

열화상 분석을 이용한 전력시스템의 안전진단에 관한 연구

유병열 · 김찬오^{*†}

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 · *서울과학기술대학교 안전공학과

(2011. 2. 12. 접수 / 2011. 4. 11. 채택)

A Study on the Safety Diagnosis for Electric Power Systems Using Thermal Imaging Analysis

Byeong Yeol Yu · Chan O Kim^{*†}

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology

^{*}Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received February 12, 2011 / Accepted April 11, 2011)

Abstract : In this paper, the safety diagnosis using thermal image analysis is described for power equipments. The conventional three-phase comparison method has only provided the results of thermal comparison for the equipments. The proposed method defines the conditions of poor connection by visual checks, and supports the criteria with each thermal rise step. As a result, the thermal difference from 5°C to 10°C meant the warning state. In addition, the thermal difference more than 10°C meant that the connection status was unbalanced. In this case, the countermeasure might be the internal load distribution. If the thermal difference more than 20°C is observed, it means a hot spot at the poor connection. If the hot spot is observed all over the surface, its cause was the unbalanced load, which made the conductive parts discolored and raised the possibility of oxidation or Cu₂O generation. This diagnostic technology employing thermal image analysis method can be directly applied in the field and ensures the safety of equipments.

Key Words : thermal image, power equipments, poor connection, diagnostic technology

1. 서론

최근 전력사용의 증가에도 불구하고 전력설비에 있어서 안전사고의 발생비율은 과거에 비해 큰 변화가 없다. 그러나 안정된 전원공급을 요구하는 부하설비의 급증으로 정전이나 주변 사고파급에 의한 물질 손실은 증가하는 추세이다. 이런 손실을 줄이기 위해 전기설비의 고장 또는 안전사고를 예방하기 위해서는 이와 관련된 징후를 미리 발견하여 적절한 시기에 조치를 취하는 것이 필요하다. 이러한 전기설비 사용자의 요구에 따라 최근 다양한 설비진단 기법이 개발되고 있다^{1,2)}. 설비진단은 운전 중인 전력설비의 접속부 접촉 불량, 전선이나 케이블 자체의 불량이나 과부하 조건에 의한 발열, 분진이나 수분 등에 의한 누설전류 발생과 지락 등으로 시스템이 멈추기 이전에 발견하기 위한 방법으

로 본 연구에서는 적외선 열화상을 이용한 전기설비 진단기법에 관하여 기술하였다. 적외선은 열이동이 직접적이므로 에너지를 전달하는 과정에서 열 손실이 없으며, 물체 표면 가까이에서 부분적으로 흡수되고, 산소, 수소, 공기 등에는 거의 흡수되지 않는 특징을 가진다. 국내에서 적외선 열화상을 이용한 전기설비 진단 방법으로 3상 비교법이 이용되고 있다³⁾.

이는 전력설비가 3상일 때 각 상의 온도 차이에 의해 설비의 이상상태를 판단하는 방법이다. 이 방법은 단순히 상별 온도분포를 비교하기 때문에 부하전류 불평형 등에 의한 영향으로 판단 오류의 개연성이 있다. 따라서 본 논문에서는 측정된 결과를 온도변화뿐만 아니라 부하전류 및 접속개소의 특징에 의한 판단을 연계함으로써 진단의 정확도를 높이고자 한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
yubyung10@lycos.co.kr

2. 이론적 배경

2.1. 적외선 이미지를 이용한 분석기법

적외선 열화상진단장비는 최근 결함 발생 시 온도상승을 동반하는 전력설비의 진단에 많이 사용하고 있다. 이는 원거리에서도 온도분포 정보를 용이하게 얻을 수 있다는 장점 때문이다. 적외선은 열에너지로 변환시키면 물체를 가열시키기 때문에 건조, 용접 등에도 이용되고 있으며, 적외선 중 비교적 파장이 짧은 부분은 적외선 사진이나 광전효과에 응용되고 있다⁴⁾. 적외선은 에너지를 전달하는 과정에서 열 손실이 없으며, 자외선에 비하여 파장이 길기 때문에 공기 중의 먼지나 다른 미립자에 산란되지 않는다. 적외선은 열방사에 있어서 물질을 구성하는 입자가 열을 받아 전자파를 방출하는 현상이며, 고온일수록 현저하고 절대 0℃ 이상에서는 항상 이런 현상이 발생한다. 어떤 물체에 적외선이 입사하면 물질의 종류에 따라 반사, 흡수, 투과하는 정도가 다르다. 이때 입사하는 적외선에 대하여 물체가 적외선을 흡수하는 정도를 나타내는 흡수율(ϵ), 투과되는 정도를 나타내는 투과율(τ), 반사되는 정도를 나타내는 반사율(ρ)을 합하면 같게 된다. 즉, 입사에너지는 흡수, 투과 및 반사에너지의 합이다. 주위온도가 $T_a(K)$ 일 경우에 $T(K)$ 의 물체를 적외선 카메라로 진단한 경우의 온도분포(W_i)는 식 (1)과 같다.

$$W_i(K) = \epsilon T + (1-\epsilon)T_a \quad (1)$$

전기설비의 경우 줄열에 의해 발생하는 설비의 온도상승을 비접촉에 의해 확인이 가능하며, 이상 발열에 의해 발생하는 적외선은 대기 중으로 파동 형태로 방사되며 검출부인 적외선 센서에 의해 각 부위에서 방사되는 적외선이 검출된다. 센서는 한 지점을 선택하여 열 발생을 확인할 수 있으나, 최근에는 대부분 주변의 상황을 동시에 확인할 수 있는 2차원 형태의 이미지를 출력하게 된다. 검출된 적외선은 신호증폭, 신호처리 분석기에 의해 적외선을 휘도가 없는 색으로 형성하고 이 색들은 영상을 구성하여 눈으로 볼 수 있는 이미지 형태로 출력된다. 전력설비에서 발생하는 복사에너지 스펙트럼 중 필터를 통해 3 μm에서 5 μm 대역의 대부분의 중 적외선 영역을 선별 검출하여 열을 감지함으로써 전력설비의 과부하, 접촉 불량, 절연체의 열화 등을 평가하는데 이용된다^{5,6)}. 현재 주로 사용하고 있는 적외선 열화상 진단장비를 이용한 전력설비 진단법은 1990년대에 한국전기안전공사에서 표본실험과

Table 1. Decision criteria on temperature pattern method

Power devices		Standards	Assessment
Oil insulated Tr	terminal	75℃ or more	fault
	body	80~95℃	precaution
		95℃ or more	fault
Molded Tr	core	100~120℃	precaution
		120℃ or more	fault
	epoxy (insulator, B type)	70~80℃	precaution
80℃ or more		fault	
GIS outside heat		10~15℃ or more	precaution
Wire, cable	IV	60℃ or more	fault
	EV	75℃ or more	fault
	HIV	75℃ or more	fault
	CV	90℃ or more	fault
Condenser	body	65℃ or more	precaution
		75℃ or more	fault

검증, 현장실측 등을 통해 설정한 3상 비교법을 판단기준으로 활용하고 있다.

이는 각 상의 온도 차이에 의해 전력설비의 이상상태를 판단하는 것으로 각 상의 온도 차이가 5℃ 미만인 경우에는 전력설비가 정상적으로 운전되고 있는 것으로 판단한다. 그리고 온도 차이가 5℃에서 10℃ 미만으로 되면, 전력설비의 각 상에서 고른 전류가 흐르지 않고 편중되고 있는 것으로 판단하여 지속적인 모니터링을 실시하고, 10℃ 이상의 온도차이가 발생하면, 설비를 정전시켜 정밀 점검하여야 하는 것으로 각 단계를 상정하였다. 또한, 온도 패턴법에 의한 판정기준은 Table 1에서 나타난 것과 같이 각 설비의 각 부위에서 발생하는 온도를 계측하여 그 설비의 이상상태를 판단하는 자료로 활용된다.

Table 1에서 제시되는 방법의 근간은 절연성능이 저하되어 전력설비 내부에 절연저하에 따른 줄열 발생으로 온도가 상승하는 것을 의미한다. 이때 절연종류나 설비에 따라 정해진 규정 이상의 온도가 발생하면 요주의 또는 이상으로 판단한다.

2.2. 전력시스템에서의 안전사고 통계분석

전기재해통계분석에 의하면 2009년도 전기화재 중 전기배선 및 배선기구에서 발화한 화재가 2,158건으로 23.0%를 점유 하였으며, 다음으로 조명기구 및 간판에서 발화한 화재로 11.7%인 1,103건이 발생하였다. 전기배선 및 배선기구에서 발화한 2,158건을 세부적으로 분석하면 옥내배선에서 704건(32.6

Table 2. Electrical fire according to accident facilities

Specifications	Fires	Percentages
Electric facilities	1,038	11.1
Wiring devices	2,158	23.0
Season equipments	884	9.4
Industrial equipments	234	2.5
Commercial equipments	34	0.4
Living equipments	221	2.4
Office equipments	41	0.4
Kitchen appliances	332	3.5
Images & audios equipments	212	2.3
Medical equipments	11	0.1
Agricultural equipments	57	0.6
Illuminated signs	1,103	11.7
Others	155	1.7
Unknown	2,911	31.0
Sum	9,391	100.0

%)으로 가장 많이 발생하였고, 전기기용 코드에서 412건(19.1%)이 발생하였으며, 다음으로 배선기구인 콘센트에서 284건이 발생하여 13.2%를 점유하였다.

Table 2와 같이 전기배선 및 배선기구에서 발화된 건수가 많이 발생되어 접속부를 집중적으로 열화상 진단을 실시하였다⁷⁾. 전기설비의 접속부에서 발생하는 발열현상을 모니터링 함으로써 전기설비를 활선상태에서 과열상태를 확인할 수 있으며, 결과 이미지를 분석하여 전기적 결함을 조기에 발견하고 적절한 대응 조치를 취할 수 있다는 장점을 가진다. 적외선 열화상 진단장비에 의해 진단이 가능한 설비로는 현재까지 전선, 케이블, 모선과 애자류, 지지금구류, 도체 접속부, 변압기, 차단기 등과 같은 전력설비 등이 이에 속한다. 그러나 이 두 가지 결과만을 활용하여 설비의 이상상태를 판단할 경우, 부하전류에 대한 비교 및 접속부 상태에 대한 분석이 동시에 이루어지지 않아서 판정된 결과에 불확실성이 내포되어 있었다.

3. 적외선 열화상을 이용한 전기설비단 기법

3.1. 배선용 차단기 접속부 발열

적외선 열화상진단장비는 NEC사 제품 TH9100 시리즈로 -40~500℃의 측정 범위를 가지고 있으며 열화상 화소수 320×240, 가시화상 화소수 41만 화소와 고속 내장 메모리(60 Hz, 1664화상)의 저장 능력을 가지고 있다⁸⁾. Fig. 1은 주위온도가 26.0℃에

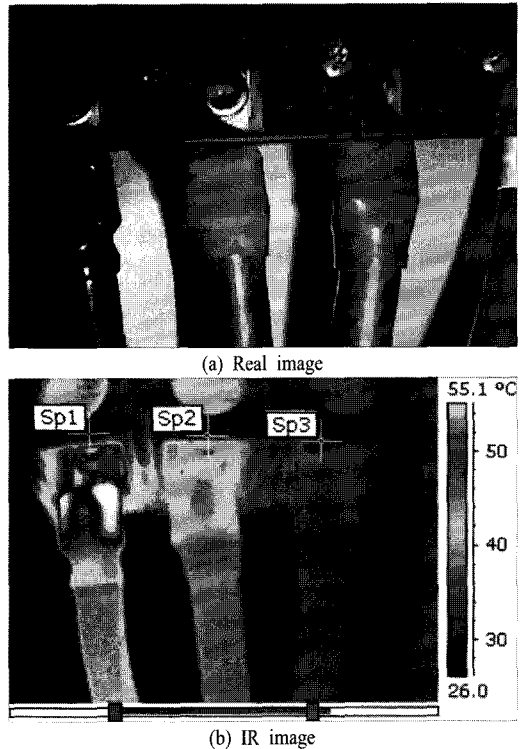


Fig. 1. Heat generated on terminals of MCCB.

서 촬영한 배선용 차단기(MCCB 3P 60AF, IV전선 14 mm², 단자 16 mm²) 2차측(통전전류 55A, 부하 : 3상 모터, 전동, 히터 등) 접속단자에서의 적외선 이미지의 온도를 나타내는 것이다. 측정결과 Sp1은 55.0℃이고, Sp2는 42.2℃, Sp3는 33.8℃인 것으로 나타났다.

3상 비교법을 적용하여 분석하면, Sp1에서의 온도가 Sp3보다 약 21.2℃가 더 높은 것을 알 수 있으며, 이는 정전을 실시하여 확인해야 하는 단계로써 단자접속 상태를 확인한 결과 불안전 접속된 것으로 나타났다. 현장에서는 대체적으로 온도 차이가 전류에 의한 것으로 확인되기 때문에 줄열에 의한 것인지 주변 환경에 의한 것인지 판단하고 줄열에 의한 것이라고 판단이 되었을 경우 부하편중에 의한 것인지 확인이 필요하다. 경부하일 때 부하 불평형률이 높으면, 전선 또는 케이블에서 한 상에서만 발열이 발생할 수 있다. 본 건의 경우에는 접속부에서의 단자 조임이 불량한 것으로 확인되었다.

3.2. 케이블 및 차단기 인입부 발열

Fig. 2는 전기설비에서 배선용 차단기(MCCB 3P 100AF)의 1차측 인입부(IV전선 22 mm², 단자 25 mm²)

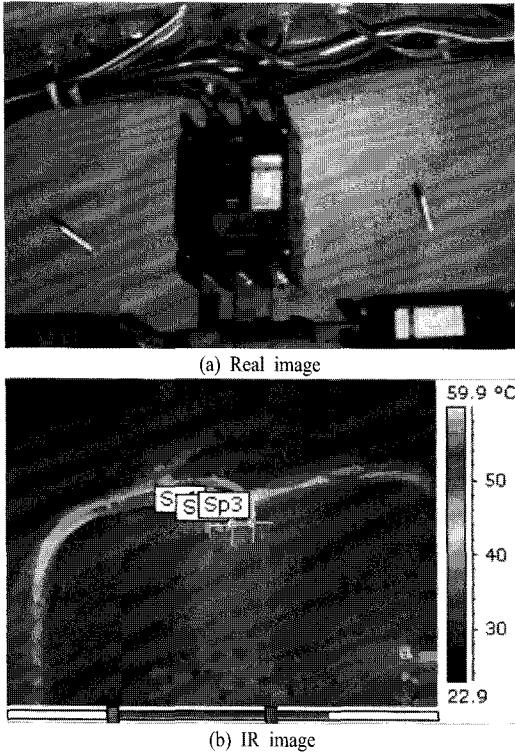


Fig. 2. Heat generated from lead-in cables and joints.

의 접속 상태를 적외선 이미지로 나타낸 것이다. Sp1의 온도는 45.9°C, Sp2는 41.0°C, Sp3은 35.8°C인 것으로 확인되었다. 가장 큰 온도 차이가 발생하는 부분은 Sp1과 Sp3로 10.1°C 온도 차이를 보였다. 10°C 이상의 온도 차이가 발생할 경우에는 정전 후 정밀점검이 요구되는 상황이다.

Fig. 2(b)에서 확인할 수 있듯이 케이블에서도 발열이 있는 것을 확인할 수 있으며, 전반적으로 한 상에 편중된 형태를 보인다. 이는 줄열에 의한 발열이 부하가 불평형된 상태에서 사용되기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 단자의 접속부 확인과 부하의 고른 분산을 시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

3.3. 모선 접속단자에서의 발열

Fig 3은 모선 접속부의 접속상태와 온도분포를 나타낸 것으로 모선 주변의 온도는 28.5°C로 측정되었다. 주변의 모선 접속부에서의 온도를 측정할 결과에 의하면, Sp1(1차측 전선규격 IV 22 mm², 2차측 BUS BAR 규격 3×15)에서의 온도는 29.7°C이었으며, Sp2(1차측 전선규격 IV 22 mm²)는 29.5°C로 측정되었고, Sp3(전선규격 IV 22 mm²)는 34.8°C인 것으로 확인되었다. 온도 차이가 가장 많이 발

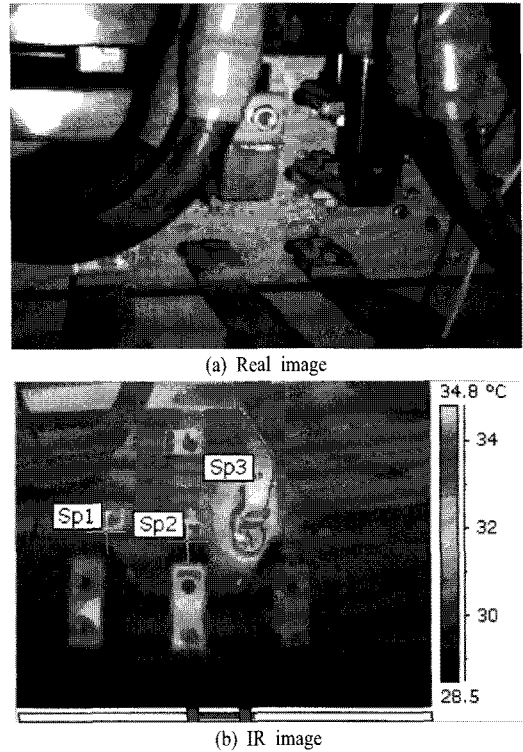


Fig. 3. Heat generated in bus bar connections.

생하는 지점은 Sp2와 Sp3로 온도 차이는 5.3°C로 나타났다. 이는 요주의 상태를 의미하며, 현재의 설비상태가 이상상태로 발전되지는 않았으나 지속적인 모니터링이 요구되는 것을 의미한다. 그러나 전체의 온도 상태가 높지 않기 때문에 전반적으로 설비에 이상이 있다거나 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

3.4. 3상 비교법에 의한 설비상태 분석

Fig. 4는 각 설비의 3상비교법에 의해 측정된 온도를 비교한 것이다. 앞서 기술한 내용에서와 같이 전기설비에 있어서 접속부는 기기 또는 설비 간 전류가 원활하게 흐를 수 있도록 통로의 역할을 한다.

그러나 단자의 조임이 부적절한 경우에는 접촉 저항에 의한 줄열이 발생한다. 전기화재에 있어서 인지하지 못하는 화재가 발생한 경우의 대부분은 접속개소의 관리가 불량으로 확인되었다. 현장에서 실측된 데이터를 확인한 결과를 보면, 약 20°C 이상의 온도차이가 발생하는 개소에서는 접속부의 영향이 거의 확실한 것으로 확인되었으며, 10°C 내외의 온도 차이가 발생하는 개소에서는 부하 불평형률과 접속개소의 접촉 불량 등을 고려하여 판단

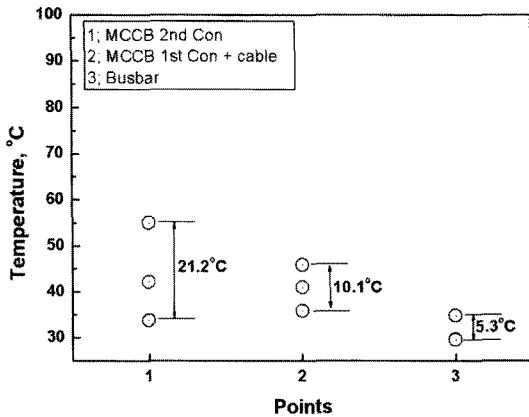


Fig. 4. Diagnosis by three phase comparison method.

Table 3. Diagnosis using improved three phase comparison method

Specifications	less than 5°C	5~10°C	10°C or more	20°C or more
Assessment steps	normal	precaution	fault	fault
Action	-	continuous monitoring	precision checks after blackout	-
Characteristics in connection parts	-	unbalanced load, overload, bad contact	unbalanced load contact	unbalanced load contact
How to make	-	regular checks	load consumption check	oxidized copper check

할 필요가 있다. 또한, 요주의로 판정된 경우인 약 5°C 이상에서의 온도 차이가 발생하는 개소는 접속 개소 또는 부하 불평형률에 의한 점검이 이루어져야 하며, 측정개소의 지속적 관찰에 의해 판단의 근거가 마련되는 것은 당연한 것이다. 현장에서의 다양한 데이터를 추가 분석하여 시스템의 트러블 동향을 정리하면, Table 3과 같다. 접속 개소의 특징과 확인 방법을 통해 좀 더 정밀한 결과의 제시가 가능하였다.

기존의 3상비교법은 단지 온도를 감지하여 그 상태를 비교함으로써 설비의 이상 유무를 밝히는데 한정되었으나 현장에서의 적용방법에 있어서 설비의 상태만을 제시하는 것은 설비의 안전을 확보하는데 매우 효과적이지 못한 결과를 나타내었다. 따라서 현장에서의 다양한 트러블 요인을 샘플링하고 관리할 수 있는 방법의 제시가 요구되었다. 본 방법은 접속부에서의 접촉 불량에 의한 상태를 확인하고 접속개소의 특징을 정의함으로써 사고발생

메커니즘에 기인한 판별법을 제시하였다는 데 의의가 있다. 즉, 온도의 상승단계에 따라 부하 불평형 조건에 의한 발열인지 접촉 불량에 의한 원인에 의한 발열인지를 구분할 수 있었으며, 특히 아산화동 증식이 진행되기 위해서는 초기 발열 후 약 20°C 이상의 온도차가 발생해야 하는 것으로 확인되었다.

4. 결론

국내 전기설비가 운용되는 현장에서의 발열현상에 관한 관리는 적외선 이미지를 촬영하여 판단하는 것이 보편화되었다. 그러나 발열 단계에 따른 특징을 정의 하는 데는 어려움이 많았다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 전기현장에서 전기에너지의 흐름을 원활하게 하기 위해 기기간의 접속을 보장하는 개소의 발열특성에 대해 정의하였다.

1) 5°C 미만의 온도차가 발생하는 접속개소는 외부환경 또는 부하 상용상의 특별한 이상이 없는 것으로 판단된다.

2) 5°C에서 10°C의 온도차가 발생하는 개소는 판단기준이 요주의 상태를 의미하며, 접속개소를 확인한 결과에 의하면, 미세한 나사풀림 또는 부하의 일시적 불평형 등이 원인된 것으로 나타났다.

3) 10°C 이상의 온도차가 발생하면, 접속개소의 이상상태는 대부분 부하 불평형에 의한 것으로 내부 부하의 분배를 통해 해소할 수 있는 것으로 확인되었다.

4) 20°C 이상의 온도차가 발생하면, 국부적인 열 발생(hot spot)은 접속개소의 접촉 불량에 의한 것으로 나타났으며, 열 발생 범위가 넓으면 부하 불평형의 원인인 것으로 나타났다. 또한, 20°C 이상의 온도차가 발생하면, 접속개소의 도전체가 변색(turning color)되는 특징이 있으며, 이는 산화부식의 진행 또는 아산화동이 진행될 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 물성적인 변이를 확인하였다. 본 연구에서 제시하는 적외선 이미지의 분석에 의한 현장 활용법은 전기설비 접속개소의 이상 징후 분석과 조치를 통해 현장에서 바로 적용할 수 있는 진단법으로 설비의 안전을 확보하는데 매우 유용한 기법자료로 활용이 기대된다.

참고문헌

- 1) 임용배, “열과 온도계측 및 열화상에 대한 소고”,

- KIEE Vol.18, No.5, pp. 24~31, 2004.
- 2) 이동영, “파괴 및 비파괴진단 비교분석을 통한 케이블 열화특성평가”, KIEE Vol. 23, No. 6, pp. 104~108, 2009.
 - 3) 김종겸, 박영진, “전압 및 주파수 변동에 따른 콘덴서 열 분포 해석”, 2009 KIEE 추계학술, pp. 33~36, 2009.
 - 4) 유병열, “적외선열화상진단장비” 월간전기 7월호, pp. 76~78, 2008.
 - 5) 김동우, 문현욱, 김향근, 길형준, 김동욱, 이기연, “분전함내 차단기 접속단자의 체결토크 변화에 따른 발열특성 및 화재위험성 분석”, 2009 KIEE 추계학술, pp. 128~129, 2009.
 - 6) 임용배, 정종욱, 정진수, 고원식, “열화상을 이용한 물드변압기 권선표면 진단”, 2005 KIEE 추계학술, pp.107~108, 2005.
 - 7) 지식경제부 “전기재해통계분석”, 제19호, pp. 19, 2010.
 - 8) 이충훈, 박성철, “적외선 온도카메라를 이용한 분할형 전기히터 가열 및 유동조건에 따른 전기히터와 매연필터 표면에서의 온도분포에 관한 연구”, 한국안전학회지, 제23권, 제5호, P9, 2008.