

## 전극형상 및 보이드에 따른 XLPE의 부분방전 특성

신종열<sup>1</sup>, 김균식<sup>2</sup>, 홍진웅<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 삼육대학교 카메카트로닉스학과

<sup>2</sup> 광운대학교 전기공학과

### Partial Discharge Characteristics of XLPE According to Electrode Shape and Void

Jong-Yeol Shin<sup>1</sup>, Guin-sik Kim<sup>2</sup>, and Jin-Woong Hong<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Car-Mechatronics, Sahmyook University, Seoul 01795, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

(Received December 16, 2015; Revised December 24, 2015; Accepted December 24, 2015)

**Abstract:** Transmission equipment is mainly used for the XLPE (cross-linked polyethylene) insulation cable for ultra high voltage power to minimize power loss. The experiment examined the partial discharge characteristics according to the insertion of the bar electrode and needle electrode into the XLPE specimen and the air voids. XLPE insulation cable manufactured by T. company and tungsten electrode material by K. company were used for specimens, by adhering conductive tape on the semi-conductive material of the lower electrode of XLPE specimen with the dimension of 16×40×30 [mm] was used as negative electrode. In order to investigate the PD with  $\phi$ -q-n of XLPE specimen according to the electrode shape and the size of air voids. we examined the PD by varying the voltage after applying voltage of 3~20 kV on the electrode. Therefore, it was confirmed from the result of PD characteristics of specimen that the larger the air void than the gap between electrode (+) and electrode(-), the larger effect on the discharge when the bar electrode and needle electrode inserted into XLPE, and the closer the distance between the insulation and the needle electrode, the faster insulation breakdown.

**Keywords:** Partial discharge, Electrical field distribution, Bar electrode, Needle electrode

### 1. 서 론

현대사회는 전기에너지의 사용이 급증하면서 손실을 줄이고 안정된 송전을 위한 시스템 및 절연재료에 관심이 높아지고 있다 [1]. 따라서 전력케이블의 초고압화 및 대용량화가 진행되어 안정된 전력전송을 위한 신뢰성 있는 절연시스템이 요구된다 [2]. 이에 따른 전력기기의 출현으로 절연재

료는 고전압 사용과 더불어 복합적인 요인으로 절연성의 저하가 발생되어 시간이 흐름에 따라 절연재료의 기능이 저하되고 기기의 기능도 저하되어 사고를 일으킬 수 있다 [2,3]. 따라서 안정된 송전시스템의 구축과 우수한 절연재료의 개발 및 성능 개선은 필수적이며 전력기기의 대용량화 및 고전압화가 매우 중요한 요소라고 사료된다 [3,4]. 전력케이블을 이루는 각 구성요소의 고유한 역할과 각 층의 재료가 제 기능을 수행하지 못하면 절연층의 절연파괴가 발생되어 전력케이블의 고장이 발생될 수 있으므로 유전재료의 특성 개선 및 새로운 재료의 개발은 계속 발전되어야 한다 [1,5]. 따라서 고분자 재료 중에서 가장 대표적인 유전재료인 폴리 에틸렌은 우수한 유전 특성과 안정된 절연 특성 [5,6]을 가지

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

며 저밀도 폴리에틸렌이 폭넓게 사용되고 있다 [7,8]. 이러한 저밀도 폴리에틸렌의 단점을 보완하기 위해서 열 변형 방지와 전기적 특성 확보를 위해 일반적으로 가교제를 첨가하여 화학적 가교를 시켜 열적 특성과 기계적 특성을 개선한 가교폴리에틸렌 (cross linked polyethylene, XLPE)을 제작하여 케이블의 대용량화와 고전압화 및 고성능화에 이용되고 있다 [6,9,10]. 본 실험에서는 케이블에서 매우 중요한 절연재료인 XLPE에 봉전극 및 침전극을 삽입시켜 부분방전 특성인  $\phi$ -q-n을 조사하고, 그리고 내부 보이드의 크기에 따른 부분방전에 미치는 영향에 대하여 연구한 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료 및 실험

#### 2.1.1 시료

전기적 및 열적 특성이 우수한 XLPE (cross linked polyethylene)를 16×40×30[mm]로 절단하여 시료로 사용하였다. 자체 제작한 지그로 시료에 직경 1[mm]의 텅스텐 전극을 에칭한 후 침 선단 곡률 반경 30~60[ $\mu$ m]로 조정하여 절연체에 서서히 삽입하였다. 그리고 보이드는 시편에 침전극 및 봉전극을 삽입한 후 보이드를 형성하고자 하는 길이만큼 뒤로 빼내는 장치를 사용하여 정교하게 제작하였고, 침전극과 봉전극 형태의 전극을 사용하고 전극 간 거리는 1~2 [mm], 공기 보이드의 크기는 0.5~1.5[mm]로 하였다. 시료 표면과 전극 사이는 에폭시 수지로 밀봉하고 접지측 전극은 내부 반도체층에 도전성 테이프를 접착하여 사용하였다.

표 1은 침전극과 봉전극의 전극형상과 절연체의 두께와 보이드의 크기에 따라 시료를 구분하였다.

Table 1. Kind of specimens.

Electrode shape	Specimen	Insulator thickness	Air void
Needle	N-I(1.0) - V(0.5)	1.0 [mm]	0.5 [mm]
	N-I(1.0) - V(1.0)		1.0 [mm]
	N-I(1.0) - V(1.5)		1.5 [mm]
	N-I(2.0) - V(0.5)	2.0 [mm]	0.5 [mm]
	N-I(2.0) - V(1.0)		1.0 [mm]
	N-I(2.0) - V(1.5)		1.5 [mm]
Bar	B-I(1.0) - V(0.5)	1.0 [mm]	0.5 [mm]
	B-I(1.0) - V(1.0)		1.0 [mm]
	B-I(1.0) - V(1.5)		1.5 [mm]
	B-I(2.0) - V(0.5)	2.0 [mm]	0.5 [mm]
	B-I(2.0) - V(1.0)		1.0 [mm]
	B-I(2.0) - V(1.5)		1.5 [mm]

Needle or Bar - Insulator[mm] - Void[mm]

### 2.2 부분방전 실험

XLPE 시료의 절연체 두께에 따른  $\phi$ -q-n 분포를 관찰하기 위해 AVO co.의 부분방전 측정 장치에 전압을 인가하고 측정하였다. 측정 전압은 60[Hz] 3~13[kV]를 step 인가법으로 인가 후 즉시 10초 동안 발생한 방전빈도수 및 방전전하량을 위상별로 검출한 데이터를 acquisition하여 데이터를 한 주기로 적층하고,  $\phi$ -q-n 데이터를 3차원 그래프로 작성하였다 [11]. 또한 전극은 텅스텐으로 제작된 봉전극과 침전극을 사용하였으며, MATLAB으로 프로그래밍 하여 위상 검출, 방전빈도수 및 방전전하량을 측정하였다.

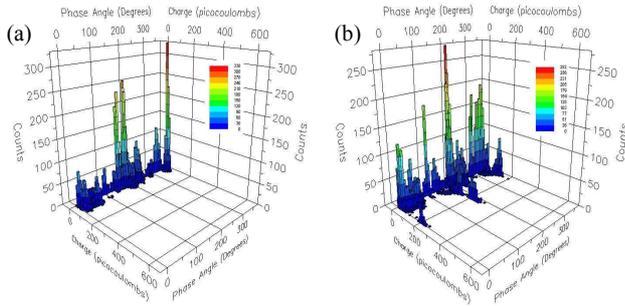
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 절연체 두께 1 mm 부분 방전

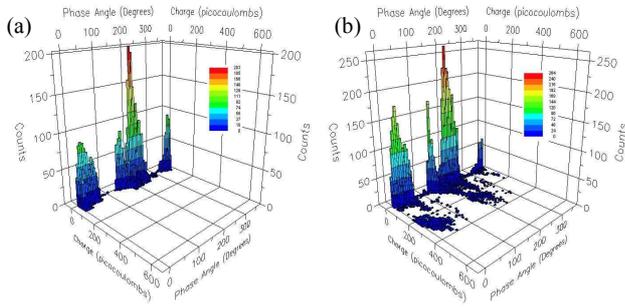
케이블 절연체 XLPE의 전극형상과 보이드에 따른 시료의 부분방전 특성을 조사하기 위하여 침전극 및 봉전극을 삽입하고 하부전극과 간격을 1[mm] 유지하며 공기 보이드 0.5~1.5 mm에서  $\phi$ -q-n을 측정하였다.

(1) 절연체 1.0 mm-보이드 0.5 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 1(a)는 전압 3[kV]를 인가했을 때 침전극 I(1.0)-V(0.5)에서  $\phi$ -q-n 분포도로 정극성 영역(0~180°)에서 방전빈도수는 50~100을 얻었고, 방전전하량은 모든 영역에서 100[pC] 이하이다. 또한 부극성 영역(180~360°)에서는 방전빈도수가 250~300으로 정극성보다 크고 위상 180~200° 부근에서는 250 정도이며, 방전전하량은 정극성과 같은 100[pC] 이하를 나타내었다. 그림 1(b)는 전압 5[kV]를 인가했을 때의  $\phi$ -q-n 분포도로 정극성 영역에서 방전빈도수가 100~150 이상 발생하며, 0~30° 영역에서는 방전전하량이 200[pC] 이상을 나타내었다. 그리고 부극성 영역에서 방전빈도수가 인가전압 3[kV]일 때와 거의 비슷하고 방전전하량은 100[pC] 이상으로 증가하였으며, 특히 230° 부근에서는 방전빈도수도 거의 300 정도로 증가했고 방전전하량은 200[pC] 이상 검출되었다. 그림 2(a)는 전압 3[kV]를 봉전극 I(1.0)-V(0.5)의  $\phi$ -q-n 분포로 정극성에서 방전빈도수가 100 이하로 침전극과 비슷하며, 방전전하량도 정극성 영역에서 100[pC]으로 침전극과 비슷하였다. 또한, 부극성 영역에서 방전빈도수는 200



**Fig. 1.**  $\phi$ -q-n distribution of needle electrode I(1.0)-V(0.5). (a) 3.0[kV], (b) 5.0[kV].



**Fig. 2.**  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(1.0)-V(0.5). (a) 3.0[kV], (b) 8.0[kV].

**Table 2.** PD characteristics of air void (0.5 mm).

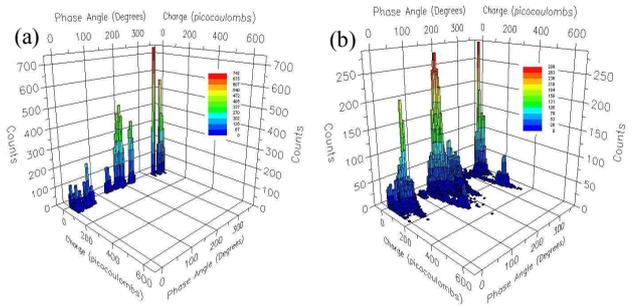
Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(1.0)-V(0.5)	3.0	149,720	194,040	36	33	4,149	4,779
	5.0	194,040	301,470	46	43	4,198	7,080
B-I(1.0)-V(0.5)	3.0	85,288	107,720	28	30	3,029	3,612
	8.0	286,160	202,140	54	48	5,308	4,203

이하이며 위상각 360°에서는 정극성보다 조금 높게 나타났으나 방전전하량도 100[pC] 이하로 침전극과 비슷하게 나타났다. 그림 2(b)는 시료에 전압 8[kV]를 인가했을 때의 봉전극 I(1.0)-V(0.5)의  $\phi$ -q-n 분포로 정극성 영역에서 방전빈도수는 400 이하이고, 방전전하량 450[pC] 이상을 얻었다. 또한 부극성 영역에서도 방전 빈도수는 인가전압 3[kV] 보다 약간 증가하였으며, 최대 방전전하량도 400[pC] 이상으로 증가하였다.

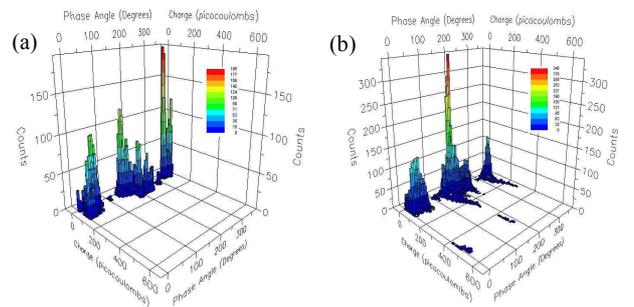
표 2는 공기 보이드 0.5 mm인 시료 XLPE의 전극 형상에 따른 부분방전 특성을 나타내고 있다.

(2) 절연체 1.0 mm-보이드 1.0 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 3(a)는 Insulator(1.0)-Void(1.0) 구조에 전압 3[kV]를 침전극에 인가할 때  $\phi$ -q-n 분포로 정극성 영역에서 방전빈도수가 200~450 정도이며, 방전전하량은 모든 영역에서 100[pC] 이하를 나타내었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 450~740 정도로 정극성보다 높으나 방전전하량은 정극성과 같은 100[pC] 이하를 나타내었다. 그림 3(b)는 전압 6.5[kV]를 인가했을 때 침전극 I(1.0)-V(1.0)의  $\phi$ -q-n 분포도로 정극성 영역에서 방전빈도수는 180 이상 발생하며, 0~30° 영역에서는 최대 방전전하량이 200[pC] 이상을 나타내기도 하였다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 인가 전압 3[kV] 때보다 낮은 300 이하의 값을 나타냈으며, 방전전하량은 400[pC] 이상으로 약간 증가하였고, 250° 부근에서는 420[pC] 이상이 검출되었다.



**Fig. 3.**  $\phi$ -q-n distribution of needle electrode I(1.0)-V(1.0). (a) 3.0[kV], (b) 6.5[kV].



**Fig. 4.**  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(1.0)-V(1.0). (a) 3.0[kV], (b) 5.0[kV].

그림 4(a)는 봉전극 I(1.0)-V(1.0)의 구조에 전압 3[kV]를 인가했을 때  $\phi$ -q-n 분포로 정극성 영역에서

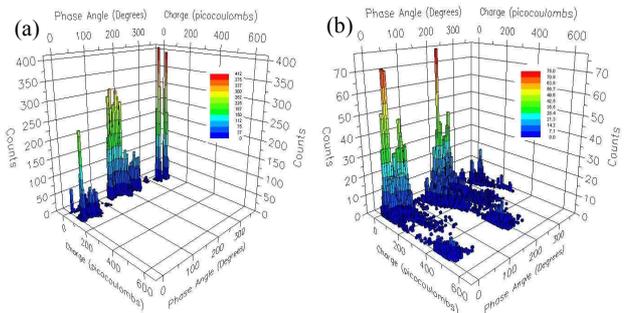
**Table 3.** PD characteristics according to electrode shape of XLPE with air void (1.0 mm).

Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(1.0)-V(1.0)	3.0	200,130	245,980	44	37	4,537	6,707
	6.5	665,810	801,480	61	73	10,898	10,926
B-I(1.0)-V(1.0)	3.0	218,080	280,270	51	78	4,235	3,608
	5.0	458,640	393,300	52	58	8,826	6,840

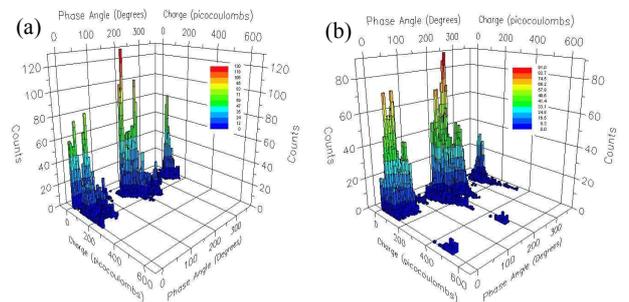
방전빈도수는 80~120을 나타내고, 방전전하량은 100[pC] 정도가 얻었다. 또한 부극성 영역에서는 200° 전후에서 방전빈도수가 120 이하이고, 360° 영역에서는 180 이상으로 정극성보다 높았으며 방전전하량도 180[pC] 이상 검출되었다. 그림 4(b)는 전압 5[kV]를 인가되었을 때 정극성 영역에서 방전빈도수가 100~350 이하를 나타내었고, 방전전하량은 500[pC] 이상 검출되었다. 또한 부극성 영역에서 방전빈도수는 인가전압 3[kV] 때보다 증가하였으며, 400[pC] 이상 검출되었고, 부분방전 특성을 정리하면 표 3과 같다.

(3) 절연체 1.0 mm-보이드 1.5 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 5(a)는 침전극 I(1.0)-V(1.5) 구조에 전압 3[kV]를 인가했을 때  $\phi$ -q-n 분포로 정극성 영역에서 방전빈도수는 200~300 이하이며, 방전전하량은 150[pC] 정도 검출되었다. 또한, 부극성 영역에서는 방전빈도수가 400 이상으로 정극성보다 많이 발생하였으며, 방전전하량은 정극성과 비슷한 150[pC] 이하가 검출되었다. 그림 5(b)는 전압 4[kV]를 인가했을 때 침전극 I(1.0)-V(1.5)의  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역에 방전빈도수가 70 이하로 낮아졌으며, 방전전하량이 500[pC] 이상 검출되었다. 또한, 부극성 영역에서는 방전빈도수가 정극성보다 약간 증가하였고, 방전전하량은 거의 비슷하게 검출되었으며, 정극성 및 부극성 영역에서 높은 트립 전하량이 갑자기 검출되었다. 따라서 침전극의 부분방전 특성 실험에서 절연체 두께 변화와 무관하게 일정한 전압에서 급격히 방전이 개시되었으며 또 트립 및 절연파괴가 발생되었다. 그림 6(a)는 인가전압 3[kV]일 때 봉전극 I(1.0)-V(1.5)의  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역에서 최대 방전빈도수가 80 이하이며, 최대 방전전하량은 300[pC] 이하가 검출되었다. 또한 부극성 영역에서도 최대 방전빈도수가 130 이하로 정극성보다 높아졌으며, 최대 방전전하량은 정극성과 거의 같게 검출되었다.



**Fig. 5.**  $\phi$ -q-n distribution of needle electrode I(1.0)-V(1.5). (a) 3.0[kV], (b) 4.0[kV].



**Fig. 6.**  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(1.0)-V(1.5). (a) 3.0[kV], (b) 4.0[kV].

**Table 4.** PD characteristics according to electrode shape of void (1.5 mm).

Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(1.0)-V(1.5)	3.0	361,870	368,080	49	58	7,437	6,354
	4.0	368,330	385,330	120	126	3,067	3,068
B-I(1.0)-V(1.5)	3.0	350,580	421,400	999	106	3,564	3,986
	4.0	358,820	384,090	81	98	4,427	3,916

그림 6(b)는 봉전극 I(1.0)-V(1.5) 구조에 인가전압 4[kV]일 때  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역에서 방전빈도수가 70 이하이고, 방전전하량 550[pC] 이상 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 90 정도로 인가전압 3[kV] 때보다 감소하였으며, 방전전하량은 정극성과 동일하게 550[pC] 이상 넓은 영역에서 검출되었다. 정극성 및 부극성 영역에서 전하량이 나타났다가 사라지는 현상을 볼 수 있었다. 이것은 시뮬레이션을 통한 실험에서 예측한 결과로 봉전극의 방전 개시 전압은 침전극에 비해

낮은 전압에서 발생했으며 절연체 두께에 영향을 받지 않고 봉전극 전체에서 전계분포가 형성되는 원인으로 사료된다.

표 4는 절연체 1 mm, 공기 보이드 1.5 mm의 시료에서 전극형상에 따른 부분방전 특성이다.

(4) 방전전류 특성 (절연체 1 mm)

XLPE 절연체의 내부 반도체층을 하부전극으로 하고 침전극 및 봉전극을 상부 전극으로 하여  $\phi$ -q-n 특성을 조사하기 위하여 절연층 1[mm]에 공기 보이드 0.5~1.5[mm]를 형성시킨 후 부분방전 전류 특성을 그림 7에 나타내었다. 그리고 같은 조건에서 전극형상에 따른 방전전류는 침전극의 방전전류가 봉전극의 수배 크고, 방전전류는 보이드의 크기에 따라 방전의 영향으로 커짐을 확인하였다.

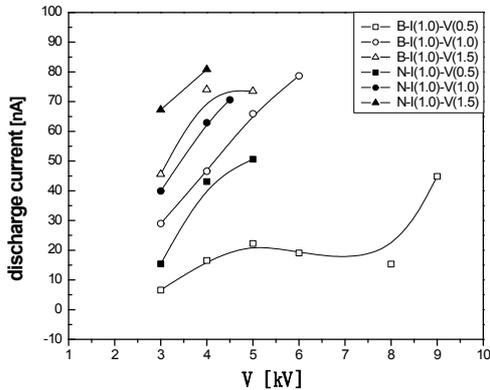


Fig. 7. Discharge current according to void of insulator.

3.2 절연체 두께 2 mm 부분 방전

케이블 절연체 XLPE의 전극형상과 보이드에 따른 시료의 부분방전 특성을 조사하기 위하여 침전극 및 봉전극을 삽입시킨 후 하부전극과 간격을 2[mm]로 고정하고, 공기 보이드를 0.5~1.5 mm에서  $\phi$ -q-n을 측정하였다.

(1) 절연체 2.0 mm 보이드 0.5 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 8(a)는 절연체 2.0 mm, 보이드 0.5 mm의 시료에 3[kV]를 침전극에 인가했을 때의  $\phi$ -q-n 분포도

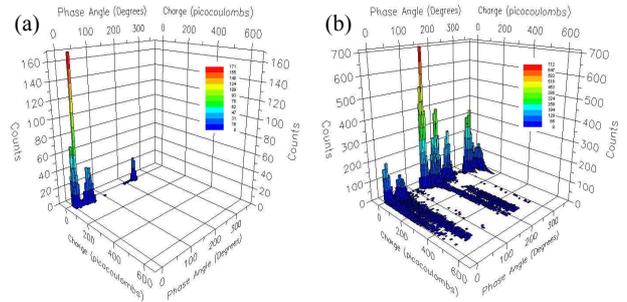


Fig. 8.  $\phi$ -q-n distribution of needle I(2.0)-V(0.5). (a) 3.0[kV], (b) 9.0[kV].

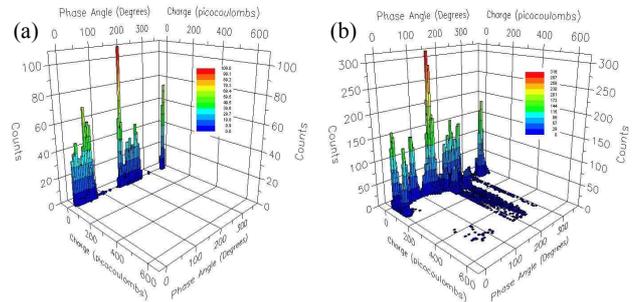


Fig. 9.  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(2.0)-V(0.5). (a) 3.0[kV], (b) 13.0[kV].

이다. 정극성 영역에서 방전빈도수가 30~170 정도 발생했으며, 방전전하량은 모든 영역에서 150[pC] 이하의 값이 검출되었다. 또한 부극성 영역은 180~250° 범위에서 방전발생 빈도수가 20 이하이고, 방전전하량은 20[pC] 이하로 정극성보다 훨씬 낮게 검출되었으며. 360° 영역에서는 방전이 발생하지 않았다. 그림 8(b)는 인가전압 9[kV]에서 정극성 영역의 방전빈도수가 710 이상 발생하였으며, 50° 부근에서는 방전전하량이 520[pC] 이상이 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수는 300~400 정도 발생했으며, 방전전하량은 정극성과 같은 값이 검출되다가 300°~360° 영역에서는 200[pC] 이하로 검출되었다.

그림 9(a)는 절연체 2.0 mm, 보이드 0.5 mm 시료에 전압 3[kV]를 봉전극에 인가했을 때  $\phi$ -q-n 분포로 정극성 영역 0~90° 범위에서 방전빈도수가 70 이하가 발생되었고, 방전전하량은 20[pC] 이하가 검출되었다. 또한 방전빈도수는 부극성 영역 180~280°에서 110 이하와 360° 부근에서 70 정도 발생하였으며, 방전전하량은 정극성과 비슷한 20[pC] 이하가 검출되었다. 그

**Table 5.** PD characteristics according to electrode shape of XLPE with air void (0.5 mm).

Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(2.0)-V(0.5)	3.0	39,982	2141	40	19	1,011	110
	9.0	1,010,000	115,900	77	86	13,130	13,396
B-I(2.0)-V(0.5)	3.0	27,399	17,833	22	21	1,235	866
	13.0	232,480	612,180	37	88	6,357	6,990

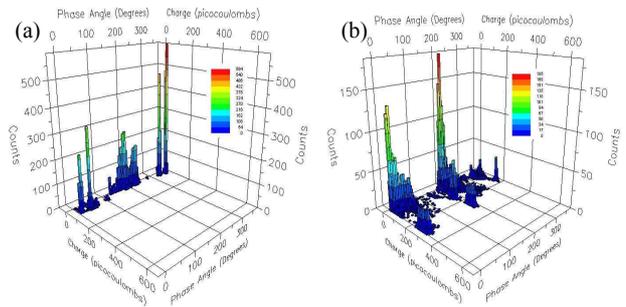
림 9(b)는 같은 시료에 전압 13[kV]를 인가되었을 때 봉전극의  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역 150° 부근에서 방전빈도수는 330 이상 발생하였고, 방전전하량은 전반적으로 낮게 분포되다가 50°~120° 영역에서 산발적으로 높게 나타나 520[pC] 이상 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 140~170 정도 발생했고, 방전전하량은 정극성과 비슷한 520[pC] 정도 검출되다가 360° 부근에서는 방전전하량이 50[pC] 이하가 검출되었다.

표 5는 절연체 두께 2.0 mm와 보이드 0.5 mm인 시료의 전극형상에 따른 부분방전 특성 값이다.

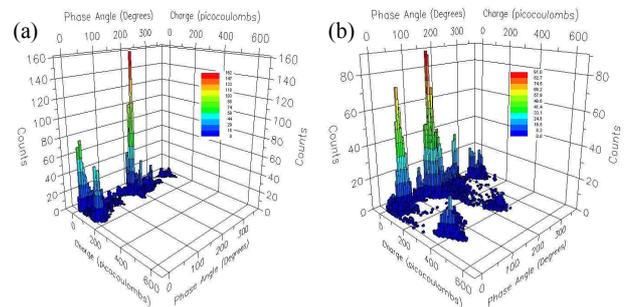
(2) 절연체 2.0 mm 보이드 1.0 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 10(a)는 절연체 2.0 mm, 보이드 1.0 mm 침전극 시료에 전압 3[kV]가 인가되었을 때의  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역에서 방전빈도수는 220~300 정도 발생했으며, 방전전하량은 100[pC] 이하가 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 200° 전후에서 방전빈도수가 230 정도 발생했으며, 360° 영역 가까이에서는 방전빈도수가 600 이하가 발생되어 정극성에 비해 높게 나타났고 방전전하량은 정극성 비슷하게 100[pC] 이하가 검출되었다. 그림 10(b)는 같은 시료에 전압 4.5[kV]가 인가되었을 때 정극성과 부극성 영역에서 방전빈도수가 200 이하 발생했으며, 방전전하량은 정극성 영역에서는 350[pC] 이상 검출되었고, 부극성 영역에서는 300[pC] 정도 검출되었다.

그림 11(a)는 절연체 2.0 mm, 보이드 1.0 mm 봉전극 시료에 전압 3[kV]가 인가되었을 때  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 범위는 0~120° 영역에서는 방전빈도수가 70 정도 발생했고, 120~180° 영역에서는 10 이하로 적었으며, 방전전하량은 정극성 영역에서 200[pC] 이하가 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 200° 전후에서 방전빈도수 160 이하가 발생했고 360° 영역 가까



**Fig. 10.**  $\phi$ -q-n distribution of needle electrode I(2.0)-V(1.0). (a) 3.0[kV], (b) 4.5[kV].



**Fig. 11.**  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(2.0)-V(1.0). (a) 3.0[kV], (b) 5.0[kV].

**Table 6.** PD characteristics according to electrode shape of XLPE with air void (0.5 mm).

Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(2.0)-V(1.0)	3.0	112,600	178,210	46	31	2,465	5,823
	4.5	312,800	284,440	98	70	3,193	4,060
B-I(2.0)-V(1.0)	3.0	204,600	114,740	72	74	2,848	1,554
	5.0	297,810	190,430	89	91	3,354	2,058

이에서는 방전이 거의 발생하지 않았으며, 방전전하량은 180[pC] 이하가 검출되었다. 그림 11(b)는 같은 조건에서 전압 5[kV]가 인가되었을 때 봉전극의  $\phi$ -q-n 분포도로서 정극성 영역에서는 방전빈도수가 70 정도로 인가전압 3[kV]일 때와 비슷하게 발생하였고, 방전전하량은 500[pC] 이하가 검출되었다. 또한, 부극성 영역에서도 방전빈도수가 90 정도로 정극성보다 조금 높게 나타났고, 방전전하량은 450[pC] 이하가 검출되어 정극성과 부극성의 넓은 영역에서 나타났다가 사라지는

분포를 알 수 있었다. 절연체 두께 2.0 mm와 공기 보이드 1.0 mm인 시료의 전극형상에 따른 부분방전 특성값을 정리하면 표 6과 같다.

(3) 절연체 2.0 mm-보이드 1.5 mm의  $\phi$ -q-n 분포

그림 12(a)는 절연체 2.0 mm 보이드 1.5 mm 시료에 전압 3[kV]를 인가했을 때 침전극의  $\phi$ -q-n 분포도로 정극성 영역에서 방전빈도수는 50~180 이하가 발생하였으며, 방전전하량은 모든 영역에서 150[pC] 이하가 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 160~400 정도까지 발생하여 정극성보다 높게 나타났고, 방전전하량은 정극성과 같은 150[pC] 이하가 검출되었다. 그림 12(b)는 같은 시료에 전압 4[kV]를 인가했을 때 정극성 영역에서 방전빈도수가 100 이하가 발생했으며 방전전하량이 250[pC] 이상 검출되었다. 또한 부극성 영역에서는 방전빈도수가 인가전압 3[kV]일 때보다 증가하여 140 이상 발생하였고, 방전전하량은 정극성과 비슷하게 검출되었고 정극성 및 부극성 영역에서 높은 트립 전하량이 나타났다.

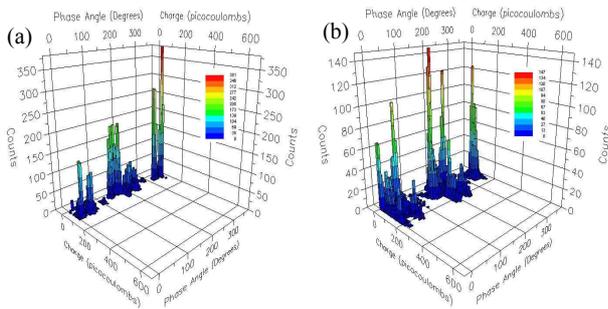


Fig. 12.  $\phi$ -q-n distribution of needle electrode I(2.0)-V(1.5). (a) 3.0[kV], (b) 4.0[kV].

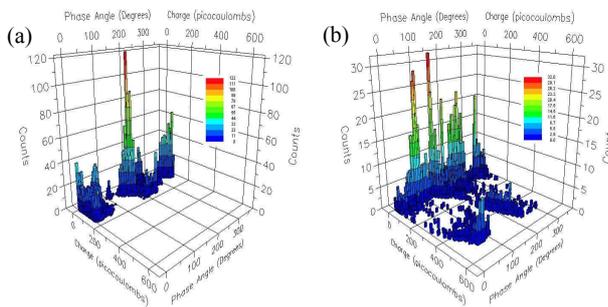


Fig. 13.  $\phi$ -q-n distribution of bar electrode I(2.0)-V(1.5). (a) 3.0[kV], (b) 4.0[kV].

Table 7. PD characteristics according to electrode shape of XLPE with air void (0.5 mm).

Specimen	V[kV]	q [pC]				n	
		+q <sub>total</sub>	-q <sub>total</sub>	+q <sub>ave</sub>	-q <sub>ave</sub>	+n	-n
N-I(2.0)-V(1.5)	3.0	265,400	317,850	57	63	4,659	5,053
	4.0	346,290	410,100	91	95	3,787	4,338
B-I(2.0)-V(1.5)	3.0	237,300	216,780	66	80	3,530	2,705
	4.0	161,970	148,540	137	128	1,179	1,156

그림 13(a) 절연체 2.0 mm, 보이드 1.5 mm 시료에 전압 3[kV]를 인가했을 때 봉전극의  $\phi$ -q-n 분포도로 정극성 영역에서 방전빈도수는 40 이하로 낮게 발생했으며 부극성 영역에서는 120 이상으로 증가하여 발생했다. 방전전하량은 정극성 및 부극성 모든 영역에서 180[pC] 정도까지 검출되었다. 그림 13(b)는 같은 조건에서 전압 4[kV]를 인가했을 때 정극성 영역에서 방전빈도수가 25~35 이하로 낮게 발생하였고, 특이하게 100° 부근에서 방전빈도수가 10 이하를 보였다. 방전전하량은 550[pC] 이상 검출되었으며, 부극성 영역에서는 방전빈도수가 정극성보다 낮아져 22 이하가 발생되었다. 방전전하량은 정극성과 비슷하게 550[pC] 이상 검출되었다. 정극성 및 부극성 영역의 넓은 범위에서 방전이 발생하였고, 전하량이 나타났다가 사라지는 현상을 볼 수 있었다.

표 7은 절연체 두께 2.0 mm, 공기 보이드 1.5 mm 시료의 전극형상에 따른 부분방전 특성을 정리한 값이다.

(4) 방전전류 특성

그림 14는 XLPE 케이블 절연층에 침전극과 봉전극 삽입에 따른 방전 전류 특성을 조사하기 위하여 절연층을 2[mm]로 고정하고 공기 보이드를 0.5 ~ 1.5[mm]로 제작한 후 인가 전압에 따른 방전 전류를 나타낸 그림으로 같은 조건에서 침전극의 방전전류가 봉전극보다 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

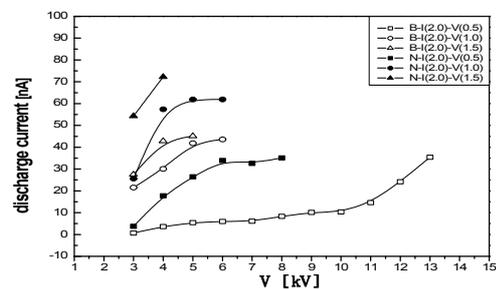


Fig. 14. Discharge current according to void of insulator.

그리고 같은 인가전압에서 보이드의 크기가 커지면 방전의 영향으로 방전 전류도 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

케이블의 절연 재료인 XLPE의 부분방전 특성을 전극 형상과 보이드의 영향을 조사하기 위해 절연체 두께 16[mm]인 초고압 케이블에 침전극 및 봉전극을 삽입시켜 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

봉전극에서 절연 층 두께가 커짐에 따라 부분방전 검출 위상영역이 넓어졌으며, 시료에 공기 보이드가 존재하면 침전극 또는 봉전극은 부분방전 검출 개시전압이 조금 낮아졌고, 부분방전은 절연체의 두께보다 공기 보이드에 의한 영향이 더 지배적임을 확인하였다. 그리고 같은 조건에서 방전의 영향으로 침전극의 방전전류가 봉전극의 방전전류 보다 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 보이드의 크기가 커지면 방전의 영향으로 방전 전류도 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

#### REFERENCES

- [1] K. Iida, J. S. Kim, S. Nakamura, and G. Sawa, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **27**, 301 (1992).
- [2] S. S. Bamji, A. T. Bulinski, and R. J. Densley, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, **EI-21** (1986).
- [3] R. M. Hill and A. K. Jonscher, *Contemp. Poly.*, **24**, 77 (1983).
- [4] M. R. Wertheimer, L. Paquin, H. P. Schreiber, and S. A. Boggs, *IEEE Conference Record of IEEE Symposium on Electrical Insulation* (1976).
- [5] K. Yahagi, *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, **EI-15**, 241 (1980).
- [6] F. W. Billmeyer, *Textbook of Polymer Science* (Inter. Sci. Pub., John Wiley and Son, New York, 1980). p. 141.
- [7] M. Ieda, G. Sawa, and S. Kato, *J. of Appl. Phys.*, 3737 (1971). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1659678>]
- [8] T. Tanaka, G. C. Montanari, and R. Mulhaupt, *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, **11**, 763 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2004.1349782>]
- [9] S. Singha and M. J. Thomas, *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, **15**, 12 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-DEI.2008.4446732>]
- [10] S. Masuda, S. Okuzumi, R. Kurniant, Y. Murakami, M. Nagao, Y. Murata, and Y. Sekiguchi, *IEEE, 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric*, 290 (2007).
- [11] J. Y. Shin, H. D. Park, J. Y. Lee, and J. W. Hong, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **11**, 42 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/TEEM.2010.11.1.042>]

[1] K. Iida, J. S. Kim, S. Nakamura, and G. Sawa, *IEEE*