

열열화된 PVC 케이블의 부분방전 진단

송기태¹, 이성일^{1,a}

¹ 충주대학교 안전공학과

Partial Discharge Diagnosis of Thermal Degradated PVC Cable

Ki-Tae Song¹ and Sung-Il Lee^{1,a}

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

(Received August 5, 2010; Revised October 22, 2010; Accepted February 15, 2011)

Abstract: In this thesis, the partial discharge according to applied voltage and variations of cross-sectional area and length of the conductor related to general condition for using cable was measured in order to study degradation diagnosis for 2-Core cable of the PVC insulator used in industrial fields for other safety installations. Also the thermal degradation conditions under various installation circumstances of cables were studied by assuming degradation conditions with each different degradation rate (50%, 67%, 100%) such as variation in degraded temperature, thermal exposure time, normal state, partially degraded state and overall degraded state for thermal degradation diagnosis. The quantity of electric discharge (V-Q) according to applied voltage was measured for measurement of inception voltage and extinction voltage. The quantity of electric discharge and the number of electric discharge (Q-N) were measured with applied voltage kept constantly. In addition, pictures were taken using SEM (scanning electron microscope) to compare the surface of external insulator to degraded state of internal insulator according to thermal degradation temperature and also compare the surface of external insulator to degraded surface state of internal insulator according exposure time of cables to thermal stress.

Keywords: PVC, Cable insulation diagnosis, Thermal degradation, Partial discharge

1. 서 론

최근 주요 설비 시스템의 고도화 및 사용전력의 대용량화에 따라 케이블 전선로가 늘어나면서 케이블 이상으로 인한 화재, 감전 등의 열화사고가 증가하고 있다. 특히 그중에서도 열악한 환경 하에서 설치 및 시공된 케이블의 경우 해당 열화 요인에 의해 단시간에도 사고에 이를 수 있으며 이로 인하여 막대한 인적 및 물적 피해를 발생 시키게 된다. 각종 전기기기에 이용되고 있는 고분자 절연재료는 열, 전기, 환경 및 기계적요인등에 의한 스트레스를 장기간 받으면

초기의 성질을 유지하지 못하고 변질되기도 하고 극단적인 경우 파괴되기도 하는데 이것을 열화라고 하며 이로 인해 수명이 저하하게 된다. 그런데, 케이블의 절연열화는 보통 사용되는 환경하의 여러 요인들에 의해 중첩되는 복합열화의 상태로 발생되며 그중에서도 전기적요인, 열적요인, 기계적요인 등이 중요한 열화의 요인이 되고 있다 [7]. 따라서 케이블의 열화로 인한 안전사고의 사전방지를 위하여 많은 연구 및 노력과 함께 이를 예방하기 위한 진단 기술의 연구가 필요하게 되었으며 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 케이블 절연체 중의 보이드나 이물질 등의 결함에 관련된 연구 외에 케이블의 열적 열화

a. Corresponding Author : silee@chungju.ac.kr

및 부분적인 열열화에 따른 부분방전 측정은 상대적으로 많이 이루어지지 않고 있다.

상기와 같은 배경에 따라 케이블의 열화 요인 중 열적 요인에 기인한 사고를 미연에 방지하기 위한 절연 진단 기술로써 부분방전 측정을 통한 열화 진단에 관한 연구의 필요성이 있다.

본 논문에서는 산업 현장 및 기타 여러 설비에 사용되는 저압용 PVC (poly vinyl chloride) 2코어 연심 케이블을 열적으로 정상상태, 부분적 열화상태 및 전체적 열화 상태로써 각각 다른 비율로 열화 시켜 실제 각기 다른 케이블 설치 환경 하에서의 부분적인 열열화 조건을 모의하였다. 이러한 시료 케이블 각각의 코어에 전극을 연결하여 인가전압을 일정하게 상승시키며 부분방전 특성을 실험하였다. 이에 대한 결과로써 인가전압에 따른 방전전하량 (V-Q) 측정을 통해 개시전압 및 소멸전압을 확인하였으며, 방전 전하량에 따른 방전발생빈도수 (Q-N)의 변화를 측정하였다. 또한, 케이블의 열적열화 온도별 외부 절연체 표면과 내부 절연체 열화상태의 비교 및 케이블의 열적 스트레스의 노출 시간에 따른 외부 절연체 표면과 내부 절연체 열화표면상태의 비교를 위하여 SEM 촬영을 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

실험용 시료는 산업용 케이블로 널리 쓰이고 있는 Thomas사 (France)의 PVC 2코어 전력용 케이블 (2cores×1.5 mm² cross section)을 실험 시료로 사용하였다. 케이블의 절연체재료로 사용된 PVC 분자 구조는 —CH₂-CHCl—n이다.

케이블의 길이 및 열화 비율에 따른 부분방전 개시 전압 및 소멸전압을 측정하기 위하여 실험용 시료인 케이블을 각각 다른 길이로 가공하였다. 케이블 가공은 케이블을 10 cm를 기준으로 100%, 200%, 300%의 비율로 변화시켜 그 실험 결과를 비교하기 위해 정상 피복 부 기준 10 cm, 20 cm, 30 cm로 절단하고 전극 연결을 위해 케이블 양쪽으로 내피 1 cm와 도체 연선 1 cm로 제작하였다. 또한 전체 길이 대비 열화 부분의 비율 변화를 모의하기 위하여 20 cm (비열화 10 cm+열열화 10 cm= 50% 열화), 30 cm (비열화 10 cm+열열화 20 cm= 67% 열화), 30 cm (열열화 30 cm= 100% 열화) 케이블로 시료를 각각 준비 제작하였다.

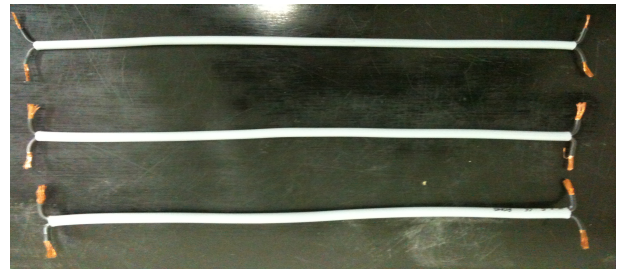


Fig. 1. The image of samples.

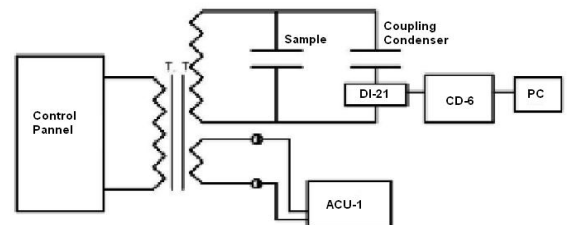


Fig. 2. Block diagram of partial discharge measuring system.

케이블의 열열화 방법은 단시간 가속열화 시키기 위하여 실험용 오븐으로 200℃에서 40분간 가열함으로써 열열화 조건을 부여하였다. 또한 케이블의 전체 길이에 대한 열열화 부분을 비율적으로 변화시킴으로써 케이블의 열화비율 변화조건을 모의하였다 [2,3]. 그림 1은 실험용 시료의 사진이다.

2.2 실험 장치

실험 장치는 일본 NKS사 (Nihon Keisokuki Seizoshō co., ltd.)의 부분 방전 측정 시스템을 사용하였다. 부분 방전 측정 시스템은 HV-30K05 가변 저항기와 변압기, 커플링 콘덴서 (BL코일), 교정전하 생성기 NPG-2, 오실로스코프, 자동화 부분방전측정기인 CD-6, 부분방전 검출 임피던스 DI-21, AC전압 측정장치 ACU-1, 그리고 데이터 기록 및 원격 자동화 측정 소프트웨어 CD-6AU 및 결과 분석 프로그램인 PDANALA가 탑재된 노트북 컴퓨터로 구성된다.

HV-30K05시험 전원 공급기 및 가변저항기와 변압기는 최고 30 KV까지 전압을 인가할 수 있다. NPG-2는 부분방전 시험 시 부분방전 측정시스템 전체 및 측정기 본체의 교정을 위한 교정전하 생성기이며 방

전 파형을 100 PPS (pulses per second) 반복 주파수에
서 발생하고, 교정전하는 0~2,500 pC까지 임의로 생
성할 수 있다. 본 실험에서는 50 pC로 설정하였다.
CD-6는 컴퓨터상에서 전환범위 설정 확인, 펄스 계수
확인, 측정값 현시 및 펄스 카운터를 내장함으로써
카운트 신호 출력을 얻을 수 있다. DI-21은 시험회로
의 공진 주파수를 부분방전 측정기의 동조주파수와
동조화시킴으로써 민감한 부분방전 또한 고감도로 검
출가능하다. ACU-1은 AC 전압정보를 디지털로 변환
하여 컴퓨터에 데이터로 전송한다. 컴퓨터 간 데이터
전송은 RS232C를 통하여 수행된다. CD-6AU는 CD-6
와 ACU-1을 사용하여 부분 방전 측정을 자동으로 수
행한다. 또한, PDANALA 프로그램은 CD-6AU를 통
해 기록된 데이터를 확인 및 분석, 그리고 보고서출
력을 지원한다. 상기에서 언급한 장치들로써 구성된
부분방전 측정 회로는 그림 1과 같다. 부분 방전 측
정 시 실험실온도 15°C~18°C, 습도 40%~55%의 환
경에서 실시하였다. 실험 주요순서로써 우선 측정기
의 상태확인 및 장치의 교정상태를 점검 후에 컴퓨터
의 CD6-AU1을 실행하여 실험 명, 시료 명, 교정치 입
력, 온도, 습도 등의 실험정보를 입력하여 저장한다.
본 실험에서는 시료를 연결한 뒤 NPG-2 (20pC)와 오
실로스코프를 사용하여 교정치 값 1,000 pC/V을 적용
하였다. 모든 실험 사전 데이터 셋팅이 완료된 후 컴
퓨터상에서 실험데이터를 자동 저장 및 기록한다.
V-Q 측정 시는 최대인가 전압 7 KV 까지 서서히 인
가시키며 측정하였으며, Q-N 측정은 측정전압 7 KV
인가 후 입력 전압의 감쇄율 변화에 따른 방전계수를
측정하기 위하여 INPUT ATT= 1/1에서 시작하여
INPUT ATT= 1/1,000까지 INPUT ATT를 감쇄시키면
서 값을 측정한다. 이 동작을 500 ms의 속도로 10회
반복 측정하였다. 실험 종료 후 컴퓨터에 저장된 결
과 데이터를 PDANALA 프로그램을 통하여 확인 및
고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비열화 케이블의 길이에 따른 V-Q 측정 결과

비열화 케이블의 길이별 부분방전 측정의 V-Q결과는
다음의 그림 3, 4, 5와 같다. 실험결과, 그래프에서
와 같이 개시전압은 4.72 kV~3.93 kV까지, 소멸전압
은 3.99 kV~3 kV로 감소됨을 확인 확인할 수 있었

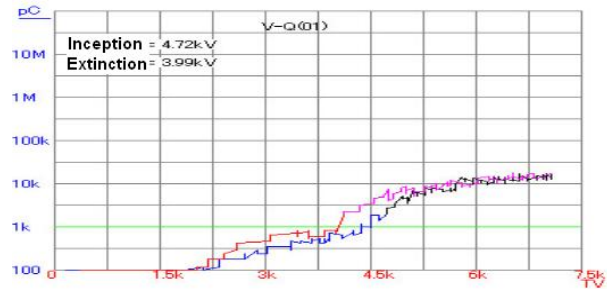


Fig. 3. V-Q result for non-degraded cable (cable length of 10 cm).

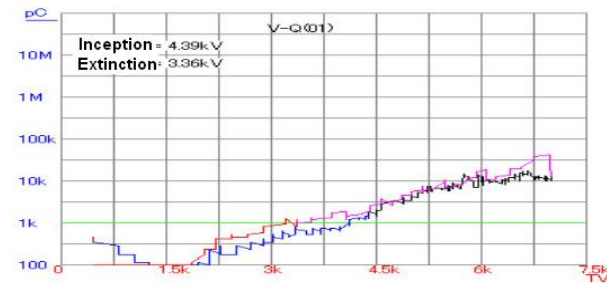


Fig. 4. V-Q result for non-degraded cable (cable length of 20 cm).

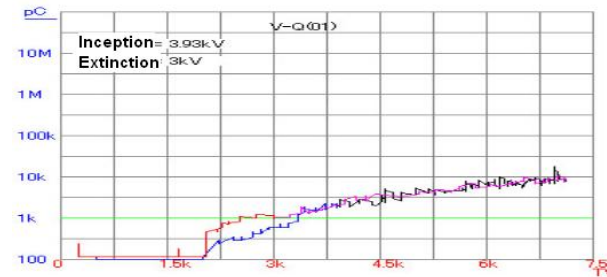


Fig. 5. V-Q result for non-degraded cable (cable length of 30 cm).

다. 즉, 비열화 케이블의 V-Q 측정 결과, 길이가 증가
함에 따라 개시전압과 소멸전압이 동시에 감소하는
패턴을 관찰하였다. 이는 길이가 길어짐에 따라 절연
체에 존재하는 보이드 및 이물질이 증가하기 때문인
것으로 생각된다. 또한 그림 4의 경우 1.5 K이전에
방전이 발생 하였는데 이는 이전의 실험 후 접지를
통한 완전 방전이 이루어지지 않아서 잔류된 방전전
하가 존재하였던 것으로 보인다.

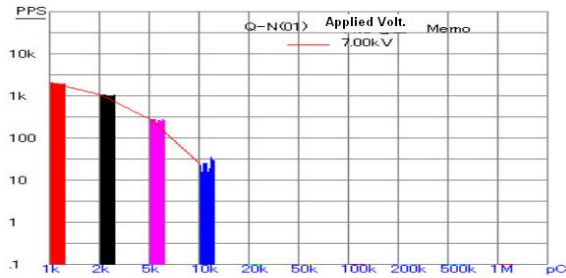


Fig. 6. Q-N result for non-degraded cable (cable length of 10 cm).

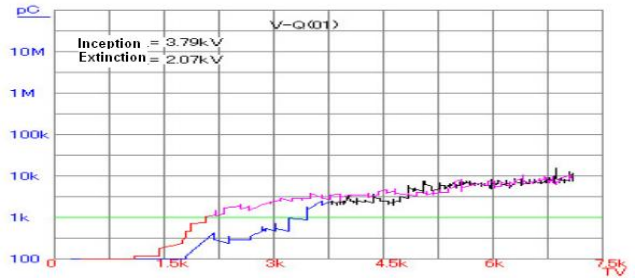


Fig. 9. V-Q result for degraded cable at the rate of 50% (cable length of 20 cm).

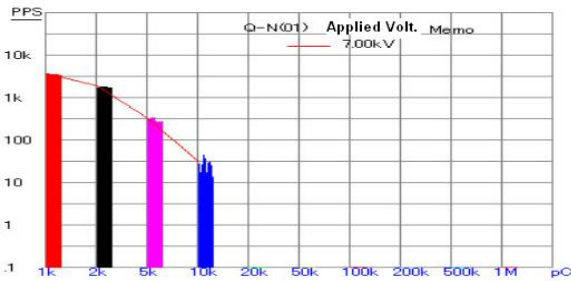


Fig. 7. Q-N result for non-degraded cable (cable length of 20 cm).

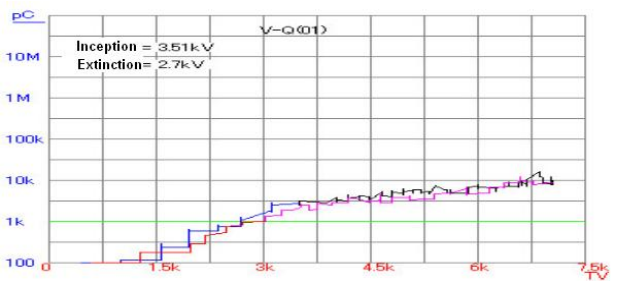


Fig. 10. V-Q result for degraded cable at the rate of 67% (cable length of 30 cm).

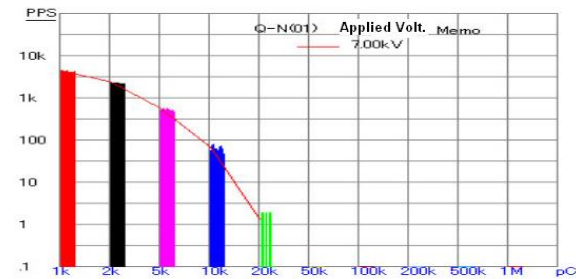


Fig. 8. Q-N result for non-degraded cable (cable length of 30 cm).



Fig. 11. V-Q result for degraded cable at the rate of 100% (cable length of 30 cm).

3.2 비열화 케이블의 길이에 따른 Q-N 측정 결과

비열화 케이블의 길이별 부분방전의 Q-N 측정 결과는 그림 6, 7, 8과 같다. 비열화 케이블의 Q-N 측정 결과, 길이가 증가함에 따라 방전 전하량과 발생빈도 수 모두 증가하는 패턴을 관찰하였다. 이 또한 케이블의 길이가 증가함에 따라 절연재 속에 존재하는 보이드 및 이물질의 증가로 방전 전하량과 발생 수가 증가한 것으로 생각된다.

3.3 열열화 케이블의 길이에 따른 V-Q 측정 결과

열열화 케이블의 열화 비율별 부분방전 측정의 V-Q 결과는 그림 9, 10, 11과 같다. 열열화 비율은 케이블의 전체 길이에 대한 열화된 부분의 비율로써 산정하였으며, 실험 결과는 아래의 그래프에서와 같이 개시전압은 3.79 kV~3.25 kV까지, 소멸전압은 2.07 kV~3.19 kV로 측정되었다. 즉, 열열화 케이블의 V-Q 측정 결과 열화 비율이 증가함에 따라 개시전압이 감

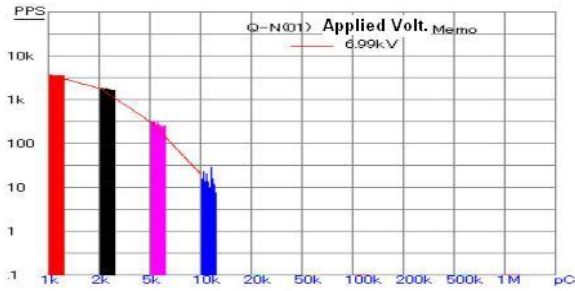


Fig. 12. Q-N result for degraded cable at the rate of 50% (cable length of 20 cm).

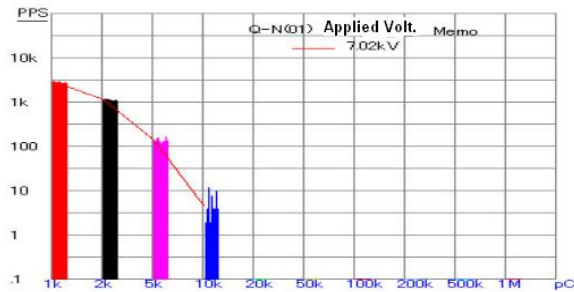


Fig. 13. Q-N result for degraded cable at the rate of 67% (cable length of 30 cm).

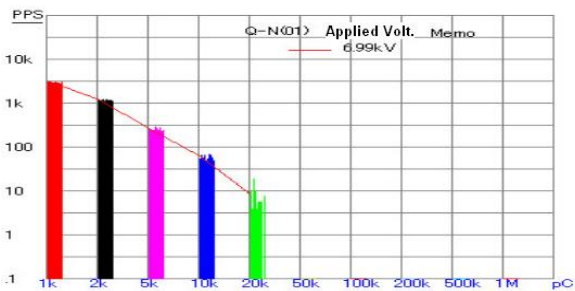


Fig. 14. Q-N result for degraded cable at the rate of 100% (cable length of 30 cm).

소하고 반면에 소멸전압은 증가하는 패턴을 관찰할 수 있었다. 이는 열열화에 따른 절연체의 해리 현상으로 인해 보이드가 증가하였고 이로 인해 방전개시 전압이 감소하였고 상대적으로 소멸전압은 증가한 것으로 보인다.

3.4 열열화 케이블의 길이에 따른 Q-N 측정 결과

열열화 케이블의 열화 비율별 부분방전의 Q-N 측정

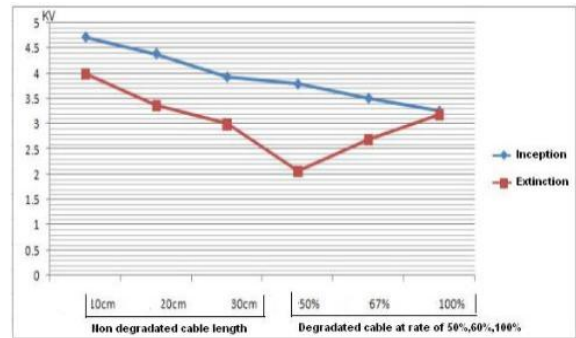


Fig. 15. Discharge inception & extinction voltage for non-degraded cable and degraded cable.

결과는 그림 12, 13, 14와 같다. 열열화 케이블의 Q-N 측정 결과, 열화비율이 증가함에 따라 방전 전하량과 발생빈도수 모두 증가하는 패턴을 관찰하였다.

3.5 비열화 케이블의 길이 및 열열화 케이블의 열화를 변화에 따른 개시/소멸 전압 측정 결과

비열화와 열열화 케이블의 길이 및 열화율에 따른 개시/소멸 전압의 변화는 그림 15와 같다. 열화되지 않은 케이블의 길이가 증가함에 따라 개시/소멸전압은 동시에 감소하였다. 반면에 열열화 케이블의 열열화 비율이 50% (20 cm), 67% (30 cm), 100% (30 cm)로 증가함에 따라 개시전압은 감소하나 소멸전압은 증가하였다.

3.6 케이블의 열화 온도별 내·외부 절연체에 대한 SEM 촬영 결과

케이블의 열적열화 온도별 외부 절연체 표면과 내부 절연체 열화상태의 비교를 위하여 SEM을 통한 촬영을 실시하였다. 이를 위하여 2코어 전력용 케이블 (1.5 mm 2 cross section)을 180°C, 200°C, 220°C에서 각각 40분간 가속열화 시킨 후 SEM 촬영을 실시하였다. 촬영에 사용된 현미경 장비는 Netherlands의 FEI社에서 제작된 Quanta 400 (FE-SEM)이다. 이에 대한 결과는 180°C에서 부터 온도가 상승 할수록 해리현상을 통해 염산가스 발생하였다. 220°C에서는 거의 용융되는 현상을 보였다. 또한, 열적으로 노출된 시간이 클수록 PVC 내·외부 피복재의 해리현상 및 열분해로 인한 표면 및 재질 변화 정도가 매우 크게 나타났다. SEM 촬영 결과는 다음의 그림 16~24와 같다.

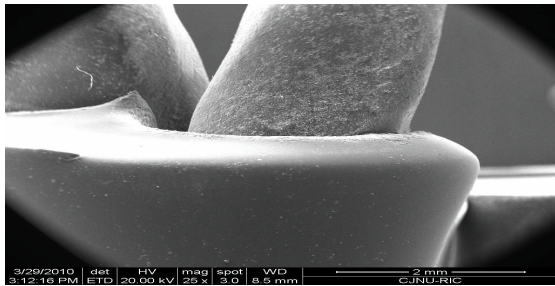


Fig. 16. SEM image of PVC cable at the temperature of 180°C (End of Sheath).

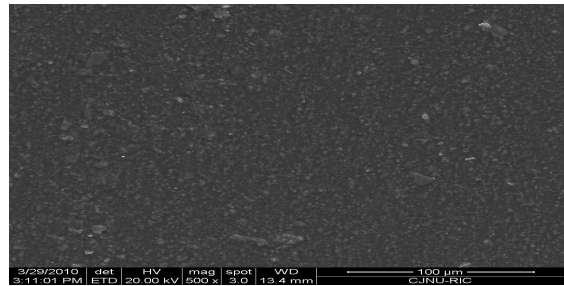


Fig. 20. SEM image of outside insulator at the temperature of 200°C (Sheath surface).

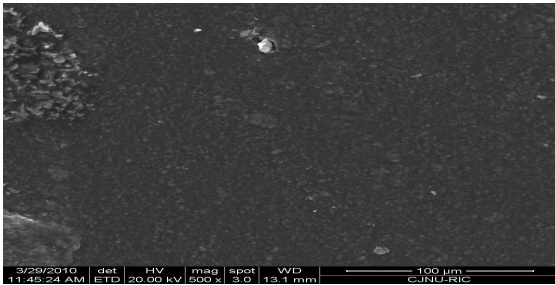


Fig. 17. SEM image of outside insulator at the temperature of 180°C (Sheath surface).

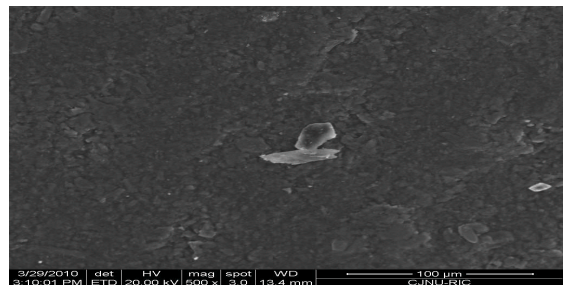


Fig. 21. SEM image of inside insulator at the temperature of 200°C (Insulation surface).

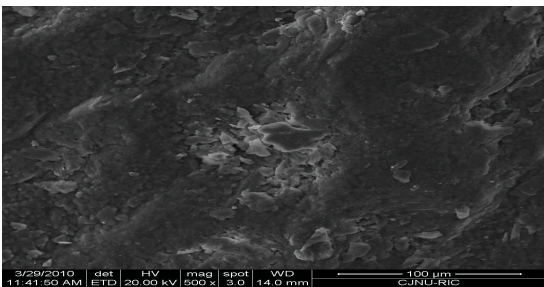


Fig. 18. SEM image of inside insulator at the temperature of 180°C (Insulation surface).

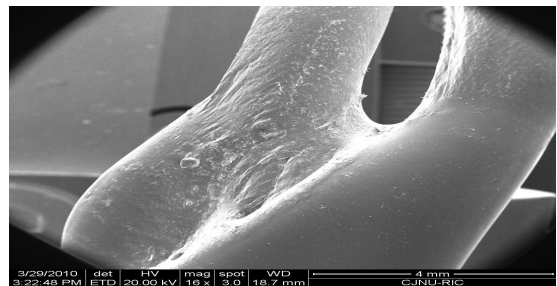


Fig. 22. SEM image of PVC cable at the temperature of 220°C (End of Sheath).

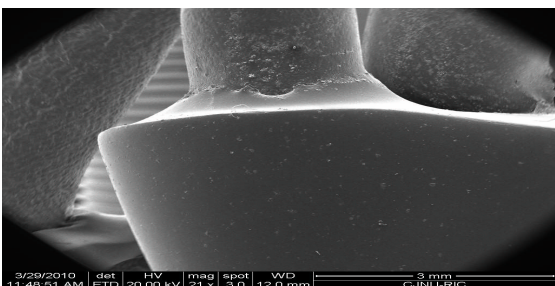


Fig. 19. SEM image of PVC cable at the temperature of 200°C (End of Sheath).

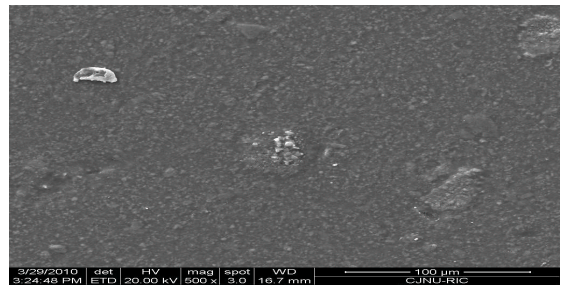


Fig. 23. SEM image of outside insulator at the temperature of 220°C (Sheath surface).

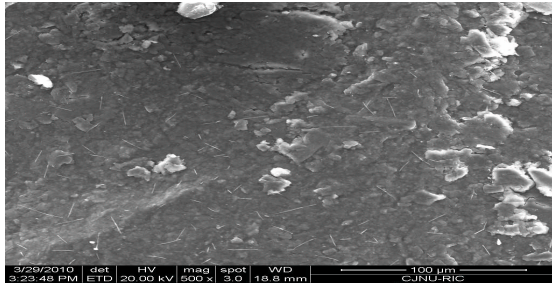


Fig. 24. SEM image of inside insulator at the temperature of 220°C (Insulation surface).

4. 결론

본 연구에서는 케이블의 길이변화 및 길이에 따른 열화 비율 조건을 변화시킨 케이블의 부분방전 V-Q 측정과 Q-N 측정을 실시하였다.

V-Q 측정 결과 비열화 케이블의 길이가 증가함에 따라 개시전압 및 소멸전압이 감소하는 패턴을 보였으며, 열열화 케이블의 경우에도 열열화 비율이 증가할수록 개시전압이 감소하였다. 하지만 소멸전압의 경우 일부 감소하는 패턴을 보이다가 다시 상승하는 패턴을 보이기도 하였다.

Q-N 측정 결과 케이블의 길이와 열열화 비율이 증가할수록 부분방전 전하량(Q)이 증가하고 발생 빈도수(N) 또한 변화가 상대적으로 심하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

특히, 비열화 케이블에 비해 열열화를 상태를 모의한 케이블이 상대적으로 개시전압이 낮게 측정되었으며, 소멸전압 또한 그 변화가 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

SEM 촬영을 통한 케이블의 열적열화 온도별 외부 절연체 표면과 내부 절연체 열화 표면 상태를 비교한 결과 180°C에서 부터 온도가 상승할수록 염산가스 발생하면서 PVC 내·외부 피복재의 해리가 급격히 진행되었으며 220°C에서는 거의 용융되는 현상을 보였다. 이에 대한 결과는 SEM 촬영이미지를 통해 확인된 케이블 표면의 상태를 통해 보다 자세하게 확인할 수 있었다.

감사의 글

부족하지만, 본 연구가 진행될 수 있도록 도와주신 충주대학교 교수님 및 그 외 전기안전연구실의 모든 구성원님들께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] IEC 60270, *Partial discharge measurement*, 3rd edition, (2001).
- [2] IEC 60811, *Insulating and sheathing materials of electric cables, Common test methods Part 1-2: General application, Thermal ageing methods* (2002).
- [3] J. H. Mason, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineer*, **113**, 2113 (1966).
- [4] F. H. Kreuger, *Partial discharge detection in high-voltage equipment* (Butterworths, London, 1989) p. 50.
- [5] J. P. Steiner and F. D. Martzloff, *Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 149 (1990).