

전자부품의 고장 분석

송 병 석

Failure Analysis of Electronic Componets

Byeng Suk Song

1. 고장분석의 개요

고장분석이란 “고장원인을 규명하기 위한 회로로부터 부품의 분석³⁾”으로 정의 할 수 있고 고장부위, 고장형태, 고장원인 및 고장기구 등을 규명하는 것을 말한다. 전자정보통신 제품에서 고장이 발생하면 먼저 어느 부품에서 고장이 발생했는지를 확인하여 고장부위(failure site)를 결정하게 되는데 이는 회로에서 어느 부품이 고장인지를 확인하는 것을 의미하고, 주로 전기적인 특성을 측정함으로써 이루어진다.

신뢰성을 구성단위로 분류하면 부품의 신뢰성과 제품(시스템 혹은 세트)의 신뢰성 그리고 네트워크 신뢰성으로 구분할 수 있고, 하위 단계에서 신뢰성이 확보되어야만 상위부분의 신뢰성이 확보되는 특성을 갖고 있다. 부품의 신뢰성이 확보되어야 제품의 신뢰성이 확보되고, 제품의 신뢰성이 확보되어야만 네트워크의 신뢰성이 확보된다. 그러나 국내에서는 전자부품의 신뢰성에 대한 자료가 전무하여 제품에 대한 신뢰성을 결정할 수가 없다. 즉, 부품단위의 신뢰성 척도(고장율과 평균수명)는 실험을 통해서 혹은 사용 중의 고장자료를 통해서 구할 수가 있는데 국내에는 거의 없다고 해도 과언이 아니다.

그런데 반하여 제품의 신뢰성은 경쟁력의 원천으로서 인식되어 일본에서는 1968년도부터 정부(통산산업성) 차원에서 투자하기 시작하여 현재에는 일본산 전자제품 하던 품질이 뛰어난 제품으로 인식되어 고가로 팔리고 있다.

이러한 인식에 바탕을 두고 산업자원부에서는 2000년부터 국내 산업의 신뢰성 문제를 해결하기 위해 매년 수천억원의 자금을 투자하여 부품단위에서부터 신뢰성의 인프라를 구축하고 신뢰성평가기준의 제정과 신뢰성평가를 시행하여 정부가 인증하여 주는 제도를 시행하고 있고 인증 받은 제품의 시장판매를 돕기 위하여

2003년부터 신뢰성보험을 시행하게 되었다. 다시 말해 국가경쟁력의 원천인 부품의 신뢰성 확보의 시급성을 인식하게 되었고, 세계의 공장으로서 부상하고 있어 우리 산업의 위협요소인 중국산 제품을 극복할 수 있는 전략으로 사용할 수 있게 된 것이다.

최근의 전자정보통신 시스템은 약 2천 개에서 2만개의 부품으로 구성되어 있어 부품의 신뢰성 확보의 중요성이 강조되고 있다. 메릴랜드대학을 중심으로 신뢰성 분야에서 고장분석의 중요성이 강조되고 있고 고장분석을 통해서 신뢰성의 문제를 해결하는 방법들이 시도되어 호평을 받고 있다. 고장분석을 하면 사용 중의 고장을 미리 예견할 수가 있고, 고장원인에 대한 지식이 축적되면 제품개발에 활용하여 많은 실험을 하지 않아도 단 시간에 신뢰할 만한 제품을 개발할 수가 있다.

Fig. 1은 전자제품의 고장원인을 구분한 것으로서 22%가 부품이 원인인 것으로 나타나고 제일 큰 비중을 차지 하고 있고, 20%가 유발에 의해서 그리고 15%가 생산결함으로 나타나 있어 부품의 신뢰성확보가 중요함을 나타내고 있다.

이러한 차원에서 고장분석의 목적을 정리하면, 첫째 부품의 고장과 관련하여 고장분석을 통해서 고장의 원

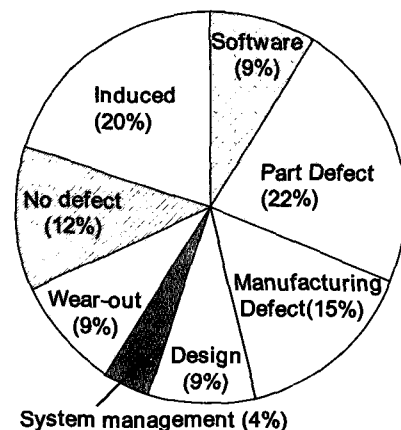


Fig. 1 전자제품의 고장원인

을 규명하게 되면 부품설계의 자료로 활용하여 신제품 설계에 활용하거나 공정을 개선하여 공정능력을 향상시킬 수 있어 불량률과 고장율을 줄일 수 있고, 둘째 부품은 자체에 내재되어있는 잠재적인 원인과 스트레스의 상호관계에 의해서 고장현상이 발생하는데 고장분석을 통해서 고장을 일으킨 주요 스트레스를 규명하게 됨으로서 가속수명시험을 설계할 때 스트레스를 결정할 수 있게 해 준다. 셋째 PL(product liability : 제조물책임)법 시행의 대책으로 상용할 수가 있다. 즉, 2001년 7월 1일부터 시행되는 제조물 책임법에서는 제품의 사용중에 발생한 사고에 의해서 신체나 재산상의 피해를 입었을 때 제조자가 배상책임을 지게 되는데 전술한 바와 같이 수많은 부품으로 구성된 세트제품에서 고장이 발생했을 때 그 원인은 매우 복잡한 상호관계에 의해서 일어나기 때문에 고장분석을 통해서 사용자의 실수인지 세트제품의 설계오류에 의한 것인지 혹은 특정부품의 문제인지를 규명하여 부당한 배상을 방지할 수 있다. 넷째 FTA나 FMEA 등 다른 신뢰성 요소기술들을 적용할 때 필요한 기본 자료의 역할을 한다.

2. 고장 원인

고장원인분석은 "왜 고장이 났는가"를 규명하는 것으로서 고장분석을 하기 위한 첫 걸음은 몇 가지 중요한 개념을 정확히 이해하는 데에서 출발한다. 개념의 명확한 이해가 없으면 고장원인을 정확히 규명할 수 없고 문제의 해결도 어렵기 때문이다.

고장은 고장이 발생할 수 있는 잠재적인 요인과 사용중에 받게 되는 스트레스에 의해서 발생하게 된다. 잠재적인 요인은 설계결함과 공정결함으로 요약될 수 있고, 설계는 부품이 특정한 기능을 발휘하기 위한 구조와 사용 재료의 결합인데 부품이 사용 중에 받아야하는 스트레스에 대한 고려가 부족한 구조이거나 부적절한 재료선택이라면 언제나 고장이 발생할 수 있는 준비가 되어있는 셈이다. 공정문제는 공정조건이 정상에서 벗어난 경우로서 부품제조에 플라스틱 재료가 사용되는 경우 완전히 경화되지 않은 상태로 제조되었다면 특정 스트레스와 결합하여 이 또한 언제나 고장이 발생할 수 있는 가능성이 내포되어 있는 것이다. 공정결함을 중심으로 잠재적인 요인을 정리하면 Table 1와 같다.

물리적 요인은 도금이나 박막 두께의 부적합과 기공으로 구분할 수 있고, 제품이 경박단소화 되면서 부품이 작아져 칩형 부품이 많아지고 특수한 기능을 가진 부품이 요구되면서 박막을 이용한 부품이 제조되고 있고 이 박막의 두께가 부적절한 경우 전기적 혹은 환경적 스트레스를 받으면 고장이 발생한다. 또한 도금두께

Table 1 잠재적인 고장원인

구 분	내 용
물리적인 요인	-도금두께 부적합 -박막두께 부적합 -기공
화학적인 요인	-오염 -성분의 부적합 -결정구조 부적합 -미소결·미경화 -습도와 수분

가 부적합한 경우는 확산에 의해서 의도하지 않은 금속간 화합물이 형성되고 특성치가 변하는 고장이 발생하기도 한다. 내재된 기공은 특히 반도체에서 열충격에 의해서 규열이나 파단의 원인이 되거나 습기를 함유하였다가 온도에 의해서 팽창하여 균열이나 파단 및 리프트의 원인이 되기도 한다.

화학적인 요인은 오염, 성분의 부적합, 결정구조의 부적합, 미소결·미경화 및 습도와 수분 등으로 구분할 수 있고 불완전한 세척으로 인해서 전 단계공정에서 사용되었던 제거대상 물질이 제거되지 않고 잔류한 상태로 다음 공정이 진행되어 오염원으로 존재하다가 스트레스와 결합하여 고장이 발생하거나 부정확한 성분함량, 배합방법의 오류 및 공정조건의 부정확 등의 원인에 의해서 편석이나 계재물 등이 생겨 스트레스와 결합한 고장발생 한다. 세라믹 등 소결체의 미소 소결이나 플라스틱 재료의 미경화 상태 등은 부적합한 공정조건으로 인해서 품질수준에서 외관상 혹은 전기적 특성에 문제가 없어 보이나 스트레스와 결합되면 고장이 발생하고 제조공정에서 습도나 수분이 부적절하게 포함된 경우 부품에 전력이 인가되면 여러 가지 형태의 고장이 발생한다.

전자부품 고장원인의 대부분은 스트레스에 의해서 발생하고 그 중에서도 주로 열에 의해서 발생한다. 스트레스는 기계적 스트레스, 열적 스트레스, 전기적 스트레스 그리고 방사(radiation)등으로 나눌 수 있고, 다르게 구분하면 전기적인 스트레스와 환경적인 스트레스로 구분하고 환경적인 스트레스에는 열, 기계, 방사 스트레스가 포함된다고 볼 수 있다.

Table 2에서 보는 바와 같이 물리적 스트레스로 구분되는 온도에는 열충격과 열싸이클이 있고, 이 양자는 부품이 고온과 저온의 환경에 번갈아 가면서 노출되는 특성을 갖고 있다. 다시 말하면, -20℃에서 +30℃로 변하는 것을 말하며 5분 이내로 급격히 변하면 열충격이라고 정의하고 5분보다 긴 시간동안 변하면 열싸이클

Table 2 스트레스의 종류

구 분	세부분류
물리적 스트레스	온도 : 열충격 열사이클 습도
기계적 스트레스	진동, 압력, 충격, 마찰
방사(Radiation)	방사능(nuclear), 이온
전기적 스트레스	과전압, 과전류, 정전기 써지(surge & spike), 전자파 간섭(EMI)
화학적 스트레스	

이러고 정의하고 있다. 열은 열 자체로서 고장의 원인이 되기도 하지만 온도변화가 이차적인 물리적 변화인 길이의 팽창과 수축을 일으키고 기계적인 하중으로 작용하여 고장으로 이어지는 경우도 많기 때문에 주의 깊게 분석해야만 정확한 고장원인 밝혀 낼 수 있다. 습도는 통상 60%정도의 상대습도를 기준으로 하고 그 이상의 습도에서 주로 고장이 발생한다.

기계적인 스트레스는 진동, 압력, 충격, 마찰로 구분할 수 있고, 재료의 강도나 경도를 초과하는 하중이나 마찰이 인가되었을 때 고장이 발생한다. 진동은 흔들림의 정도(주파수), 크기(stroke), 형태(파형) 및 세기(G_rt)에 의해서 직접적인 고장이 발생하게 되고, 2차적으로 다른 스트레스에 의해 진행 중인 고장속도를 가속화 시킨다고 한다. 압력은 직접적으로 작용하여 파단을 일으키기도 하고, 이차적으로 화학적인 변화를 가속화 시킨다. 충격은 순간적인 압축응력이 특정부위에 집중됨으로써 해서 고장을 일으키는 원인이 된다. 전자부품에서 마찰이 스트레스가 되어 고장이 발생하는 경우는 경희해보지 못했고, 주로 기계나 자동차 부품 등에서 중요한 스트레스가 된다.

방사는 일반적으로 경험하기 힘든 스트레스의 일종으로서 주로 우주선이나 인공위성에서 문제시 되는 스트레스다. 특히 반도체 부품인 경우 반드시 해결해 주어야 할 문제로 알려져 있고, 우리나라에서 개발된 무궁화 위성에서도 이 문제가 심도 있게 거론되었다고 하며, 방사선과 이온 방사가 있다.

전기적인 스트레스는 과전압, 과전류, 써지(surge & spike), 정전기, EMI 등이 있고 전자부품 고장의 많은 부분을 차지 하고 있다. 과전압·과전류는 회로 상에 정상적인 전력을 초과하는 전류·전압이 인가된 경우로서 직접적으로 문제를 일으키기도 하고, 이차적으로 열이 발생하여 열에 의한 고장의 원인으로 작용하기도 한다. 써지는 곧 바로 회로의 단락 등의 원인이 되고 스파이크는 써지 보다 치명적인 단락이나 발화의 원

이 된다. 정전기는 전류 값은 크지 않지만 전압이 높은 특성을 가지고 있고 주로 반도체(IC)제품에 치명적인 영향을 준다. 전자파 간섭은 전자파에 의해서 회로에 잡을 발생시키는 등의 문제를 일으킨다.

3. 고장 형태와 기구

고장 형태는 전자부품에 내재되어 있는 잠재적인 요인과 스트레스가 상호작용을 하거나 스트레스 단독으로 영향을 주어 발생한 고장유형을 말한다. 일반적으로 전자에서 말하는 고장형태는 단락(short), 개방(open), 특성치 변화(parameter shift), 특성치 불안정(electric instability) 등 4가지로 구분할 수 있다. 단락은 회로가 합선된 상태를 의미하고, 개방은 전기가 통하지 않는 상태를 의미하며, 특성치 변화는 회로가 입력신호에 대해 정상상태를 일정하게 벗어난 상태를 말한다. 또한 특성치 불안정은 특성치가 정상적인 입력신호에 대해 일정하지 못하고 시간에 따라 변하는 상태를 말한다.

고장기구는 “고장을 일으키는 기계적, 전기적, 화학적 혹은 물리적 스트레스의 특정한 결합과정”으로 정의된다⁵⁾.

특정한 스트레스가 잠재적인 고장원인과 연합하거나 스트레스 간의 결합 혹은 단독으로 전자부품에 작용해서 전술한 4가지의 고장형태를 일으키는 과정을 말한다. 고장기구는 크게 초과스트레스 기구(overstress mechanisms)과 마모기구(wearout mechanisms)으로 구분할 수 있고, 더욱 상세하게 분류하면 Fig. 2와 같다.

전자부품에 과도한 전기적 스트레스가 작용하면 회로에 저항이 증가하고 용융(melting)이나 소손(firing) 현상이 일어나고 단락(open)이라는 고장형태가 발생한다. 이 경우 우리는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 스트레스 : 전기적 스트레스
- 고장기구 : 초과스트레스 기구로서 소손 혹은 용융
- 고장형태 : 단락

이 경우 고장을 방지하려면 과도한 전기적 스트레스가 인가되지 않도록 하거나 과도한 전기적 스트레스가

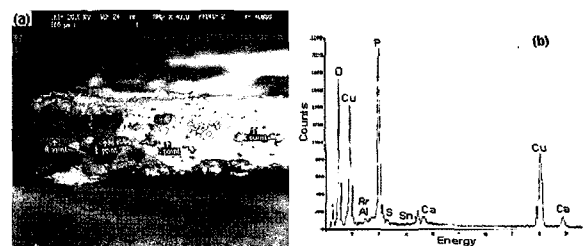


Fig 2 고장부위 SEM사진(x40)과 E오염층의 EDS 분석 결과 DS 결과

Table 3 고장기구

Stress	Overstress Mechanisms	Wearout Mechanisms
Mechanical	Yield, Fracture, Interfacial de-adhesion	Fatigue, Creep
Thermal	Glass transition(Tg) Phase transition	Stress driven diffusion voiding(SDDV)
Electrical	Dielectric breakdown, Electrical overstress Electrostatic discharge Second breakdown	Electromigration, Surface charge Spreading, Hot electrons, CFF, Slow trapping
Radiation	Single event ups5et	Radiation embrittlement, Charge trapping in Oxides
Chemical	-	Corrosion, Dendrite growth, Depolymerization Intermetallic growth

인가되더라도 저항을 줄여 발열하지 않도록 설계를 변경해야 할 것이다. 이처럼 고장분석을 통해서 고장원인을 규명하고 전자부품의 신뢰성을 향상시킬 수 있어, 최근에는 고장분석 기법이 미국과 일본에서 각광 받고 있고 우리나라에서도 많은 사람들이 관심을 가지고 있다.

4. 고장분석의 실례

4.1 PC 키보드 콘넥터의 고장

고온다습한 환경에서 낮은 에어컨이 작동되었다가 야간에 중지한 상태에서 사용되었던 PC 키보드의 콘넥터(Connector)의 고장원인을 분석한 결과이다. Fig. 2는 고장 부위에 대한 검토결과를 나타낸 것이다. (a)는 고장 부위의 외관이고, (b) 이 부위 오염층의 EDS 분석 결과를 나타낸 것으로, 고장 부위에 C, O, P, Ca, S, Sn, Pb와 같은 물질 등이 검출되었다. Fig. 3은 (a)와 (b)는 고장 부위의 단면, (c)는 양품의 단면 사진이고, (d)는 (b)의 부식되어 있는 부위를 EDS 분석한 결과이다. 이것으로부터 고장 부위는 양품과 비교하여 Sn 도금층이 아주 부실하여 부식되어 있음을 알 수 있다. 부식생성물은 앞의 결과와 동일하다. 사용 환경과 고장 부위의 분석결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- 스트레스 : 습기
- 고장형태 : 저항 증가
- 고장기구 : 부식(특히 도금층이 얇은 곳에서 Cu 성분이 확산되어 표출되고, 습기와 반응하여 부식되었다)

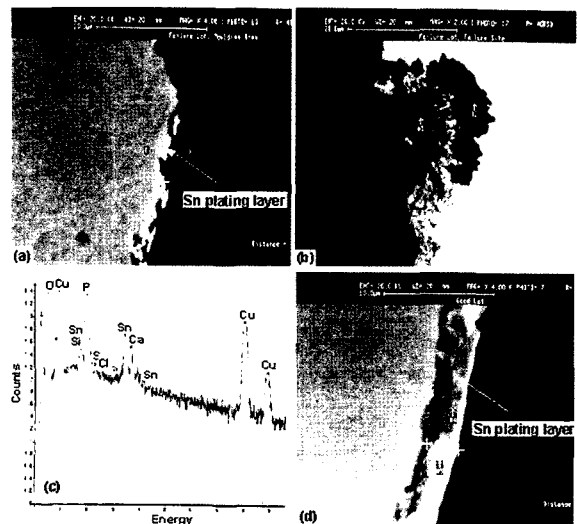


Fig. 3 고장 부위와 양품의 단면 SEM사진 비교 (a), (b) 고장부위, (c) (b)의 흑색 영역의 EDS 분석 결과, (d) 양품

- 개선 : Sn도금을 5 μ m이상 균일하게 실시하여 개선되었다.

4.2 PC 키보드 멤브레인(membrane)의 고장

Fig. 4의 (a)는 고장이 난 멤브레인의 사진이고, (b)는 사진에서 오염된 부위의 EDS 분석 결과로서, 오염된 부위에 검출된 성분은 C, O, Na, Cl 성분임을 알 수 있다. 이 검출되었다. 용 환경과 고장 부위의 분석 결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- 스트레스 : 음료수, 전류
- 고장형태 : 저항증가

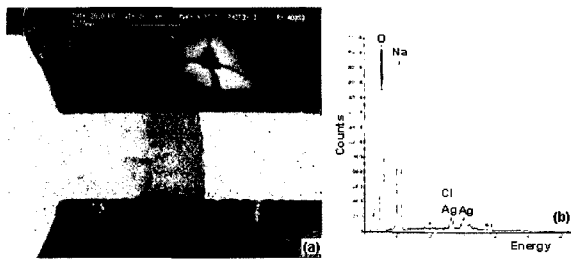


Fig. 4 고장부위 SEM사진(a)과 오염층의 EDS 분석 결과(b)

- 고장기구 : 전기화학반응(음료수와 전류의 반응에 의해 국부적인 산화 혹은 탄화 등 화학적 변화초래)
- 개선사항 : 사용자 주의 및 밀폐

4.3 Conditioner 조절기

온외에 설치된 conditioner 조절기 회로의 파워 트랜스의 고장 분석 사례에 대해서 검토한 결과이다. Fig. 5의 (a)는 개봉된 트랜스 고장 부위의 사진이고, (b)는 A 부위를 확대한 사진이며, (c)는 (b)의 □부분을 확대한 사진으로, 접속 부위에 오염되어 있다. (d)는 이 오염물을 EDS로 분석한 결과로서, Al, Ag, Mo 등이 검출되고 있다. Fig. 6의 (a)는 조절 스위치를 OFF/Auto로 조절한 경우에 전압측정 결과로서, 유기된 과도전압이 128V이고, (b)는 6단 → 7단으로 조절한 경우에 측정된 결과로서 유기된 과도전압은 136V임을 알 수 있다.

이들의 결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- 스트레스 : 서지(Surge)
- 고장형태 : 단락(Short)
- 고장기구 : 용융(Tr의 항복전압(Vceo) 90V,

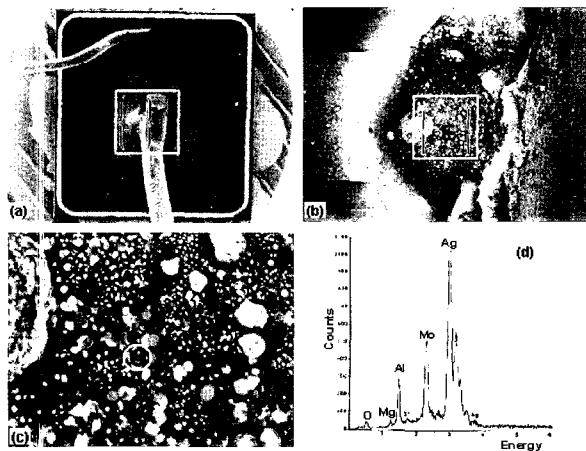


Fig. 5 고장부위 SEM사진과 오염층의 EDS 분석 결과. (a) 개봉된 Tr의 고장 부위, (b) (a)의 □ 영역의 확대 (c) (b)의 □ 영역의 확대, (d) (c)의 EDS 분석 결과

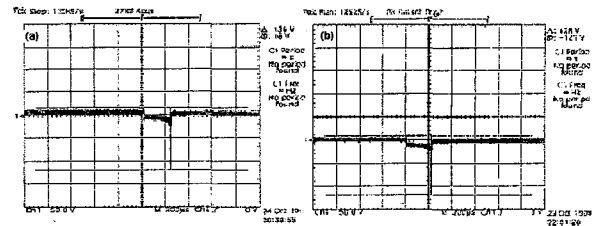


Fig 6 유기된 과도전압 측정 결과 (a) 136V, (b) 128V

실제측정 항복전압 135V, 사용전압은 14V, 조절 스위치를 OFF→Auto로 조절 128V, 6단→7단으로 조절 136V 유기전압 측정되었고 이전압이 접속(junction)을 파괴함)

- 개선 : 유기전압 차단회로 개선 및 항복전압이 높은 Tr을 사용하여 개선하였다.

4.4 트랜스포머

Fig. 7 트랜스포머 페라이트 코어의 접착면에서 고장이 발생한 부위를 검토한 결과로서, (a)는 이물질이 존재하는 부위의 SEM 사진이고, (b)는 확대한 것이다. (c)는 이물질의 OM 형광상의 사진이다. (d)는 이물질을 EDS 분석 결과를 나타낸 것으로, Na, S, K, Ca 등이 검출되고 있다. 이와 같은 분석결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- 스트레스 : 오염
- 고장형태 : 이격(Delamination)
- 고장기구 : 화학반응(세척수에 함유된 Na, S, K, Ca 등이 접착제와 반응하여 접착력이 저하시킴)
- 개선 : 접착면 연마 후 세척공정 개선시킴

4.5 알루미늄 전해콘덴서

Fig. 8 (a) 및 (b)는 각각 양품의 탭(+tab) 부위와 콘덴서의 내부 모양을 나타내는 사진이고, (c)와 (d)는 고장 부품의 모양을 나타내는 사진이고, (e)는 (d)의 오염층을 확대한 사진이다. 고장 난 부품 표면에는 부식 및 석출된 염이 형성되어 있음을 알 수 있다. (d)는 EDS 분석 결과로서, C, O, Al, P, Cl이 다량 검출되고 있다. 고장 부위의 분석결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

- 스트레스 : 오염
- 고장형태 : 개방(open)

5. 고장분석의 원칙

고장분석은 정교한 논리적 사고에 의해서만 가능한 난해한 기술 중의 하나이다. 대체로 고장이 발생한 부



Fig 8 양품 콘덴서의 Tab부위(a), 콘덴서 내부 모습(b) 과 고장 난 콘덴서((c),(d)의 양상 비교 및 부식 생성물의 형상(e), EDS 분석결과(f)

품이나 제품을 대상으로 그 원인을 규명해야 하기 때문에 연역적인 접근 방법으로 분석을 하게 된다. 즉, 고장형태에서 시작하여 스트레스와 기구를 유추하는 과정을 거쳐 고장을 재현하여 실제 분석결과가 정확한지 검증해야하는데 매우 난해한 실험을 필요로 한다.

그럼에도 불구하고 신뢰성분야에서 매우 유용한 기법 중의 하나인 고장분석은 앞으로 전문가도 성되어야 하고 전문기관도 육성되어야만 우리나라의 신뢰성기술이 발전할 수 있을 것이다.

고장분석을 하기 위해서는 몇 가지 중요한 지켜야 할 원칙들이 있다. 첫째 고장을 명확히 정의해야만 한다. 고장이 명확히 정의되지 못하면 고장인지 아닌지 알 수 없기 때문에 아무리 분석을 해도 결과를 얻을 수 없게 된다. 둘째 고장기구는 대부분 복합적이라는 사실이다. 어느 한가지 스트레스나 현상에 의해서 고장이 발생하지는 않는다. 셋째 관계자들을 대상으로 관련 자료를 수집할 때 항상 편견에 주의해야만 한다. 잘못된 정보는 그릇된 결과를 유도하기 때문이다. 넷째 분석자 자신이 편견에 사로잡히지 말아야 한다. 편견을 가지고 접근하면 미궁을 헤매게 되고 결론에 도달 할 수 없게 된다. 다섯째 논리적이고 합리적으로 사고하되 다양한 가능성을 염두에 두고 분석해야만 한다. 여섯째 결과는 반드시 검증하는 절차를 거쳐야만 한다. 요즘에는 국내외 자료가 많아서 비교적 쉽게 분석결과를 확인 할 수 있지만 경험일 없는 경우에는 분석한 결과가 정확한지 알 수 없는 경우가 있다.

참 고 문 헌

1. Soon-Bok Lee, Asaf Katz, and Craig Hilman. "Getting the Quality and Reliability Terminology straight, IEEE Trans. Compl. Pack. and Manuf. Technol.k 21-3, 1998
2. 김광섭 등 20인 공저, "신뢰성 전문가 과정 교재", 1998



- 송병석
- 1961년생
- 연세대학교 준결정 재료 연구단
- 금속공학전공
- e-mail: fleury@yonsei.ac.kr