

온도변화에 따른 초고압케이블 절연재의 부분방전특성

김탁용, 김원종, 신현택, 변두균, 조경순, 김귀열\*, 홍진웅  
 광운대학교, \*한국기술교육대학교

The Characteristic of Partial Discharge at Extra High Voltage due to Variation of Temperature

T.Y. Kim, W.J. Kim, H.T. Shin, D.K. Byun, K.S. Cho, K.Y. Kim\*, J.W. Hong  
 Kwangwoon Univ., Korea Univ. of Technology and Education

요약 - 초고압절연케이블의 온도변화에 따른 절연특성을 연구하였다. 온도변화는 상온, 50, 80[°C]로 변화시켰으며, 전압은 0.5[kV]씩 스텝인가법에 의해 승압시켰다. 또한 보이드 특성을 위해 내부에 보이드를 삽입하였다.

그림 1에서 시료의 적층모습 및 전극의 형상을 나타내었다.

1. 서 론

가교 폴리에틸렌 고분자 절연재료는 절연과피강도가 높고, 유전손실이 낮으며, 경량으로 취급이 용이한 점 등 절연체로서 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 현재 송배전 계통의 지중선로에서 주로 사용되어지고 있다<sup>[1][2]</sup>. 그러나 고분자는 고온에서 변형, 경화, 유동 등의 물리적 변화와 주쇄의 절단, 가교, 산화 반응과 같은 화학변화가 일어나기 쉽다<sup>[3]</sup>. 이러한 열화현상은 고분자 절연재의 수명에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 온도변화에 따른 수명예측은 매우 중요한 과제이다. 또한 내부에 공기가 존재하는 경우 전계의 집중을 유발하므로 절연수명에 치명적인 결함으로 작용할 수 있다<sup>[4]</sup>. 이에 본 논문에서는 가교폴리에틸렌의 수명을 사전에 예측·진단하여 돌발적인 전기사고를 미연에 방지할 수 있는 시스템 개발을 위해, 온도변화에 따른  $\phi-q-n$  패턴과 내부 공기보이드 존재 시 온도영향을 조사하였다<sup>[5]</sup>.

2. 실험

2.1 시료 및 전극장치

본 실험에 사용한 시료는 154[kV] 케이블 절연층(XLPE)을 0.8×60×70 [mm]의 크기로 자른 후 3층으로 적층하였으며, 인공보이드는 지름 2[mm]인 원통형으로 만들었다. 내부보이드 특성을 보기위해 중간층에 인공보이드 시료를 삽입하였다. 전극은 평판 대 평판의 형태인 구리전극을 사용했으며, 전극 주변의 연면방전을 억제하기 위해 에폭시로 몰딩하였다. 또한 중심에 스프링을 삽입하여 시료에 일정한 압력이 가해지도록 제작하였다. 또한 실험은 실리콘오일(1000cs)에 잠입하여 실험하였다.

2.2 실험장치

XLPE 시료의 부분방전 특성인  $\phi-q-n$  분포를 조사하기 위해 AVO Co.에서 제작한 부분방전 측정장치를 이용하였다. 인가전압은 AC 60[Hz]를 3[kV]부터 0.5[kV]씩 step 인가법으로 18[kV]까지 승압하였으며, 전압인가 후 10초 동안 발생한 방전전하량을 AD보드를 통해 Acquisition하였다. 주변온도는 상온, 50[°C], 80[°C]로 변화시켰다, 방전전하량 및 위상을 64×64 매트릭스로 받아들였다. 즉 방전전하량 1byte는 8[pC]을, 위상각 1byte는 5.625°의 값을 나타내고 있다. 또한 방전전하량 검출 범위는 0 - 512[pC]로 그 이상의 값이 검출되면 trip 전하량으로 간주하여 측정을 멈추었다. 그림 2는 검출회로의 개략도이다.

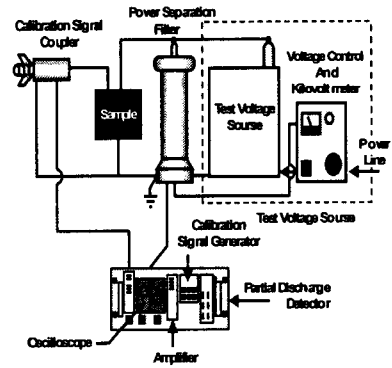


그림 2. PD 측정장치  
 Fig. 2. Equipment of PD measurement

3. 결과 및 고찰

3.1 무보이드의 온도 의존성

그림 3은 상온에서 무보이드 시료의 부분방전특성을 나타낸 것이다.

그림 (a)는 초기 부분방전이 검출되는 전압인 10[kV]일 때를 나타내고 있다. 정극성은 10 - 80° 영역에서 방전이 나타나며, 부극성은 200 - 250° 영역에서 방전이 발생하였다. 방전전하량은 정극성에서 최대 40[pC]으로 10초동안 4회 나타났으며, 부극성에서는 최대 56[pC]으로 1회 발생하였다. 발생빈도수는 정극성에서는 전하량이 5[pC]인 방전이 50° 위상영역에서 48로 최대값을 나타냈으며, 부극성에서는 5 - 10[pC]의 방전이 230° 부극에서 70으로 최대값을 나타내었다. 전체 방전전하량은 정극성에서 18,316[pC]을 나타내고, 부

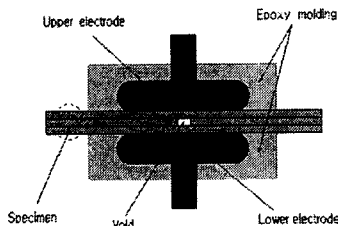


그림1. 전극의 형상  
 Fig. 1 Shape of electrode

극성에서 36,540[pC]를 나타내었다. 전체 방전발생빈도수는 정극성에서 890, 부극성에서 1,027 임을 확인하였다. 그림 (b)는 인가전압 18[kV]일 때로, 정극성은 0 - 80° 영역에서 방전이 주로 발생하였으며, 부극성은 180 - 250° 영역에서 발생하였다. 방전전하량은 모두 50[pC]이하의 값으로 매우 낮은 전하량을 나타내었다. 발생빈도는 정·부극성에서 최대 200회 이상 발생하였지만 전하량 값은 매우 낮은 방전이었다. 또한 정극성에서 전체 방전전하량은 57,606[pC], 전체방전발생빈도수는 2,500이며, 부극성에서 전체 78,572[pC]의 방전전하량이 3,148회의 빈도수가 나타남을 확인할 수 있다.

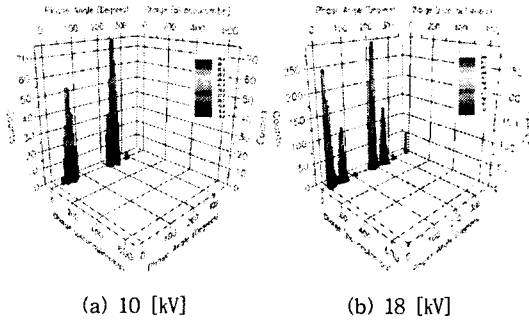


그림 3. 무보이드에서  $\phi-q-n$ 분포(상온)  
Fig. 3. Distribution of  $\phi-q-n$  at no void(RT)

그림 4는 50[°C]일 때 부분방전 특성을 나타낸 것이다. 그림 (a)는 10[kV]가 인가된 경우로 초기방전이 검출되는 전압이다. 방전발생영역은 정극성 0 - 40° 및 50 - 80°영역에서, 부극성 180 - 250° 영역에서 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 방전전하량은 50[pC]이하의 값을 가지며, 방전빈도수는 24[pC]의 전하량 값이 최대로 정극성에서 82, 부극성에서 97회 발생함을 볼 수 있었다. 또한 전체방전전하량은 정극성에서 26,391[pC]을 나타내고, 부극성에서 21,282[pC]을 나타내었으며, 전체방전발생빈도수도 정극성에서 948, 부극성에서 696임을 확인할 수 있다.

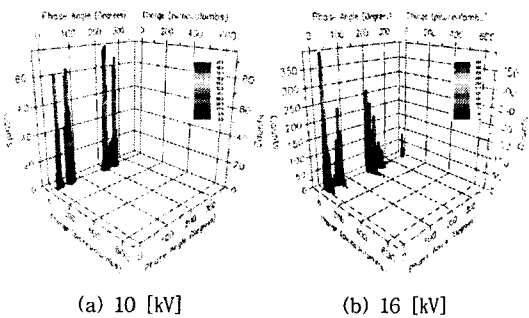


그림 4. 무보이드에서  $\phi-q-n$ 분포(50[°C])  
Fig. 4. Distribution of  $\phi-q-n$  at no void(50[°C])

전압을 16[kV]로 승압 시, 정극성에서는 위상영역 0 - 80°영역, 부극성은 180 - 280° 영역에서 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 정극성에서는 90[pC]이하의 방전이, 부극성은 150[pC]이하의 방전이 발생하였으며, 방전빈도수도 200회 이상을 나타내었다. 전체방전전하량은 정극성에서 112,100[pC]가 나타났으며, 부극성에서 121,170[pC]를 나타내었다. 전체방전발생빈도수는 각각 3,162와 2,995발생하였다.

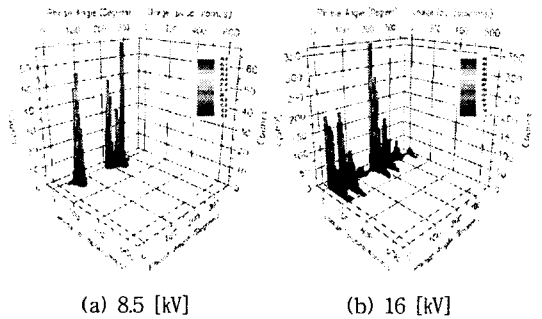


그림 5. 무보이드에서  $\phi-q-n$ 분포(80[°C])  
Fig. 5. Distribution of  $\phi-q-n$  at no void(80[°C])

그림 5는 무보이드 시료를 80[°C]로 승온 한 경우를 나타내고 있다.

전압을 8.5[kV]로 인가할 때 초기방전이 검출되었으며, 정극성에서는 20 - 80° 영역에서 방전이 발생하였으며, 부극성은 180 - 250° 영역에서 방전이 발생하였다. 방전발생빈도수는 정극성에서 최대 53, 부극성에서 최대 69회의 방전이 발생하였으며, 방전전하량은 정·부극성에서 100[pC]의 전하량이 검출되었다. 전체방전전하량은 정극성에서 37,082[pC]을 나타내고, 부극성에서 38,365[pC]이 발생하였으며, 전체방전발생빈도수는 정극성에서 560, 부극성에서 857 임을 확인하였다.

그림 (b)는 전압 16.0[kV]로 인가한 경우로 방전은 전체영역에서 발생함을 확인할 수 있었으며, 정극성에서는 0 - 30°, 50 - 80°영역에서 주로 발생하였고, 부극성에서는 180 - 200°, 230 - 250°에서 주로 방전이 발생하였다. 방전전하량은 정극성에서 최대 약 230[pC], 부극성에서 200[pC]의 방전이 발생하였으며, 전체방전전하량은 정극성에서 238,490[pC], 부극성에서 275,090[pC]이 발생하였으며, 전체방전발생빈도는 각각 5,927, 6,279회 임을 확인 하였다.

### 3.2 공기보이드의 온도의존성

그림 6은 상온에서 내부 인공보이드가 존재하는 경우  $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 그래프이다.

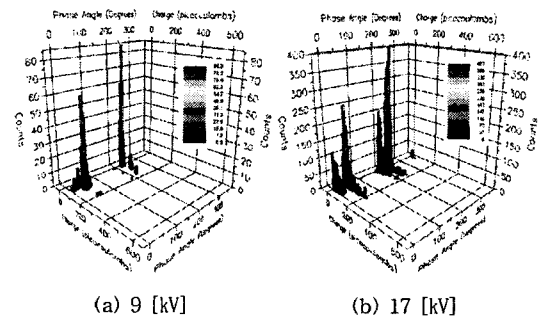
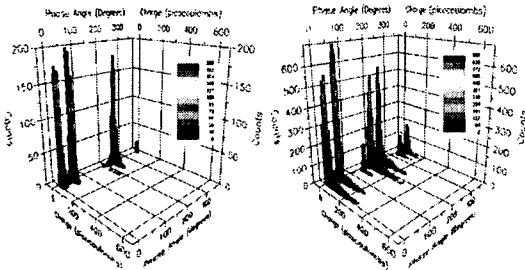


그림 6. 공기보이드에서  $\phi-q-n$ 분포(상온)  
Fig. 6. Distribution of  $\phi-q-n$  at air void(RT)

그림 (a)는 전압 9.0[kV] 인가한 경우로 정극성에서는 0 - 80° 영역에서 방전이 검출되었으나, 50° 부근에 방전이 집중되어있음을 확인할 수 있었다. 부극성의 경우 180 - 250° 영역에서 방전이 발생하였으나, 230°부근에 방전이 집중되었다. 최대방전발생빈도수는 정극성에서 70[pC]의 방전이 54회, 부극성에서 32[pC]의 방전이 88회 발생함을 볼 수 있으며, 최대방전전하량은 정·부극성에서 192[pC]의 전하량을 나타내었다. 전체방전전하량은 정극성에서 45,815[pC]을 나타내고, 부극성에서

49,260[pC]이 발생함을 볼 수 있었으며, 전체방전발생 빈도수는 정극성에서 1,870, 부극성에서 1,081 임을 확인할 수 있었다. 전압을 17[kV]로 승압한 경우 정극성에서는 0 - 80°영역에서 방전이 발생하였으며, 부극성에서는 180 - 260°영역에서 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 최대방전전하량은 정극성에서 224[pC], 부극성에서 216[pC]의 값을 나타내었다. 최대방전발생빈도수는 정극성에서 230, 부극성에서 403 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 전체방전전하량은 정극성에서 372,520[pC], 부극성에서 585,000[pC] 발생하였으며, 전체방전발생빈도수는 정극성에서 8,751이며, 부극성에서 11,681임을 확인하였다.



(a) 8 [kV]

(b) 15 [kV]

그림 7. 공기보이드에서의  $\phi-q-n$ 분포(50[°C])

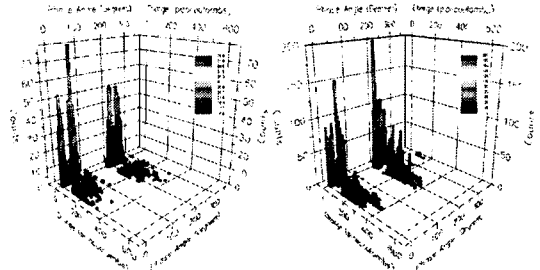
Fig. 7. Distribution of  $\phi-q-n$  at air void(50[°C])

그림 7은 주변온도를 50[°C] 승압한 경우  $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 그래프이다.

그림 (a)에서 방전발생은 0 - 80°영역과 190 - 250°영역에서 발생하였으나, 정극성에서는 0 - 16°, 50 - 60° 영역에서 주로 발생하였으며, 부극성은 220 - 250° 영역에서 주로 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 최대방전빈도수도 정극성은 50°에서 200, 부극성은 245°에서 520회 발생함을 볼 수 있었다. 전체방전전하량은 정극성에서는 34,507[pC]을 나타내고, 부극성에서 48,956[pC]이 검출되었다. 전압을 15[kV] 인가시 정극성에서는 0 - 180° 영역에서 부극성은 180 - 260°, 360° 부근에서 방전이 발생하였으며, (a)그림과 비슷하게 정극성에서는 0 - 28°와 50 - 70° 영역에 집중되어 있고 부극성의 경우 180 - 200°와 220 - 250° 영역에 방전이 집중되었음을 볼 수 있었다. 정극성에서 최대방전전하량은 300[pC]의 값을 0 - 28° 영역에서 나타내고 있으며, 최대방전빈도수는 699로 50 - 70°영역에서 나타났다. 부극성에서 최대방전전하량은 330[pC]으로 180 - 200°영역에서 나타났으며, 최대발생빈도수는 220 - 250°에서 532회 발생하였음을 볼 수 있다. 전체방전전하량은 정극성에서 642,820[pC]가 나타났으며, 부극성에서 567,320 [pC]이 나타났다. 전체방전발생빈도수는 정극성에서 14,207이며 부극성에서 14,377로 정극성보다 빈도수가 1.1배 더 큼을 확인할 수 있었다.

그림 8은 80[°C]로 승압시  $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 방전은 0 - 80°와 110°, 180 - 250°과 290° 영역에서 발생하였으며, 부극성은 0 - 80°영역에서 주로 발생하였고, 부극성은 180 - 250°에서 대부분의 방전이 발생하였다. 방전전하량은 정극성에서 최대 350[pC], 부극성에서 최대 380[pC]의 큰 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 방전발생빈도는 정·부극성에서 8[pC]의 방전이 가장 많이 발생하였으나, 100[pC]이상의 방전도 많이 발생함을 볼 수 있었다. 전체방전전하량은 정극성에서 79,564[pC]을 나타내고, 부극성에서 95,505[pC]의 방전전하량을 확인하였으며, 전체방전발생빈도수는 정극성에서 1,722가 나타났으며, 부극성에서

1,552 임을 확인할 수 있다. 그림 (b)는 전압 15[kV]로 인가할 경우로 정극성에서는 위상각 0 - 80° 영역에서, 부극성은 180 - 250° 영역에서 방전이 발생함을 볼 수 있었다. 방전전하량은 정극성에서 최대 400[pC], 부극성에서 382[pC]의 값을 나타내었으며, 방전빈도수는 정극성에서 8[pC]의 방전이 최대 150, 부극성에서 16[pC]의 방전이 최대 201회 발생함을 볼 수 있었다. 그러나 정·부극성에서 100[pC]이상의 방전이 그림(a)에 비해 크게 증가하였음을 볼 수 있었다. 또한 전체방전전하량은 정극성에서 371,980[pC], 부극성에서 415,000 [pC]이 발생하였으며, 전체방전발생빈도수는 정극성에서 5,128이며, 부극성에서 4,879임을 확인 하였다.



(a) 8 [kV]

(b) 15 [kV]

그림 8. 공기보이드에서  $\phi-q-n$ 분포(80[°C])

Fig. 5. Distribution of  $\phi-q-n$  at air void(80[°C])

### 3. 결 론

온도변화에 따른 초고압케이블 절연재의 부분방전특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인공보이드가 없는 경우 온도 상승시 초기  $\phi-q-n$  분포는 유사한 형태로 나타났으며, 초기 방전전압만이 낮아짐을 확인하였다.
2. 인공보이드가 없는 경우 80[°C]에서 전압증가에 따라 전하량이 큰 방전의 발생하였다.
3. 인공보이드가 존재하는 경우 전압상승에 따라 방전빈도수의 증가와 전하량이 큰 방전이 발생하였다.
4. 인공보이드가 존재하는 경우 고온의 경우 초기전압부터 매우 높은 전하량을 가진 방전이 발생함을 볼 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Katakai, S., "Design of XLPE cables and soundness confirmation methods to extra high voltage XLPE cables", Asia Pacific. IEEE/PES, Volume: 2, pp.1411-1415, 2002.
- [2] Yamada, H.; Nakagawa, S.; Katakai, S.; Kishi, K.; Nakanishi, T.; Murata, Y., "Development of heat resistant XLPE cable and accessories", Proceedings of the 7th International Conference on, Volume: 2, pp.776-781, 2003.
- [3] 大澤善次郎, "高分子の劣化と安定化", 武蔵野コリエト, pp.15-31, 1992.
- [4] L.A. Dissado and J.C. Fothergill, "ELECTRICAL DEGRADATION AND BREAKDOWN IN POLYMERS", Peter Peregrinus Ltd., pp.289-292, 1992.
- [5] T.J.Gallagher, A.J.Pearmain, "HIGH VOLTAGE Measurement, Testing and Design", John Wiley & Sons Ltd., pp.162-174, 1984.