

AC 트래킹 휠 시험에서 하우스징 재료 및 형상의 표면 성능

김승현^{ID}, 노요한, 정종훈, 조한구^{ID}

(주)이플전기 기술연구소

Surface Performance of Housing Materials and Profiles in AC Tracking Wheel Tests

Seung-Hyun Kim, Yo-Han Noh, Jong-Hun Cheong, and Han-Goo Cho

Institute of Research and Development, EPLUS Electric Co., Ltd., Suwon 16208, Korea

(Received December 1, 2019; Revised December 15, 2019; Accepted December 25, 2019)

Abstract: An experimental study was conducted using the tracking wheel test (IEC 62217) method for evaluating the performance of insulator materials, in particular ethylene propylene diene monomer (EPDM) and silicone rubber. In addition, we studied the tracking characteristics resulting from applying the same method for the shape of the insulator housing, that is, the performance of regular and alternating sheds. The evaluation parameters were leakage current, surface characteristics, SEM, EDX, hydrophobicity, and temperature distribution; likewise, we applied the commercial frequency dry (and wet) flashover voltage test. We found that the regular shed had a greater leakage current than the alternating shed and that the recovery of the hydrophobicity in terms of rest time was greater than that of the EPDM in terms of leakage current. All of the regular-shed insulators of silicone rubber had tracking traces and choking on the sheath parting line, while the alternating shed showed only choking at the interface but no tracking traces. Therefore, it can be concluded that the commercial frequency wet flashover voltage of the silicone rubber with regular shed before and after the tracking wheel test is higher than that of the alternating shed.

Keywords: Polymer insulator, Tracking, Housing material, Regular shed, Alternating shed

1. 서론

폴리머 절연물의 적용은 계속적으로 증가함에 따라 여러 가지 표면 열화에 따른 연구가 이루어지고 있다 [1,2]. 이에 따라 폴리머 절연물의 각종 가속열화시험을 통해 성능을 평가하며, 시험으로는 IEC 61109 (1,000 hrs), IEC 61109 annex C (5,000 hrs), ENEL 5,000 hrs 시험, EPRI 하계 및 동계 사이클 시험, IEC 62217 등이 있다 [3,4]. 폴리머 절연물의 열화시험은 하우스징

재료 및 형상, end-fitting 조건 및 FRP 봉(rod)의 취성파괴 등에 대해 연구되고 있다. 하우스징 재료에 대해서는 실리콘, EPDM 및 액상 실리콘 고무(liquid silicone rubber, LSR)이 주로 사용되고 있으며, 하우스징 형상에 대해서는 갓의 간격, 형상(규칙갓, 교대갓), 돌출거리 및 기울기뿐만 아니라 최근에는 취성 파괴에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다 [5].

폴리머 애자의 주요 열화 진단으로는 누설전류, 온도 분포, 발수성, 전계강도 등이 있으며, 주로 누설전류에 따른 열화 현상을 분석하고 있다. 방전에 따른 누설전류의 변화나 누설전류 파형, 누설전류의 고조파 성분 변화 등을 검토하고 있다.

본 논문에서는 실리콘 고무, EPDM 등의 하우스징 재료 및 갓의 형상 등에 따른 폴리머 애자의 트래킹 성능을 평가하였다. 폴리머 애자의 트래킹 성능을 평가하

✉ Seung-Hyun Kim; seungk0528@naver.com
 Han-Goo Cho; hgcho414@naver.com

는 시험 방법인 트래킹 휠 시험(IEC 62217)을 통해 애자의 열화 특성을 검토하였으며, 누설전류, 표면 특성, SEM, EDX, 발수성(STRI 평가방법), 온도 분포, 상용 주파건조(주수) 섬락전압으로 평가하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 애자는 표 1과 같이 하우스징 재료, 갓의 형상이며, 하우스징의 재료로는 실리콘 고무, EPDM이며, 갓의 형상은 규칙갓, 교대갓으로 준비하였다.

그림 1과 같이 규칙갓은 갓 간격이 42 mm, 갓의 돌출거리는 34 mm, 갓의 전체 길이가 265 mm이며, 교대갓은 큰 갓의 돌출거리는 34 mm, 작은 갓의 돌출거리는 19 mm이다. 모든 시료의 건조섬락거리는 동일하며 교대갓의 누설거리는 규칙갓의 누설거리보다 60 mm 가 짧으며, 모든 시료의 건조섬락거리는 동일하다.

본 실험에서는 애자의 시험방법인 트래킹 휠 시험이며, 이의 구성은 그림 2와 같이 4개의 각 위치에서 정지된 상태로 40초간 머물게 한 위치에서 다음 위치로 이동하는 시간은 8초로 시료가 회전하여 처음 인가되는 위치까지 도달하는 데는 3분 12초가 걸리며 이를 1 사이클이라 한다. 인가전계는 35 V/mm, 염수농도는 1.4 g/l이며, 휴지시간은 4일 시험 후 1일(24시간)을

Table 1. Profile of insulator used in tracking wheel test.

Sample	Shed material	Shed type	Leakage distance
1	Silicone rubber	Regular	650 mm
2	Silicone rubber	Regular	650 mm
3	EPDM	Regular	650 mm
4	Silicone rubber	Alternative	590 mm

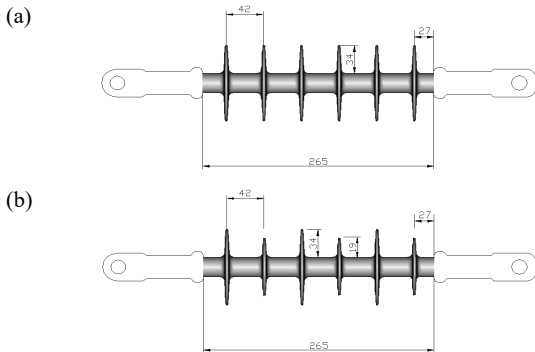


Fig. 1. Insulator dimension used in tracking wheel test. (a) Regular type and (b) alternative type.

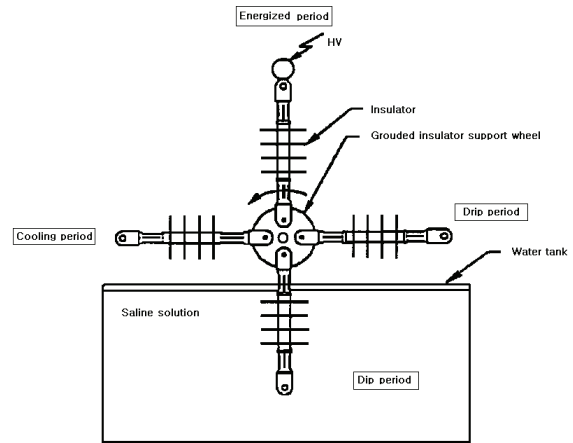


Fig. 2. Apparatus of tracking wheel test.

가지며, 시험시간은 30,000사이클이다.

트래킹 휠 시험장치 회전축에 센서를 장착하여 시료가 과전되었을 때의 누설전류를 측정하였다. 누설전류 검출은 회로상에 무유도 저항(100 Ω)을 직렬로 연결하여 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하여 전류로 산출하였다. 발수성은 STRI guide에 의해서, 적외선 촬영은 방전 시 시료의 온도 분포를 측정하였다. 시험 후 시료 상태를 SEM, EDX로 분석하였으며, 트래킹에 의한 열화 정도를 상용주파섬락전압시험을 통해 확인하였다. 본 실험에서 선택된 진단은 STRI guide, 섬락전압시험을 제외하고는 온라인 상태에서 측정(표면 특성, 누설전류, 온도 분포)하였다

3. 결과 및 고찰

시료의 누설전류는 피크치, 실효치, 평균치를 사이클마다 측정하였으며, 휴지시간 전후에 누설전류의 경향을 분석하기 위해 휴지시간(resting time) 전의 누설전류와 휴지시간 후의 누설전류를 측정하였다. 트래킹 휠 시험에서 애자의 누설전류는 과전 시 초기에 도전성 전류가 흐르다가 건조대(dry band) 아크가 도전성 전류보다는 적은 전류의 크기로 나타난다.

그림 3은 시료 1의 10,800사이클일 때 누설전류로 A, B, C 구간으로 분류할 수 있다. A 구간은 과전일 때 초기에 흐르는 도전성 전류 구간, B는 건조대 아크가 발생하기 시작하는 건조대 아크 구간, C는 지속적인 방전이 발생하는 구간이다. 시료에 전압이 인가되는 40초 동안 A 구간은 약 5초, B 구간도 약 4~5초, C

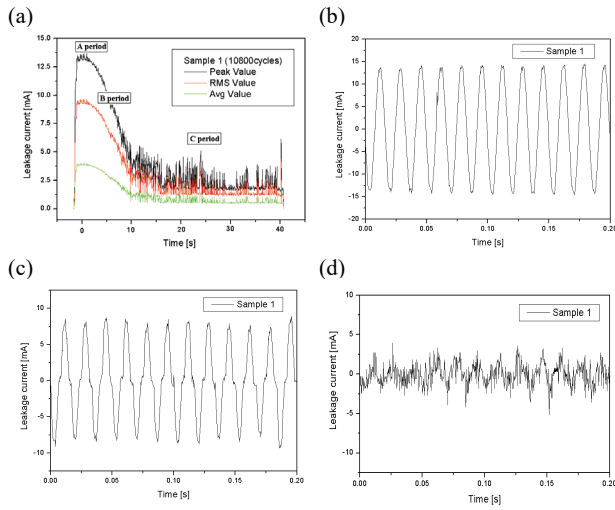


Fig. 3. Leakage current wave of each period (sample 1). (a) Leakage current, (b) A period, (c) B period, and (d) C period.

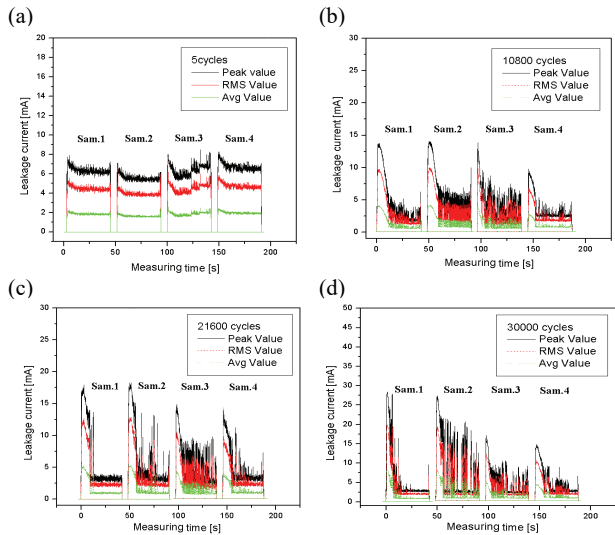


Fig. 4. Leakage current of each sample according to tracking wheel test cycles. (a) 5 cycles, (b) 10,800 cycles, (c) 21,600 cycles, and (d) 30,000 cycles

구간은 약 30초 정도로 구성된다. 그림 4(a), (b), (c), (d)는 각각의 사이클 경과에 따른 누설전류를 그림 5(a), (b)는 휴지시간 후의 누설전류를 나타내었다. 그림 4(b), (c), (d)를 보면 시료 1, 2, 4와는 달리 시료 3은 초기 도전성 전류 구간이 1~2초 정도로 매우 짧은 것을 알 수 있다. 이는 재료의 발수성의 차이로 인한 방전으로 볼 수 있다 [6].

사이클에 따라 누설전류는 계속 증가하며, 30,000사이클의 누설전류 피크를 보면 시료 1, 2는 27~28 mA,

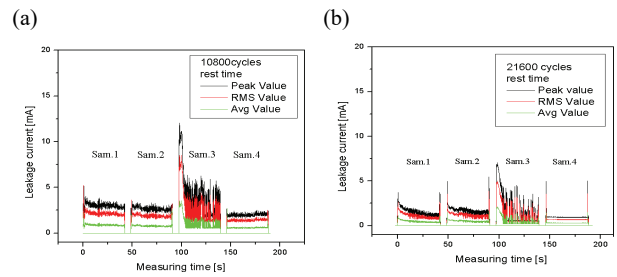


Fig. 5. Leakage current of each sample after resting time in tracking wheel test. (a) 10,800 cycles and (b) 21,600 cycles.

시료 3은 17~18 mA, 시료 4는 15 mA으로 나타났으며, 휴지시간 후의 누설전류는 시료 1, 2, 4는 휴지시간 전의 누설전류보다 매우 감소하며 이는 휴지시간 동안 재료 표면의 발수성 회복에 의한 것으로 볼 수 있다.

그러나 시료 3은 전류의 감소 정도가 다른 시료들에 비해 작음을 알 수 있는데 이는 EPDM과 실리콘 고무의 표면 특성인 발수성으로 추측할 수 있다. 즉 실리콘 고무는 휴지시간 동안 표면 발수성 회복 특성에 따른 것으로 생각된다. 가장 작은 누설전류를 보이는 시료는 시료 4(교대갓)이며, 가장 큰 누설전류를 보인 것은 시료 1(규칙갓)이다. 발수성이 우수한 실리콘 고무 시료(시료 1, 시료 2)보다 시료 3의 시료가 누설전류가 작은 이유는 시료 2의 경우 오손물이 갓에 축적되었다가 오손액에 의해 세정(washing)되지만, 실리콘 고무의 경우는 저분자 오일이 표면으로 나온 후 쌓여 있는 오손물질이 오일과 함께 묻혀 버려 점착적인 누설전류의 크기가 EPDM보다 실리콘 고무가 높게 나타난 것으로 사료된다.

그림 6과 같이 시험 전후의 표면 상태를 비교하면 시료 1은 갓 시스(sheath)에서 트래킹이 발생하였으며 이는 파팅 라인(parting line)에서 일어났다. 시료 2도 갓 시스에 트래킹이 발생하였으며, 또한 시료 1, 2 모두 쇼킹(chalking) 현상도 나타났다. 시료 3은 갓 시스의 가벼운 침식(erosion) 및 변색현상이 나타났으며, 이는 방전으로 인한 오존, 질소 가스 발생에 의해 시료 2의 2중 결합 및 자유 라디칼이 생성하여 황색으로 변한 것으로 사료된다. 그러나 시료 4의 경우는 갓의 가벼운 부식과 계면부근에서의 쇼킹현상만 나타났을 뿐 트래킹의 흔적은 발생하지 않았다.

시료 2의 시스(sheath)에 발생한 트래킹 흔적 및 쇼킹현상이 발생한 부분, 시료 3의 변색된 부분을 채취하여 SEM을 분석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 8은 트래킹이 발생한 표면상태를 나타내며 그림 8(a)은

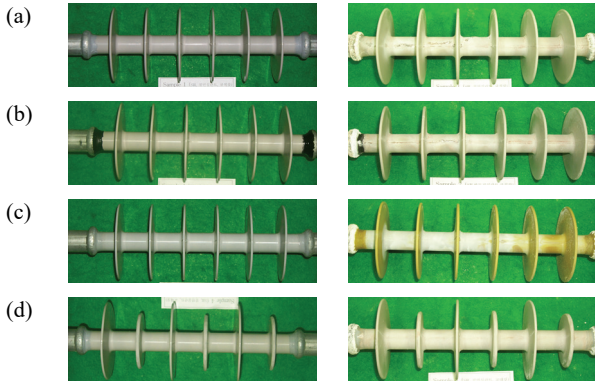


Fig. 6. Insulator surface state of virgin and 30,000 cycles in tracking wheel test. (a) Sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

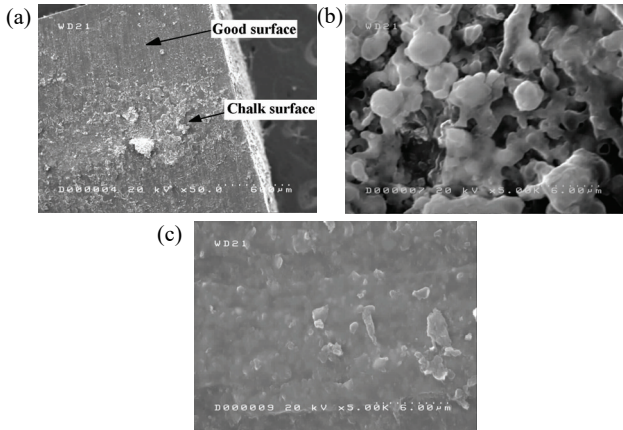


Fig. 7. Tracking traces and chalking in the insulator sheath by SEM analysis. (a) Chalking (sample 2, 50 \times), (b) chalking (sample 2, 5,000 \times), and (c) color changing (sample 3, 5,000 \times).

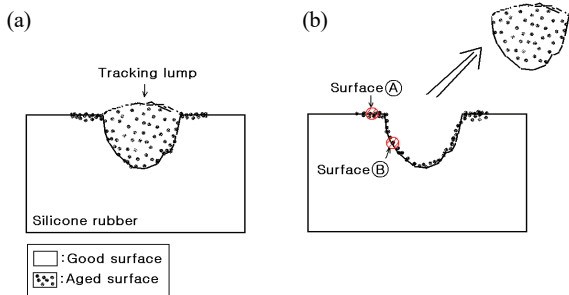


Fig. 8. Surface structure and state of the sample by tracking. (a) Before tracking lump escapes and (b) after tracking lump escapes.

표면에 발생한 트래킹 덩어리가 존재하는 상태이며, 그림 8(b)는 트래킹 덩어리가 떨어져 나간 상태로 표면 A (surface A), 표면 B (surface B) 부분을 분석하였다.

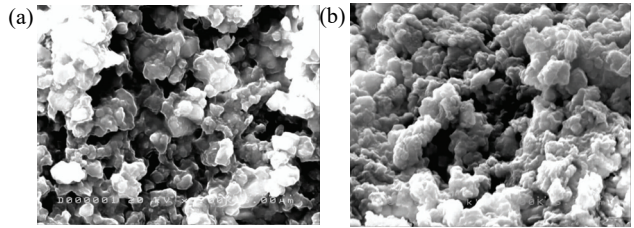


Fig. 9. SEM images of surface shape (5,000 \times) by tracking. (a) Tracking surface A and (b) tracking surface B.

Table 2. EDX analysis of the tracking surface.

Atomic %	Surface A	Surface B
Si	65.8%	49.1%
Al	34.2%	50.8%

표면 A 부분은 그림 9(a)와 같이 무기물이 노출된 상태로 표면 B 부분은 흰색 무기물들이 노출된 것을 볼 수 있다. 이 흰색 무기물 성분을 분석하기 위해 EDX 분석 결과, 표 2와 같이 표면 A 부분에 비해 표면 B 부분에 Al 성분이 증가한 것을 볼 수 있으며 결국 이들 무기물들이 Al 무기물이 표면에 나타난 것으로 사료된다.

그림 7(a)는 애자 표면에 발생한 초킹 발생부분과 발생하지 않은 부분을 함께 나타낸 것으로 초킹이 발생한 부분을 보면 양호한 표면과 다르게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 초킹이 발생한 부분을 확대 분석한 사진이 그림 7(b)이다. 표면 상태를 보면 역시 무기물이 노출된 표면양상을 보인다. 하지만 시료 3의 변색부분은 표면상태가 거의 매끄러운 상태여서 열화가 심하지 않은 것을 알 수 있다 [7].

결과적으로 보면 시료 외관 상태로 볼 때 실리콘 고무 재료의 교대갯을 가진 시료 4의 경우가 가장 양호한 상태이며, 다음으로 양호한 상태를 보인 것은 EPDM 재료의 시료 3이다. 이와 같은 결과로 볼 때 절연물의 형상 설계에 있어서 규칙갯보다는 교대갯으로 설계하는 것이 유리하다고 사료된다 [8].

각 애자 시료의 발수성은 STRI Guide에 의해 25cm 정도 거리에서 약 20초간 스프레이로 분무하여 표면의 발수성을 측정하였다. 초기에는 EPDM 재료의 시료 3을 제외하고는 모두 발수성 등급이 HC 1, 시료 3은 부분적으로 HC 3, HC 4 등급을 보이는 곳도 있었다. 30,000사이클 시험 종료 후 각 시료의 발수성 상태를 그림 10에 나타낸다.

시료 1은 시험 종료 후 표면의 발수성은 HC 1, HC 3, HC 5 등급으로, 시료 2도 HC 1, HC 3, HC 5 등

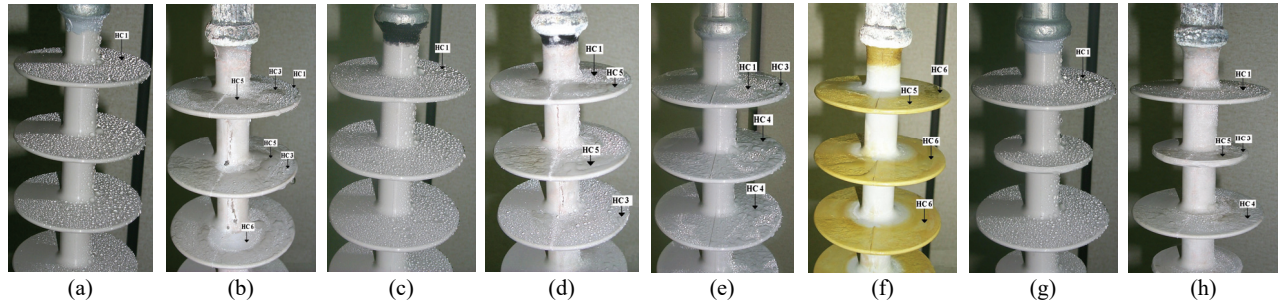


Fig. 10. Changes in hydrophobicity of insulators 1, 2, 3, and 4. (a) Virgin 1, (b) 30,000 cycles 1, (c) virgin 2, (d) 30,000 cycles 2, (e) virgin 3, (f) 30,000 cycles 3, (g) virgin 4, and (h) 30,000 cycles 4.

Table 3. Surface temperature of insulator shed according to tracking wheel cycle.

Sample	Average temperature [°C]		
	10,000 cycles	20,000 cycles	30,000 cycles
1	50.4	50.6	62.8
2	49.3	48.4	53.9
3	40.3	40.0	44.2
4	49.4	48.6	50.6

급으로 나타났다. 그러나 시료 3의 경우는 HC 5, HC 6 등급만 존재하여 발수성이 다른 시료에 비해 매우 나쁜 것을 알 수 있다. 시료 4는 HC 1, HC 3, HC 4, HC 5 등급으로 나타났으며, 1번 갓 표면의 발수성은 아주 양호하였다. EPDM 재질의 시료 1의 발수성은 휴지시간 1일을 지난 후에도 발수성이 회복되지 않았으며, 이러한 영향이 발수성 상태가 가장 나쁜 HC 6이 주로 나타나게 된 것으로 볼 수 있다.

시료의 온도 분포를 10,000, 20,000, 30,000사이클 경과했을 때 적외선 카메라로 분석하여 표 3에 나타내었으며, 트래킹 사이클 증가에 따라 방전이 활발하게 일어나 평균온도는 증가하는 것을 알 수 있다.

10,000사이클에서 시료 1의 평균온도는 50.4°C, 시료 2는 49.3°C, 시료 3은 40.3°C, 시료 4는 49.4°C로이며, 가장 낮은 평균온도를 보인 것은 시료 3이며, 나머지 시료들은 시료 3보다 10°C 더 높게 나타났다. 30,000사이클의 평균온도를 보면 시료 2와 시료 4는 53.9°C, 50.6°C이지만, 시료 1은 62.8°C로 10°C 이상 차이가 났다. 이는 시료 1의 트래킹 열화된 부분에 지속적인 방전현상에 기인한 것으로 보인다. 그림 11은 10,000, 30,000사이클일 때 시료 1의 온도 분포로 이는 절연물의 상단에서 하단까지 온도를 라인 플롯(line plot)한 것으로 No. 표시는 갓(shed) 수를 나타낸다. 10,000사이클일 때 온도 분포를 보면 모든 갓에 대해 균등한 온도 분포를 보이거나, 30,000사이클일 때는 2번

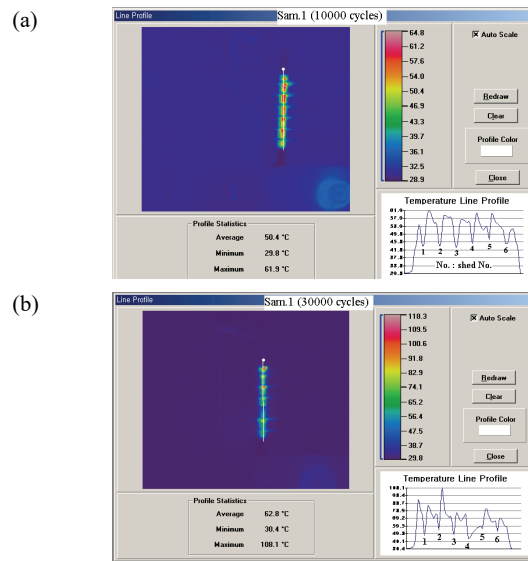


Fig. 11. Temperature distribution of insulator according to the tracking wheel cycle in sample 1. (a) 10,000 cycles and (b) 30,000 cycles.

과 3번 갓 사이에 높은 온도가 나타나고 있는 것은 트래킹 열화 흔적이 발생한 곳에 지속적인 방전에 의해 온도가 매우 높게 나타난 것으로 사료된다.

트래킹 휠 시험 후 상용주파건조섬락전압 시험 결과를 그림 12에 나타내었으며, 시료 1의 섬락전압이 가장 낮았고, 시료 3이 가장 높았으며, 애자 시스에 트래킹 흔적이 나타났던 시료 2의 건조섬락전압이 높게 나타났다. 이는 건조섬락시험에서는 트래킹 열화 정도에 따라서 섬락전압이 좌우되지 않는 것을 알 수 있으며 보다 가혹한 조건에서 열화상태에 따른 섬락전압 값의 차이를 검토하기 위해 상용주파주수섬락전압시험도 하였다.

시료 1과 시료 4에 대해서 트래킹 휠 시험 전후의 주수섬락전압시험을 시행한 결과 그림 13과 같이, 시험 전에는 시료 1과 시료 4의 주수섬락전압 값이 별로

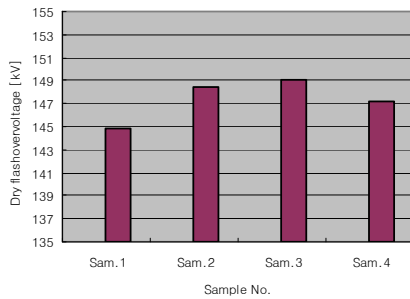


Fig. 12. Commercial frequency dry flashover voltage of insulator after tracking wheel cycle.

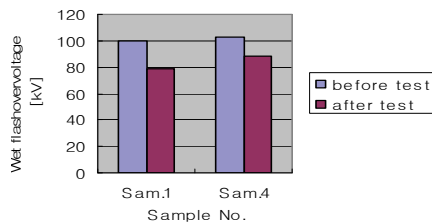


Fig. 13. Commercial frequency wet flashover voltage of sample 1, 4 insulator before and after tracking wheel test.

차이가 나지 않았다. 그러나 트래킹 휠 시험 후에 주수섬락전압은 시료 1의 경우 78.3 kV로 시험 전보다 약 22 kV 정도 저하하였으며, 시료 4는 13.6 kV 정도 낮은 값을 보였다. 이러한 차이는 트래킹 휠 시험을 통해 규칙적인 시료 1의 트래킹 열화현상이 두드러지게 나타났기 때문으로 볼 수 있다.

4. 결론

폴리머 절연물은 바람, 오염, 열, 습도 및 자외선과 같은 환경 스트레스에 노출되므로 시간이 지남에 따라 하우징의 표면 열화와 FRP rod의 취성파괴 등의 고장이 발생한다. 하우징은 지속적인 건조대 형성에 따른 방전으로 표면 열화를 가져오고, FRP rod는 코로나 방전에 의한 질산 등의 부식성 매체로 응력 부식을 발생한다.

본 논문에서는 하우징의 재료와 갖의 형상에 따른 폴리머 애자의 경우 규칙적이 교대갓보다 누설전류가 크며, 휴지시간에 따른 발수성의 회복은 누설전류의 크기로 볼 때 실리콘 고무가 EPDM보다 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 실리콘 고무의 규칙적 애자는 모두 쉬스의 파팅라인에 트래킹 흔적과 초킹현상이 발생한 반면에 교대갓은 계면에서의 초킹현상만 나타났을 뿐 트래킹 흔적은 발생하지 않았다. 이를 확인하기 위하여

트래킹 시험 후 열화에 의해 상용주파주수섬락전압은 교대갓에 비해 규칙적이 감소의 폭이 큰 것을 알 수 있었으며, 시험 후 발수성도 실리콘 고무는 HC 1, 3, 5등급으로 EPDM은 HC 5, 6등급만 나타난 것으로 볼 때 트래킹 사이클 증가에 따라 표면 온도는 트래킹 열화 흔적이 발생한 곳에 지속적인 방전에 의해 온도가 높게 나타나기 때문이다.

ORCID

Seung-Hyun Kim
Han-Goo Cho

<https://orcid.org/0000-0002-6419-3839>
<https://orcid.org/0000-0003-0884-7655>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIC)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다[No.20171210000100].

REFERENCES

- [1] V. M. Moreno, R. S. Gorur, and A. Kroese, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **10**, 80 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2003.1176565>]
- [2] Y. Xiong, S. Rowland, J. Robertson, and R. Day, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 763 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2008.4543114>]
- [3] P. Charalampidis, M. Albano, H. Griffiths, A. Haddad, and R. T. Waters, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **21**, 740 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.004015>]
- [4] Misao Josho, Hajime Miyakawa, Manabu Sakata, Katsumi Arakawa, Kenji Tsuge, Daiki Usami, and Yusuke Utsumi, *Proc. INMR World Conference & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings (USA, 2003)* p. 113.
- [5] X. Liang, J. Wang, and J. Dai, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 368 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5448090>]
- [6] G. P. Bruce, S. M. Rowland, and A. Krivda, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 521 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5448108>]
- [7] G. P. Bruce, S. M. Rowland, and A. Krivda, *Proc. 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (IEEE, Quebec, Canada, 2008)* p. 196. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ceidp.2008.4772788>]
- [8] V. Rajini and K. Udayakumar, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16**, 834 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2009.5128524>]