



# 임피던스 분석을 이용한 전자회로의 비파괴적 고장 진단 기술

권 대 일\*

(울산과학기술대학교 인간 및 시스템공학과)

## 1. 머리말

이 글에서는 전자회로의 물리적 결함을 비파괴적으로 진단할 수 있는 임피던스 분석 기술에 대해 소개하고 진단 원리에 대해 알아본다. 그리고 통계적 신호 분석 방법의 하나인 SPRT(sequential probability ratio test)에 대해 소개하고 임피던스 분석 기술과의 융합을 통해 전자회로 고장의 조기진단 사례를 제시하고자 한다.

전자회로는 우리 주위에 제품, 모듈, 시스템 등의 형태로 매우 흔하게 찾아볼 수 있다. 이전에는 기계시스템이라 생각되었던 선박, 자동차, 비행

기들도 기술의 진화에 따라 각종 전자장비가 핵심역할을 담당하게 되면서 오늘날 전자시스템에 더욱 가깝게 여겨진다. 시스템 운용에 있어 전자회로는 열, 진동, 습도 등의 부하 조건에 노출되기 쉬워 솔더 조인트와 같이 전자회로내 약한 부분의 크고 작은 손상 및 고장으로 이어지기도 한다. 전자회로의 결함이나 예상치 못한 고장은 전체 시스템의 고장 및 장애를 야기할 수 있으며 경우에 따라 경제적 손실을 초래하기도 한다. 일례로 2000년도 초반에 영국에 지어진 밀레니엄 다리(millennium bridge, 그림 1)는 다리 운전 제어부 전자회로가 타버려 한동안 다리 이용이 중지되



그림 1 영국의 밀레니엄 다리(출처: Wikipedia photo gallery, Gateshead Millennium Bridge)

\* E-mail : dkwon@unist.ac.kr

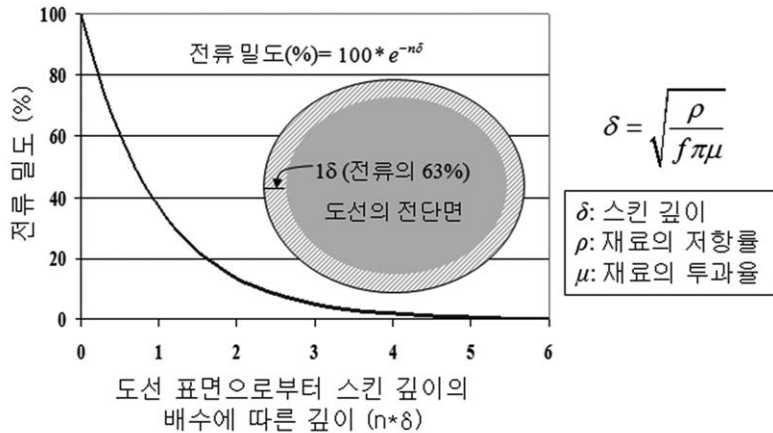


그림 2 스킨이펙트와 스킨 깊이의 정의

기도 하였다. 밀레니엄 다리는 2200만 파운드(약 360억원)를 들여 다리 아래로 배를 통과시키기 위해 다리 전체가 기울어지는 구조를 가진 다리였으나, 약 200파운드(약 32만원)하는 전자회로의 결함으로 완공 이후 한동안 이용을 할 수 없었다. 많은 시스템에 있어 전자회로의 고장 진단 및 예지는 시스템의 안정적 운용과 높은 가용도 확보를 위해 필요한 기술이다.

## 2. 임피던스 분석 기술과 통계적 신호 분석 기술의 융합을 이용한 고장진단

전자회로의 단락 여부 파악을 위해 일반적으로 직렬저항 측정을 이용한다. 직렬저항은 회로의 접속, 단락 여부를 쉽고 효과적으로 파악할 수 있다는 장점이 있으나, 접속에서 단락에 이르는 과정 측정이 근본적으로 불가능하여 고장 진단을 위해 사용하기에는 한계가 있다. 반면, 임피던스의 경우 스킨이펙트 현상으로 도체의 표면에서 일어나는 물리적 변화에 민감하여 균열과 같은 손상의 초기 탐지 및 정량화가 가능하다. 스킨이펙트(skin effect)는 고주파 신호가 흐를 때 도체의 전단면을 이용하지 않고 표면만을 따라 흐르는 현상을 지칭한다. 또한, 솔더 조인트, 커넥터, 전송선로와 같은 전자회로의 구성 요소들은 균열이나 부식으로 인한 손상이 진행

될 때 표면에서 시작하여 내부로 진행되는 특성을 보인다. 따라서 고주파 임피던스는 회로 표면에서 일어나는 물리적 손상 초기 단계의 효과적인 탐지가 가능하여 고장 진단에 이용하기 적합한 측정 방법이다.

스킨이펙트로 인해 고주파 신호의 전류 밀도는 도체의 표면에서부터 중심까지 지수함수의 형태로 감소한다. 스킨 깊이(skin depth)는 도체 전단면에 있어 전체 전류의 약 63%가 존재하는 도체 표면으로부터의 거리로 정의되며, 도체의 저항률(resistivity)의 제곱근에 비례하고 주파수의 제곱근과 도체의 투과율(permeability)의 제곱근에 반비례한다. 스킨 깊이의 약 5배가 되는 깊이 안에 전체 전류의 99% 이상이 존재하기 때문에, 고주파 신호의 적절한 주파수 선택을 통해 표면에서 발생하는 손상 탐지의 민감도를 선택할 수 있다. 전자회로내 집적회로 등 전자부품 실장에 사용되는 솔더볼의 경우 보통 수백 마이크로미터의 직경을 가진다. 솔더 재료와 그에 따른 저항률, 투과율의 물성치를 고려할 때, 수백 MHz 이상의 고주파 신호 이용시 솔더볼 직경의 약 1/10에 해당하는 표면에 대부분의 전류가 집중되어 솔더볼 표면 손상을 탐지하는데 효과적이다.

시간영역 반사측(TDR, time domain reflectometry)은 고주파 신호를 이용하여 전자회로의 이상을 비파괴적으로 진단할 수 있는 기술이다. 효율적

인 에너지 전달을 위해 고주파 신호의 전송선로는 특성 임피던스( $Z_0$ , characteristic impedance)에 맞추어져 설계되어 있으나, 균열, 부식 등으로 인해 전송선로가 손상을 받게 되면 선로의 임피던스 또한 변하게 된다. 고주파 신호가 전송선로를 따라 흐를 때 선로의 임피던스 변화를 만나게 되면 변화 크기에 따라 신호의 일부가 반사되는 현상이 발생한다. 인가한 신호의 전압대비 반사되어 되돌아온 신호의 전압을 측정하여 반사계수( $\Gamma$ , reflection coefficient)이며 전송선로의 특성 임피던스와 측정 임피던스( $Z_L$ )의 함수로 표현된다. 접속(short)으로 인해 임피던스 값이 0에 가까워지는 경우, 반사계수는 -1에 수렴하며 단락(open)으로 인해 임피던스 값이 무한대로 증가하는 경우, 반사계수는 1에 수렴한다. 신호가 인가되고 반사되기까지의 시간을 측정하여 전송선로내 임피던스 변화가 일어난 지점의 파악 또한 가능하다. 따라서, TDR 측정을 통해 전송선로의 위치에 따른 임피던스의 변화를 측정하여 전자회로내 손상 정도를 파악할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{V_{reflected}}{V_{incident}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

SPRT는 통계적 가설검정에 기반한 의사결정 방법으로 시간영역에서 순차적으로 측정된 건전성 데이터가 현재 정상상태에 속하는지, 혹은 고장상태에 속하는지를 판단하는데 도움을 준다. 현재 데이터가 정상상태에 속한다는 귀무가설과 현재 데이터가 고장상태에 속한다는 대립가설을 세운 후, SPRT를 이용하여 시간영역에서 순차적으로 측정된 건전성 데이터가 어느 시점부터 고장상태에 속하게 되는지 확률적으로 파악을 할 수 있다. 건전성 데이터로 TDR 반사계수를 이용하게 되면 고장상태는 정상상태 대비 반사계수의 증가로 나타나 대립가설은 귀무가설 대비 TDR 반사계수(건전성 데이터)가  $M$  (시스템 불안도)만큼 증가한 분포함수로 볼 수 있다. 건전성 데이터의 지속적인 모니터링을 통해 SPRT지표를 계산하여 현재 상태를 판단할 수 있으며 지표

값이 오경보 확률(false-positive probability)과 미경보 확률(false-negative probability)의 함수로 표현되는 특정 임계치를 넘게 되면 고장상태에 속한다고 판단할 수 있게 된다.

### 3. 전자회로 고장의 조기진단

임피던스 분석 기술과 SPRT의 융합을 이용한 전자회로 고장의 조기진단 여부를 확인하기 위해 피로 파괴실험을 설계하였다. 테스트 보드위 전송선로에 솔더를 이용하여 전자부품을 실장하고 이 부품에 열-기계적 하중을 가하는 방법으로 솔더 조인트의 점진적인 피로 파괴를 유발하였다. 이와 동시에 시험 시작부터 회로의 단락에 이르기까지 네트워크 분석기와 디지털 멀티미터를 이용하여 솔더 조인트의 TDR 반사계수와 직렬저항을 실시간으로 각각 수집하였다. 그림 3은 실험동안 수집한 TDR 반사계수(군청색, 왼쪽 y축)와 직렬저항(분홍색, 오른쪽 y축)의 변화를 비교하여 보여준다. 총 503분에 걸쳐 진행된 실험에서 TDR 반사계수는 단락이 일어나기 전부터 비선형적인 증가형태를 통한 점진적인 변화를 보였다. SPRT를 적용하여 확인한 결과 414분(총 수명대비 약 82% 지점)부터 고장상태에 속하는 확률이 우선함을 보여 고장의 조기진단 가능성을 확인하였다. 반면, 직렬저항은 실험동안 초기 값을 유지하며 특징적인 변화를 보이지 않다가 단락이 일어난 503분에 무한대로 증가하였다. SPRT를 적용한 결과 또한 직렬저항을 이용한 고장의 조기진단이 불가능함을 알 수 있었다. 다음 실험에서는 TDR 반사계수의 증가가 실제 물리적 손상에 의한 것인지를 확인하기 위해, 다른 모든 실험조건을 유지한 채 SPRT가 TDR 반사계수의 변화를 감지한 시점에 실험을 중단하고 시험 시편에 대한 단면 분석을 실시하였다. 그 결과, 솔더 조인트의 표면에서 시작한 후, 중심방향으로 진행 중인 부분 균열을 확인하였고(그림 4), 이를 통해, 솔더 조인트내 부분 균열이 TDR 반사계수를 점진적으로 증가시켰음을 확인하였고,

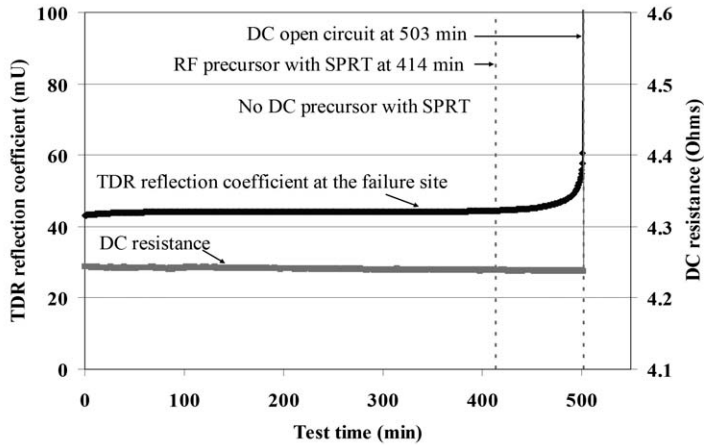


그림 3 TDR 반사계수와 직렬저항의 비교

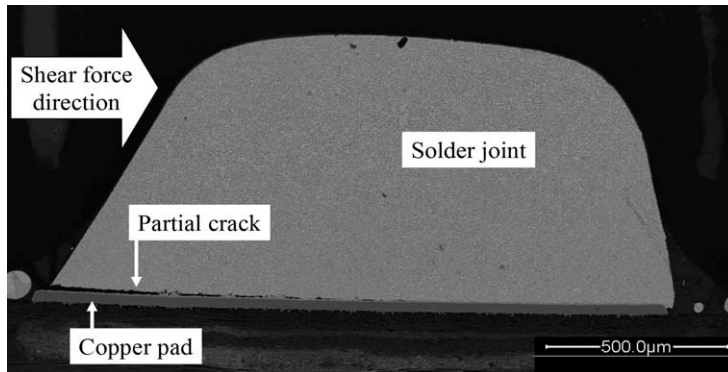


그림 4 고장 조기진단을 통해 얻은 균열 진행 중의 솔더조인트 단면

임피던스 분석 기술과 SPRT의 융합을 통해 고장의 조기 진단이 가능함을 확인하였다.

#### 4. 제약 조건, 극복 방안 및 향후 전망

임피던스 분석 기술과 SPRT를 융합한 고장 진단 방법은 기존 직렬저항 측정법보다 진단 능력이 탁월한 반면 몇 가지 제약이 수반된다. 고주파 신호는 특성 임피던스가 잘 정의된 회로에서 최적의 성능을 보여준다. 그러나, 내재적 결함 등으로 인해 전송선로의 품질이 초기 단계부터 좋지 않을 경우, 품질로 인한 임피던스 변화와 균열, 부식 등의 손상에서 오는 임피던스 변화를 구별하는 것이 사실상 불가능하다. 또한, 손상지점인 신호 인가지점에서 멀어질수록 거리에 따른 신

호의 감쇠로 인해 탐지 민감도가 떨어져 고장 진단능력의 저하로 이어지기도 한다. 마지막으로 네트워크 분석기, TDR 모듈 등 임피던스 분석을 위한 측정 장비가 상대적으로 고가인 점이 또 다른 제약 조건이 된다. 이러한 제약 조건들을 극복하기 위해 데이터 필터링 및 분류 알고리즘 개발을 통한 건전성 데이터 확보, 전자회로내 효과적인 탐침 방법의 제시, 어플리케이션별 TDR 모듈 특화 등의 방향으로 후속 연구가 진행 중에 있다. 나아가 측정 장비를 통해 고주파 신호를 인가하는 것이 아닌 전자제품 및 시스템 내부에 데이터 전송을 위해 흐르는 디지털 신호를 이용하여 부가적인 별도의 장비 없이 실시간 고장 진단을 시도하는 연구가 현재 진행 중에 있다. [KSNVE](#)