

자기재/폴리머 계면이 하이브리드 애자의 미세구조, 절연특성과 전계분포에 미치는 영향

조준영¹, 김우석², 안호성³, 안희성³, 김태완³, 임윤석³, 배성환⁴, 박 찬^{1,5,a}

¹ 서울대학교 공과대학 재료공학부

² 한국산업기술대학교 에너지전기공학과

³ 한국전력 전력연구원

⁴ 경남대학교 나노신소재공학과

⁵ 서울대학교 신소재공동연구소

Effect of Porcelain/Polymer Interface on the Microstructure, Insulation Characteristics and Electrical Field Distribution of Hybrid Insulators

Jun-Young Cho¹, Woo-Seok Kim², Ho-Sung An³, Hee-Sung An³, Tae-wan Kim³,
 Yun-Seog Lim³, Sung-Hwan Bae⁴, and Chan Park^{1,5,a}

¹ Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

² Department of Energy and Electrical Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 15073, Korea

³ KEPCO Research Institute, Daejeon 34056, Korea

⁴ Department of Nano Science and Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

⁵ Research Institute of Advanced Materials, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

(Received June 30, 2017; Revised July 23, 2017; Accepted July 25, 2017)

Abstract: Hybrid insulators that have the advantages of both porcelain (high mechanical strength and chemical stability) as well as polymer (light weight and high resistance to pollution) insulators, can be used in place of individual porcelain and polymer insulators that are used for both mechanical support as well as electrical insulation of overhead power transmission lines. The most significant feature of hybrid insulators is the presence of porcelain/polymer interfaces where the porcelain and polymer are physically bonded. Individual porcelain and polymer insulators do not have such porcelain/polymer interfaces. Although the interface is expected to affect the mechanical/electrical properties of the hybrid insulator, systematic studies of the adhesion properties at the porcelain/polymer interface and the effect of the interface on the insulation characteristics and electric field distribution of the hybrid insulator have not been reported. In this study, we fabricated small hybrid insulator specimens with various types of interfaces and investigated the effect of the porcelain/polymer interface on the microstructure, insulating characteristics, and electric field distribution of the hybrid insulators. It was observed that the porcelain/polymer interface of the hybrid insulator does not have a significant effect on the insulating characteristics and electric field distribution, and the hybrid insulator can exhibit electrical insulating properties that are similar or superior to those of individual porcelain and polymer insulators.

Keywords: Hybrid insulator, Insulator, Interface microstructure, Electric field analysis, Insulating characteristics

a. Corresponding author; pchan@snu.ac.kr

1. 서론

송전선로에서 전선을 기계적으로 고정시키는 동시에 전기적 절연을 위해 사용되는 애자는 선로의 신뢰성을 결정하는 중요한 역할을 담당하고 있으며, 절연체의 재료에 따라 자기애자, 유리애자, 폴리머 애자로 크게 구분된다 [1-3]. 자기나 유리애자의 경우 기계적 특성이 우수하며, 장기 사용에 따른 화학적 안정성이 높은 장점을 가지고 있지만, 무거운 중량으로 인한 운반, 설치의 어려움이 있고 물리적 충격에 약하다는 단점이 있다. 반면 폴리머 애자의 경우, 가볍고 운반 및 설치가 용이하며 오손능성이 우수하다. 하지만 폴리머애자는 유기절연물의 내후성이 약하고, 불량애자 검출이 어려우며, 장기신뢰성이 검증되지 않았다는 단점이 있다 [1,2,4-7]. 따라서 기계적인 특성이 우수한 자기애자와 경량이며 내오손성이 우수한 폴리머 애자의 장점을 모두 가질 수 있는 하이브리드 애자 개발의 필요성이 증대되고 있다. 자기애자 및 폴리머 애자와는 다른 하이브리드 애자의 가장 큰 특징은 자기애자와 폴리머가 물리적으로 결합된 구조를 가지는 자기애자/폴리머 계면의 존재이다 [8-10]. 기존의 자기 애자 및 폴리머 애자의 경우 결합이나 열화에 의한 누설 전류의 변화, 유전 특성 변화, 전자파/열 발생, 기계적 특성의 변화, 전계/응력 분포 등 많은 연구가 이루어져 왔고, 이러한 결과들을 하이브리드 애자의 경우에도 적용할 수 있을 것이다 [11-17]. 하지만 하이브리드 애자의 자기애자/폴리머 계면은 자기애자 애자와 폴리머 애자에서는 고려할 필요가 없었던 새로운 변수이며, 자기애자/폴리머 계면이 하이브리드 애자의 전기적/기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 보고되지 않았다. 폴리머 애자에서도 FRP rod와 폴리머 사이의 계면이 존재하지만, 성질이 유사한 재료 사이의 계면이기 때문에 하이브리드 애자에서의 자기애자/폴리머 계면과는 애자의 특성에 미치는 영향의 정도가 많이 다를 수 있다. 송전용 하이브리드 애자의 성능 예측 및 개선, 신뢰성과 진단 기술의 확보 등을 위하여, 자기애자/폴리머 계면이 하이브리드 애자의 기계적/전기적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 2종의 폴리머, 4종의 접착제 그리고 직접 제조한 자기애자를 이용하여, 다양한 자기애자/폴리머 계면을 가지는 작은 하이브리드 애자 시편을 제조한 뒤, 자기애자/폴리머 계면의 미세구조와 계면이 하이브리드 애자의 절연 특성과 전계분포에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 하이브리드 애자 제조

다양한 자기애자/폴리머 계면을 가지는 작은 하이브리드 애자 시편을 제조하기 위해서 1종의 자기애자, 2종의 폴리머, 4종의 접착제가 사용되었다. 자기애자의 경우 Bauxite (CMP, <0.043 mm), 도석(진도광업, <0.089 mm), 장석(BMS, <0.2 mm), 목질점토(Sibelco, 0.043 mm), 와목점토(KCM, <0.043 mm)를 사용하여 직접 제조하였다. 폴리머와 접착제의 경우 다양한 회사에서 나오는 제품을 사용하였으며, 폴리머 A, B와 접착제 1, 2, 3, 4로 각각 표기하였다. 하이브리드 애자 시편에 사용할 자기애자를 제조하기 위해 Bauxite, 도석, 장석, 목질점토, 와목점토를 각각 13 : 26 : 24 : 22 : 15의 비율로 ball milling 혼합하였다. 혼합된 slurry는 탈철기와 진동체를 이용하여 철분과 큰 입자를 제거하였고, 필터프레스를 이용하여 수분 함량이 20% 내외인 filter cake를 제조하였다. 이를 진공 토련기를 이용하여 압출하였고, 상온에서 24시간 동안 숙성시킨 뒤 일정한 두께로 절단하였다. 그 후 원형틀을 이용하여 직경 68 mm의 원형 시편을 만들어 상온에서 48시간 건조시킨 후, 150°C에서 12시간 동안 추가 건조시켰다. 건조된 자기애자 시편 표면에 유약을 도포한 시편(시유자기애자)과 도포하지 않은 시편(무유자기애자)을 준비하였고, 이 후 1,300°C에서 약 38시간 열처리를 하여, ~68 mm의 직경과 ~2 mm의 두께를 가지는 시유자기애자와 무유자기애자를 제조하였다. X-선 회절(X-ray diffraction, XRD, New D8 advance, Bruker)와 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM, JSM-5600, JEOL)을 이용하여 제조한 자기애자 시편의 상 및 미세구조 분석을 진행하였다.

하이브리드 애자 시편 제작을 위해서 준비한 4종의 접착제를 시유자기애자와 무유자기애자 표면에 각각 도포한 후 건조과정을 통해 접착제의 액체 성분을 먼저 제거하였다. 이후 접착제의 건조가 완료된 자기애자 시편 위에 폴리머를 올려 놓고, 금형 프레스기구를 이용하여 170°C에서 10분간 압력을 가하여 최종적으로 16종의(1종의 자기애자, 2종의 폴리머, 4종의 접착제, 유약 유무: 표 1) 자기애자/폴리머 계면을 가지는, ~68 mm 직경과 ~4 mm 두께 (자기애자 2 mm + 폴리머 2 mm)의 하이브리드 애자 시편을 제조하였다. 제조한 하이브리드 애자 시편의 구조를 표 1에 나타내었다.

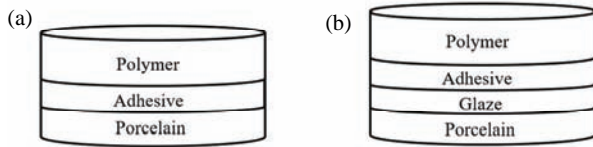


Fig. 1. (a) The structure of the hybrid specimens without glazing and (b) the structure of the hybrid specimens without glazing.

Table 1. Results of adhesion test of hybrid insulator specimens with 16 kinds of porcelain/polymer interface (without glazing ; a porcelain without glaze on the surface, glazing ; a porcelain with glaze on the surface).

Number	Porcelain	Polymer	Adhesive	Result of adhesion
1	Without glazing	A	Adhesive 1	Good
2			Adhesive 2	Good
3			Adhesive 3	Good
4			Adhesive 4	Good
5		B	Adhesive 1	Good
6			Adhesive 2	Good
7			Adhesive 3	Good
8			Adhesive 4	Good
9	Glazing	A	Adhesive 1	Poor
10			Adhesive 2	Poor
11			Adhesive 3	Poor
12			Adhesive 4	Poor
13		B	Adhesive 1	Poor
14			Adhesive 2	Poor
15			Adhesive 3	Poor
16			Adhesive 4	Poor

2.2 하이브리드 애자의 특성 분석

16종의 다양한 자기재/폴리머 계면을 가지는 하이브리드 애자의 기계적/전기적 특성을 비교 분석하기 위하여, 제조한 시편의 접착력, 절연특성, 그리고 전계분포를 분석하였다. 하이브리드애자 시편의 접착력은 자기재/폴리머 계면을 물리적으로 떼어내는 시험을 통해 분석하였고, 사용한 유약, 폴리머 및 접착제 종류가 하이브리드애자의 계면 접착력에 미치는 영향을 조사하였다. 계면의 미세구조는 전자현미경을 이용하여 관찰하였고, 그 결과를 접착력 시험 결과와 비교하였다. 자기재와 폴리머 사이의 계면이 하이브리드 애자의 절연

특성과 전계분포에 미치는 영향을 분석하였다. 절연특성은 내전압시험기(nissin electric)를 이용하여 IEC 60243-1:2013-03 [18]의 기준을 따라 측정하였다. 국내에서 사용되는 교류전압의 상용주파수는 60 Hz이며, 상기 표준은 48~62 Hz의 상용 주파수에서 고체 절연물질의 단시간 절연특성 결정을 위한 시험방법이기 때문에, 이 표준에 따라 절연특성을 측정하였다.

하이브리드 애자의 전계분포는 제조한 16종의 계면 조건을 고려하여, 동일한 형상의 하이브리드 애자를 모델링한 후 전계해석을 하였다. 전자기해석 프로그램인 CST EM Studio를 사용하여 3차원 모델링을 통해 자기재/폴리머 계면이 하이브리드 애자의 전계분포에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제조한 자기재 애자의 특성

하이브리드 애자 시편 제조에 사용하기 위하여 제조한 자기재의 상과 미세구조를 분석하였고, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 상 분석결과 자기재가 출발 원료인 Bauxite, 도석, 장석, 목질점토, 와목점토의 주요 성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 등으로 구성되어 있었으며, 그 외의 다른 이차상은 관찰되지 않았다. 제조한 자기재가 현재 사용되고 있는 자기애자와 유사한 상들로 구성되어 있는 것을 확인하였다. 자기재의 미세구조 분

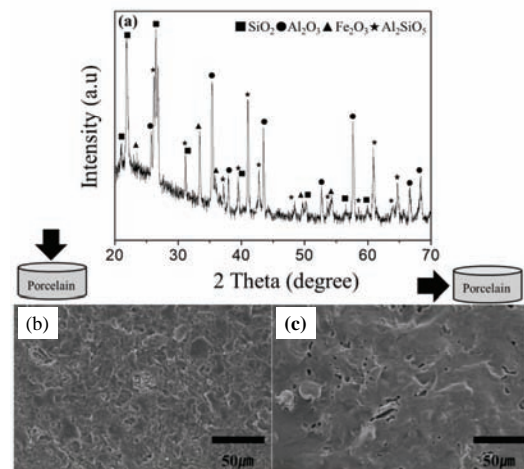


Fig. 2. (a) Result of the XRD phase analysis of the porcelain, (b) the microstructure on the surface of the porcelain, and (c) the microstructure on the fracture surface of the porcelain.

석 결과 시편 제조 시 가해진 압력 방향에 수직인 면의 경우 기공이 적고 치밀화 되어 있는 반면 평행한 면의 경우 기공이 많았다.

3.2 하이브리드 애자의 계면 특성

하이브리드 애자를 구성하는 자기재와 폴리머의 계면 특성을 분석하기 위해 시유한 자기재, 무유한 자기재, 2종의 폴리머, 4종의 접착제를 조합하여 총 16종의 계면을 가지는 애자 시편을 제조하였다. 각 시편의 직경과 두께는 ~68 mm × ~4 mm 이었다. 자기재와 폴리머 계면의 접착 특성을 분석하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 분석 결과 폴리머 및 접착제 종류에 상관없이 시유자기재 시편에 접착한 폴리머가 쉽게 떨어져 분리가 되는 반면에, 무유자기재 시편에 접착한 폴리머는 분리가 쉽지 않아 무유 시편의 접착력이 상대적으로 우수하였다.

유약 유무에 따른 계면 특성을 더 자세하게 관찰하기 위하여, SEM을 이용하여 폴리머/유약/자기재(폴리머/시유자기재)로 구성된 시편과 폴리머/자기재(폴리머/무유자기재)로 구성된 시편의 계면 미세구조를 비교 분석하였고 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 폴리머/유약/자기재 부분의 구조, 그림 3(b)와 (c)는 폴리머/유약 계면과, 유약/자기재 계면 부근의 미세구조를 보여준다. 유약층의 두께는 100~200 um 이었으며, 유약층에서 자기재 부분보다 많은 기공이 관찰되었다. 자기재와 유약사이의 계면은 연결 부분을 확인하기 어려울 정도로 결합이 강해 보이지만 폴리머와 유약사이의 결합은 자기재/유약 계면보다 결합이 약해 보였다. 실제로 접착력 시험을 통해 유약층이 있는 애자 시편의 경우 유약층이 없는 애자 시편에 비해 접착력이 좋지 않았고, 이것을 계면 미세구조에서 확인할 수 있었다. 접착력 시험과 미세구조 분석을 통해, 상대적으로 강한 자기재/폴리머 계면 접착력을 가지는 하이브리드 애자의 제조를 위해서는 유약을 사용하지 않는 것이 좋다고 판단된다. 그림 4는 유약을 사용하지 않은 하이브리드 애자 시편의 자기재/폴리머 계면 부근의 미세구조를 보여준다. 그림 4(a)~(d)는 폴리머 A를 사용하였을 때 4종의 접착제를 이용하여 제조한 하이브리드 애자 시편의 계면 미세구조를, 그림 4(e)~(h)는 폴리머 B를 사용하였을 때 4종의 접착제를 이용하여 제조한 하이브리드 애자 시편의 계면 미세구조를 보여준다. 폴리머 A를 사용한 경우와 폴리머 B를 사용한 자기재/폴리머 계면의 미세구조는 큰 차이가 없었

으며, 접착제 종류에 따른 자기재/폴리머 계면의 미세구조도 큰 변화가 없었다. 이를 통해 폴리머 및 접착제가 자기재/폴리머 계면 특성에 미치는 영향은 크지 않다고 판단하였다. 하지만 단순히 미세구조만으로 계면 특성을 판단하는 것은 충분하지 않기 때문에 전기절연 특성을 측정하여 비교 분석하였다.

표 2는 제조한 하이브리드 애자 시편의 절연내력 측정값이다. 비록 그 차이는 크지 않았지만, 폴리머 A를 사용하여 제조한 하이브리드 애자 시편이 폴리머 B를 이용하여 제조한 애자 시편보다 상대적으로 높은 절연내력 값을 보였다. 애자의 절연 특성은 계면의 접착 특성에 의해 영향을 받을 수 있다. 만약 높은 전압 인

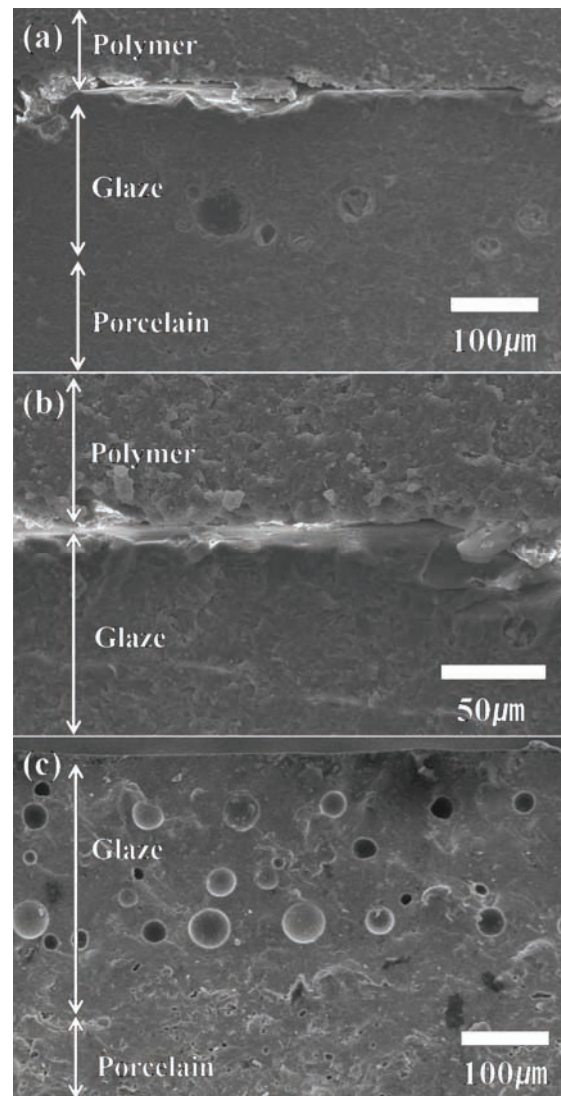


Fig. 3. Microstructure of hybrid insulator specimens, (a) polymer/glaze/porcelain, (b) polymer/glaze, and (c) glaze/porcelain.

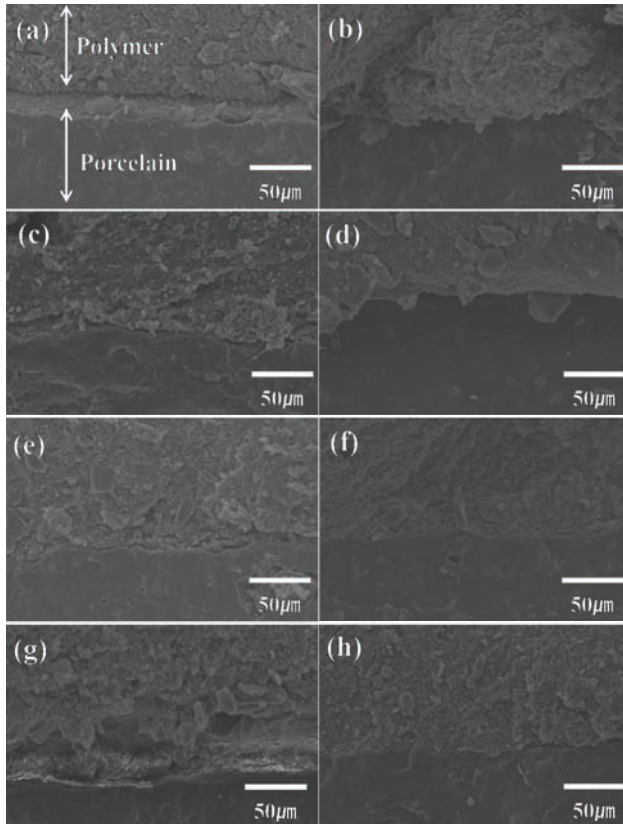


Fig. 4. Microstructure near the porcelain(without glazing)/polymer interface of hybrid insulator specimen. The microstructure of the hybrid insulator specimen prepared using polymer A and four kinds of adhesives (a) adhesive 1, (b) adhesive 2, (c) adhesive 3, and (d) adhesive 4. The microstructure of the hybrid insulator specimen prepared using polymer B and four kinds of adhesives (e) adhesive 1, (f) adhesive 2, (g) adhesive 3, and (h) adhesive 4.

가 시 계면에 많은 수의 공극이 존재하면 이 부분에서 부분 방전이 발생하고 계면의 절연 파괴가 일어날 수 있다. 즉 강한 접착력을 가지는 계면을 가지는 경우, 계면 부근의 공극이 감소하여 전계가 국부적으로 집중되는 정도가 약화되며, 이것이 상대적으로 높은 절연내력으로 연결될 수 있다. 앞선 미세구조 분석에서 폴리머 종류에 따른 자기재/폴리머 계면 구조의 차이가 크지 않았기 때문에, 계면 접착력이 절연내력에 미치는 영향은 크지 않을 것이다. 본 연구에서 사용한 폴리머 A의 유전율은 4.0이며, 폴리머 B의 유전율은 3.8이다. 폴리머 A를 사용한 하이브리드 애자가 절연내력이 높은 이유는 폴리머 A의 유전율이 폴리머 B에 비하여 높기 때문인 것으로 보인다.

Table 2. Results of insulation characteristics of hybrid insulator specimens with 16 kinds of porcelain/polymer interface (without glazing ; a porcelain without glaze on the surface, glazing ; a porcelain with glaze on the surface).

Number	Porcelain	Polymer	Adhesive	Breakdown Voltage (KV)	Sample thickness (mm)	Dielectric strength (KV/mm)	
1			1	51.1	3.9	12.9	
2		A	2	45.6	3.7	12.5	
3			3	49.6	3.6	13.6	
4	Without glazing		4	47.7	3.5	13.7	
5				1	52.1	4.4	12.0
6			B	2	44.4	4.2	10.5
7				3	50.0	4.3	11.8
8		4		49.8	4.1	12.0	
9			1	57.5	4.0	11.6	
10		A	2	54.4	4.2	12.8	
11			3	54.4	3.9	13.4	
12	Glazing		4	54.3	4.0	12.7	
13				1	57.7	4.5	10.9
14			B	2	56.8	4.8	11.8
15				3	55.9	4.4	11.6
16			4	56.7	4.6	11.8	

측정한 하이브리드 애자의 절연내력은 11~15 kV/mm의 범위를 가지고 있었으며, 하이브리드 애자 제조에 사용한 자기재와 폴리머 시편의 절연내력은 측정 결과 각각 8~10 kV/mm와 14~16 kV/mm의 범위를 가지고 있었다. 앞선 접착력 시험과 절연내력 결과로부터, 하이브리드 애자가 자기 혹은 폴리머 애자와 유사한 수준의 전기 절연 특성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 작고 단순한 형태의 하이브리드 애자 시편을 제조하고 절연특성을 측정하였지만, 실제 하이브리드 애자 제품을 설계하기 위해서는, 최종 제품의 재료특성과 형상을 모델링하여 전계분포를 예측하는 것이 필요하다. 특히, 본 연구에서 다루고 있는 것과 같이 복합구조물의 형태를 띠고 있는 하이브리드 애자의 경우에는, 성질이 상이한 여러 재료들의 계면구조가 복잡한 형태로 존재하기 때문에, 이로 인한 전계분포의 변화를 예측하는 것이 매우 중요하다. 하이브리드 애자의 자기재/폴리머 계면이 전계분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 하이브리드 애자를 3차원 모델링하여 전계분포를 해석하였다.

본 연구에서 사용된, 총 12가지의 서로 다른 계면을

Table 3. The medium constants (permittivity) used to analyze the electric field distribution of the hybrid insulator.

Field	Medium constant (permittivity)	
Air	1.0	
Porcelain	6.0	
Polymer	A	4.0
	B	3.8
Adhesive	Adhesive 1	1, 2, 3, 5, 7, 9
	Adhesive 2	
	Adhesive 3	
	Adhesive 4	
Glaze	8.6	
Cement	2.6	

가지는 하이브리드 애자 시편의 전계분포 해석 결과, 사용된 폴리머의 종류, 계면에 사용되는 접착제의 유전율, 그리고 유약의 유무에 관계없이 하이브리드애자의 전계분포가 유사하다는 것을 확인하였다.

표 3은 전계분포 해석에 사용된 각 재료별 유전율을 보여준다. 본 연구에서는 총 4가지 종류의 접착제를 사용하였으나, 각 접착제의 유전율이 알려진 바가 없어 접착제의 유전율을 1, 2, 3, 5, 7 그리고 9로 변화시키면서 접착제 유전율의 변화에 의한 전계분포의 변화를 분석하였다. 전계분포 해석 모델에 적용된 하이브리드 애자의 계면은 총 12가지이다(2종의 폴리머 × 6가지 유전율을 가지는 접착제). 또한 본 연구에서는 계면의 두께가 전계 분포에 미치는 영향을 배제하기 위해 모델 내 모든 계면의 두께를 0.1 mm로 일정하다고 가정 후 해석을 수행하였다.

그림 5는 하이브리드 애자의 단면 구조와 사용된 폴리머의 유전율이 하이브리드 애자의 전계분포에 미치는 영향을 분석한 결과를 보여준다. 자기재, 시멘트 그리고 폴리머가 만나는 삼중점 부근의 전계의 세기를 비교해본 결과, 폴리머에 인가되는 가장 높은 전계의 세기는 폴리머 A를 적용한 경우에는 약 1.38 kV/mm, 폴리머 B를 적용한 경우에는 약 1.36 kV/mm이었다. 이는 본 연구에서 계면의 영향을 고려하지 않은 경우와 약 1% 내외의 오차를 가지며, 실용적인 입장에서 거의 차이가 없음을 확인하였다. 또한 자기재/폴리머

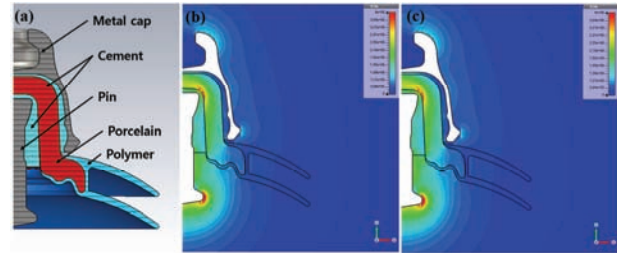


Fig. 5. (a) Cross-sectional structure of hybrid insulator and electric field distribution of hybrid insulator with (b) polymer A and (c) polymer B. The permittivities of material used were 4.0 (polymer A), 3.8 (polymer B), 2.0 (adhesive) and 6.0 (porcelain).

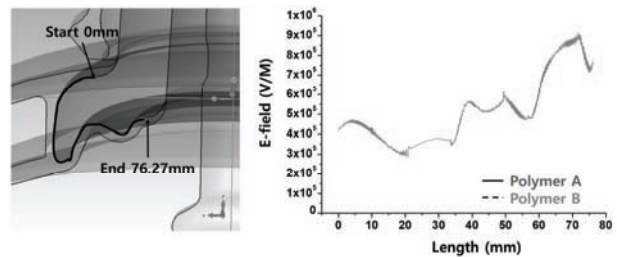


Fig. 6. The effect of permittivity of polymer on the electric field distribution in porcelain/polymer interface of hybrid insulator.

계면에서의 전계의 세기를 계면을 따라 계산하였고, 이를 그림 6에 나타내었다. 두 가지 서로 다른 폴리머의 유전율을 적용하였을 때의 전계의 세기 분포를 동일한 계면을 따라가면서 나타내었으며, 두 경우 해석결과를 비교하였을 때 거의 차이를 보이지 않았다. 본 해석 결과에 의하면, 실용적인 범위에서 하이브리드 애자의 절연특성은 본 연구에서 사용된 폴리머의 종류에 관계없이 거의 일정하였다.

또한 계면에 사용되는 접착제 및 유약층이 전계분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 폴리머 A를 사용하는 경우 유약층의 유무와 접착제의 유전율을 1, 3, 5, 7, 그리고 9로 변화시키며 하이브리드 애자의 전계분포를 해석하였고, 계면 부분의 전계분포 해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 계면을 따라 표현된 가상의 선을 따라가면서 전계의 세기를 계산하였다. 전계의 세기 분포는 접착제의 유전율 변화에 관계없이 오차 범위 약 1% 내로 거의 변화가 없었다. 또한 유약층이 존재하는 하이브리드 애자를 모델링하여 분석한 전계분포에서도 큰 차이가 없었다.

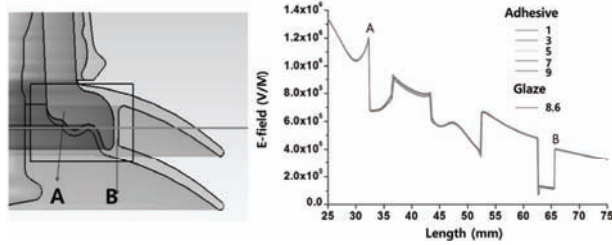


Fig. 7. The effect of permittivity of adhesive and glaze on the electric field distribution in the porcelain/polymer interface of hybrid insulator.

4. 결론

자기재 애자의 우수한 기계적 특성과 화학적 안정성 그리고 폴리머 애자의 운반 및 설치의 용이, 우수한 내오손특성을 가질 수 있는 하이브리드 애자의 자기재/폴리머 계면이 애자의 미세구조, 절연특성 그리고 전계분포에 미치는 영향을 조사하였다. 다양한 폴리머와 접착제를 사용하여 총 16 종류의 상이한 자기재/폴리머 계면을 가지는 작은 하이브리드 애자 시편을 제조하고, 미세구조, 계면 접착력, 절연특성 등을 분석하고 전계분포 해석을 실시하였다.

자기재 표면에 유약을 사용할 경우, 자기재/폴리머 계면 접착력이 저하되며, 폴리머 및 접착제의 종류가 자기재/폴리머 계면 접착력에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 확인하였다. 사용된 폴리머의 유전 특성이 하이브리드 애자 시편의 절연 특성에 영향을 주는 것과, 하이브리드 애자의 절연내력은 11~15 kV/mm의 범위를 가지며 자기재 애자 혹은 폴리머 애자와 유사한 수준의 절연특성을 가지는 것을 확인하였다. 유전율을 포함한 폴리머의 특성과 자기재와 폴리머를 접착하기 위하여 사용된 접착제의 특성이 하이브리드 애자의 전계분포에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 확인하였다. 하이브리드 애자는 현재 사용되고 있는 송전용 자기재 그리고 폴리머 애자와 유사하거나 더 우수한 전기절연 특성을 가질 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2013년 선정 BK21플러스 사업(과제번호: 21A20131912052)과 한국전력공사의 2015년 선정 기

초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R15XA03-33).

REFERENCES

- [1] J. Looms, *Insulators for High Voltages* (Peter Pergrinus Ltd., London, 1988).
- [2] H. M. Schneider, J. F. Hall, G. Karady, and J. Renowden, *IEEE Trans. Power Del.*, **4**, 2214 (1989). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.35649>]
- [3] J. Mackevich and M. Shah, *IEEE Electr. Insul. Magazine*, **13**, 5 (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/57.591510>]
- [4] J. F. Hall, *IEEE Trans. Power Del.*, **8**, 376 (1993). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.180359>]
- [5] S. C. Kim and T. Y. Kim, *Proceedings of KIEE*, **48**, 22 (1999).
- [6] J. H. Lee, B. S. Lee, J. B. Lee, and T. H. Kwon, *Bulletin of the Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **17**, 14 (2004).
- [7] X. Jiang, J. Yuan, L. Shu, Z. Zhang, J. Hu, and F. Mao, *IEEE Trans. Power Del.*, **23**, 1183 (2008) [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.908779>]
- [8] J.S.T. Looms, *IEEE Electr. Insul. Magazine*, **4**, 11 (1988). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/57.7985>]
- [9] M. G. Mardika, T. A. Puri, Suwarno, M. Walch, U. Schichler, and G. Godel, *Pro. 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (IEEE, Chiang Mai, Thailand, 2015) p. 394. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICITEED.2015.7408978>]
- [10] G. Goedel, M. Muhr, J. M. George, and K. Pointner, *Elektrotech. Inftech.*, **134**, 53 (2017). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00502-016-0451-5>]
- [11] A. P. Mishra, R. S. Gorur, and S. Venkataraman, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 467 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483466>]
- [12] Y. Xiong, S. M. Rowland, J. Robertson, and R. J. Day, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 763 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2008.4543114>]
- [13] S. Chandrasekar, C. Kalaiivanan, A. Cavallini, and G. C. Montanari, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16**, 574 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2009.4815193>]
- [14] A. Rawat and R. S. Gorur, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16**, 107 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784557>]
- [15] S. M. Rowland, J. Robertson, Y. Xiong, and R. J. Day, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 375 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2010.5448091>]
- [16] E. A. Cherney, A. C. Baker, J. Kuffel, Z. Lodi, A. Phillips, D. G. Powell, and G. A. Stewart, *IEEE Trans. Power Del.*

- 29, 275 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2288776>]
- [17] E. Cherney, A. Baker, B. Freimark, R. Gorur, Z. Lodi, M. Marzinotto, I. Ramirez-Vazquez, and G. Stewart, *IEEE Trans. Power Del.*, **30**, 1145 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2369457>]
- [18] *Electrical Strength of Insulating Materials-Test Methods-Part 1: Test at Power Frequencies*, **IEC 60243-1**, 53 (2013).