

## 표면방전 현상의 적외선 카메라 관측에 관한 연구

임장섭\*, 김진국\*, 김현중\*, 이우선\*\*, 이진†, 김덕근†, 이학현¶

목포해양대학교, 조선대학교, 목포대학교, 한국전기안전공사, 한국전력공사

### A Study on the Observation of IRR Camera in Surface Discharge Image

Lim. Jang-Seob\*, Kim. Jin-Gook\*, Kim. Hyun-Jong,

Lee. Jin\*\*, Lee. Woo-Sun†, Kim. Duck-Keun‡, Lee. Hack-Hyun¶

\* : Mok-Po Maritime Univ. \*\* : Mok-Po Univ. † : Chosun Univ.

‡ : Korea Electrical Safety Corp. ¶ : Korea Electrical Power Comp.

#### 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.

**Key Words** : Surface Discharges(SD : 표면방전), IRR-Camera(적외선 카메라), Scintillation Discharge(미소발광방전)

## 1. 서 론

전력계통에는 여러 종류의 재료가 도전재료, 자성 재료 및 절연재료 등으로 사용되고 있다. 이중 옥외용 절연재료는 타 분야의 재료에 비하여 열악한 환경에 노출되어 장기간 사용되고 있다. 이러한 이유로 옥외용 설비의 내야크성, 내후성, 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.

절연재료는 현장의 각종 오염환경에 따라 수명 및 열화인자가 복잡하게 변화되므로 이들의 신뢰성이 부족하고, 이를 객관적으로 표현할 수 있는 방법에 대한 연구들도 상당히 미진한 편이다. 그러나 최근 유럽 및 북미를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 연구 결과는 절연재료의 수요와 제조기술의 개발 향상에 따라 더욱 확대될 것이다.

트래킹 파괴는 먼지, 습기, 유분 및 강우 등 여러 가지 표면의 오손이 원인으로 발표되고 있다. 특히 주된 요인으로 연해로 인한 원인과 화석연료의 연소에 의한 유황산화물(SOx)이나 질소산화물(NOx) 등이 대기중에 멀물다가 비의 형태로 강우하여 피해를 주는 산성비로서, 이들의 영향이 심각하게 대두되고 있다.

트래킹 현상을 연구하는 시험법으로 IEC법, ASTM법, DIN법 및 Dust & Fog법 등 20여 종류의 시험법이 제안되어 있으나 결정적이라고 말할 방법이 없다. 이는 하나의 가속시험법에 지나지 않는 장치규정으로 폴리머 재료에 관한 실제의 사용 및 환경 조건을 수용할 수 없기 때문이고, 트래킹 파괴 양상의 복잡성과 그것을 초래하는 인자의 다양성을 실험실에서 재현하는 것이 곤란하기 때문이다.

본 연구에서는 PMMA 재질을 이용하여 IEC-60587법에서의 트래킹 발생 및 진행 과정을 분석하고 Weibull 함수를 이용하여 평가하였다. 특히 적외선방사카메라로 표면열을 측정하여 열화과정을 비교분석 및 각종 가속실험 전후의 특성을 판단하고자 한다. 또한 장기간의 신뢰성 평가 및 국산화로 인한 기술적 수준을 상대적으로 표현할 수 있는 방법 및 측정기술을 제안하고자 한다.

## 2. 이 론

### 2-1. 적외선 이론

비접촉으로 온도를 측정하고자 할 때는 많은 요소들을 고려하여야 한다. 고려 대상중에서 대표적인 것들을 나열하게 되면, 우선 방사율( $\epsilon$ ), 주변의 온도, 측정거리, 상대습도 등이 있다. 그 중에서도 방사

율은 매우 중요해서 자세히 기술 하고자 한다. 방사율은 표면으로부터 방출한 복사 에너지의 효율을 측정하는 것이다. 이를 수학적으로 표현하자면 다음과 같다.

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

이것은 곧 흑체로부터 복사된 에너지에 대한 피사체로부터 복사된 에너지의 비율을 나타낸 것이다. (단, 같은 온도, 파장 조건) 물체가 방사율이 높다고 하는 것은 흡수율 또한 높다는 것을 의미한다.

### 2-2. 와이불 함수(Weibull Distribution)

와이불 분포(Weibull Distribution)는 신뢰도 계산에서 가장 널리 쓰이는 분포중의 하나로, 모수를 적절히 선택하면 다양한 고장률 형태를 모형화할 수 있다. 마모(Wear-out)와 역마모(Wear-in) 현상을 모형화하는 고장외에도, 특별한 경우로 상수 고장률도 묘사할 수 있다. 형상모수(Shape Parameter)와 특성수명(Characteristic Life)를 갖는 와이불 분포는 고장률이 멱수 법칙의 형식을 취한다고 가정하면 식(1)과 같다.

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

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  $T=t$ 에서 아직 고장나지 않았는데  $T < t + dt$ 에서 고장날 확률을  $\lambda(t)dt$ 라 하자. 즉 이는 조건부 확률로  $t$ 초후 고장날 확률과 확률밀도함수를 대입하여 나타내면 식(2)와 같다.

$$f(t) = -\frac{d}{dt} R(t) \quad (2)$$

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

형상모수(shape parameter)  $\beta$ 와 특성수명(characteristic life)  $\theta$ 를 갖는 와이불 분포(Weibull Distribution)의 누적분포함수(CDF)를 이항하고 양변에 자연로그를 두 번 취하면 식(3)과 같으면 이를 이용한 와이불 함수(Weibull Distribution)의 평가를 측정한다.

$$\ln \ln \left[ \frac{1}{1-F(t)} \right] = \beta \ln t - \beta \ln \theta \quad (3)$$

### 2-3. 트래킹과피 현상

트래킹과피 현상은 다음과 같이 두 가지 형식으로 나눌 수 있다.

- 고체절연물이 오손되어 최저과피전압보다 낮은 전압에서 과피가 발생하는 것이다. 이 과피는 기중방전을 동반하지 않으며, 절연물 표면의 전기전도는 전해작용으로 활발히 진행되고, 결국 탄화도전

로를 발생시켜 파괴에 이른다.

- 절연물의 표면에 기중방전을 수반하는 형태이다. 절연물의 표면이 전해액에 오손되거나 무기질과 섬유질등의 먼지가 침적되어 수분을 취하면 표면에 누설전류가 흘러 열이 발생한다.

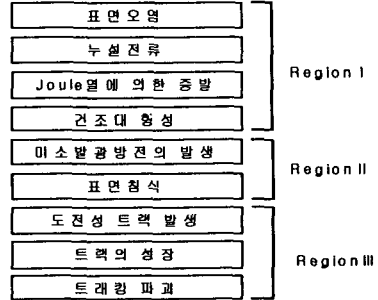


그림 1. 트래킹과피과정

트래킹은 전기적 스트레스와 침적물의 복합적인 요인으로 발생하며 트래킹에 의한 절연파괴의 과정은 다음의 세 단계로 구분된다.

제 1 단계 : 표면의 오염에 의한 도전로의 형성.

- 절연재료 표면의 침식은 습기와 해안지역의 염분, 무기질, 섬유질 및 침적성 가스분위기 등 여러 가지 침식인자들에 의해 표면이 침식되어 도전로가 형성되는 과정이다.

제 2 단계 : 도전로의 분단과 미소발광방전의 발생.

- 침식된 표면 즉 도전로를 통하여 누설전류가 흐르고 이 때 발생한 주열로 건조대가 형성되어 도전로가 분단된다. 분단된 도전로 사이의 전위차로 인하여 미소발광방전이 발생한다. 이 시점은 방전에 의한 도전성 잔여물의 형성과정이다.

제 3 단계 : 방전에 의한 표면의 탄화개시 및 트랙의 생성.

- 도전로의 분단점에서 미소발광방전이 반복되면 방전의 열에너지에 의해 재료표면이 탄화되거나 휘발됨으로서 도전성 트랙이 생성된다.

## 3. 실험 및 방법

### 3-1. PMMA에서의 표면열화

Track과 표면방전의 관찰이 비교적 쉬운 PMMA로 열화과정을 수행한 다음, 고분자 애자의 열화단계를 다음과 같이 III단계로 구분하였다.

영역 I : 초음파방사 등을 수반하는 열화에 의한 규칙적인 표면침식의 경우로서, 전자의 트랩이나 이온의 이론적 고찰보다는 표면침식으로 유도되는 국부적인 표면 고전계로 인한 미소 발광방전 과정.

영역 II : 열적 열화로 폴리머의 표면에 마이크로 크랙(Micro-cracks)이 형성되면 표면방전이 집중하게 되고, 방전의 집중으로 인하여 형성된 표면의 크랙이 다시 방전의 가속을 일으키는 트랙 형성과정.

영역 III : 피트 말단부 스트레스가 일부 마이크로론의

국부적인 진성 절연파괴 스트레스까지 상승되며, 이때 마이크론 사이의 일정거리에서 절연파괴가 일어나고, 새로운 전계집중을 형성하여, 절연파괴에 이르는 과정.

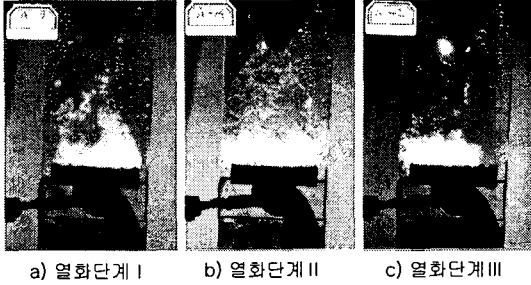


그림 2. 3단계 트래킹 진전과정.

### 3-2. 와이블 함수식 유도

확률변수 시간  $t$ 에 대해서 확률밀도함수  $f(t)$ 를 가지고 있는 한 시스템을 가정한다. 확률밀도함수에서 신뢰도 함수 및 누적분포함수를 정의하고 고장률함수는 식(1)으로 정의한다. 여기서 확률밀도함수를  $f(t) = -dR(t)/dt$ 라 하며 이를 적분하면  $R(0) = 1$ 의 관계에서 식(2)이 된다. 따라서 수명 분포의 확률밀도함수는  $f(t)$ 는 식(2)의 양변을 미분하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^T \lambda(t)dt\right\} \quad (2-1)$$

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^T f(t)dt\right\}, \quad (2-2)$$

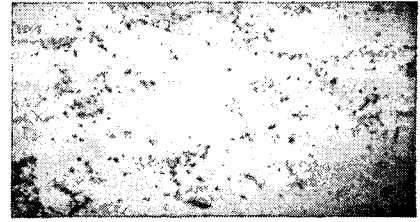
$$f(t) = \lambda(t)\exp\left\{-\int_0^T \lambda(t)dt\right\} \quad (3)$$

## 4. 결과 및 고찰

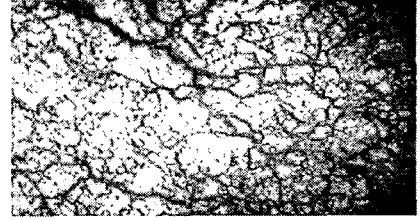
### 4-1. IRR 카메라를 이용한 고찰

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 표면파의 거리를 감소시키는 원인으로 작용하여, 크랙의 진행에 주된 원인이 된다.

이러한 국부적인 부분에서의 크랙 진행은 열화영역 II에 도달하게 되고, 광범위한 영역에서의 크랙을 유도하게 된다. 기존의 시각적 관측으로는 발견하기 어려운 표면손상은 고배율의 현미경을 통하여 확인할 수 있지만, 이를 현장에서 적용하기에는 어려운 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 적외선방사카메라를 이용한 온도 분포특성에 관한 고찰의 결과는 수명예측이 표면방전 및 표면열화를 통하여 가능함을 알 수 있었다.



a) 초기단계의 PMMA 시료의 표면( $\times 200,5.7$ [kV])



b) 영역II 단계의 PMMA 시료의 표면( $\times 80,5.7$ [kV])

그림 3. IRR Camera에 의한 PMMA 표면관측.

### 4-2. 척도파라미터(Measuring parameter)

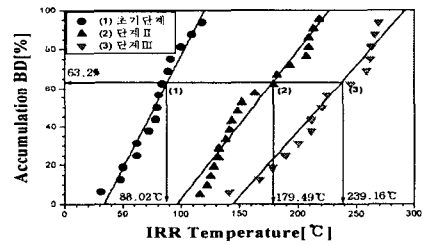
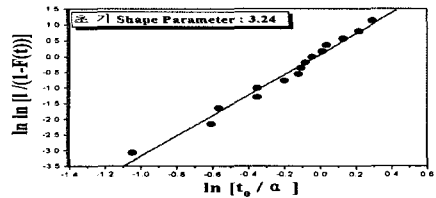
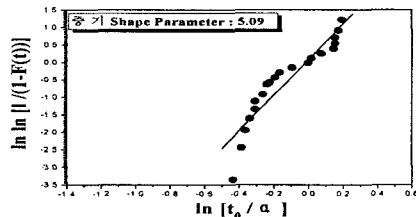


그림 4. 각 단계별 척도모수.

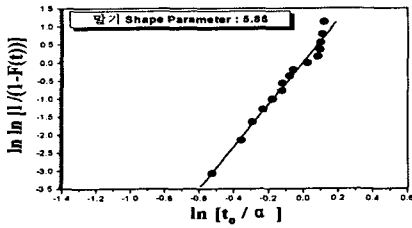
### 4-3. 형상파라미터(Shape Parameter)



a) 초기단계의 형상모수



b) 단계II의 형상모수



c) 단계Ⅲ의 형상모수  
그림 5. 각 단계별 형상모수.

시료에 대한 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 와이불분포 방정식의 변형으로 각 시료의 형상파라미터를 구할 수 있다. 위에서 구해진 형상과 척도파라미터를 이용한 와이불분포 함수 대입으로 각 단계별 IRR 카메라의 온도 분포를 도시한다.

#### 4-4. 와이불분포 함수

Table 1. Weibull distribution calculation data

$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$					
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	0.6838
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		

위에서 구해진 데이터를 가지고 파괴확률에 따른 수명 예측값을 1%~99.99%까지 파괴수명을 예측하여 도시한다. 와이불 함수에서 보이듯 형상파라미터와 적외선카메라의 온도분포의 형상에 따른 고장률의 척도를 확인할 수 있다.

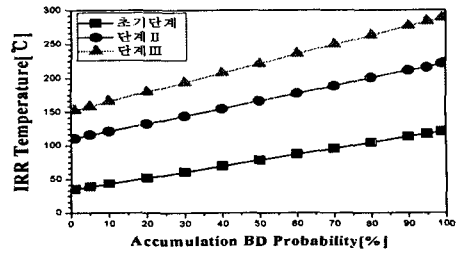


그림 6. 파괴 확률에 따른 적외선 온도분포

## 5. 결론

상기의 메카니즘은 위의 결과에서 확인할 수 있었다. 이는 표면구조가 제품의 신뢰성에 영향을 미치고, 표면의 방전온도에서 시료의 방전 과정을 예측할 수 있음을 보여준다. 따라서, 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 기초 연구 및 현장운용 가능성은 다음과 같다.

1. 트래킹 열화는 표면온도의 고찰을 통하여 단계별 진전특성을 감지할 수 있으며, PMMA는 약 180 [°C]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. 제품의 표면이 균일하면, 트래킹의 발생이 집중되지 않고, 그 결과에서 제품의 장기적인 신뢰성을 예측할 수 있다.
4. 적외선방사카메라 분석과 트래킹 누설전류에 관한 복합적인 연구를 통하여, 시료의 급진적인 트래킹 파괴에 관한 예측이 가능하였다.

## [REFERENCE]

- [1]. Lim. Jang-Seob. CIGRE WG15-108, 1998.
- [2]. Lim. Jang-Seob, "Aging Recognition of Partial Discharge Patterns Using Neural Network and Semi-Fractal Dimension", Proceedings of the 5th ICPADM, Vol.1, pp290 - 293,1997.
- [3]. N. Yoshimura, " Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulator", IEEE Trans. DEI Vol. 6 No, 5, pp. 632~650(1999)
- [4]. Mukden Uger, " Analyzing and Modeling the 2D Surface Tracking Patterns of Polymeric Insulation Materials", IEEE Trans. DEI Vol. 5 No, 6, pp. 824~829(1998)
- [5]. IEC Publication 60587, First Edition, "Test Method for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials used under Severe Ambient Conditions", (1977).