

실리콘 고무의 부분방전 특성에 관한 연구

이성일¹, 권영천^{1,a}

¹ 충주대학교 안전공학과

A Study on Properties of Partial Discharge in Silicone Rubber

Sung-Ill Lee¹ and Young-Cheon Kwon^{1,a}

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

(Received August 22, 2011; Revised September 21, 2011; Accepted September 28, 2011)

Abstract: In this thesis, the silicone filler with a sample size of 0~75 phr and void size of 2~4.5 mm is prepared in order to diagnose the defect of void which exists in widely used insulation material, silicone rubber. In this silicone rubber sample, electrodes are connected and whilst the voltage changes, applied voltage 7 kV~9 kV is increased constantly over time and discharge quantity, discharge frequency and applied voltage (T-QNV) were measured. The discharge quantity of the applied voltage (VQ) is measured to estimate inception voltage and extinction voltage. In addition, under the condition of maintaining constant applied voltage, discharge quantity and discharge frequency (QN) are measured, and its characteristics are analyzed.

Keywords: Silicone filler, Silicone rubber, Partial discharge

1. 서론

최근 주요 설비 사용전력의 대용량화에 따라 실리콘 사용 횟수가 늘면서 실리콘의 중요성을 대두되고 있다. 실리콘 고무는 40여 년 전부터 개발되기 시작했는데, 다른 유기 고무에 비해 고온에서의 뛰어난 기계적 물성과 내열성이 우수하다. 여기에 실리콘 탄성 중합체의 물리적 특성 및 역학적 성질이 다른 유기 합성 고무 수준 이상으로 발전함에 따라 산업계에서는 이 부분에 대한 기술 응용에 더 많은 관심을 가지게 되었다. 최근 점차 커지고 있는 디스플레이 시장과 핸드폰, PDA (personal digital assistant) 등의 통신기기 시장의 기기들이 소형화, 박막화, 다기능화를 요구 받으면서 기기의 내부 밀집도가 점차 커지게 됨에 따라 높은 내열성을 필요로 하는 고무 재료의 요구가 급격히 증가하면서 실리콘 고무의 용도는

무한하게 커지고 있다. 실리콘 고무는 일반 유기 합성 고무에 비해 여러 가지 우수한 물성을 가지고 있는데 그 중 독특한 것이 내열성과 내한성이다. 200℃ 이상에서도 물성의 변화 없이 장시간 사용이 가능하고 -50℃이하에서도 유연성을 유지할 뿐만 아니라 전기적 특성 또한 온도에 민감하게 변화하지 않기 때문에 내열성을 요구하는 전기, 전자, 통신부품 재료로 응용되고 있다. 또한 내열성과 내약품성, 발수성, 이형성 등이 우수할 뿐만 아니라 가스 투과성이 우수하고 유해성이 적거나 거의 없어서 의료용으로도 널리 사용되고 있다 [1-3].

그러나 일반 유기 고무와 비교해서 기계적 강도의 절대값이 다소 떨어지고, 내마모성이 취약하고, 산과 알칼리에 대한 안전성이 낮은 단점과 다른 고무와의 혼합이나 다른 재질로의 접착이 어려운 단점을 가지고 있다. 이런 단점들은 장점을 극대화함으로써 최소화할 수 있고 단점을 개선할 수 있는 보장제, 접착제

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

등의 개발로 조금씩 개선되고 있다. 이런 각종 전기 기기에 이용되고 있는 실리콘 절연재료는 열, 전기, 환경 및 기계적인 요인 등에 의한 스트레스를 장기간 받게 되면 초기의 물성치를 유지하지 못하고 변질되기도 하고 파괴되기도 하는데 이것을 열화라고 하며 이로 인해 수명이 저하하게 된다. 또한 합성 실리콘 재료는 우수한 전기절연성, 기계적, 화학적 특성 등으로 인해 전기절연 재료로써 널리 사용되고 있지만, 절연체속이나 절연체에 접하는 도체 근방에 보이드가 존재한 경우 또는 적용 환경에 의해 열화된 경우에는 부분방전 (partial discharge, PD)이 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 절연체로 널리 사용하고 있는 실리콘 고무에 존재하는 보이드 결함을 진단하기 위해 보이드의 크기를 2~4.5 mm로 준비하였다 [4-6].

실리콘 고무시료에 전극을 연결하여 전압의 변화에 인가전압을 7 kV~9 kV 일정하게 상승시켜 전체시간에 따른 방전전하량, 방전발생 빈도 및 인가전압 (T-QNV)을 측정하였으며, 개시전압 및 소멸전압 측정을 위한 인가전압에 따른 방전전하량(V-Q)을 측정하였다. 또한 일정 인가전압을 유지시킨 상태에서 방전전하량과 방전발생 수(Q-N)를 측정하여 특성을 분석하였다 [7-11].

2. 실험 방법

2.1 시료

실제적으로 실리콘 절연체 내부에 형성될 수 있는 μm 크기의 다양한 형태의 보이드를 인위적으로 일정한 형태와 크기로 형성시키는 것은 현실적으로 많은 어려움이 수반되므로 본 연구에서는 기초 연구로써 보이드의 크기를 2 mm로 제작하였다.

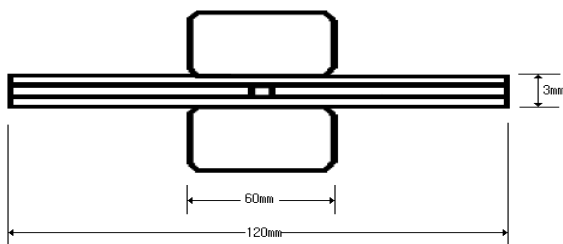


Fig. 1. The specimen of sample.

본 실험에 사용한 시료는 산업용 실리콘으로 널리 쓰이고 있는 pross oil 4 phr, base (gum) 44 phr의 무충진 시편을 170°C에서 5분 간 1차 경화를 하고, 200°C에서 4시간 동안 2차 경화를 하여 시편을 제작하였다. 이와 같은 과정으로, 상부 및 하부 전극의 직경은 60 mm로 제작하였고, 전극 사이에 보이드를 인위적으로 만든 평판 시편을 삽입하였다. 그리고 계면에서 발생할 수 있는 방전을 방지하고자 계면에 실리콘 본드를 이용하여 프레스로 압착한 상태에서 부착시켰다. 제작된 시편은 표면에 부착된 각종 먼지, 불순물 등 오염물질을 제거하기 위하여 에틸알코올로 닦아내었다. 이런 실리콘 고무 시료에 전극을 연결하여 전압의 변화에 인가전압을 7 kV~9 kV 일정하게 상승시켜 전체시간에 따른 방전전하량, 방전발생 빈도 및 인가전압 (T-QNV)을 측정하였으며, 개시전압 및 소멸전압 측정을 위한 인가전압에 따른 방전전하량 (V-Q)을 측정하였다. 또한 일정 인가전압을 유지시킨 상태에서 방전전하량과 방전발생 수 (Q-N)를 측정하여 그 특성을 분석하였다.

2.2 실험장치

실험 장치는 일본 NKS社 (Nihon Keisokuki Seizosho Co., Ltd.)의 부분 방전 측정 시스템을 사용하였다. 부분방전 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 구성하였다.

HV-30K05 시험 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 방전 파형을 100 PPS (pulses per second) 반복 주파수에서 발생하고, 교정전하는 0~2,500 pC까지 임의로 생성할 수 있다. 본 실험에서는 50 pC로 설정하였다. CD-6는 컴퓨터 상에서 전환범위 설정 확인, 펄스 계수 확인, 측정값 현시 및 펄스 카운터를 내장함으로써 카운트 신호 출력을 얻을 수 있다. DI-21은 시험 회로의 공진 주파수를 부분방전 측정기의 동조주파수와 동조화시킴으로써 민감한 부분방전 또한 고감도로 검출 가능하다. ACU-1은 AC 전압정보를 디지털로 변환하여 컴퓨터에 데이터로 전송한다. 컴퓨터 간 데

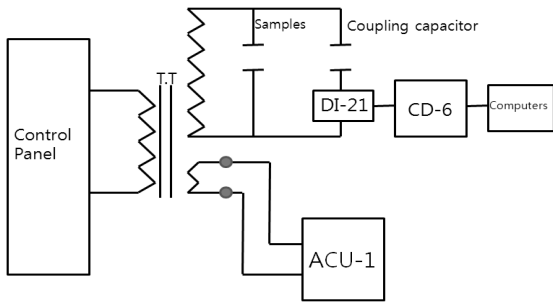


Fig. 2. Block diagram of partial discharge measuring system.

이터 전송은 RS232C를 통하여 수행된다. CD-6AU는 CD-6과 ACU-1을 사용하여 부분 방전 측정을 자동으로 수행한다.

또한, PDANALA 프로그램은 CD-6AU를 통해 기록된 데이터를 확인 및 분석, 그리고 보고서 출력을 지원한다. 부분 방전 측정 시 실험실온도 18℃~21℃, 습도 40%~55%의 환경에서 실시하였다. 본 실험에서는 시료를 연결한 뒤 NPG-2 (20 pC)와 오실로스코프를 사용하여 교정치 값 1,000 pC/V를 적용하였다.

모든 실험은 사전 데이터 설정이 완료된 후 컴퓨터 상에서 실험데이터를 자동 저장 및 기록한다. V-Q 측정 시는 최대인가 전압 7 KV까지 서서히 인가시키며 측정하였으며, Q-N 측정은 측정전압 9 KV 인가 후 입력전압의 감쇄율 변화에 따른 방전계수를 측정하기 위하여 INPUT ATT를 감쇄시키면서 값을 측정하였다. 이 동작을 500 ms의 속도로 15회 반복 측정하였다. 실험 종료 후 컴퓨터에 저장된 결과 데이터를 PDANALA 프로그램을 통하여 확인 및 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충전제 0 phr 보이드 크기 2 mm일 때 보이드 변화에 따른 V-Q 개시전압, 소멸전압 측정 결과

그림 3~5는 실리콘 고무시료의 부분방전 측정의 V-Q 결과이며, 보이드 지름이 2 mm 보이드가 2set, 3set, 4set일 때 방전 개시전압이 1.68, 1.84, 1.90 kV로 증가하였다. 이 때 소멸전압의 크기는 1.62, 1.81, 1.89 kV이었다. 다음과 같이 실리콘의 V-Q측정 결과 개시전압은 증가함을 알 수 있고 소멸전압은 감소하는

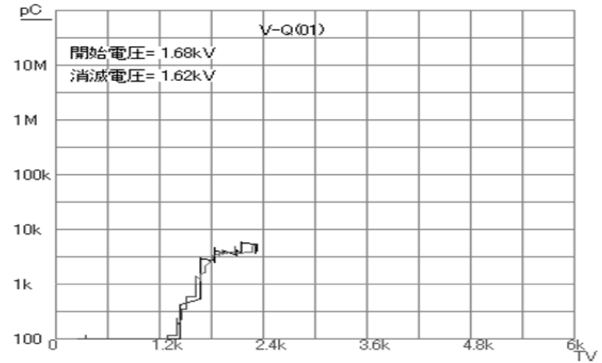


Fig. 3. Filler(0%) hole(2 mm) void(2 set).

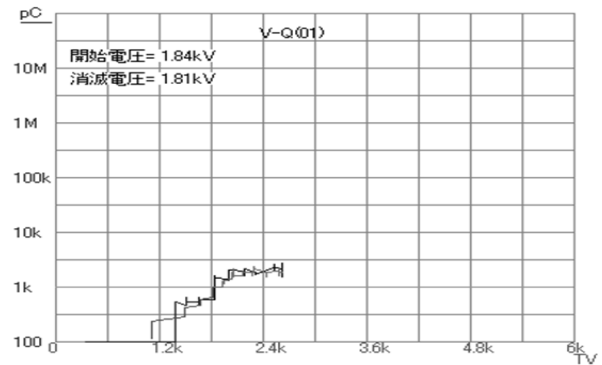


Fig. 4. Filler(0%) hole(2 mm) void(3 set).

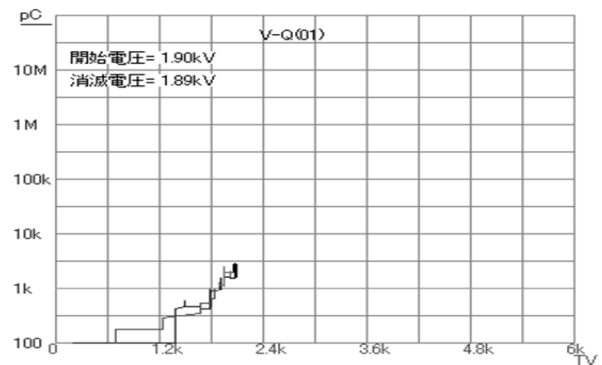


Fig. 5. Filler(0%) hole(2 mm) void(4 set).

패턴을 관찰할 수 있다. 또한 개시전압과 소멸전압 간 차이는 최소 약 0.01 kV에서 최대 약 0.04 kV까지 나타남을 확인하였다. 시료의 보이드가 3set, 4set로 될수록 방전전하량-인가전압 특성에서 부분 방전 개시전압부터 서서히 상승하고, 소멸전압도 감압과 더

불어 감소하고 있다. 보이드의 set수가 증가함에 대응하여 전압상승에 따라 모든 보이드가 방전을 일으켜서 최대 방전전하량이 포화되는 것으로 사료된다. 보이드가 많을수록 부분 방전특성은 방전개시 후에도 지속하게 되며, 방전전하량은 선형적으로 증가하는데 이 결과로부터 전력용 기기의 결함상태를 추정할 수 있다. 전압강하 시 시료의 부분 방전특성은 상승 시보다 완만하므로 방전개시와 동시에 계면의 전 영역에 생긴 부분방전이 인가전압의 강하에 따라서 국소부분에서 유지되다가 결국 소멸하게 된다. 방전 개시 전압이 소멸전압 보다 아주 미소하게 나타났는데 계면 층에서 발생된 부분방전이 다른 계면 보이드의 후속방전을 유도했기 때문이라 생각된다.

3.2 충전제 0 phr 보이드 크기 2 mm 보이드 2개 일 때 전압 증가에 따른 Q-N 측정 결과

실리콘 고무시료의 보이드의 부분방전의 Q-N측정 결과는 그림 6~8과 같다. 다음 그림의 결과를 고찰해 보면 전압이 7 kV에서 9 kV로 상승할수록 부분 방전전하량과 발생빈도가 증가함을 확인할 수 있다.

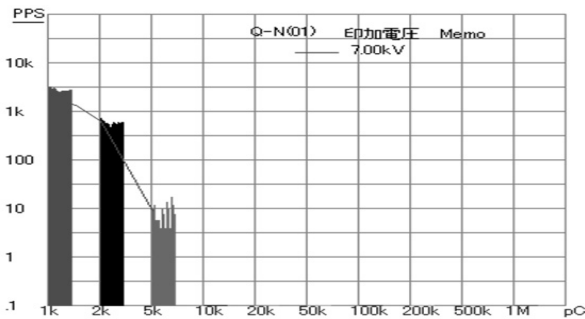


Fig. 6. Filler(0%) hole(2 mm) void(2 set) 7 kV.

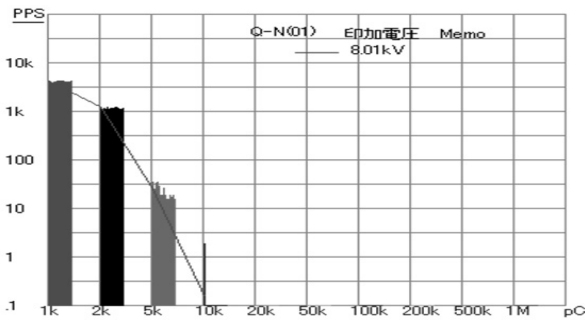


Fig. 7. Filler(0%) hole(2 mm) void(2 set) 8 kV.

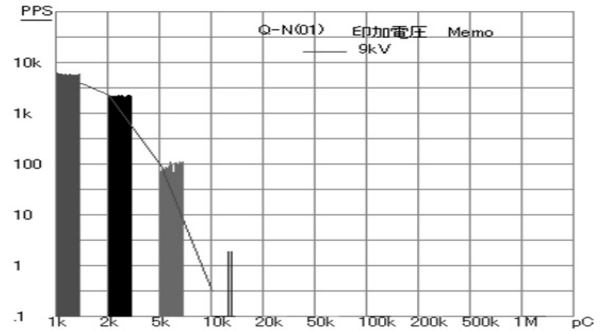


Fig. 8. Filler(0%) hole(2 mm) void(2 set) 9 kV.

3.3 충전제 0 phr 보이드 크기 2 mm 보이드 3개 일 때 전압 증가에 따른 Q-N 측정 결과

실리콘 고무시료의 보이드의 부분방전의 Q-N측정 결과는 그림 9~11과 같다. 그림의 결과를 고찰해 보면 전압이 증가할수록 부분방전 전하량과 발생빈도가 증가함을 확인할 수 있다.

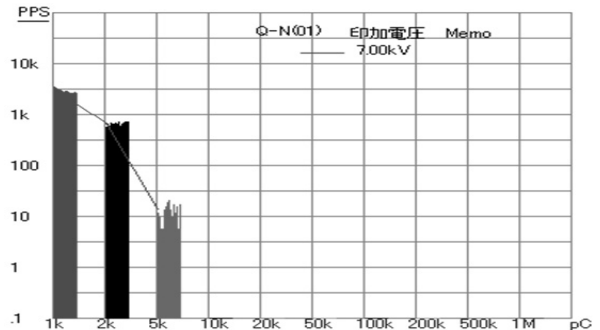


Fig. 9. Filler(0%) hole(2 mm) void(3 set) 7 kV.

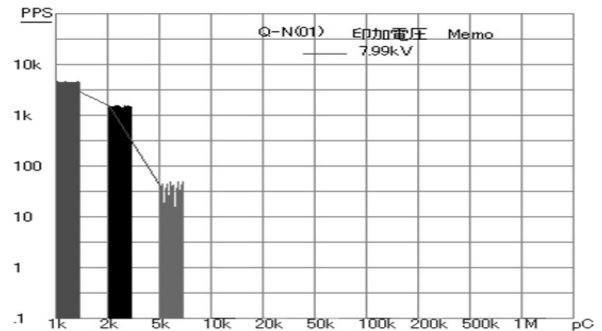


Fig. 10. Filler(0%) hole(2 mm) void(3 set) 8 kV.

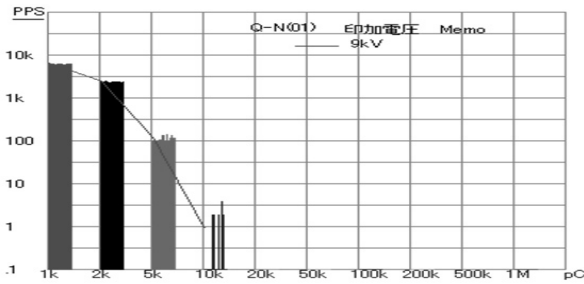


Fig. 11. Filler(0%) hole(2 mm) void(3 set) 9 kV.

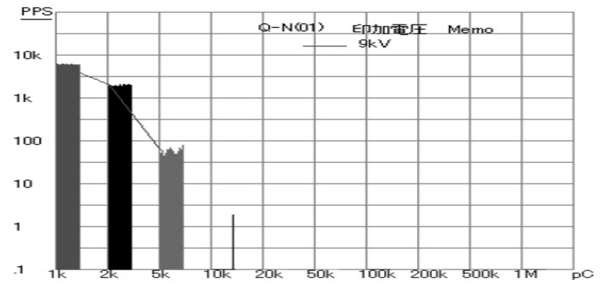


Fig. 14. Filler(0%) hole(2 mm) void(4 set) 9 kV.

3.4 충전제 0 phr 보이드 크기 2 mm 보이드 4개 일 때 전압 증가에 따른 Q-N 측정 결과

실리콘 고무시료의 보이드의 부분방전의 Q-N측정 결과는 그림 12~14와 같다. 그림의 결과를 고찰해 보면 전압이 증가할수록 부분방전 전하량과 발생빈도가 증가함을 확인할 수 있다. 그림 6~14는 set 수가 2, 3, 4개인 경우의 전압이 7 kV에서 9 kV로 상승에 따른 결과인데, 개개의 방전전하량이 매우 작아 단위시간 당 방전개수가 매우 많은 방전이 일어나고 있다. 이것은 실리콘 고무 절연재료의 내부 부분 방전열화가 원인이라고 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 실리콘 보이드의 수에 의한 부분방전 측정 실험을 실시하였으며, 이를 통해 인가전압에 따른 방전 전하량(V-Q)측정 및 방전 전하량에 따른 방전 발생 수 (Q-N)를 측정하였다. 실험 결과를 정리하면 보이드에 갖는 시편에서 보이드의 크기가 2 mm 일 때 보이드의 수가 증가함에 따라 개시전압 및 소멸 전압이 증가했음을 알 수 있다. 또한, 인가전압에 따른 실리콘 시편에 전압을 증가시키면 그에 따른 부분방전 전하량과 발생빈도가 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 각종 결함에 대한 실리콘 고무 내부의 부분 방전열화가 일어났기 때문이라고 생각된다.

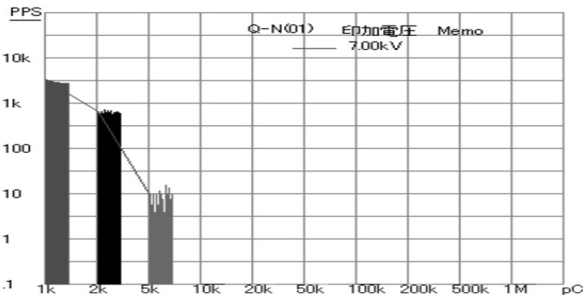


Fig. 12. Filler(0%) hole(2 mm) void(4 set) 7 kV.

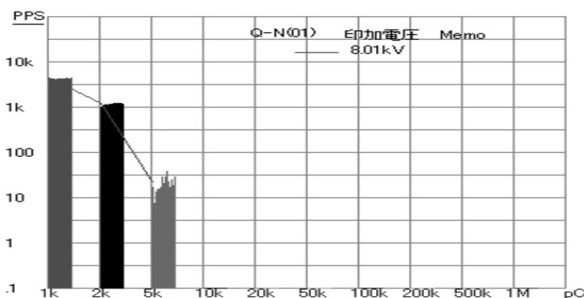


Fig. 13. Filler(0%) hole(2 mm) void(4 set) 8 kV.

REFERENCES

- [1] K. T. Song and S. I. Lee, *J. KIEEME*, **24**, 208 (2010).
- [2] IEC International Standard 60270, *Partial Discharge Measurement, 3rd ed* (2001).
- [3] IEC International Standard 60811, *Insulating and sheathing materials of electric cables, Common test methods Part 1-2: General application, Thermal Aging Methods* (2002).
- [4] A. Barlw, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, **7**, 8 (1991).
- [5] T. Fukuda, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, **4**, 9 (1988).
- [6] R. J. V. Brunt, *IEEE Trans. Elec. Insul.*, **26**, 902 (1991).
- [7] R. Krump and H. G. Kranz, *Proc. 6th* (ISH, New Orleans, USA, 1989) p. 2213.
- [8] R. Schifani and G. Mirelli, *Compel*, **17**, 765 (1998).
- [9] G. Capponi, and R. Schifani, *IEEE Trans. Elec. Insul.*, **27**, 106 (1992)
- [10] M. Cacciari, A. Contin, and G. C. Montanari, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2**, 1166 (1995)
- [11] S. Jiang and D. Kececioglu, *IEEE Trans. Reliab.*, **44**, 241 (1992).