


전기 절연성능 향상을 위한 폴리머 애자의 표면 특성 연구

박용섭¹, 배재성², 홍병유², 이재형² 

¹ 조선이공대학교 전자과

² 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

A Study on the Surface Properties of Polymer Insulators for Improving Electrical Insulation Performance

Yong Seob Park¹, Jae Sung Bae², Byungyou Hong², and Jae Hyeong Lee²

¹ Department of Electronics, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea

² Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received November 20, 2020; Revised November 23, 2020; Accepted November 25, 2020)

Abstract: In this paper, we investigated the surface properties of polymer insulators to improve electrical insulation performance. First, after washing the polymer insulator in various ways, its contact angle was increased, thereby improving the hydrophobic properties and electrical insulation properties. In addition, TiO₂ thin films, which have been used as a photocatalytic material and have been applied to the polymer insulator surface of to enhance the surface and electrical insulating properties. For the sputtering method, the contact angle after coating the TiO₂ thin film increased with increasing RF power, but it was lower compared to that before coating, indicating that the hydrophobic properties of the surface were slightly deteriorated. Consequently, the electrical properties of the polymer-insulating material were maintained or improved after the TiO₂ thin-film coating.

Keywords: Polymer insulator, Surface properties, TiO₂ thin films, Sputtering, Leakage current

1. 서론

자기애자(ceramic insulator)는 대표적인 전기 절연 재료써 무겁고 충격에 약하기 때문에 취급이 매우 어렵다. 자기애자의 이런 단점을 해결하기 위한 방안으로 폴리머 애자(polymer insulator)가 개발되어 시공되고 있다. 폴리머 애자의 경우 자기애자가 가지는 단점을 해결할 수 있으며, 내오손성이 우수하고 아주 가볍기 때문에 전 세계적으로 그 사용 비율을 증가하고 있다 [1]. 국내

에서도 15년 전부터 한전을 중심으로 폴리머 애자를 적극적으로 검토하여 현재 22.9 kV의 일부 외국제품으로 배전선로에 사용되고 있으며, 10년 이상의 기간이 지나도 어떠한 변화와 문제없이 기존 우수한 특성들을 나타내고 있다고 평가되고 있다. 또한 일부 국내 업체들도 폴리머 애자 개발에 성공하였으며, 전체 사용량의 50% 이상을 폴리머 애자로 제공 중이다. 한전의 경우 공업단지 등 오염이 심한 지역에서 154 kV 이상의 송전급 애자에서 기존 자기애자의 섬락 사고들이 빈번하여 상대적으로 내오손 성능이 우수한 폴리머 애자들의 사용량을 늘리고 있다. 그러나 상대적으로, 폴리머 애자는 재질이 가지고 있는 고유특성 때문에 자기애자보다 분진 등 이물질의 부착이 쉽고, 부착된 분진 등의 이물질 등은 쉽게 떨어지지 않아 세척의 어려

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2021 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.

음을 가지고 있다. 또한 대부분 폴리머 애자의 경우 옥외에 사용되어 노출되는 환경 때문에 오존, 자외선, 산성비 등에 의해 애자 표면은 열화되고, 오손등 물질의 부착 등으로 표면의 습윤성이 증가하기 때문에 애자의 절연능력이 점점 저하되게 된다 [2-7].

본 연구에서는 폴리머 애자의 표면 특성 개선을 위해 다양한 세정방법에 따른 접촉각 및 누설 전류 특성 변화를 조사하였다. 또한 절연능력 특성을 향상시키기 위해 광촉매 소재로도 널리 사용되고 있는 TiO_2 박막을 스퍼터링법(sputtering) 이용하여 폴리머 애자 표면에 증착하고 공정 조건에 따른 표면 및 전기적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 표면 특성 개선을 위한 고분자 절연 물로 (주)평일사의 폴리머 애자를 사용하였다. 폴리머 애자의 가장 중요한 특성 중 하나는 표면에서의 소수성에 있다. 표면 개질 전 폴리머 애자의 고유 표면 특성을 평가하고 표면 세정을 실시하였다. 표면 세정 방법으로는 아세톤 및 에탄올을 이용하였고, 초음파를 이용하여 15분간 세척하였다. 표면 세척한 고분자 절연 물의 세정 전후 표면 특성 변화를 알아보기 위한 방법으로 접촉각(contact angle) 측정 장치를 이용하였다. 본 측정을 위해 매 시험 시마다 10개의 샘플을 5회에 걸쳐 진행하였다. 또한 폴리머 애자 표면에서의 전기적 특성을 측정하기 위해 시료 표면에 그림 1에서와 같이 일정한 간격으로 패턴 된 마스크를 이용하여 금(Au) 전극을 증착하였으며, HP 4140B 장비를 이용하여 인가 전압에 따른 표면 누설 전류를 측정하였다.

한편, 고분자 절연물 표면 특성 향상을 위한 방안으로 TiO_2 박막을 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 폴리머 애자 위에 증착하였다. TiO_2 계열의 소재들은 광촉매 특성을 지니고 있어 표면의 극친수 특성을 유지할

수 있게 하는 자기세정(self-cleaning) 특성을 지니고 있는 물질이며, 김서림 방지(anti-fogging)와 대전 방지(anti-static) 등을 위한 소재로써 그 기능이 탁월한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 폴리머 애자의 고유 표면 특성 기능을 유지하면서 그 성능을 향상시키기 위해 TiO_2 물질을 표면 개선을 위한 소재로써 도입하였으며, 친수성과 전기적 절연 특성은 폴리머 애자의 가장 중요한 특성이라고 할 수 있으며, 폴리머 애자의 하우징 역할을 할 수 있는 물리적 특성을 갖춘다면 그 활용도가 높을 것으로 판단된다. TiO_2 박막 증착 전 기판은 증류수, 에탄올, 아세톤을 사용하여 세척하였으며 RF (radio frequency) 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 TiO_2 박막 증착 전 초기 진공도는 3.0×10^{-6} Torr 였고, Ar을 30 sccm의 유량으로 주입하여 증착 작업 압력을 2×10^{-3} Torr로 유지하였다. 4인치 크기의 원형 세라믹 TiO_2 타깃을 사용하여, 첫 번째는 상온에서 RF 전력은 70~100 W를 변화시켰고 Ar 이용한 플라즈마를 통하여 20분간 스퍼터링하여 100 nm의 두께의 TiO_2 박막을 제조하였고, 다른 조건은 상온에서 Ar과 O_2 (Ar: O_2 = 9:1, 8:2)를 혼합한 플라즈마를 이용하여 27분간 스퍼터링하여 100 nm 두께로 증착하였으며, 두 조건 모두 타깃과 기판과의 거리는 60 mm, 기판의 회전속도는 5 rpm을 유지하였다. 표 1은 TiO_2 박막 증착에 사용된 스퍼터링 조건을 나타낸 것이다.

증착된 TiO_2 박막의 미세구조는 XRD (X-ray diffractometer, Bruker, AXS D8 Discover)로 분석하였고, 박막의 표면 미세 구조는 FE-SEM (field emission scanning electron microscopy, JEOL JSM-6700F) 및 AFM (atomic force microscopy)을 이용하여 측정하였다. 또한 TiO_2 박막의 광학적 및 전기적 특성은 UV-visible spectrophotometer (Hitachi, U 3000)과 HP 4140B가 부착된 SPM (scanning probe microscope) 장비를 이용하여 분석하였다.

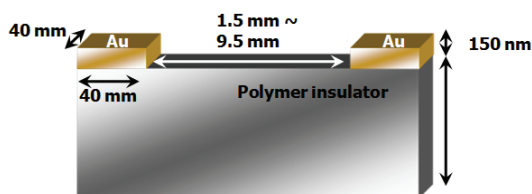


Fig. 1. Schematic diagram of electrode structure for measuring surface leakage current of polymer insulator.

Table 1. Sputtering process conditions for TiO_2 thin film deposition.

Parameters	Process 1	Process 2
Base pressure	3×10^{-6} Torr	3×10^{-6} Torr
Working pressure	2×10^{-3} Torr	2×10^{-3} Torr
RF power	70~100 W	100 W
Sputtering gas	Ar	Ar: O_2 (8:2, 9:1)
Deposition time	20 min	27 min
Substrate temperature	Room temp.	Room temp.
Thickness	100 nm	100 nm

3. 결과 및 고찰

3.1 폴리머 애자의 표면 세정에 따른 특성

표 2는 아세톤 및 에탄올 용액으로 세정된 고분자 절연물 표면의 접촉각의 이미지와 접촉각 크기를 나타낸 것이다. 일반적으로, 표면 특성 시험인 접촉각 측정은 젖음성 측정을 위해 사용되며, 주로 고착된 물방울 (sessile drop) 방법을 이용하여 측정한다. 접촉각은 열역학적으로 액체가 고체 표면 위에서 평형을 이룰 때 갖는 각을 말하며, 낮은 접촉각을 나타낼 때는 높은 젖음성(친수성, hydrophilic)으로 높은 표면 에너지를 의미하며, 높은 접촉각은 낮은 젖음성(소수성, hydrophobic)으로 작은 표면 에너지를 의미하게 된다. 세정 전 폴리머 애자는 평균 111° 정도의 접촉각을 나타내었는데, 이것은 폴리머 애자가 낮은 젖음성, 즉 소수성을 나타내어 작은 표면 에너지를 갖는다는 것을 의미한다. 아세톤 및 에탄올로 세정한 후 접촉각은 더욱 커짐을 볼 수 있는데, 이러한 결과들로부터 표면 세정이 폴리머 애자의 소수성 특성을 개선함을 하는 것으로 알 수 있다. 특히, 에탄올을 문힌 와이퍼를 이용한 표면 세정은 화학적 반응과 물리적인 힘이 가해져 아세톤을 이용한 표면 세정과 유사한 정도의 접촉각 증가 효과를 얻을 수 있었다.

그림 2는 고분자 절연물의 표면 세정에 따른 누설 전류 변화를 나타낸 것이다. 세정 전의 경우, 시료 표면에 인가된 전계가 높아짐에 따라 누설 전류가 증가

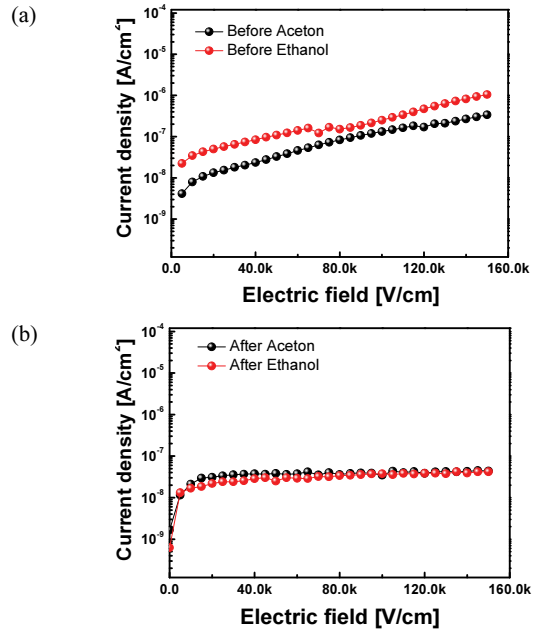


Fig. 2. Leakage current vs. applied electric field for polymer insulator before (a) and after and (b) surface cleaning.







함을 볼 수 있다. 폴리머 애자는 절연체로서 낮은 누설 전류를 나타내지만, 표면에 부분적 결함인 부착된 유기물 등으로 인해 누설 전류 값이 증가한 것으로 판단되며, 한편, 표면 세정 후 고분자 절연물 표면에서 누설 전류는 인가 전계에 따라 증가하지 않고 일정한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 폴리머 애자의 표면 세정에 의한 오손 제거는 고분자 절연물의 전기적 특성 향상을 유도할 수 있는 방안이라고 판단된다.

3.2 TiO₂ 박막 코팅에 따른 폴리머 애자의 표면 특성

TiO₂ 박막을 제조하기 위한 방법으로 졸겔(sol-gel) [5], 화학기상증착법(chemical vapor deposition) [2-4], 스퍼터링법(sputtering) [6,7], 상온 진공분말분사공정(에어로졸 데포지션) 등이 사용되고 있는데, 본 연구에서는 스퍼터링법을 이용하여 고분자 절연체인 폴리머 애자 위에 증착하였다.

그림 3은 스퍼터 전력에 따른 TiO₂ 박막 코팅된 폴리머 애자 표면의 접촉각 측정 결과를 나타낸 것이다. 이때 TiO₂ 박막의 두께는 100 nm로 고정하였다. 70 W에서 접촉각은 약 84° 정도였으나, 스퍼터 전력이 높아짐에 따라 접촉각 값은 점차 증가하여 100 W에서는 96° 이상의 값을 나타내었다. 스퍼터 전력이 증가함에 따라 타겟으로부터 스퍼터된 높은 에너지의 원자들이

Table 2. Average contact angles of polymer insulator before and after surface cleaning.

	Before cleaning	After cleaning
Aceton	 111°±0.5°	 120°±1°
Ethanol	 111°±0.5°	 116°±1.1°
Ethanol + wipe	 111°±0.5°	 121°±1.2°

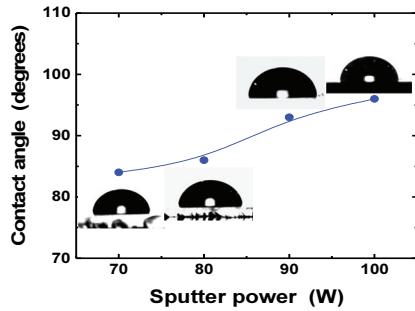


Fig. 3. Contact angles of polymer insulator surface coated with TiO_2 thin films as a function of the sputter power.

고분자 절연물 표면에 도달하여 표면이 개질된 더욱 안정적인 결합을 형성하게 되어 표면의 소수성 특성을 향상시키게 된다고 판단된다 [6-9]. 결국 스퍼터 전력의 증가는 접촉각 값을 증가시켰고, 절연체 표면 에너지는 감소됨을 확인하였다.

그림 4는 스퍼터링 가스로 아르곤을 사용했을 때와 아르곤과 산소를 혼합하여 사용하였을 경우, TiO_2 박막 코팅된 폴리머 애자 표면의 접촉각 변화를 나타내었으며, 이때 스퍼터 전력과 TiO_2 박막의 두께는 각각 100 W 및 100 nm로 고정하였다. 스퍼터링 가스로써 산소가스를 혼합하여 제작한 TiO_2 박막이 증착된 고분자 폴리머의 경우 접촉각 값은 그림 3의 결과보다 크게 낮아졌으며, Ar에 대한 O_2 가스 비율이 높아짐에 따라 접촉각은 46° 에서 35° 로 감소하였다. 산소 가스 주입 시 플라즈마 내 생성된 산소 이온이 TiO_2 박막 형성 시 잉여 산소로 작용하여 박막 내 산소 비율을 증가시키게 되며, 특히, TiO_2 박막 표면에서 산소 성분 비율이 높아지고, 이에 따라 표면 에너지가 증가하게 되어 박막이 친수성을 갖게 하는 원인이 된다. 따라서 스퍼터링 시 산소 가스 주입은 고분자 절연물의 고유 특성인 소수성이 특성을 감퇴시키지만 상대적으로 표면에서의 산소 결합으로 전기적 성능을 향상시킬 수 있는 원인을 제공할 수 있다고 판단된다 [10].

그림 5는 스퍼터 전력을 달리하여 증착한 TiO_2 박막의 표면 미세구조를 나타낸 것이다. 스퍼터 전력에 관계없이 TiO_2 박막은 균일하고 결함이 없는 부드러운 표면을 나타내었다. 그러나 접촉각 특성에서는 낮은 전력에서 증착된 TiO_2 박막이 높은 스퍼터 전력에서 증착된 박막에 비해 작은 접촉각 값을 나타내었다. 접촉각 변화 원인을 조사하기 위해 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)를 이용하여 박막 표면의 성분 분석을 하였다. 그 결과, 스퍼터 전력이 100 W에서 70 W로

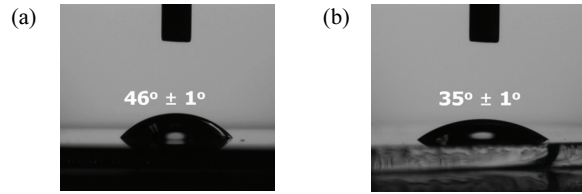


Fig. 4. Contact angles of polymer insulator surface coated with TiO_2 thin films. The mixing gas ratio of Ar to O_2 was (a) 9:1 and (b) 8:2 during the sputtering process.

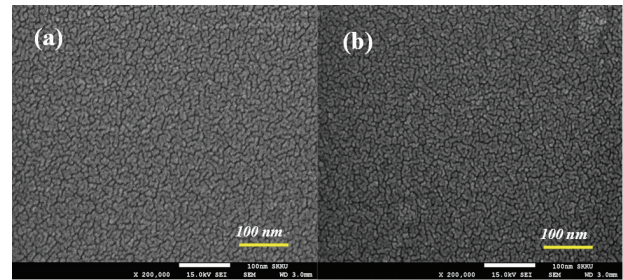


Fig. 5. Surface morphologies of TiO_2 thin films deposited at (a) 70 W and (b) 100 W of the sputtering power.

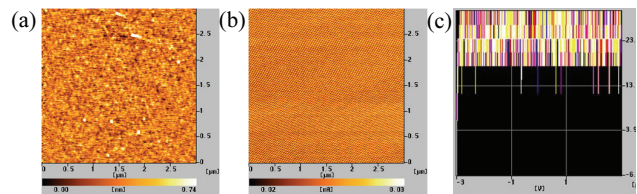


Fig. 6. SPM image (a) leakage current image and (b) average leakage current of TiO_2 thin films with MIM sample structure. The sputter power was 100 W.

감소함에 따라 TiO_2 박막 내 산소 농도는 86.5%에서 90%로 증가함을 알 수 있었다 [6,7].

스퍼터링 방법으로 증착된 박막의 전기적 특성 시험을 하기 위하여 TiO_2 박막을 절연체로 사용하여 금속-절연체-금속(MIM) 구조로 샘플을 제작하였으며 준비된 샘플은 SPM (scanning probe microscope) 장치를 이용하여 그림 6과 같이 박막의 전류 흐름 이미지와 평균 누설 전류 값을 얻었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, TiO_2 박막의 rms 표면 거칠기 값은 평균 0.12 nm로 매우 부드러운 표면을 나타내었으며, 박막 전체가 균일한 전류 흐름, 즉 균일한 누설 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 누설 전류의 평균값은 매우 낮은 23 pA로 조사되었으며, 증착된 TiO_2 박막이 우수한 전기적 절연 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 전기 절연성능 향상을 위한 폴리머 애자의 표면 특성 개선 방법에 대해 연구하였다. 먼저 폴리머 애자를 다양한 방법으로 세척한 후 표면 특성과 전기적 특성을 조사한 결과, 세정 후 접촉각이 증가하여 소수성 특성이 향상되었으며 전기적 절연 특성 역시 개선됨을 알 수 있었다. 또한 전기 절연물의 성능 향상을 위한 방안으로 광촉매 소재인 TiO_2 박막을 적용한 폴리머 애자의 표면 및 전기 절연 특성을 조사하였다. 스퍼터법의 경우, TiO_2 박막 코팅 후 접촉각이 RF 전력에 따라 증가하였으나, 코팅 전에 비해 낮아져 표면의 소수성 특성이 다소 저하됨을 알 수 있었다. 결론적으로, TiO_2 박막 코팅 후 고분자 절연물의 전기적 특성은 유지되거나 향상되었다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>

감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20010965).

REFERENCES

- [1] J. Kim, M. K. Chaudhury, M. J. Owen, and T. Orbeck, *J. Colloid Interface Sci.*, **244**, 200 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7909>]
- [2] C. H. Li, Y. H. Hsieh, W. T. Chiu, C. C. Liu, C. L. Kao, *Sep. Purif. Technol.*, **58**, 148 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.013>]
- [3] H. Sun, C. Wang, S. Pang, X. Li, Y. Tao, H. Tang, and M. Liu, *J. Non-Cryst. Solids*, **354**, 1440 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2007.01.108>]
- [4] G. J. Yang, C. J. Li, Y. Y. Wang, and C. X. Li, *Mater. Lett.*, **62**, 1670 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.09.056>]
- [5] M. Addamo, V. Augugliaro, A. Di Paola, E. García-López, V. Liggio, G. Marci, and L. Palmisano, *Thin Solid Films*, **516**, 3802 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.06.139>]
- [6] C. H. Heo, S. B. Lee, and J. H. Boo, *Thin Solid Films*, **475**, 183 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.08.033>]
- [7] F. Meng and F. Lu, *Vacuum*, **85**, 84 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2010.04.006>]
- [8] P. Zeman and S. Takabayashi, *Surf. Coat. Technol.*, **153**, 93 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01553-5](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01553-5)]
- [9] M. M. Abdel-Aziz, I. S. Yahia, L. A. Wahab, M. Fadel, and M. A. Afifi, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 8163 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.10.040>]
- [10] M. Dhayal, J. Jun, H. B. Gu, and K. H. Park, *J. Solid State Chem.*, **180**, 2696 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.06.037>]