

적외선 열외상기를 이용한 능동열시험법

임용배 (한국전기안전공사 전기안전연구원)

1 머리말

전기설비의 상태를 추정하기 위해 측정된 온도분포는 설비상태의 절대적인 값이고, 변화의 시간율이며, 기준 값에 대한 차이이다. 따라서 열화상 장비는 조작은 쉽지만, 결과의 적당한 해석에 많은 경험을 요구하기 때문에, 조작자는 피시험체에 대한 지식을 가지고 있어야 하고 열화상 처리에 대해 적절히 훈련되어 있어야 한다.

외부적인 열적 자극을 적용하지 않는 수동적(passive)인 접근법은 평가되는 구조물 내에 존재하는 온도의 차와 구조물과 주위와의 온도차만을 보여주므로, 열 분포에 기초를 둔 단자이완이나, 과부하 등의 상태를 추정하거나 감시하는 데 주로 활용된다.

그러나 전기설비의 치명적인 고장이나 결함은 절연체에서 대부분 발생지만 도체처럼 전류가 흐르지 않기 때문에 유전손에 의해서 발생하는 열 이외에는 거의 발생되지 않고, 따라서 수동열시험법으로는 검출이 불가능하다. 반면 외부적 가열이나 냉각 후 시간이 경과함에 따라 변화되는 온도분포변화를 측정하는 능동열시험법에서의 열과는 과도적 또는 영속적 자극에 의해 발생하는 측정 가능한 온도변화를 발생시킨다. 결과적으로 표면 하에 위치한 감추어진 결함에 대한 정보를 온도변화 분석을 통해 일부 예측할 수 있을 것

이다.

능동열시험법에 적용될 수 있는 열 인가 방법은 다양하다. 본 원고에서는 이런 방법들을 적용하여, 결함이 존재하지만 수동적 측정법으로는 관측되지 않는 온도의 변화를 분석하여 전기설비의 절연물에 존재하는 결함을 검출하는 방법에 대하여 논하여 보겠다.

2. 능동열시험법

2.1 개요

적외선 열화상의 장점이자 특징은 정상적인 운전 시 대상체의 상태에 대한 정보를 실시간으로 안전 작업 거리에서 검출할 수 있는 능력이다. 그중에서도 수동열시험법은 고장이나 최적 동작을 하지 않는 설비의 고온점이나 저온점을 검출하기 위하여 피시험 구조물의 복사에너지를 스캐닝하는 방법으로, 결함을 빠르게 발견하여 조기에 보수할 수 있게 하여 최적의 운전환경 확보를 가능하게 한다.

그러나 이런 외부적인 가열이나 냉각 없는 수동적인 접근법에서는 평가되는 구조물 내에 존재하는 온도의 차 또는 구조물과 주위와의 온도차만 알 수 있다. 따라서 수동열화상법은 주로 온도 분포에 기초를 둔 단자이완이나 과부하 등의 상태를 추정하거나 감시하는 데 주로 적용된다.

적외선 열화상비파괴시험은 열화상과 조절된 열 주입 또는 냉각을 조합하기 때문에 능동적 적외선 열화상으로 표현할 수 있다. 열 주입이라고 표현하였지만, 실제로 열은 복사와 함께 짧은 시간 동안만 표면에 흐르게 된다. 그 열은 순간펄스(flash pulse ; impulse) 또는 광폭펄스(wide pulse), 연속적인 주기적 펄스로 주입될 수 있고, 그 복사열은 대상체의 열전도율 및 열용량 등에 따라 그림 1과 같이 크세는 플래시램프(xenon flash lamp)나 레이저(laser), 백열등, 열풍기 등에 의해 인가될 수 있다. 만약 대상체 표면의 반사율이 낮다면 표면은 순간적으로 가열될 것이고 그 열은 물질을 통해 전파될 것이다.

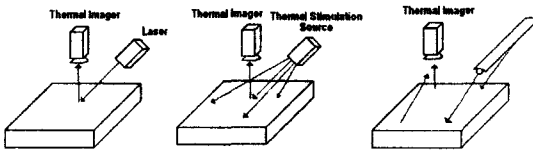


그림 1. 다양한 열원 인가

2.2 측정법

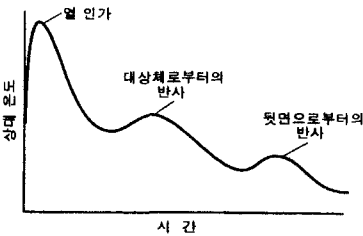


그림 2. 인가된 열의 전파에 의한 온도 변화

능동열시험 기법들 사이에는 일차적으로 시료에 에너지를 주입하는 방법에 따른 차이가 있다. 따라서 설비별 특성에 따라 열을 인가 또는 냉각시키게 된다. 즉 열이 과도하게 발생되는 설비는 냉각에 의한 표면 온도 저하 후 회복되는 온도 분포를 확인하고, 열이 발생되지 않거나 적게 발생되는 설비는 열 인가 후 회

복되는 표면 온도 분포를 확인하여 물체 내부에 감추어진 불연속면 등을 검출하는 진단 방법으로 활용된다. 열 인가 후 회복되는 온도는 설비의 기구적 특성 및 물성에 따라 그림 2와 그림 3과 같이 변화한다.

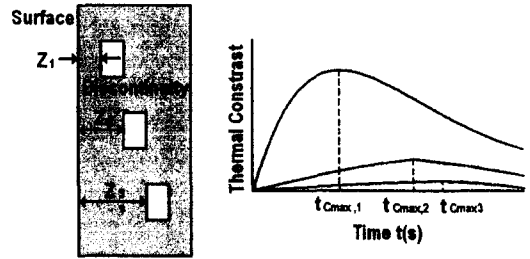


그림 3. 표면 하 불연속 부분 깊이의 함수로서 최대 대비 시간

열적 대비는 물질의 특성과 결함의 종류에 의존하며 열적 대비(thermal contrast)는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{T_{defect}(t) - T_{defect}(t=0)}{T_{sound}(t) - T_{sound}(t=0)} = \frac{\Delta T_{defect}}{\Delta T_{sound}} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 sound는 건전부를 의미하고, defect는 결함부를 의미한다. 그리고 ΔT 는 주위 온도 ($t=0$ 에서의 최초 온도)를 초과하는 표면 온도 상승을 나타낸 것이다. 온도 대비의 최대값은 가열하는 기법과 결함의 깊이에 의존한다. 결함의 깊이는 미지의 상수이기 때문에 최대 대비를 알아내기 위해서는 화상의 연속적인 저장이 요구된다. 그리고 감지할 수 있는 대비의 최소값이 명확하지는 않지만, 양호한 부분과 결함이 존재하는 부분 사이의 온도차는 열화상 시스템의 잡음 수준보다 식 (2)와 같이 상당히 커야 한다.

$$\Delta T_{defect} - \Delta T_{sound} \gg NEDT \quad (2)$$

다시 말해서 대비는 양호한 신호 대 잡음비를 제공

하여야 하고, 열확산 때문에 결함은 깊이에 대하여 상대적으로 커야 한다.

측정방법으로는 열원과 적외선열화상기의 위치에 따라 반사법과 전도법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 그림 4(a)의 반사법은 가열된 표면에 가깝게 불연속 부분이 위치되어 있을 때 이용되고, 반대로 그림 4(b)의 전도법은 열전선의 분산 현상 때문에 뒤쪽 표면 가까이 위치한 불연속 부분의 검출에 적합하다. 그러나 뒤쪽 표면에 접근할 수 없다면 전도법에 의한 검사는 가능하지 않다. 결국 전도법에 의한 검사에서는 불연속 부분의 깊이가 얼마이든 간에 같은 이동 거리가 되기 때문에 불연속 부분의 깊이는 추정될 수 없다.

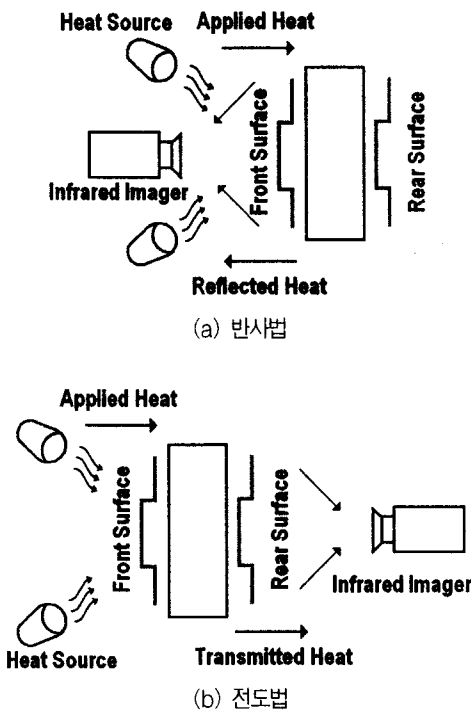


그림 4. 관찰 기법

2.2.1 펄스법

펄스법(flash pulse; impulse or Dirac pulse)

은 시료의 순간적인 가열과 그 후의 온도 감쇠를 기록하는 것으로 비파괴시험에서 사용되는 가장 일반적인 열 자극 방법 중 하나로 그 이유는 검사의 신속성에 있다.

가열은 금속과 같은 고열전도체의 약 3[ms]로부터 플라스틱과 그래파이트 에폭시 적층과 같은 저열전도체의 4[sec] 정도의 짧은 열펄스에 의존한다. 이런 순간적인 열적 자극은 가열원에 직접적으로 열을 인가하지만 순간적인 가열은 설비에 손상을 주지 않는다.

정성적으로(qualitatively) 그 현상은 다음과 같다. 물질의 온도 변화는 표면 하에서 확산에 의해 열전선(thermal front)이 전파되기 때문에 최초의 열펄스 인가 후 빠르게 변화한다. 불연속 부분(discontinuity)의 존재는 열확산을 감소시키고 열전선이 도달하면 주위 건전한 영역에 대하여 다른 온도 영역으로 표시되므로 표면 온도 관찰 시 불연속 부분이 나타난다. 결과적으로 깊은 불연속 부분은 늦게 관찰될 것이고 대비가 감소될 것이다. 사실 그 관찰되는 시간 t 는 식 (3)과 같이 깊이 L 의 제곱의 함수이고 대비 C 는 식 (4)와 같이 깊이의 3승의 비율로 저하된다.

$$t \cong \frac{L^2}{\alpha} \quad (3)$$

$$C \cong \frac{1}{L^3} \quad (4)$$

여기서 α 는 물질의 열확산율로 물성에 의존하며 다음 식과 같다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (5)$$

여기서 k 는 열전도율, c 는 비열, ρ 는 물질의 비중

이다.

적외선 열화상법에서 열전선의 확산 효과 때문에 관찰 가능한 불연속 부분은 일반적으로 깊이는 얇아지고 대비도 약해진다. 따라서 가장 작은 검출 가능한 불연속 부분의 반경은 이것의 표면 하 깊이보다 적어도 두 배 이상 커야 한다. 그러나 이 법칙은 균등질 등방성(homogeneous isotropic) 물질에 대해 적용되는 것이므로 비등방성 물질의 경우에는 반경 대 깊이 비율이 좀더 제한적인 값을 갖게 되어 결합의 크기가 더욱 커야 검출 될 수 있다.

순간 펄스의 열 인가 기법은 6(mm)보다 두께가 얇은 알루미늄과 강철과 같은 고열전도율 물질을 시험하는데 유용하다. 넓은 면적에 조사하는 임펄스에 대하여 무시할 수 있는 반경류(radial flow) 온도의 시간-깊이 의존은 다음 식과 같다.

$$T(L, t) - T_a = \frac{Q}{\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{-\frac{L^2}{4\alpha t}} \quad (6)$$

여기서 L은 표면으로부터 결합까지의 깊이이고 Q는 저장된 열의 양이며 Ta는 주위 온도이다. 단 그 물체는 열 주입 전에 T(0,0)=Ta로 균일 온도라고 가정한다. 그리고 여기에서 지수(exponent)부분은 열이 빠르게 감소되는 것을 나타내며, 깊이 L에서 침투 온도까지 이르는 시간은 다음 식과 같다.

$$t_{peak} = \frac{L^2}{2\alpha} \quad (7)$$

반사법을 이용할 경우 깊이 L에 결합이 있다면, 열 펄스는 표면까지 재반사되기까지 2L만큼 이동해야 한다. 그 표면 온도는 다음 식과 같다.

$$T(0, t) - T_a = \frac{QR_t}{\sqrt{4\pi\alpha t}} e^{-\frac{(2L)^2}{4\alpha t}} \quad (8)$$

여기서 Rt는 열반사계수(thermal reflection coefficient)로 다음과 같다.

$$R_t = \frac{e_M - e_F}{e_M + e_F} \quad (9)$$

여기서 아래 첨자 M과 F는 각각 물성과 결합을 나타내며, 두 열발산율은 다음과 같다.

$$e_M = \sqrt{k_M \rho_M c_M}, \quad e_F = \sqrt{k_F \rho_F c_F} \quad (10)$$

그리고 그 발산율은 열저항과 반비례관계에 있어 고열전도율 물질에서의 열은 빠르게 이동한다. 결합의 발산율이 증가함에 따라 열 반사는 감소하고 결과적으로 표면 온도가 감소한다. 따라서 결합의 발산율이 증가함에 따라 결합을 측정하는 것이 더욱 어렵게 된다. 만약 결합이 L깊이에 있다면, 결합에 도달하고 표면에 재반사되어 오는 시간은 다음과 같다.

$$t_{defect} = \frac{(2L)^2}{2\alpha} = \frac{2L^2}{\alpha} \quad (11)$$

좀더 깊은 곳에 위치한 결합은 더 늦게 관찰되며 결합이 좀더 깊이 있을 경우에는 그 위치의 표면온도가 감소할 것이다. 따라서 아주 깊이 있는 결합을 검출하기 위해서는 좀더 많은 에너지가 필요하게 된다. 이 때문에 순간 펄스 방법은 상대적으로 얇은 금속에 대하여 제한적으로 사용되어야 한다.

2.2.2 단속열화상법

단속열화상법은 시료 내부에서 발생된 열파(thermal wave)에 의한 표면 온도 변화를 검출하는 방법으로 단속(lock-in)은 출력 신호와 기준 입력 신호 사이의 정확한 시간 의존의 감시를 의미한다. 이 방법은 국부적인 레이저 가열이나 또는 위상화상과

크기화상 모두를 얻기 위해 조명으로 전체 범위를 가 열하여 컴퓨터에 의해 수행된다. 위상화상들은 전파 시간에 관계되고 이 화상들이 상대적으로 국부적 광학 표면 특성에 둔감하기 때문에 비파괴 시험에 적합하다. 그리고 화상의 깊이 범위는 변조 주파수에 역비례하기 때문에 높은 변조 주파수는 표면 근처 범위의 분석을 제한한다.

위상화상은 조도나 표면 흡수, 열 방출의 국부적 변화에 독립적인 반면, 진폭화상은 모든 이런 비관련 정보(nonrelevant information)를 포함하기 때문에 위상화상이 좀더 유용하다. 그리고 위상화상의 또 다른 장점은 열파로 검출하기 위한 깊이 범위가 거의 열 확산 길이 (μ)의 약 2배가 된다는 것이다.

한 화상의 취득 시간은 화소의 수와 복조 주파수에 의존한다. 그리고 고분자 화합물과 세라믹 같은 낮은 확산도를 갖는 물질에 대하여 적용할 수 있는 깊이 범위에 대한 변조 주기는 약 60[s] 정도이다. 따라서 광열 복사 측정법을 이용해 얻은 래스터 화상은 물질의 약 1[mm] 깊이 내의 열 분포를 감시하는 데 적용이 가능하다.

열화상 집합으로부터 추출되는 정보는 진폭 화상이 조도와 광학적 표면흡수, 열복사계수, 열적 특성 등의 복합적 결과인 반면, 온도변조위상화상은 열적 특성만을 보여주며, 시험 시간은 화소의 생성 수와 변조 주기의 시간뿐만 아니라 변조 주기에 의해서도 결정된다. 이 방법은 고분자 화합물이나 세라믹 물질에서 수 [mm] 깊이에 존재하는 결함을 10[mHz] 범위의 변조 주파수로 검출할 수 있다.

연속적인 열 펄스 주입은 신호 대 잡음비를 증가시킬 수 있다. 만약 변조된 열원이 한 대상체의 표면에 인가된다면, 온도 변조는 그 물체로 전파하기 시작하여, 몇 주기 동안 지속되는 과도 시간 후 안정 상태에 이르는데, 이들 온도의 진폭은 깊이에 따라 빠르게 감소한다. 이 기술은 복합물질이나 매우 두꺼운 금속물질에 대한 시험 시에 유용하다. 만약 입력이 정현파라

면 깊이 L에서의 온도는 다음과 같다.

$$T(L, t) = T_a e^{-\sigma L} \cos(\sigma L - \omega t) \quad (12)$$

여기서 σ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (13)$$

또 진행파(traveling wave)의 속도는 다음 식과 같다.

$$v = \sqrt{2a\omega} \quad (14)$$

감폭부분(damping term) $e^{-\sigma L}$ 은 열확산길이를 제공하고 이들 두 계수는 매우 빠르게 그 파를 감소시킨다.

2.2.3 펄스위상열화상법

펄스위상열화상법(pulsed phase thermography)은 1996년에 도입되었다. 이 기법은 펄스열화상법과 단속열화상법 사이의 연계로 설명될 수 있다.

펄스열화상법에서는 펄스 에너지가 시료의 표면에 인가되면 이 가열 펄스는 시료에 다른 주파수의 열파를 발생시킨다. 이 측정은 과도 상태에서 이루어지고 표면의 온도 변동은 적외선 열화상기에 의해 기록한다.

단속열화상법에서는 시료에 정현파 형태의 열적 자극을 주며 표면의 온도 변동은 적외선 열화상시스템에 의해 측정되지만 안정상태에서 행해진다. 이 기법은 열이 조사된 물질의 특이 깊이(specific depth)에 대한 특정 주파수의 열파 응답에 의해 이루어지고 가열에 대한 제한이 적기 때문에 큰 영역이 한번에 검사될 수 있다. 이런 접근법은 여러 주파수로 시험되어야 하는 경우에 매우 효율적이다. 즉 열화상법을 이용한 시험은 여러 주파수로 동시에 분석할 수 있기 때문에 좀더 빠르고, 얻어진 측정으로부터 단속열화상법에

의해 얻어지는 주파수 분석과 유사한 결과를 도출할 수 있다. 이 주파수 분석은 푸리에 변환(fourier transform)에 의해 수행되며 데이터 취득 방법은 피기백방식 신호처리(piggyback signal processing)로 펄스열화상법과 동일하다.

사실상 열 펄스 인가 직후 시료 표면의 연속적인 적외선 열화상들이 기록되며 이에 대한 취득률은 표본화 법칙과 위신호(偽信號 : aliasing) 때문에 매우 중요하다. 이런 위신호 왜곡을 저감시키기 위해서는 적어도 두 배의 최대 주파수로 취득할 필요가 있다.

불연속 부분의 최대 가시도(visibility)는 낮은 주파수에서 얻어지기 때문에 열 펄스의 파장을 증가시켜 향상시킬 수 있다. 이 시험에서 진폭을 초과하는 위상의 주요 장점은 열 펄스 진폭에 관계된 모든 정보가 푸리에 스펙트럼 내에 포함되기 때문에 위상은 비등방성체(anisotropy)의 가열에 대한 영향이 적다는 것이다. 그리고 비등방성 조명 때문에 횡단 열전달이 위상에 영향을 줄 수는 있으나 일반적으로 심각하지는 않다는 것이다. 이것은 가열 분배의 비등방성이 펄스열화상법의 전통적인 분석에 대한 공통된 문제이기 때문에 가장 중요한 장점이다.

열화상에서 불연속 부분은 가장자리가 더욱 선명히 나타나는데 이것은 불연속 부분의 윤곽이 주파수에 관계되기 때문이다. 여러 주파수와 다양한 깊이에 대한 위상의 전개는 위상과 깊이 관계가 일대일 대응이 아니기 때문에 위상으로부터 깊이를 쉽게 추적하는 것이 가능하지 않고 불연속 부분에 대한 깊이의 확인은 불연속 부분에 도달하는 열파의 이동과 표면의 이면에 의존한다. 그러나 푸리에 변환은 이 시간 정보를 갖고 있지 않다. 이 이유 때문에 깊이 추출은 푸리에 변환 기반 펄스위상열화상법 분야에서는 신경망이나 통계적 기법 등이 이들 문제를 우회하기 위해 사용되고 있다.

펄스위상열화상법에서 깊이 추정을 위한 주요 문제는 푸리에 변환과 함께 발생하는 시간 정보의 손실이

다. 따라서 깊이 추정을 위해 시간 정보를 보존할 수 있는 웨이브렛 변환(wavelet transform)을 사용하며 온도 함수에 대한 변환은 다음 식과 같이 정의된다.

$$w(S, TrF) = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-\infty}^{\infty} [T(h) \times h^* \left(\frac{t - TrF}{S} \right) dt] \quad (15)$$

여기서 S는 주파수와 관련된 비례상수이고, TrF는 불연속 부분의 깊이를 추정하기 위해 필요한 시간 정보와 관련된 변환계수이며, h(t)는 모웨이브렛(mother wavelet)이다. 불연속 부분의 깊이 위치 추정을 위해 선정된 모웨이브렛은 다음과 같이 정의된 모렛 웨이브렛(morlet wavelet)이다.

$$h(t) = \exp(-j\omega_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (16)$$

펄스위상열화상법에서 이런 웨이브렛 처리는 불연속 부분의 깊이 위치를 추정하기 위한 시간 정보뿐만 아니라 푸리에 변환의 장점을 유지시키므로 이런 분석에 매우 유용하다.

2.2.4 계단가열

계단가열은 긴 펄스에 의한 열 자극 방법으로 피막의 두께 추정 등에 적용된다. 대부분의 적외선 열화상 비파괴 시험법은 열을 인가하고 냉각되는 동안 대상체의 표면 온도를 측정하지만, 이 기법은 열 인가 동안 표면온도 상승을 측정하는 시분할적외선시험법으로, 표면 하 특성을 확인할 수 있고 다른 열시험법과 같은 속도로 열 특성을 측정할 수 있다. 하지만 적절한 가열을 계속 유지시켜야 하는 단점이 있다. 따라서 순간적인 고온의 가열이 요구되지 않는 곳에서는 마이크로파와 같은 열원을 이용할 수도 있다. 시분할적외선시험법의 가장 큰 장점 중 하나는 시료가 열적으로 두꺼울 때, 초기에 온도 응답을 계산할 수 있다는

점이다. 이것은 비균질체에 대한 가열원 분포 및 배경 물질 사이의 차를 보정할 수 있게 한다.

열비파괴시험법이 일반적으로 불연속 부분 검출에 중점을 두고 있는 반면, 시분할적외선시험법은 물체의 열확산율과 두께와 같은 물성을 측정하는데 활용되어 왔다. 시분할계단가열시험법으로부터 열적 특성을 추출하기 위해 가열할 때 표면 온도의 일시적 의존은 분석적 모델에 비교되며 관련된 열적특성은 열전도도 k 또는 열확산율 α 이다.

2.2.5 진동열화상법

진동열화상법은 구조체 외부에서 기계적 진동을 인가하여 이에 의한 영향을 이용한 능동열비파괴시험법으로 열은 균열과 바리(剝離) 같은 결함 부위에서 미세한 기계적 마찰에 의해 발생된다. 진동열화상법은 구조체가 강제적인 기계적 진동 하에 있을 때 구조체의 표면 온도를 분석하는 것이다.

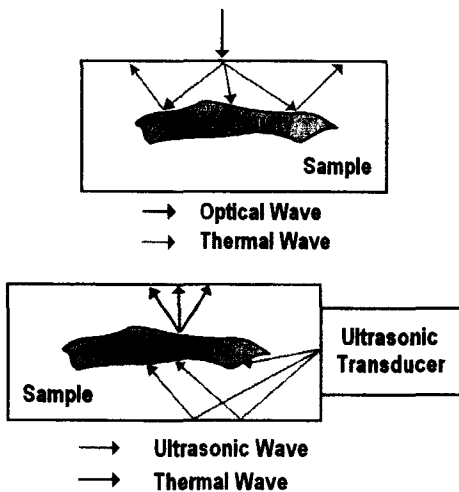


그림 5. 광학 및 초음파에 의한 결함부 열 발생

기계적 진동은 초음파 발생장치를 이용하며 이를 시료 외벽에 부착시켜 시료 내부로 탄성파를 전달시킴으로써 시료 내부의 계면에서 발생하는 열파가 시

료 외부로 전달되는 과정을 감시함에 의해 결함의 존재를 확인한다(그림 5).

세라믹 부분에서의 균열은 잘못된 소결(sintering)이나 표면 처리, 과도한 국부적 하중에 의한 원인일 수 있다. 균열은 진행이 전체 계통의 고장으로 확대될 수 있기 때문에 조기 검출이 중요하다. 금속에서도 마찬가지이다. 균열은 진동 부하에서 각기 다른 부분에 대하여 마찰이 생길 수 있는 두 표면이 존재하기 때문에 주변과 다르다. 그 열 발생은 경계에 대한 수직 응력과 상대 속도(relative velocity)의 곱에 의존한다. 균열 방향의 검출은 광학적으로 발생된 단방향으로 주입된 열파를 이용한 단속열화상법으로 이루어진다.

균열이 개방되어 있지 않다면 열파 방출이 발생한다. 이것은 초음파 단속열화상법 화상에서 관찰된 특징의 해석에 중요한 역할을 한다. 암시야 현미경과 유사하게 불연속 부분이 선택적으로 화상화될지라도, 장력이 있는 금속시료에서의 가장 강력한 신호는 균열의 끝 부분에서 발견되지만 세라믹에서는 전체 균열에서 나타난다. 이런 물질은 연성(ductile)이 없어 균열이 개방되지 않기 때문이다. 개방된 균열은 광학적으로 발생된 열파에서도 발견될 수 있기 때문에 초음파 단속열화상법과 광학적으로 발생된 열파의 조합은 개방된 영역과 폐쇄된 영역 사이의 구분을 가능하게 한다. 하지만 균열의 끝 부분이 폐쇄된 특징 균열은 초음파 단속열화상법에 의해서도 발견될 수 있다.

기계적인 불연속 부분은 그들의 기계적 결합에 의해 주위와 다르다. 그들은 응력(stress) 집중과 균열 및 떨어진 적층부에서의 마찰에 의해 발생할 수 있는 주기적 부하가 원인일 수 있다. 따라서 불연속 부분은 기계적 제동(mechanical damping)이 향상되어 이것이 좀더 효율적으로 열로 변화되기 때문에 초음파가 감쇠된다. 만약 주입된 초음파의 진폭(amplitude)이 낮은 주파수로 변조되었다면 불연속 부분은 암시야 광학 화상(dark field optical imaging)에

서 나타나는 것과 유사하게 국부적 열과원으로 작용한다. 이 기법이 초음파 시험과 유사하지만, 열 기법에서는 초음파 변환기(ultrasonic transducer)를 음파가 불연속 부분에서 열을 발생시킬 때까지 전체 체적에 인가될 수 있는 한 점에 부착한다. 따라서 이것은 초음파 주파수의 탄성파로 인한 주기적 손실각(loss angle) 가열에 의한 저주파의 열과 발생을 이용하는 것이다. 이력의 면적은 체적 당 열에너지이기 때문에 시간당 면적은 체적 당 가열력으로, 고주파는 1초 동안에도 많은 이력 주기가 수행되기 때문에 가열에 매우 효율적이다.

이 기법, 즉 초음파 단속열화상법(ultrasonic lockin thermography)은 금속과 세라믹에서의 균열, 적층물에서의 충격 손상과 떨어짐, 금속의 부식, 미세 구조의 뭉개짐 등을 확인하는데 적합하다. 따라서 이 기법은 신속한 불연속 검출을 위해 비파괴 열시험의 분야에서 관심을 가져 볼만하다.

광학적으로 발생된 열파와 초음파 단속열화상법의 두 기법에 의해 제공되는 화상들은 본질적으로 다른 기구에 기초한다. 광학적 단속열화상기법은 변조된 열 흐름과 열교란(perturbation)의 화상을 제공하는 반면, 초음파 단속열화상법은 국부 손실각(local loss angle) 또는 이력현상에 의한 열화상을 제공한다. 그 화상은 이력현상이 발생하면 면적과 이것의 표면 하 깊이의 합성인 반면, 위상화상은 오직 깊이만을 나타낸다. 따라서 탄성 특성(elastic properties)의 실수부에 기초한 초음파 화상에 일부 관계가 있지만, 초음파 단속열화상법은 허수부를 사용한다. 탄성파의 속도는 저주파 열파의 속도보다 매우 빠르기 때문에 탄성파의 진폭 변조에 따라 열파가 동시에 시료 내 여러 곳에서 발생된다. 점검된 부분의 기계적 공진은 표면을 가로지르는 비균질 응답(heterogeneous response)의 결과이기 때문에 피해야 한다.

초음파 단속열화상법을 위해 사용되는 실험 설비는 펄스 또는 과도 음파 가열 열화상법을 위한 설비와 유

사하고 다른 점은 음파 변환기(acoustic transducer)가 시료에 부착되는 반면 단속열시험법 설비의 동기화 출력은 음파 진폭을 조정할 뿐 조도를 조절하지는 않는다는 것이다. 그러나 에너지는 두 경우 모두 비슷하다.

진동열화상법(vibrothermography)은 진동하는 부분의 평균 온도 분포를 열화상기를 이용하여 화상으로 관찰하는 기법으로 진동의 진폭이 변조되지 않기 때문에 열파의 방출을 포함하지 않고 그 결과는 초음파 단속열화상법과 다르다. 그리고 열 방출에 의한 응력 패턴 분석(stress pattern analysis by thermal emission : SPATE)은 변조된 온도 부분을 분석하기 위한 온도 분포를 발생시키기 위해 일정한 진폭을 갖는 저주파의 기계적 부하를 사용한다. 하지만 이 경우에 관계된 응력 분포는 가역적이고 응력에 대하여 선형인 열탄성 효과(thermoelastic effect)를 이용함에 의해 관찰된다.

3. 맺음말

인간의 편함을 추구하는 육구와 시각정보 선호 속성에 의해 향후 진단기술은 시각적·직관적 분석이 가능한 결과를 요구하는 방향으로 진행될 것이다. 이에 가장 적합한 것이 열화상 진단기술이라 생각한다. 그러나 기존의 열화상시스템을 이용한 전기설비 진단은 수동열시험법만을 적용하여 왔다. 결과적으로 결합이 온도변화와 연계되지 않을 경우에는 검출할 수 없었고, 따라서 현재 활용되고 있는 기술로는 비용효율적인 면에서 개선이 요구되고 있다.

본 원고에서는 다양한 능동열시험법을 이용하여 표면뿐만 아니라 표면하에 존재하는 온도변화가 동반되지 않는 결함을 검출할 수 있는 열인가법을 중심으로 검토하여 보았다. 이를 이용하면 수동열시험법으로는 확인할 수 없었던 결함들을 확인할 수 있을 것이다. 그러나 주위온도보다 상당히 높은 온도를 갖는 시

료에 열인가법을 이용할 경우 양호한 결과를 얻기 위해서는 많은 열이 공급되어야 한다. 이 때문에 시료의 열화를 가속시킬 수 있어 검출 능력을 높이는 데는 한계가 있다. 따라서 냉각을 통한 표면온도변화를 감지하는 냉각법의 활용이 능동열시험법 선정 시 병행 검토되어야 할 것이다.

향후 적외선 열화상시스템을 이용한 진단 시 능동 열화상법을 적용할 경우 많은 장점이 있다. 특히 현재의 전기설비 진단방법으로는 확인이 불가능한 열의 변화가 없는 구조적 결함까지도 검출할 수 있기 때문에 전기설비의 절연 고장에 대한 적극적 예방대책이 될 수 있을 것으로 기대된다.

◇ 저 자 소 개 ◇



임용배(林庸培)

1967년 11월 16일생. 1994년 원광대학교 전기공학과 졸업(학사). 1998년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(석사). 2003년 홍익대학교 전기정보제어공학과 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구2팀 연구대리.

관심분야 : 전기설비열화진단, bioelectromagnetic

E-mail : tree@kesco.or.kr