

세라믹 분야 신뢰성 연구 추이와 전망

(Reliability trend on Ceramics)

글 _ 최형석 || 요업기술원 신뢰성평가분석센터
hschoi@kicet.re.kr

1. 서 론

산업 분야에서의 세라믹 응용이 점차 활발해지고 있으며 향후에는 이러한 추세는 계속 될 것으로 예상된다. 그 예로 유비쿼터스, 디지털 전자 부품 분야의 주요 부품 중 62%가 파인세라믹스를 주요 소재로 사용하고 있다. 이렇게 세라믹의 산업에의 응용이 활발해지면서 세라믹의 신뢰성의 중요성도 증가하고 있다.

신뢰성이란 제품이 주어진 환경 하에서 일정기간 동안 최초의 품질과 성능을 유지하는 특성을 말하는 것으로서, 하나의 제품을 얼마나 오랫동안 안심하고 사용할 수 있는가를 정량적인 수치로 표현하여 “제품에 대한 믿음의 정도”를 나타낸 것이다. 약속을 잘 지키거나 언행이 일치하는 사람을 보통 신뢰성이 있는 사람으로 인정하듯이 고장이 잘나지 않고 오래 쓸 수 있어 소비자가 만족하는 제품을 신뢰성 있는 제품이라 말할 수 있으며, 이러한 신뢰성은 오랜 시간 동안 축적되어 온 신물로 일시에 형성되거나 무너지지 않는 속성을 지니고 있다. 따라서 제품의 신뢰성은 보이지 않는 요소기술 등이 얼마나 내실 있게 축적되어 왔는가에 달려 있다고 볼 수 있다. 이 글에서는 신뢰성의 정의와 신뢰성 향상의 방법론, 그리고 세라믹 분야에서의 신뢰성 연구의 중요성 등을 기술하고자 한다.

2. 신뢰성 개요

2.1 고장의 정의

고장은 제품의 소재가 강도가 약하거나 외부 스트레스

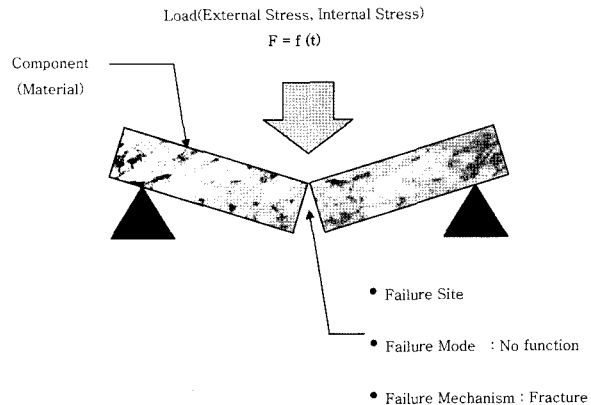


Fig. 1. 고장의 정의.

가 강하여 더 이상 버틸 수 없을 경우에 발생한다. 아래 Fig. 1에 고장 발생의 원인을 개략적으로 설명해 놓았다. 그림의 판이 부러지는 이유는 지지대에 의한 스트레스 집중(설계의 문제), 판 자체의 강도가 약함(소재의 문제), 외부 스트레스(과도한 외부 환경 조건) 등 복합적으로 발생한다. 이와 더불어 대량 생산일 경우 공정 등도 고장 발생의 원인이 될 수 있다. 고장의 원인을 찾기 위해서는 고장이 발생한 위치(Failure site), 고장 발생에 의해 제품에 생기는 이상 현상(Failure Mode), 고장이 발생한 원인(Failure Mechanism) 등을 파악해야 한다.

2.2 신뢰성의 목표

일반적으로 부품소재의 수명 곡선은 Fig. 2와 같은 곡선을 그린다.

위와 같은 곡선을 육조의 형상과 닮았다고 하여 bath-

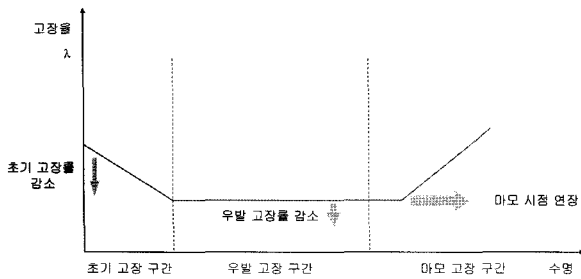


Fig. 2. Bathtub 곡선.

tub 곡선이라고 한다. 위의 그림을 보면 제품의 시간에 따른 수명 양상을 확인할 수 있다.

욕조 곡선은 사용중에 일반적으로 나타나는 고장률을 시간의 함수로 나타낸 곡선으로 초기고장(Early failure), 우발고장(random failure), 마모고장(wearout failure) 기간의 3부분으로 나뉘어진다.

초기 고장은 제품 출시 직후 잠재적인 설계나 제조상의 결함으로 인한 고장으로 초기에는 정상품이지만 저장, 물류, 설치 및 소비자 사용에 이르는 과정에서 스트레스를 받아 고장이 발생하는 것이다. 대부분 저품질의 제품에서 많이 발생하는 고장이며 지속적인 품질 안정화와 함께 줄어들게 된다.

우발고장기간은 품질 안정화 이후에 일정한 고장률을 갖게 되는 기간이다. 우발고장기간에는 설계과정에서 예상치 못한 과부하(overstress)와 사용자의 실수 등에 의해 우발적으로 고장이 발생한다. 우발고장기간은 일정한 고장률(CFR: Constant Failure Rate) 기간이다. 따라서 이 기간의 고장시간은 지수분포로 모형화될 수 있다.

제품을 어느 기간 이상 사용하면 재료나 부품이 열화되어 고장률이 증가하게 된다. 이 기간을 마모 고장 기간이라 한다. 따라서 마모 고장 기간을 IFR(Increasing Failure Rate)라고 하기도 한다.

제품이 마모 고장 기간에 들어가게 되면 고장률이 급격하게 증가하게 되므로 일반적인 제품의 내구 수명은 초기 고장과 우발고장 기간의 합이라고 할 수 있다.

그래프에서 보이는 바와 같이 일반적인 신뢰성의 목표는 다음과 같다.

- 1) 우선 초기 고장 기간에는 초기 고장률을 낮추고 안

정화 시간을 단축

- 2) 우발 고장 기간에는 우발 고장률을 최소화
- 3) 마모 고장 기간에는 내구 수명을 신뢰성 목표 이상으로 연장

3. 신뢰성 향상을 위한 방법

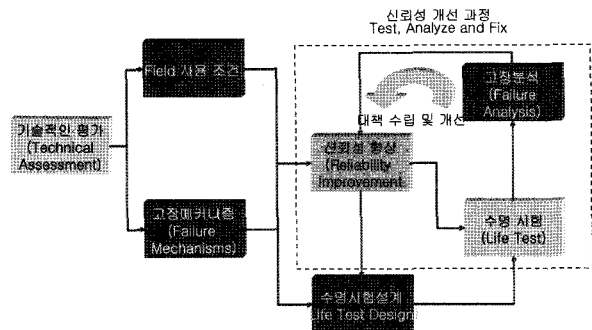


Fig. 3. 신뢰성 향상 절차.

신뢰성 향상을 위한 방법은 시대에 따라 계속 발전해 오고 있다. 현재 사용되고 있는 신뢰성 향상 기법은 Fig. 3과 같은 순서도의 절차로 진행된다.

제품의 신뢰성 향상을 위해서는 우선 제품이 사용될 환경 조건을 파악해야 하며 이에 따른 제품의 잠재 고장 메커니즘을 파악해야 한다. 이러한 환경 조건과 잠재 고장 메커니즘에 기초하여 수명 시험을 설계 한다.

이렇게 설계된 수명시험 방법에 의해 수명시험을 진행하고 고장품에 대한 고장분석을 실시한다. 분석된 고장은 실제 사용 환경에서의 고장과 일치하여야 하며 만약 실제 고장과 수명 시험에서의 고장 메커니즘이 일치하지 않을 경우 수명 시험 설계가 잘못된 것으로 다시 설계하여야 하며 일치할 경우 이에 대한 대책을 수립하고 재시험을 실시하여 최종적으로 목표 수명을 만족하도록 한다.

이러한 과정을 통하여 제품의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 각각의 과정을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 Field 사용 조건 파악

동일 제품이라도 사용 조건에 따라 예상 수명이 달라진다. 스트레스 조건이 다르기 때문이다. 가령 동일한 써

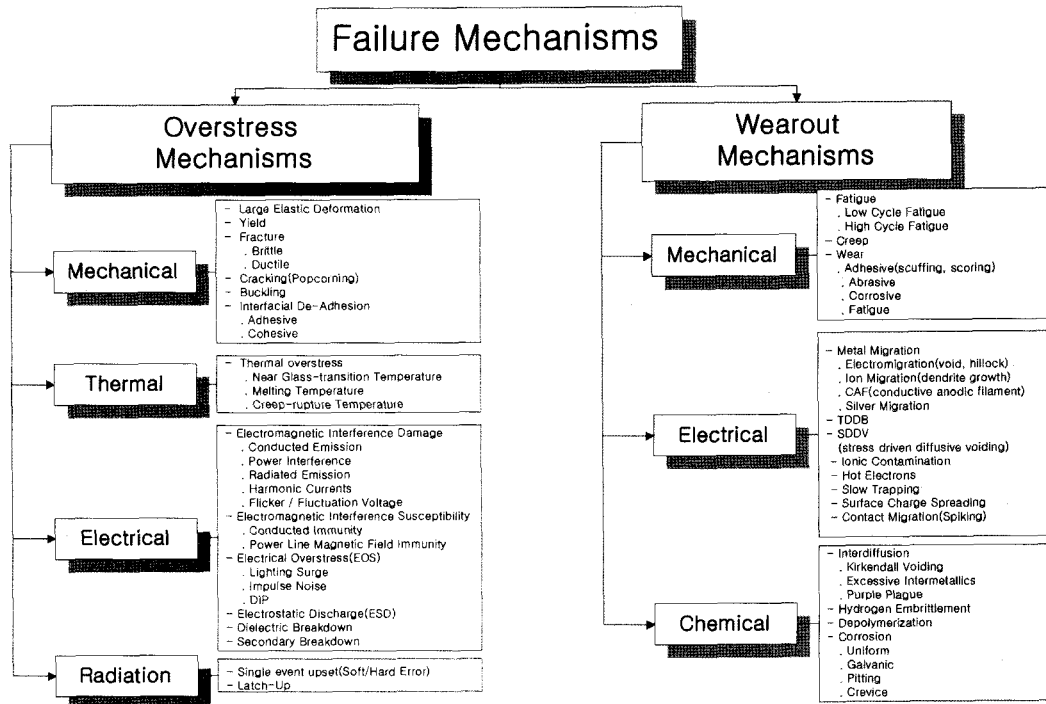


Fig. 4. 고장 메커니즘.

미스터라도 냉온수기에 사용될 경우에는 수분 침투에 의한 Migration이 주요 고장 메커니즘이다. 하지만 일반 전자 제품에 사용될 경우에는 전압 인가에 의한 Diffusion 등이 주요 고장 메커니즘이 될 것이다.

3.2 고장 메커니즘 파악

가속수명시험을 실시하기 전에 제품의 잠재고장메커니즘을 파악해야만 한다. Field 사용 조건을 파악하고 잠재고장메커니즘을 파악하면 어떠한 스트레스로 제품을 고장낼 수 있을 것인지 알 수 있게 된다. 일반적인 고장 메커니즘은 Fig. 4와 같다.

Overstress Failure Mechanism은 stress가 제품의 strength보다 높을 경우에 발생하는 고장이다. 일반적으로 제품 설계시 제품의 strength가 외부의 stress보다 높도록 설계한다. 하지만 제품의 strength와 stress가 모두 확률 분포를 이루고 있으므로 stress가 strength보다 높은 경우는 발생하기 마련이다. 확률적으로 stress가 strength보다 높은 경우는 2가지로 나눌 수 있다.

첫째, strength와 stress의 대표값이 너무 근접해 있는 것이다. 제품 제조상의 공정 능력은 좋으나 stress 자체가 너무 stress에 근접한 만큼 설계상의 strength를 강화하여

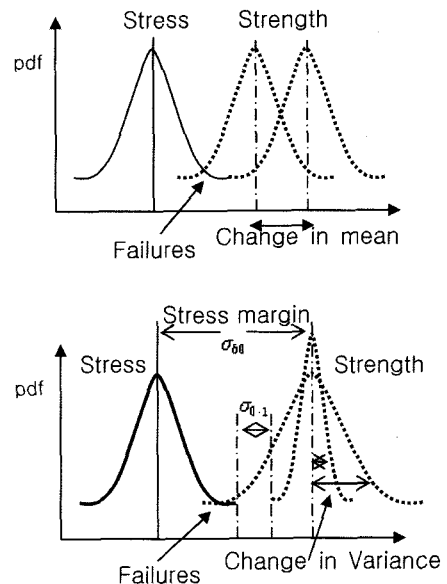


Fig. 5. Overstress Failure Mechanism.

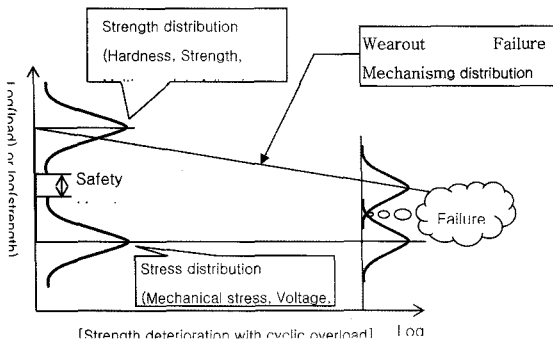


Fig. 6. Wearout Failure Mechanism.

야 한다.

둘째, strength의 대표값이 충분히 크나 편차가 너무 큰 경우이다. 이 경우에는 설계상으로는 문제가 없으나 공정에서의 편차가 너무 큰 경우이다. 이럴 경우에는 공정 능력을 보완해야 한다.(Fig. 5참조)

Wearout Failure Mechanism 장기 사용에 의해 제품의 Strength가 저하되어 발생하는 고장이다. 초기의 strength는 stress를 버틸 수 있도록 설계되어 있다

예를 들어 고무의 경우 장기 사용에 의해 열화가 진행된다. 고무의 열화란 탄성의 저하 및 경화를 의미한다. 따라서 고무의 충격 흡수 역할을 못하게 되면 고장으로 판단하게 되고 이러한 고무의 열화에 의해 다른 부품들 까지도 고장이 발생하게 된다.

3.3 가속수명시험

장기 사용에 의하여 hardness, Melting point, Adhesion 등 제품의 strength는 열화 되어 점차적으로 stress 분포와 겹치게 된다. 이러한 마모 메커니즘에 의해 고장 발생은 초기의 우발 고장에서부터 점차 기하급수적으로 증가하게 된다(Fig. 7).

가속수명시험은 일반 사용 조건보다 가혹한 조건에서 수명 시험을 실시하여 더욱 빨리 고장을 발생시키는 기법이다. 제품의 라이프 사이클이 점차 짧아지는 현 추세에서 빠른 시간 내에 신뢰성을 검증할 수 있는 가속수명 시험은 가장 고장분석과 함께 가장 강력한 신뢰성 도구라 할 수 있다.

가속수명시험은 제품이 일반적으로 사용되는 조건보

다 가혹한 조건하에서 동일한 고장메커니즘 및 고장 모드에 의해 고장이 발생한다고 가정하고 시작한다.

가속수명시험의 절차는 일반적으로 다음과 같다.

- 1) 가속 stress의 결정
- 2) 스트레스 수준 결정
- 3) 고장판정기준 및 샘플의 개수 결정

3.4 가속수명시험 데이터의 해석

가속수명시험 후에는 수명 데이터를 수명 분포에 Fitting 한다. 이는 알려져 있는 분포식을 이용해 수명을 해석하기 위함이다. 일반적으로 신뢰성 수명 분포 분석에 이용되는 수명 분포는 Table 1과 같다.

Table 1. 수명 분포

분포	제품
지수	전자부품, insulating oil
와이블	전자부품, 베어링, 세라믹, capacitor, dielectrics
대수정규	금속 피로, 전자부품(반도체, diodes, GaAs FETs 등), electrical insulation

수명분포를 해석한 후에는 수명-스트레스 관계식을 파악해야 한다. 일반적으로 사용되는 모델식은 Table 2와 같다.

Table 2. 스트레스 수명 관계식

모형	관계식	용도
역 거듭제곱	$\tau = A \cdot V^{-n}$ τ : 고장시간 V : 가속변수 A, n : 상수	절연체의 전압 내구시험, 베어링, 백열전구, 금속 재료의 열화 등
아레니우스	$\tau = A \cdot \exp[E/(kT)]$ τ : 고장시간 E : 전이 에너지(electron-volts) k : 볼츠만 상수(8.617×10^{-5} eV) T : 절대온도(°K) A : 상수	반도체, 건전지, 윤활유, 전구 필라멘트, 절연체
아이링	$\tau = (A/T) \cdot \exp[B/(kT)]$ τ : 고장시간 k : 볼츠만 상수(8.617×10^{-5} eV) T : 절대온도(°K) A, B : 상수	아레니우스 모형과 유사 온도에 의한 가속 단일 스트레스(전기장)에 의한 가속 화학적 열화 반응을

4) 고장 분석

일반적인 고장의 원인을 분석하는 것은 제품의 신뢰성을 높이기 위한 가장 직접적이고 강력한 도구이다. 고장의 원인은 기계적, 화학적 스트레스 등 다양하기 때문에 고장분석을 효과적으로 수행하기 위해서는 여러 분야간

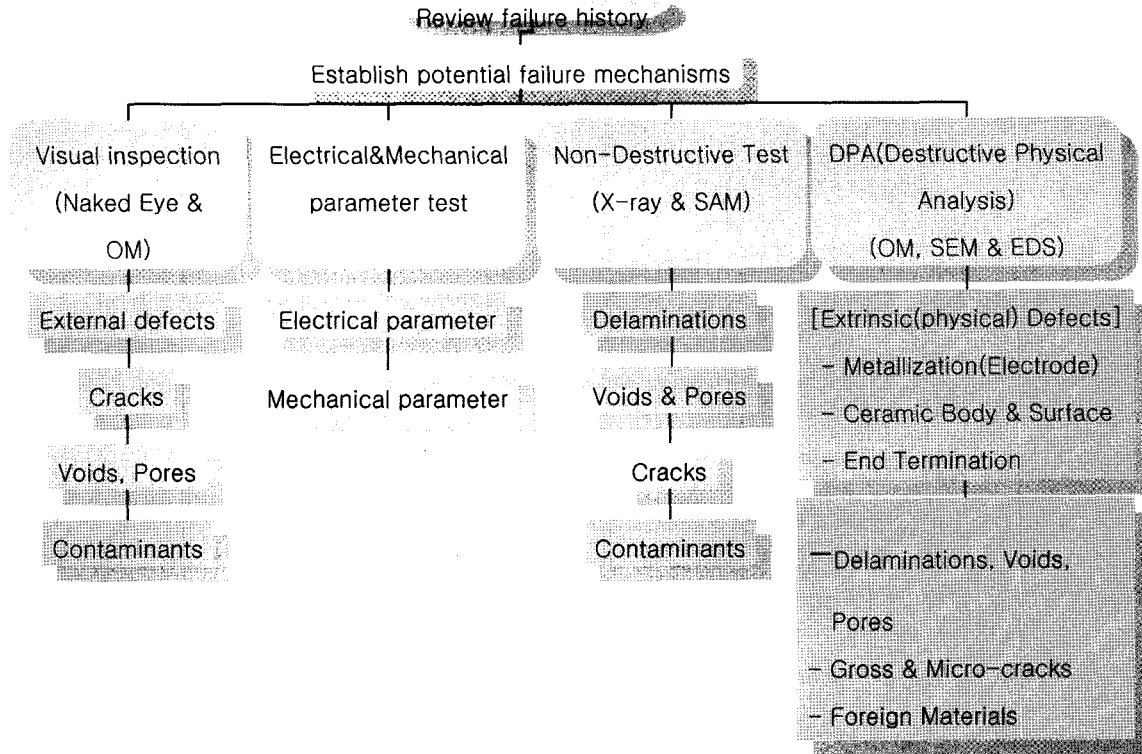


Fig. 7. 고장분석 체계도.

의 학제적인 연구가 필요하다. 이러한 고장 분석 기법은 Fig. 8과 같다.

상당수의 고장은 육안으로 파악이 가능하므로 고장품에 대한 Visual Inspection을 우선 시행하도록 한다. 또한 성능 측정에 의해 고장 모드, Site 등의 대략적인 파악이 가능하므로 성능 측정을 먼저 한다. 고장 위치 파악을 위하여 비파괴 분석을 먼저 실시한다. 파괴 분석 후에는 고장 부위까지 훼손될 수 있기 때문이다. 이러한 절차를 통하여 고장 위치, 모드 등을 파악한 뒤 고장 메커니즘을 추정하게 된다.

4. 세라믹(소재) 신뢰성의 중요성

부품과 소재의 신뢰성은 개념과 접근 방법에서 차이가 난다. 일반적으로 소재의 경우 부품 신뢰성보다 향상시 키기가 난해하며 그 이유는 다음과 같다.

첫째로, 소재 수명 예측의 난이성 문제이다. 신뢰성의

최종 목표는 실사용 조건에서 제품의 수명을 정확히 예측하는 것으로서 소재의 경우 사용 범위가 광범위하여 많은 Back Data가 필요하다. 둘째로는 소재의 성능 여부를 측정하기가 어려우며 셋째로는 소재 신뢰성 시험의 경우 부품보다 장기간의 시간과 노력이 소요되며 분석 후 대책 적용도 더욱 어렵다. 부품과 소재의 신뢰성 차이는 Table 3과 같다.

일반적으로 제품의 고장 원인은 공정불량, 설계 불량, 소재 불량으로 나뉘며 위와 같이 소재 신뢰성의 어려움 때문에 저품질/저가의 제품은 공정 불량과 설계 불량, 고

Table 3. 신뢰성 분야에서 소재와 부품의 차이점

구분	소재	부품
측정 Point	물성	기능성
고장 원인	기능 미달, Defect, 물성의 경시 변화, 노화, 열화, 배합조성 불량, 제조방법,공정편차, Source별 물성 편차	기능 미달, Defect, 물성의 경시 변화, 노화, 열화, 설계 불량, 공정 편차
측정 단위	Lot별, 공간별 소재 특성 변화	관찰시간측 성능의 변화 관찰
관리 Point	재현성, 작업성, 안정성, 경시성	수명
접근 방법	Quality& Reliability	Reliability

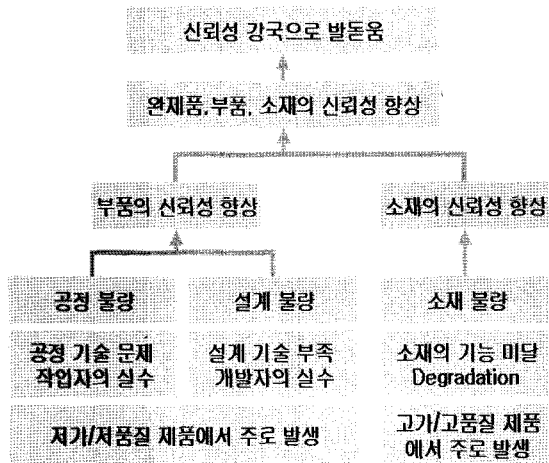


Fig. 8. 고장의 종류와 원인.

품질/고가의 제품은 소재 불량이 주요 고장 원인이 된다. (Fig. 9 참조) 따라서 제품의 기술이 발달되고 신뢰성이 향상될 수록 최후에 남는 것은 소재의 신뢰성 문제이다.

5. 맺음말

지금까지 신뢰성의 정의와 신뢰성 향상을 위한 방법론을 개괄적으로 논해 보았다. 고장의 발생 원인이 다양한 만큼 신뢰성에서 요구되는 지식과 기술도 점차 많아지고 있다. 이러한 이유 때문에 신뢰성을 학제적인(학제적, interdisciplinary) 학문이라고 이야기 하곤 한다. 이러한 신뢰성 기술이 고장분석의 중요성이 커지면서 고장의 물리적 특성을 파악하여 더욱 정교한 신뢰성 향상이 가능하도록 할 수 있는 고장물리(Physics-of-Failure)로 발전하고 있으며 또한 수명 분포와 수명-스트레스 모델을 구한 후에는 Monte-Carlo Simulation을 이용하여 시험 없이 수

명을 예측할 수 있는 Virtual Qualification 기법의 개발까지 계속하여 발전하고 있다. 우리나라에서는 신뢰성에 대한 관심을 가진 것이 10여년 정도인 걸음마 단계이나 2000년 이후 산업자원부가 주관하고 기술표준원에서 수행하는 신뢰성향상사업과 함께 비약적으로 발전하고 있다.

산업 발전과 함께 신뢰성의 중요성도 점차 높아지고 있으며 특히 그 응용 분야가 점차 넓어지고 있는 세라믹 분야에서는 특히 중요성이 크다 하겠다. 향후 세라믹 분야 신뢰성의 진일보가 기대되는 것은 이러한 이유 때문이다.

참고문헌

1. A. Dasgupta, "The physics-of-failure approach at the University of Maryland for the development of reliable electronics", SIME 2002(2002)pp. 10-17
2. J. W. Evans, J. Y. Evans "Product Integrity and Reliability in Design" Springer, 2001
3. P. D. T. O'connor, "Practical Reliability Engineering", JohnWiley&sons, 2005
4. Korean Agency for Technology and Standards "신뢰성용어 해설서", 2005

●● 최형석



- 건국대학교 이과대학 물리학과 학사
- 연세대학교 이과대학 물리학과 석사
- 대우전자 품질신뢰성연구소 선임연구원
- 요업기술원 신뢰성평가분석센터 선임연구원