

부분 방전에 의한 실리콘 케이블의 열화 특성에 관한 연구

이성일^{1,a}

¹ 한국교통대학교 안전공학과

A Study on Degradation Properties of Silicone Cable due to Partial Discharge

Sung Ill Lee^{1,a}

¹ Department of safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received December 15, 2014; Accepted December 21, 2014)

Abstract: In this study, the characteristics of partial discharge was measured for the four core silicone cable (0.6/1.0 kV, 1.0 SQ × 4 C) with insulated part of 15 cm and conductor of 1cm. The following results have been confirmed as a result of this study. When the first line of cable is connected to the positive electrode and the second, third line of cable is connected to the negative electrode, it found that the inception voltage and extinction voltage decreased with increasing the line of negative electrode, and the partial discharge charge quantity(Q) increases, while the number of discharge occurrence has decreased. The inception voltage and extinction voltage of partial discharge has decreased with increasing the degradation rate in the 33%, 67%, 100%. Also, it confirmed that the partial discharge charge quantity(Q) and the number of discharge occurrence has decreased.

Keyword: Partial discharge, Silicone cable, Carbonized road, Partial discharge charge quantity, Inception voltage, Extinction voltage

1. 서 론

규소와 산소가 반복하여 결합한 구조의 실리콘 고무는 실록산 결합을 가지는 생고무에 상당한 쇠상고 분자이며, 무색 투명한 가소성 고체 (분자량 30만~60만)이며, 탄성을 나타내지 않는다. 생고무에 과산화벤젠 등의 유기과산화물로 처리하여 -60~250℃ 범위에서 물리적 성질이 변화하지 않으며 H중 절연체로 사용된다. 또한 내열성, 내한성, 내후성, 내약품성,

내노화성, 내코로나성, 내유성 및 전기절연성도 매우 우수하며, 화학적으로도 안정하다. 또한, 강산, 강알칼리에 침해는 되나 전기적 성질은 온도의 상승과 함께 매우 양호하다 [1-3].

실리콘 케이블은 정격전압의 고온 환경 하에 전기기기 및 전기 회로에 가요성이 요구되는 곳에 사용되며, 도체는 IEC 60228 (Class 5)에 규정된 주석도금 동선을 소선으로 한 집합 연선으로 되어 있다 [4,5].

케이블의 절연체는 실리콘 고무로서 도체위에, 바인더 (binder)는 부직포 테이프로써 연합된 선심 위에 접합 없이 중첩 되도록 균일하게 테이핑 (taping)하며, 시스 (sheath)는 실리콘 고무를 동심원상으로 일정하게 피복한다. 실리콘 케이블 표면은 오염, 기포, 색상 등 기타 유해한 결합 유무를 육안으로 검사를

a. Corresponding author: silee@cjnu.ac.kr

한다 [6,7]. 교류 부분 방전시험은 케이블 절연체에 사용 전압과 비슷한 상용 주파 교류 전압을 인가하여 절연체 내부에 공극 (void), 이물 혼입 등의 국부적 결함에 의해 발생하는 부분 방전을 정량적으로 측정하여 절연체의 열화 상태를 가늠할 수 있는 방법이다.

이 연구에서는 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 15 cm로 절단하여 280℃에서 2시간 열 열화시킨 시료의 비율에 따라서, 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q), 방전 전하량에 따른 방전발생 수(Q-N)을 측정하여 열화의 정도를 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 측정

2.1.1 측정시료

이 실험에서는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블 시료(주: 영창 실리콘)의 구리 부분을 1 cm의 나선선으로 제작한 후 280℃에서 2시간 동안 열 열화시켰다. 또한 시료를 그림 1과 같이 접속하였으며, 내부도선을 2선, 3선을 접속한 후 1선을 정(+)극에 1선과 2선과 3선을 부(-)극으로 하여 부분 방전 열화를 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q), 방전 전하량에 따른 방전발생 수(Q-N)을 측정하였다.

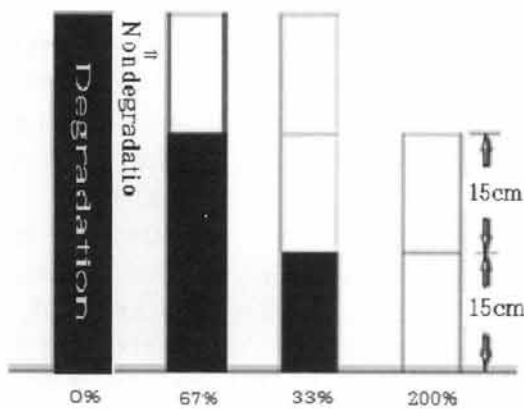


Fig. 1. A schematic illustration for partially heated cable.

2.2 측정 장치 및 회로

실험 장치는 일본 NKS사의 (Nihon Keisokuki Seizosho

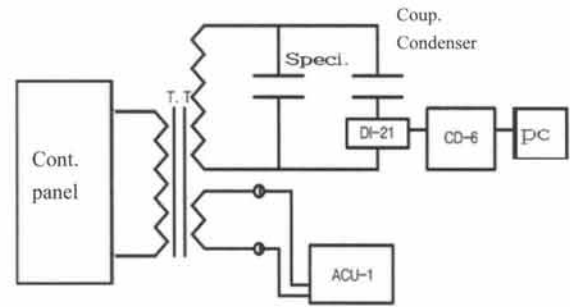


Fig. 2. Block diagram of partial discharge measuring equipment.

Co., Ltd.) 부분 방전 측정시스템을 사용하였다. 부분 방전 측정시스템은 HV-30K05 가변 저항기와 변압기, 커플링 콘덴서 (BL코일), 교정전하 생성기 NPG-2, 오실로스코프, 자동화 부분 방전 측정기인 CD-6, 부분 방전 검출 임피던스 DI-21, AC전압 측정 장치 ACU-1, 그리고 데이터 기록 및 원격 자동화 측정 소프트웨어 CD-6AU 및 결과 분석 프로그램인 PDANALA가 탑재된 노트북 컴퓨터로 구성되었으며 측정 회로도를 그림 2에 나타내었다.

또한, V-Q 측정 시는 최대 인가 전압 1.2 KV까지 서서히 인가시키며 측정하였으며, Q-N 측정은 측정 전압 1.2 KV 인가 후 INPUT ATT=1/1에서 시작하여 INPUT ATT= 1/1,000까지 INPUT ATT를 감쇄시키면서 값을 측정하였다. 또한, 이 동작을 500 ms의 속도로 10회 반복 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3~5는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속하여 부분 방전 개시전압과 소멸전압을 측정한 결과이다. 부전극의 내부도체를 1선, 2선 3선으로 증가시켜 접속한 시료일수록 개시전압과 소멸전압은 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 개시전압과 소멸전압 간의 차이는 최소 0.2~0.9 kV까지 나타남을 확인하였다.

그림 3은 내부도체 1선을 정(+)극에, 1선을 부(-)극으로 접속하여 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q)을 측정한 결과이다.

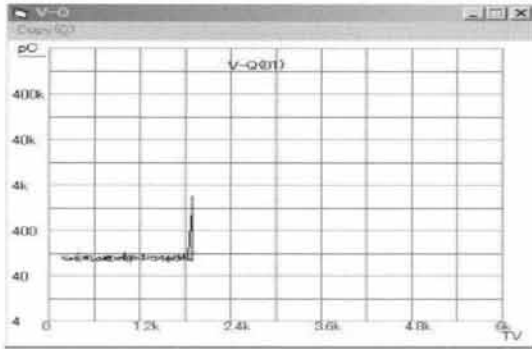


Fig. 3. V-Q properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact a internal wire.

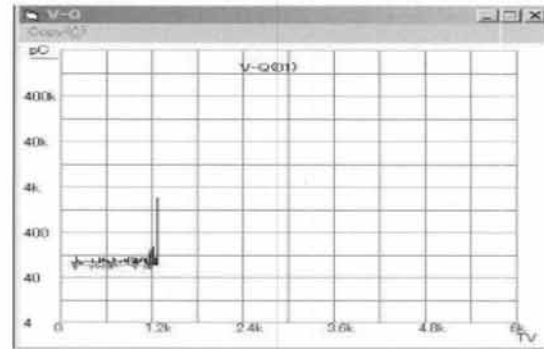


Fig. 5. V-Q properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact 3 internal wires.

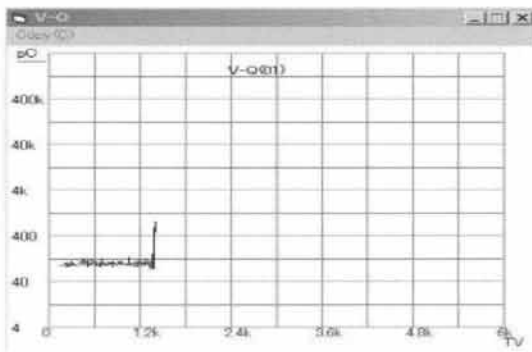


Fig. 4. V-Q properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact 2 internal wires.

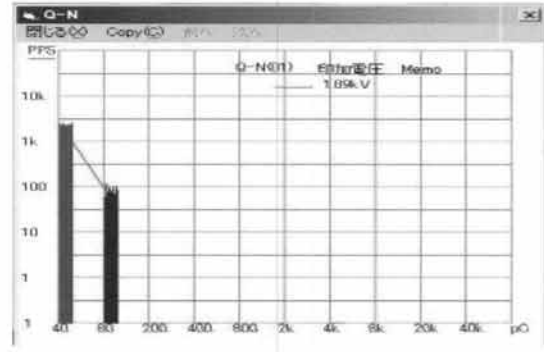


Fig. 6. Q-N properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact a internal wires.

약 0.2 kV일 때부터 방전이 서서히 값의 변화가 거의 없이 진행되다가 약 2.0 kV 정도에서 개시전압이 나타났으며, 약 1.8 kV 정도에서 소멸전압이 나타났다. 또한 개시전압과 소멸전압 간의 차이는 약 0.2 kV 정도임을 알 수 있었다. 이때 방전 전하량은 약 2,750 pC이었다.

그림 4는 내부 도체 1선을 정(+극)에, 2선을 접속하여 부(-극)으로 접속하여 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q)을 측정한 결과이다. 약 0.2 kV일 때부터 방전이 서서히 값의 변화가 거의 없이 진행되다가 약 1.35 kV 정도에서 개시전압이 나타났으며, 약 1.30 kV 정도에서 소멸전압이 나타났다. 또한, 개시전압과 소멸전압간의 차이는 약 0.5 kV 정도임을 알 수 있었다. 이때 방전 전하량은 약 1,000 pC이었다.

그림 5는 내부도체 1선을 정(+극)에, 3선을 접속하여 부(-극)으로 접속하여 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q)을 측정한 결과이다. 약 0.2 kV일 때부터 방

전이 서서히 값의 변화가 거의 없이 진행되다가 약 1.30 kV 정도에서 개시전압이 나타났으며, 약 1.21 kV 정도에서 소멸전압이 나타났다. 또한, 개시전압과 소멸전압 간의 차이는 약 0.9 kV 정도임을 알 수 있었다. 이때 방전 전하량은 약 3,200 pC이었다.

그림 6~8은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속하여 1.27~1.89 kV의 인가전압을 유지시킨 상태에서 방전 전하량과 방전발생수(Q-N)을 측정한 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수(loop)는 10회로 설정하였다. 그림 6은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속한 후 1.89 kV의 인가전압을 유지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+극)에, 2선을 접속하여 부(-극)으로 접속하여 방전 전하량과 방전발생수(Q-N)을 측정한 결과이다. 이때의 측정 주기는 500

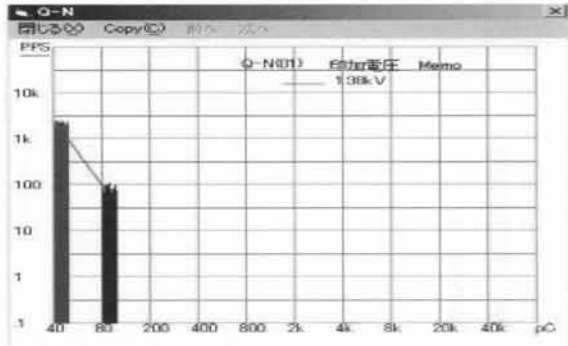


Fig. 7. Q-N properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact 2 internal wires.

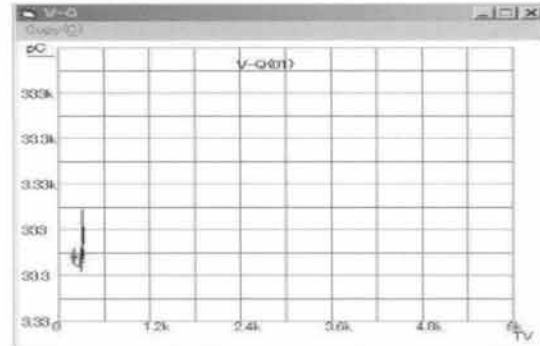


Fig. 9. V-Q properties for degraded silicone cable at the rate of 33%.

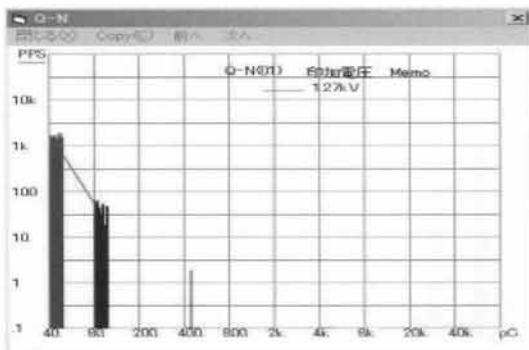


Fig. 8. Q-N properties for non-degraded silicone cable (15 cm+15 cm) contact 3 internal wires.

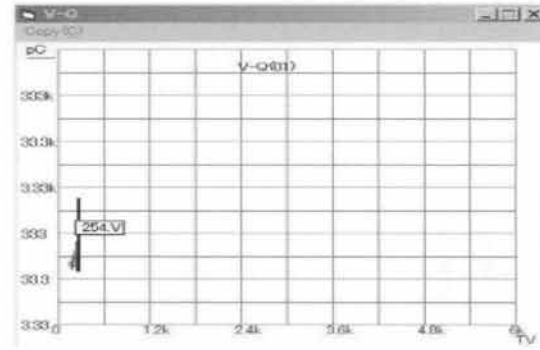


Fig. 10. V-Q properties for degraded silicone cable at the rate of 67%.

ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량(V-Q)을 측정한 결과이다. 방전 전하량이 40 pC일 때 발생 빈도수는 약 4.85 k pps, 80 pC일 때 발생 빈도수는 약 100 pps 정도로 감소했다.

그림 7은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속한 후 1.38 kV의 인가전압을 유지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+)극에, 2선을 접속하여 부(-)극으로 접속하여 방전 전하량과 방전 발생 수(Q-N)을 측정한 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량이 40 pC일 때 발생 빈도수는 약 4.84 k pps, 80 pC일 때 발생 빈도수는 약 95 pps 정도로 감소했다.

그림 8은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속한 후 1.27 kV의 인가전압을 유

지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+)극에, 2선을 접속하여 부(-)극으로 접속하여 방전 전하량과 방전 발생 수(Q-N)을 측정한 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량이 40 pC일 때 발생 빈도수는 약 2.5 k pps, 80 pC일 때 발생 빈도수는 약 55 pps 정도로 감소했다.

그림 9~11은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 3개를 접속하여 부분 방전 개시전압과 소멸전압을 측정한 결과이다. 280℃에서 2시간 가열시킨 도체를 1개 접속한 시료를 33%, 280℃에서 2시간 가열시킨 도체를 2개 접속한 시료를 67%, 280℃에서 2시간 가열시킨 도체를 3개 접속한 시료를 100% 열화된 시료라고 했다. 부전극의 내부도체 2선을 접속시킨 실리콘 케이블 시료에 전압을 서서히 증가시켜 개시전압과 소멸전압은 감소함을 확인할 수

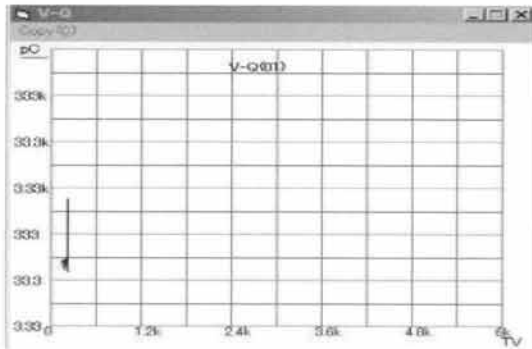


Fig. 11. V-Q properties for degraded silicone cable at the rate of 100%.

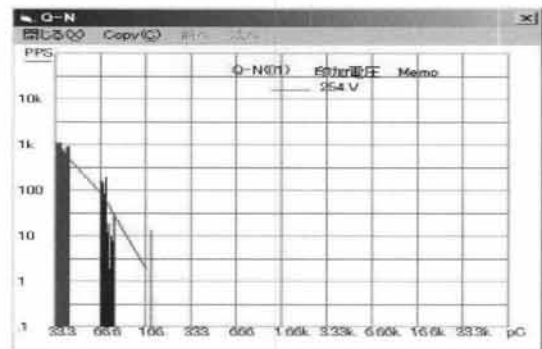


Fig. 13. Q-N properties for degraded silicone cable at the rate of 67%.

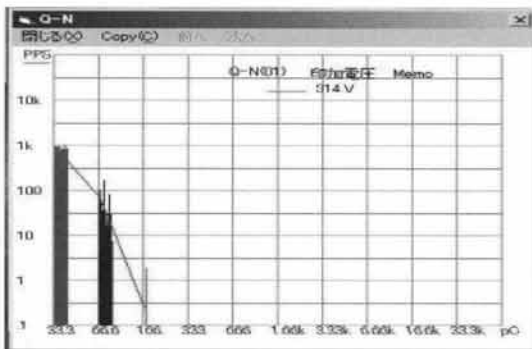


Fig. 12. Q-N properties for degraded silicone cable at the rate of 33%.

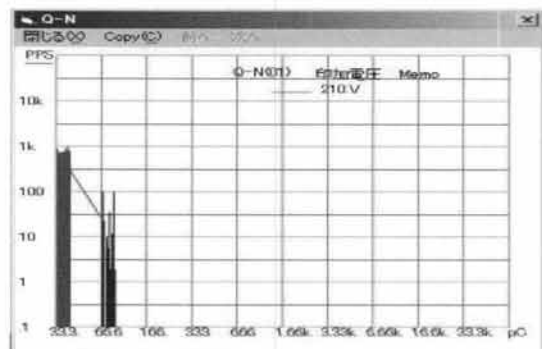


Fig. 14. Q-N properties for degraded silicone cable at the rate of 100%.

있었다. 또한, 개시전압 및 소멸전압의 33%일 때와 100%일 때의 차이는 약 105 V의 차이가 남을 확인하였다.

그림 9는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 미열화 시료 2개와 열 열화 시료 1개를 접속하여 부분 방전 개시전압과 소멸전압을 측정하는 결과이다. 280℃에서 2시간 가열시킨 도체를 1개 접속한 시료를 33%라 하고, 부전극의 내부도체 2선을 접속시킨 실리콘 케이블 시료에 전압을 서서히 증가시켜 개시전압은 약 315 V, 소멸전압은 약 200 V임을 확인했다.

그림 10은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 미열화 시료 1개와 열 열화 시료 2개를 접속하여 부분 방전 개시전압과 소멸전압을 측정하는 결과이다. 280℃에서 2시간 가열시킨 도체를 2개 접

속한 시료를 67%라 하고, 부전극의 내부도체 2선을 접속시킨 실리콘 케이블 시료에 전압을 서서히 증가시켜 개시전압은 약 254 V, 소멸전압은 약 195 V임을 확인했다.

그림 11은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 열 열화 시료 3개를 접속하여 부분 방전 개시전압과 소멸전압을 측정하는 결과이다. 280℃에서 2시간 가열시킨 케이블 시료를 3개 접속한 시료를 100%라 하고, 부전극의 내부도체 2선을 접속시킨 실리콘 케이블 시료에 전압을 서서히 증가시켜 개시전압은 약 210 V, 소멸전압은 약 165 V임을 확인했다. 이 결과들로부터 열화 비율이 높을수록 개시전압과 소멸전압이 낮아짐을 확인하였다.

그림 12~14는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 280℃에서 2시간 가열시킨 케이블 시

료를 1개(33%), 2개(66%), 3개(100%)를 접속하여 210~314 V의 인가전압을 유지시킨 상태에서 방전 전하량과 방전발생 수(Q-N)을 측정된 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다.

그림 12는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 280℃에서 2시간 가열시킨 케이블 시료를 1개(33%)를 접속하여 314 V의 인가전압을 유지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+)/극에, 1선을 부(-)극으로 접속하여 방전 전하량과 방전발생 수(Q-N)을 측정된 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량이 33 pC일 때 발생 빈도수는 약 990 pps, 67 pC일 때 발생 빈도수는 약 90 pps, 166 pC일 때 발생 빈도수는 약 0.4 pps 정도로 감소했음을 확인했다.

그림 13은 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 280℃에서 2시간 가열시킨 케이블 시료를 2개(67%)를 접속하여 254 V의 인가전압을 유지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+)/극에, 1선을 부(-)극으로 접속하여 방전 전하량과 방전발생 수(Q-N)을 측정된 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량이 33 pC일 때 발생 빈도수는 약 950 pps, 67 pC일 때 발생 빈도수는 약 60 pps, 166 pC일 때 발생 빈도수는 약 20 pps 정도로 감소했음을 확인했다.

그림 14는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 280℃에서 2시간 가열시킨 케이블 시료를 1개(100%)를 접속하여 314 V의 인가전압을 유지시킨 상태에서 내부도체 1선을 정(+)/극에, 1선을 부(-)극으로 접속하여 방전 전하량과 방전발생 수(Q-N)을 측정된 결과이다. 이때의 측정 주기는 500 ms이며, 측정 반복 횟수 (loop)는 10회로 설정하였다. 방전 전하량이 33 pC일 때 발생 빈도수는 약 900 pps, 67 pC일 때 발생 빈도수는 약 40 pps, 정도로 감소했음을 확인했다. 이상의 결과로부터 방전 전하가

높아질수록 방전발생 빈도수는 낮아졌음을 확인했다.

4. 결론

1. 이 연구에서는 0.6/1.0 kV용 1.0 SQ×4 C인 실리콘 케이블을 절연체 부분 15 cm, 구리 부분 1 cm의 도체로 제작한 후 2개를 접속하여 부분 방전을 측정하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

2. 내부 도선의 1선을 정(+)/전극, 1선, 2선, 3선을 접속한 도선을 부(-)전극으로 했을 때 부전극의 선이 많을수록 개시전압 및 소멸전압이 감소하였으며, 부분 방전 전하량(Q)이 증가하고 방전발생 수는 약간 감소함을 확인하였다.

3. 열화의 비율이 33%, 67%, 100%로 높아질수록 방전개시전압 및 소멸전압은 감소하였으며, 방전 전하량(Q)이 감소하고 발생수도 감소함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] K. Nehete, R. A. Sharma, L. Chaudhari, S. Bhattacharya, V. Singal, and D. D'Melo, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 19, 373 (2012).
- [2] J. J. Park and J. Y. Lee, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17, 5 (2010).
- [3] Z. Li, K. Okamoto, Y. Okhi, and T. Tanaka, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 17, 653 (2010).
- [4] T. Tanaka, Y. Ohki, M. Ochi, M. Harada, and T. Imai, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 15, 81 (2008).
- [5] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang and K. E. Min, *Proceeding of 6th ICPADM*, 354 (2000).
- [6] P. Maity, S. V. Kasisomayajula, V. Parameswaran, S. Basu, and N. Gupta, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 15, 63 (2008).
- [7] T. Tanaka, S. Kuge, M. Kozako, T. Imai, T. Ozaki, and T. Shimizu, *Proc. of ICEE*, ME1-01, 4 (2006).