

직류 및 교류인가시 CV전력 케이블에 미치는 공간전하 특성 연구

정영일, 인종배, 김종서*
한국전기안전공사 부설 전기안전시험연구원

A Study of Characteristic for Space Charge in CV Power Cable When Impressed DC and AC Voltage

Young-Il Jung, Yong-Bae Lim, Jong-Seo Kim
Electrical Safety Laboratory Research Institute

Abstract - Polyethylene(PE) in polymer insulation materials of used power cable have carried out in abundance of experiment and study for electrical conduction, insulation breakdown, dielectric character and so on.

When apply to field for power cable to make PE, application of DC withstand test to put in practice for inspection is get to effect accumulated space charge.

In this paper, to make use of Pulsed Electro-Acoustic(PEA), It is analysis to take shape space charges under AC and DC voltage, clear up the point at issue for effect of DC withstand test.

(PVDF-9 μ m)를 사용하여 외부를 알루미늄으로 금형하였다. 교류 측정의 경우 위상은 0° 부터 360° 사이를 45°로 구분하여 측정하였으며, 노이즈 영향을 배제시키기 위해 처리를 위해 1,024회의 평균화 처리를 하였다. 시료 케이블의 열화단계별로 부분방전량을 측정하여 열화정도를 판단하였다. 그림 1, 2, 3은 실제 케이블에 적용된 공간전하 측정개념도 및 측정장치이다.

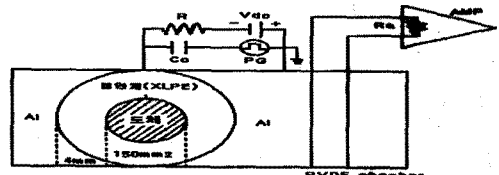


그림 1. PEA법에 의한 공간전하 측정개념도

1. 서 론

산업사회의 발달 및 문화생활의 향상과 함께 전기사용이 급격히 증가하였고, 전력을 전송하는 전력용 케이블에 대한 신뢰성 향상에 기대가 점차 높아지고 있다. 이와 함께 전력케이블 포설 이후 보수·유지에 따른 시험방법 등 많은 문제점이 제기되고 있다.

일반적으로 고분자 절연재료는 주로 고전계에서 사용되며, 이들을 현장 적용시 검사를 위해 실시하는 직류 내전압의 적용은 고분자 내에 공간전하를 축적시킨다. 이 공간전하는 절연재료의 결함과 첨가제, 가교잔유물 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 전극-절연체, 계면전극 및 내부 전계를 왜곡시켜 전기전도 특성을 변화시키고, 국부적으로는 고전계를 유발시켜 절연내력 및 파괴강도에 영향을 미친다고 보고되고 있다⁽¹⁾. 그러므로 고분자 절연체에서의 공간전하 형성분석을 통해 직류 내전압인가시 절연체에 미치는 영향을 규명할 수 있다.

최근에 두꺼운 고체 절연재료에서 공간전하 분포를 측정할 수 있도록 개발된 2가지의 비파괴 방법이 있는데 각각 Pressure Wave Propagation(PWP)법과 Pulsed Electro-Acoustic(PEA) 방법이다. 이 중 PEA(펄스정전용력법)방법은 시스템의 크기가 작으며, 우수한 측정능력, 간단한 구조와 높은 재현성을 가지고 있다^(1,2,3,4).

본 논문에서는 펄스정전용력법을 이용한 공간전하 측정기를 제작⁽¹⁾하여, 실케이블을 강제열화시켜 직류 전압인가에 의해 형성되는 절연체중의 공간전하 분포를 측정하고 이 특성을 분석하였으며, 교류 인가상태에서도 공간전하 분포를 측정하여 직류인가시와 비교하였다.

2. 측정

공간전하 특성분석을 위해 파형이 다른 두 종류(DC[최대 -60kV], AC)의 전압을 시료에 인가하였다. 6.6kV 시료케이블에 직류 및 교류를 최대 -13.2kV를 인가하였고, 측정펄스 전압범위는 0~10kV이며, 30ns의 진폭을 가지는 펄스를 사용하였다.

신호를 검출하는 센서부는 고분자 필름 압전소자

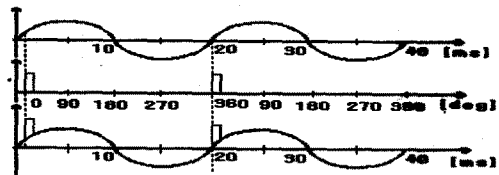


그림 2. 교류인가시 공간전하 분포 위상분해 측정



그림 3. 실제 케이블에 적용된 공간전하 측정장치

3. 시험 시료

시료케이블은 6.6kV, 150mm를 1.5m간격으로 절단하고, 외피 및 시스층을 제거하며, 시료케이블의 중앙부위의 20cm만 남기고 반도전층을 제거하였다. 시료는 모두 신규 케이블이고 전압 및 열 열화로 실험을 진행하였다. (표1).

이 시료를 위의 그림 3의 공간전하 측정장치에 적용하였다. 열 인가방법은 수조에 물을 채워넣고 이것을 80℃까지 가열시키며, 이 수조속에 케이블을 침수시켰다. 또한 침수시킨 케이블에 정격전압을 인가하여 현장조건과 유사하게 하였다. 전압열화 방법은 공기중에 시료 케이블을 띄어놓은 상태에서 전압만 인가하였다. 이들 시료는 칼집 결함을 인위적으로 만들어 제작하였다.

전기기구나 케이블의 사용전압에 관한 수명을 추정하는 경우로는 일반적으로 V-t(전압-시간)특성으로부터 구하며, 그 산출식은 다음과 같다.

$$V^n \cdot t = K(const) \quad (1)$$

이 관계를 역 누승법칙이라 하고, n 을 수명지수라 한다. 전력케이블의 경우 대부분 $n=9$ 를 많이 사용하고 있다⁽⁵⁾. CV 케이블의 V-t 특성의 n 의 값은 각종 결합이나 케이블 사용 상황에 따라 다르다.

표 1. 시료 케이블 조건

시료 NO	열화 기간	등가사용기간	길이	결합 방법	비고	
전압 열화	1	22일	11264일 (약 30년)	1.5m	칼흠집	
	2	22일	11264일 (약 30년)	"	"	
	3	22일	11264일 (약 30년)	"	"	
열 열화	4	22일	11264일 (약 30년)	"	"	
	5	22일	11264일 (약 30년)	"	"	
	6	22일	11264일 (약 30년)	"	"	

4. 측정 결과

길이 1.5m, 절연체 두께 4mm의 실케이블에서 공간전하 분포를 측정하였다. 시료 케이블의 외피를 제거하고, 외부 반도전층에 부채꼴 모양의 전극을 취부하여 이 전극에 펄스 고전압(1.4kV)을 인가시켜 전하분포의 정보를 얻기 위해서 압력파를 발생시킨다. 이 압력파를 압전소자(PVDF)에서 검출 및 전기신호로 변환되고, 이 신호가 증폭기로 증폭되어 오실로스코프에 기록된다.

4.1 직류인가시의 공간전하 실험

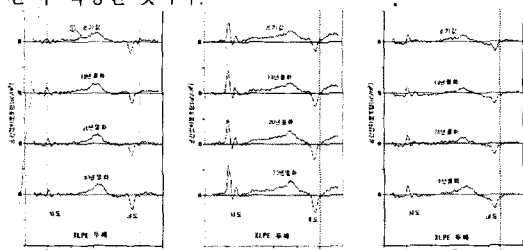
공간전하 측정 실험은 다음과 같은 조건으로 실시하였다.

① 최대 13.2kV 까지, 3kV 단계로 승압하였으며, 각 단계별로 10분 동안 직류전압을 인가한 후 이때의 공간전하 분포를 측정하였다.

② 공간전하 분포의 시간특성을 파악하기 위해 최대 60분 동안 직류를 인가한 후 접지시켜 이때의 잔류 공간전하량을 측정하였다.

공간전하 분포 측정은 전압 및 열 열화를 각각 30년 강제 열화시킨 시료에서 초기값, 10년, 20년, 30년으로 나누어 측정을 실시하였으며 현재 직류 내전압 시행 규격인 상용전압의 2배인 13.2kV를 인가하여 공간전하를 측정하였다.

전압열화시의 실험 데이터는 그림 4와 같으며 열화에 따른 공간전하 분포모습으로 상온에서 직류전압을 인가시킨 후 측정된 것이다.

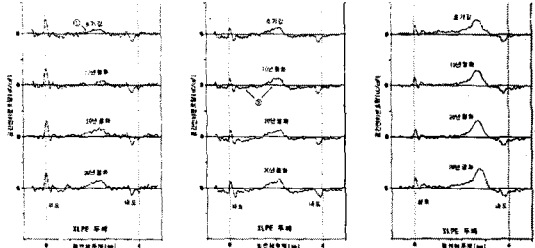


(a) 시료 1 (b) 시료 2 (c) 시료 3

그림 4. 직류에서 전압 열화시의 공간전하 분포

그림 4는 상온 25°C에서 각 시료의 열화단계별로 최대전압 13.2kV에서 10분동안 인가한 후 측정된 것으로, 모든 시료에서 공통적으로 결합부근에서 공간전하가 축적된다는 것을 확인할 수 있다. 대부분의 시료에 축적되는 공간전하는 동종전하로 예를 들면 시료 1의 ①을 말하며 중앙부에 위치하고 있는 것을 관찰할 수 있고, 이종전하는 관찰할 수 없다.

열화가 진행 될 수록 절연체에서 공간전하의 분포량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 대부분의 시료에서 외도에서 기점으로 깊이인 2(mm) 이상을 넘는 공간전하 분포가 관찰되어 열화가 진행 되었음을 알 수 있고, 또한 열화가 진행 될 수록 공간전하 분포가 내도 쪽으로 이동하는 것을 관찰 할 수 있다.



(a) 시료 4 (b) 시료 5 (c) 시료 6

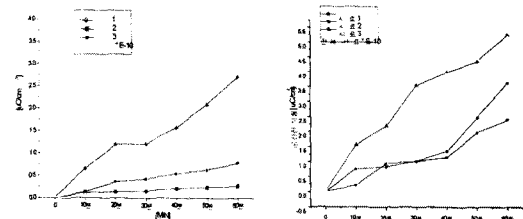
그림 5. 직류에서 열 열화시의 공간전하 분포

그림 5는 열 열화시의 공간전하 분포로 전압 열화와 동일하게 열화가 진행될수록 4~6번 모든 시료에서의 공간전하의 측정정도가 열화 정도별로 다르게 나타나고 있다.

대부분의 시료에서 그래프 상에서 나타나고 있는 것은 동종전하로 예를 들면 시료 4의 ①을 말하며 중앙부에 위치하고 있는 것을 관찰할 수 있고, 시료 5의 그래프를 살펴보면 0점을 기준으로 공간전하 분포가 +, - 부분으로 축적되어 있는 것을 볼수 있는데 이것을 이종전하라고 하며 ②의 부분을 말하고 있다. 이들의 발생 원인은 XLPE에 포함된 이물 및 강제 열화에 의한 절연체의 손상이 원인이다. 전 시료에서 공통적으로 열화가 진행될수록 공간전하의 축적량이 증가하는 것을 관찰 할 수 있으며, 공간전하 분포량이 내도쪽으로 진행되는 것도 관찰할 수 있다.

4.1.1 직류인가시 시간 경과에 따른 공간전하 분포변화

경과 시간에 따른 공간전하 분포량을 측정하기 위하여 각 시료별로 말기상태인 30년 열화된 시료에 대하여 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분 단위별로 그 축적량의 변화를 실험한 결과, 직류 전압의 인가 시간의 경과에 따라 결합부근에 축적되는 공간전하의 분포량이 증가함을 알 수 있다. 전압 열화와 열 열화의 공간전하 분포 및 축적량은 큰 차이를 보이지 않았으나 열 열화가 전압열화보다 축적량이 더 크게 나타나 절연체에 더 나쁜 영향을 미친다는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 열 열화시 전압과 물을 동시에 인가한 경우 XLPE 절연체가 더 급속히 열화된다는 것을 알 수 있다. 즉 수분 인가시에 열화가 더 빨리 진행되는 것으로 나타났다.

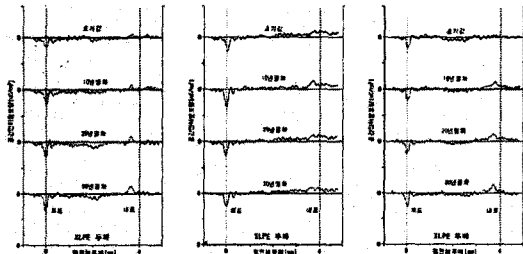


(a) 전압 열화 (b) 열 열화

그림 6. 시간에 따른 공간전하 분포

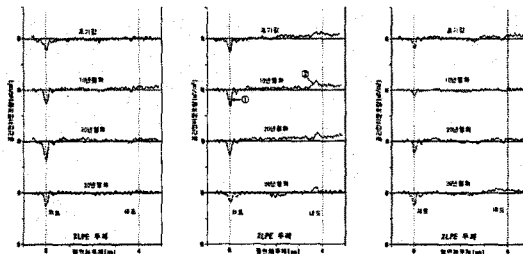
4.2 교류인가시의 공간전하 실험

교류인가시 직류와의 주파수에 의한 공간전하 형성 차이를 조사하기 위해 교류전압 60Hz에서 최대 공간전하분포를 측정하였다.



(a) 시료 1 (b) 시료 2 (c) 시료 3
그림 7. 교류에서 전압 열화시의 공간전하 분포

전압 열화시료인 1~3번까지의 실험결과를 위 그림 7과 같이 나타내었다. 시험시료에 인가하는 정현파 교류전압 V_0 는 13.2kV이다. 교류인가시의 공간전하 측정분포는 초기 열화상태에서 등가 30년 열화 상태 모두 직류인가시와 비교하여 절연체의 중간에서 시료별로 약간 측정되는 것도 있으나 거의 무시할 수 있는 수준이다. 측정그래프는 모두 위상 270° 에서 측정하였다. 실험결과 DC인가시의 공간전하 측정결과와 비교해서 거의 공간전하가 측정되지 않는다는 것을 관찰할 수 있다.



(a) 시료 4 (b) 시료 5 (c) 시료 6
그림 8. 교류에서 열 열화시의 공간전하 분포

열 열화시료인 4~6번까지의 교류전압 과전후의 공간전하 측정 분포를 그림 8과 같이 나타내었다. 시료 5에서 (-)전하①과 양(+)전하 ②는 인가전압에 의하여 계면에 측정된 전극유도전하이다. 각 시료에 인가된 펄스 위상각은 270° 이며, 인가전압 13.2kV이다. 시료에 따라 내도 전극에서의 유도 전하가 거의 관찰되지 않았는데 이는 교류의 교번전계에 의해 계면 유도 전하가 직류에 비해 잘 측정되지 않는다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 DC 전압 인가시와 비교해서 강제 절함부근에서 공간전하가 거의 측정되지 않는다는 것을 관찰할 수 있다.

5. 검토

지금까지 검토한 시료 케이블의 공간전하 분포 및 부분방전량의 특징을 기술하면 다음과 같다.

- ① 교류인가시의 공간전하 분포는 거의 측정되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.
- ② 전압열화한 것보다 열 열화 시료에서 공간전하량이 많이 측정되었다.
- ③ 인가전압의 주파수가 높으면 공간전하의 분포량이 작아진다. 즉 직류 인가시보다 교류 인가시에 공간전하의 측정이 현저하게 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 인가전압이 증가함에 따라 측정된 공간전하량이 거의 선형적으로 증가하였다.

④ 시간 경과에 따른 공간전하 측정은 전압인가 시간경과에 따라 연속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

⑤ 절함부위에서 열화가 진행될수록 공간전하 분포가 내도쪽으로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다.

이 공간전하는 직류 전압 시험시 전력을 케이블의 주요한 절연파괴 사고 요인으로 제시되고 있는 것이다.

6. 결론

실제 케이블에 대한 공간전하 측정이 우수한 펄스정전용력법을 이용하여 강제 열화시킨 전력케이블에 대한 직류 및 교류에서 공간전하 분포를 측정하였으며, 인가 시간별로 공간전하 분포를 측정하였다. 그 결과 직류 인가시에 교류 인가시보다 전력용 케이블에서 공간전하가 현저하게 많이 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 시험기간 동안 공간전하 영향에 의한 케이블의 절연파괴는 나타나지 않았다. 그러나 DC 전압 인가에 의해 형성된 공간전하에 의한 전계왜곡 효과는 교류전압 하에서도 그 영향이 지속되어 장시간 교류절연 특성에 치명적인 영향을 미침으로서 전력케이블의 열화속도의 주된 요인이 된다.

참고 문헌

- [1] 황보승, "펄스정전용력법의 개선에 의한 고분자 절연재료에서 공간전하가 전도 및 부분방전에 미치는 영향에 관한 연구", 박사학위논문, 1998
- [2] 李英外 5人, "水トリ-劣化架橋ポリエチレンにおける空間電荷の挙動", T.IEE Japan, Vol. 116-A, No.9, '96
- [3] Takashi Maeno, "Calibration of the pulsed electroacoustic method", T.IEE, Vol.119-A, No.8/9, '99
- [4] Rongsheng Liut beside two persons, "Pulsed electro-acoustic method for measurement of space charge distribution in power cables under both DC and AC electric fields" IOP publishing Lid, 1993
- [5] 速水敏幸, "CV케이블", 住友電気工業株式会社, コナ社
- [6] 建二 外3人, "500kV케이블의直流耐壓試驗に於ける檢討, 日新電機技報, T.IEE Japan, Vol 117-B, No.1, '97
- [7] 寺島一希外 4人, "直流CV케이블의絶縁設計手法に於ける考察", T.IEE Japan, Vol. 119-B, No.2, '99
- [8] 天井二郎外 6人, "水トリ-劣化架橋ポリエチレンの古調波電流と非線型電氣伝導", 電學論A, 119卷 3号, 平成11年
- [9] "特別高壓CV케이블絶縁劣化形態と絶縁診斷技術の動向", 特別高壓CV케이블絶縁診斷技術調査専門委員會, 1998