

적외선 열화상 장비를 이용한 실시간 변압기 진단 및 평가

이철구⁺, 백원갑*, 김승대⁺⁺

(Manuscript received: Oct, 28, 2011 / Revised: Feb, 10, 2012 / Accepted: Apr, 5, 2012)

Diagnosis and Evaluation of the Real Time Transformer by the Infrared Thermal Image Equipment

Chul-Ku Lee⁺, Won-Gab Baek*, Sung-Dai Kim⁺⁺

Abstract

It was diagnosed customer transformers and other equipment by using non-contact infrared equipment. Examiners can identify not only abnormalities in real time in the field of the transformer immediately, as well as they were able to safely perform the scan. Thanks to successful transformer diagnosis, we can easily diagnose abnormalities of transformer itself which can be caused by deterioration of the oil used as overlaod or refrigerant and we can also diagnose abnormalities from low voltage bushing which can be result by external environmental factors and physical factors and abnormalities from its connections at the same time we found it is very useful at proactive diagnostics.

Key Words : Infrared thermal image(적외선 열화상 이미지), Abnormality(이상), Transformer(변압기)

1. 서론

전기 수요의 증가에 따라 각 수용가의 전기 설비 용량이 증가하고 있는 현상이 나타나고 있다. 이에 따른 생활이나 산업환경은 많은 편리를 누리게 되었으나 그 반대의 현상도 우리가 감내해야 하는 부분이 되었다. 전기 설비의 이상으로 발생하는 경제적 손실뿐만 아니라 인명 피해까지 가져올 수 있기 때문이다. 그러므로, 전기 설비의 이상을 조기에 진단하고 유지하기 위해서 여러 가지의 검사방법이 개발되어 활용되고 있다. 전기설비 중에서도 변압기의 안정적인 운용으로 전력공급을 원활하게 하는 것이 중요한 위치를 차지하게 되었다. 전력용 변압기의 열화요인을 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 열화요인으로

열적(thermal), 전기적(electrical), 환경적(environmental) 또는 기계적(mechanical) 요인으로 분류되어 질 수 있다⁽¹⁾. 세부적으로 유입 변압기의 내부이상을 진단하는 방법으로는 부분방전법, 절연유의 특성시험법, 가스분석법, 역률측정법, 저압서어지 시험법 등이 있다⁽²⁾. 건식인 몰드 변압기는 전기적으로 안정된 절연특성을 가지고 있는 구조로 되어 있으므로 독립된 권선 내 층간 절연에 대한 이상유무를 확인하는 방법으로 국한시킬 수 있다⁽³⁾. 열화요인에 의해 발생하는 변압기의 이상 유무를 진단하는 방법은 정전상태에서 변압기를 점검하는 방법이 주로 사용되었다. 그러나 앞으로의 진단방법으로는 변압기의 이상 유무를 운전상태(on-line)에서 상시 감시하여 장애에 일어날 사태 등을 예측하고 그것이 치명적이기 이전에 처리하는 예

⁺ 서울과학기술대학교 기계·자동차 공학과

⁺⁺ 남부대학교 의료공학과

* 교신저자, 서울과학기술대학교 산업대학원 기계공학과 (arjuna3@seoultech.ac.kr)

주소: 서울시 노원구 공릉동 17-2

측보전기술 중심으로 변하고 있다⁽⁴⁾. 위에서 말한 변압기의 이상 유무를 파악하는 데 어느 한 방법만이 아닌 다양한 방법을 활용할 수 있으나, 현장에서 실시간으로 이상 유무를 파악하는 검사방법으로 대두되고 있는 것이 적외선 열화상 장비를 이용한 진단이다. 각 수용가에 설치된 전력설비 중에서 변압기를 적외선 열화상 장비를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 이에 변압기에서 발생하는 이상유무를 파악하고자 하였다.

2. 관련이론

2.1 변압기의 열화원인

변압기내의 절연재료는 시간이 지남에 따라 또는 다른 요인에 의해 열화하게 된다. 열화의 원인이 개별적으로 일어나기 보다는 복합적으로 작용하여 전기적 성질을 변하게 하는 것이다. Fig. 1에서와 같이 열에 의한 절연의 변화가 있을 때, 화학적으로는 변질되고 물리적으로 경화 또는 취화되어 절연과피강도의 변화를 가져오게 됨을 알 수 있다^(1,5). 변압기의 경년열화로 인해 변압기 수명을 저하시키는 요인은 다음과 같다.

- 열(thermal)에 의한 열화
- 흡습에 의한 열화
- 산소의 흡수에 의한 열화
- 부분방전(partial discharge)에 의한 열화
- 기계적 응력

이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 열에 의한 열화(aging)이고 절연물이 흡습되거나 산소가 존재하면 열열화(thermal aging)가 촉진된다⁽⁵⁾.

2.2 변압기의 이상 유무 검출 허용온도

Table 1은 각 규격별 허용온도이다. 변압기는 절연물의 종류에 따라 허용기준 온도가 다르므로 변압기에 사용된 절연재료 중 허용온도가 낮은 것을 기준으로 하게 된다. 수용가의 변압기에 사용된 절연물의 특성 및 환경적 요인을 고려하여 적외선

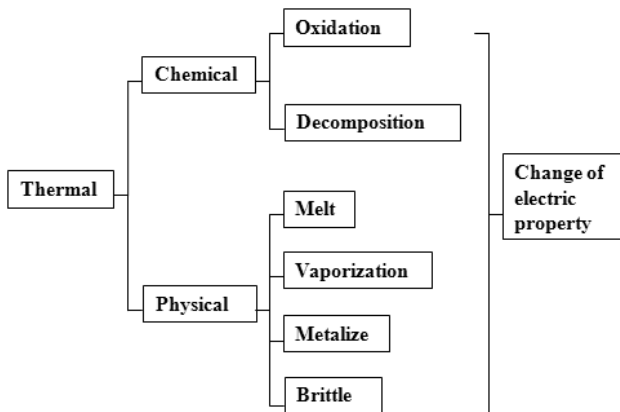


Fig. 1 Experiment setup for glass cutting

열화상을 진단하여야 하나 각 수용가에 설치된 변압기의 절연 물 및 냉매를 정확히 알 수 없기 때문에 절연물 및 냉매를 고려하지 않고 변압기에서 나타나는 최대 온도만을 고려하게 되었다. 유입 변압기에 적용된 최대 허용온도는 가장 낮은 것을 기준으로 평가할 때, JEC-204에 나타난 바와 같이 유입 변압기 및 건식 변압기(몰드 변압기)에 동일한 55°C를 평가 기준으로 삼았다.

2.3 진단방법 비교

변압기 절연물이 열화 될 때 그 정도를 측정하기 위하여 전력용 변압기를 계통에서 분리시킨 후 시험측정을 하나, 부분방전 측정 및 유중가스분석 등은 운전 중에 내부 이상검출이 가능한 방법이다. 부분방전측정은 장시간 운전됨에 따라 각 부분의 열화 등에 의하여 전기적 기계적 성능이 저하하여 이상이 나타날 때 부분방전을 수반하고, 이상발생 시 다른 징후보다 빠른 특성을 가지고 있다. 외함에 센서를 부착하여 이상 징후인 음향펄스나 전류펄스를 간단하게 측정이 가능하나 취득된 정보를 처리 및 분석하는 시스템을 갖추는 것이 많은 비용과 숙련된 검사기술자가 요구된다. 유중가스분석은 변압기 내부에 이상이 발생하면 절연유 또는 고체 절연물이 열분해하여 가스가 발생하고 절연유 중에 용해된다. 이러한 절연유를 채취하고 이상 유무를 분석하는데 장시간이 소요되며 전문 인력이 요구된다⁽¹⁻²⁾. 적외선 열화상 카메라를 이용한 진단은 비접촉에 의해 변압기의 이상 유무를 현장에서 직접 확인할 수 있다. 또한 변압기에서 발

Table 1 Permission temperature of codes

		Items	JEC-204	ANSIC 57,12	IEC726 BS171
A rising permission temp. of TR (°C)	Dry	A	55	-	60
		E	70	-	75
		B	55	80	80
		F	95	115	110
		H	120	150	125
	C	-	-	150	
Oil	Natural rotation	55	65	65	
	compulsory rotation	60	65	65,70	
Max. permission temp. of friction materials (°C)	A		105	105	105
	E		120	-	120
	B		130	150	130
	F		155	185	155
	H		180	220	180
	C		180 over	220 over	180 over

산하는 적외선 에너지를 온도로 변환시켜 가시적인 색상으로 보여줌으로써 이상부위가 어디인지를 용이하게 파악할 수 있다. 이와 같이, 각 검사방법별로 장단점을 가지고 있다. 부분방전 및 유증가스 검사방법은 검사시간이 많이 소요되고 전문 인력이 요구되는 단점에도 검사의 정확성을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 반면, 적외선 열화상 진단은 정확한 이상 원인을 찾기보다는 운전 중에 이상 유무를 검출하고 이에 대한 조치를 신속히 할 수 있다는 장점이 있다.

3. 분석 방법 및 장비

열화상 온도분포를 이용하여 판정하기 위해서 두 가지 방법을 사용하였다. 변압기 몸체의 이상 현상을 판정하기 위해서 Table 1의 가장 최소값을 적용하였다. 나머지 부분에 대해서는 3상 온도비교 판별법을 사용하였다. 측정점의 정확한 온도보다는 비교하고자 하는 측정점 간의 온도를 이용하여 판정하였다⁶⁾. 온도차의 비교식 및 판별법은 아래와 같다.

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (1)$$

모든 물체는 온도의 작용으로서 적외선을 방사 또는 복사하고, 온도 증가에 따라 물체의 원자는 더 많은 움직임이 발생하며 이에 따라 적외선 에너지도 더 많이 방사하게 된다. 적외선 열화상 카메라에 감지되는 것은 물체가 발산하는 열이 아니라 적외선 에너지이며, 이를 이용하면 피측정물의 온도분포를 도식화할 수 있다. 변압기를 진단하는데 사용된 장비는 물체에서 방사되는 적외선 에너지를 기기를 통하여 감지하고 수집하게 된다. 수집된 에너지양에 비례하여 전기적 신호로 바꾸어 주고,

Table 2 Three-phase temperature comparison

temperature differential	criterion
less than 5℃	normal
more than 5℃ less than 10℃	caution
more than 10℃	Abnormal

Table 3 P-620 Technical Specifications

Items	Range	Items	Range
Spatial resolution	0.65mrad	Accuracy	±2℃ or ±2%
Spectral range	7.7~13μm	Detect type	Focal plane array (FPA)
Temperature	-4~500℃	Emissivity correction	0.1~1.0

전기적 신호가 온도 값으로 표시되는 것이다. 진단에 사용된 장비는 플리어(FLIR) 사의 P-620이다. 이 장비의 해상도는 640 × 480픽셀을 가지고 있으며, 측정 가능한 온도범위는 -40 ~ 500℃로 허용오차는 2℃ 또는 2 %이다(Table 3).

4. 진단 결과 및 고찰

4.1 수용가 전력설비에 나타난 이상 현상

Table 4는 A지역(서울동부)과 B지역(진천)의 수용가 전력설비를 진단한 결과이다. 전력설비는 다음과 같은 계기용 변성기(MOF : Metering Out Fit), 변압기(TR : Transformer), 전력퓨즈(PF : Power Fuse), 컷 아웃 스위치(COS : Cut Out switch) 및 피뢰기(LA : Lighting Arrester) 등으로 구성되어 있다. 진단 결과를 보면, A지역에서는 변압기와 COS가 나온 반면, B지역은 설비 내 다양한 기기에서 이상 발열현상이 나타났다.

4.2 변압기에 나타난 이상 현상

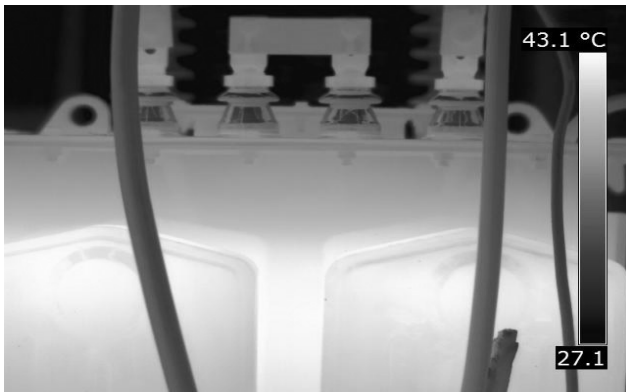
Table 5는 A지역과 B지역에서 진단한 것으로 변압기 종류별 이상 현상이 발생한 부분을 보여주고 있다. 변압기 종류에서 두 지역 모두 건식 변압기에서는 특이점을 발견하지 못하였으나 유입변압기는 이상이 나타나는 부분에서 공통점이 있었다. 유입변압기의 이상 현상이 나타난 부분을 살펴보면, 크게 두 부분으로 나타났다. 하나는 몸체에서 나머지 하나는 저압 부싱 및 접속부에서 나타났으며, 변압기 몸체보다도 저압 부싱 및 접속부에서의 이상 비율이 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

Table 4 Diagnosis result

items		MOF	TR	PF	COS	Total
A	Diagnosis	203	203	203	203	812
	Abnormal	0	2	0	2	4
	%	0.00	0.99	0.00	0.99	0.49
B	Diagnosis	387	387	387	387	1548
	Abnormal	1	11	4	1	19
	%	0.26	2.84	1.03	0.26	1.10
Sum	Diagnosis	590	590	590	590	2360
	Abnormal	1	13	4	3	21
	%	0.17	2.20	0.68	0.51	0.89

Table 5 Abnormal part of a transformer

Items	Body	Low voltage bushing & connect	Total
Oil TR	2	11	13
Dry (Mould)TR	0	0	0
Sum	2	11	13



(a) Normal



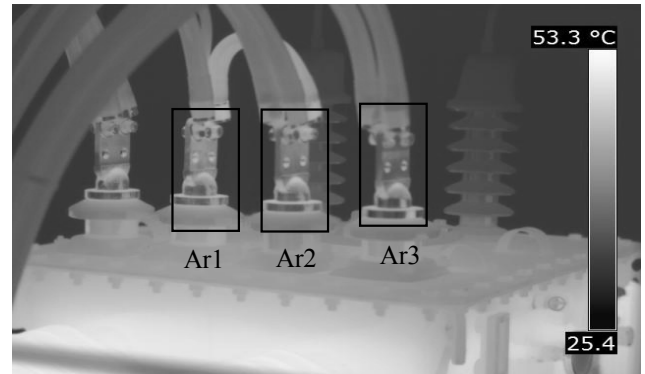
(b) Abnormal

Fig. 2 Abnormal of a oil transformer body

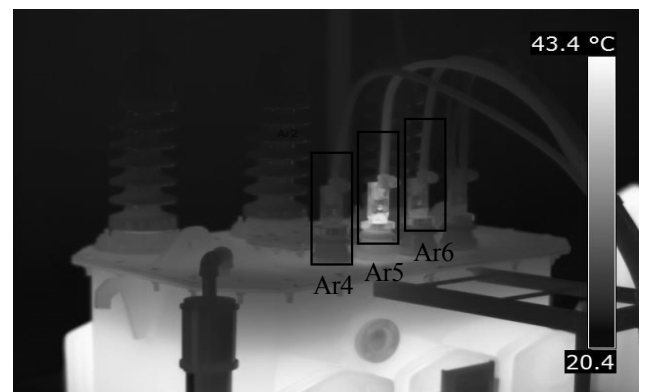
4.3 진단 결과

변압기를 중심으로 A지역에서는 진단한 203개소에 대해 대략 1%인 반면, B지역에서는 387개소에 대해 2.9 %를 보였다. A지역 및 B지역을 진단한 결과에서 지역에 따라 나타난 이상 유무 발생률이 상이하였으나, A지역 및 B지역에서의 변압기에 나타난 이상부위는 차이가 없었다. 이상부위로 변압기 몸체, 부싱 또는 접속부에서의 이상 발열현상이 나타났다. Fig. 2는 유입변압기 몸체에서 나타나는 현상을 보여주고 있는 것이다. (a)는 유입변압기를 사용하면서 발산하는 열적인 현상으로 일정한 온도 분포로 정상상태를 보여주고 있으며, (b)는 유입변압기의 이상 유무를 보여주고 있는 것이다. (b)의 본체에서 발생되는 열을 측정된 결과 약 62°C로 Tabel 1에서 나타난 유입변압기의 최저 허용온도인 55°C를 초과하였다. 내부적 요인은 알 수 없으나 사용량이 급격히 증가한 것에 대한 과부하 또는 본체의 내부의 단락 및 절연물의 열화에 따른 원인으로 추정된다.

Fig. 3은 유입변압기의 저압 부싱 및 접속부에서 나타나는 이상 유무를 보여주고 있다. (a)는 저압 부싱 및 접속부 각 상에서 온도를 측정된 결과 Ar1은 40.9°C, Ar2는 41.6°C 그리고 Ar3은 39.9°C로 최대 온도차가 1.7°C로 일정한 온도 분포를 나타낸 반면에, (b)는 저압 부싱 및 접속부 각 상에서의 온도를



(a) Normal



(b) Abnormal

Fig. 3 Abnormal connect part of low voltage bushing on the oil transformer

측정한 결과 Ar4은 29°C, Ar5는 42.6°C 그리고 Ar6은 31°C로 나타났다. 식 (1)에 따라 나타난 결과를 Table 3에서 보여주는 기준과 비교하면, 정상상태로 보이는 Ar4와 Ar6의 온도 차인 2°C인 반면, Ar4와 Ar5에서의 온도차가 13.6°C로 높은 발열 현상을 보여주고 있는 것을 볼 수 있다. 동일한 조건 및 환경에서 어느 한 상만 온도가 높다는 것은 그 부분에서 저항에 의한 열이 발생한 것으로 추정된다. 따라서 변압기가 놓인 외부적 환경에 의한 원인으로 습기에 많이 노출되는 곳에서 국부 부식에 의한 저항열이 발생한 것으로 간주되며, 또 다른 원인으로서는 접속부 기계적인 체결인 나사 조임이 느슨하여 접촉불량에 의한 것으로 추정된다.

4.4 고찰

변압기의 이상은 크게 세 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째, 변압기의 내부이상으로 철심 및 철심 주위의 구조재에서 발생하는 이상으로 과열 및 진동에 의한 것이 있다. 또한 코일, 리드 및 절연물의 이상으로는 냉각불량, 절연불량, 이상전압에 의한 방전 등이다. 두 번째, 변압기 외부이상으로 탱크, 배관의 용접불량, 손상에 의한 누유, 패킹 불량 또는 경년열화에 의한 누유

가 있다. 세 번째, 부속기기의 이상으로는 냉각장치의 이상으로 누유로 인한 냉각능력의 저하, 계기 및 보호장치의 오동작 및 부동작은 흡습 등에 의한 점점 성능의 저하, 압착불량에 의한 단선, 단락 등의 전기회로적 이상 및 동작부의 기계적 이상이 고려된다.

선행 연구에서의 유입 변압기에 나타난 이상 유무 분석결과 몸체에서의 이상발열은 내부적인 요인으로 적외선 열화상 이미지로 정확한 이상 원인을 알 수는 없으나 부분방전 및 유증가스 분석 등을 이용하거나 기타 방법을 이용하여 정확한 이상 원인을 밝혀야 하겠다. 사용량의 과부하에서 오는 것은 변압기의 용량을 증가시켜 개선하는 것이 필요하며, 냉매로 사용되는 오일의 열화 가능성이 있기 때문에 냉매로 사용되는 오일을 주기적으로 점검하여 교환하는 것이 필요하다. 저압부 부상 및 접속부의 이상 발열인 경우, 외부 환경 및 물리적인 요인이 결합되어 나타나거나 이 두 요인이 개별적으로 발생한 것이라 볼 수 있다. 개별적 요인을 살펴보면, 외부로 노출된 형태로 설치되어 있는 전력설비가 일교차에 의해 발생하는 수증기, 비, 습기 등의 영향으로 국부적으로 저항이 발생하여 열적인 이상 현상이 나타난 것으로 추정된다. 물리적 요인인 접속부의 나사체결이 잘 되지 않았을 때 발생할 수 있는 것은 철저한 시공이 요구되어 진다. 이러한 진단 결과, 안전하고 실시간으로 바로 결과를 알 수 있는 적외선 열화상 검사방법으로 주기적인 점검을 통해 변압기의 이상 유무를 발견하고 조치하는 데 있어 사전 예방활동에 유용하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 것은 정량적 평가는 다소 미흡하나, 정성적 평가를 통해서 또는 간접적으로 확인할 수 있었다.

5. 결론

수용가에 설치된 전력설비 변압기를 적외선 열화상 장비를 이용하여 실시간으로 측정 및 분석하여 변압기에서 발생하는 이상 유무를 진단하였다. 비접촉식 적외선 열화상 장비를 이용하여 수용가 변압기를 진단하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이상부위를 정확하게 파악하고 조치할 수 있는 사전 예방 진단에 유용하다는 것이 추정된다.
- (2) 유입 변압기에서 이상부위로 나타나는 곳은 주로 변압기 몸체와 저압 부상 및 접속부에서 검출되었다.
- (3) 수용가 변압기를 실시간으로 점검하여 이상 유무를 현장에서 즉시 파악하는 것이 가능하고, 비접촉식 점검방법으로 검사자가 안전하게 검사를 수행할 수 있었다.

덧붙여, 향후 신뢰성 있는 자료를 획득하기 위해 다양한 조건 및 환경에서 적외선 열화상 진단 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Chon, Y. K., and Sun, J. H., 1989, "Deterioration Diagnosis testing of Power Transformer," *KIEE*, Vol. 38, No. 11, pp. 21~33.
- (2) Kwak, H. R., 1996, "Insulated Diagnosis Skill of Transformer," *KIEE*, Vol. 45, No. 4, pp. 5~12.
- (3) Lim, Y. B., 2005, "A study on the Integrity Evaluation of the windings in Cast resin Transformers Using vertical Thermal Distribution Analysis," *Journal of Korean Institute of illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 94~99.
- (4) Kwak, H. R., Lim, K. J., Koo, J. Y., and Kang, S. H., 1997, "Insulation Degradation Diagnosis Method of Electrical Equipments," *Proceedings of KIEE*, Vol. 46, No. 8, pp. 34~40.
- (5) Jin, M. K., Ko, S. M., Lee, J. H., and Shin, Y. H., 2004, "Diagnosis of Power Apparatus by Infrared Image," *KIEE Autumn Conference*, pp. 43~45.
- (6) Jeong, S. C., Lim, Y. B., and Kim, J. S., 2004, "The Analysis of Temperature Distribution Electric incoming Apparatus using a Infrared Thermal Imaging System," *KIEEME Summer Conference*, pp. 1113~1116.
- (7) Lim, Y. B., Choi, M. I., Park, C. H., Bae, S. M., and Cho, S. W., 2007, "Analysis on the Effects by Weather Conditions of Infrared Thermography," *KIEE*, Vol. 56, No. 3, pp. 142~147.
- (8) Park, H. J., Nam, C. H., and Yoon, Y. C., 2005, "Diagnostics of Oil Immersed Transformer by Analysis of Degradation Products." *KIEE Summer Conference*, pp. 572~574.
- (9) Park, H. S., Choi, M. Y., Park, J. H., Huh, Y. H., and Choi, W. J., 2011, "Defect Detection in GFRP Composite by using Ultrasound Infrared Thermography," *KSMTE Spring Conference*, pp. 246~247.
- (10) Kim, J. Y., Shim, J. G., Yang, D. J., and Yu, S., 2000, "Heat Analysis of Welding-bead Infrared Thermoimage Camera," *KSMTE Autumn Conference*, pp. 57~62.
- (11) Kim, J. Y., Song, K. S., Choi, C. J., and Kim, H. J.,

2006, "Study on Assessing Safety of Welded Parts with a Thermal Image Camera," *KSMTE Spring Conference*, pp. 360~365.

(12) Kim, J. Y., Shim, J. G., Choi, S. H., Choi, J. H., 2008,

"IR Camera Technique Application for Temperature Characteristics and Evaluation of Gas Turbine Blades Coering Integrity," *KSMTE Autumn Conference*, pp. 324~330.