

## 능동열시험법을 이용한 몰드변압기 진단

임용배, 정승천

한국전기안전공사 전기안전연구원

### Diagnostic of Cast Resin Using Active Infrared Thermal Testing Method

Young-Bae Lim and Seung-Cheon Jeong  
KESCO Electrical Safety Research Institution

#### Abstract

A form of measured temperature distribution to estimate condition of a electrical apparatus is a absolute reference for condition of the apparatus, time rate of transition, and difference between reference and currently temperature. Because passive thermography which has not injection of external thermal stimulation shows difference of temperature being on surface of a structure and temperature difference between the structure and back ground, the result could apply only to estimation or monitor for condition of terminal relaxation and overload related with temperature rising. However, a thermal flow in active thermography is differently generated by structure and condition of surface and subsurface. This paper presents the nondestructive testing using the properties and includes the results by heat injection and cooling to the apparatus. The buried discontinuity of subsurface could be detected by these techniques.

**Key Words** : thermography, subsurface structure, infrared, thermal image, buried discontinuity

#### 1. 서론

모든 물체는 절대영도를 초과할 때 적외선을 복사한다[1]. 이 이론을 측정 장비에 응용한 것이 적외선 열화상기로 물체의 표면온도를 분석하여 설비상태를 진단하는데 주로 이용되고 있다.

전기설비의 상태를 추정하기 위해 측정되는 온도분포의 양상은 설비상태의 절대적인 값이고, 변화의 시간율이며, 기준 값에 대한 차이이다. 외부적인 열적 교란이 적용되지 않는 수동적인 접근법에서는 평가되는 구조물 내에 존재하는 온도의 차와 구조물과 주위와의 온도차만을 보여주므로, 열 분포에 기초를 둔 단자이완이나, 과부하 등의 상태를 추정하거나 감시하는 데 주로 적용된다. 그러나 전기설비의 결함은 몰드변압기 절연물이나 애자 등과 같이 열을 발생시키지 않는 결함이 존재할 수

도 있고 이는 수동열시험법으로는 검출이 불가능하다.

반면 외부적 가열이나 냉각 후 시간이 경과함에 따라 변화되는 온도분포변화를 측정하기 위한 능동열시험법에서의 열파는 과도적 또는 영속적 자극에 의해 발생하는 측정 가능한 온도변화를 발생시킨다. 결과적으로 표면 하에 위치된 감추어진 결함에 대한 정보를 온도변화 분석을 통해 일부 예측할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 몰드변압기에 이 기법을 적용하여 표면 하의 결함을 검출하여 보았다. 이 실험에 적용된 방법은 열인가법과 냉각법 두 가지이다. 열인가법은 몰드변압기 권선의 열용량이 크기 때문에 표면온도에 많은 변화를 줄 정도로 열을 인가할 경우 권선열화의 원인이 될 수 있으므로 활용에 적합하지 않은 것으로 결론되었다. 반면 압축공

기를 이용한 냉각법은 몰드변압기에 열화작용 없이 많은 온도변화를 줌으로써, 결함이 존재하지만 수동적 측정법으로는 관측되지 않는 온도의 변화를 검출하여 몰드변압기 권선의 절연물에 존재하는 결함을 발견할 수 있었다.

## 2. 모의실험

### 2.1 실험 개요

능동열시험법은 열파의 전파 속도와 관계된 것으로서 물질의 내부 구조 및 물질에 따라 열원으로부터 열이 전도되는 과정에서 열파가 반사되거나 또는 지연되는 과정에 의해 물질표면에 나타나는 온도분포의 변화를 분석하여 내부결함을 분석하는 기법이다.

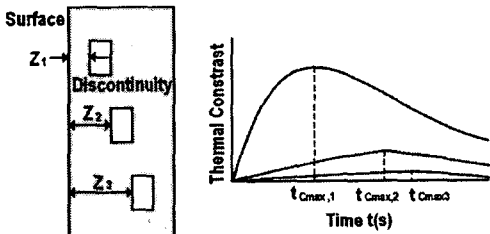


그림 1. 결함 깊이에 대한 열적대비[2].

그림 1은 표면 하의 불연속부분인  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ 가 열인가 후, 시간에 따라 변화되는 표면에 나타나는 열적 대비를 나타낸 것으로서, 깊이가 깊어짐에 따라 대비가 낮아짐을 나타낸 것이고,  $t_{Cmax,1}$ 과  $t_{Cmax,2}$ ,  $t_{Cmax,3}$ 는 각각  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ 가 가장 높은 대비로 표면에 나타나는 데 소요되는 시간으로 균질체의 경우 깊이의 제곱에 비례하게 된다[2]. 그리고 열적 대비  $C(i,j,t)$ 는 열화상  $T$ 로부터의 화소  $(i,j)$ 에 대한 시간  $t$ 에서 다음 식과 같이 계산된다.

$$C(i, j, t) = \frac{T(i, j, t) - T(i, j, t=0)}{T_{soa}(t) - T_{soa}(t=0)} \quad (1)$$

여기서  $T_{soa}$ 는 화상에서 건전한 영역 상단의 표면 온도이다. 가열 전( $t=0$ )의 화상은 의사열반사를 제거하기 위해 차분연산을 실시한다[2], [3].

그림 2와 같이 각 화소가 최대 열적대비  $C$ 를 발생시킬 때인  $t_{Cmax}$ 를 화소별로 분포시킨 것이 시화상인  $TG_{Cmax}$ 가 된다. 시화상이 최대 열적대비가

발생된 시간분포이므로 그리고 불연속부분 깊이의 제곱에 대한 비율이 최대 대비 시간이므로 시화상과 같은 시간 정보는 대상체에 존재하는 결함의 깊이에 대한 비율의 정보가 된다. 이 시화상은 적외선 열화상과 같은 차원을 갖기 때문에 하나의 화상으로서 표현될 수 있다.

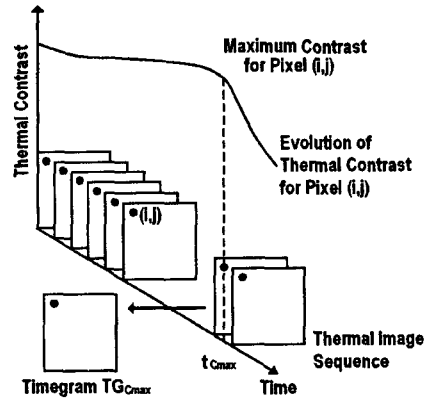


그림 2. 연속 열화상에서의 시화상.

### 2.2 실험설비 구성

능동열시험법에서 열적 교란에 활용되는 열의 인가, 혹은 냉각 기법은 적용 대상체에 열화 요인으로 작용되지 않아야 한다. 그리고 순간적인 인가에 적합하고 많은 열량을 제어할 수 있어야 하며 적용이 용이해야 한다.

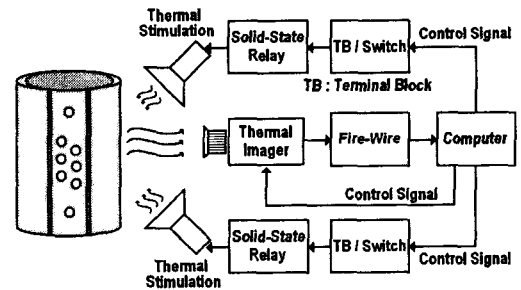


그림 3. 열인가법 설비 구성도.

따라서 본 연구의 열인가법에는 그림 3과 같이 할로젠램프(500W×4개)를 장착한 등기구를 이용하여 열을 인가할 수 있도록 구성하였다. 이는 순간적으로 열인가 시간을 제어할 수 있기 때문이다.

그리고 냉각법에는 그림 4와 같이 압축공기(최대

압력 8kPa)로 냉각할 수 있게 구성하였다. 압축공기는 상온의 공기를 압축하여 사용하기 때문에 변압기에 열화요인으로 작용되지 않고, 순간적으로 큰 온도변화를 시료 표면에 줄 수 있기 때문이다.

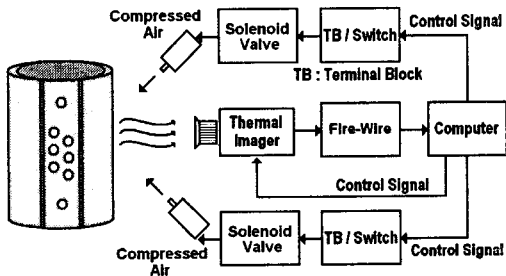


그림 4. 냉각법 설비 구성도.

여기에 사용된 적외선 열화상기는 Avionic사의 TVS-8502로 온도분해능이  $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ , 유효화소가  $256 \times 256$  pixels인 InSb센서가 장착된 장비이다. 그리고 시험 시료는 229kV/100kVA용으로 직경이 0.85mm인 동선을 사용한 몰드변압기 고압권선부로 외경이 32cm이고 높이가 56cm인 진공성형하지 않은 결합을 포함하고 있는 것을 사용하였다. 컴퓨터와의 인터페이스는 fire-wire(IEEE1394)를 통해 이루어졌으며 분석을 위한 프로그램은 자체 제작하였다.

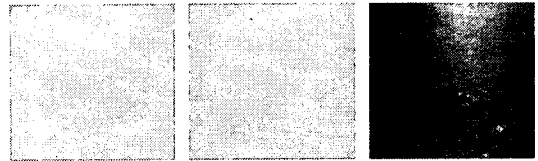
### 3. 결과 및 고찰

그림 5는 그림 3의 열인가법을 이용하여 몰드변압기 고압권선의 절연체 표면을 측정한 것으로 그림 5(a)는 열인가 전 열화상, 그림 5(b)는 열인가 시 화상, 그림 5(c)는 인가 시에서 인가 전 화상을 화소 대 화소 차분 연산한 결과 화상이다.

측정결과 그림 5(c)에서와 같이 열용량이 큰 변압기 권선에 2kW의 할로겐램프로 인가된 열량이 변압기 권선에 정격전류 2.5A의 1/2의 전류를 인가함에 의해 발생된 열량에 비해 매우 작기 때문에 순간적인 온도 변화를 크게 줄 수 없어 표면의 미세한 결함만을 검출할 수 있었고 표면 하에 존재하는 결함은 거의 검출할 수 없었다.

따라서 표면 하에 존재하는 불연속 결함부를 검출하기 위해서는 인가하는 열량을 더욱 증가시켜야 한다. 그러나 이는 절연체 열화의 원인이 될 수 있으므로 검출능력 개선을 위한 방법으로는 적합

하지 않다.



(a) 인가 전 (b) 인가 시 (c) 차분 화상

그림 5. 열인가법을 이용한 측정결과.

대안으로 이를 개선하기 위해 그림 4와 같은 압축공기를 이용한 냉각법을 적용하였다. 최대압력 8kPa를 출력하는 콤프레서를 이용하여 몰드변압기 권선부 절연체 표면으로 압축공기를 방사함으로써 표면을 냉각시키고, 이렇게 냉각된 표면에 결합에 의해 생성되는 열적 대비를 분석함으로써 표면에 노출되지 않은 결함을 검출하는 방법이다.

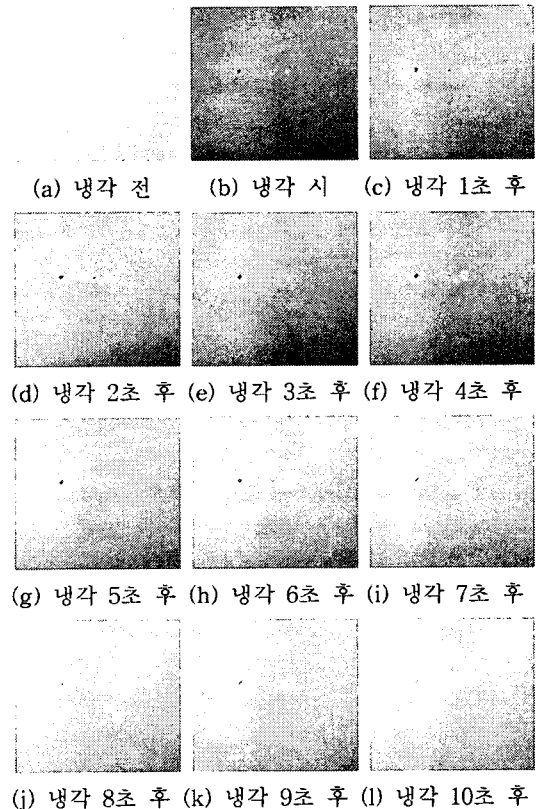


그림 6. 냉각법을 이용한 측정결과.

그림 6은 이와 같이 그림 4의 냉각법을 이용한

몰드변압기 고압권선의 절연물을 진단한 결과로서, 냉각 시 그리고 냉각 후 1초마다 측정된 열화상으로부터 냉각 전 열화상을 차분 연산함에 의해 얻어진 화상이다. 이는 시간이 경과함에 따라 표면에 나타나는 온도대비에 대한 정보를 가지며 표면 냉각 후 정격전류 2.5A의 1/2의 전류가 흐름에 의해 권선 내부에서 발생된 열에 의해 재가열되는 과정에서 발생하는 현상이다.

이 결과를 분석하면 낮은 깊이에 존재하는 표면 하의 결함을 검출할 수 있다. 즉 그림 6(b)에서는 표면에 노출되어 있는 결함의 대비가 높게 나타나지만 시간이 지남에 따라 대비가 저하되어 그림 6(l)에서는 대비가 현저히 감소되어 있는 것을 확인할 수 있는 반면, 그림 6(b)에서는 나타나지 않던 열적대비가 그림 6(h) 등에서 나타난 것을 볼 때 표면에는 노출되지 않았지만 내부에 불연속부분이 존재함을 표면에 전파된 열의 분포로 확인할 수 있다.



그림 7. 측정 시료 및 측정 시료의 측정 부위.

그림 7은 측정 시료 및 냉각법으로 측정된 시료의 측정 부위로 그림 6과 비교해 볼 때 외부에 노출된 부위 외에 표면 하의 불연속부분이 검출된 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

기존의 열화상기를 이용한 수전설비 진단은 수동열시험법만으로 측정되었다. 따라서 결함이 온도 변화와 연계되지 않는 경우에는 검출할 수 없었다.

본 논문에서는 능동열시험법을 적용하였다. 결과로 열인가법과 냉각법을 이용하여 수동열시험법으로는 확인되지 않았던 몰드변압기 고압 권선부의 표면 하 불연속부분을 확인할 수 있었다. 그러나 열인가법은 발열하고 있는 시료에 많은 열을 공급

하는 것은 시료의 열화를 가속시킬 수 있기 때문에 검출 능력에 한계가 있었다. 반면 냉각법은 상온의 압축공기를 이용하기 때문에 좀더 향상된 검출 능력이 있었다.

이 결과는 수동열시험법으로 확인되었던 과전류, 단자이완, 접속불량 등의 열의 변화를 동반하는 기구(mechanism)가 포함된 결함뿐 아니라, 열의 변화가 없는 구조적 결함 또한 검출하여 절연 고장에 대한 적극적 대책이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] Gerald C. Holst, *Common Sense Approach to Thermal Imaging*, SPIE Press, p. 34, 2000.
- [2] Xavier P.V. Maldague, *Infrared and Thermal Testing*, Nondestructive Testing Handbook, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 3, p. 386~391, 2001.
- [3] Xavier P.V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons, Inc., p. 198~200, 2001.