Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 28, No. 2, pp. 120-125 February 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.120
ISSN 1226-7945 (Print), 2288-3258 (Online)

보강제 변화에 따른 실리콘 고무의 정전기 열화 특성에 관한 연구

이성일[1,a]

[1] 한국교통대학교 안전공학과

A Study on Electrostatic Degradation Properties of Silicone Rubber due to Reinforcing Agent

Sung Ill Lee[1,a]

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

(Received January 12, 2015; Accepted January 19, 2015)

Abstract: In this study, we have come to the following conclusions regarding to the electrification properties (electrostatic electrification voltage and electrification relaxation time) of electrostatics in the three type of specimen (size: 4 cm × 4 cm × 0.103 cm) of silicone rubber which is mixed with the ATH (Aluminium Trihydrate($Al(OH_3)$)) of 30 phr, 60 phr, 120 phr as reinforcing filler. The electrification properties of electrostatics were measured for the different mixing ratio of ATH with the applied voltage of DC 10 kV at the temperature range of 10℃～30℃ and humidity range of 60%～80%. When the temperature remained constant, the electrical resistance decreased as the humidity increasing in the range of 60%, 70%, 80%. In contrast, when the humidity remained constant, the electrical resistance increased as the temperature increasing in the range of 10℃, 20℃, 30℃. Regarding these results, may be it is because the absorption of O-H molecule appeared in the silicone specimen. It was confirmed that when the temperature remained constant, the electrification relaxation time decreased as the humidity increased. In contrast, when the humidity remained constant, the electrification relaxation time increased as the temperature increased.

Keyword: Electrostatic electrification voltage, Electrification relaxation time

1. 서 론

1940년대에 전기제품의 세라믹 절연체의 대체용으로 시작된 실리콘은 플라스틱에 비하여 내열성, 내한성, 전기절연성 등이 우수하였다. 2차 세계대전 때에 군용기와 배 등의 특수 목적용으로 금속규소와 염화메틸을 직접 반응시켜 메틸염화실란을 얻은 이후 규소화학 공업이 고도의 성장을 해오고 있다. 실리콘은 건설, 운송기계, 전기전자, 섬유, 페인트, 화학, 의료, 식품, 화장품으로 사용되고 있으며, 저분자 규소 화합물은 발수제, 소포제, 의약품, 이형제, 화장품, 계면활성제, 식품처리제, 표면 처리제 등으로, 고분자 규소화합물은 고무, 수지, 오일 등으로 사용된다. 실리콘 고무는 규소와 산소와 규소의 무기 결합으로 되어 있기 때문에 유기계 고무보다 내열성, 내한성, 내후성, 내아크성, 내코로나성, 내방사선성, 내산화성, 내자외선성, 내절연파괴성 및 화학적 안정성 등이 우수하나 기계적 강도가 약

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

Copyright ©2015 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하다. 최근 생산현장 등에서 정전기에 의해 생산 장애와 시스템 파괴가 일어나 생산성, 품질 향상 및 안전 대책에 있어서 큰 작용을 하므로 현장 또는 기계 주변에 가습 설비를 설치하고 있다 [1-3]. 또한 고분자 절연물질 등에 정전기가 원인이 되어 재해가 발생하는 경우가 급격히 늘고 있다 [4-6].

초고층 빌딩, 대량 수송수단, 각종 발전시설, 우주산업 시설에 전선이나 케이블 및 애자와 같은 전기절연설비에 정전기가 원인이 되어 화재 및 폭발 막대한 인명과 재산상의 손실을 가져올 수 있다. 이에 실리콘 고무 절연체 시트 표면에 얼마만큼의 정전기 대전전압이 발생하는지 조사하는 것이 대단히 중요하다 [7]. 전선을 실리콘 고무로 절연하면 과전류가 흘렀을 때 발생하는 열에 잘 견디며, 열전도성이 유기재료보다 좋아 발생된 열을 쉽게 외기에 발산하므로 전선 및 사용 부품에 영향을 주지 않는다.

이 연구에서는 보강성 충전제인 SiO_2 양을 30%, 60%, 120%로 증가 배합시켜 세 종류의 실리콘 고무 시트를 만들어 가로 4 cm, 세로 4 cm, 두께 0.103 mm인 시편을 제작하였다. 온도 10~30℃, 습도 60~80% 환경 범위에서 실리콘 고무 절연재료 시트 시편이 정전기 대전 전압이 발생하는지 보강성 충전제의 비율이 다른 세 종류의 시편에 10 kV의 전압을 인가하여 정전기 대전 전위를 측정하여 습도와 온도의 영향을 하였으며, 습도와 온도의 환경 하에서 정전기 대전전압이 36.8%로 감소할 때까지의 시간을 측정하여 보강성 충전제의 영향을 분석 및 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

이 실험에서 사용한 케이블용 실리콘 고무 시트 시편은 보강제인 ATH (aluminum trihydrate)의 양을 30~120 phr로 증가 배합하였으며 그 비율은 표 1과 같다. Base를 투입한 후 100℃에서 30분 동안 mixing 하였으며, 실리카와 첨가제인 오일과 카본을 투입 후 120℃에서 10분 동안 혼합시켜 제작한 실리콘 컴파운드를 핫-프레스로 150 kG/cm^{2}의 압력으로 120℃에서 10분 동안 압축 성형하여 두께 1.03 mm로 제작하였다. 4 cm × 4 cm × 0.103 cm인 3종류의 시편을 제작하였다.

Table 1. Mixing ratio of silicone rubber samples(phr).

Compound \ Specimen No.	1	2	3
Silicone Base	100	100	100
Aluminum trihydrate	30	60	120
Press oil	2	2	2

1. phr : Parts per hundred resin

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 Seriai Dot 방식) 및 항온.항습계를 사용하였다. 측정회로를 그림 2에 나타내었으며, 항온.항습계로 온도 10~30℃까지 5℃씩 상승시키면서, 습도는 60~80%까지 5%씩 상승시켜가면서 60초 동안 정전기 대전 및 완화시간 값을 측정했다.

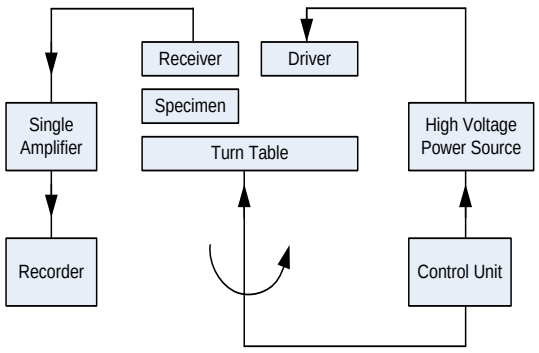

Fig. 1. Measuring device.

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

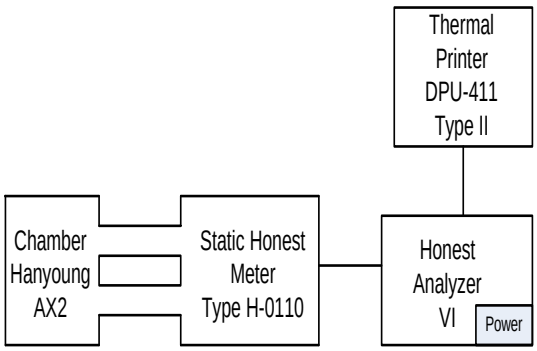

Fig. 2. A schematic diagram showing the structure of static honestmeter.

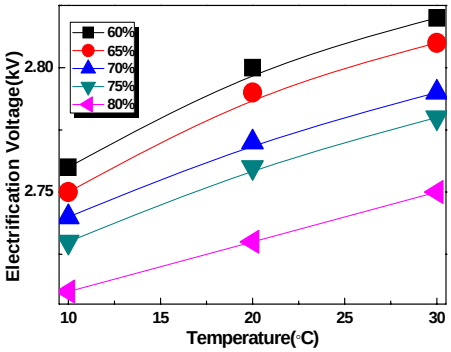

Fig. 3. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at ATH 30 phr.

구조를 나타내었으며 턴테이블(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 10~30℃, 습도 60~80%의 환경에서 10 kV의 직류 고전압을 코로나 방전 형으로 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 온도 10℃~30℃, 습도 60%~80%의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr, 60 phr, 120 phr 배합시킨 세 종류의 실리콘 고무 시편을

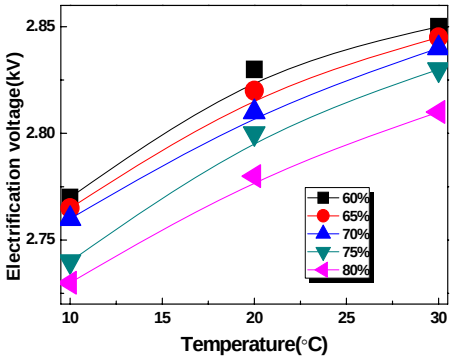

Fig. 4. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at ATH 60 phr.

4 cm × 4 cm × 0.103 cm로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다.

그림 3은 온도 10℃~30℃, 습도 60%~80%의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 cm로 제작하여 턴 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 습도 60%인 경우 10℃일 때 2.76 kV 정도, 20℃일 때 2.8 kV 정도, 30℃일 때 2.82 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 습도 70%인 경우 10℃일 때 2.74 kV 정도, 20℃일 때 2.77 kV 정도, 30℃일 때 2.9 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 습도 80%인 경우 10℃일 때 2.71 kV 정도, 20℃일 때 2.73 kV 정도, 30℃일 때 2.75 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 온도가 10℃인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.76~2.71 kV 정도, 20℃인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.8~2.73 kV 정도, 20℃인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.82~2.75 kV 정도로 대전전압은 증가하였다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 보강성 충전제인 ATH를 60 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 습도 60%인 경우 10℃일 때 2.77 kV 정도, 20℃일 때 2.83 kV 정도, 30℃일 때 2.85 kV 정도로 대전전압이 증가하였다.

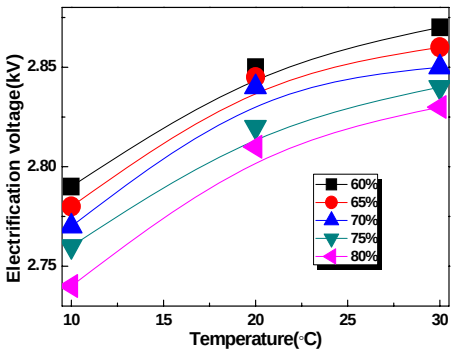

Fig. 5. Electrostatics electrification properties due to temperature of silicone rubber at ATH 120 phr.

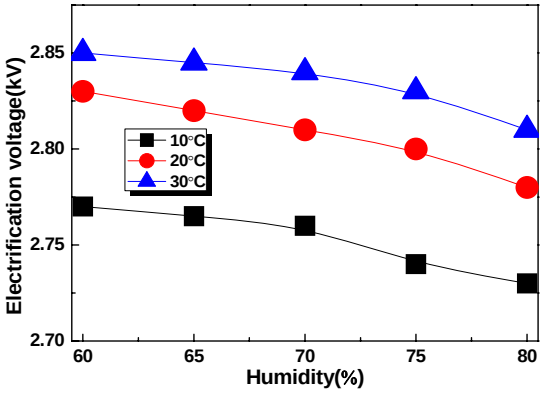

Fig. 7. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at ATH 60 phr.

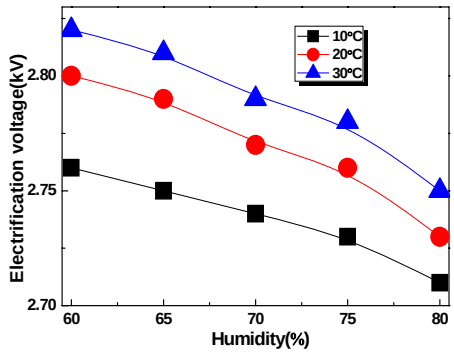

Fig. 6. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at ATH 30 phr.

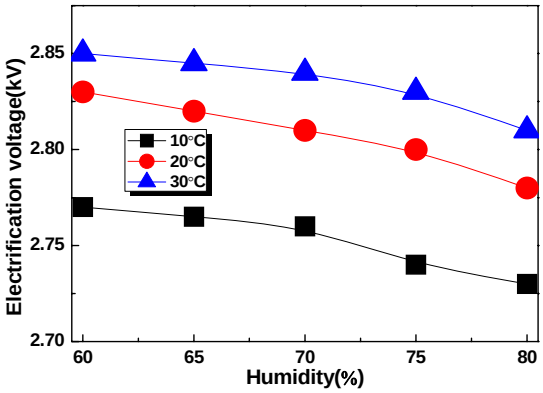

Fig. 8. Electrostatics electrification properties due to humidity of silicone rubber at ATH 120 phr.

습도 70%인 경우 10°C일 때 2.76 kV 정도, 20°C일 때 2.81 kV 정도, 30°C일 때 2.84 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 습도 80%인 경우 10°C일 때 2.73 kV 정도, 20°C일 때 2.78 kV 정도, 30°C일 때 2.81 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 온도가 10°C인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.77~2.73 kV 정도, 20°C인 경우 약 60~80%일 때 대전전압은 약 2.83~2.78 kV 정도, 30°C인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.85~2.81 kV 정도로 대전전압은 증가하였다. 이는 실리콘 고무 시편에 O-H분자가 침투함으로써 전기저항의 값이 떨어졌기 때문이라 생각된다.

그림 5는 그림 3과 같은 조건에서 보강성 충전제인 ATH를 120 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 습도 120%인 경우 10°C일 때 2.79 kV 정도, 20°C일 때 2.85 kV 정도, 30°C일 때 2.87 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 습도 70%인 경우 10°C일 때 2.77 kV 정도, 20°C일 때 2.84 kV 정도, 30°C일 때 2.85 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 습도 80%인 경우 10°C일 때 2.74 kV 정도, 20°C일 때 2.81 kV 정도, 30°C일 때 2.83 kV 정도로 대전전압이 증가하였다. 온도가 10°C인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.79~2.74 kV 정도, 20°C인 경우 약 60~80%일 때 대전전압은 약 2.85~2.81 kV 정도, 30°C인 경우 60~80%일 때 대전전압은 약 2.87~2.83 kV 정도로 대전전압은 감소하였다.

그림3~5의 결과로부터 온도가 일정할 경우 습도가 60%, 70%, 80%로 증가할수록 전기저항의 값은 감소했으며, 습도가 일정할 경우 온도가 10°C, 20°C, 30°C로 증가할수록 전기저항의 값은 증가함을 확인했는데 이는 실리콘 고무 시편에 O-H분자가 흡습했기 때문이라 생각된다.

그림6~8은 습도 60%~80%, 온도 10℃~30℃의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr, 60 phr, 120 phr 배합시킨 세 종류의 실리콘 고무 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 cm로 제작하여 텐 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다.

그림 6은 습도 60%~80%, 온도 10℃~30℃의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 cm로 제작하여 텐 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴테이블이 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 온도가 10℃인 경우 습도가 60%일 때 2.76 kV 정도, 70%일 때 2.74 V 정도, 80%일 때 2.71 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 20℃인 경우 습도가 60%일 때 2.8kV 정도, 70%일 때 2.77 V 정도, 80%일 때 2.73 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 30℃인 경우 습도가 60%일 때 2.82 kV 정도, 70%일 때 2.79 V 정도, 80%일 때 2.75 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도 10℃~30℃인 경우 60%일 때 대전전압은 약 2.76~2.82 V 정도, 70%일 때 대전전압은 약 2.74~2.79 V 정도, 80%일 때 대전전압은 약 2.71~2.75 kV 정도로 대전전압은 감소하였다.

그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 ATH 양을 60 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편을 대전전압이 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 온도가 10℃인 경우 습도가 60%일 때 2.77 kV 정도, 70%일 때 2.76 kV 정도, 80%일 때 2.73 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 20℃인 경우 습도가 60%일 때 2.83 kV 정도, 70%일 때 2.81 kV 정도, 80%일 때 2.78 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 30℃인 경우 습도가 60%일 때 2.85 kV 정도, 70%일 때 2.84 V 정도, 80%일 때 2.81 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도 10℃~30℃인 경우 60%일 때 대전전압은 약 2.77~2.85 kV 정도, 70%일 때 대전전압은 약 2.76~2.84 kV 정도, 80%일 때 대전전압은 약 2.73~2.81 kV 정도로 대전전압은 감소하였다.

그림 8은 그림 6과 같은 조건에서 ATH 양을 120 phr 배합시킨 실리콘 고무 시편의 대전전압이 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 온도가 10℃인 경우 습도가 60%일 때 2.79 kV 정도, 70%일 때 2.77 kV 정도, 80%일 때 2.74 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 20℃인 경우 습도가 60%일 때 2.85 kV 정도, 70%일 때 2.84 kV 정도, 80%일 때 2.81 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도가 30℃인 경우 습도가 60%일 때 2.87 kV 정도, 70%일 때 2.85 V 정도, 80%일 때 2.83 kV 정도로 대전전압이 감소하였다. 온도 10℃~30℃인 경우 60%일 때 대전전압은 약 2.79~2.87 kV 정도, 70%일 때 대전전압은 약 2.77~2.85 kV 정도, 80%일 때 대전전압은 약 2.87~2.83 kV 정도로 대전전압은 감소하였다.

그림 6~8에서 시료에 전압를 인가하여 전하의 분포가 정상상태에 도달한 후 전원을 차단했다. 이때의 시료의 전위를 10 kV라 하면 60초 후에는 누설전류에 의한 전하의 감소분만큼 시료 전위가 강하하며 그 때의 전위V[V]는 시료의 누설저항 R_c[Ω]과 정전용량 C[F]에 의해 다음 식으로 주어진다.

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

시료의 전하가 누설되어 감소하고 그 전위 V가 초기의 전위 V_0의 1/2 전압치로 될 때의 시간 τ를 반감기라 부른다. 여기서 반감기 τ는 누설저항 R_c[Ω]과 비례관계에 있으므로 반감기τ를 측정하면 대전체의 전하이동에 대한 난이도의 추정이 가능하다. 이때 분석기에 기록되는 V_0의 크기는 시료의 누설전하와 코로나 방전에 의해서 공급된 전하가 평형을 이루는 것으로 결정된다. 보강성 충전제인 ATH 양의 비율을 30 phr, 60 phr, 120 phr로 배합시킨 시료의 경우, 보강제 함유비율이 일정할 때 온도 10℃, 20℃, 30℃일 때 습도가 높을수록 각각의 대전전압은 낮은 값을 나타내었는데 이는 분 당 1,550 회전을 행함으로 발생된 정전기 대전전하량이 도체에 의해 0 상태가 되어 버리기 때문이라 생각된다.

Table 2. Electrification relaxation time due to humidity vs temperature of silicone rubber with ATH 30 phr.

Humi.(%) / Temp.(℃)	60	65	70	75	80
10	15.23	13.1	12.78	6.059	1.607
20	44.72	26.41	6.447	4.392	2.29
30	46.38	27.64	26.37	13.54	5.228

Table 3. Electrification relaxation time due to humidity vs temperature of silicone rubber with ATH 60 phr.

Humi.(%) / Temp.(℃)	60	65	70	75	80
10	14.37	11.04	0.627	0.626	3.561
20	73.23	68.43	58.43	45.09	33.87
30	40.89	37.59	35.84	20.43	16.42

Table 4. Electrification relaxation time due to humidity vs temperature of silicone rubber with ATH 30 phr.

Humi.(%) / Temp.(℃)	60	65	70	75	80
10	21.14	18.77	14.37	13.62	12.37
20	34.3	28.06	20.72	17.62	11.43
30	14.387	11.67	10.35	2.365	2.42

표2~4는 그림6~8은 습도 60%~80%, 온도 10℃~30℃의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr, 60 phr, 120 phr 배합시킨 세 종류의 실리콘 고무 시편을 4 cm × 4 cm × 0.103 cm로 제작하여 텐 테이블(turn table) 위에 놓고 위쪽에서 침 전극으로 시료에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 턴테이블이 분 당 1,550 회전하여 전위계 유도 프로브 아래쪽에 왔을 때의 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과인데 이때 발생한 대전전압이 1/2로 반감되는데 걸리는 시간(sec)을 측정한 결과이다.

표2~4와 같이 ATH를 30 phr, 60 phr, 120 phr 배합시킨 세 종류의 실리콘 고무 시편의 경우 온도가 일정할 경우 습도가 증가함에 따라서 대전전압이 1/2로 감소할 때까지 걸리는 시간 감소했으며, 습도가 일정할 경우 온도가 증가함에 따라서 대전전압이 1/2로 감소할 때까지 걸리는 시간은 일정하지 않음을 확인했다. 이는 보강제인 ATH 배합된 실리콘 고무 시료에 O-H분자가 흡습되어 매 순간 정전용량이 변화되었기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 온도 10℃~30℃, 습도 60%~80%의 상태에서 보강성 충전제인 ATH를 30 phr, 60 phr, 120 phr 배합시킨 세 종류의 실리콘 고무 시편에 10 kV의 직류 고전압을 인가하여 대전전압을 60초 지속되었을 때 측정한 결과이다. 온도가 일정할 경우 습도가 60%, 70%, 80%로 증가할수록 전기저항의 값은 감소했으며, 습도가 일정할 경우 온도가 10℃, 20℃, 30℃로 증가할수록 전기저항의 값은 증가함을 확인했는데 이는 실리콘 고무 시편에 O-H 분자가 흡습했기 때문이라 생각된다. 온도가 일정할 경우 습도가 증가할수록 정전기의 대전 완화시간은 감소하였으며, 습도가 일정할 경우 온도가 증가할수록 정전기의 대전 완화시간은 증가하였다.

REFERENCES

[1] S. Lee, *J. KIEEME*, **23**, 718 (2010).
[2] W. D Greason and S. Bulach, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **33**, 286 (1997).
[3] R. G. Renninger, *J. Electrostatics*, **28**, 253 (1992).
[4] D. L. Sin and T. L. Welsher, *J. Electrostatics*, **31**, 199 (1993).
[5] M. C. Jon and T. L. Welsher, *J. Electrostatics*, **32**, 43 (1994).
[6] K. Lee, J. Yoo, J. Hong, S. Lee, Y. Kim, and H. Jeong, *J. KIEEME*, **20**, 25 (2007).
[7] W. D Greason, *J. Electrostatics*, **28**, 199 (1992).