

방전발생 빈도해석을 통한 XLPE 절연진단

김탁용, 신종열*, 이수원*, 홍진웅
 광운대학교, *삼육의명대학, **철도전문대학

XLPE Diagnostics according to Analysis of Discharge Number

Tag-Yong Kim, Jong-Yeol Shin, Soo-Woon Lee, Jin-Woong Hong
 Kwangwoon Univ., Samyook College, Korea National Road Rail College

Abstract - 본 논문은 XLPE 절연재료의 보이드에 따른 방전빈도를 와이블 함수로 조사하였으며, 또한 방전빈도와 결합에 대한 상관관계를 와이블 해석을 이용한 진단 시스템을 제안하고 있다. 인가전압은 교류 60[Hz]를 방전 개시전압을 기점으로 1[μ]씩 승압하였으며, 전하량이 512[pC] 이상이 발생하면 검출한도를 초과하므로 실험을 멈추었다. 그 결과 보이드 시료에서 큰 형태파라미터값을 나타냄을 확인하였다.

2. 시료 및 실험방법

시료는 전기적 특성이 우수한 초고압절연케이블의 XLPE층을 0.8[mm]로 슬라이싱 한 후 100×100 [mm] 크기로 절단한 시편을 전극사이에 2층으로 삽입하였다. 전극은 평판 대 평판 전극을 이용하였으며, 연면방전을 억제하기 위해 전극주변은 에폭시로 몰딩하였다. 내부보이드는 직경 2[mm ϕ]인 원통구조로 가공하였으며, 상부에 위치하도록 하였다. 그림 1은 전극의 형상 및 시편의 구조를 나타내고 있다.

1. 서 론

최근 전력수요의 증대에 따른 전력케이블이나 전력기기 등의 초고압화·대용량화가 요구되고, 설비시설의 감소를 위한 변전기기 등의 소형화를 요구하고 있다. 따라서 전기절연체에 전기적 stress는 증가하였으며, 전기절연열화 및 절연파괴에 의한 사고위험성도 점점 증가되고 있다^[1]. 또한 고도정보화 사회로 순간정전이 무시할 수 없는 중요한 문제로 대두되고 있으며, 안전한 전력급급이 요구되어지고 있다.

이러한 문제점의 해결방법 중 절연재료의 조기진단 및 절연성능 측정은 매우 중요한 요소로 대두되어지고 있다.

전기절연재료의 절연열화 및 절연파괴현상은 수많은 요인에 의해서 발생되면, 그 발생형태도 매우 다양한 형태로 나타나고 있다. 그 중에서 인가된 고전압으로 절연체 내부에서 누설전류가 발생 (부분방전)하며, 발생한 부분방전에 의해 트리라고 불리는 미세한 탄화물이 형성되는 현상을 트리잉 현상이라고 하며, 이 현상은 절연체 수명을 좌우하는 매우 중요한 성분이기도 하다^{[1][2][3]}. 이러한 누설전류는 절연체 내부에 결합이 존재하면 그 진행속도가 급격하게 증가하여 절연재료의 수명을 단축시켜 예기치 못하는 사고유발이 발생할 수 있다.

현재 내부결함에 의한 진단검사를 위해 절연체 내부에 인공 보이드를 삽입하여 절연파괴 및 방전전하량을 검출하여 뉴럴네트워크를 이용한 수명예측을 시도하고 있다. 그러나 뉴럴네트워크의 경우 비슷한 경향에 대한 판정이 매우 모호한 단점으로 신뢰성 확보에 매우 어려운 점이 있다. 또한 부분방전은 동일한 실험 조건에서도 매우 불규칙적으로 발생하므로 진단에 상당히 곤란한 점이 많이 있다. 그로인해 불규칙한 통계치러로 이용되는 확률분포로 와이블 분포, 정규분포, 지수분포, 감마분포 등 여러 가지가 분포함수를 이용한 수명평가방법으로 이용되고 있으며, 그 중 고전압 기기의 열화통계 및 고장 진단을 위해서는 와이블 분포가 많이 사용되고 있다^{[4][5]}.

본 논문에서는 Crosslink polyethylene (XLPE) 절연층 내부에 인공 보이드가 존재 시 인가전압에 따른 $\phi-q-n$ 분포의 패턴형상을 해석하고, 10초동안 발생한 방전발생수를 와이블 해석함으로 다양한 전기기기의 절연진단 시스템 개발에 방향을 제시하도록 한다.

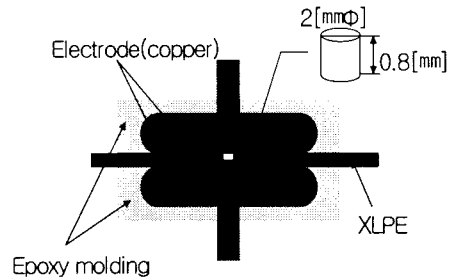


Fig.1. Shape of electrode and void

Table 1. specimen

specimen		voltage [W]
N series	N1	6
	N2	8
	N3	10
A series	A1	4
	A2	5
	A3	6
	A4	7

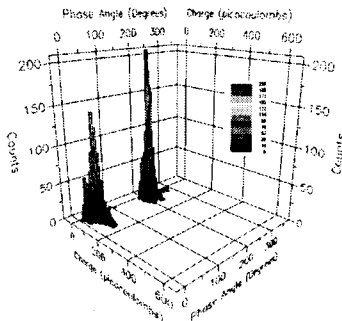
N series : XLPE layer-XLPE layer
 A series : air layer-XLPE layer

전하량은 AVO. co.에서 제작된 부분방전 측정 장치를 사용하였고, 인가전압은 교류전압(60[Hz])을 초기방전발생전압부터 step법으로 0.5[W] 승압시켰다. 방전검출감도

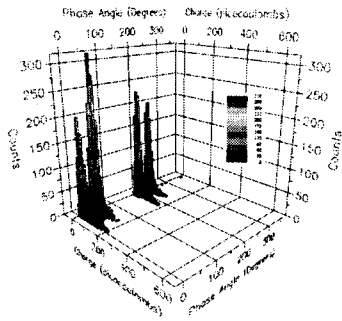
는 Calibration을 50[pC](slope=8.333)으로 세팅하였으므로 방전전량이 533.3[pC]이상인 방전이 발생하면 방전 전하량을 검출할 수 없으므로 실험을 중지하였다. 또한, 데이터는 전압인가 후 10[sec] (600[cycle])동안 발생하는 전하량을 누적한 값으로 하였다. 동일 실험을 10회 이상 실시하였으며, 그 중 최대 및 최소값을 제외한 나머지 데이터를 이용하여 형상파라미터를 구했다. 표 1은 인가 전압 및 시편 종류를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

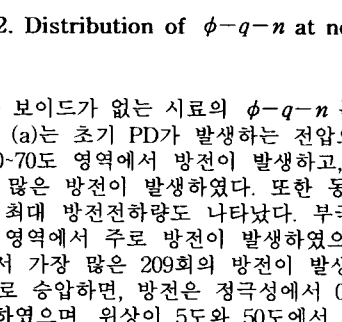
3.1 $\phi-q-n$ 분포



(a) 5 [W]



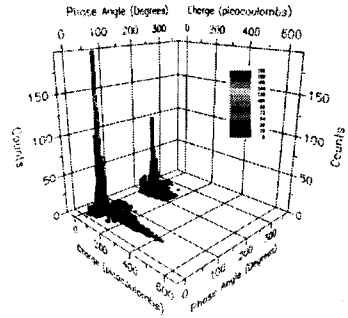
(b) 6 [W]



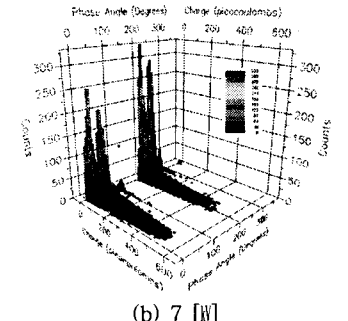
(b) 10 [W]

Fig. 2. Distribution of $\phi-q-n$ at no void

그림 2는 보이드가 없는 시료의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. (a)는 초기 PD가 발생하는 전압으로 방전은 정극성은 0-70도 영역에서 방전이 발생하고, 50도 영역에서 가장 많은 방전이 발생하였다. 또한 동일영역에서 150[pC]의 최대 방전전하량도 나타났다. 부극성의 경우 180-250도 영역에서 주로 방전이 발생하였으며, 약 225도 영역에서 가장 많은 209회의 방전이 발생하였다. 전압을 10[W]로 승압하면, 방전은 정극성에서 0-85도 영역으로 증가하였으며, 위상이 5도와 50도에서 210 및 180의 방전이 발생함을 확인하였다. 부극성에서는 180-260도 영역에서 방전이 주로 발생하였으나, 190도와 225도 영역에서 방전빈도 190 및 150이 발생함을 확인하였다. 전압의 증가로 위상에 따른 방전발생영역이 두 그룹으로 늘어남을 확인할 수 있었다.



(a) 5 [W]



(b) 7 [W]

Fig. 3. Distribution of $\phi-q-n$ at air void

그림 3은 보이드가 있는 시료의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다.

그림 (a)는 5[W]전압을 인가한 경우로 정극성 영역은 5-115도, 부극성 영역에서는 180-300도 영역으로 매우 넓은 위상에서 방전이 발생함을 볼 수 있었으며, 방전전하량도 정극성의 경우 400[pC]이상의 전하량을 나타내었으며, 방전 빈도는 50도 영역에서 최대인 198방전이 발생하였다. 부극성의 경우 최대방전전하량이 200[pC], 최대 방전빈도가 200이므로 보이드 시료에서 초기 방전발생 특성은 정극성에 비해 낮은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 전압의 증가시키면 정극성의 경우 0-115도 영역으로 방전발생은 거의 비슷한 영역에서 나타났지만, 방전전하량은 500[pC]이상의 값을 가지는 방전이 다수 발생하였으며, 발생빈도도 15도 영역에서 약 250, 50도 영역에서 약 180의 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 또한 부극성의 경우 180-300도 영역으로 정극성과 동일하게 방전발생영역은 낮은 전압(5[W])과 거의 비슷한 영역에서 발생하였지만 방전전하량은 최대 500[pC]이상의 값을 나타내었다. 또한 발생빈도가 190도에서 333, 225도 영역에서 방전이 약 280 발생함을 볼 수 있었다. 즉 보이드 시료는 전압의 상승에 따라 방전발생영역의 변화의 거의 없었으나, 방전전하량이 급속히 증가하고, 방전 발생빈도수의 증가를 볼 수 있었다. 또한, 전압의 증가에 따라 방전이 다수 발생하는 영역이 더 늘어남을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 $\phi-q-n$ 분포의 경우 수치값이 매우 다양하게 나타남으로 그 자체로서의 진단에 적용하기에는 매우 어려운 점이 많이 있었다. 이를 정량적인 수치로 해석하기 위해 방전 발생빈도에 대한 와이불 해석을 통해 정량적인 패턴을 작성해 보았다.

3.2 Weibull 분포

검출된 10개의 데이터를 검토하기 위하여 2-para

meter 와이블 함수를 이용하여, 전압변화에 따른 누적파괴확률($F(n)$)은

$$F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{n_s}\right)^m\right] \quad (1)$$

- 단, n_s : 척도파라미터(누적파괴 확률이 63.2[%]에 해당하는 평균적인 파괴빈도에 대응하는 값)
 m : 형상파라미터(누적파괴확률분포의 분포형상을 결정하는 파라미터로서 m 이 커짐에 따라 흐트러짐이 작은 분포를 의미한다.)

이다. 식 (1)을 변형하면

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(n)} \right] = m \ln \left[\frac{n}{n_s} \right] \quad (2)$$

을 얻을 수 있으며, 이를 간단히 표현하면

$$y = m x \quad (3)$$

$$\text{단, } y = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(n)} \right], \quad x = \ln \left[\frac{n}{n_s} \right]$$

로 나타낼 수 있다. 즉 식 (3)에서 직선의 기울기가 형상파라미터(m)를 나타내고 있다.

표 1은 전압변화에 따른 각 시료의 척도파라미터를 나타낸 것이다.

Table 2. Scaleparameter(n_s)ofspecimens

	voltage [W]	PN	NN	TN
N series	N1	2,628.59	2,976.65	5,603.67
	N2	2,627.56	3,048.24	5,678.39
	N3	2,658.68	3,393.52	6,018.65
A series	A1	513.68	184.82	605.42
	A2	2,530.41	1,855.78	4,241.39
	A3	6,279.85	7,395.83	13,651.09
	A4	9,844.44	9,740.83	19,501.47

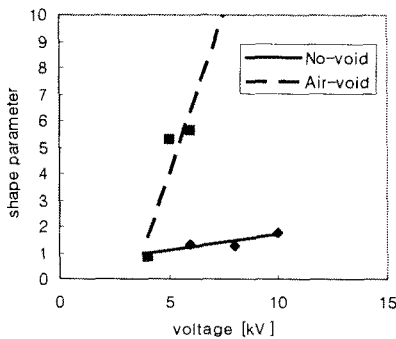


Fig.6. Shapeparameter(m)according to voltage variation

그림 6는 전압 변화에 따른 형상파라미터의 변화를 나타낸 그래프이다.

무보이드시료(N series)의 경우 6[W]에서 형상파라미터가 정극성에서 1.4212, 부극성에서 1.1756을 나타냈으며, 전체 방전발생빈도에 대한 형상파라미터는 1.3068을 값을 나타내었다. 또한 전압의 증가에 따라 10[W]에서 정극성은 1.6021, 부극성은 1.9025를 나타내었으며, 전체적으로 1.7849의 값을 나타내었다. 전압의 증가에 따라 전압의 증가로 형상파라미터의 값은 미소한 값으로 증가하였

으나, 모든 2이하의 값을 나타내고 있었음을 확인하였다.

일반적으로 와이블 분포에서 형상파라미터 값에 따라 X의 확률밀도함수(probability density function)의 모양이 변하기 때문에 매우 중요한 파라미터이다. 일반적으로 $m=2$ 인 경우를 램리분포(Rayleigh distribution)라고 하는데, 이를 기준으로 m 이 작아지면 지수분포함수를, m 이 커지면 정규분포함수를 나타낸다. 특히 $m=1$ 인 경우가 완전한 지수분포의 확률밀도함수를 나타내므로, 보이드가 없을 때 방전발생빈도는 지수분포를 형성하고 있음을 알 수 있다.

보이드 시료(A series)의 경우, 5[W]에서 형상파라미터는 정극성에서 5.0174, 부극성에서 3.5091, 전체 5.3375의 값을 나타내었으며, 전압을 7[W]로 승압하면 정극성은 5.5460, 부극성은 8.0636, 전체 6.9913의 값을 나타내었다. 보이드 시료의 경우, 전압의 증가에 따라 형상파라미터가 5에서 7로 매우 높은 값을 나타내었는데, 일반적으로 $m>2$ 이상의 값을 나타내면 데이터 분포가 정규분포로 나타남을 의미하므로 보이드가 있을 때에는 전압의 증가에 따라 정규분포형태의 확률밀도 함수를 나타내고 있다고 할 수 있다. 이러한 현상은 보이드가 있으므로 인해서 마찰적인 트리 성장특성을 나타내고, 우발적인 방전 현상이 아니라 지속적이고 규칙적인 방전이 발생함을 의미한다고 생각된다.

3. 결 론

방전발생 빈도통계에 의한 XLPE 절연진단 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전압 증가에 따른 $\phi-q-n$ 분포는 무보이드 및 공기보이드 시료 모두 최대 방전발생빈도가 정극성 및 부극성영역에서 초기에는 한 위상에서 집중적으로 발생하다가 두 위상에서 집중적으로 발생함을 볼 수 있었으며, 최대 방전전하량도 동일한 형태를 나타내었다.
- (2) 파괴확률이 63.2[%]를 나타내는 척도파라미터의 경우 무보이드 시료에 비해 보이드시료에서 전압의 증가에 따른 급속한 증가를 볼 수 있었다.
- (3) Weibull 분포해석결과 보이드시료의 경우 전압 증가에 따라 방전발생빈도가 정규분포를 나타내고, 무보이드 시료의 경우 지수분포를 나타냄을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] L.A. Dissado, J.C. Fothergill "Electrical Degradation and breakdown in polymers" Peter Peregrinus Ltd. pp.117-198, 1992.
- [2] Kuniharu IMAI etc., "Analysis of Tree Initiation with Weibull Distribution and the Influence of Various Factors", T.IEE Japan. Vol.120-A, No.5, pp.645-650, 2000.
- [3] 北川, "信頼性工学入門", コロナ社, pp.67-75, 1997.
- [4] Hideo Hirose, "Statistical Consideration on the V-t Characteristic Model and the Weibull Probability Distribution", T. IEE Japan, Vol. 116-A, No. 10, pp.840-848, 1996.
- [5] 河村 達雄, 田中 祀捷, "電気設備の診断技術", 電気學會, pp. 38-42, 2003.