

오손액 변화에 따른 실리콘 고무의 정전기 대전열화 특성

이성일^a

한국교통대학교 안전공학과

Properties of Electrostatic Electrification Degradation due to Contaminant Difference of Silicone Rubbers

Sung Ill Lee^a

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

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

Abstract: In this study, the electrification voltage of electrostatics for silicone rubber sample(4 cm × 4 cm × 0.103 cm) following immersion with contaminants of 2 ml, 5 ml, 10 ml for six hours has been measured in through the applied voltage of 10 kV DC at temperature of 80°C ~ 110°C, humidity of 50% ~ 90%. The results of this study are as follows. In case the contaminants is constant, it found that the electrification voltage of electrostatic decreased with increasing temperature and humidity to 35°C, 90%. In case of 2 ml of contaminants concentration, it found that the electrification voltage of electrostatic decreased with increasing temperature and humidity to 35°C, 50%. In case of the sample at temperature of 15°C and humidity of 50%, it found that the electrification voltage of electrostatic decreased with increasing contaminants to 10 ml.

Keywords: Electrostatic electrification voltage, Electrification relaxation time

1. 서 론

실리콘 고무는 규소원자와 산소원자를 골격으로 한 실록산 결합으로 되어 있으며, 배합하는 첨가제나 충전제 등에 의해 각종 물성 및 전기 특성이 크게 변화한다. 특히 뛰어난 내열성, 발수성, 내열성과 열전도성 때문에 실리콘 고무 절연케이블의 절연 용량을 증가시킬 수 있다 [1,2]. 최근 고기능화, 고속화, 고집적화와 표면 실장(surface mount)한 반도체 디바이스를 납땜에 의한 접착 형태에서 전도성 입자를 분산시킨 필름

상의 접착제를 사용하고 있는데 이방 전도성 필름(anisotropic conductive film, ACF)은 금속 코팅된 플라스틱 또는 금속 입자 등의 전도성 입자를 분산시킨 필름상의 접착제로 액정 화면(liquid crystal display, LCD) 실장(mount) 분야에서의 LCD 패널과 테이프 캐리어 패키지(tape carrier package, TCP) 또는 인쇄 회로 기판(printed circuit board, PCB)과 TCP 등의 전기적 접속에 사용되고 있다 [3-5]. 전기자동차의 인버터 기판, 노트북 컴퓨터의 중앙처리장치, LED 조명의 고휘도 LED 패키지, 휴대전화 및 단말기 등의 고집적화, 소형화, 대용량화에 따라 발열이 증가한다.

ACF의 접속은 판 사이에 ACF를 160~180°C, 10~20 sec의 범위에서 얇게 가열, 2~3 MPa의 압력으로 가압하여 접착제를 용융하고 분산되어 있는 도전입자가 대

a. Corresponding author; silee@uc.ac.kr

치하는 전극 사이에 보호되어 도전성이 얼어짐과 동시에 인접하는 전극 사이에 접착제가 충전되어 도전입자가 독립하여 존재하기 때문에 높은 절연성을 얻을 수 있다. 도전입자와 전극 사이의 기계적 적용은 접착제의 높은 접착력에 의해 유지된다.

최근 정전기에 의해 생산 장애와 시스템 파기가 일어나 고분자 절연 물질 등에 정전기가 원인이 되어 재해가 발생하는 경우가 급격히 늘고 있다 [6-8]. 그래서 표면실장(surface mount)한 반도체 디바이스에 실리콘 고무 절연체 시트 표면에 얼마만큼의 정전기 대전 전압이 발생하는지 조사하는 것이 대단히 중요하다 [7-9].

이 연구에서는 열전도성 실리콘 고무로 절연하면 얼마만큼의 정전기 대전완화 전류가 흐르는지를 측정하기 위해서 2%, 5%, 10% 오손액에 6시간 함침시킨 3 종류의 실리콘 고무 시트를 가로 4 cm, 세로 4 cm, 두께 0.103 mm인 시편을 제작하였다. 온도 10~35°C, 습도 50~90% 환경 범위에서 실리콘 고무 절연체 재료 시트 시편이 정전기 대전전압이 발생하는지 오손액 함유량이 다른 세 종류의 시편에 10 kV의 전압을 인가하여 정전기 대전 전위를 측정하여 습도와 온도의 환경 하에서 정전기 대전전압의 영향을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

이 실험에서는 Dimethylvinyl terminated dimethyl siloxane 100 phr, SiO₂ 10 phr, Al₂O₃ 230 phr로 열전도성이 우수하고, 인장강도 500 kg/mm² 부여하고 내열성이 우수한 폴리이미드(polyimide)의 표면개질 및 실리콘과의 접착이 되도록 프라이머를 처리하여 화학적으로 반응을 일으켜 두께 평탄도 $\pm 20 \mu\text{m}$, 이방 전도성 필름(anisotropic conductive film, ACF) 30회 압착하여 120°C에서 10분 동안 압축 성형하여 두께 4 cm $\times$ 4 cm $\times$ 0.103 mm인 열전도성 실리콘/Polyimide 시편을 제작하였다. 오손액은 증류수에 0.1 $\pm$ 0.002 wt%의 염화암모늄 (Korea, Daejung Chemical & Metal(주), Ammonium Chloride, NH₄CL)과 0.02 $\pm$ 0.002 wt%의 비이온계 계면 활성제 (Korea, Daejung Chemical & Metal Co.), Triton X-100(C₈H₁₇-C₆H₄(OCH₂CH₂)_nOH)의 농도를 2 ml, 4 ml, 8 ml를 혼합하여 제조한 것에 6시간 동안 침적시킨 후에 사용하였다.

Table 1. Condition of measurement of specimen.

Humidity(%) Temper.(°C)	50	60	70	80	90
10	○	○	○	○	○
15	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○
25	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○
35	○	○	○	○	○

Contaminant: 2%, 5%, 10%

또한 표 1에 실리콘 고무 시료의 정전기 대전량의 측정 조건을 표 1에 나타내었다.

2.2 측정회로 및 방법

정전기를 발생시켜 주는 직류 코로나 방전식의 chopper형이며, D.C($\pm$), 0~10 kV의 가변형인 Static Honestmeter (일본:Shishido 정전기(Type H-0110), 분석용으로 Honest Analyzer (일본:Shishido 정전기(Type V1), Thermal printer (일본:DPU-411, 열감지식 Serial Dot 방식) 및 항온·항습계를 사용하였으며 그림 1과 같이 배치했다.

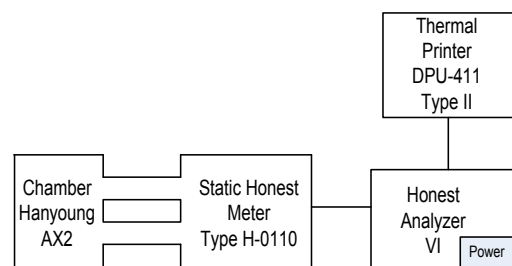


Fig. 1. Measuring device.

측정회로를 그림 2에 나타내었으며, 항온·항습계로 온도 10~35°C의 범위에서 5°C씩 상승시키면서, 습도는 50~90%까지 10%씩 상승시켜가면서 60초 동안 정전기 대전 및 완화시간 값을 측정했다.

그림 3에 시료를 코로나 방전에 의해 임의로 대전시키는 구동기, 코로나를 발생시키기 위한 고압직류 전원, 소자를 위에 놓고 회전시키는 턴 테이블 및 모터, 시료의 전위를 픽업하는 수신기와 증폭기, 또 완화되는

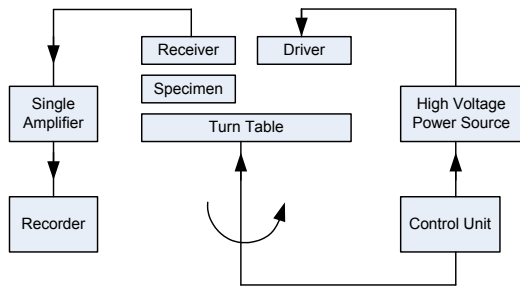


Fig. 2. A schematic diagram showing the structure of static honestmeter.

전하로부터 반감기를 측정하는 Analyzer가 부착, 이를 조작하는 조작부 등으로 구성되어 있는 Static Honestmeter의 구조를 나타내었으며 턴 테이블(turn table)을 1,550 rpm의 속도로 회전시키면서 시료에 10 kV의 전압을 20 mm 떨어진 시료에 인가하여 대전되는 대전전압이 3 kV인데 실리콘 고무 시편을 장착한 후 온도를 10~35°C, 습도 50~80%의 환경에서 10 kV의 직류고전압을 코로나 방전형으로 인가시켜 그 검출치가 포화치(saturation level)에 도달한 후 고압인가를 차단시키고, 그 후 60 sec 동안 시료 표면상의 전위 감쇠상태를 연속적으로 측정했다.

3. 결과 및 고찰

그림3~5는 2%, 5%, 10%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 6시간 동안 열화시킨 세 종류의 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 mm로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴 테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다.

그림 3은 온도 10°C~30°C, 습도 60%~80%의 상태에서 2%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 6시간 동안 열화시킨 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 mm로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴 테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 습도

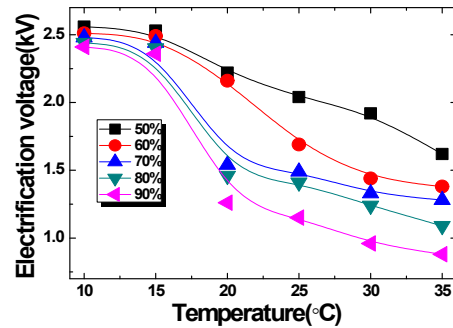


Fig. 3. Properties of electrostatic voltage vs temperature of specimen in contaminant 2%.

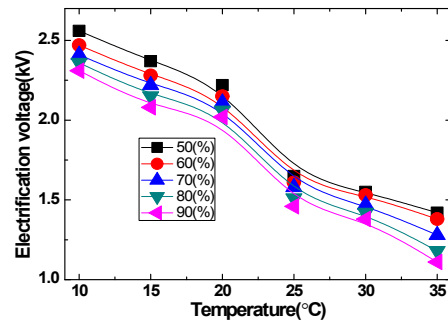


Fig. 4. Properties of electrostatic voltage vs temperature of specimen in contaminant 5%.

50%인 경우 10°C일 때 2.56 kV 정도, 15°C일 때 2.53 kV 정도, 20°C일 때 2.22 kV 정도, 25°C일 때 2.04 kV 정도, 30°C일 때 1.92 kV 정도, 35°C일 때 1.62 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소하였다. 습도 70%인 경우 10°C일 때 2.48 kV 정도, 15°C일 때 2.44 kV 정도로 서서히 감소하다가 20°C일 때 1.54 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 25°C일 때 1.49 kV 정도, 30°C일 때 1.33 kV 정도, 35°C일 때 1.28 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소하였다. 습도 90%인 경우 10°C일 때 2.41 kV 정도, 15°C일 때 2.36 kV 정도로 서서히 감소하다가 20°C일 때 1.26 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 25°C일 때 1.15 kV 정도, 30°C일 때 0.96 kV 정도, 35°C일 때 0.88 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소함을 확인하였다. 또한 습도 50%인 경우 10°C~35°C일 때 2.56~1.62 kV 정도의 크기이나 90%인 경우 10°C~35°C일 때 2.41~0.88 kV 정도의 크기로 감소하였다.

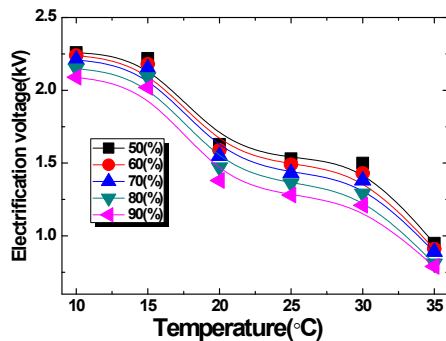


Fig. 5. Properties of electrostatic voltage vs temperature of specimen in contaminant.

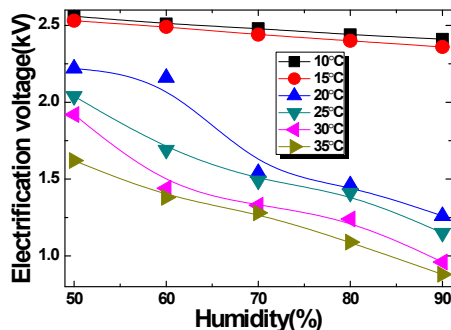


Fig. 6. Properties of electrostatic voltage vs humidity of specimen in contaminant 2%.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 5%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 습도 50%인 경우 10°C일 때 2.56 kV 정도, 15°C일 때 2.37 kV 정도, 20°C일 때 2.22 kV 정도, 25°C일 때 1.65 kV 정도, 30°C일 때 1.55 kV 정도, 35°C일 때 1.42 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소하였다. 습도 70%인 경우 10°C일 때 2.41 kV 정도, 15°C일 때 2.22 kV 정도로 서서히 감소하다가 20°C일 때 2.11 kV 정도로 서서히 감소하다가 25°C일 때 1.51 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 30°C일 때 1.47 kV 정도, 35°C일 때 1.28 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소하였다. 습도 90%인 경우 10°C일 때 2.31 kV 정도, 15°C일 때 2.08 kV 정도, 20°C일 때 2.02 kV 정도로 서서히 감소하다가, 25°C일 때 1.15 kV 경사지게 감소하다가, 30°C일 때 0.96 kV 정도, 35°C일 때 0.88 kV 정도로 온도가 증가할수록 대전전압이 서서히 감소함을 확인하였다.

또한 습도 50%인 경우 10°C~35°C일 때 2.56 ~ 1.42 kV 정도의 크기이나 90%인 경우 10°C~35°C일 때 2.31 ~ 1.11 kV 정도의 크기로 감소하였다.

그림 5는 그림 3과 같은 조건에서 5%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 습도 50%인 경우 10°C일 때 2.26 kV 정도, 15°C일 때 2.22 kV 정도로 서서히 감소하다가, 20°C일 때 1.63 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 25°C일 때 1.53 kV 정도, 30°C일 때 1.5 kV 정도로 서서히 감소하다가, 35°C일 때 0.9 kV 정도로 급격하게 온도가 증가할수록 대전전압이 감소하였다. 습도 70%인 경우 10°C일 때 2.21 kV 정도, 15°C일 때 2.15 kV 정도로 서서히 감소하다가, 20°C일 때 1.55 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 25°C일 때 1.43 kV 정도, 30°C일 때 1.38 kV 정도로 서서히 감소하다가, 35°C일 때 0.89 kV 정도로 급격하게 온도가 증가할수록 대전전압이 감소하였다. 습도 90%인 경우 10°C일 때 2.09 kV 정도, 15°C일 때 2.02 kV 정도로 서서히 감소하다가, 20°C일 때 1.38 kV 정도로 경사지게 감소하다가, 25°C일 때 1.28 kV 정도, 30°C일 때 1.21 kV 정도로 서서히 감소하다가, 35°C일 때 0.79 kV 정도로 급격하게 온도가 증가할수록 대전전압이 감소하였다. 또한 습도 50%인 경우 10°C~35°C일 때 2.26 ~ 1.42 kV 정도의 크기이나 90%인 경우 10°C~35°C일 때 1.09 ~ 0.79 kV 정도의 크기로 감소하였다. 그림 3~5의 결과로부터 오손액이 일정할 경우 습도가 50%에서 90%로 증가할수록 정전기 대전전압은 감소하였는데 이는 오손액에 의해서 전기저항의 값이 감소했기 때문이라 생각된다. 온도가 10°C에서 35°C로 증가할수록 정전기 대전전압은 감소하였는데 이는 오손액이 O-H 분자의 흡습 때문이라 생각되며 또한 온도보다 습도가 정전기 대전에 더 영향을 미친다고 생각된다.

그림 6~8은 2%, 5%, 10%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 6시간 동안 열화시킨 세 종류의 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 mm로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴 테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 습도에 대한 온도의 대전전압을 측정한 결과이다.

그림 6은 온도 10°C~35°C, 습도 50%~90%인 상태에서 2%의 오손액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 6시간 동안 열화시킨 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 mm

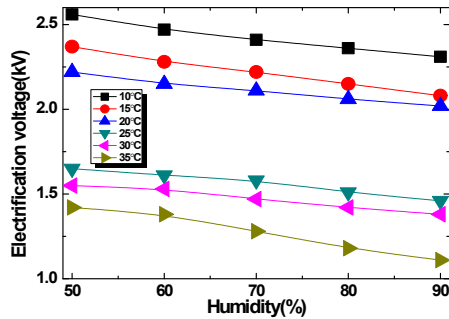


Fig. 7. Properties of electrostatic voltage vs humidity of specimen in contaminant 5%.

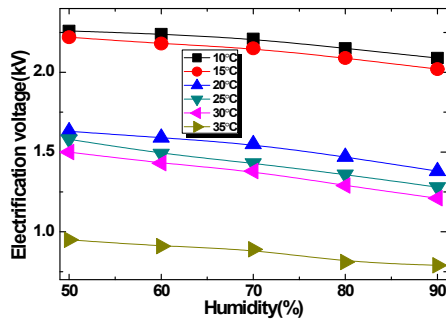


Fig. 8. Properties of electrostatic voltage vs humidity of specimen in contaminant 10%.

로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴 테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 습도에 대한 온도의 대전전압을 측정한 결과이다. 온도 10°C인 경우 50%일 때 2.56 kV 정도, 60%일 때 2.51 kV 정도, 70%일 때 2.48 kV 정도, 80%일 때 2.44 kV 정도, 90%일 때 2.41 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 20°C인 경우 50%일 때 2.22 kV 정도, 60%일 때 2.16 kV 정도로 서서히 감소하다가 70%일 때 1.54 kV 정도, 80%일 때 1.46 kV 정도, 90%일 때 1.26 kV 정도, 35°C일 때 1.62 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 35°C인 경우 50%일 때 1.62 kV 정도, 60%일 때 1.38 kV 정도, 70%일 때 1.28 kV 정도, 80%일 때 1.09 kV 정도, 90%일 때 0.88 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 일정한 기울기로 서서히 감소하였다. 또한 온도 10°C인 경우 50 ~

90%일 때 2.56 ~ 2.41 kV 정도의 크기이나 온도 20°C인 경우 50 ~ 90%일 때 2.22 ~ 1.26 kV 정도, 온도 35°C인 경우 50 ~ 90%일 때 1.62 ~ 0.886 kV 정도의 크기로 감소하였다.

그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 5%의 오존액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 습도에 대한 온도의 대전전압을 측정한 결과이다. 온도 10°C인 경우 50%일 때 2.56 kV 정도, 60%일 때 2.47 kV 정도, 70%일 때 2.41 kV 정도, 80%일 때 2.36 kV 정도, 90%일 때 2.31 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 20°C인 경우 50%일 때 2.22 kV 정도, 60%일 때 2.15 kV 정도로 서서히 감소하다가 70%일 때 2.11 kV 정도, 80%일 때 2.06 kV 정도, 90%일 때 2.02 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 35°C인 경우 50%일 때 1.42 kV 정도, 60%일 때 1.38 kV 정도, 70%일 때 1.28 kV 정도, 80%일 때 1.18 kV 정도, 90%일 때 0.11 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 일정한 기울기로 서서히 감소하였다. 또한 온도 10°C인 경우 50 ~ 90%일 때 2.56 ~ 2.41 kV 정도의 크기이나 온도 20°C인 경우 50 ~ 90%일 때 2.22 ~ 2.02 kV 정도, 온도 35°C인 경우 50 ~ 90%일 때 1.42 ~ 1.11 kV 정도의 크기로 감소하였다.

그림 8은 그림 3과 같은 조건에서 10%의 오존액 속에 열전도성 실리콘 고무 시편을 온도에 대한 습도의 대전전압을 측정한 결과이다. 습도에 대한 온도의 대전전압을 측정한 결과이다. 온도 10°C인 경우 50%일 때 2.26 kV 정도, 60%일 때 2.24 kV 정도, 70%일 때 2.21 kV 정도, 80%일 때 2.15 kV 정도, 90%일 때 2.09 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 20°C인 경우 50%일 때 1.63 kV 정도, 60%일 때 1.59 kV 정도로 서서히 감소하다가 70%일 때 1.55 kV 정도, 80%일 때 1.47 kV 정도, 90%일 때 1.38 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 서서히 감소하였다. 온도 35°C인 경우 50%일 때 0.95 kV 정도, 60%일 때 0.91 kV 정도, 70%일 때 0.89 kV 정도, 80%일 때 0.81 kV 정도, 90%일 때 0.79 kV 정도로 습도가 증가할수록 대전전압은 일정한 기울기로 서서히 감소하였다. 또한 온도 10°C인 경우 50 ~ 90%일 때 2.26 ~ 2.09 kV 정도의 크기이나 온도 20°C인 경우 50 ~ 90%일 때 1.63 ~ 1.38 kV 정도, 온도 35°C인 경우 50 ~ 90%일 때 0.95 ~ 0.79 kV 정도의 크기로 감소하였다.

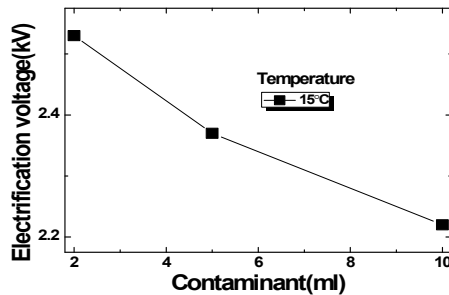


Fig. 9. Electrostatic voltage vs humidity of in contaminant 2%, 5%, 10% on 15°C.

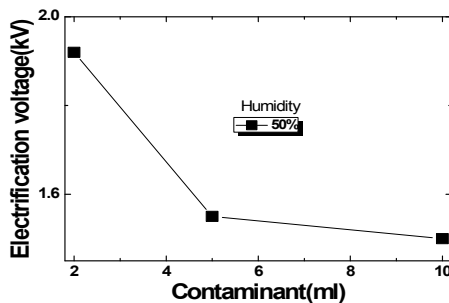


Fig. 10. Electrostatic voltage vs temperature in contaminant 2%, 5%, 10% on 50%.

그림 6~8에서 실리콘 고무 시료에 10 kV의 전압을 인가하여 전하의 분포가 정상상태에 도달한 후 전원을 차단했다. 이때의 시료의 전위를 10 kV라 하면 60초 후에는 누설전류에 의한 전하의 감소분만큼 시료 전위가 강하하며 그때의 전위 V 는 시료의 누설저항 R_c 와

정전용량 C F에 의해 $V = V_0 e^{-\frac{t}{CR_c}}$ 식으로 구해진다.

그림 9는 온도가 15°C로 일정할 때 오손액이 2%, 5%, 10%로 증가할수록 정전기 대전전압은 2.53 kV에서 2.25 kV로 감소했다.

그림 10은 온도가 50%로 일정할 때 오손액이 2%, 5%, 10%로 증가할수록 정전기 대전전압은 1.92 kV에서 1.5 kV로 감소했다. 그림 9와 그림 10으로부터 오손액이 증가할수록 대전전압이 감소함을 확인했다.

4. 결 론

이 연구에서는 오손액이 2 ml, 5 ml, 10 ml에서 6시간 침적시킨 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.103 \text{ cm}$ 의 실리콘

고무 시편을 온도 10°C ~ 35°C, 습도 50% ~ 90%의 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 정전기 대전전압을 측정하고 그 결과를 얻었다.

1) 오손액 농도가 일정할 경우 정전기 대전전압은 온도가 35°C로 증가할수록 감소했으며, 습도가 90%로 증가할수록 감소함을 확인했다.

2) 오손액 농도가 2 ml인 경우 정전기 대전전압의 크기는 습도가 50%일 때 온도가 35°C로 증가할수록 감소함을 확인했다.

3) 온도 15°C, 습도가 50%일 때 정전기의 대전전압은 오손액 농도가 10 ml로 증가할수록 정전기의 대전전압은 감소했음을 확인했다.

4) 이 연구에서는 오손액(contaminant)이 2 ml, 5 ml, 10 ml에서 6시간 침적시킨 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.103 \text{ cm}$ 의 실리콘 고무 시편을 온도 10°C ~ 35°C, 습도 50% ~ 90%의 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 정전기 대전전압(electrification voltage)을 측정하고 그 결과를 얻었다.

5) 오손액 농도가 일정할 경우 정전기 대전전압은 온도가 35°C로 증가할수록 감소했으며, 습도가 90%로 증가할수록 감소함을 확인했다.

6) 오손액 농도가 2 ml인 경우 정전기 대전전압의 크기는 습도가 50%일 때 온도가 35°C로 증가할수록 감소함을 확인했다.

7) 온도 15°C, 습도가 50%일 때 정전기의 대전전압은 오손액 농도가 10 ml로 증가할수록 정전기의 대전전압은 감소했음을 확인했다.

REFERENCES

- [1] T. J. Maloney, *J. of Electrostatics*, **31**, 313 (1993).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886\(93\)90015-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886(93)90015-Y)]
- [2] R. G. Renninger, *J. of Electrostatics*, **28**, 253 (1992).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886\(92\)90076-6](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886(92)90076-6)]
- [3] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 120 (2015).
- [4] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 34 (2015).
- [5] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 841 (2014).
- [6] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 730 (2014).
- [7] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 576 (2014).
- [8] S. I. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 522 (2014).