2004년도 대한전기학회 전기물성 • 응용부문회 추계학술대회 논문집 (2004.11.5-11.6)

적외선 모니터링 관측의 와이블 분포해석

임장섭*, 김진국*, 이학현**, 이진†, 이우선‡,
* : 목포해양대학교, ** : 한국전력공사
† : 목포대학교, ‡ : 조선대학교

The Analysis of Weibull Distribution on the Monitering of IRR Camera

Lim Jang-Seob*, Kim Jin-Gook*, Lee Hack-Hyun**, Lee Jin†, Lee Woo-Sun‡
* : Mokpo National Maritime University, ** : Korea Electric Power Corporation
† : Mokpo National University, ‡ : chosun University

Abstract - The conventional testing as IEC-60587 is widely used in surface aging measurement of outside insulator those testing can carry out very short time in Lab testing. Also IEC-60587 testing is able to offer the standard judgement of relative degradation level of out side HV machine.

Therefore it is very useful method compare to previous conventional tracking testing method and effective Lab testing method, But surface discharges(SD) have very complex characteristics of discharge pattern so it is required estimation research to development of precise analysis method.

In recent, the study of IRR Camera is carrying out discover of temperature of power equipment through condition diagnosis and system development of degradation diagnosis.

1. 서 론

전력계통에는 여러 종류의 재료가 도전재료, 자성재료, 및 절연재료로 사용되고 있다. 이 중 옥외용 절연재료는 타 분야의 재료에 비하여 열악한 환경에 노출되어 장기간 사용되고 있다. 이러한 이유로 옥외용 애자는 내아크성, 내 후성, 내열성, 등이 우수한 특성을 갖도록 제작되고 있으나, 산업의 발전으로 인한 전력수요의 급격한 증가는 상기의 특성 외에도 유지, 보수, 소형화, 경량화 및 내환경성 등의 추가적인 기능을 요구하고 있다[1].

절연재료는 현장의 각종 환경오염에 따라 수명 및 열화인자가 복잡하게 변화되므로 이들의 신뢰성이 부족하고, 이들 객관적으로 표현할 수 있는 방법에 대한 연구들도 상당히 미진한 편이다. 그러나 최근 유럽 및 북미를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 절연재료의 수용와 제조기술의 향상으로 더욱더 확대될 것이다.

고분자 비정질 애자는 제작상의 손상, 염진해, 산성우, 자외선, 열적 열화, 기계적 열화 및 전계적 열화 등으로 절연성의 점진적인 특성이 저하되고, 특히 전계적 열화에 의한 국부적인 표면파괴 현상인 트래킹 파괴는 절연물이 열악한 환경에서 장기간 사용되고 표면에 수분, 이온성 물질 및 먼지 등의 불순물에 오염이 이러나 발생하는 현상으로, 최종적으로 절연파괴에 도달하게 된다.

본 연구에서는 PMMA 재질을 이용한 IEC-60587법에서의 트래킹 발생 및 진행과정을 분석하고, 적외선모니터링을 통해 표면열을 관측, 와이블함수를 이용 열화과정을 비교분석 및 각종 가속실험 전후의 특성을 판단하였다.

2. 본 론

2.1 적외선이론

비접촉으로 온도를 측정하고자 할 때는 많은 요소들을 고려하여야 한다. 고려 대상 중에서 대표적인 것들을 나열하게 되면, 우선 방사율(ε), 주변의 온도, 측정거리, 상대습도 등이 있다. 그 중에서도 방사율은 매우 중요해서 요소 중에 하나로 . 방사율은 표면으로부터 방출한 복사에너지의 효율을 측정하는 것이다. 식(1)은 이러한 방사율에 대한 수식을 표현하였다.

$$\varepsilon = E_{object} \,/\, E_{blackbody} \qquad (1)$$

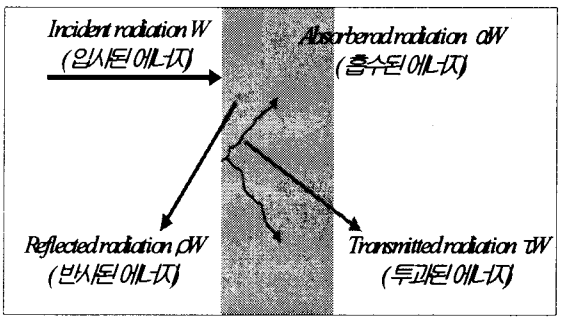


그림 1. Infrared rays theory

적외선 방사카메라는 항시 실 "복사에너지"만을 본다. 따라서 방사, 반사, 투과성 때문에 우리가 열화상을 볼 때에는 표면상(외관상) 온도만이 관측 된다. 적외선 복사는 빛의 복사와 같이 빛의 속도로 전달되고 초점에 모아질 수 있으며 반사가 이루어지고 또한 굴절되기도 한다. 적외선 검출기 또는 시스템들은 파장에 의해 분류되며 단위는 Microns 또는 μ를 사용하며 "장파장"은 8-12 Microns 대역에서 복사되고 "단파장"은 3-5 Microns에서 복사가 이루어진다. 가시부분은 전자 스펙트럼 상에서 0.4-0.78 Microns에 속한다.

2.2 와이블함수

와이블분포(Weibull Distribution)는 신뢰도 계산에서 가장 널리 쓰이는 분포중의 하나로, 모수를 적절히 선택하면 다양한 고장률 형태를 모형화할 수 있다. 마모(Wear-out)와 역마모(Weat-in) 현상을 모형화하는 고장외에도, 특별한 경우로 상수 고장률도 묘사할 수 있다.

형상모수(Shape Parameter)와 특성수명(Characteristic Life)를 갖는 와이블 분포는 고장률이 멱수 법칙의 형식을 취한다고 가정하면 식(2)과 같다.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta}(\frac{t}{\theta})^{\beta-1} \quad (2)$$

체계 고장률의 형태를 고찰하면 고장기전(mechanism)에 대해서 좀더 통찰할 수 있다. 고장률 $\lambda(t)$는 신뢰도 혹은 고장시간의 PDF(확률밀도함수)에 의하여 다음과 같이 정의할 수 있다. 체계가 T=t에서 아직 고장 나지 않았는데 $T < t+dt$ 에서 고장 날 확률을 $\lambda(t)dt$라 하자. 즉 이는 조건부 확률로 t초 후 고장 날 확률과 확률밀도 함수를 대입하여 나타내면 식(3)과 같다.

$$f(t) = -\frac{d}{dt}R(t) \quad (3)$$

CDF(누적분포함수)에서 F(θ) = 0.632라는 것을 유의하면 CDF 도표로부터도 얻을 수 있다. β=1일 때에는 상수 고장률(CFR)에서 해당하는 지수분포가 얻어진다. β <1의 값에 대해서는 고장률은 逆마모(wear-in) 현상의 전형으로 감소하고(DFR), β>1의 값에 대해서는 고장률은 노화영향(aging effect)의 전형으로 증가한다(IFR).

Weibull Distribution은 체계적이거나 극단적인 부분의 값에 대한 통계학 분야에서 이용되며, 많은 연구자들이 그 분야에 맡게 수정하고, 발전시켰다.[3-4] 체계적인 값에 대해서 통계학적인 관계는 연속적인 data X_i 와 $X_i << \cdots << X_n (1 << i << n)$를 가지고 있어야 하며, X_i는 연속적이거나 정렬되어 있어야 한다. 체계적이지 않은 값에 대해서 통계학적인 관계는 다수의 X_i와 최소한의 데이터를 요구한다. 아래의 표1에서는 현재 이용되고 있는 세가지 형태의 통계학적인 분석방법을 보여주고 있다.

표 1. 세가지 접근방법

Distribution	Shape	Range
Weibull	$F(x) = 1-\exp-[\frac{x-\gamma}{\alpha}]^{\beta}$	$\gamma << x < \infty$ $\alpha, \beta > 0$
Gumbel	$F(x) = 1-\exp[-\exp(\frac{x-\gamma}{\alpha})^{\beta}]$	$-\infty << x < \infty$ $\alpha > 0$
Cauchy	$F(x) = 1-\exp[-(-\frac{x-\gamma}{\alpha})]^{-\beta}$	$-\infty << x < \gamma$ $\alpha, \beta > 0$

각각의 Parameter α, β, γ는 척도, 형상, 위치 파라미터를 나타낸다. 2-parameter Weibull Distribution ("Weibull-2")는 가장 대중적인 분포해석이며, 이 경우, Weibull-3의 γ는 0으로 정하며, 본 논문에서는 이러한 2-Parameter Weibull Distribution을 이용한 적외선 모니터링 관측에 의한 온도분포를 해석하고 있다.

$$F(x\ ;\ \alpha,\ \beta,\ \gamma) = 1-\exp-[\frac{x}{\alpha}]^{\beta} \quad (3)$$

$$f(x\ ;\ \alpha,\ \beta) = \frac{\beta}{\alpha}[\frac{x}{\alpha}]^{\beta-1}\ \exp-[\frac{x}{\alpha}]^{\beta} \quad (4)$$

위치파라미터는 정해져 있는 것이 아니라 관심의 대상인 피시험물에 의존한다. 예를 들어 전기 절연 시스템에 인가된 전압이 임계 또는 최저 전압보다 작다면 고장은 절대로 일어나지 않음을 의미하며 부분방전 개시 전압이 있으며, 와이블분포의 특징은 아래와 같다.

1) β>1 : 마모 고장

고장율은 시간 t에 따라 증가한다. β(형상파라미터)가 증가할 때 고장은 갑자기 나타난다. 시험대상이 절연파괴에 이를 정도의 절연 저하를 나타낼 때가 이에 속한다. 이런 이유로 이를 마모형 고장이라 하며, β값이 4이상일 때 고장 확률 함수는 정규분포 함수에 가깝다.

2) β=1 : 우발 고장

순간 고장율은 t에 무관하다. 따라서 시험 대상은 절연 저하 없이 우발 고장을 일으키다. 고장 확률함수는 지수분포함수와 아주 흡사하다.

3) β<1 : 초기 고장

순간 고장율은 t에 따라 감소한다. 고장 발생은 초기에 집중되어 초기고장으로 분류된다.

3. 실험 및 방법

3.1 트래킹파괴

PMMA에서의 표면열화에 있어서 표면트래킹의 진행과정은 다음과 같다. 초기의 PMMA 오손액 접촉각은 대단히 커서 미소발광방전이 재료표면에 미치는 영향이 적다. 따라서, 열화초기에는 극히 국부적인 지점에서의 소규모의 크랙만 생성되게 된다. 열화가 진행되면, 소규모 크랙에서의 국부적인 접촉각 저하가 발생하고, 접촉각의 저하는 미소발광방전과 표면과의 거리를 감소시키는 원인으로 작용하여, 크랙의 진행에 주된 원인이 된다. 이러한 국부적인 부분에서의 크랙 진행은 열화영역Ⅱ에 도달하게 되고, 광범위한 영역에서의 크랙을 유도하게 된다. 기존의 시각적 관측으로는 발견하기 어려운 표면 손상은 고배율의 현미경을 통하여 확인할 수 있지만, 이를 현장에서 적용하기에는 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 적외선방사카메라를 이용한 온도 분포 특성에 대하여 고찰 하였으며, 와이블 함수를 이용한 특성분석이 가능할 것으로 판단된다. 그림2는 적외선 방사카메라를 이용한 온도분포 측정도를 도시하였다.

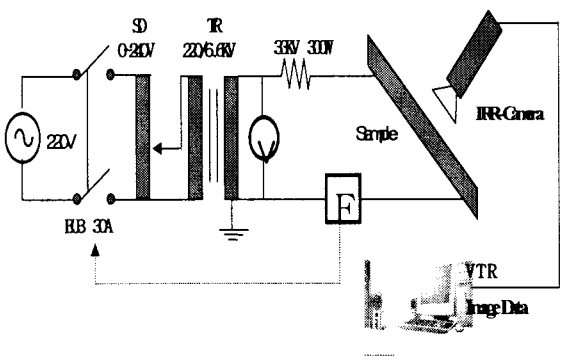


그림. 2. 적외선방사카메라를 이용한 온도분포 측정도

4. 결과 및 고찰

4.1 적외선카메라 관측

실험 개시후 건조대 형성을 시작하는 부분의 열분석은 왼쪽의 상단에 나타나 있고, 다른 3부분은 열화의 진행상태에서 생성된 표면열이 시료의 표면온도를 증대시킴

을 표현한다. 이 결과에서, 적외선방사카메라의 측정이 금속현미경의 단순 측정이나 IEC-60587법보다 트래킹의 진행과정을 보다 효과적으로 고찰할 수 있음을 알 수 있었으며, IEC-60587법을 이용한 열화과정과 IRR 카메라의 온도분포의 상관성에서 고찰된 결과를 도시한 것으로, X축은 열화단계(Aging step)이고, Y축은 온도이다.

열화의 중기가 열화의 초기보다 낮은 온도분포를 보이고 있는 것은 표면트래킹에 온도분포가 크랙의 진행과 밀접한 관계를 가지고 있는 것을 의미하고, 이것은 표면에 건조대가 형성되기 때문이다. 즉 국부적인 크랙의 진행에서는 급격한 온도상승이 고찰되지만, 일정한 크랙의 형성후 오손액 증발에 의한 건조대의 생성으로 일시적인 온도분포의 정체가 나타나는 것이다.

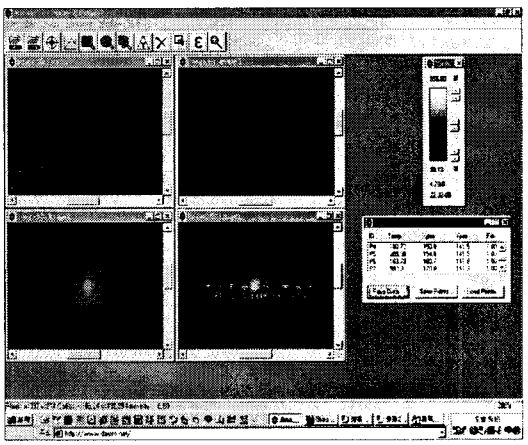


그림 3. 적외선방사카메라를 이용한 온도분포 관측

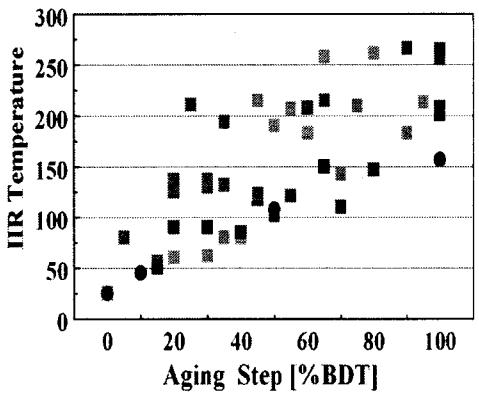


그림 4. 적외선방사카메라관측 온도분포

열화단계는 파괴시간을 백분율한 비율로서, 이와같이 열화단계로 구분하는 것은, 대부분의 열화진행이 통계적인 복잡성 때문에 상대적 비교가 어렵기 때문이다. 즉, 2[Hr]의 파괴수명을 가지고있는 시스템에서의 1[Hr]열화는 50[%]의 열화가 진행된 것으로 추론된다.

그림 4는 방사카메라 온도분포는 거의 근사적인 선형성을 보이고 있으며, 상기 조건에서 200[℃]를 열화중기로 판정하고 있는 근거를 그림에서 확인할 수 있다. 그러나 중간영역에서 있어서의 온도분포는 크랙의 진행과 밀접한 상관관계를 가지고 있으므로 일부의 구간에서 갑작스런 온도 상승이 관찰되기도 하였다.

4.2 와이블 분포해석

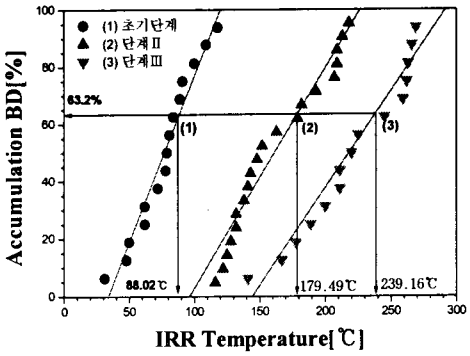
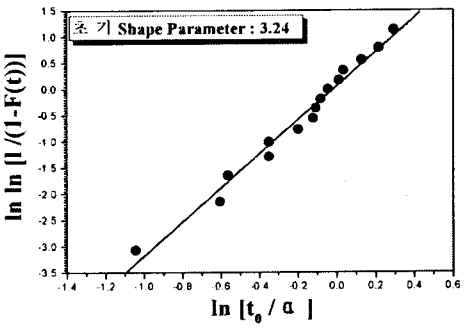
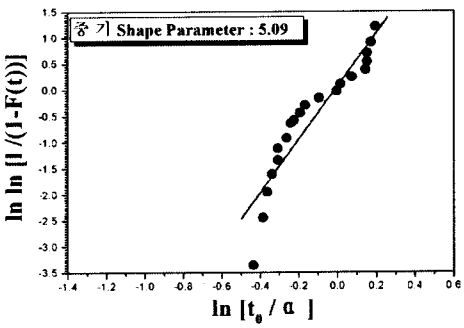


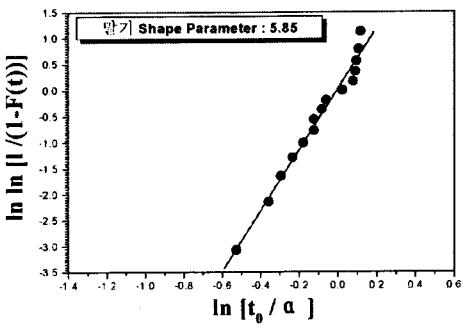
그림 5. 각 단계별 척도모수(Measumenting Parameter)



a) 초기단계의 형상모수



b) 단계Ⅱ의 형상모수



c) 단계Ⅲ의 형상모수

그림 6. 각 단계별 형상모수(Shape Parameter)

시료에 때한 IRR 카메라를 이용한 온도분포를 측정하여 척도파라미터와 형상 파라미터를 구하였다. 척도파라미터(Measuring Parameter)는 누적파괴확률에 따른 IRR 카메라의 온도분포를 도시하여 63.2%의 값을 표시한다. 척도파라미터의 도시값에 따른 초기단계와 열화단계별 시료의 온도분포 변화를 확인할 수 있다.

형상파라미터(Shape Parameter)는 와이블분포 방정식의 변형으로 각 시료의 형상파라미터를 구할수 있다. 위에서 구해진 형상과 척도파라미터를 이용한 와이블분포 함수 대입으로 각 단계별 IRR 카메라의 온도 분포를 도시한다.

표 2. 와이블 분포

$$F(t)=1-\exp[-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}]$$

초기단계		중기단계		말기단계	
31	0.0334	116	0.1027	141	0.0444
48	0.1308	122	0.1307	167	0.1151
50	0.1478	125	0.1466	178	0.1628
62	0.2747	128	0.1638	189	0.2230
62	0.2747	132	0.1888	200	0.2962
72	0.4064	132	0.1888	211	0.3815
78	0.4913	138	0.2307	211	0.3815
79	0.5056	141	0.2537	220	0.4585
81	0.5341	143	0.2698	225	0.5032
84	0.5766	148	0.3124	245	06838
89	0.6453	152	0.3489	249	0.7968
91	0.6714	163	0.4579	262	0.8182
100	0.7795	179	0.6270	263	0.8285
109	0.8645	182	0.6581	266	0.8448
118	0.9246	193	0.7646	269	0.8632
		207	0.8733		
		209	0.8858		
		209	0.8858		
		213	0.9093		
		218	0.9320		

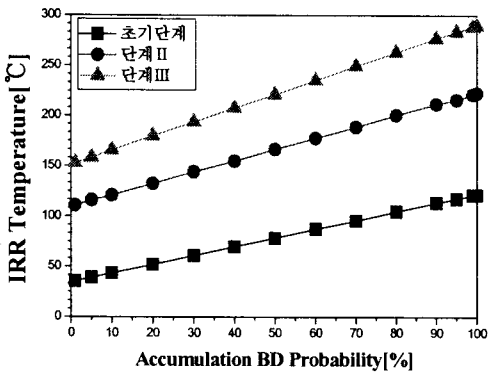


그림 7. 파괴 확률에 따른 적외선 온도분포

위에서 구해진 데이터를 가지고 파괴확률에 따른 수명예측값을 1%~99.99%까지 파괴수명을 예측하여 도시한다. 와이블 함수에서 보이듯 형상파라메터와 적외선카메라의 온도분포의 형상에 따른 고장률의 척도를 확인할 수 있다.

5. 결 론

실용에서 표면온도를 측정하면, 제조년도와 사용 장소에 따른 수명의 예측이 가능함을 의미하고, 광범위한 자료를 수집하면 전력설비의 교체시기를 결정할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구를 통한 적외선 적외선방사카메라의 기초연구 및 현장운용 가능성은 다음과 같다.

1. 트래킹 열화는 표면온도의 고찰을 통하여 단계별 진전특성을 감지할 수 있으며, PMMA는 약 180[℃]의 온도를 절연파괴의 중간 영역으로 추정할 수 있다.

2. 온도분포의 고찰로 열화의 국부적인 집중과 급진적 진행에 대한 예측과 감지가 가능하며, 이를 통하여 절연설비의 제작형태와 표면의 미세 결정구조를 평가할 수 있다.

3. 적외선방사카메라 분석과 트래킹 누설전류에 관한 복합적인 연구를 통하여, 시료의 급진적인 트래킹 파괴에 관한 예측이 가능하였다.

4. Weibull Distribution함수를 이용한 분석 및 복합적인 연구가 진행되었고 시료의 상대적 평가가 가능하며 적외선 방사카메라에 의한 시각적 평가를 확인시킬 수 있는 근거를 마련할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1]M. A. R. M. Fermando, "Leakage Currents on Non-ceramic Insulators and Materials", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 660~667(1999).

[2]IEC Publication 60587, Fist Edition, "Test method for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions", (1977).

[3]Tatsuo Takada, "Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distribution in Dielectrics", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 519~547(1999)

[4]R. J. Chang and Linas Mazeika, "Analysis of electrical activity associated with inclined-plane tracking and erosion of insulating materials", IEEE Trans. DEI Vol. 7 No. 3, pp. 394~400(2000).

[5]N. Yoshimura, "Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulator", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 632~650(1999).

[6]T. Kikuchi, "Survey on the Use of Non-ceramic Composite insulators", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 548~556(1999).

[7]Liang Xidong, "Development of composite unsulatior in China", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 586~594(1999).

[8]Kunikazu Lzumi, "Applications of Polymeric Outdoor Insulation in Japan", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No. 5, pp. 595~604(1999).

[9]S. Kumagai and N. Yoshmura, "Tracking and Erosion of HTV silicone Rubber and Suppression Mechanism of ATH" IEEE Trans, DEI Vol. 8 No. 2, pp. 203~211(2001).