

재료파손과 신뢰성

글 ◦ 김 태 원 / 한양대학교 기계공학부, 교수 e-mail ◦ twkim@hanyang.ac.kr

이 글에서는 제품의 고장 및 신뢰성과 밀접한 관계가 있는 재료의 역할과 기능에 대해 알아보고 특히 파손의 원인 및 유형, 기구, 분석방법 등을 통하여 제품의 신뢰성 설계를 위한 재료파손과 재료거동분석의 중요성을 소개하고자 한다.

고장이란 제품(이하 소재, 부품, 구조물, 시스템 등을 총괄적으로 포함)이 어떠한 물리적-화학적 변화(크기, 모양, 기계적, 재료적 성질 등)에 따라 본래의 목적에 충분치 않으면서 부분적으로 혹은 완전하게 그 기능을 상실하게 되는 현상을 말하며, 이와 같은 고장현상은 단순 물리-화학적 과정뿐만 아니라 그와 같은 과정들의 반복, 복합형태로 나타난다. 소재의 경우 특히 고장현상은 재료파손(materials failure)과 관계되며, 이는 재료 개발, 개발된 재료를 이용한 제품의 생산 및 생산된 제품을 사용하는 과정 동안 발생하는 전 범위에 걸친 재료의 변형과 파괴 및 성질의 변화를 포함하게 된다. 신뢰성은 제품이 주어진 환경 및 시간 하에서 이와 같은 고장 혹은 파손 없이 그 기능을 유지, 수행할 수 있는 능력으로 정의할 수 있으며, 따라서 재료파손 연구는 고장분석과 이를 바탕으로 한 제품의 신뢰성설계를 위하여 필수적으로 수반되어야 할 사항으로 생각할 수 있다.

다양한 물리-화학적 조건에 기인된 고장현상은 실제로 복잡한 경로를 통

해 발생함에도 불구하고 명확한 현상의 이해와 분석이 설계에 앞서 반드시 선행되어야 한다. 신뢰성이 없는 제품은 제품 자체의 경쟁력 상실뿐 아니라 사고를 통한 소비자의 피해와 그에 따른 경제적, 신체적 손실을 유발시킬 수 있기 때문이다. 고장현상의 분석과 관련하여 현재 많은 연구가 진행 중이며, 특히 고장물리(physics of failure)를 바탕으로 하는 파손연구는 고장, 기구(mechanism)와 유형(mode)에 따른 경로(failure process)를 보다 근본적으로 밝혀

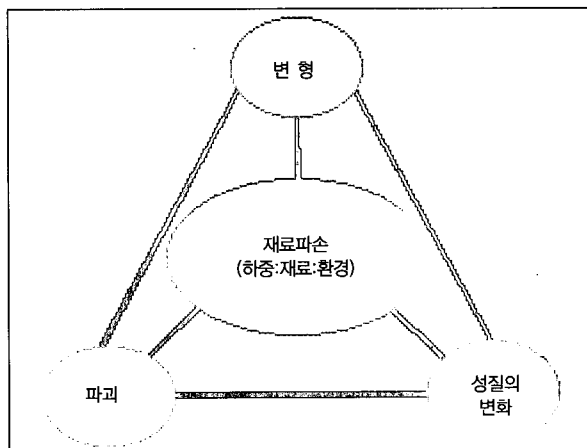


그림 1 재료파손의 유형



내고 있다. 또한 대상부품 혹은 제품별 분석 방법, 고장을 초래하는 요소와 인자에 의한 분석, 고장분석을 위한 절차 및 방법, 고장 재현을 위한 가속수명기법 그리고 제품수명 예측을 위한 통계적 기법 등도 복합적인 고장현상의 규명 또는 이를 바탕으로 하는 신뢰성설계를 위해 폭넓게 연구되고 있다. 한편 재료파손 경우, 그 유형은 크게 변형과 파괴 및 재료 본성의 변화로 구분할 수 있으며, 변형의 경우는 시간적인 관점에서, 파괴의 경우는 작용하중의 변화로 그 형태를 더욱 세분할 수 있다[1]. 그림 1은 이와 같은 재료파손의 유형을 나타낸다. 온도와 환경적인 영향(예, hydrogen or oxygen attack) 역시 재료파손을 유발하는 중요한 요소로 생각할 수 있으며, 이와 같은 인자들이 동시에 혹은 개별적으로 파손과정에 직·간접적으로 영향을 미치게 된다. 고장사례 분석과 그에 따른 결과들은 고장과 관련한 정량적 혹은 정성적 연구에 유용한 도구로 활용할 수 있으며, 그림 2는 사례분석을 통한 다양한 형태의 원인을 보여주고 있다[2]. 그림에서

보듯이 특히 재료의 부적절한 선택 및 공정 관리 등이 제품의 고장과 관련한 근본적인 문제점이 된다는 것을 확인할 수 있다.

재료거동(materials behavior) 모델링은 재료파손현상의 규명과 그에 따른 물리량(응력, 변형률 등)의 변화를 예측 가능하게 하며, 이를 공학적으로 제품설계에 반영할 수 있게 한다. 수많은 부품의 결합체인 항공기, 자동차로부터 미시-나노(micro-nano) 부품소자에 걸쳐 실제 다양한 형태의 고장이 발생되고 있으며, 이는 사용조건에 부적합한 재료선택을 포함하여 미시적 결합, 균열 등이 변형과정 동안 누적된 손실에 의해 성장 혹은 발전되어 치명적인 재료파손과 연관되는 인과관계로 작용되기 때문이다. 그림 3은 항공우주용 부품의 소재로 널리 사용되는 티타늄합금의 변형 전 미시재료 구조와 변형 후 파손된 부위에서의 조직을 나타낸다. 고온 인장변형에 따른 미시조직 구성 요소들의 심대한 변화를 관측할 수 있으며, 이를 통해 거시적-기계적특성의 변화는 근본적으로 미시적 소재의 변화가 수반되는 것임을

확인할 수 있다. 재료거동 및 파손분석은 우선 고장을 유발한 인자(예: 하중, 온도, 재료특성, 환경 등)를 정확하게 파악하여야 하며, 그에 따른 사용조건과 시험조건 등을 검사 및 평가하여야 한다. 일반적으로 재료분석은 표면 및 재료 내부의 미세조직, 균열, 화학적조성 등과 같은 재료자체의 특성과, 제조공정 및 사용조건을 포함하게 된다. 이는 파손된 시료에 대한 육안검사로부터

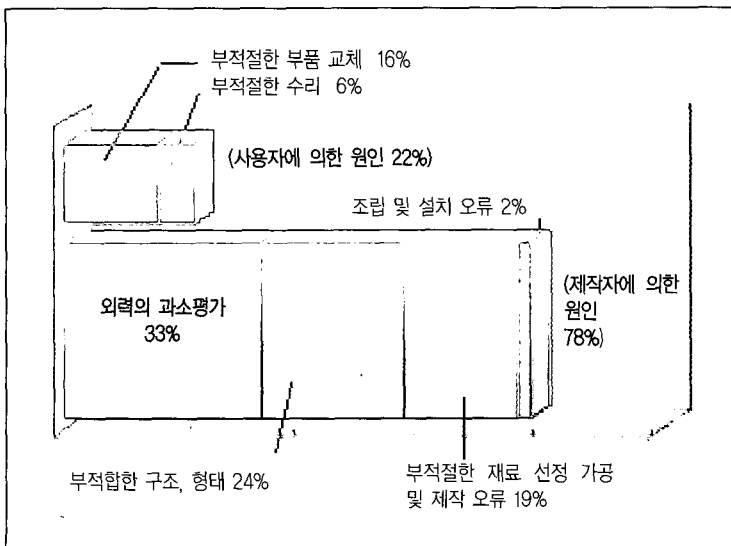


그림 2 고장원인별 분류[2]

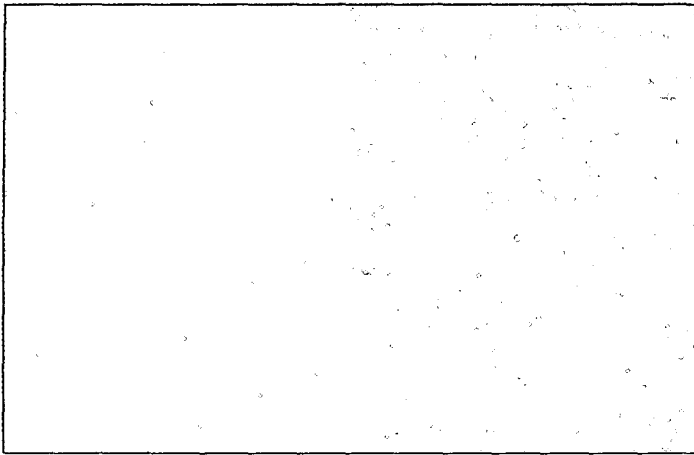


그림 3 변형 전(좌) 및 파손 후 조직사진

비파괴적기법, 기계적-파괴적기법, 조직 및 화학적 성분 분석 등을 통상적으로 수반하게 된다. 나아가 이들의 분석결과를 바탕으로 파손유형(예: 피로, 부식, 크리프, 마멸 등)을 규명할 수 있으며, 세부 유형에 따른 물리적-화학적 거동 해석을 바탕으로 파손 제어 혹은 파손극복을 위한 방안을 강구할 수 있게 된다[3]. 소재의 결함 혹은 결함을 초래하는 인자들이 초기 상태부터 억제되는 공정기술을 제품 설계기술에 포함하여야 하며 부득이 결함의 존재가 피할 수 없다면 그들의 발전에 직접적인 영향을 미치는 하중을 최소화할 수 있는 구조적, 역학적 측면을 고려하여야 한다. 한편 가속수명시험기법 등과 같은 실험적-해석적 기법을 바탕으로 극한 조건에서의 한계수명까지 모두 예측할 수 있어야 하며, 이상과 같은 과정을 통해 잠재된 고장의 발생, 경로 및 영향까지 고려된 체계적인 신뢰성설계를 달성할 수 있게 된다.

재료파손의 주요 유형으로는 항복, 연성 및 취성 파괴, 피로(세부: thermal, corrosion, fretting), 크리프(세부: rupture, fatigue), 부식(세부: stress,

hydrogen, chemical-biological), 마멸(세부: corrosive, adhesive, abrasive) 등이 있으며, 손실누적률(damage accumulation rate), 균열진전속도(crack growth or propagation rate) 등을 이용하여 파손 수명을 효과적으로 예측할 수 있다. 한편 재료파손 분석을 위해 실질적으로 고려해야 할 사항으로는 물리-화학적 현상 이해를 기반으로 하는 논리적인 거동해석,

환경과 하중의 변동성을 충분히 반영할 것, 응력상태에 따른 미시조직과 내부의 균열진전에 대한 상호관계 이해 그리고 실 제품의 특성 및 추정 물리량을 정확히 모사할 수 있는 시험편 제작 및 사용 등이 있다[4]. 특히 신소재 개발과 그에 따른 제품 적용은 성능 향상뿐만 아니라 예기치 못한 고장을 극복할 수 있는 많은 선행 연구가 수반되어야 함은 물론, 기존의 재료거동에서 볼 수 없었던, 보다 근본적인 재료연구가 수행되어야 비로소 신뢰성 있는 제품으로 사용될 수 있음을 인지해야 한다.

산업화, 선진화라는 이름 아래 지난 수 십년 동안 실로 고도의 경제성장을 이룩한 것은 누구도 부인할 수 없는 현실이며, 자랑스러운 일이 아닐 수 없다. 이러한 발전의 원동력이 바로 제품을 생산하는 제조기술이며, 가난을 극복하기 위해 시작한 제조, 생산이 이제는 세계시장에서 무시할 수 없는 위치로 자리 매김을 하게 한 것이다. 그런데 앞만 보고 정신없이 달려온 우리에게 이제 무슨 일이 일어나고 있는가? 도체에 문제점을 내포하고 있고, 미처 확인하고 검증하지 못한 상태에서 조립, 생산에만 집착한 것 역시



부인할 수 없다. 21세기는 무한지식의 세계가 될 것이라는 것은 자명한 사실이다. 중국을 비롯한 후발 국가들의 노동력만 앞세운 산업이 이제는 고도의 기술을 동반한 경쟁자로 대두되고 있는 현실에서 우리의 결론 또한 분명하다. 성능과 생산성을 만족하는 보다 우수한 제품을 만들기 위해서는 비용 절감, 효율적인 노동력 이용, 제조공정 개발 등의 다양한 조건들이 충족되어야 할 뿐만 아니라 소비자가 진정 만족할 수 있는 제대로 된 제품을 만들기 위해서는 안전성과 내구성을 바탕으로 한 총체적인 신뢰성 제고가 필수적으로 요구된다. 부품소재에 대한 원천적 신뢰성향상이 수반되지 않고서는 좋은 제품을 기대할 수 없으며, 이것이 바로 제조기술과 함께 원천적, 신뢰성설계기술의 중요성이 강조되는 이유이다. 재료파손 연구와 그에 따른 신뢰성 향상은 따라서 이 같은 요구조건에 따라 첫째, 제품 개발과 관련한 적합한 재료의 개발 및 선택뿐만 아니라 둘째, 사용 환경과 조건에 대한 정밀한 기계적, 재료적 거동 연구 및 고장분석이 요구되며, 셋째, 이들을 바탕으로 제품 사용에 따른 안전성과 내구성, 신뢰성 분석 및 평가가 반드시 수반되어야 한다. 제품의 신뢰성설계

는 이와 같은 과정을 수행하는 포괄적 개념으로 제품에 대한 고장 원인을 분석하고 그에 대한 근본 원인을 이해함은 물론, 그와 관련된 또 다른 고장을 피할 수 있게 함과 동시에 차후 제품에 대한 설계 변경에 보다 효과적으로 사용될 수 있게 한다.

[참고문헌]

- (1) Dowling, N. E., 1999, "Mechanical behavior of materials", Prentice-Hall, Inc.
- (2) Nishida, S., 1992, "Failure Analysis in Engineering Applications", Butterworth-Heinemann Ltd.
- (3) Collins, J.A., 1981, "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley & Sons.
- (4) Prager, M., 1991, "Assuring reliability of advanced materials in severe applications", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 40, pp 921~926.



입자집진(Particle Precipitation)

공기 오염물질 중 주로 공기 중 분산부유하고 있는 입자상 물질(고체 또는 액체)을 분리 제거하는 것을 의미한다. 공기 중의 오염물질 중 입자상 물질의 분리제거 방법을 원리별로 구분하면, 크게 중력집진, 원심력집진, 관성충돌집진, 여과집진, 세정집진, 전기집진 등으로 대별된다. 그러나 실제의 입자집진에서는 위의 방법을 단독으로 이용하는 경우는 적고, 통상 두 종류 이상의 복합적인 작용에 의하는 경우가 많다.