

## 고분자소재의 고장분석 기술 분류 및 절차

변 두 진

### 1. 서 론

플라스틱, 고무, 필름, 접착 및 코팅재료의 주성분을 구성하는 고분자소재는 생활용 소비제품에서 항공우주용 첨단기기에 이르는 다양한 제품 및 부품을 구성하는 기초소재로써 폭넓게 사용되고 있으나, 석유화학 원재료로부터 인공적으로 합성된 소재가 갖게 되는 환경 적합성의 부족함을 태생적으로 갖고 있다. 여기에서의 환경 적합성은 친환경성을 의미하는 생물학적 안전성 외에 환경적 열화에 대한 내구성을 포함하는 것으로서, 고분자소재에서 발생한 고장의 절반 이상이 고분자소재 자체의 환경적 열화가 원인이 되는 것으로 파악되고 있다.

소재의 열화가 부품의 고장에 미치는 영향은 이미 오래 전부터 연구된 분야이지만 부품의 고장은 단순히 소재의 열화에 의해서만 유발되는 것이 아니며, 열화와 관계없이 사용된 소재 간의 부조화 또는 소재에 포함된 첨가제에 의한 문제 발생 등이 원인이 되는 경우도 많으므로 이러한 고장들은 특정한 부품의 구조 및 사용 환경을 고려한 각각의 고장 원인분석을 통해서만 파악될 수 있게 된다.

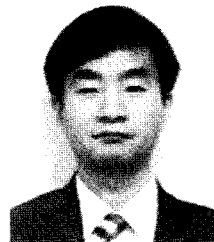
최근에는 이러한 고장의 각 사례를 계통화하여 하나의 기술분야로 정리해 나가자 하는 시도들이 이루어지고 있는데, 본 요소기술자료집에서는 다양한 부품 또는 소재로서 사용되고 있는 고분자소재의 고장분석을 수행함에 있어 일반적인 분석 절차와 그에 따르는 핵심적인 고려 사항들을 서술하였다.

고분자소재의 고장원인을 분석하기 위해서는

기본적으로 화학분석 및 기기분석에 대한 이해가 필요하며, 특히 분석결과에 대한 해석능력이 요구되기 때문에 고장 현상 및 제품을 취급하는 일반의 기술자들이 이를 활용함에 있어 장애가 되고 있다. 반대로 해당 고장 제품에 대한 이해가 부족한 화학분석이나 기기분석 전공자들은 분석결과만으로 해당 제품 고장의 원인과 분석결과 간의 인과관계를 유도하기에는 소재의 열화기구나 고장기구에 대한 이해와 경험이 부족한 한계를 갖기 때문에 결과적으로 논리적인 고장원인의 규명에 실패하는 경우가 많다.

이러한 이유로 고분자소재의 고장분석은 고분자소재에 대한 전문적 지식, 화학분석에 대한 깊은 이해, 다양한 고장 및 제품에 대한 폭넓은 경험을 함께 갖춘 훈련된 전문가만이 수행할 수 있는 특수한 기술 분야라 할 수 있으나, 본 요소기술자료집에서는 고분자소재 또는 기기분석에 대한 기본적인 지식을 가지고 있는 산업 현장의 제품 기술자와 기기분석 담당자들을 대상으로 고분자소재에서 가장 빈번하게 발생하는 고장의 유형별로 해당하는 고장 및 열화의 고장기구와 해당 고장기

#### 변두진



1989 아주대학교 화학공학과 학사  
 1989 한국화학연구원 연구원  
 1999 과학기술원 화학과 박사  
 2002~ 일본 NAIST Postdoc.  
 2003  
 현재 한국화학연구원 신뢰성평가센터 책임연구원

구를 확인할 수 있는 분석방법 및 핵심적인 요소 분석기술을 정리하고자 하였다.

따라서 이 요소기술자료집을 활용하는 가장 적절한 방법은 고분자소재에서 발생한 고장의 유형이 요소기술자료집에서 제시하는 여러가지의 고장 유형 중, 어느 유형에 가장 근접하는 지를 확인하여 해당 고장 기구를 참고로 기술된 고장분석 방법을 준용하여 분석을 수행하는 것이다. 그러나 이러한 경우 고장의 관찰만으로 미리 추정된 고장 기구와 분석을 통하여 확인한 결과가 모순되는 근본적인 오류가 있을 수 있으며, 분석 결과가 지적하는 기술적 증거가 추정된 고장기구 및 고장현상과 논리적으로 일치하는지에 대한 확인과 판단의 기준은 이 요소기술자료집에서 충분히 제공하지 못한다는 것을 밝힌다.

## 2. 소재의 열화와 부품의 고장

주요 공산품으로 취급되는 가전제품 및 자동차 제품 등에 있어 품질 개선 및 신뢰성 향상을 위한 노력으로 제품의 고장 수명은 점차 늘어나고 있는 추세에 있다. 특히 텔레비전, 냉장고, 승용차와 같은 내구성 소비재는 생산자에 의한 보증수명과는 관계없이 소비자에 의한 기대 수명은 10년 이상으로 인식되고 있기 때문에 부품에 사용되는 고분자소재의 선정에 있어 장기간에 걸쳐 점진적으로 진행되는 고분자소재의 열화 특성에 대한 새로운 인식이 필요하다.

고분자소재는 기본적으로 일반적인 사용 환경 하에서 다양한 원인에 의하여 열화가 진행되는 약점이 있는데, 과도한 수준의 열화 인자에 노출되는 환경이 아니라면, 그 진행 속도는 사용 중에 인식하기 어려울 정도로 완만한 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 고분자소재의 열화 속도 및 열화에 의한 물성 저하 수준은 금속소재나 세라믹소재와 같이 유사한 열화 인자에 상대적으로 안정한 소재들에 비하면 매우 급격한 편이다.

그림 1은 저밀도 폴리에틸렌 필름의 물성이 옥외 환경에서 저하되는 자연 열화를 보여주는 것으로, 많은 고분자소재는 높은 수준의 부하가 작용

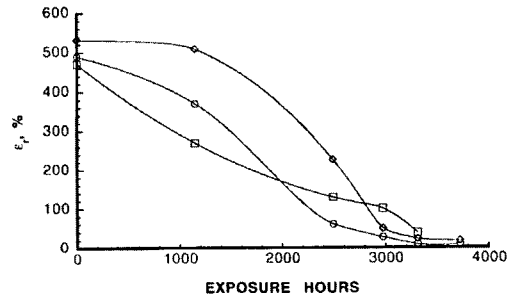


그림 1. 저밀도 폴리에틸렌 필름의 자연 열화에 의한 물성(신장율)저하<sup>1</sup>

하지 않는 일반의 환경 하에서도 점진적이지만 결코 무시할 수 없는 물성 및 기능 저하를 수반하게 된다.

이와 같이 고분자소재에서 발생하는 고장의 절반 이상이 고분자소재의 열화에 의한 물리적, 화학적 경시변화에 관련되어 있기 때문에, 고분자소재의 열화 특성, 특히 중요한 열화기구들에 대한 이해가 없이는 고장의 원인을 분석함에 있어 근본적인 이해의 한계를 갖게 된다. 따라서 고분자소재의 고장분석을 위해서는 고분자소재의 열화 현상에 따른 여러 고장유형 중, 열 열화, 화학적 열화, 광 열화 등의 열화 인자에 따른 열화기구를 이해하고 있는 것이 필요하며, 그 외에도 환경응력 파손, 접착 파괴, 변색, 첨가제 문제 등에서 소재의 열화가 고장기구에 작용하는 메커니즘을 이해하는 것이 기본적으로 요구된다.

## 3. 고분자소재의 고장분석

고장분석(Failure analysis)은 아이템의 잠재적 또는 나타난 고장 메커니즘·발생률 및 고장의 영향을 검토하여 시정조치를 검토하기 위한 계통적인 조사연구로 정의되거나(JIS Z 8115), 아이템의 고장 및 잠재고장의 고장·열화기구를 규명·분석하는 행위로 정의한다.<sup>2</sup> 여러 부품이 복잡하게 구성된 시스템이나 다양한 소재가 혼합되어 사용된 부품의 경우에는 고장분석의 우선적인 관심사가 고장부위를 확인하는 것이 될 수 있기 때문에 고장분석은 결함나무분석(FTA)이나 고장모드영향분

석(FMEA)와 같은 도식적이고 관념적인 분석도구를 연상할 수 있다.

고분자소재의 고장분석은 인접한 타 부품·소재와의 상호작용에 의한 고장현상에 대해서도 다루고 있지만, 기본적으로 고분자소재에서의 고장이 확인되거나 추정이 되는 경우에 수행되는 경우가 대부분이므로 결합나무분석이나 고장모드영향분석과 같은 도식적 분석도구의 역할에는 한계가 있게 된다. 고분자소재에서의 고장은 외부 환경하에 주어지는 광, 열, 피로 하중, 변형, 약품 등의 지속적인 부하에 의하여 분자량의 변화와 같은 화학적 변화를 수반하게 되는 경우가 대부분이므로 제품의 고장을 일으키는 거시적 열화는 필연적으로 고분자소재의 분자 수준의 열화와 관련되게 된다. 따라서 고분자소재의 고장분석은 제품형태의 거시적 고장을 화학적 분자 수준에서 고분자의 열화 또는 고장과 연관지어 설명하고자 하는 일련의 분석법 및 분석 절차를 의미하게 된다.<sup>3</sup>

따라서 본 요소기술자료집에서는 고분자소재에서 발생하는 주요 고장유형별 고장기구를 분자 수준의 화학적 표현으로 기술하였으며, 이를 입증할 수 있는 분석방법으로서 기기분석에 기초한 화학 분석법을 선택하였다. 그러므로 본 요소기술자료집을 적절히 활용하기 위해서는 어느 정도의 기초적인 분석화학에 대한 이해와 고분자소재에 대한 이해를 갖는 것이 필요하다. 많은 경우 고분자소재의 고장분석은 고분자소재와 관련된 전공자 및 분석화학 전공자에게도 낯선, 특별한 훈련과 경험의 축적을 필요로 하는 전문분야가 된다. 이와 같은 연유로, 본 요소기술자료집은 고장분석에 숙련되어 있지 않은 고분자소재 또는 분석화학 전공자들을 위한 기초적인 지침서로서 활용될 수 있도록 기술하고자 하였다.

#### 4. 고장분석의 용어

고분자소재의 고장분석을 수행함에 있어 주로 사용되는 중요한 용어에 대한 정의는 다음과 같다. 신뢰성공학의 범위에서 사용되는 용어는 기술 표준원에서 발행한 신뢰성용어 해설서에 기초하

였으며, 고분자화학 및 기기분석의 범위에서 사용되는 용어는 한국고분자학회에서 발행한 고분자용어집에 기초하였다.<sup>2,4</sup>

**고분자(Polymer):** 거대분자, 고분자물질 또는 고중합체라고도 불리며, 분자량을 기준으로 1만 이상인 분자량이 큰 분자, 대개의 경우 공유결합으로 되어 구성된 유기화합물을 말하며, 단량체라고 하는 규칙적인 화학구조를 가진 단위체의 반복 구조를 갖는 경우가 많아서 반복되는 단위체의 수(중합도)를 기준으로 분류.

고분자에 대하여 분자량이 수백 이하인 화합물을 저분자량체라 하며, 분자량 1,000~1만의 화합물을 따로 구별하여 중분자량체(oligomer)로 분류

**고분자소재(Polymer materials, polymeric materials):** 고분자를 기초 원료로 사용하여 만들어진 플라스틱·합성섬유·고무·도료·접착제 등의 인공적으로 합성된 고분자재료와 셀룰로오스·천연고무·단백질 등의 천연 고분자재료

**고분자소재의 고장(Failure of polymer material):** 시스템 또는 시스템을 구성하는 아이টে에 사용된 고분자소재에서 고장이 발생하거나 고분자소재의 사용이 고장의 원인이 된 사건

**고분자소재의 고장분석(Failure analysis of polymer material):** 고분자소재로 만들어진 아이টে에 고장의 상태에 이르게 된 경위를 분자 수준에서의 미시적 관점으로 고장 및 열화가 가속화되는 메커니즘으로 규명하는 작업

**열화(Degradation, Deterioration):** 소재가 사용 환경에 노출되어 고유의 성질이 물리화학적으로 변질되어 가는 현상

**노화 (Aging, Ageing):** 소재가 주어진 환경에서 사용 시간이 경과함에 따라 고유한 성질이 경시 변화하여 변질되어 가는 현상

**고장분석(failure analysis):** 아이টে에의 잠재적 또는 나타난 고장 메커니즘·발생률 및 고장의 영향을 검토하여 시정조치를 검토하기 위한 계통적인 조사연구

**열화분석(Degradation analysis):** 소재의 열화에 따른 고유한 물리화학적 성질의 변화를 소재의

물질적 열화 메커니즘으로 규명하기 위한 연구

**근본 원인분석(Root cause analysis):** 고장의 원인을 가장 근원적인 상태에서부터 규명하기 위하여 물리적, 화학적 기초인자의 고장 원인 요소를 분석 규명하는 조사연구

**고장모드(Failure mode):** 개별적으로 설계된 시스템 및 컴포넌트가 운용 수행을 멈추는 양상 또는 특징

**고장 메커니즘(Failure mechanism):** 주어진 아이템의 고장 원인을 설명하기 위한, 물리적, 화학적, 기계적, 전기적, 인간적 원인과 고장 현상과의 인과관계를 설명하는 고장 과정의 과학적 설명

**고장 위치(Failure site, Failure location):** 아이템에서 고장이 일어난 부위 또는 고장이 집중된 위치

**잠재 고장(Latent failure):** 고장이 발생하지 않은 아이템 또는 고장이 발생한 아이템의 고장과는 다른 고장이 나타날 수 있는 아이템에 내재되어 있는 결함 및 약점에 의한 잠재된 고장

**고장 추정(Postulation of failure causes):** 고장 형태 및 고장 현상에 의한 관찰을 통하여 관찰자가 사전 지식 및 경험으로 고장 원인 및 고장 메커니즘을 가설적으로 추정하는 행위

**고분자 분해(Polymer degradation):** 고분자를 형성하는 화학 결합의 절단, 약화, 분리의 과정을 통하여 고분자의 분자량이 저하되는 일련의 열화 과정

**해중합(Depolymerization):** 고분자분해를 통하여 고분자에서 저분자량체가 형성되거나 중합도가 낮아지는 일련의 분해 과정

고분자 단량체가 중합반응이 일어나는 역반응 과정을 지칭하기도 하며, 이러한 경우에는 해중합을 통하여 고분자 중합체의 출발물질인 단량체가 형성된다.

**가수분해(Hydrolysis, Hydrolytic degradation):** 물분자가 작용하여 일어나는 분해 반응

카보닐기, 에스테르기, 우레탄기 등을 포함하는 폴리카보네이트, 폴리에스터, 폴리우레탄 등의 축합 중합체에서 발생하는 물분자가 관여하는 분해

과정

**열분해(Thermal degradation):** 열에 의해 화학물을 형성하는 화학결합이 약화하여 절단되거나 약화 또는 분리가 일어나는 분자량 저하 과정

열에 의하여 산화 반응이 수반하는 열산화분해 과정과 분리하여 산화반응이 수반되지 않는 열분해 과정만을 한정하여 지칭.

**광분해(Photo degradation):** 광에 의하여 화학물을 형성하는 화학결합이 약화하여 절단되거나 약화 또는 분리가 일어나는 분자량 저하 과정

주로 옥외 폭로 시에 햇빛 속에 포함된 자외선에 의한 화학적 열화 과정을 지칭하며, 내후성시험에 의한 고장, 열화의 주 고장 메커니즘

**첨가제(Additives):** 고분자소재의 열화 및 분해 억제, 기능성 부여, 물성 개량 등을 목적으로 고분자소재에 첨가하여 사용하는 정밀화학 화합물의 총칭

산화방지제 및 UV 흡수제와 같은 열화 안정제와 활제 및 왁스와 같은 가공 조제, 카본블랙 및 무기 보강제, 가소제와 같은 물성 개량제 등이 대표적인 첨가제로 고분자소재 100파트를 기준으로 수십~수 파트의 양이 사용되는 것이 일반적

**환경응력균열(Environmental stress cracking, ESC):** 용제 또는 계면활성제, 오일 등의 화학물질과 스트레스가 함께 작용하여 해당 소재의 항복강도 이하에서 크랙에 의한 균열파괴가 일어나는 파괴 메커니즘

**잔류응력(Residual stress):** 물체에 가해진 외력이 제거된 후에도 물체 속에 존재하는 내부응력 중합 또는 가공 중에 발생한 고분자사슬의 교란된 배열과 경화 및 열처리 등의 과정에 의해 생긴 불규칙한 고분자사슬의 배열이 내부응력으로 잔류하여 생성된다. 잔류응력은 고분자 성형품의 변형을 유발하고 환경응력 균열 및 열산화, 광열화 등의 열화 메커니즘에 민감하게 만드는 원인으로 작용

**계면파괴(Interface failure):** 접착 및 코팅의 중요한 접착 파괴 메커니즘으로서 피착재나 접착제 자체의 응집력, 즉 재료의 항복강도 부족에서 파괴가 유발되는 것이 아니고 접착이 이루어지는 계

면의 결합력이 부족하여 파괴가 유발되는 파괴 메커니즘

**응집파괴(Cohesive failure):** 접착 및 코팅의 중요한 접착 파괴 메커니즘으로서 접착이 형성되어 있는 계면의 결합력이 부족하여 파괴가 유발되는 것이 아니고 피착재나 접착제 자체의 응집력, 즉 재료의 항복강도 부족에서 파괴가 유발되는 파괴 메커니즘

**폴리엔(Polyene):** 고분자사슬에서 진행된 열열화 및 광열화 등의 열화 과정을 통하여 불포화 이중결합이 만들어져 형성된 후 이중결합의 교차구조 (conjugated structure)

이중결합의 규칙적인 반복 구조가 만들어지므로 자외선이나 가시광선을 흡수하는 발색단을 형성하는 경우가 많아 고분자중합체의 열화에 의하여 황변색이 발생하는 황변의 주요 메커니즘

**열산화(Oxidative thermal degradation):** 열에 의하여 화합물을 형성하는 화학결합이 약화하여 절단되거나 약화 또는 분리가 일어나는 분자량의 저하 과정에서 산소에 의한 산화 반응이 수반하는 열 열화 과정

고분자소재의 경우, 산소가 존재하는 표면에서의 열 열화는 열산화가 중요한 열화 메커니즘이 되고, 산소가 차단되는 소재 내부에서는 순수한 열 열화가 중요한 열화 메커니즘이 되는 것이 일반적

**가교(Crosslinking):** 고분자사슬 간의 화학결합, 대부분 공유결합을 통하여 3차원적인 가교 구조가 형성되는 결합

열가소성 수지나 고무에서는 선형의 분자 사슬 간의 화학결합으로 가교가 형성되나, 열경화성 수지에서는 가교결합을 취할 수 있는 특수한 단량체의 반응에 의하여 저분자량의 단량체로부터의 중합과정 중에 직접 가교가 형성

**후가류, 후가교(Post crosslinking):** 기 형성된 선형의 고분자사슬 또는 가교된 망목구조의 고분자사슬에서 추가적으로 진행되는 2차적인 가교 반응

가류제를 사용하여 가교 구조를 얻는 고무에서는 추가적으로 발생하는 2차 가교 반응을 후가류

라 칭하며, 가류 또는 가교 과정의 생산성을 증가시키기 위한 방법으로 2차 가교를 선택하기도 하나, 열화 또는 부반응의 과정으로 진행

**첨가제 이행(Additive migration):** 고분자 첨가제의 소재 내 이동 현상

대부분 첨가제 내부에서 표면으로의 이동을 말하며, 접촉된 타 소재로의 흡수 또는 휘발, 용출 등에 의한 농도 구배가 이동의 작용력이 된다. 일반적으로 첨가제와 고분자소재의 혼화성과 상용성이 부족할수록, 또한 첨가제 자체의 분자량이 작을수록 크게 나타나는 경향

**용제 유발크랙(Solvent induced crack):** 환경응력균열과 같이 용제가 고분자소재 내부에 침투하여 크랙의 생성을 유발하는 크랙 생성 메커니즘 및 그에 의하여 생성되는 크랙의 형태

용제 유발크랙은 상대적으로 낮은 내·외부 응력에 의하여 크랙이 생성되므로 크랙이 생성되는 파열 면이 깨끗한 거울 면의 특징을 갖는데, 이는 크랙 파열시에 흡수된 소재 내부의 파괴 응력이 낮은 것을 의미

**과냉각효과(Super cooling effect):** 분자운동이 비교적 활발하고 자유로운 고온의 열유동 상태 및 용액 상태에 있던 고분자사슬이 갑자기 냉각 고화되거나 석출되어 교란된 사슬 배열상태를 갖게 되는 과정

이러한 교란된 사슬 배열 상태를 갖는 고분자사슬은 큰 자유부피(free volume)와 높은 에너지 상태를 갖게 되며 국부적인 잔류응력을 보유

## 5. 고장분석 기법의 분류

### 5.1 분류 방법

고분자소재의 고장분석에서 가장 큰 비중을 차지하는 화학분석에서 분석기기를 활용하는 기기분석의 비중은 계속적으로 증가하는 추세에 있어, 고분자소재의 고장분석은 기기분석을 이용한 특수한 분야의 분석기법으로 받아들여지고 있다.

고분자소재를 포함하는 화학소재의 고장분석은 이러한 전통적인 화학분석을 위한 기기분석에 기초하고 있는 만큼, 분석기법을 분류함에 있어 전

통적인 기기분석의 분류기준을 따르는 방법이 사용되어질 수 있다. 이와 같은 방법은 특히 기기분석에 익숙한 분석화학 연구실이나 실험실에서 친근하게 접근이 가능한 방법이 될 수 있으며 기기분석에 대한 기초적인 이해를 바탕으로 고장분석에 대한 분석의 관점과 시료의 취급법, 분석결과 해석 방법 등을 추가적으로 훈련하는데 활용할 수 있을 것이다.

또 다른 분류 방법은 고분자소재의 중요한 고장 현상을 따라 분류하는 방법으로, 기기분석 담당자들보다는 고분자소재를 산업체에서 사용하거나 연구하는 전문가들에게 유용한 분류 방법이 될 수

있다.

고분자소재가 소재 자체적으로도 매우 다양하고, 사용되는 응용분야 역시 매우 광범위하므로 고장의 형태나 유형을 일정한 분류 기준으로 한정하는 것은 어렵지만 고분자소재가 갖는 일반적인 약점을 따라 흔히 빈발하는 중요한 고장 형태를 분류하는 것은 가능하다.

본 요소기술자료집에서는 고분자소재를 취급하는 산업체 및 연구소의 담당자들에게 보다 편리하게 사용될 수 있을 것으로 판단하여 5.3의 분류 기준과 같은 고분자소재의 고장현상에 따른 분류방법도 함께 기술하였다.

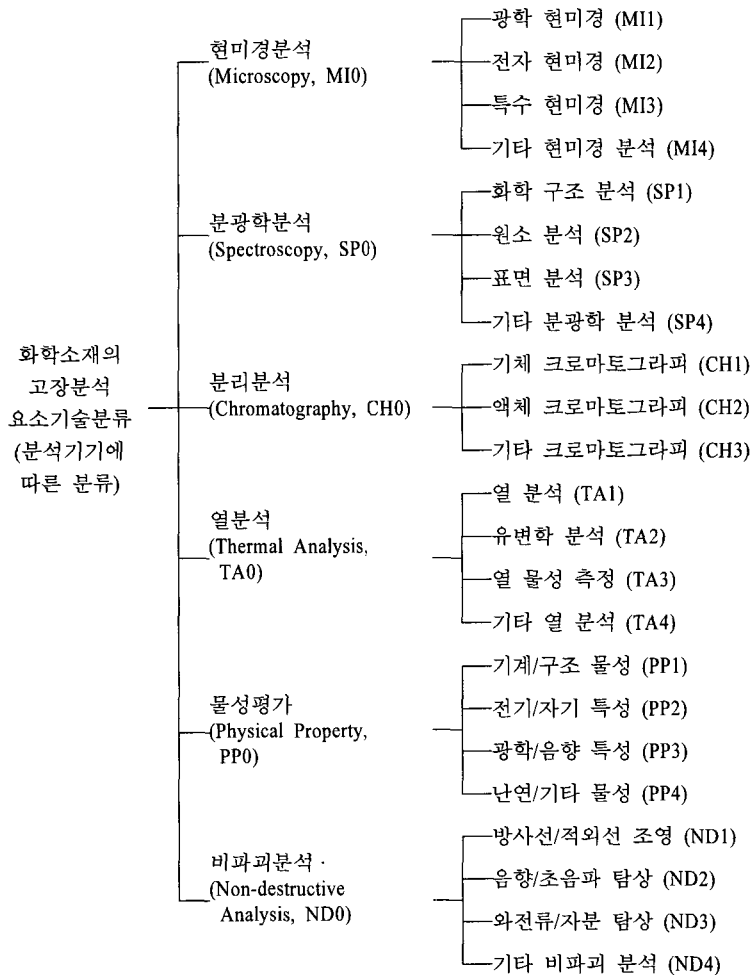


그림 2. 고분자소재의 분석기기에 따른 고장분석 기법의 분류

## 5.2 분석기기에 따른 분류

고분자소재의 고장분석에 사용되는 분석기기의 종류별로 분석기법을 분류하면 그림 2와 같다. 일반적인 화학분석의 분류 기준과 별반 다르지 않으나 소재 고장의 중요한 유형 중의 하나가 파손 및 파열과 같은 기계적 파손이기 때문에 이에 대한 분석과 관찰을 위한 현미경에 의한 분석기법이 중요하게 취급되는 특징이 있다.

현미경 분석은 주로 기계적 파손의 파단면을 관찰하기 위한 목적과 미세한 결함의 확인 및 분석을 위한 목적으로 사용되는데, 크게 일반의 광학현미경, 비디오 현미경 등의 광학현미경류와 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM) 등을 지

칭하는 전자현미경류, 원자현미경(AFM), 레이저 공초점 현미경(Laser confocal Microscopy), 열분석 현미경(Thermo-microscopy) 등이 포함된 특수현미경류 등으로 구분한다.

주로 고분자소재의 화학적 구조나 구성 원소를 분석하기 위해 사용하는 분광학분석은 분광학적 분석에 의하여 화학관능기를 분석하는 적외선분광(IR), 핵자기공명분광(NMR), 자외선분광(UV-Vis), 전자스핀공명분광(ESR), 라만분광(Raman) 분석기류가 포함되며, 구성 원소를 정성 및 정량적으로 분석하기 위한 원소분석기로는 X-선 형광분광분석(XRF), 원자흡광도(AA), 원소분석(EA) 등이 포함된다. 외에 고분자소재의 극표면 분석을 위해서

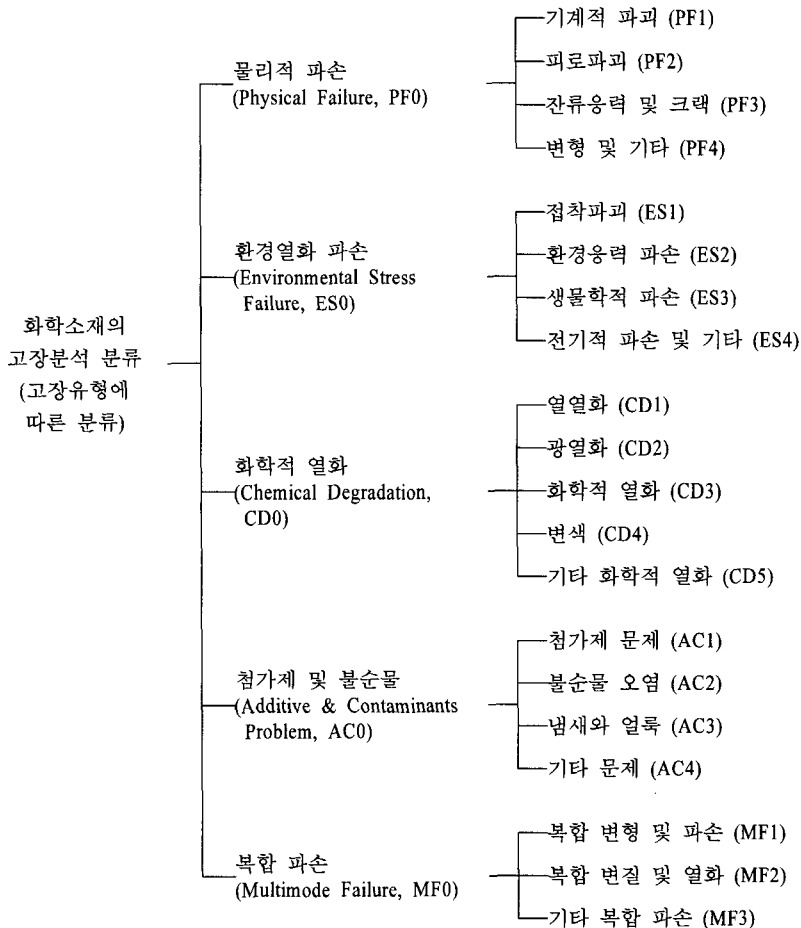


그림 3. 고분자소재의 고장유형에 따른 고장분석 기법의 분류

사용되는 표면분석기 종류로는 광전자분광(XPS), 오제이전자분광(AES), 이차이온질량분석(SIMS), 전자현미경성분분석(EPMA) 장비류가 포함된다.

고분자소재 뿐 아니라 대부분의 화학소재는 특정한 고분자소재가 주성분으로 사용되어도 다양한 성분의 다른 화학구조를 갖는 화합물의 혼합물 상태로 사용되기 때문에 정확한 고장분석을 위해서는 이들 혼합물의 분리 분석이 중요하게 사용되는 경우가 있다. 이러한 경우 분리분석 기법은 중요한 분석 도구가 되는데, 흔히 기상의 이동상을 사용하는 기체 크로마토그래피와 액상의 이동상을 사용하는 액체 크로마토그래피 방법으로 분류한다.

기체 크로마토그래피는 고분자소재에 포함된 저분자량 첨가제 분석에 유용한 분석기법이며, 외에도 고분자 사슬을 열분해하는 방법으로 분석하는 열분해 기체 크로마토그래피 분석법은 고분자소재의 분석 도구로 유용한 분석 기법이다.

액체 크로마토그래피는 고분자소재의 분석에 있어 겔투과 크로마토그래피를 이용한 분자량 분석기법으로 주로 사용되어 왔다. 겔투과 크로마토그래피는 분자량이 서로 다른 중합체의 집합체인 고분자의 평균 분자량과 분자량 분포를 동시에 분석할 수 있는 장점이 있어 고분자소재의 분자량 측정 기법으로 가장 편리하게 사용되는 방법이다. 최근에는 겔투과 크로마토그래피에 질량분석기나 적외선분광분석기를 연결하여 보다 세밀한 분석 정보를 얻기 위한 기법도 소개되고 있다.

열분석은 타 소재에 비하여 고분자소재에 있어 중요도가 높은 분석기법이다. 고분자소재의 가장 큰 특징 중의 하나는 용융에 의한 가공성이 우수하다는 것인데, 용융 상태에서의 유동성 및 고체 상태에서의 열물성을 관측하는 분석기법이 열분석이다.

열분석에는 온도 변화에 따른 고분자소재의 열적 전이나 무게 변화 등을 통하여 고분자소재의 열특성과 열안정성 등을 관측하고 평가할 수 있는 열분석 기법과 용융 및 고체 상태에서의 응력부하에 따른 변형 또는 흐름의 상관관계를 측정하는

유변학분석 기법이 포함될 수 있다.

시차주사열량계(DSC) 및 열무게분석(TGA), 열기계물성분석(TMA) 등은 잘 알려진 열분석방법으로 온도 변화에 따른 고분자소재의 열적 전이, 무게변화, 부피변화를 측정하는 분석기법이다.

유변학분석은 동적기계적분석(DMA), 동적기계적열분석(DMTA), 모세관점탄성분석(capillary rheometer), 동적점탄성분석(ARES) 등의 유변학 분석기기가 포함되며 고분자소재의 고체 상태에서의 기계적 물성의 온도 변화에 따른 변화 거동 및 용융상태에서의 점탄성 특성을 분석하는 기법으로 사용된다.

### 5.3 고장 유형에 따른 분류

고분자소재는 소재 종류가 다양하고 배합 특성에 따른 변화가 다양하여 부품적인 특성을 배제하여도 고장의 유형과 현상이 매우 광범위한 특징이 있다. 따라서 이의 고장을 계통적으로 분류하여 기술적 분류 체계를 세우는 것은 주의 깊은 판단이 필요하며 특히 분류의 목적과 용도에 따른 기준이 고려되어야 한다.

본 요소기술자료집에서는 이미 기술한 바와 같이 고분자소재를 다루는 산업체의 현장 전문가들을 위하여 고분자소재가 갖고 있는 특징적인 약점에 따른 고장현상으로 그림 3과 같이 고장현상 별 분석기법을 정리하였다.

고분자소재의 고장현상은 크게 고분자소재를 구성하는 주성분인 고분자에 의한 고장과 보조성분인 첨가제 및 외부 불순물 또는 오염물질에 의한 고장으로 대별할 수 있다. 고분자에 의한 고장은 다시 기계적 파손 및 파열, 크랙 생성과 같은 물리적 파괴에 의한 고장과 열 및 광, 화학약품 등에 의한 열화가 원인이 되는 화학적 열화에 의한 고장, 그리고 화학적 열화와 기계적 파손이 함께 작용하여 고장을 유발하는 환경열화 파손에 의한 고장으로 나누어 고려할 수 있다.

상기한 물리적 파손이나 화학적 열화에 의한 고장의 중요 원인이 되는 고장현상 외에도 화학적 열화와 물리적 파손이 함께 작용하여 고장에 이르



게 되는 중요한 고장 메커니즘도 알려져 있는데, 고분자소재의 환경응력균열에 의한 파손과 접착제의 환경열화에 의한 계면파괴 등은 환경적 열화 인자에 의한 열화와 응력부하에 의한 물리적 파손이 함께 작용하는 대표적인 고장 메커니즘이다.

고분자소재의 물리적 파손은 비교적 명백히 고장 형태를 진단할 수 있는 고장현상으로, 이는 고분자소재 뿐 아니라 타 소재에서도 유사하게 발생하는 고장현상이다. 대부분의 물리적 파손은 항복 강도 이상의 과도한 외부 응력에 기계적 파손이

며, 항복 강도 이하의 응력 하에서도 장기간 지속적으로 응력이 작용하면 동적 및 정적 피로에 의한 피로 파괴가 유발되기도 한다. 또 한가지의 중요한 고분자소재의 물리적 파손은 고분자소재의 가공 중에 이루어지는 열이력 상태에 따라 성형품 내에 전류응력이 발생하여 생성되는 변형 및 크랙에 의한 고장이다.

노화 또는 열화라 칭하는 고분자소재의 장시간에 걸친 환경적 열화 인자에 의한 물리화학적 성질의 경시변화에 의한 열화는 고분자소재의 특징

표 1. 화학소재의 고장분석 요소기술 기술분류표

고장 현상 분류				분석기법 분류			
대분류		중분류		대분류		중분류	
고장 현상	코드	고장 현상	코드	분석 기법	코드	분석 기법	코드
물리적 파손 (Physical Fracture)	PF0	기계적 파손	PF1	현미경 분석 (Microscopy)	MI0	광학 현미경	MI1
		피로 파괴	PF2			전자 현미경	MI2
		잔류응력 크랙	PF3			특수 현미경	MI3
		기타 변형	PF4			기타 미분류	MI4
환경열화 파손 (Environmental Stress Cracking)	ES0	접착 파괴	ES1	분광학 분석 (Spectroscopy)	SP0	화학구조 분석	SP1
		환경응력 파손	ES2			원소 분석	SP2
		생물학적 파손	ES3			표면 분석	SP3
		기타 전기적	ES4			기타 미분류	SP4
화학적 열화 (Chemical egradation)	CD0	열열화	CD1	분리 분석 (Chromato graphy)	CH0	기체 크로마토 그래피	CH1
		광열화	CD2			액체 크로마토 그래피	CH2
		화학적 열화	CD3			기타 크로마토 그래피	CH3
		변색	CD4				
		기타 미분류	CD5				
첨가제 및 불순물 (Additive & Contamination roblem)	AC0	첨가제 문제	AC1	열분석 (Thermal analysis)	TA0	열 분석	TA1
		불순물 오염	AC2			유변학 분석	TA2
		냄새와 얼룩	AC3			열물성 측정	TA3
		기타 미분류	AC4			기타 미분류	TA4
복합 파손 (Mutimode Failure)	MF0	변형 및 파손	MF1	물성평가 (Physical property)	PP0	기계/구조물성	PP1
						전기/자기특성	PP2
						광학/음향특성	PP3
						난연/기타물성	PP4
		변질 및 열화	MF2	비파괴 분석 (Non-destructive)	ND0	방사선, 적외선 촬영	ND1
						초음파 탐상	ND2
기타 미분류	MF3			와전류, 자분탐상	ND3		
				기타 미분류	ND4		

고장분석 요소기술 코드: □□□,□□□ (앞 3자리 고장현상 코드, 뒤 3자리 분석기법 코드)

적인 고장 유형중 하나이다. 이는 일상적인 사용 환경 하에서도 고분자소재가 불안정하기 때문에 야기되는 완만한 분해, 즉 화학결합의 약화 및 절단과 관련되어 있다.

구체적인 열화인자로는 열, 광, 산 및 알칼리, 용제와 같은 화학약품 등이며, 중요하게 작용하는 열화 인자에 따른 고장 현상과 메커니즘이 다르기 때문에 각각 열열화, 광열화, 화학적 열화로 고장 메커니즘이 구분되어 연구되고 있다. 이러한 열열화 및 광열화, 화학적 열화는 해당 열화인자가 열, 광 등으로 한정될 수 있을 때 각 열화 인자가 작용하는 부하의 수준과 경과시간에 따라 부분적으로 열화의 정도를 예측할 수 있으며, 그에 따른 고장 수명을 예측하기 위한 기법이 연구되고 있다.<sup>5</sup>

고분자소재에서 발생하는 고장현상은 상기한 고장현상과 같이 고분자소재 자체의 파손과 열화가 원인이 될 뿐 아니라 고분자소재에 소량 첨가된 첨가제나 외부로부터 유입 또는 오염된 불순물에 의하여 고장이 유발되는 경우도 많다. 고분자 첨가제에 의한 고장의 경우에는 특히 첨가제의 분산 불량과 이행이 고장원인으로 작용하는 경우가 빈번하며, 불순물의 오염은 특히 반도체나 디스플레이 부품과 같은 전자부품용 화학소재에서 중요한 고장 원인이 된다.

예를 들어 상기한 고장분석 분류기준에 의한 분류 코드로, 음향방출 분석(sound emission analysis)에 의한 접착 불량 분석기술을 표현하면 ES1, ND2가 된다. 역으로, CD2, SP0는 분광학분석에 의한 광열화 분석기술을 표현하는 것으로, SP0는 분광학적 분석기술 전반을 표현하는 것이다.

## 6. 고장분석의 계획 및 절차

고분자소재의 고장분석을 위한 절차 및 단계 및 수행 내용은 그림 4의 일반적 고장분석 절차를 따른다.

고장분석의 절차는 고분자소재의 고장분석의 기술 요소로서 중요하게 취급되어야 하는데, 그 이유는 고분자소재 자체의 소재와 용도가 매우 광

범위하기 때문에 고장분석 및 해결을 위한 일련의 효과적인 접근법에 대한 훈련이 없이는 분석 결과의 혼란으로부터 결론을 얻기 어렵기 때문이다.

고장분석의 절차에서 필요한 작업은 고장과 관련된 정보 및 지식의 효율적인 수집과 수집 정보의 논리적 구성에 의한 결론의 도출이다. 이 과정에서 꼭 필요한 작업이 고장품의 수집과 고장품에 대비할 수 있는 표준 견본품의 수집이다.

표준 견본품은 고장이 발생하지 않은 같은 사용이력을 가진 제품이나 아직 사용되지 않은 그래서 고장이 나지 않은 제품이 선택될 수도 있으며, 이러한 대비가 될 수 있는 적절한 견본품이 없는 경우에는 고장이 발생한 고장품 내에서 고장부위와 고장이 발생하지 않은 비고장 부위를 대비하는 방법을 채택하는 것이 바람직하다.

고장현상과 고장형태에 대한 관찰을 통하여 고장원인이나 고장 메커니즘에 대한 추정이 가능할 수 있다면, 고장분석의 방법과 절차는 비교적 명확하게 선택되고 계획될 수 있다. 따라서 고장분석을 위한 실험에 착수하기 이전에 사전 경험과 지식으로 추정되는 고장원인에 대한 가설을 세우는 것이 필요하다.

따라서 이러한 고장원인에 대한 가설을 정확하게 추정할 수 있는 고장분석 수행자의 사전 지식과 경험이 중요하며, 그에 따라 고장분석의 방향과 방법, 절차, 예측되는 결과 등이 결정되게 된다.

그러나 추정된 고장 원인이나 메커니즘이 최종적으로 결론으로 확정되는 경우는 비교적 고장현상이 명확하거나 잘 알려진 고장형태를 갖는 경우로 한정되므로 고장분석 수행 중에 얻게 되는 실험결과와의 모순이 없는지 주의 깊게 일치 여부를 확인하고, 모순된 결과로부터 새롭게 예측하지 못한 새로운 고장원인이나 고장 메커니즘을 찾아내려는 노력이 유지되어야 한다.

때때로 고장분석의 결과로 얻어진 결론이 얻어진 실험결과와 전적인 일치를 이루지 못하거나 기술적으로 모호한 개념을 담고 있다면 이를 입증하기 위한 재현실험이 필요할 수 있다. 그러나 이러한 재현실험은 고장이 발생하는 사용 환경에 대한

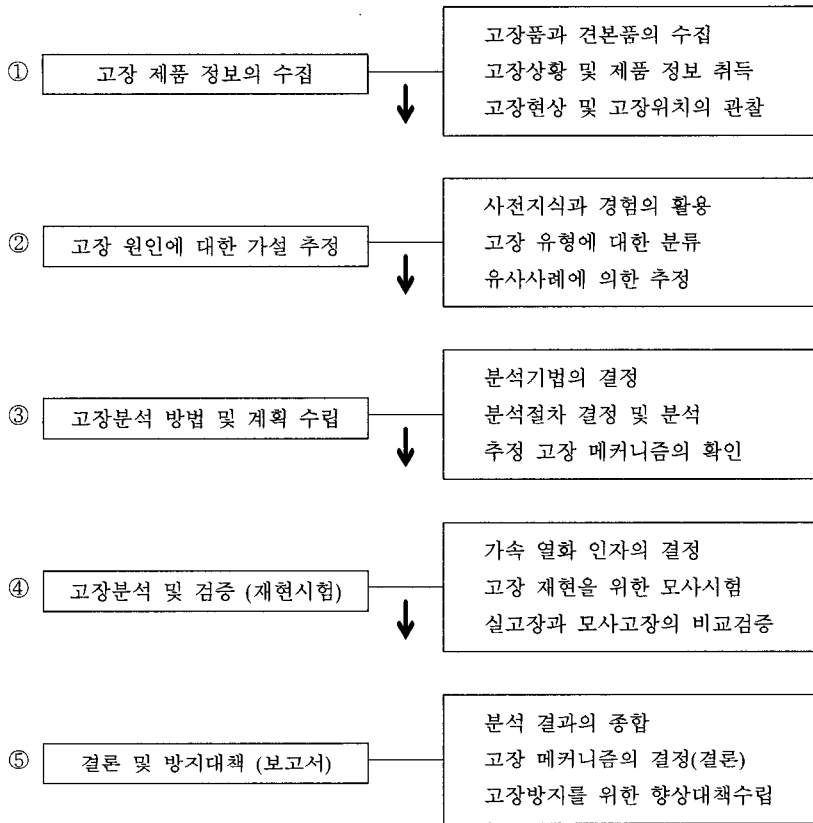


그림 4. 고장분석의 일반적 절차 및 내용

정확한 재현이 어렵고, 비교적 장시간이 가속열화 시험이 요구되는 경우가 대부분이어서 늘 사용될 수 있는 방법이 되지 못한다는 문제점이 있다.

그림 5는 고분자소재의 고장분석 계획 수립을 위한 절차를 대표적 예시로 제시한 것이다. 고분자소재는 금속소재나 세라믹소재와 같은 타소재에 비하여 열화에 민감하여 일상적인 사용 환경 하에서도 점진적인 경시변화에 의한 열화를 수반하게 된다.

대부분의 경우에 고장분석이 이루어지는 기간 중의 열화에 대해서는 무시할 수 있을 정도이지만, 빛에 민감하거나 습기에 민감한 일부 특수한 고분자소재의 취급에는 사전에 그에 대한 정보와 취급법이 숙지되어야 한다. 경우에 따라서는 고장 분석 중의 부주의한 취급에 의하여 고장품이 변질되거나 열화가 촉진되어 분석 결론에 오류를 유발

할 수 있다.

고분자소재의 고장분석 계획의 수립에서 중요한 두 가지의 원칙은 첫째, 비파괴적 분석에서 시작하여 파괴적인 분석으로 수행되는 것이다. 많은 경우 고장분석을 위한 고장품은 한정된 경우가 많아서 분석을 위한 고장품의 제공에 한계가 주어지는 경우가 대부분이다. 따라서 한정된 고장 시료로부터 효율적인 분석을 수행하기 위해서는 분석을 위한 시료 제작이나 분석 과정에서 시료를 오염 또는 파손시키지 않는 비파괴적 분석을 먼저 수행하는 것이 바람직하다.

또한 파괴 분석 중에도 시료를 적게 소모하는 분석을 먼저 수행하는 것이 바람직하며, 특히 고장품의 고장부위가 국소 부위에 제한되어 있는 경우에는 시료의 양과 분석기법 상의 제한이 많으므로 이의 고장 특성을 보존하면서 가능한 다양한

분석 결과를 얻기 위한 주의 깊은 실험계획이 수립되어야 한다. 둘째, 분석의 범위가 큰 분석기법에서부터 시작하여 점차 고장의 부위, 그중에서도 고장이 시작된 고장 유발 위치로 분석 범위를 좁혀나가는 방법으로 수행하는 것이다.

이러한 원칙을 그림 5에서 보여주고 있는데, 고장 제품 전체의 관찰을 통한 고장부위와 인접부위, 그리고 정상부위를 결정하는 것이 고장분석의 우선적인 시작점이 될 수 있다.

고장품에서 고장부위가 선별되면, 많은 경우 고장부위의 현미경에 의한 세부 관찰이 진행되는데 특히 물리적 파손이 있는 파단면이나 파열부위에 대한 현미경 분석은 필수적인 절차에 해당한다. 이후 고장부위나 열화부위에 대한 물리화학적 변화에 대한 분석 또는 측정이 수행될 수 있는데, 이 경우에는 대부분 정상품의 동일 부위 또는 고장품의 정상부위와의 비교 분석에 의하여 물리화학적 특성치 자체보다는 표준이 되는 견본으로부터 변

화된 특이성이나 변화된 정도를 관측해 내는 것이 필요하다.

이후 분자수준에서의 변화를 관측할 수 있는 화학적 분광분석 기기나 원소분석 기기를 사용한 화학구조 상의 변화를 측정하여 내고, 이러한 결과를 먼저 얻어진 물리화학적 특성의 변화나 고장 현상의 특징과 관련하여 고장 메커니즘을 유추하게 된다. 추가적으로 고분자소재의 화학적 열화를 보다 분명하게 확인하는 것이 필요한 경우에는 전자스핀공명분광이나 화학발광분석 등의 분석기법을 사용하여 고장 및 열화가 집중된 부위의 라디칼 또는 라디칼 생성에 의한 관능기 생성을 확인하는 절차가 수행될 수도 있다.

주의 깊은 고장분석 계획의 수립과 훈련된 분석 절차에도 불구하고 얻어진 분석결과가 하나의 결론으로 집중되지 못하고, 얻어진 고장 메커니즘 역시 모호한 경우는 많은 경우 고장의 원인으로 작용하는 열화인자가 다양하거나 복합적인 고장

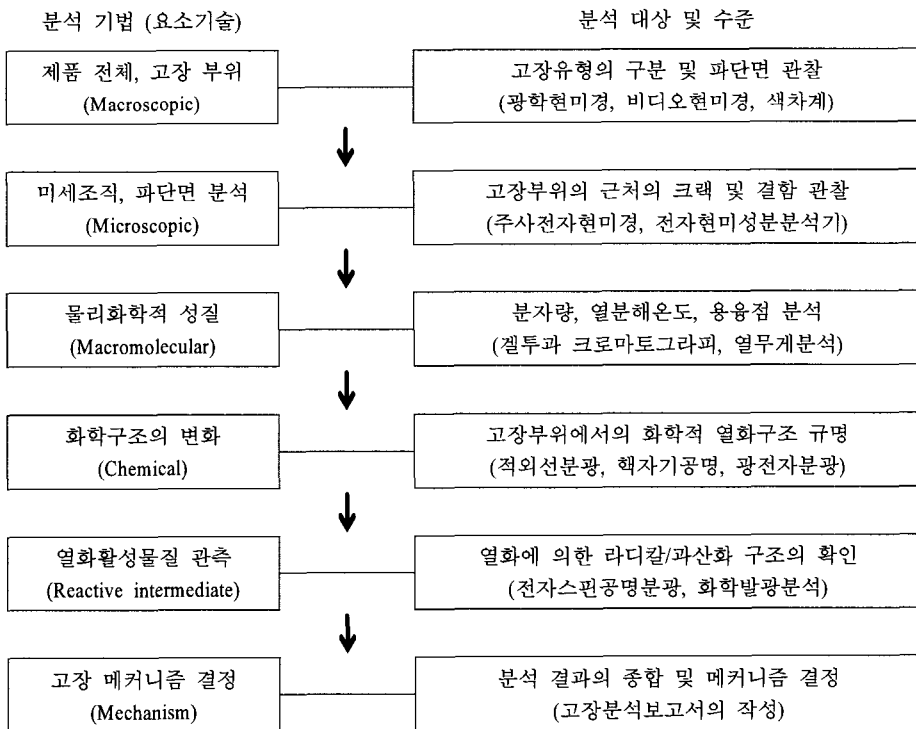


그림 5. 고분자소재의 고장분석 순서

메커니즘인 경우이다. 이러한 경우에는 분석결과가 하나의 고장원인으로 집중되지 못하고 고장 현상 또한 산만하게 나타는 경우가 많다.

상기한 경우를 제외하고, 고장분석의 결과로 얻어진 결론과 각각의 분석 결과들이 제시하는 고장 메커니즘이 일치하지 못하거나 모호하다면, 고장 분석의 절차나 계획상의 오류 및 고장의 원인을 추정하는 관점상의 실수를 점검해 볼 필요가 있다.

## 7. 고장분석 시료 취급법

### 7.1 고장품의 관찰

고분자소재의 고장분석은 고분자소재가 갖고 있는, 특히 고장품에 있어서 더욱 주의할 필요가 있는, 특징에 유의하여 분석 대상 시료를 채취하여야 한다.

이때 고장품에 대한 주의 깊은 관찰이 필요한데, 고장 유형에 따라 시료를 채취하여야 하는 부위와 방법이 달라져야 하기 때문이다. 표 2에 이러한 고분자소재의 고장 유형에 따른 고장 부위와 분석 기법에 대한 대표적 예시를 정리하였다. 따라서 고장품의 관찰에 의한 고장 유형의 판정과 시료 채취 방법의 결정은 고장분석의 성패를 좌우하는 시작점이 된다.

고장품을 관찰하여 고장 유형과 고장부위를 판

단함에 있어 유의할 원칙은 고장은 고장을 유발하는 열화 인자에 가장 취약한 부위에서 제한적으로 진행된다는 것이다.

따라서 고장품 전체가 분석 대상이 되는 경우는 매우 드물며, 고장 원인을 찾기 위한 대상 시료는 고장품 내의 특정한 부위에 한정되게 된다. 경우에 따라, 이러한 고장 부위가 육안으로는 보이지 않을 미세한 국소부위일 수도 있다는 것에 유의하여야 한다.

### 7.2 시료 채취 및 시편 제작

고분자소재의 고장 유형이 판단되고 고장 부위가 결정되면 해당하는 분석 기법에서 사용하기 적절한 형태의 시료 제작이 이루어져야 한다. 사용되는 분석기법 및 분석기기, 그리고 분석 목적에 따라 시료의 모양과 전처리 방법 등이 크게 달라지기 때문에 고장 유형에 따른 분석 목적과 사용되는 분석기법 및 분석기기의 사양에 따른 전문적인 이해를 필요로 한다.

예를 들어, 동일한 고장 시료라 할지라도 전자현미경 분석을 수행하기 위해서는 시료 내에 포함되어 있는 휘발성분을 제거하여야 하고, 가스 크로마토그래피 분석을 수행하기 위해서는 대상 시료를 휘발이 가능한 성분으로 변화시켜야 한다.

이러한 분석 시료 준비과정에서 고장분석을 수

표 2. 고장 유형에 따른 분석 부위 및 분석 기법

고장 현상	고장 부위	주 분석 기법
기계적 파괴	파단면	광학현미경 및 전자현미경
피로 파괴	균열 시작점	전자현미경 및 X-선 원소분석기
간류응력 변형	변형 부위	열분석기 및 편광현미경
접착 파괴	접착 계면	광학현미경 및 전자현미경
환경응력균열	외부 소재 접촉면	전자현미경 및 질량분석기
열 열화	열적 손상 부위	전자스핀공명분광기
광 열화	표면 열화층	적외선분광기 및 광전자분광기
화학적 열화	약품 및 용제 접촉면	전자현미경 및 질량분석기
변색	탈, 변색 부위	자외선분광기 및 라만분광기
첨가제 문제	표면 및 접촉면	가스 크로마토그래피
불순물 오염	오염 부위	전자현미경분석기
냄새와 얼룩	표면 및 고장 부위	가스 크로마토그래피, 질량분석기

행 또는 주관하는 담당자가 개별 분석기법이나 분석기기의 사양에 따른 제반 이해가 부족할 수 있으므로 이러한 경우에는 해당 분석기법에 대한 전문가나 분석기 담당자의 도움과 조언을 얻는 것이 바람직하다.

본 요소기술자료집에서는 고분자소재의 고장분석용 시료를 채취함에 있어서 고려해야할 특징적인 주의 사항에 대해서만 언급하고자 한다.

① 고장 유형의 대표성이 있는 고장부위가 선택되어야 한다. 고장부위는 고장품을 구성하는 일부 분이기 때문에 고장 현상을 대표하는 부위가 선택되는 것이 원칙이다.

② 배합상태가 불균일하거나 물리적 특성에 위치적 방향성이 있는 시료의 상태에 주의하여야 한다. 이러한 불균일성이나 이방성이 고장에 미치는 영향이 고려되어 시료 채취가 이루어져야 한다.

③ 고분자소재는 분석 중에 노출되는 강한 에너지에 의하여 추가적인 열화나 고장이 진행될 수 있다는 것에 주의하여야 한다. 전자현미경 분석을 위한 전자 빔이나 원소분석이나 표면분석을 위한 X-선 빔에 의하여 고분자소재는 물리화학적 손상을 받는다. 예를 들어 불소수지나 불소화합물은 내열성이나 내약품성이 우수한 소재로 알려져 있지만 전자 빔이나 X-선 빔에 취약하여 분석 중에 심각한 열화가 수반될 수 있다.

④ 시료의 분석 전, 전처리나 보관 상태에 유의하여야 하는 시료가 있다. 예를 들어 고진공을 필요로 하는 전자현미경이나 표면분석 기기를 사용

하기 위한 시료 제작에서는 휘발성분의 제거가 필요한데, 이 과정에서 고장 시료의 고장 상태가 변화하지 않도록 주의가 필요하다. 나일론 수지와 같은 흡습성이 높은 고분자소재의 경우 고장 유형에 따라 시료 보관 상태에 따른 흡수율의 변화에 대한 사전 지식이 중요하게 작용할 수도 있다.

⑤ 고분자소재는 항상 성형과정에서 형성된 열이력을 담고 있다. 이러한 열이력에 의한 영향은 열분석을 이용한 고장 분석에서 중요하게 취급되어야 한다. 시차주사열량계(DSC) 및 열적기계물성분석(TMA), 동적기계물성분석(DMA) 등의 분석 결과에는 고분자소재의 열이력이 분석 결과에 영향을 주게 되며, 이를 제거하여 소재 고유의 열물성에 의한 분석 결과를 보기 위해서는 분석 전 열처리(아닐링)나 반복분석 방법이 사용된다.

⑥ 시료 제작 방법을 결정함에 있어, 시료의 성질이나 분석 기법에 따른 특성이 고려되어야 한다. 예를 들어 미세입자 상태의 시료를 얻기 위하여 분쇄 방법이 흔히 사용되지만 흡습성이 강하거나 전자스핀공명분광기의 시료 제작법으로는 적절하지 못한 방법이 된다.

상기한 고분자소재의 소재적인 특징에 기초한 주의 사항 외에 시료 제작 기법에 따른 주의사항도 고려되어야 한다. 고분자소재의 고장분석을 위한 시료 제작은 대부분의 경우 수십 mm 이상에서 수 m에 이르는 크기의 제품에서 수십 mm에서 수 십 nm에 이르는 미세한 시료를 채취해내는 작업이 중심이 된다.

표 3. 시료 제작 방법에 따른 주의 사항

제작 방법	대상 시료	주의 사항
분쇄	경질 플라스틱	분쇄에 따른 라디칼 생성 및 고 흡습성 수지의 흡습
용해	무정형 고분자	열이력 및 몰폴로지의 유실, 오염물질 및 첨가제 성분의 유실
연마	엔지니어링 플라스틱	연마 마찰열에 의한 열열화 발생, 연마 과정 중의 기계적 손상
냉동 절단	고무 및 연질 플라스틱	흡습성 소재에의 수분 응결, 파열 과정 중의 크랙 생성
미세 절단	연질 플라스틱	표면의 미세 긁힘, 선정 부위의 위치 오차
용융	열가소성 플라스틱	열이력 및 몰폴로지의 유실, 휘발성 첨가제의 손실, 열에 약한 성분의 열적 손상

이러한 고분자소재의 채취 작업에 흔히 사용되는 방법은 분쇄, 절단, 용해, 용융 등의 방법으로 각 방법에 따른 주의 사항을 표 3에 정리하였다.

### 7.3 시료의 보존

고장분석에 사용된 시료는 분석 의뢰자의 요청에 따라 폐기 또는 보존 한다. 그러나 많은 고장분석이 일정한 절차와 계획에 의하여 분석이 완료되었어도 얻어진 결과로부터 분명한 고장원인이 파악되지 못하거나 고장 메커니즘이 불분명할 수 있고, 추후 추가적인 고장분석의 필요성이 대두되거나 새로운 고장품의 취득에 따른 비교 분석의 필요성이 대두될 수 있기 때문에 일정기간 보존하는 것이 바람직하다.

## 8. 고장분석 보고서의 작성

### 8.1 작성 개요

고장분석 보고서의 작성은 일반의 실험 보고서 작성 요령으로부터 크게 벗어나지 않는다. 다만, 고장분석의 특성에 따라 고장품에 대한 명확한 이해와 고장분석 내용 및 분석 결론을 일목요연하게 정리하여 의뢰자에게 정확하게 전달하기 위한 고려가 필요하다.

특히 고장분석 보고서에서는 대상 고장품에 대한 명확한 명기가 필수적인데, 유사 제품 및 소재에서도 다양한 고장현상이 존재할 수 있기 때문에 제품명이나 상품명으로 표시하는 방법은 바람직하지 못하다. 따라서 제공된 고장품에 대한 생산이력이나 사용이력에 대한 파악된 정보를 상세히 기술하고, 가능한 경우에는 고장부위가 드러난 사진이 첨부되는 것이 바람직하다.

고장분석은 수행 작업의 특성 상, 분석 담당자가 해당 고장에 대한 직관적인 판단과 분석결과에 대한 주관적 해석이 관여될 수 있기 때문에 동일한 고장현상에 대해서도 개인차가 발생할 소지가 큰 문제점이 내포되어 있다. 따라서 동일한 고장분석을 수행한 분석 결과로부터 작성하는 담당자에 따라서 보고서의 검토 내용과 결론에서 어느 정도의 개인차가 발생하는 것을 근본적으로 피하

기는 어려울 것이다.

특히 고장 원인과 고장 메커니즘을 다루는 고장분석 결론은 객관적인 실험자료를 바탕으로 하지만 일정한 사전 지식과 경험에 의한 추정과 해석이 개입할 수밖에 없으므로 작성자에 따른 개인차가 가장 문제가 될 수 있는 부분이다. 또한 고장원인을 설명하기 위한 고장 메커니즘이 대부분 해당분야의 전문가만이 이해할 수 있는 특수한 공학적인 개념을 바탕으로 하고 있기 때문에 이를 의뢰자에게 개념적으로 전달하기 어려운 경우도 많으므로 이에 대한 배려가 있어야 한다.

### 8.2 보고서 형식

고장분석보고서에는 다음에서 예시된 바와 같이, 각각의 항목별로 정리하여 작성하는 것이 편리하다.

- ① 의뢰자 및 의뢰기관의 인적사항,
- ② 고장품에 대한 의뢰 배경 및 고장 현황,
- ③ 분석 절차 및 시료 제작 방법,
- ④ 분석 결과 및 검토,
- ⑤ 결론 및 고장 방지 대책
- ⑥ 참고문헌

경우에 따라서는 제시된 고장 메커니즘의 검증을 위한 고장 재현 시험이나 시뮬레이션 고장 시험을 수행하여 이를 별도의 항목으로 작성하여 첨부할 수 있는데, 이러한 경우에는 상기한 4. 분석결과 및 검토 항목과 5. 결론 및 고장 방지 대책 사이에 고장 재현 시험의 항목을 삽입하여 작성하는 것이 바람직하다.

① 의뢰자 및 의뢰기관의 인적사항 및 ② 고장품에 대한 의뢰 배경 및 고장 현황 항목은 의뢰자로부터 제공되는 정보에 의존하게 되므로 고장분석 신청을 위한 신청서 작성 시에 이를 정확하게 파악하기 위한 양식을 사용하는 것이 필요하다.

고장분석은 동일한 고장품을 분석하여도 고장품 내 분석 위치 선정이나 분석 기법의 선택에 따라 다른 결론에 도달할 수 있다. 따라서 고장분석 보고서는 고장 결론 뿐 아니라 결론에 이르게 된 실험전개 과정에 대한 자세한 기술이 꼭 필요하다.

또한 일반적으로 고장분석에서 얻게 되는 결론, 즉 고장 메커니즘은 비록 해당 고장품의 고장 메커니즘으로는 알려져 있지 않다하여도 보다 일반화된 과학적 내용으로는 이미 알려져 있는 경우가 대부분이다. 따라서 분석 결과 얻어진 고장 메커니즘에 대해서는 적절한 문헌 조사를 통하여 보고된 유사사례를 파악하여 검토하는 것이 바람직하며, 보고서에서도 이를 수록하는 것이 필요하다.

### 8.3 보고서 작성

고장분석보고서의 작성에 있어 숙련되어 있지 않은 작성자들에게 가장 문제가 되는 부분은 ④항의 분석결과 및 검토 부분이다.

대부분의 다른 보고서 작성 항목이 주어진 내용에 따라 간결하게 작성하는 것으로 충분히 작성이 이루어질 수 있는데 반하여, ④ 분석결과 및 검토 부분은 내용이 많고 결과에 대한 분석자의 의견과 해석이 포함되어야 하는 부분이기 때문에 대부분의 경우에 가장 작성하기 어려운 부분으로 느끼게 한다. 특히 이 부분은 내용이 많은 경우가 흔히 있기 때문에 분석 결과를 제시하는 순서가 의뢰자에게 논리적으로 쉽게 이해될 수 있도록 배열되는 것이 필요하다.

이러한 실험 결과를 제시하는 순서는 그림 5로 제시된 고분자소재의 고장분석 절차 및 순서에서 제시된 원리를 따르는 것이 적절하다. 즉 분석의 범위가 큰 분석기법에서부터 시작하여 점차 고장의 부위, 그중에서도 고장이 시작된 고장 유발 위치로 분석 범위를 좁혀나가는 방법으로 결과를 제시하는 것이다.

이를 보다 상세하여 설명하면 다음의 순서와 같다.

- ① 고장품의 고장부위에 대한 사진 및 현미경 관찰 결과
- ② 고장부위와 정상부위의 물리화학적 특성 측정 및 비교
- ③ 분광학적 기법에 의한 고장부위의 화학적 구조 변화 추적
- ④ 고장 부위의 화학적 열화에 대한 정량 분석 시도

### ⑤ 고장 원인물질 또는 열화 활성물질(라디칼)의 확인

분석결과 및 검토 부분은 고장분석보고서에서 분석 데이터를 직접적으로 제시하고 설명하는 부분이므로 가능한 상세하게 작성되는 것이 필요하며, 분석 결론과는 배치되는 분석 결과도 수록하여 검토하는 것이 바람직하다.

이때 필요하면 참고문헌의 인용이 이루어질 수 있으며, 인용된 자료는 참고문헌에서 인용된 자료의 출처를 밝히는 것이 원칙이다.

보고서의 분석결과와 검토 부분은 다소 전문성이 요구되는 공학적 표현과 내용을 담고 있어도 무방하지만, 결론 및 고장 방지 대책 부분은 가능한 일반적 표현과 내용으로 풀어 쓰는 것이 바람직하다. 또한 필요한 경우에는 간단한 도식이나 그래프에 의한 표현을 사용하는 것도 필요하다. 이는 보고서의 결론 부분만큼은 해당 분야에의 전문성이 부족한 의뢰자일지라도 보고서의 핵심적인 내용이 충분히 전달되어야 하기 때문이다.

### 8.4 분석 결론 도출

고장분석보고서의 결론은 고장원인에 대한 규명과 고장원인이 고장 현상에 이르게 된 고장의 경위를 고장 메커니즘으로 설명하게 된다. 따라서 고분자소재의 고장분석 결론은 고분자소재에서 발생한 거시적 고장현상을 미시적인 분자수준의 물리화학적 열화 과정으로 설명하고자 하는 작업이라고 할 수 있다.

고장분석의 분석실험은 일반의 기기분석 및 분석화학에 대한 이해를 가지고 있는 일반의 담당자들에 의하여 수행될 수 있지만, 분석결과를 해석하여 고장의 메커니즘을 제시하는 결론을 작성하는 일은 전문적인 경험이 축적되어 있는 고장분석 전문가가 아니면 수행되기 어려운 작업이다. 예를 들어 폴리카보네이트나 ABS 수지에 용제가 포함된 접착제를 사용하거나 가소제가 포함된 PVC 수지를 접촉시킬 경우 환경응력균열이 쉽게 발생하게 된다는 것을 사전에 알고 있지 못하면, 그에 관련된 분석결과를 얻었다 하여도 그로부터 고장



메커니즘을 정확히 추론하기 어렵게 된다.

고장 현상과 그를 설명할 수 있는 고장 원인 간의 인과관계에 대한 해석은 고장분석 담당자가 가지고 있는 사전 지식과 경험에 의존할 수밖에 없기 때문에 알려진 고장의 유형에 따른 많은 고장 메커니즘을 숙지하는 것이 고장 메커니즘의 정확한 도출 방법이다. 이러한 의미에서 본 요소기술 자료집이 제시하고 있는 고분자소재에 있어 빈번하게 발생하는 주요 고장 유형별 고장 메커니즘과 분석방법을 숙지하고 제시된 고장분석 절차에 따라 얻어진 결과를 종합하는 방법이 산업 현장에서 잘 활용될 수 있기를 기대한다.

### 8.5 향상 및 방지 대책

향상 및 고장 방지 대책은 엄밀한 의미로는 고장분석보고서의 범주를 벗어난 내용이라고 할 수 있다. 고장분석과 관련한 일련의 실험결과만으로 고장을 억제 또는 방지할 수 있는 향상대책을 제시하는 것에는 한계가 있으며, 경우에 따라서는 심각한 오류가 포함된 대책을 제시할 가능성이 존재하기 때문이다. 그 이유는 많은 경우 제시된 향상 대책에 대해서 실험으로서 입증되지 못한 추론만을 담고 있기 때문이다.

이러한 문제점에도 불구하고 고장분석보고서에 고장 억제나 고장 방지를 위한 향상대책을 다루고 있는 이유는 고장원인을 규명하고 고장원인이 고장 현상으로 어떻게 진전되는가를 밝힌 고장 메커니즘을 다루고 있기 때문에 고장 억제나 고장 방지에 대한 대안 제시가 용이하게 도출될 수 있

기 때문이다.

따라서 고장분석보고서의 향상대책은 해당 고장품의 고장 메커니즘에 깊은 이해와 실험적 증거를 갖게 된 고장분석 담당자가 해당하는 고장의 억제 및 방지 방법에 대해서 조언하는 수준에서 작성되어야 한다.

## 참 고 문 헌

1. F. Severini, R. Gallo, S. Ipsale, E. Nisoli, M. Pardi, "Natural weathering of some new ethylene copolymers", *Polym. Degrad. Stab.*, **65**, 329 (1999)
2. 김운광, 안현호, 안병만, 최우석, 이두면, 신필수 외, "신뢰성용어 해설서" 산업자원부 기술표준원 (2003)
3. J. Scheirs, "Textbook: Compositional and failure analysis of polymers" (1999)
4. 한국고분자학회 용어제정위원회, "고분자용어집", 한국고분자학회 (1995)
5. R.L. Norton, "Machine design: An integrated approach", *Prentice Hall*, (1999)
6. T.L. Anderson, "Fracture mechanics: Fundamentals and applications, 2nd edition", *CRC Press*, (1995)
7. D.R.H. Jones, "Materials failure analysis: Case studies and design implications", *Pergamon Press*, (1993)

한국화학연구원 신뢰성평가센터의 허락을 득하여, 화학소재 고장분석 요소기술 1에 수록된 논문을 부분 발췌하여 수록하였습니다.