

기후 변화에 따른 자기 애자의 시멘트 경도 변화

이주현^{1,2}, 김홍식^{1,2}, 김준동^{1,2,a}, 최인혁^{3,b}

¹ 인천대학교 차세대융합에너지중점연구소

² 인천대학교 전기공학과 광전에너지소재연구실

³ 한국전력공사 전력연구원

Hardness Profiles of Porcelain Insulators by Climate Changes

Joohyun Lee^{1,2}, Hong-Sik Kim^{1,2}, Joondong Kim^{1,2,a}, and In-Hyuk Choi^{3,b}

¹ Multidisciplinary Core Institute for Future Energies, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

² Photoelectric and Energy Device Application Lab, Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

³ KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, Daejeon 34056, Korea

(Received October 21, 2017; Revised November 16, 2017; Accepted November 17, 2017)

Abstract: Insulators used in overhead transmission lines are continuously exposed to a number of mechanical and electrical stresses owing to external environmental factors, resulting in corrosion, reduction in durability, and deterioration. Widely used porcelain insulators are fabricated with cement and porcelain and are especially common in Korea. Changes in the hardness and chemical reactivity of the cement increase the leakage and fault currents and increase the possibility of flashover due to insulation breakdown. Therefore, it is important to evaluate the durability and defects of porcelain insulators. Studies on the reliability of various evaluation methods are needed to prevent accidents by accurately determining the replacement timing and potential defects in porcelain insulators. In this study, the hardness of the cement part of the porcelain insulator was measured using the Vickers hardness test and its composition was analyzed by energy dispersive spectroscopy and X-ray diffraction analysis. The performance of the insulators was compared in two different regions with varying climatic conditions. This study presents an evaluation method of the defects in porcelain insulators by measuring humidity, which can also be used to assess the reliability of the insulators.

Keywords: Insulator, Climate change, Flashover, Reliability assessment

1. 서론

애자는 가공 송전선로의 절연 및 지지, 송전의 신뢰성 등을 유지하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 애자

의 종류에는 자기 애자, 고분자 애자, 유리 애자 등이 사용되고 있으며 그중 자기 애자는 현재 국내에서 가장 광범위하게 사용되고 있어 자기 애자에 대한 연구가 중요하다고 할 수 있다. 선진국에서는 송전용 애자의 수명 향상을 위한 새로운 평가 방법 연구가 활발하여 신뢰성 향상이 많이 이루어지고 있지만 국내의 경우 아직 연구가 미비한 상태이다. 따라서 국내 송전선로의 환경적 요인을 고려한 애자의 신뢰성 평가가 매우 중요하다 할 수 있는데 애자의 교체 시기, 미연의 사고 방지를 통해 안정적인 송전선로를 구축하는 데 중요한 역할을 하기 때문이다 [1-3].

a. Corresponding author; joonkim@incheon.ac.kr

b. Corresponding author; inhyukchoi@kepcoco.kr

Copyright ©2018 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.

자기 애자의 경우 절연성과 내구성이 우수하고 비용이 적금구류 및 시멘트의 특징에 의해 경년에 의한 감소와 환경적 요인으로 인한 부식, 경도의 변화가 발생하는 경우가 있다. 특히 수분과 시멘트의 화학반응으로 인해 애자의 수명을 단축시키는 경우가 많다. 또한 자기 애자의 수명에 영향을 끼치는 핵심 요소로 시멘트 및 자기부의 경도 변화가 있다고 알려져 있다. 시멘트는 외부의 습기와 오손 등의 원인으로 수년간 수축과 팽창 과정을 거치게 된다 [3,4]. 시멘트의 강도 저하와 두께 감소에 따라 높은 전압의 인가 시 절연 파괴로 인해 고장 전류가 증가할 수 있고 섬락을 일으키면 애자의 접지 고장 전류가 발생할 가능성이 커진다 [5]. 이러한 이유로 본 연구에서는 수분에 의한 시멘트의 경도 변화를 지역별 기후 데이터를 기반으로 분석하여 시멘트의 경도를 증가시키는 원인을 파악하여 신뢰성을 평가할 수 있는 방안으로 연구하였다.

본 연구에서는 두 지역의 자기 애자를 이용하여 EDS (energy dispersive spectroscopy), XRD (x-ray diffraction) 분석을 통해 경년 변화와 수분에 의한 화학반응에 따른 시멘트의 조성 변화와 자기 애자의 상 변화를 확인하고 경도를 측정하여 수분이 자기 애자의 오손에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 워터젯(water jet)을 이용한 자기 애자 커팅

현수 자기 애자는 그림 1과 같이 금구, 자기, 시멘트로 구성되어 있다. 현수 자기 애자 커팅 시 손실을 최소화하기 위하여 워터젯 방식을 이용하였다. 워터젯은 고압펌프를 사용하여 보통의 물을 초고압으로 압축한 뒤, 사파이어나 다이아몬드 소재 등의 노즐을 통해 음속의 2~3배 속도로 소재 표면에 분사시켜 가공하는 기술이다. 워터젯은 절단 시 열에 의한 변형이 없고 절단 가능한 두께의 범위도 넓으며 가공에 따른 가공 응

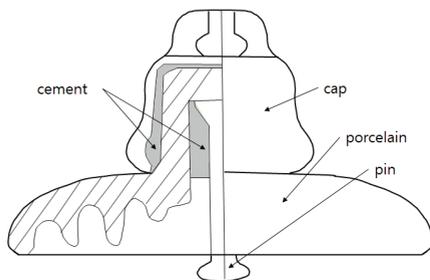


Fig. 1. Structure of porcelain suspension insulator.

력이 발생하지 않고 절단 폭이 좁아 재료 손실이 적기 때문에 커팅에 의한 손상을 방지할 수 있다 [6].

애자 커팅에는 세로와 가로로 커팅 하는 방식이 있는데 세로로 커팅 하여 추출하는 방식에서는 금구 핀과 시멘트 부위가 잘 떨어져 나가는 문제로 인해 이후에는 먼저 가로로 3등분 커팅 후 경도 샘플을 제작하였다.

2.2 폴리싱(polishing) 장비를 이용한 샘플 표면 연마

비커스 경도를 포함한 모든 경도 시험에서 표면의 거칠기가 낮으면 낮을수록 정확하며, 샘플의 형태가 정육면체(cubic) 또는 직육면체 모양을 가져야만 측정이 가능하다. 폴리싱 진행 시 SiC abrasive paper를 거칠기의 단계별로 준비하여 거친 순서대로 수 분간 물을 일정한 간격으로 분사하여 표면을 연마한다. 실시간으로 광학현미경 및 육안을 통해 표면의 거칠기 변화를 수시로 관찰하며, 부족한 표면 연마에 대해서는 Fabric 소재의 스테이지를 활용하여 표면을 더 정밀하게 연마한다.

2.3 경도 시험 샘플 제작

자기 애자의 경도를 측정하기 위해 워터젯으로 커팅된 샘플의 표면 연마를 실시하였다. 정확한 측정을 위

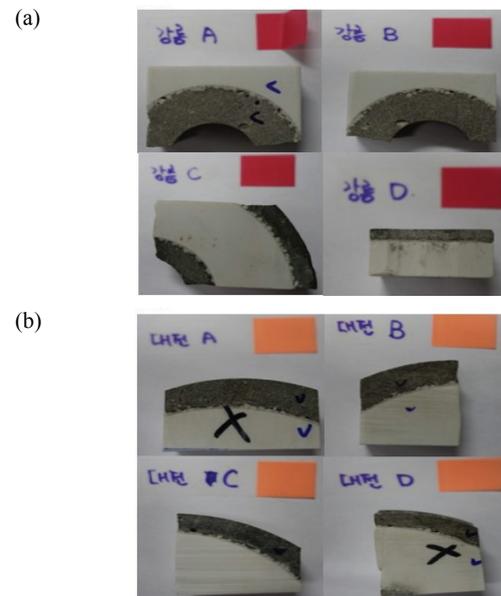


Fig. 2. Hardness measurement of insulator sample (a) Gangneung and (b) Daejeon.

해 강릉과 대전의 자기 현수 애자를 각각 준비하였으며 그림 2에 경도 측정을 위해 준비된 샘플을 나타내었다. 대전과 강릉 애자 각각 25회씩 측정하였다.

2.4 경도 측정 방법

압흔 경도(indentation hardness) 시험은 소량 재료의 기계적 성질을 시험하는 간편한 방식으로 다이아몬드 압자에 하중을 가해 재료 표면에 생긴 압입의 치수를 측정하여 경도를 측정하는 방식이다. 본 연구에서는 다양한 압흔 경도 시험 중 대표적인 방식인 비커스 경도(vickers hardness) 시험 방식을 사용하였다. 그림 3에는 비커스 경도 시험 모식도와 재료의 압입 흔적을 나타내었다. 비커스 경도 H_V 는 다음 식 (1)과 같다.

$$H_V = \frac{P}{A} = \frac{\alpha P}{d^2} \quad (1)$$

여기서 P: 하중, A: 압흔 면적, α : 1.8544, d: 압흔 대각선 길이이다 [7].

완성된 샘플은 Zwick사의 ZHU 0.2 비커스 경도계를 활용하여 대전과 강릉 애자 각각 25회씩 측정하였

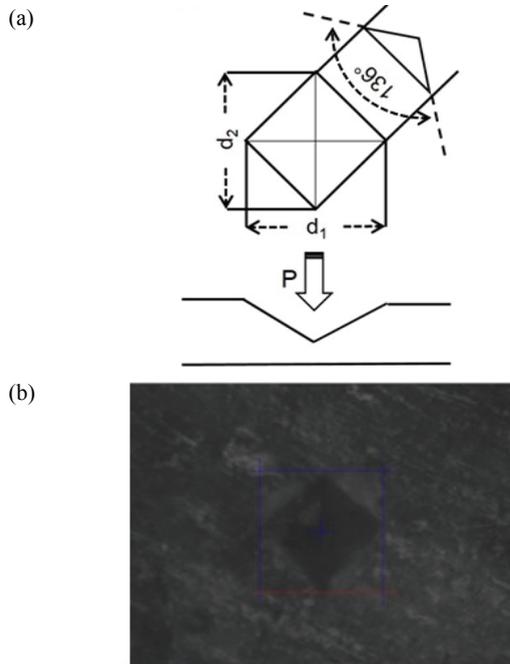


Fig. 3. Vickers hardness test (a) mimetic diagram and (b) indentation trace of material.

다. 하중은 HV1 (9.8N) 또는 HV10 (98N)의 힘으로 측정하였으며 시멘트 및 금속의 경우 경도가 세라믹에 비해 다소 낮아 HV1으로 측정하였고, KS 규격에서 일반적으로 HV10, HV1을 권장하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경도 시험

대전(1979년에 설치)과 강릉(1977년에 설치) 두 지역 애자의 경도 측정 결과 자기 부분에서는 비슷한 경도 값을 나타내었으나 시멘트 부위에서는 강릉이 대전보다 높게 나타난다. 이는 시멘트의 특성 중 물과 반응하여 굳고 단단해지는 특성에 의한 것으로 주성분인 규산삼칼슘($3CaO \cdot SiO_2$)과 규산이칼슘($2CaO \cdot SiO_2$)이 물과 다음과 같은 화학 반응을 일으킨다.

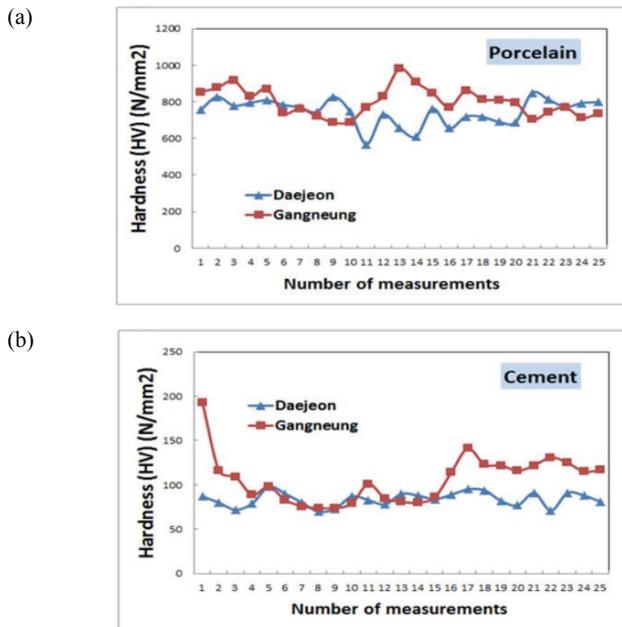
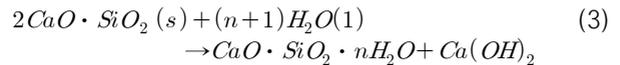
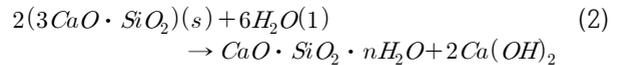


Fig. 4. Hardness measurement result in Daejeon and Gangneung insulator. (a) porcelain hardness and (b) cement hardness.

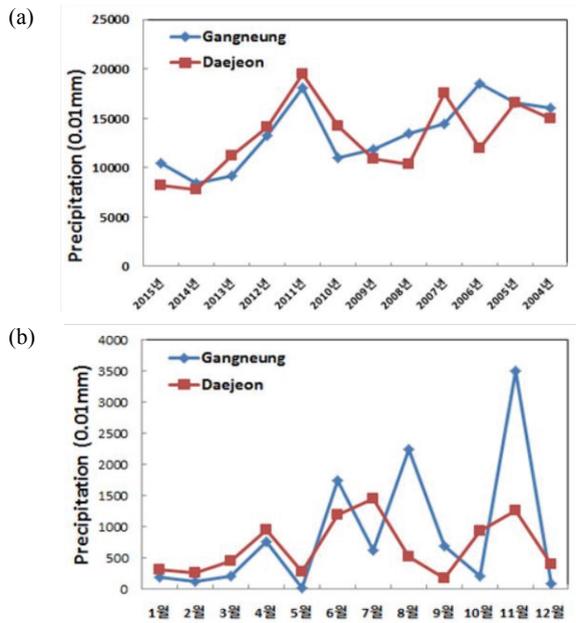


Fig. 5. Precipitation in Daejeon and Gangneung insulator (a) annual precipitation and (b) monthly precipitation.

이러한 물질의 결합과 결정화에 의해 시멘트 강도가 증가한다. 즉, 자기 애자는 오랜 시간 동안 물과 화학반응을 일으켜 생성된 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 공기 중의 이산화탄소를 흡수하여 탄산칼슘(CaCO_3)으로 됨으로써 시멘트의 경도가 증가하게 된다 [8].

대전(1979년에 설치)과 강릉(1977년에 설치) 자기 애자의 차이는 경년 기간과 설치 지역이라는 2가지 요인이 존재하나 경년 기간의 차이는 2년이라는 짧은 시간으로 차이점으로 보기에는 어렵다. 그림 5에는 월평균 및 연도별 강수량을 나타내었다. 기상청의 강수량 데이터를 이용하여 강릉이 대전보다 강수량이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 최근 2004-2015년 강수량 통계자료를 합산하면 대전은 1,572.1 mm, 강릉은 1,613.1 mm로 나타났다. 따라서 높은 강수량으로 인해 수분이 자기 애자의 화학반응에 큰 영향을 주었고 강릉 애자 샘플의 경도가 상대적으로 더 높은 수치가 측정되었다.

3.2 EDS 분석

경년 변화에 따른 조성의 변화를 확인하기 위하여 EDS를 이용하여 조성을 분석하였다. 시멘트에서의 결정립에서는 시멘트 양생 과정 중에 생성되어 석출되는 SiO_2 성분이 주를 이루며 이외의 시멘트 부분의 주 원

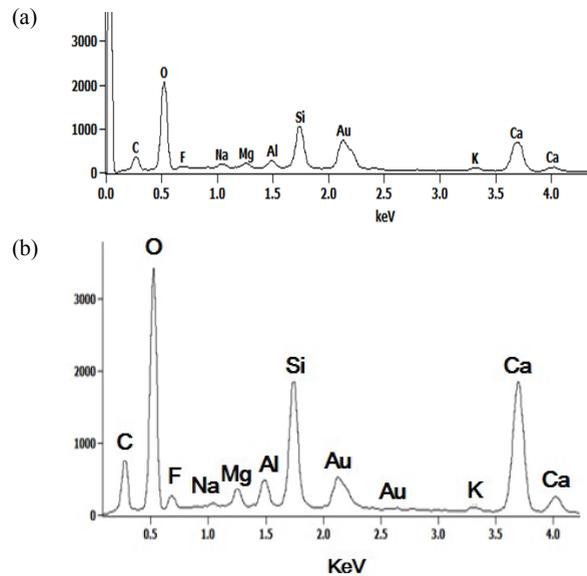


Fig. 6. EDS (energy dispersive spectroscopy) analysis of porcelain insulator (a) Daejeon and (b) Gangneung.

Table 1. Composition of porcelain insulator.

	Daejeon [%]	Gangneung [%]
C-K	15.62	16.08
O-K	63.76	61.02
F-K	2.94	4.57
Na-K	0.9	0.21
Mg-K	0.93	1.02
Al-K	1.16	1.31
Si-K	6.65	6.36
K-K	0.47	0.24
Ca-K	7.34	9.13
Au-K	0.22	0.06

료 성분인 CaCO_3 , SiO_2 , MgO 등과 일치하였다. 자기 애자의 성분 조성은 표 1에 나타내었다. Au는 표면 전도성을 위해 Au 코팅으로 인해 나타나는 성분이다. 그림 6에서 대전과 강릉의 자기 애자 성분 조성을 나타내었으며 특히 경도에 큰 영향을 주는 CaCO_3 성분에 해당하는 Ca 비율이 대전에 비해 강릉에서 높게 나타났고 이는 경도 측정 결과와 일치하는 것을 알 수 있다 [8].

3.3 XRD 분석

그림 7는 자기 애자의 시멘트 XRD 분석 자료이다. 시멘트 부분의 XRD 분석 결과 시멘트 주성분인 CaCO_3 , SiO_2 가 주를 이루었으며 Al_2O_3 와 SiO_2 의 화

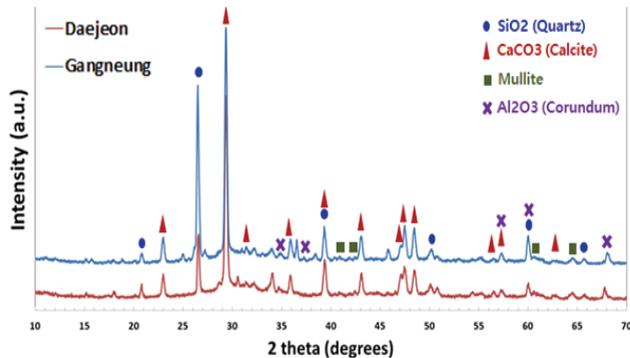


Fig. 7. XRD (x-ray diffraction) analysis of cement in Daejeon and Gangneung.

합물인 Mullite 성분이 일부 검출되었다. Mullite는 알루미늄 성분인 시멘트에 포함되어 Al_2O_3 성분이 검출되고 시간이 지남에 따라 Al_2O_3 와 SiO_2 가 반응하여 혼합형 형태로서 일부 포함된 것으로 XRD 측정 결과도 마찬가지로 대전보다 강릉에서 $CaCO_3$ 비율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다 [9]. 지금까지 강수량 그래프와 EDS 및 XRD 분석 결과를 통해 강릉과 대전 애자의 경도 차이 원인을 알아보았다. 따라서 수분에 따른 영향을 분석함으로써, 자기 애자의 시멘트 경도가 지역에 따라 차이가 발생하는 원인을 확인할 수 있었다.

4. 결론

자기 현수 애자의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 시멘트 부분의 경도를 측정함으로써 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 현수애자의 시멘트 부분의 경도 변화가 지역별로 차이가 발생하였고, 이러한 원인을 기상청 데이터를 이용하여 비교 및 분석한 결과 강수량의 차이가 영향을 끼치는 것으로 확인된다.
- 2) 경도 측정 결과 경도 값에 영향을 주는 수분과 반응하여 발생하는 최종 물질인 탄산칼슘($CaCO_3$)의 비율을 EDS와 XRD 분석을 통해 확인한 결과, 경도가 높은 강릉 애자 샘플의 경우 $CaCO_3$ 비율이 높게 나타났다.
- 3) 자기 현수 애자의 시멘트 경도 차이가 발생하는

원인을 지역에 따른 강수량 차이를 통하여 분석하였으며 수분에 반응하여 경도에 영향을 미치는 성분인 $CaCO_3$ 을 EDS와 XRD를 통하여 확인하였다.

- 4) 이러한 기후의 영향에 관한 분석 방법은 자기 현수 애자의 전기적·기계적 특성 변화가 지역에 따라 차이가 발생하는 것에 대한 새로운 접근 방법이 될 것이다.

감사의 글

The authors acknowledge the financial support of the National Research Foundation (NRF) of Korea by the Ministry of Education (NRF-2015R1D1A1A01059165). I.-H Choi also appreciates the funding support by through KEPCO for researches on transmission lines and insulators.

REFERENCES

- [1] J. H. Pi and Y. G. Choi, *Ceramist*, **19**, 15 (2016).
- [2] I. H. Choi, J. H. Choi, Y. H. Jung, D. I. Lee, G. J. Jung, T. W. Shin, and H. K. Bang, *Proc. KIEE Annual Conference*, A (KIEE, Busan, 2004) p. 527.
- [3] S. J. Chung, S. J. Lee, B. S. Sim, S. H. Heo, H. D. Kim, C. H. Kim, I. Y. Seo, and G. H. Lee, *Proc. KIIEE Annual Conference* (KIIEE, Hoengseong, 2016) p. 74.
- [4] C. S. Oh, Y. J. Lee, C. H. Ryu, B. W. Lee, G. B. Choi, and J. Y. Koo, *Proc. KIEE Annual Conference* (KIEE, Muju, 2009) p. 1461.
- [5] I. K. Song and C. Y. Kim, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, **49C**, 406 (2000).
- [6] J. Wang and W.C.K. Wong, *J. Mater. Process. Technol.*, **95**, 164 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00276-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00276-9)]
- [7] J. Gong, J. Wu, and Z. Guan, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **19**, 2625 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(99\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00043-6)]
- [8] J. J. Chen, L. Sorrelli, M. Vandamme, F. J. Ulm, and G. Chanvillard, *J. Am. Ceram. Soc.*, **93**, 1484 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03599.x>]
- [9] K. Okada and N. Ōtsuka, *J. Am. Ceram. Soc.*, **69**, 652 (1986). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb07466.x>]