

HVDC GIS용 에폭시 스페이스의 재질과 형상에 따른 전계분포 특성 연구

구재홍, 황재상, 권익수, 신우주, 구자윤, 이방욱[†]
한양대학교

An Investigation on DC Electric Field Distribution according to the Material and Configuration of Epoxy Spacer for HVDC GIS

Jae-Hong Koo, Jae-Sang Hwang, Ik-Soo Kwon, Woo-Ju Shin, Ja-Yoon Koo Bang-Wook Lee[†]
Hanyang University

Abstract - 본 논문에서 HVDC SF₆ 가스절연시스템(GIS)에서 최적의 에폭시 재질을 알아내기 위해 Al₂O₃와 SiO₂ 나노필러가 첨가된 총 다섯 종류의 에폭시에 대한 도전율을 측정하여 DC 전계분포 해석을 수행하였다. 해석결과 75°의 접촉각(에폭시 스페이스와 도체가 이루는 각도)가 가장 우수한 전계특성을 나타냈고 Al₂O₃ 2 hundred per resin(phr)의 나노필러가 첨가된 에폭시가 가장 우수한 절연매질로서의 특성을 보여주었다. 또한, 삼중점에서 전계집중 완화를 위하여 Al₂O₃ 2 phr의 나노필러가 첨가된 에폭시의 데이터를 기반으로 열해석을 고려한 정상상태 및 극성반전에 대해 DC 전계 해석을 수행하여 최적의 에폭시 스페이스 형상을 도출하였다.

열 전도율을 각각 0.0155 W·m⁻¹·K⁻¹, 2.09W·m⁻¹·K⁻¹로 입력하였으며 도체의 온도를 GIS 내 도체부의 온도를 90℃, 접지부의 온도를 20℃로 입력하였다. 해석 수행에 사용된 HVDC GIS 형상은 그림 1에 나타나있다. 그림 2는 열 해석을 고려한 정상상태 및 극성반전에서의 최대전계(E_{max})를 보여준다. 해석결과 접촉각(α)가 90°가 가장 우수한 절연 성능을 보이는 것으로 나타났으나, 현실적으로 90°의 접촉각을 가지는 스페이스의 경우 열변형거리를 확보하는데 어려움이 있어 SF₆ 가스와 에폭시의 계면에서 표면 섬락이 일어날 가능성이 상존한다. 그러므로 본 논문의 해석을 기반으로 75°의 접촉각을 지니는 스페이스가 최적의 형상이라는 결론을 도출하였다.

접촉각 외에 적절한 절연매질을 찾기 위해 (1)식과 같이 정상상태와 극성반전 시의 E_{max}의 비를 구하는 식을 도입하였다.

$$E_{max} \text{의 비} = \frac{\text{극성반전 시 } E_{max}}{\text{정상상태 } E_{max}} \quad (1)$$

만약 정상상태와 극성반전 시 E_{max} 값의 차이가 크다면 급격한 전계 집중의 변화로 시스템은 절연파괴에 취약해질 수 있다. 그러므로 E_{max}의 비가 작은 경우 가장 안정적인 시스템이라는 것을 유추할 수 있으며 최적이라고 판단된 75°에 대한 E_{max}의 비를 표 2에 요약하였다. 결과적으로 75°의 접촉각을 지니고 Al₂O₃ 2 phr의 나노필러가 첨가된 에폭시로 제조된 스페이스가 최적인 것으로 판단되었으며 해석결과가 그림 3에 나타나 있다.

1. 서 론

최근 HVDC 절연 매질로써 나노필러가 첨가된 에폭시가 많은 주목을 받고 있다. 수 년 전부터 지속적으로 진행된 연구에 따르면, 마이크로 혹은 나노필러를 첨가한 에폭시 기반 화합물은 순수 에폭시에 비해 높은 열 전도성과 열 저항을 가지므로 개선된 열 특성 성질을 띤다고 보고되고 있다 [1-3]. 이러한 새로운 유형의 전력매질의 발전은 설비의 소형화를 가능하게 하며 기존 설비보다 긴 수명을 갖도록 해준다 [4]. 절연물에 주로 첨가되는 필러의 종류로는 알루미늄(Al₂O₃)와 용융실리카(SiO₂)가 있다 [5]. Al₂O₃와 SiO₂, 모두는 절연물과 적절한 비율로 합성되면 절연성을 향상시킬 수 있지만 비율이 높아지면 오히려 절연성이 감소하는 반대의 특성이 나타난다 [6]. 본 연구에서는 실험을 통하여 도출한 전기적 도전율 값을 이용하여 DC 전계분포해석을 수행, HVDC GIS용 스페이스의 절연물로서의 적합성을 판단하였다. 더불어 DC 전계분포해석결과를 기반으로 가장 적합하다고 판단된 절연 매질에 대해 도체, SF₆ 가스 및 에폭시가 접촉하는 삼중점의 전계집중을 접지부 및 스페이스의 형상을 변화시켜 전계를 완화시키는 방안을 모색하였다.

2. 본 론

2.1 도전율 측정실험

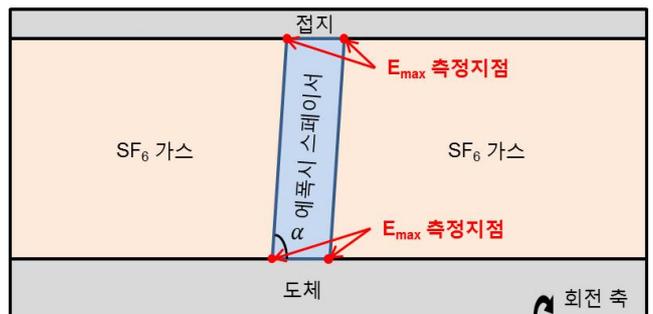
HVDC GIS용 스페이스의 전계분포 해석을 위해서는 우선적으로 스페이스의 절연물인 에폭시 기반 화합물의 전기 도전율 값을 도출해야 한다. 전기 도전율은 온도에 따라 변하는 파라미터로써 DC 전계분포 해석에 있어 반드시 필요한 물성이다. 누설전류 측정 실험은 미소 전류를 이용하여 측정하는 정밀한 실험이기 때문에 주변 전자기 영향을 배제하기 위하여 전자계 차폐실에서 실시하였다. Mitsubishi社의 -60 kV 급 DC 전압발생기를 이용하여 에폭시 시료가 삽입된 샘플홀더에 DC 전압을 인가하였고 KEITHLEY社의 6517A Electrometer를 이용하여 미소 전류를 측정하였다. 본 연구에서는 온도에 따른 에폭시의 도전율 값의 추세를 얻기 위해 20℃, 40℃, 60℃, 90℃에서 다섯 가지 시료의 도전율을 측정하였다. 실험을 통해 도출된 각 시료의 온도에 따른 도전율의 추세를 표1에 요약되어 있다. 각 시료의 추세선식은 Al₂O₃ 2 phr 시료의 추세선식을 기준으로 일반화한 수치다.

2.2 온도를 고려한 DC 전계해석

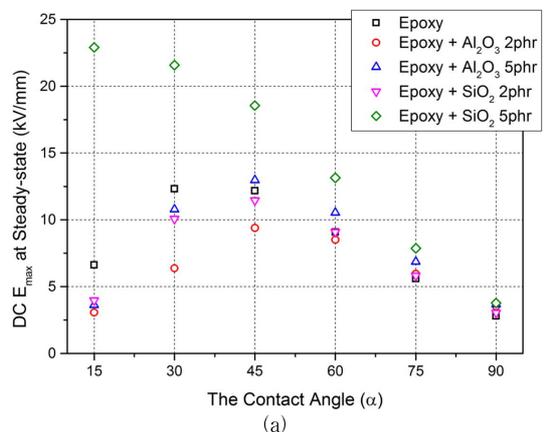
온도를 고려한 DC 전계해석을 위해 해석조건에 SF₆ 가스와 에폭시의

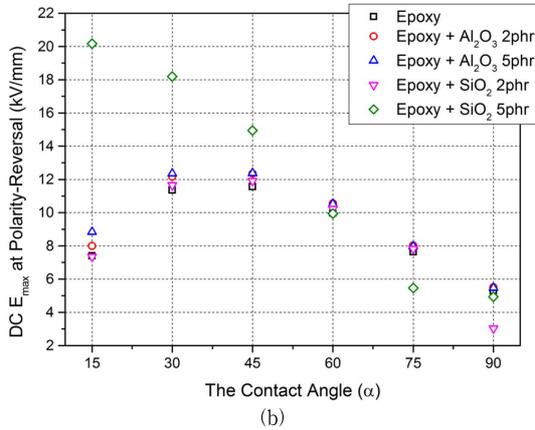
〈표 1〉 Al₂O₃ 2 phr 기준, 온도에 따른 도전율 추세선식

시료	온도에 따른 도전율 추세선 식
Neat	(2.16E3) exp [0.72T]
Al ₂ O ₃ 2 phr	exp [T]
Al ₂ O ₃ 5 phr	(2.00) exp [0.88T]
SiO ₂ 2 phr	(1.36E2) exp [0.81T]
SiO ₂ 5 phr	(1.94) exp [0.72T]

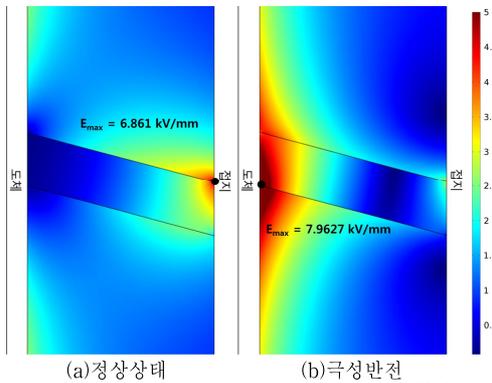


〈그림 1〉 전계해석에 사용된 개선된 형상의 HVDC GIS





〈그림 2〉 정상상태와 극성반전 시 각 시료의 E_{max}



〈그림 3〉 접촉각 75° 및 Al₂O₃ 2 phr 나노필러가 첨가된 에폭시의 열해석을 반영한 DC 전계분포 해석결과: (a) 정상상태 (b) 극성반전

〈표 3〉 각 시료별 E_{max}의 비

	Neat	Al ₂ O ₃ 2 phr	Al ₂ O ₃ 5 phr	SiO ₂ 2 phr	SiO ₂ 5 phr
Ratio	1.3662	1.1606	1.3466	1.3451	0.6940

2.3 개선된 형상의 HVDC GIS에 대한 DC 전계해석

GIS의 접촉각과 각각의 나노필러가 첨가된 에폭시에 대해 온도에 따른 DC 전계해석을 수행한 결과 75° 및 Al₂O₃ 2 phr 나노필러가 첨가된 에폭시가 가장 우수한 절연 성능을 보여주었다. 하지만 스페이서, 도체 및 기체가 만나는 삼중점에서의 전계집중 현상은 안정적인 HVDC GIS의 운용에 여전히 큰 문제점으로 작용한다. 그러므로 AC에서 활용되는 전계 완화 방식을 기반으로 개선된 형상의 HVDC GIS에 대한 DC 전계 해석을 통해 정상상태와 극성반전 시, 최적의 형상을 도출하였다. 그림 4는 개선된 형상의 HVDC GIS를 나타낸다. 접지층 삼중점의 전계집중을 완화하기 위해 에폭시 스페이서와 접지 사이의 간격(β)과 접지로부터 수직방향으로 돌출된 에폭시 스페이서의 길이(γ)를 변화시켜가며 DC 전계해석을 수행하였다 [7]. 그리고 가장자리에서의 전계집중을 방지하기 위해 접지와 에폭시 스페이서 사이 공간의 접지부에 20 mm의 라운딩 처리를 하였다. 해석 결과, 일부는 기존의 HVDC GIS보다 더 높은 전계를 보여주었지만 대부분은 개선된 DC 전계분포 양상을 나타냈다. 표 4에 β , γ 를 바꾸가며 DC 전계해석을 한 결과를 통해 정상상태와 극성반전 시 E_{max}의 비를 요약하였다. 그 결과 $\beta = 4$ mm, $\gamma = 0$ mm 일 때 가장 작은 E_{max}의 비를 보여줬다. 결과적으로 스페이서와 접지 사이에 간격을 삽입함으로써 전계를 완화할 수 있지만 접지로부터 수직방향으로 돌출된 에폭시 스페이서의 길이를 변화시키는 것은 오히려 DC 전계분포를 더 집중시킨다는 것을 확인할 수 있었으며 이는 그림 5에 도시되어 있다.

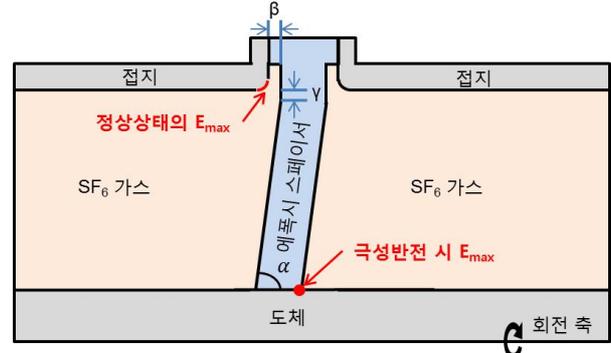
3. 결 론

본 논문에서는 열 해석을 고려한 도전을 기반한 HVDC GIS의 DC 전계 해석을 수행하였다. 결과적으로 해석결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

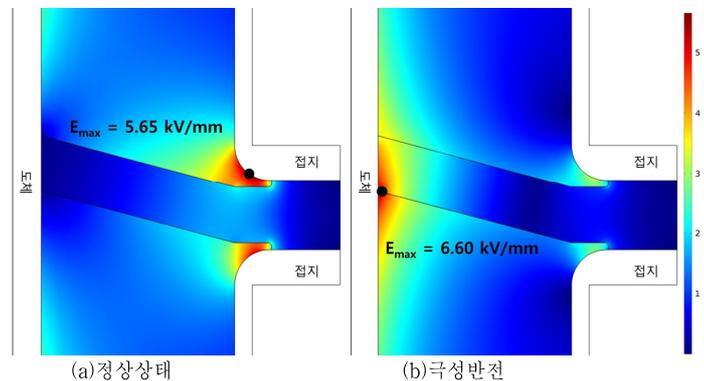
1. 해석결과를 토대로 75°가 정상상태와 극성반전 시 가장 낮은 E_{max}를 가졌으므로 최적의 접촉각으로 선정되었다.

〈표 4〉 $\beta \setminus \gamma$ 조합에 따른 E_{max}의 비

$\beta \setminus \gamma$	0	10	20	30	40	50	60
2	기존 HVDC GIS보다 큰 DC 전계강도						
4	1.17	1.24	1.29	1.35	1.42	1.50	
6	1.39	1.50	1.58	1.65	1.73	1.80	
8	1.60	1.74	1.84	1.94	2.01		
10	1.81	1.96	2.10	2.21			



〈그림 4〉 전계해석에 사용된 개선된 형상의 HVDC GIS



〈그림 5〉 개선된 형상의 HVDC GIS에 대해 열해석을 반영한 DC 전계분포 해석결과: (a) 정상상태 (b) 극성반전

2. Al₂O₃ 2 phr이 첨가된 에폭시 재질이 E_{max} 비가 가장 작아 가장 우수한 절연매질로 선정되었다.
3. 개선된 형상의 HVDC GIS는 AC와 같은 방식으로 접지부와 에폭시 스페이서 사이의 간격을 좁으로써 전계를 완화시킬 수 있었다.
4. 결과적으로 AC에서도 활용하는 방식으로 DC의 전계집중을 완화시킬 수 있었으며 $\beta = 4$ mm, $\gamma = 0$ mm가 가장 우수한 성능을 보여줬다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Guo, Y. Chen, Z. Jia, T. Tanaka, J. Wu, Y. Cheng: "Study on electrical properties of micro-nano structured epoxy composites", IEEE ISEIM, pp. 441-444, 2014.
- [2] S. Santanu, M. Joy Thomas: "Dielectric properties of epoxy nanocomposites", IEEE TDEI, Vol. 15, No. 1, pp. 12-23, 2008.
- [3] J. Katayama, Y. Ohki, N. Fuse, M. Kozako, T. Tanaka: "Effects of nanofiller materials on the dielectric properties of epoxy nanocomposites IEEE TDEI, Vol. 20, No. 1, pp. 157-165, 2013.
- [4] T. Imai, F. Sawa, T. Nakano, T. Ozaki, T. Shimizu, M. Kozako, T. Tanaka: "Effects of nano- and micro-filler mixture on electrical insulation properties of epoxy based composites", IEEE TDEI, Vol. 13, No. 1, pp. 319-326, 2006.
- [5] T. S. Ramu, H. N. Nagamani: "Alumina and Silica based Epoxy Nano-composites for Electrical Insulation", IEEE TDEI, Vol. 21, No. 1, pp. 236-243, 2014.
- [6] T. Andritsch, R. Kochetove, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit: "Short term DC breakdown and complex permittivity of Al₂O₃-and MgO-epoxy nanocomposites", IEEE, CEIDP, pp. 1-4, 2010.
- [7] K. Itaka, T. Hara, T. Misaki, H. Tsuboi: "Improved Structure Avoiding Local Field Intensification on Spacers in SF₆ Gas" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 250 - 255, 1983