

## Al 비율에 실리콘 고무의 정전기 대전 특성

이성일<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국교통대학교 안전공학과

### Electrostatic Electrification Properties of Silicone Rubber due to Al Ratios

Sung-Il Lee<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received July 18, 2014; Revised July 23, 2014; Accepted July 24, 2014)

**Abstract:** In this study, using the silicone rubber sample of 4 cm × 4 cm × 0.1 cm for low voltage cable, the electrostatic electrification properties of three samples that the conductive Al of 0%, 25%, and 50% is attached to the surface of sample was measured. The following conclusion was obtained through this experiment. 1) In case of the sample which has the Al area of 50%, the higher the humidity to 90% in the temperature of 10°C, the electrostatic electrification voltage was reduced about 0.25 kV to 0.02 kV, and it confirmed that the electrostatic electrification voltage was in constant about 0.02 kV in the temperature over 20°C. 2) Increasing the Al area of samples of 0%, 25%, and 50% in temperature of 10°C, it confirmed that the electrostatic electrification voltage was reduced by about 2.67 kV, 2.02 k, 0.21 kV. 3) This study shows that the conductor, followed by temperature and humidity affects the electrostatic electrification voltage.

**Keywords:** Electrostatic, Electrification properties, Silicone rubber, Low voltage cable, FT-IR

#### 1. 서 론

최근, 산업현장에서 온도 및 습도 등의 생산 작업 환경을 실현하는데 역점을 두고 있다. 특히, 정전기 발생의 근원이 되고 있는 습도 환경은 생산 공장에서는 생산성, 품질 향상 및 안전 대책에 있어서 중요 요인으로 작용을 하므로 공장 전체 또는 기계 주변에 가습 설비를 설치하고 있다. 정전기에 의한 생산 장애와 시스템 파괴 등의 재해가 고분자 절연 물질에

의해 발생하는 경우가 급격히 늘고 있다 [1-3].

절연재료로서 우수한 전기 특성 때문에 폴리에틸렌 계통 및 여러 가지 유기 고분자가 사용되고 있는데 이와 같은 절연재료들은 각기 성능이 다르고 수명, 가격, 무게 등의 차이가 있으므로 전선의 사용 목적에 따라 적합한 재료들을 선택해야 한다. 산업의 발달과 더불어 긴 수명의 고도화된 성능의 기계에 대응하는 전선 및 케이블 등의 개발이 되어야만 누전으로 인한 화재로 막대한 인명과 재산의 손실을 방지할 수 있다. 초고층 빌딩, 대량 수송수단, 각종 발전시설, 우주 산업 시설에 완벽한 부도체인 절연전선을 개발하여 피해를 줄이도록 해야 한다. 이에 전기 절연성, 유전특성, 내아크성, 내코로나성, 내약품성, 열안정성 등이 매우 우수한 무기결합인 규소와 산소와의 결합

a. Corresponding author: [silee@ut.ac.kr](mailto:silee@ut.ac.kr)

(Si-O)이 반복된 실리콘 고무를 시료로 선정하여 실리콘 절연체와 도전성 물체사이에서 얼마만큼의 정전기 대전량이 발생하여 재해에 영향을 미치는지 조사하는 것이 대단히 중요하다 [4-6]. 전선을 실리콘 고무로 절연하면 과전류가 흘렀을 때 발생하는 열에 잘 견디며, 열전도성이 유기재료보다 좋아 발생된 열을 쉽게 외기에 발산해 버리므로 전선 및 사용 부품에 영향을 주지 않는다 [7-9].

이 연구에서는 가로 4 cm, 세로 4 cm, 두께 1 mm 인 저압 케이블용 실리콘 고무시편에 0%, 25%, 50%의 도전성 재료인 Al을 부착하여 세 종류의 시편을 제작하였다. 온도 10~38℃, 습도 40~90% 환경 범위에서 이때 도전성 재료가 실리콘 고무 절연재료의 정전기 대전 특성에 어떤 영향을 미치는지 Al의 비율이 다른 세 종류 시료에 10 kV의 전압을 인가하여 정전기 대전 전위를 측정하였으며, 습도와 온도의 환경하에서 특히 Al 접촉 면적 비율에도 영향을 받는다는 것과 물성을 측정을 위해서 푸리에 변환 적외선 분광계 (Germany, Bruker optics vertex 79 model)로 분석 및 검토를 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료

이 실험에서 사용한 저압 케이블용 실리콘 고무 시편은 표 1과 같으며 원재료를 준비하고 설비를 가동하며 base를 투입한 후 100℃에서 30분 동안 mixing 하였으며, 실리카와 첨가제인 오일과 카본을 투입 후 120℃에서 10분 동안 혼합시켜 4 cm × 4 cm × 0.1 cm로 성형하였다. 성형한 실리콘 고무에 도전체인 Al을 0% (100% 절연체), Al 25% (75% 절연체), Al 50% (50% 절연체)로 부착하여 그림 1과 같이 시편을 3종류로 제작하였으며, 시편의 조성비는 표 1과 같다.

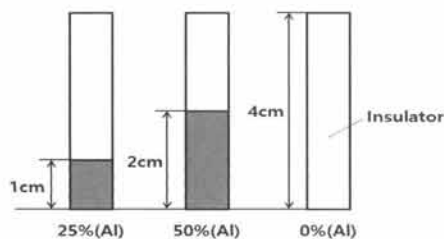


Fig. 1. Shape of specimen.

Table 1. Mixing ratio of silicone rubber samples.

Materials	Ratios(phr)
Dimethyl, methylvinyl siloxane, dimethylvinyl-terminated	60
Dimethyl siloxane, hydroxy-terminated	5
Silicon dioxide	30
Di(2,4-dichlorobenzoyl)peroxide	2
Carbon Black	3

### 2.2 측정회로 및 방법

정전기를 발생시켜 주는 직류 코로나 방전식의 chopper형이며, D.C(±), 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 사용하였다.

측정회로를 그림 2에 나타내었으며, 항온·항습계로 온도 10~38℃까지 5℃씩 상승시키면서, 습도는 40~90%까지 5%씩 상승시켜가면서 60초 동안 정전기 대전 및 완화 전위 값을 측정했다.

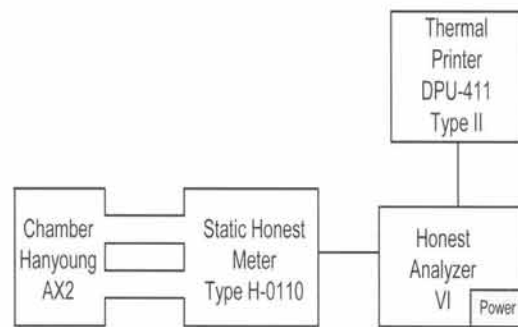


Fig. 2. Measuring device.

그림 3에 시료를 코로나 방전에 의해 임의로 대전시키는 구동기, 코로나를 발생시키기 위한 고압직류 전원, 소자를 위에 놓고 회전시키는 턴테이블 및 모터, 시료의 전위를 픽업하는 수신기와 증폭기, 또 완화되는 전하로부터 반감기를 측정하는 analyzer가 부착, 이를 조작하는 조작부 등으로 구성되어 있는 Static Honestmeter의 구조를 나타내었으며 턴테이블

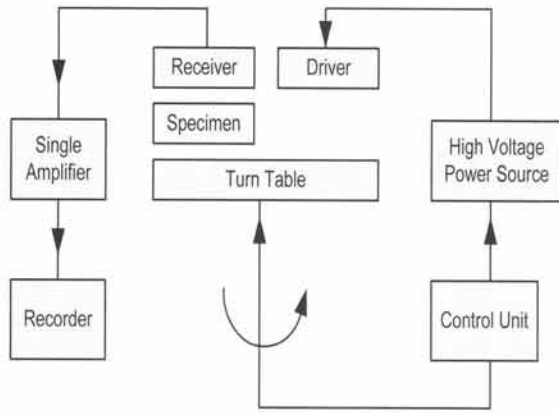


Fig. 3. A schematic diagram showing the structure of static honestmeter.

(turn table)을 1,550 rpm의 속도로 회전시키면서 시료에 10 kV의 전압을 20 mm 떨어진 시료에 인가하여 대전되는 대전전압이 3 kV인데 3종류의 실리콘 고무 시편을 장착한 후 온도를 10~40°C, 습도 40~90%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

#### 3.1 푸리에 변환 적외선 분광

실리콘 고분자는 다른 유기고분자와 같이 공유결합을 하고 있어, 관능기는 스펙트럼 중 적외선 영역에서 흡수를 일으킨다. 실리콘 고분자는 파수 1,000~1,200[cm<sup>-1</sup>]영역에서 실록산기의 stretching vibrations에 의한 강한 흡수, 파수 2,900[cm<sup>-1</sup>]에서 C-H<sub>3</sub>의 신장에 의한 흡수를, 파수 1,250~1,270[cm<sup>-1</sup>]에서 날카로운 밴드는 대칭성 C-H<sub>3</sub>의 결합에 의한 흡수, 파수 874~740[cm<sup>-1</sup>]에서 C-H<sub>3</sub>의 흔들림 (rocking)에 의한 IR 흡수가 나타난다고 보고되어 있다 [10].

그림 4는 푸리에 변환 적외선 분광계 (Germany, Bruker optics vertex 79 model)로 파수 2,900~3,000[cm<sup>-1</sup>] 영역에서 뾰족하게 나타난 피크는 메틸기에서 탄소와 수소에 의해 나타난 피크이며, 1,400[cm<sup>-1</sup>] 부근에서 나타난 피크는 실리콘과 메틸기에 의한 비대칭

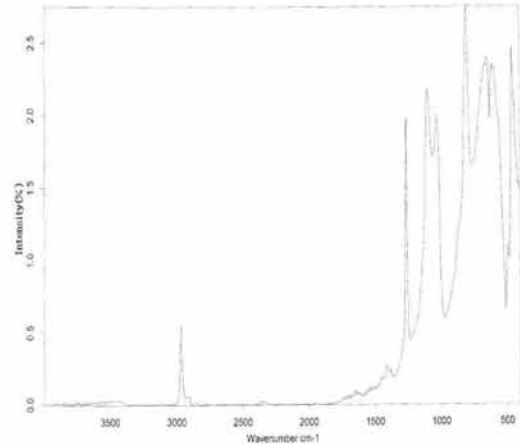


Fig. 4. FT-IR spectra of specimens.

변형 피크이며, 1,300[cm<sup>-1</sup>] 부근에서 나타난 피크는 실리콘과 메틸기에 의한 대칭 변형 피크이며, 파수 1,100~1,200[cm<sup>-1</sup>] 부근 영역에서 나타난 피크 (Si-O-Si)는 실리콘과 산소에 의한 진동피크이며, 파수 850 [cm<sup>-1</sup>]에서 나타난 피크는 실리콘과 탄소에 의한 피크라고 생각된다 [10].

#### 3.2 습도의 영향

그림 5~7은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 0% (100% 절연체), Al 25% (75% 절연체), Al 50% (50% 절연체)로 부착한 3종류의 시편을 각각의 온도 10°C~38°C, 습도를 40%~90%의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정한 결과이다.

그림 5는 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 0% (100% 절연체)인 시편을 온도 10°C~38°C, 습도를 40%~90%의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정한 결과이다. 온도 10°C인 경우 습도가 40%에서 2.67 kV 정도이나 50%일 때 2.38 kV 정도로 감소한 후 60% 이후부터 완만하게 감소하다가 습도가 90% 정도가 되었을 때 대전전압은 2.15 kV 정도가 되었다. 습도가 40%일 때 대전전압은 2.6~2.67 kV 정도로 대전전압의 폭이 좁게 습도가 50%일 때 2.24~2.34 kV 정도로 감소한 후 60% 이후부터 완만하게 감소하다가 습도가 90% 정도가 되었을 때 대전전압의 폭

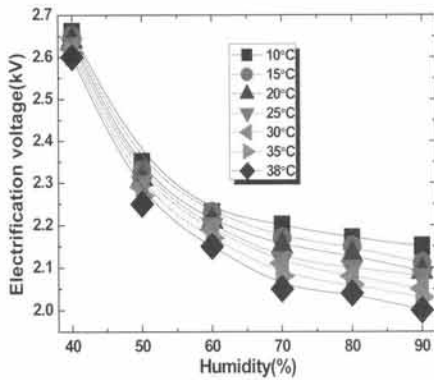


Fig. 5. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at Al ratios 0%.

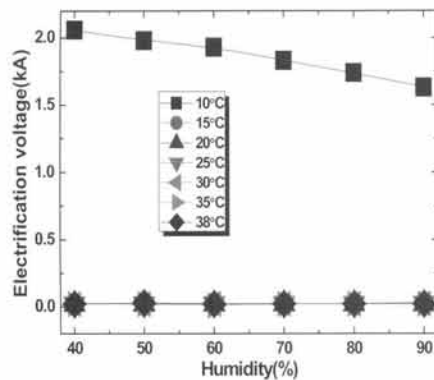


Fig. 6. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at Al ratios 25%.

이 2~2.15 kV의 넓은 범위 정도로 감소되었다. 이는 실리콘 고무 시편에 O-H 분자가 침투함으로써 전기 저항의 값이 떨어졌기 때문이라 생각된다.

그림 6은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 50% (25% 절연체) 부착한 시편을 온도 10°C~38°C, 습도를 40%~90%의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정된 결과이다. 온도 10°C인 경우 습도가 40%에서 대전전압이 2.1 kV 정도이나 90%일 때 대전전압이 1.75 kV 정도까지 완만하게 감소하였다. 온도 15°C~38°C의 각각의 온도에서, 습도가 40%~90%일 때 일정하게, 대략 0.2 kV 정도의 낮은 대전전압이 측정되었는데 이는 실리콘 고무 시편에 O-H 분자가 침투함으로써

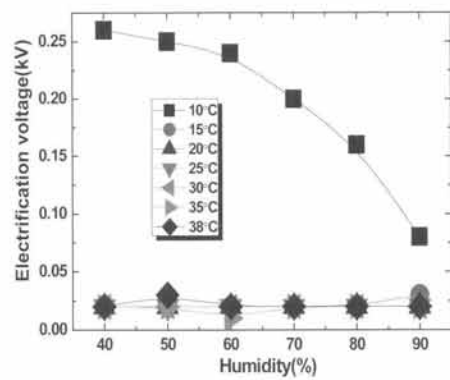


Fig. 7. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at Al ratios 50%.

전기저항의 값이 더 떨어졌기 때문이라 생각된다. 대전전압의 차는 40%일 때 약 2 kV, 90%일 때 1.5 kV가 나타났으므로 습도보다도 도전체인 Al이 정전기에 큰 영향을 미침을 확인했다.

그림 7은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 50% (50% 절연체) 부착한 시편을 온도 10°C~38°C, 습도를 40%~90%의 환경 범위에서 10kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정된 결과이다. 온도 10°C인 경우 습도가 40%에서 대전전압이 0.28 kV 정도이나 50%일 때 0.25 kV 정도로 감소한 후 60%일 때부터 포물선을 그리면서 감소하기 시작하여 90%일 때 대전전압이 0.076 kV 정도까지 완만하게 감소하였다. 온도 15°C~38°C의 각각의 온도에서, 습도가 40%~90%일 때 대략 0.2 kV 정도의 낮은 일정한 대전전압이 측정되었는데 이는 실리콘 고무 시편에 O-H 분자가 침투함으로써 전기 저항의 값이 더 떨어졌기 때문이라 생각된다. 또한, 대전전압의 차는 40%일 때 약 0.02 kV 정도, 90%일 때 0.05 kV가 나타났으므로 결국 도전체인 Al 이 습도보다 정전기에 큰 영향을 미침을 확인했다.

그림 5~7에서 정전기 대전전압이 Al 면적 비율이 넓을수록 습도가 높을수록 각각의 온도는 낮은 값을 나타내었는데 이는 분 당 1,550 회전을 행함으로 발생된 정전기 대전 전하량이 도체에 의해 접지상태가 되어 버리기 때문이라 생각된다. Al 면적 비율이 0%일 때 대전전압의 크기는 약 2.65 kV 정도, 25%일 때 대전전압의 크기는 약 2.0 kV 정도, 50%일 때 대전전압의 크기는 약 0.02 kV 정도로 급격히 감소하였

는데 이것으로부터 도전체의 영향이 습도의 영향보다 훨씬 크다는 것을 확인했다.

### 3.3 온도의 영향

그림 8~10은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 0% (100% 절연체), Al 25% (75% 절연체), Al 50% (50% 절연체)로 부착한 3종류의 시편을 각각의 습도 40%~90%, 온도 10℃~38℃의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정된 결과이다.

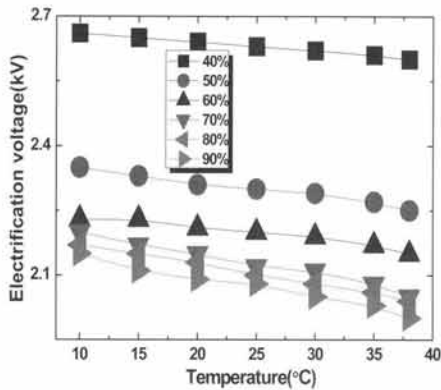


Fig. 8. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at Al ratios 0%.

그림 8은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 0% (100% 절연체)인 시편을 각각의 습도 40%~90%, 온도 10℃~38℃의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정된 결과이다. 습도가 40%일 때 온도가 10℃ 가해졌을 때 대전전압은 2.67 kV 정도이나 90%일 때 2.6 kV 정도로 미소하게 감소하였다. 각각의 습도가 50~90%인 경우 온도가 10℃에서의 대전전압은 약 2.2~2.25 kV 정도이나 90%일 때는 약 2.0~2.25 kV 정도의 범위로 같은 형태로 완만하게 감소함을 확인했다. 이는 온도에 의한 영향이 습도보다 덜 영향을 받는다고 생각된다.

그림 9는 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 25% (75% 절연체)인 시편을 각각의 습도 40%~90%, 온도 10℃~38℃의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전형으로

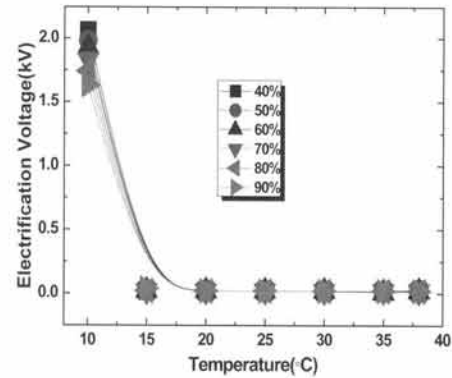


Fig. 9. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at Al ratios 25%.

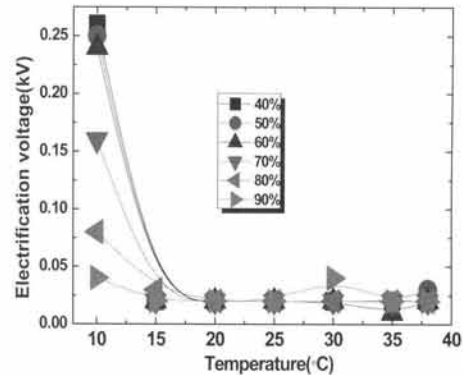


Fig. 10. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at Al ratios 50%.

인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정된 결과이다. 습도가 40%, 온도가 10℃일 때의 대전전압은 2.1 kV 정도이나 온도가 15℃까지 급격히 떨어진 후 온도가 20℃부터 38℃까지 0.02 kV 정도로 일정한 값으로 대전하였다. 각각의 습도가 50~90%인 경우 온도가 10℃에서의 대전전압은 약 1.6~2.1 kV 정도의 크기이나 온도가 15℃까지 급격히 떨어진 후, 온도가 20℃부터 38℃까지 0.02 kV 정도로 일정한 값으로 대전하였다. 이에 각각의 습도에서 10℃의 저온 영역에서는 대전전압이 온도의 영향을 받으나 20℃부터 38℃까지는 변화가 없이 일정하므로 습도보다 온도 영향을 덜 받는다고 판단된다.

그림 10은 4 cm × 4 cm × 0.1 cm인 실리콘 고무 시편의 표면에 도전체인 Al을 50% (50% 절연체)인 시편을 각각의 습도 40%~90%, 온도 10℃~38℃의 환경 범위에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전

형으로 인가하여 1/2로 반감되는데 걸리는 대전전압을 측정할 결과이다. 습도가 40%, 온도가 10℃일 때의 대전전압은 0.26 kV 정도이나 온도가 15℃까지 급격히 떨어진 후 온도가 20℃부터 38℃까지 0.02 kV 정도로 미약한 변화의 일정한 값으로 대전하였다. 각각의 습도가 50~90%인 경우 온도가 10℃에서의 대전전압은 약 0.06~0.25 kV 정도의 크기이나 온도가 15℃까지 같은 경향으로 급격히 떨어진 후, 온도가 20℃부터 38℃까지 0.02 kV 정도로 일정한 값으로 대전하였다. 이에 각각의 습도에서 10℃의 저온 영역에서는 대전전압이 온도의 영향을 받으나 20℃부터 38℃까지는 변화가 없이 일정하므로 습도보다 온도 영향을 덜 받는다고 판단된다.

그림 8~10에서 시료에 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  $V[V]$ 는 시료의 누설저항  $R_c[\Omega]$ 과 정전용량  $C[F]$ 에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{CR_c}}$$

시료의 전하가 누설되어 감소하고 그 전위  $V$ 가 초기의 전위  $V_0$ 의 1/2 전압치로 될 때의 시간  $\tau$ 를 반감기라 부른다. 여기서 반감기  $\tau$ 는 누설저항  $R_c[\Omega]$ 과 비례 관계에 있으므로 반감기  $\tau$ 를 측정하면 대전체의 전하 이동에 대한 난이도의 추정이 가능하다. 이때 분석기에 기록되는  $V_0$ 의 크기는 시료의 누설전하와 코로나 방전에 의해서 공급된 전하가 평형을 이루는 것으로 결정된다. 일반적으로 대전물체의 절연 성능이 높을수록  $V_0$ 가 높고,  $\tau$ 가 커진다. 그러므로 Al 면적 비율을 증가시켰을 경우 대전전압이 1/2로 반감했을 때 접촉 면적이 커짐에 따라 대전전압이 감소함을 확인하고자 대전전압을 측정하였다. 정전기 대전전압이 Al 면적 비율이 높을수록 온도 10℃일 때 습도가 높을수록 각각의 대전전압은 낮은 값을 나타내었는데 이는 분 당 1,550 회전을 행함으로 발생된 정전기 대전 전하량이 도체에 의해 접지상태가 되어 버리기 때문이라 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 충전제인 실리카를 50 phr을 배합한 저압용 케이블용 실리콘 고무를 접촉면적  $45 \times 0.02 \times 45 \sim 55$  mm인 시료를 제작하여 온도 25~40℃, 습도 40~80%의 환경에서 10 kV의 전압을 인가하여 정전기 대전전압을 측정하였다. 면적이 정전기 대전 특성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 습도가 증가함에 따라 정전기 대전 특성이 반비례하여 감소함을 확인했다.
- 2) 온도가 높아질수록 대전전압이 상승함을 확인했다.
- 3) 동일한 조건에서 면적이 넓을수록 대전전압이 상승함을 확인했다.
- 4) 재료 자체의 특성이 습도보다 더 완화 시간에 영향을 미침을 확인했다.

#### REFERENCES

- [1] T. J. Maloney, *J of Electrostatics*, 31, 313 (1993).
- [2] W. D. Greason, *IEEE Trans.*, 33, 286 (1997).
- [3] H. G. Cho and Y. K. Park, *J. KIEEME*, 10, 770 (1997).
- [4] C. S. Huh, K. S. Jang, and H. G. Cho, *J. KIEEME*, 9, 344 (1996).
- [5] K. S. Cole and R. H. Cole, *J. Chem. Phys.*, 9, 341 (1941).
- [6] Y. S. Yoo, J. H. Kim, K. S. Seo, H. G. Cho, and Y. K. Park, *J. KIEEME*, 12, 1052 (1999).
- [7] R. J. Morgan, L. T. Mones, and W. J. Steele, *Polymer*, 23, 295 (1982).
- [8] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. kido, M. Kozako, and T. Tanaka, *Proc. of International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 5-9 (Kitakyushu, Japan, 2005) p. 239.
- [9] H. C. Karner, *Evaluation of Polymeric Insulating Materials for HV Outdoor Application*, 6th ISH, 30.02, 1 (1989).
- [10] ASTM D 2132-91, *Standard Test Method for Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulation Materials* (1991).