

## 전력케이블 접속재 XLPE/EPDM 계면의 부분방전 특성

### Partial Discharge Characteristics of the XLPE/EPDM Interface in Power Cable Joint

조경순<sup>1,a</sup>, 홍진웅<sup>1</sup>

(Kyung-Soon Cho<sup>1,a</sup> and Jin-Woong Hong<sup>1</sup>)

#### Abstract

This paper describes the influence on partial discharge characteristics of defects at the model XLPE/EPDM interfaces of power cable joints. The defects of void and copper which could inadvertently be present at the joint interface. We measured  $\Phi$ -n,  $\Phi$ -q patterns by a computer-aided partial discharge measuring system. Several parameters i. e. maximum discharge  $q_{max}$  [pC], average discharge  $q$  [pC/cycle], and average angle of discharge  $\Theta_g$  [deg] were found to depend upon the defect type varying applied voltage. As the result of time evaluation, partial discharges are small different at copper defects, but is decreasing obviously about 20 minutes at void defect. It considered that difference of magnitude of total positive discharge of  $Q^+$  [pC] and total negative discharge of  $Q^-$  [pC] is SPMD(swarming pulsive micro discharges).

**Key Words** : XLPE, EPDM, Cable joint, Partial discharge, SPMD, Void and copper defects

#### 1. 서론

지중선로는 주요지역의 미관확보와 가공선로 시설이 불가능하고 유지보수가 곤란한 지역 등에 시설하게 된다. XLPE케이블은 기존의 OF케이블과 비교하여 보수가 용이하며 방재 성능이 우수하므로 지중선로의 배전케이블에서 초고압케이블에 이르기까지 널리 이용되고 있다. 그러나 포설시 케이블 길이의 제한으로 인하여 중간에 접속을 하여야 한다. 케이블 접속은 일반적으로 전력관로에서 이루어지는데 공간적인 제한과 함께 빗물의 유입 등으로 작업상황이 매우 열악하다. 이에 따라 접속재 사고는 전체 케이블 사고의 69%를 차지하고 있으며, 특히 직선 접속재가 점유하고 있는 고장이 42%로써 가장 높다[1]. 케이블 접속재 사고의 원

인으로는 훼손, 조립시 이물질 침투등 시공 불량에 의한 사고 원인과 장시간 옥외 노출에 따른 환경 열화에 의한 것으로 분석되고 있다. 한편 부분방전은 절연체 중의 보이드나 이물질 등의 결함부에 발생하는 미소한 방전이며, 각 부분방전 펄스의 에너지양은 미세하나 부분방전의 발생이 매 주기 반복적이고 그 위치가 국부적으로 밀집되어 있기 때문에 열화를 심각하게 하는 주원인으로 알려져 있다[2-4]. 따라서 사고를 미연에 방지하기 위한 절연 진단 기술로서 부분방전측정이 주목되고 있으며 많은 연구가 이루어지고 있지만, 접속부 계면에서 발생하는 전기적 현상에 관해서는 현재까지 많은 검토가 이루어지지 않았다. 계면에 있어 전기적 현상을 분명히 하기 위해서는 최적의 전극계를 구축하고 그 전극계에 있어 검토할 필요가 있다. 이상의 관점으로 본 연구에서는 전력케이블 XLPE 절연층과 전력케이블 직선접속재중 가장 많이 사용되는 조립형 접속재 재료인 EDPM을 모델링한 XLPE/EPDM 계면에 칼날에 의한 상처를 모의한 보이드와 케이블 절단작업시 발생하게 되는 구리 조각을 넣어 인공적인 결함을 발생시킨 후 전압을

1. 광운대학교 전자정보공과대학 전기공학과  
중전기기 미래기술개발 연구센터  
(서울시 노원구 월계동 447-1)

a. Corresponding Author : kscho@seoil.ac.kr

접수일자 : 2006. 8. 16

1차 심사 : 2006. 10. 9

심사완료 : 2007. 8. 8

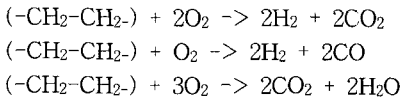
상승시키며 부분방전 특성을 실험 하였으며, 평균 방전 전하량  $q$  [pC/cycle], 최대 방전 전하량  $q_{max}$  [pQ]와 방전 발생 수  $N$  [number]의 변화를 고찰 하였다. 또한 압력 변화에 대한 부분방전의 변화를 조사하고 이들의 결과를 소개한다.

## 2. 시료 및 실험장치

### 2.1 시료

실험 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 전력용 XLPE 케이블(제조사 : L. co)의 절연층 XLPE를 1 [mm] 두께로 슬라이스 하여 사용하였으며, EPDM 시료는 조립형 직선접속재 제조사에서(제조사 : P. co)에서 1 mm 두께로 프레스한 것을 사용하였다. 결함에 의한 부분방전특성을 확인하기 위하여 EPDM과 XLPE 사이의 중앙부분에 표 1과 같은 보이드와 구리를 삽입하여 인공적인 결함을 만들었다. 그림 1은 결함의 형태를 나타낸 것으로 (a)는 XLPE표면에 칼날에 의한 상처를 만든 후 EPDM 적층한 것이고 (b)는 EPDM과 XLPE 계면 사이에 구리를 넣은 것이다.

XLPE/EPDM 계면에 존재하는 보이드 결함의 변화는 절연체 표면의 화학변화와 깊은 관련이 있다. 본 연구에서 부분방전은 XLPE/EPDM 계면에서 발생한다. XLPE(에틸렌(-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-))와 EPDM(에틸렌(-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-)과 플로필렌고무(CH<sub>3</sub>CH=CH<sub>2</sub>)의 공중결합)는 공통적으로 에틸렌이 포함되어 있고, 보이드 내에 있는 공기에 산소가 존재하는 상황에서 에틸렌에 대한 부분방전에 의한 화학반응은 다음과 같다[8].



CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 존재하는 경우에는 다음과 같은 반응에 의해 수산(oxalic acid)이 발생한다.



더욱이, 산소와 질소의 혼합가스 내에서 부분방전이 발생한 경우 다음과 같은 반응이 일어난다[6].

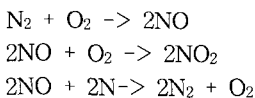


표 1. 결함의 종류.

Table 1. Classification of defects.

Defect	Dimension [mm]
Void	length = 5, depth = 0.6
Copper	length = 2, $\Phi$ = 0.6

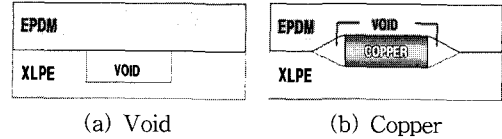
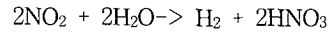


그림 1. 결함의 형태.

Fig. 1. Configuration of defects.

혼합가스 내에 에틸렌의 부분방전에 의한 수분이 존재하면 다시 진행하여 다음 식으로 표현되어진다.



즉, 보이드 중에 부분방전에 의한 공기로부터 활성화된 산소 및 질소가 생기고, 이들은 서로 반응하여 질소산화물로 된다. 이 상태로 수산이 생긴다. 부분방전에 의해 절연체 표면에 수산이 생성되면, 절연체의 도전율은 증가한다[5].

### 2.2 실험장치

전극은 XLPE와 EPDM 시트를 겹쳐 스프링(바넷경수:25 mm/80 kg)에 의해 일정한 면압을 주는 구조로 되어있다. 이때 면압을 2 kg/cm<sup>2</sup>으로 하여 실험하였는데 이는 조립형 접속재의 경우 케이블 절연층의 직경에 따른 접속재의 내경만이 규정되어 있기 때문에 계면의 정확한 압력을 알 수는 없지만, 테이프조인트식으로 직선접속을 할 경우 케이블 접합부의 면압이 2 kg/cm<sup>2</sup>인 것을 고려한 것이다. 또한 고전압을 인가하면 모델전극의 다른 부분에서 방전이 발생할 가능성이 있으므로 모델 전극 전체를 100 cSt의 실리콘유 안에 담가 실험하였다. 실험은 부분방전이 개시할 때까지 전압을 상승시킨 후 600사이클 동안의 방전 펄스를 측정하였으며, 5 kV씩 상승시키며 30 kV까지 반복하였다. 전원에서 인가된 교류전압은 슬라이다스를 거쳐 변압기의 1차측에 입력된다. 2차측 출력전압은 저항 5 MΩ을 통해서 콘덴서 Ck와 전극에 인가되어 부분방전을 발생시킨다. 부분방전을 RC검출회로, 하이패스필터,

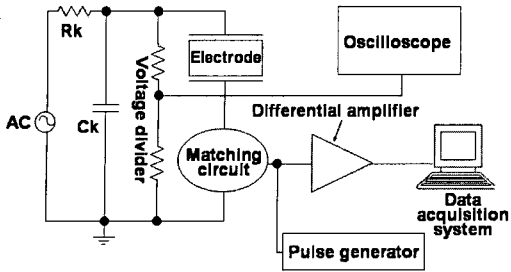


그림 2. 부분방전측정시스템의 블록선도.  
Fig. 2. Block diagram of PD measuring system.

앰프를 통해 데이터취득시스템에 입력된다. 한편 부분방전의 위상정보를 얻기 위해 슬라이더의 2차측에서 Zero Cross 신호를 데이터로 취득 시스템에 입력하였다. 한편, 펄스폭이 수ns로 매우 짧은 부분방전 파형을 데이터취득시스템으로 입력 가능하게 하기 위해 펄스를 약 1  $\mu$ s로 정형화하고, 부분방전 전하량만을 입력하기 위해 RC병렬인 검출임피던스를 이용하였다. 또 절연과파가 발생할 경우 계측장치를 보호하기 위하여 바리스터와 제너다이오드를 검출 임피던스에 병렬로 삽입하였다. 부분방전 신호를 검출할 때 검출임피던스만을 이용하면 전원 60 Hz의 주파수성분의 신호가 증첩되므로 하이패스필터를 이용하여 60 Hz의 주파수성분을 제거하였다. 그러나 하이패스필터를 이용하면 역극성펄스의 언더슈트가 발생하여 이것을 부분방전 신호로 잘못 인식하고 계측장치가 받아들일 가능성이 있기 때문에 이 점은 계측기의 최저 입력 전압을 조정하여 처리하였다.

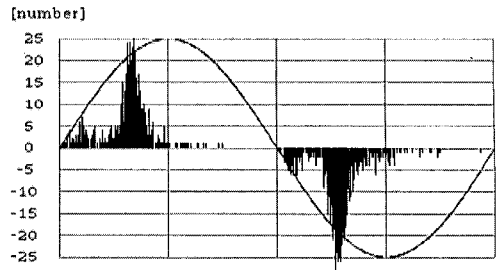
### 2.3 데이터처리

데이터 취득 시스템에 부분방전신호와 측정 제어용의 제로크로스신호를 입력하면 세 개의 디지털 신호인 ZCC(Zero Cross Count), AMP(Amplitude of PD pulse), 및 PHA(Phase of PD pulse)신호로 변환되고, PC에서 동작 명령이 오면 버퍼 내에 기억된 데이터부터 순서대로 GPIB보드를 통해서 PC의 주기억장치에 보내 하드디스크에 저장한 후 위상 정보와 부분방전 전하량 데이터를 이용하여  $\Phi$ -n,  $\Phi$ -q 패턴과 각종 파라메타를 산출하였다.

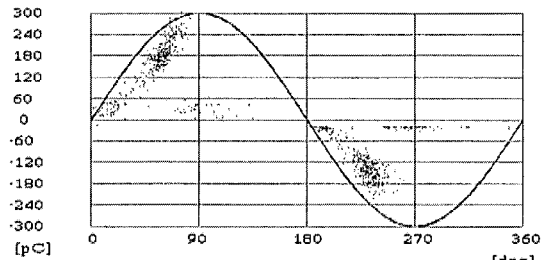
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 부분방전의 $\Phi$ -n, $\Phi$ -q 패턴

부분방전 측정에서 얻어지는  $\Phi$ -n,  $\Phi$ -q 패턴은

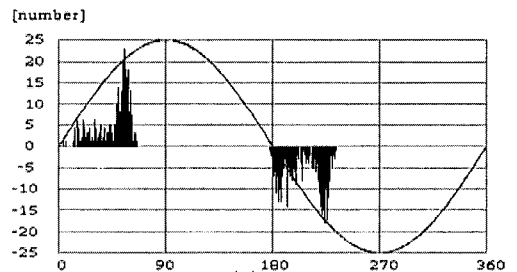


(a)

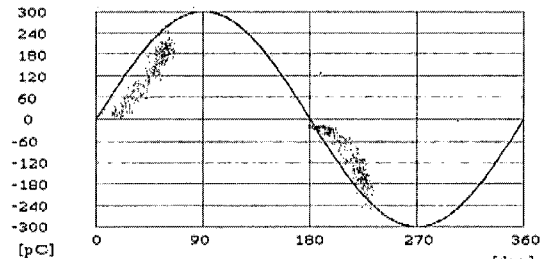


(b)

그림 3. 보이드 결함의  $\Phi$ -n (a),  $\Phi$ -q (b) 특성.  
Fig. 3.  $\Phi$ -n (a),  $\Phi$ -q (b) characteristics of void defect.



(a)



(b)

그림 4. 구리 결함의  $\Phi$ -n (a),  $\Phi$ -q (b) 특성.  
Fig. 4.  $\Phi$ -n (a)  $\Phi$ -q (b) characteristics of copper defect.

결함의 형태 및 열화정도에 따라 그 특성이 달라 절연체의 상태분석이 가능하다. 그림 3, 4는 30 kV를 인가하여 측정된 시료의  $\Phi$ -n,  $\Phi$ -q 패턴을 나

타낸 것으로, 부분방전은 인가전압의 제로크로스 지점인  $0^\circ$  및  $180^\circ$  부근에서 시작하여  $90^\circ$  와  $270^\circ$  구간에서 주로 나타났다. 이처럼 정과 음의 반주기에서 대칭적으로 발생하는 현상은 보이드에서 발생하는 부분방전의 전형적인 특성이다[6]. 고체 절연체 내의 보이드에 연속적으로 전압이 인가되면 절연체 내부벽면은 침식이 일어나게 되고, 결국에는 피트의 형성으로 전로가 이루어져 트리열화를 초래하게 된다. 보이드가 존재하는 고전압 장치에 계속적으로 전압이 인가될 경우 보이드의 모양, 크기 및 위치 등에 따라 절연수명에 영향을 주게 된다. 실험 장치를 이용하여 보이드가 존재하는 고체 유전체에서 부분방전전하량을 측정할 경우 금속 전극은 방전에 관계가 없는 것으로 보이드 내부에서 방전이 일어나게 되는데, 실제의 경우에는 연면방전과 보이드방전 또는 코로나방전 등이 서로 혼합되어 복잡하게 나타나게 된다. 일반적으로 부분방전은 고체 유전체와 직렬로 개재하는 형태를 갖고 있으므로 특히 코로나방전이나 보이드 방전에서는 방전에 의해 생기는 등극성의 공간전하로 인하여 역전계가 형성되어 방전은 정지하게 된다. 따라서 등극성의 공간전하가 누설되거나 전압이 인가됨에 따라 방전 공간에는 충분한 전계가 재형성되어 방전은 다시 일어나게 된다. 즉,  $V$ 가 증가하는 범위( $-270^\circ \sim 90^\circ$ )에서는 정으로 충전되어 방전이 일어나고,  $V$ 가 감소하는 범위( $90^\circ \sim 270^\circ$ )에서는 부로 충전되는 방전이 반복된다.  $V$ 의 1주기를 고려하면,  $V$ 의 순시변화율  $dV/dt$ 는 제로크로스부근 즉  $0^\circ$  및  $180^\circ$ 에서 최대가 되고,  $90^\circ$  및  $270^\circ$ 에 있어서 최소로 된다. 이에 따라 순시변화율이 가장 큰 이 구간에서 주로 부분방전이 발생하게 된다. 한편 방전의 크기와 발생빈도수는 거의 같게 나타나지만 때로는 같지 않게 나타나는 수가 있으며, 양쪽의 반주기 사이에서 3:1 까지 차이를 보이기도 한다.  $\Phi-n$ ,  $\Phi-q$  특성으로 볼 때 구리의 경우 구리와 시료사이에 존재하는 미소공극에서 부분방전이 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.2 부분방전의 전압의존성

그림 5, 6은 전압 상승에 따른 부분방전의 변화를 측정된 결과, 구리의 경우 약 10 kV에서 부분방전이 개시되기 시작하였으며 보이드는 약 12 kV에서 부분방전이 시작되었다. 구리는 주변에 형성된 불평등 전계에 의하여 전계가 집중되므로 보이드의 경우 보다 낮은 전압에서 부분방전이 시작된 것으로 생각된다. 이것은 유전체 내부의 제한된 보이드와 일정전압 이상에서는 더 이상 방전이 커지지 않기 때문이다. 한편 그림 7의 평균방전 발생 위상각  $\theta_g$

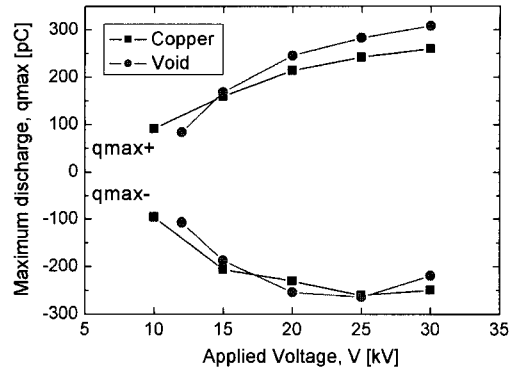


그림 5. 최대 방전 전하량  $q_{max}$ 의 전압의존성.

Fig. 5. Voltage dependence of  $q_{max}$ .

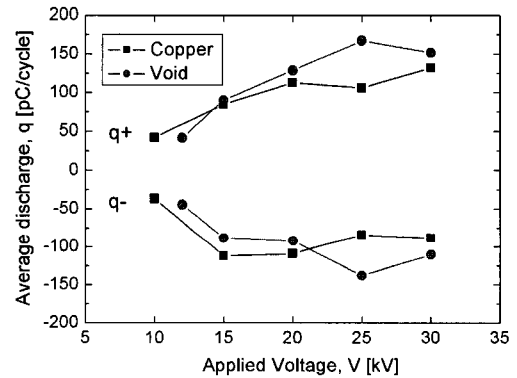


그림 6. 평균 전하량  $q$ 의 전압의존성.

Fig. 6. Voltage dependence of  $q$ .

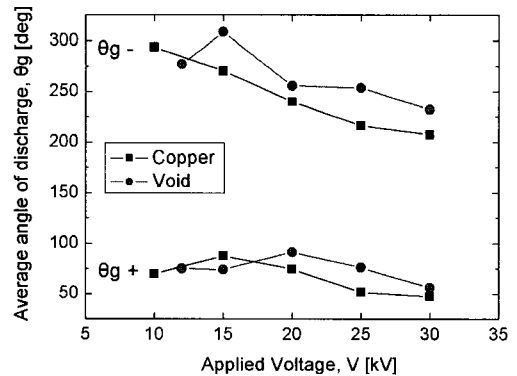


그림 7. 평균 방전 발생 위상각  $\theta_g$ 의 전압의존성.

Fig. 7. Voltage dependence of  $\theta_g$ .

$\theta_g$  [deg]는 인가전압  $V$ 의 상승에 따라 제로크로스 지점인  $0^\circ$  및  $180^\circ$  방향으로 변위함을 확인하였다.

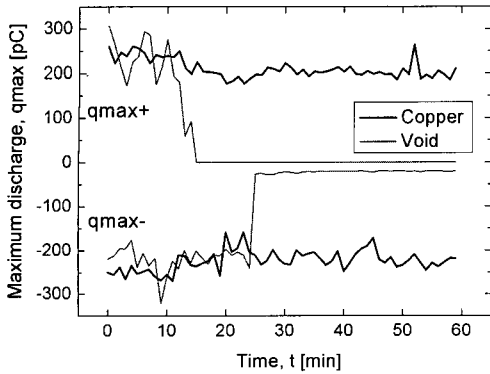


그림 8. 최대 방전 전하량  $q_{max}$ 의 경시평가.  
Fig. 8. Time evaluation of  $q_{max}$ .

### 3.3 부분방전의 경시평가

전력 케이블은 한번 포설하면 수 십 년간 사용하기 때문에 고품질이 요구되지만 접속부 시공불량에 의한 고장이 자주 발생하며, 그 발생 시기는 운전개시 후 2~3년 초기형 고장이 많다. 따라서 초기의 부분방전 경시변화를 측정하는 것은 절연진단에 있어서 유효한 수단이 되고 있으며, 또, 초기 부분 방전발생량으로부터 수명을 추정할 수 있다는 보고도 있다.

그림 8, 9는 30 kV를 인가 한 후 한 시간동안 측정된 최대 방전 전하량  $q_{max}$  [pC]와 총방전 발생수  $N$  [number]을 나타낸 것으로 구리의 경우에는 측정시간 동안 최대 방전 전하량  $q_{max}$  [pC]와 방전 발생수  $N$ [number]의 변화가 적은 반면, 보이드의 경우에는 20분에서 30분경과 후 그 크기가 급격하게 감소하였다.

고체절연재료의 부분방전 열화는 그 현상이 복잡하기 때문에 정확히 규명되지 않은 내용이 많이 남아있다. 이에 따라 많은 연구가 되고 있는데, 그 중 SPMD(swarming pulsive micro discharges)라고 부르는 현상에 대한 보고가 있다[7]. SPMD는 정(+의 반 사이클의 총방전 전하량과 음(-)의 반 사이클의 총방전 전하량을 비교하여 그 크기의 차이가 큰 경우를 지칭하는 것이다.

그림 10, 11과 같이 보이드와 구리의 총 방전 전하량을 비교한 결과, 보이드의 경우에는 10분경과 후부터 30분 까지 정부의 방전 전하량에 큰 차이가 발생하였으며 구리의 경우에는 30분경과 후부터 한 시간까지 큰 차이가 발생하였음을 확인할 수 있었다.

한편 보이드 결합의 경우 시간 경과와 함께 부분방전전하량이 작아지며, 측정감도이하가 되는 결과를 얻고 있다. SPMD은 일반적으로 전하량이 작

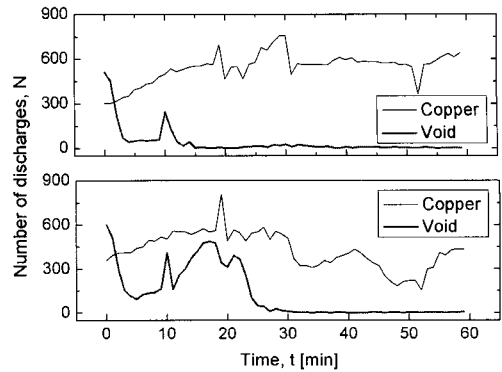
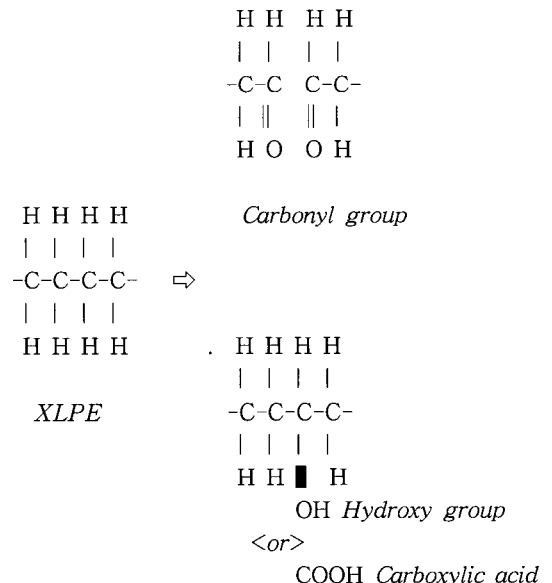


그림 9. 총방전 발생수  $N$ 의 경시평가.  
Fig. 9. Time evaluation of  $N$ .

고 빈도가 높은 것을 의미하나 본 연구의 보이드 결합인 경우에는 전하량이 작아짐과 함께 방전의 빈도도 낮아졌다. 이것은 부분방전계측시스템의 최저측정감도이하(약 0.5 pC)인 방전이 발생하기 때문이라고 생각된다. 도전율이 증가하면, 시료전체에 대한 보이드의 전압분담은 작아진다. 이 현상에 관해서 다음과 같은 모델로 설명 할 수 있다.



- ① 폴리에틸렌의 C-C 및 C-H결합이 절단된 카르보닐기(>C=O)가 생성되므로 C-C결합은 감소한다.
- ② 폴리에틸렌의 C-H결합이 절단되고 수산기(-OH) 또는 카르복실기(-COOH)가 붙어 C-O결합이 증가한다. ① 및 ②의 요인으로 동선을 배치한 주변에 있어서는 C-C결합 비율이 감소하여 C-O결합의

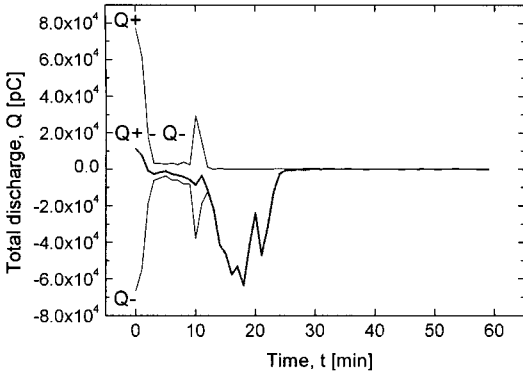


그림 10. 보이드의 총방전 전하량 Q.  
Fig. 10. Total discharge Q of void.

비율이 증가되는 것으로 사료된다. 즉, 부분방전에 의한 화학반응은 다양한 반응이 동시에 일어나는 것이다.

그 결과 보이드 내의 전계를 완화시켜 검출감도 이하가 되었다고 판단된다. 따라서 검출하한이하의 미소부분 방전은 계속하고 있는 것으로 생각된다. 물론 SPMD로 전이한 후에도 방전에 의한 열화는 진행하고, 최종적으로 절연파괴에 이르게 되지만 그 진행 속도가 non-SPMD인 경우보다 느리다. 한편 구리의 경우에는 측정시간 동안 부분방전이 계속하여 측정되었는데, 보고에 의하면 CV케이블의 고무/에폭시 계면을 모의한 전극을 이용하여 금속이물 결합에 대하여 부분 방전이 균소화한 후 Q와 N이 5000시간까지 거의 일정하며 절연파괴까지는 이르지 않았다[8].

이런 현상은 보이드의 전압 분담이 낮아짐에도 불구하고 구리 주위의 전위경도가 크고 전계가 집중되기 때문으로 판단된다.

### 3.4 부분방전의 기계적 압력 의존성

포설 후 케이블에서 발생하는 주열 열과 사용시간의 경과에 따라 EPDM 탄성이 감소하게 되며 그에 따라 XLPE 케이블을 감싸는 면압이 줄어들게 된다. 이에 따라 시료의 기계적인 압력을 1 kg/cm<sup>2</sup>으로 낮추어 부분방전을 측정하였다.

표 2는 20 kV 인가시 압력 변화에 따른 통계량의 변화를 정리한 것이다. 압력감소에 따라 구리의 최대방전전하량 qmax [pQ], 총 방전 전하량 Q [pC], 방전 발생 수 N [number]은 모두 감소하였으나 보이드는 반대로 증가하였다. 보이드는 압력이 증가하면 크기가 감소하게 되고 이에 따라 보이드내 전계의 세기가 커지는 것이 일반적이나 본

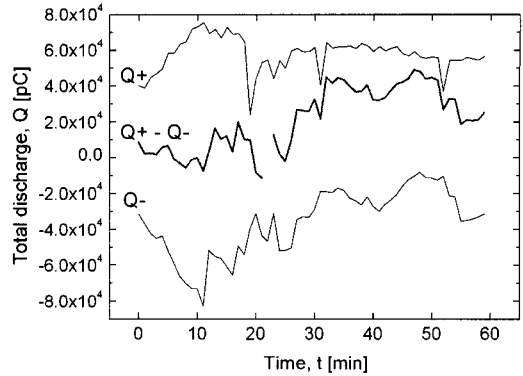


그림 11. 구리의 총 방전 전하량 Q.  
Fig. 11. Total discharge Q of copper.

연구의 경우에는 낮은 면압을 증가시킴으로 인하여 계면 접촉 저항을 줄이는 효과가 발생하였고 이로 인하여 부분방전 발생량이 감소한 것으로 판단된다[9].

그러나 구리는 압력 증가에 의하여 구리 주변에 전계가 더욱 집중되었기 때문에 압력 증가에 따라 미소 공극 크기의 감소에도 불구하고 부분방전량이 증가한 것으로 사료된다. 부분방전의 발생이 매 주기 반복적이고 그 위치가 국부적으로 밀집된다는 점을 고려할 때 보이드의 경우 압력증가에 의하여 1사이클당 평균 방전 펄스수가 감소하는 현상은 부분방전으로 인한 열화의 진행 속도를 늦출 수 있을 것으로 생각된다.

표 2. 기계적 압력변화에 따른 부분방전.

Table 2. Partial discharge with mechanical pressure variation.

Classification	Void		Copper	
	1 kg/cm <sup>2</sup>	2 kg/cm <sup>2</sup>	1 kg/cm <sup>2</sup>	2 kg/cm <sup>2</sup>
qmax+	700.5	245.7	128.8	213.5
qmax-	-737.2	-254.7	-107.1	-230.7
Q+	235808.5	36546.5	8954.9	52601.3
Q-	-281428.4	-31035.1	-3233.7	-58389.2
N+	3506	284	258	467
N-	2100	337	96	535

#### 4. 결 론

전력케이블 조립형 접속재를 모의한 XLPE/EPDM 계면에 상처인 보이드와 케이블 절단시 발생하게 되는 구리 조각을 넣어 인공 결함을 만든 후 전압을 상승시키며 부분방전을 측정된 결과, 구리의 경우 약 10 kV에서 부분방전이 발생하기 시작하였고 보이드는 약 12 kV에서부터 부분방전이 시작되었으며, 두 경우 모두 0°에서 90° 구간과 180°에서 270° 구간에서 대부분의 부분방전이 이루어졌다. 최대 방전 전하량  $q_{max}$  [pC]는 인가전압의 상승과 함께 상승하였으나, 1 사이클당 평균 방전 전하량  $q$  [pC/cycle]는 20 ~ 25 kV 부근에서 포화되었고 평균방전 발생 위상각  $\theta_g$  [deg]는 인가전압  $V$ 의 상승에 따라 제로크로스 지점인 0° 및 180° 방향으로 변위하였다. 30 kV를 인가 한 후 한 시간동안 최대 방전 전하량  $q_{max}$  [pC]와 방전 발생 수  $N$  [number]의 변화를 측정된 결과 구리는 측정시간 동안 평균 방전 전하량  $q$  [pC/cycle]와 방전 발생 수  $N$  [number]의 변화가 적은 반면, 보이드의 경우에는 20분에서 30분경과 후 그 크기가 급격하게 감소하였다. 또한 보이드의 경우에는 10분경과 후부터 30분 까지 정부의 방전 전하량에 큰 차이가 발생하였으며 구리의 경우에는 30분경과 후 부터 한 시간까지 큰 차이가 발생하였음을 확인 할 수 있었다. 압력을 변화시켜 부분방전의 변화를 살펴본 결과 압력감소에 따라 구리의 최대방전전하량  $q_{max}$  [pC], 총 방전 전하량  $Q$  [pC], 총방전 발생 수  $N$  [number]이 모두 감소하였으나 보이드는 반대로 증가하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] 유근양, "지중 케이블 접속재 시공", 전기설비, 18권, 10호, 통권 제194호, p. 40, 2001.  
 [2] Ehara, Y., Koizumi, N., Kishida, H., and Ito, T., "Effects of humidity on the degradation of insulating materials exposed to partial discharge", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE annual Report, p. 538, 1994.  
 [3] Wolter, K. D., Tanaka, J., and Johnson, J. F., "A study of the gaseous degradation

products of corona exposed polyethylene", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 17, No. 3, p. 248, 1982.

[4] Cavallini, A., Montanari, G. C., Contin, A., and Pulletti, F., "A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 2, p. 23, 2003.  
 [5] Uchida K., Hirata T., Tanaka I., and Takahashi T., "Partial discharge and breakdown characteristics of various defects in XLPE cable joint", T. IEE Japan, Vol. 115-B, No. 10, p. 1185, 1995.  
 [6] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths, p. 52, 1989.  
 [7] Kawakami, H., Kawakubo, N., Ehara, Y., Kishida, H., and Ito, T., "Influence of swarming pulsive micro discharge on tree degradation", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 979, 2002.  
 [8] Tokunaga, S., Tsurusaki, T., Arief, Y. Z., Ohtsuka, S., Mizuno, T., and Hikita, M., "Partial discharge characteristics till breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect", Proceedings 7th International Conference on Applications of Dielectric Materials, p. 1206, 2003.  
 [9] Nadolny, Z., Braun, J. M., and Densley, R. J., "Effect of Mechanical Pressure and Silicone Grease on Partial Discharge Characteristics for Model XLPE Transmission Cable Joint", IEE High Voltage engineering Symposium, p. 297, 1999.  
 [10] B. Yazici, "Statistical pattern analysis of partial discharge measurements for quality assessment of insulation systems in high-voltage electrical machinery", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 40, No. 2, p. 1579, 2004.