해서는 시험결과에 대한 통계적인 분석인 신뢰성 특성 정량화가 필요하지만, 시험을 수행할 때 정확한 스트레스 선정도 중요한 사항이다.

그러므로 시장에서의 고장현상을 이해하는 고장분석이 정확해야 하며, 고장분석으로부터 인가할 스트레스를 선정하여야 한다. 고장에 이르는 화학/기계/열/전기적 스트레스에 의한 물리적 과정을 규명하는 고장물리(physics of failure)에 대한 연구가 고장분석의 중요한 연구분야로 활발히 수행되고 있다. 그림 5는 solder joint bump의 피로파괴 수명을 평가하기 위한 통합된 실험 및 simulation 절차를 나타내는데, 수명에 영향을 미치는 스트레스 인자, 즉 온도사이클과 기계적 하중에 대한 정확한 선정과 스트레스에 대한 응답 선정이 수명평가의 정확도에 많은 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있다.

맺음말

제품의 장기간의 품질인 신뢰성이 소비자의 구매요소와 기업의 수익을 확보를 결정하는 핵심요소로 결정되는 현 상황에서, 제품설계 기술뿐만 아니라 신뢰성 향상 설계기술이 매우 중요한 핵심기술로 부각되고 있다. 신뢰성 향상을 위해서는, 제품 설계의 초기 단계에서부터 스트레스에 대한 제품의 강건성이 고려되어야 하며, 이러한 강건성을 평가하고 개선할 수 있는 해석기법 및 VQ를 구현할 수 있는 전산화 도구에 대한 연구가 미래의 제품설계 기술의 핵심 연구분야가 될 것으로 기대한다. [R]

[담당 : 양철호, 편집위원]