

침 전극 기울기에 따른 XLPE의 부분 방전 특성

신종열¹, 안병철², 홍진웅^{2,a}

¹ 삼육대학교 카메카트로닉스학과

² 광운대학교 전기공학과

The Partial Discharge Characteristics of the XLPE According to the Tilt of the Needle Electrode

Jong-Yeol Shin¹, Byung-Chul Ahn², and Jin-Woong Hong^{2,a}

¹ Department of Car-Mechatronics, Sahmyook University, Seoul 139-742, Korea

² Department of Electric Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received November 28, 2014; Revised December 10, 2014; Accepted December 16, 2014)

Abstract: The needle electrode is inserted into the cross-linked polyethylene(XLPE) which is the ultra high voltage cable for electric power. By changing the tilt of the needle electrode, we investigated how the void and the thickness of the insulating layer influence the partial discharge(PD) characteristics and the insulating breakdown. In order to investigate the PD characteristics, The XLPE cable was used to the specimens and the tungsten electrode was used with the needle electrode. And the inner semi-conductive layer material of XLPE cable was used with the negative electrode by bonding with the use of conduction tape. The size of the specimens was manufactured to be 16×40×30 [mm]. We confirmed the effect on changing the PD characteristics according to the changing voltage and the tilt of the electrode after applying the voltage on the electrode from 1[kV] to 40[kV] at room temperature. In the PD characteristics, it was confirmed that the PD current of air void specimens with tilt was unstable more than that of no void specimens with tilt. It was also confirmed that the breakdown voltage was decreased because the effect of air void is more active than the change of the needle electrode tilt in the specimen with air void inside the insulation.

Keywords: Partial discharge characteristics, Electrode tilt, Air void, Needle electrode, Breakdown voltage

1. 서 론

현대사회에서 에너지가 차지하는 비중은 크며, 그

중에서도 전기에너지가 차지하는 비중은 매우 중요하고 산업현장에서는 매년 전력 소비량이 증가하고 있는 추세이다 [1,2]. 그리고 전력수요의 증가로 케이블과 변압기 및 가스절연 개폐장치(GIS) 등의 대용량화와 초고압화가 거듭 발전하고 있다. 또한, 설비의 고밀도화, 고기능화 등의 기술도 날로 발전하고 있어 이들 기기의 신뢰성이 전력공급의 신뢰성으로 그 관계가 매우 긴밀하다 [3,4]. 그러나 현재 우리나라의

a. Corresponding author; ealab@kw.ac.kr

Copyright ©2015 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전력계통은 여러 요인으로 인한 장거리 전송을 통하여 수도권을 중심으로 대도시 수요지에서 사용하므로 초고압화로 인한 전력수송도 매우 중요한 문제로 대두되고 있으며 시설의 밀집화로 인한 전력 케이블의 지중화 설비로 환경에 의한 열화도 매우 중요하게 취급되고 있다 [5-7].

초고압용 케이블의 단면 구조는 중심에서 도체, 내부 반도체층, 절연체, 외부 반도체층으로 구성되며 외부에는 금속 시스와 고분자 방식층이 있어 절연체를 외부 환경으로부터 보호할 수 있는 시스템으로 구성되어 있으며, 저밀도 폴리에틸렌에 가교제를 첨가하여 케이블의 열적 특성과 기계적 특성을 개선한 가교 폴리에틸렌(XLPE) [8]의 사용은 절연유를 사용하지 않는 절연매질이 고체이므로 시공성 및 유지보수가 용이하고 친환경성이 우수하여 초고압용 절연케이블의 절연재료로서의 사용이 급증하고 있다 [9,10].

본 실험에서는 전력용 초고압 케이블 절연체인 XLPE 내부에 삽입 침전극의 기울기를 변화시켜 부분방전 실험을 통한 XLPE의 침 전극 기울기 변화와 내부 보이드에 따른 절연과피 현상을 조사하고 분석함으로써 기울기에 따른 절연층의 부분방전 패턴을 연구한 결과를 소개한다.

2. 실험 방법

2.1 시료

시료는 전기적 특성이 매우 우수한 XLPE를 16×40×30[mm]의 크기로 제작하여 사용하였고, 시료에 보이드 유·무와 침 전극 기울기 변화로 구분하여 사용하였다. 침 전극의 기울기는 예상 각도를 형성하여 침 전극을 삽입하고 광학현미경을 이용하여 침 전극 기울기와 절연층 두께를 측정하였으며, 그리고 보이드 시편의 제조 과정은 무보이드 시편에 침 전극을 삽입한 후 보이드를 형성할 길이만큼 뒤로 빼내어 인공적으로 보이드를 만들었다. 전극의 형태는 침 대평판전극 (내부 반도체층에 도전성 테이프를 접착함)으로 침 전극 기울기는 수직(0)과 45°의 기울기로 절연층 두께는 2[mm]로 제작하고 공기 보이드의 길이는 1[mm]를 사용하였다. 시료 표면과 침 전극 사이는 에폭시 수지계의 접착제로 밀봉하였으며, 접지측 전극은 내부 반도체층에 도전성 테이프를 이용하여 사용하였다.

표 1은 시료의 종류를 나타내고 있으며, 시료의 구

Table 1. Kind of specimens.

| Specimens | Electrode tilt (deg) | Air void [mm] |
|-------------------------|----------------------|---------------|
| I(2.0) - V(0) - T(0) | 0° | 0 |
| I(2.7) - V(0) - T(45) | 45° | |
| I(2.0) - V(1.0) - T(0) | 0° | 1.0 |
| I(2.5) - V(1.0) - T(45) | 45° | |

분은 절연체는 I, 보이드는 V, 기울기는 T로 각각 구분하여 표기하였다.

2.2 실험

부분방전을 측정하기 위한 인가전압은 1 [kV]부터 최대 40 [kV]까지 step 전압 인가법으로 절연과피가 발생할 때까지 승압하였고, 전압인가 즉시 10초 동안 발생한 전하량과 빈도수를 검출하여 데이터를 acquisition 하였으며 데이터 Φ -q-n을 3차원 그래프로 작성하였고, MATLAB으로 프로그래밍하여 검출하였다. 전극은 텅스텐 침전극을 에칭한 후 사용하였고, 그림 1은 부분방전 검출회로를 나타내고 있다.

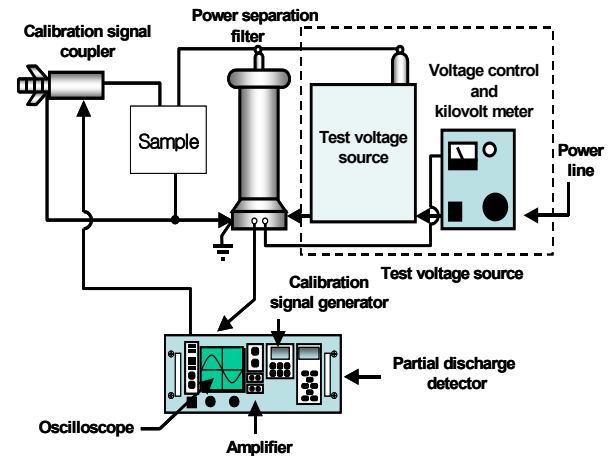


Fig. 1. PD detection circuit.

3. 결과 및 고찰

XLPE (cross linked polyethylene) 절연체에 침 전극을 기울기에 따라 삽입 후, 하부전극인 내부 반도체층과 상부 전극인 침 전극의 간격 2[mm] 상태에서

부분방전 특성을 조사하고 전압은 step 인가법으로 1[kV/s]의 속도로 40[kV]까지 인가하였다.

3.1 무보이드 수직 시료

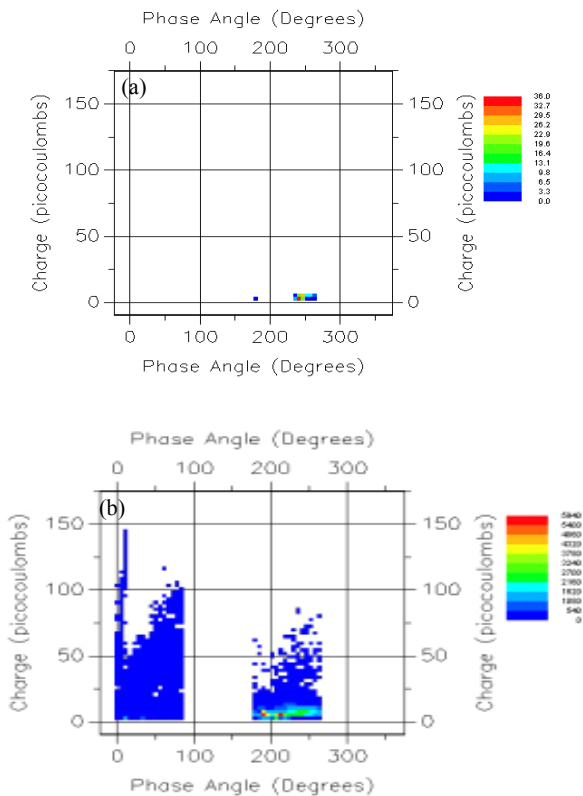


Fig. 2. Distribution of no-void specimens at V(0)-T(0). (a) 15[kV] and (b) 31[kV].

그림 2는 기울기 0°, 절연층 두께 2[mm]인 XLPE 무보이드 수직시료의 부분방전 패턴분포를 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 인가전압 15[kV]일 때의 방전분포로써 정극성 영역(0~180°)에서는 부분방전이 나타나지 않았고, 부극성 영역인 180~270°의 위상 영역에서 952[pC]의 방전전하량을 얻었으며, 최대 방전전하량 8[pC], 방전 발생 빈도수가 147임을 확인하였다. 또한, 최초 방전이 부극성에서 나타나는 것은 부극성에서의 전자 주입이 용이하기 때문인 것으로 사료된다. 그림 2(b)는 인가전압 31[kV]에서 정극성의 위상 영역 0~90°에서 방전전하량 396,180[pC], 발생 빈도수 15,757을 얻었고, 위상각 15° 부근에서 최대 방전전하량 147[pC]을 얻었다. 또한 부극성 영역 180~270°의 위

상각 영역에서 방전전하량 1,047,500[pC], 발생 빈도수 108,083, 최대 방전전하량 88[pC]를 확인하였다. 전반적으로 정극성에서는 방전전하량과 방전발생 빈도수는 증가하였으나, 부극성에서의 방전발생 빈도수는 인가전압 25[kV]의 경우보다 약 15[%] 감소하였고 방전전하량은 10[%] 감소함을 확인하였다. 이것은 시료가 절연과피가 되어 정극성 영역에서의 전하량이 증가한 것으로 사료되며, 절연과피에 이룰수록 최대 방전전하량 위상이 0°에 가깝게 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 45° 무보이드 시료

그림 3은 침 전극 기울기가 45°이고, 절연층 두께 2[mm]시료의 부분방전 패턴을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 인가전압 14[kV]로 정극성에서 부분방전은 발생하지 않았고 부극성에서는 위상각 190~230° 범위에서 250[pC]의 방전전하량이 발생하였으며 최대 방전전하량 8[pC], 방전 발생 빈도수가 40임을 확인하였다. 그림 3(b)는 인가전압 33[kV]일 경우로서 정극성에서 0~90°의 위상각 영역에서 방전전하량 31,548[pC], 발생 빈도수 739를 나타내었고, 부극성에서는 180~270°의 위상각 영역에서 방전전하량 25,642[pC], 발생 빈도수 642이 나타났으며, 정극성에서 최대 방전전하량 165 [pC], 부극성에서 최대 방전전하량 165 [pC]를 나타내었다. 전체 위상에서 부분방전 발생영역은 변함이 없었으나 방전전하량 및 방전발생 빈도수는 정극성 및 부극성 영역에서 모두 증가하여 최대 방전전하량 발생영역은 정극성은 0° 부근에서, 부극성은 180° 부근에서 발생하고 절연과피까지 도달되었다. 무보이드 시료는 침 전극의 기울기에 따른 침 전극의 배치가 크게 영향을 미쳐 침 전극 기울기가 45°로 커지면 형상이 전체집중을 방해하여 방전개시 전압이 수직 전극과 비슷하게 된다. 무보이드 시료에서의 전압에 따른 정극성과 부극성의 방전 전하량과 방전 빈도수를 정리하면 표 2와 같다.

Table 2. PD characteristics of no-void specimens.

| Specimen | V [kV] | q [pC] | | | | n | |
|----------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|------|
| | | +q total | -q total | +q ave | -q ave | +n | -n |
| I(2.0) | 15.0 | 0 | 952 | 0 | 6 | 0 | 147 |
| -V(0) | 31.0 | 3.96 | 1.05 | 25 | 10 | 1.58 | 1.08 |
| -T(0) | | $\times 10^5$ | $\times 10^6$ | $\times 10^4$ | $\times 10^5$ | | |
| I(2.0) | 14.0 | 0 | 250 | 0 | 6 | 0 | 40 |
| -V(0) | 33.0 | 3.15 | 2.56 | 43 | 40 | 739 | 642 |
| -T(45) | | $\times 10^4$ | $\times 10^4$ | | | | |

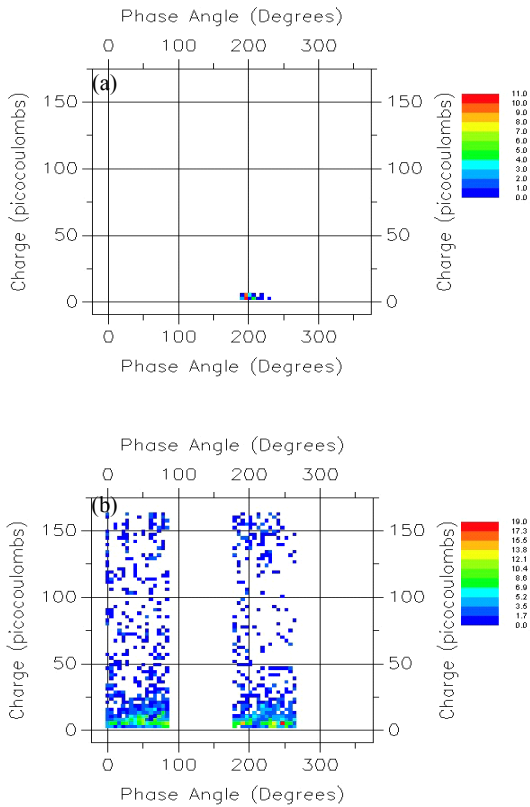


Fig. 3. Distribution of no-void specimens at V(0)-T(45). (a) 14[kV] and (b) 33[kV].

3.3 무보이드 시료의 방전전류 특성

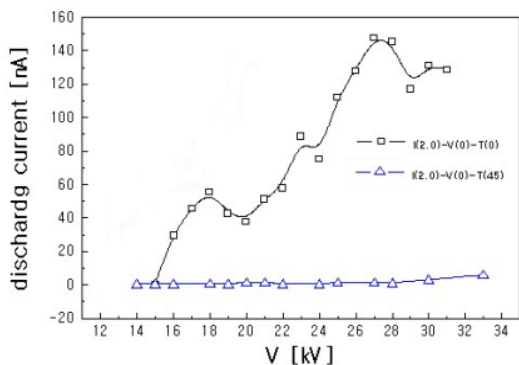


Fig. 4. Discharge current of the no-void specimens.

그림 4는 인가전압을 변화시키면서 침 전극 기울기에 따른 무보이드 시료의 방전 특성을 조사한 것으로

I(2.0)-V(0)-T(0) 시료의 경우 인가전압 15[kV]에서 방전이 개시되어 방전전류 0.08[nA]가 처음으로 측정되었으며, 트립 직전 인가전압 31[kV]에서는 128.4[nA]로서 15[kV]에 비해 1,605배 정도까지 증가됨을 확인할 수 있었다. I(2.0)-V(0)-T(45) 시료는 방전개시 전압 14[kV]에서 가장 낮은 방전전류 0.02[nA]가 검출되었으며, 트립 직전까지 인가한 33[kV]에서는 5.54[nA]가 측정되었고, 이는 침 전극 배치로 인하여 침 전극 형상이 침 모양에서 평판모양으로 변화되어 전계집중이 완화됐기 때문으로 사료된다. 따라서 기울기 45°인 경우가 시료 중에서 가장 안정적인 방전전류 특성을 나타냈다.

3.4 공기 보이드 수직 시료

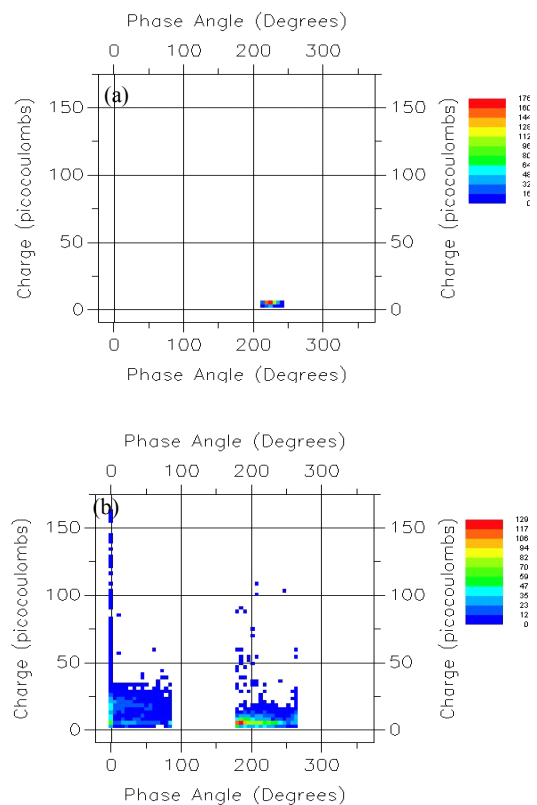


Fig. 5. Distribution of air void specimens at V(1)-T(0). (a) 1[kV] and (b) 13[kV].

그림 5는 기울기가 수직(0°)인 침 전극 절연층 두께 2[mm], 공기 보이드 1[mm]인 XLPE시료에 부분방전 패턴을 나타낸 것으로 그림 5(a)는 인가전압 1[kV]일

때의 방전분포이며, 정극성 영역에서 부분방전은 발생하지 않았다. 그러나 부극성 영역 위상각 210~250°에서 4,388[pC]의 방전전하량을 확인하였고, 최대 방전전하량 8[pC], 방전 발생 빈도수가 54임을 확인할 수 있었다. 전자주입이 용이한 부극성에 부분방전이 발생하였으며, 그리고 공기 보이드의 존재로 방전개시 전압이 감소함을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 인가전압 13 [kV]로 0° 부근에서 최대 방전전하량을 보이며, 정극성의 위상각 0~90° 영역에서 방전전하량 42,014[pC], 발생 빈도수 2,148을 얻었고, 부극성에서는 위상각 180~270° 영역에서 방전전하량 25,051[pC], 발생 빈도수 2,487을 얻었다. 정극성에서의 최대 방전전하 발생 영역은 거의 변화가 없고 일정한 기울기를 갖는 방전전하는 사라졌으며 방전전하량 및 방전발생 빈도수는 증가하였으나 부극성에서의 방전발생 빈도수와 방전전하량은 감소함을 확인하였다. 이것은 공기 보이드의 존재로 인하여 급격한 방전전하량 증가가 급속한 절연과피를 일으켜서 무보이드 수직시료에 비하여 절연 과피전압이 58[%] 낮아짐을 확인할 수 있었다.

3.5 45° 공기 보이드 시료

그림 6은 침전극 기울기가 45°이고 절연층 두께 2 [mm], 보이드 1[mm]의 XLPE 시료에서의 부분방전을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 인가전압 4[kV]의 경우 방전 분포를 나타내며 정극성 영역에서는 35~90° 위상에서 6,713[pC]의 방전전하량을 나타내고, 부극성 영역에서는 위상각 180~250°에서 75[pC]의 방전전하량을 나타낸다. 또한, 정극성에서 최대 방전전하량 10[pC], 방전 발생 빈도수 880이 발생했으며, 부극성에서는 최대 방전전하량 8[pC], 방전 발생 빈도수가 14임을 확인할 수 있었다. 공기 보이드 존재뿐 아니라 침전극 기울기가 45° 가까이 되면서 전자주입이 정극성 영역에서도 용이하게 되어 나타나는 현상으로 인하여 부극성 영역에서보다 정극성 영역에서 방전 전하량과 빈도수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6(b)는 인가전압 21 [kV]일 경우로서 정극성에서의 위상각 0~90° 영역에서 방전전하량 105,780[pC], 발생 빈도수 10,633을 나타내고, 부극성에서는 초기위상에서 발생하면서 방전발생 빈도수가 크게 증가하여 절연과피가 발생하였다.

공기 보이드 시료에서의 부분방전 개시전압은 침전극 기울기가 수직에서 45°로 커짐에 따라 1[kV]에서 2[kV] 및 4[kV]로 선형적으로 증가됨을 확인하였다. 이것은 공기 보이드의 영향에 의한 전극의 기하학적 형

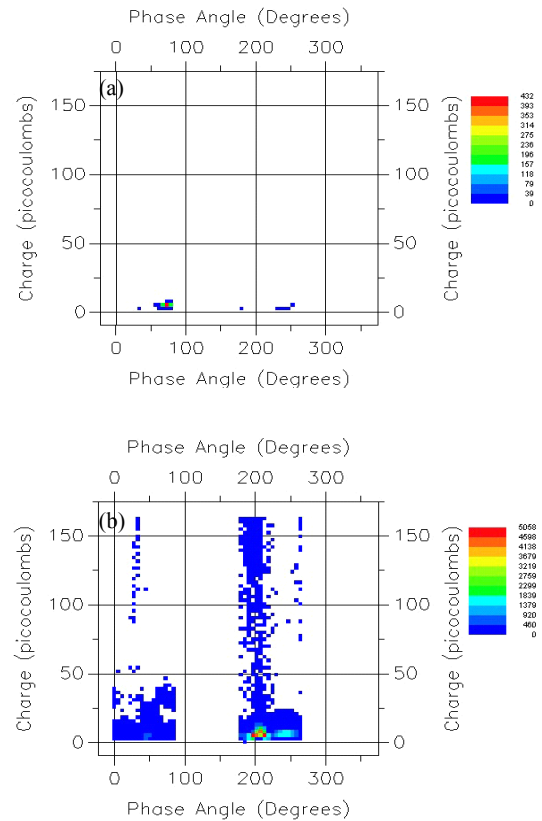


Fig. 6. Distribution of air void specimens at V(1)-T(45). (a) 4[kV] and (b) 21[kV].

Table 3. PD characteristics of air void specimens.

| Specimen | V [kV] | q [pC] | | | | n | |
|----------|--------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| | | +q _{total} | -q _{total} | +q _{ave} | -q _{ave} | +n | -n |
| I(2.0) | 1.0 | 0 | 4.39 × 10 ³ | 0 | 7 | 0 | 597 |
| -V(1.0) | 13.0 | 4.20 × 10 ⁴ | 2.50 × 10 ⁴ | 20 | 10 | 2,148 | 2,487 |
| -T(0) | 4.0 | 6.71 × 10 ³ | 74.8 | 8 | 5 | 8.8 × 10 ² | 14 |
| I(2.0) | 21.0 | 1.06 × 10 ⁵ | 7.27 × 10 ⁵ | 10 | 10 | 1.06 × 10 ⁴ | 7.10 × 10 ⁴ |

상의 변화로 사료된다. 공기 보이드 시료에서의 전압에 따른 영역별 방전 전하량과 방전 빈도수를 정리하면 표 3과 같다.

3.6 공기 보이드 시료의 방전전류 특성

그림 7은 인가전압 변화와 침전극 기울기에 따른 공기 보이드 시료의 방전 특성을 조사한 것으로

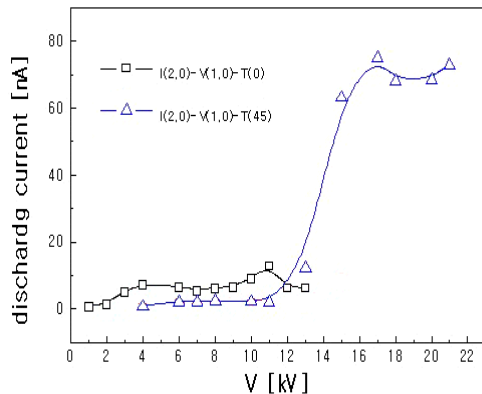


Fig. 7. Discharge current in the air void specimens.

I(2.0)-V(1.0)-T(0)의 경우는 낮은 인가전압 1[kV]에서 방전이 개시되어 방전전류 0.36[nA]가 처음으로 측정되었으며, 인가전압 8[kV]에서는 5.9[nA]로 1[kV]에 비해 16.4배 증가하고 트립 직전 인가전압 13[kV]에서는 6.1[nA]로서 1[kV]에 비해 17배 정도까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

I(2.0)-V(1.0)-T(45) 경우는 방전개시 전압 4[kV]에서 방전전류 0.56[nA]가 트립 직전까지 인가한 21[kV]에서는 72.76[nA]가 측정되었고, 무보이드 시료와 비교하면 12[kV] 이하에서는 방전전류가 안정적이었으나, 전압이 높아지면서 공기 보이드 부분방전의 영향으로 방전전류가 매우 급하게 증가하다가 절연파괴에 이르는 것을 확인하였다.

4. 결론

침 전극 기울기에 따른 초고압 케이블 절연재료인 XLPE 내부에서의 부분방전 특성에 대한 실험 결과, 부분방전 실험에서 침 전극 기울기 45° 시료는 침 전극 배치에 따른 전계집중의 완화로 절연파괴 전압이 상승함을 확인하였다. 그리고 공기 보이드 시료는 무보이드 시료에 비해 부분방전 발생 개시전압이 매우

낮아지고, 기울기 각도에 비례하여 선형적으로 증가함을 확인하였다.

무보이드 시료에서 침 전극 기울기에 따른 전계집중은 전극 배치의 영향이 매우 크나 공기 보이드 시료에서는 보이드의 영향이 지배적임을 확인하였다. 침 전극 기울기에 따른 방전전류의 특성은 무보이드 시료에서 기울기가 45°일 때 방전전류 특성이 가장 안정적이거나, 공기 보이드 시료에서는 보이드의 기여로 방전전류가 매우 급하게 증가함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] H. N. Nagamani and Channakeshava, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **13**, 706 (1998).
- [2] J. Densley, T. Kalickil, and Z. Nadolnf, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **8**, 48 (2001).
- [3] G. Wu and D. H. Park, *High Voltage Engineering Symposium* (Conference Publication No. 467, IEE, 1999) p. 22.
- [4] H. Kaneiwa, Y. Suzuoki, and T. Mizutani, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **7**, 843 (2000).
- [5] K. S. Suh and C. R. Lee, *Proc. of KIEE*, **46**, 34 (1997).
- [6] S. T. Okunaga, T. T. Surusaki, Y. Z. Arief, S. O. Htsuka, T. Mizuno, and M. Hikita, *Proc. of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, **3** (Nagoya, 2003) p. 1206.
- [7] M. Muhr, E. Neges, R. Woschitz, and C. Sumerede, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (2004). p. 232.
- [8] T. Ito, O. Sato, T. Sakai, and Y. Ehara, *Jpn. Trans. of IEE*, **109**, 19 (1989).
- [9] A. R. Blythe, *Electrical Properties of Polymers* (Cambridge University Press, New York, 1982) p. 88.
- [10] T. Okamoto and T. Tanaka, *Jpn. Trans. of IEE*, **102**, 7 (1982).