

SiO₂와 Al₂O₃를 충전재료로 사용하는 초고압 GIS용 에폭시 절연물 베리어의 전기적 및 기계적 특성에 관한 연구

서왕벽¹, 배동호^{2,a}

¹ 영남대학교 기계공학부

² 성균관대학교 기계공학부

A Study on Electrical and Mechanical Properties of Epoxy Insulation Barrier for High Voltage GIS Using a Filler of SiO₂ and Al₂O₃

Wang-Byuck Suh¹ and Dong-Ho Bae^{2,a}

¹ Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 280, Korea

² Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 300, Korea

(Received April 26, 2015; Revised May 23, 2015; Accepted May 24, 2015)

Abstract: Some insulating materials are organized and analyzed with variables to obtain the optimized profile of encapsulated three phase of epoxy barrier which is applied to gas compartment and supporting conductors for high voltage GIS (gas insulated switchgear). The high voltage GIS is used in electrical power system and operating reliability. In this paper, optimization possibility of barrier shape including both electrical insulation performance and mechanical strength, premised on that condition minimizing volume and light weight should be kept for high voltage GIS, could be achieved by analysis simulation. As a result, filling material which is lower permittivity such as SiO₂ instead of Al₂O₃ properly to the epoxy material, can be improved to increase the electrical insulation performance and mechanical strength for an optimized profile barrier of a high voltage GIS.

Keywords: High voltage GIS, Barrier, Enclosure, Epoxy, SiO₂, Al₂O₃, Filler, SF₆, Electric field, Permittivity

1. 서론

최근의 전력계통에서 초고압 분야의 145 kV급 이상의 가스절연개폐장치 (gas insulated switchgear, GIS)는 계통에서 차지하는 비중이 날로 증가되고 있으며, 고 신뢰성, 소형화 와 경량화 측면에서 그 범위를 확대해 나가고 있는 추세이다 [1,2]. 이러한 환경에서

GIS는 외함 (enclosure)을 최소화해야 하고, 외함을 최소화하기 위해서는 SF₆ 가스를 구획하고 있고, 통전 도체부를 지지해주는 에폭시 (epoxy) 소재 계열의 절연 베리어 (barrier)가 소형화 및 경량화 되어져야 한다 [3].

초고압급에 사용되는 베리어는 주재료인 에폭시 소재와 충전재료인 필러 (filler)가 유전율 3.8에서 6까지 사용되고 있으나, 상대적으로 작은 1.03의 SF₆ 가스로 인해 베리어의 계면 절연에 취약한 성질을 보여주고 있어 [4-6] 전기적 특성의 개선과 외함 내부의 SF₆ 가스의 증가와 소형화에 따른 베리어의 기계적 특성의 개선이 필요하게 되었다.

a. Corresponding author; bae@yurim.skku.ac.kr

본 논문에서는 GIS 베리어의 전기적인 절연성과 기계적인 강도(strength)를 동시에 향상시키면서 소형화 경량화가 될 수 있는 최적 형상의 베리어를 구하고자 하였으며, 주재료인 에폭시 소재와 충전재료인 필러의 혼합비율을 변경함에 따라 초고압 분야의 적용 타당성 검토를 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 베리어 모델링

본 논문에서 베리어는 방전 개시 전압을 기준으로 전계를 계산 하였고, 신규 소재의 적용과 압력변화에 따른 강도를 가혹한 조건하에서 계산하였다. 그리고 유전 알고리즘과 연계하여 초고압 GIS에 적용할 소형화 경량화에 적합한 최적형상의 베리어를 구현하고자 하였다.

해석에 사용된 베리어의 기본 모델은 그림 1과 같이 3상 일괄 형태로 되어있으며, 해석을 수행하는 동안 도체의 형상이 베리어 표면 부분에 전계의 영향을 미치지 않도록 말단부에 곡면 처리를 하였다. 그리고 도체부를 지지하고 있는 베리어의 각 표면에는 곡면 강화를 위한 외관 형태를 만들고, 소재의 적용 가능성을 검토하고자 충전재료인 SiO₂와 Al₂O₃ 두 가지 소재를 각각 적용하면서 비교하였다. 소형 및 경량화의 추세에 기인하여 베리어의 외경과 두께 부를 최소화 하는 형상을 설계하고, 내부압력은 설계 최고 파열압력을 기준으로 외함에 설치되는 구조로 모사(simulation)하였다. 해석에 사용된 파라메타(parameter)는 표 1에 나타났다.

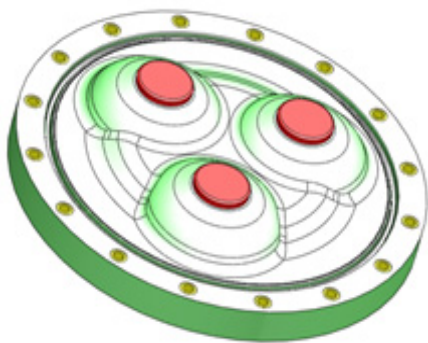


Fig. 1. Geometry of barrier for modeling.

Table 1. Calculation parameters.

Parameter / Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Permittivity	3.8	6
Weight (kg)	28	38
Young's modulus (GPa)	10	3.9
Tensile strength (MPa)	70	55
Poisson's ratio	0.35	0.3
Break down voltage (kV)	780	
Bursting pressure (MPa)	2.64	

2.2 베리어 전계강도

GIS 베리어의 전기적인 절연설계는 유전율이 3.8인 SiO₂와 6인 Al₂O₃ 충전재료를 갖는 각각의 에폭시 소재의 베리어를 유전율이 1.03인 SF₆ 가스가 균일하게 최소 압력으로 가해지는 형태로 하였다. 3개의 도체가 하나의 베리어에 동시에 존재하기 때문에 상과 상 사이와 상과 대지간 사이의 각각에 대해 설계 최고 충격전압에 대한 전계강도를 모두 계산하였다. 동시에 양방향 가스 압력이 동시에 존재하는 비대칭 구조의 베리어이므로 앞면과 뒷면 모두를 계산하고 도체에서 대지까지의 직선에 대한 방전개시 전압도 계산하였다. 공간상 허용 전계강도는 안전율 1.1, 오차범위 15%, 계면상 허용 전계강도는 안전율 1.1, 오차범위 20%로 계산하였다.

2.3 베리어 구조강도

GIS의 베리어는 상시 운전에서 가스 구획 내에서의 가스 누설 (leakage)로 인한 양면 차압으로 베리어의 손상뿐만 아니라 계통사고에서 차단현상이 발생하는 단락강도의 조건에서도 도체를 안전하게 지지해 줌으로써 베리어에 균열이나 파괴가 발생하지 않아야 되는 조건을 갖고 있다.

따라서 최적의 베리어 외경과 두께부를 정하는 외형 설계로 응력강도를 계산하여 타당성을 검토하였고, 에폭시 소재에 각각의 SiO₂와 Al₂O₃ 충전재료를 혼합 비율을 변수로 하여 베리어 표면의 상과 상 사이 및 상과 상간 거리를 강도 측면에서 비교하여 계산하였다. 베리어의 취약한 부분을 최고 파열압력의 인가 방향으로 결정하고 베리어를 볼트체결 구속 조건으로 약 1,248,580개의 요소 수로 분할하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전계강도

그림2는 최대 충격전압의 10%를 상승시킨 값으로 유전율 값을 달리하여 도출된 베리어 앞면의 전위 및 전계 값의 분포이다. 유전율이 3.8인 경우 최대전위는 $6.30-6.55 \times 10^5$ V, 최대전계 값은 $1.75-1.81 \times 10^7$ V/m이며, 유전율이 6인 경우 최대전위는 $6.31-6.53 \times 10^5$ V, 최대전계 값은 $1.51-1.56 \times 10^7$ V/m으로 나타나고 있다. 이는 유전율이 낮을 경우 베리어의 계면 부분에서 전계집중이 낮게 분포되고 있음을 보였다.

그림 3은 최대 충격전압 인가 시 상과 상 사이와 상과 대지간 사이의 전계 값의 분포를 비교하였다. 상과 상 사이, 상과 대지간의 전계 값의 분포에서 베리어의 볼록 부분의 도체 지지부에서 전계 집중이 크게 분포되고 있음을 보였다.

그림 4(a)는 상과 상 사이의 베리어 표면에서 거리별로 SiO₂와 Al₂O₃의 유전율이 서로 다른 충전재료를 사용한 베리어의 앞면과 뒷면을 각각 비교한 전계 값의 분포이다. 최대 전계값은 상과 상사이의 부근에서 나타나며 Al₂O₃ 보다 SiO₂가 베리어의 앞면에서는 약 1.23배, 베리어의 뒷면에서는 약 1.19배 높음을 보였다.

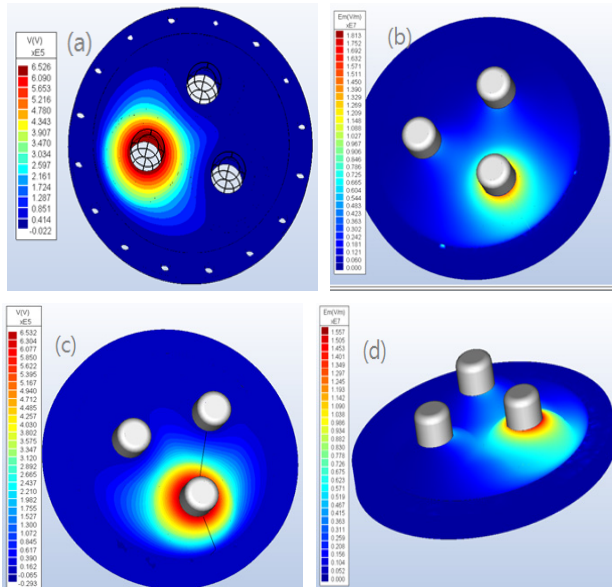


Fig. 2. Comparison of permittivity for barrier on electrical potential and field. (a) electrical potential, permittivity 3.8, (b) electrical field, permittivity 3.8, (c) electrical potential, permittivity 6, and (d) electrical field, permittivity 6.

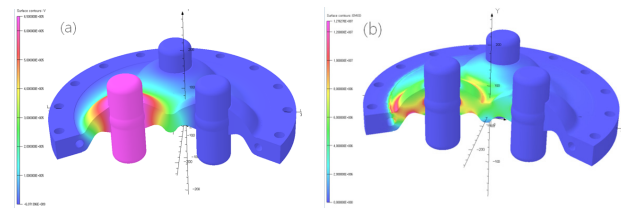


Fig. 3. Comparison between phase to phase and phase to earth for barrier on electrical field. (a) phase to phase and (b) phase to earth.

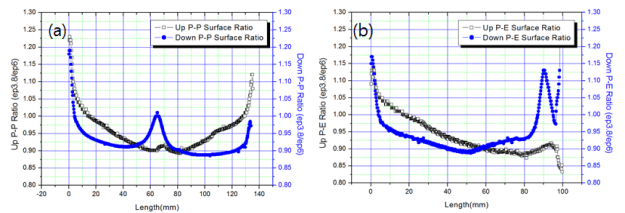


Fig. 4. Comparison of electric field on barrier surface. (a) phase to phase and (b) phase to earth.

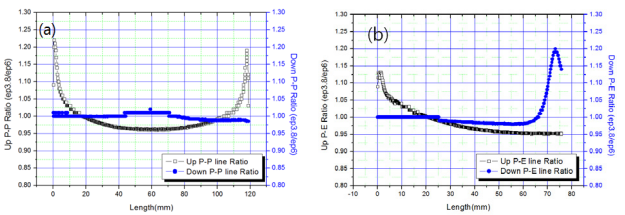


Fig. 5. Comparison of electric field in SF₆ gas. (a) phase to phase and (b) phase to earth.

그림 4(b)는 상과 대지간의 베리어 표면에서 거리별로 SiO₂와 Al₂O₃의 유전율이 서로 다른 충전재료를 사용한 베리어의 앞면과 뒷면을 각각 비교한 전계 값의 분포이다. 최대 전계값은 상과 대지간 끝부분에서 나타나며 Al₂O₃ 보다 SiO₂가 베리어의 앞면에서는 약 1.15배, 베리어의 뒷면에서는 약 1.14배 높음을 보였다.

그림 5(a)는 상과 상 사이의 SF₆ 가스 내에서 거리별로 SiO₂와 Al₂O₃의 유전율이 서로 다른 충전재료를 사용한 베리어의 앞면과 뒷면을 각각 비교한 전계 값의 분포이다. 최대 전계값은 상과 상사이의 부근에서 나타나며 Al₂O₃ 보다 SiO₂가 베리어의 앞면에서는 약 1.23배, 베리어의 뒷면에서는 전구간 변화가 없음을 보였다. 그림 5(b)는 상과 대지간 사이의 SF₆ 가스 내에서 거리별로 SiO₂와 Al₂O₃의 유전율이 서로 다른 충전재료를 사용한 베리어의 앞면과 뒷면을 각각 비교한

전계 값의 분포이다. 최대 전계값은 상과 대지간 끝부분에서 나타나며 Al_2O_3 보다 SiO_2 가 베리어의 앞면에서는 약 1.13배, 베리어의 뒷면에서는 약 1.2배 높음을 보였다.

해석 결과, 베리어의 상과 상 사이, 상과 대지간의 계면에서의 절연 성능은 유전율이 낮은 SiO_2 경우가 거리 분포별로 비교하여 약 1.1~1.2배 유리함을 보였다.

3.2 구조강도

그림 6(a)는 설계 최고 파열압력을 인가하였을 때 베리어의 취약부분이 일반적인 형상으로 볼 때 볼록 부분보다 오목 부분이 더욱 취약 하므로 오목 부분에 인가한 모델링을 표기하였으며, 그림 6(b)에서 해석하기 위한 모델링 (modeling)과 경계 조건을 수행한 결과이다.

그림 7(a)는 최대 주응력 (maximum principle stress), 그림 7(b)는 변형량의 분포를 해석한 결과이다. 베리어 상간 도체부를 감싸는 부분의 최대 주응력은 2.5-3 MPa로서 형상보강이 필요한 주요 부분임을 확인하였고, 최대 변형량도 동일한 위치에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 베리어의 충전재료가 SiO_2 의 함량 변화에 따라 베리어의 표면 길이를 기준으로 위치별 응력과 변형량을 해석한 결과이다. 그림 8(a)는 베리어의 도체와 도체 사이의 응력분포를, 그림 8(b)는 베리어의 도체와 접지부의 볼트 부분까지의 응력 분포를 나타낸 결과이다. 그리고 그림 8(c)는 베리어의 도체와 도체 사이의 변형량을 나타낸 것이다. 그림 8(d)는 베리어의 도체와 접지부의 볼트 부분까지의 변형량을 나타내고 있다. 충전재료의 혼합비율을 증가시킬수록 최대 응력값도 비례적으로 상승하였다.

그림 9는 베리어의 충전재료가 Al_2O_3 인 함량 변화에 따라 베리어의 표면 길이를 기준으로 위치별 응력과 변형량에 대한 결과이다. 그림 9(a)는 베리어의 도체와 도체 사이의 응력분포이고, 그림 9(b)는 베리어의 도체와 접지부의 볼트 부분까지의 응력 분포를 나타낸 것이다. 그리고 그림 9(c)는 베리어의 도체와 도체 사이의 변형량 분포이며, 그림 9(d)는 베리어의 도체와 접지부의 볼트 부분까지의 변형량의 분포를 나타낸 것이다.

충전재료의 혼합비율을 증가시킬수록 최대 응력값도 비례적으로 상승하였지만 SiO_2 의 해석 결과와 비교하여 상대적으로 변형량은 커짐을 확인하였다.

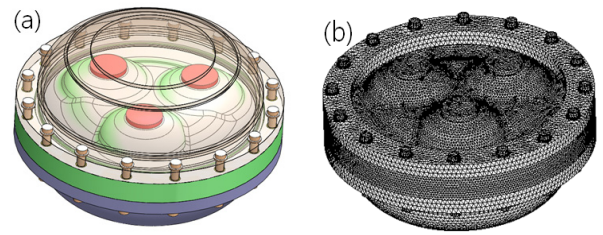


Fig. 6. Modeling for analysis of assembled barrier. (a) barrier and test cover and (b) FEM analysis with element and nod number.

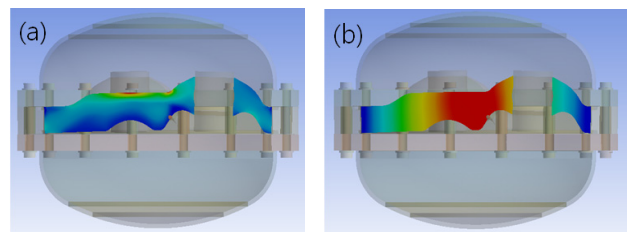


Fig. 7. Analysis result on (a) maximum principal stress and (b) deformation.

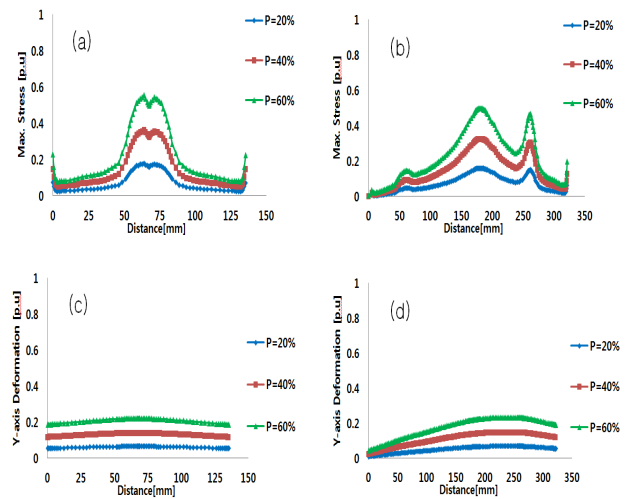


Fig. 8. Result of maximum stress and deformation for SiO_2 filler with variation distance on barrier (a) stress between phase to phase, (b) stress between phase to earth, (c) deformation between phase to phase, and (d) deformation between phase to earth.

그림 8과 그림 9에서 나타난 결과와 같이 소재 부분에서 예폭시 수지에 Al_2O_3 보다 SiO_2 충전재료를 첨가

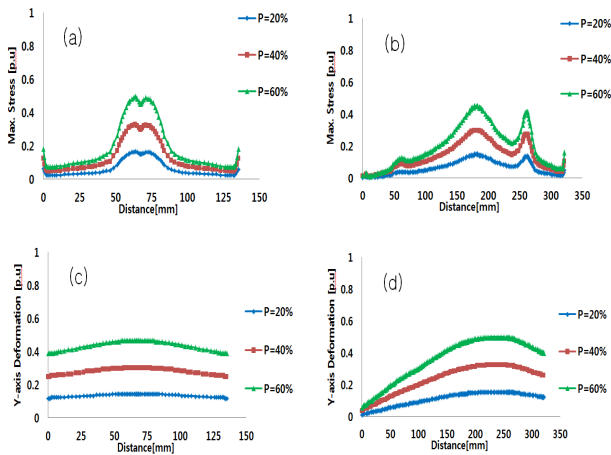


Fig. 9. Result of maximum stress and deformation for Al_2O_3 filler with variation distance on barrier (a) stress between phase to phase, (b) stress between phase to earth, (c) deformation between phase to phase, and (d) deformation between phase to earth.

하는 부분이 구조적 강도면에서 평균 20%의 양호함을 보여주고 있고, 변형량도 평균 10%가 낮음을 확인 하였다. 그리고 충전재료의 혼합비율이 증가할수록 응력 값도 비례적으로 상승함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 초고압급 GIS에 적용되는 에폭시 절연 베리어의 외형을 전기적, 기계적 특성을 동시에 만족할 수 있는 최적형상을 수치해석을 통해 도출하였다.

최적 형상을 도출하는 과정에서 유전율이 다른 충전 재료인 SiO_2 와 Al_2O_3 의 혼합비율을 달리 적용하였으며,

이와 병행하여 145 kV급 이상에서 에폭시 절연 베리어의 충전재료로 SiO_2 와 최적 혼합비율을 적용하기 위한 타당성 검토도 동시에 진행하였다. 최적형상을 통하여 소형화 및 경량화에 부응하기 위한 베리어의 체적은 15%, 중량은 10%를 줄일 수 있음을 확인하였다. 초고압에 적용되는 최적 형상의 베리어에는 충전재료 중 유전율이 상대적으로 낮은 SiO_2 가 Al_2O_3 에 비해서 전기적 특성이 우수할 뿐만 아니라 구조강도 면에서도 약 10% 우수함을 확인하였다. 다만 충전재료 혼합비율의 최적화를 구하기 위해서는 전기적 성질과 연계되는 추가 연구도 필요함을 확인하였다.

그러나 본 연구를 통해서 획득된 데이터들은 전기적 충격 전압과 기계적 파열압력을 약 10% 증가시킨 가혹한 해석 조건 하에서의 결과이기 때문에, 베리어의 소형화와 경량화에 적용되어도 내구 수명은 이보다 더 향상될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] A. Luxa, *The CAPEIEL Cradle-to-Grave Inventory Methodology for SF₆-Insulated Electrical High Voltage Switchgear in Europe* (EPA Conference, San Diego, USA, 2002) p. 21-22.
- [2] H. H. Däumling and H. Singer, *IEEE Trans, on PD.*, **4**, 1 (1989).
- [3] B. Y. Lee, *IEEE Trans. on PD.*, **13**, 3 (1998).
- [4] K. Kato, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, **13**, 362 (2006).
- [5] A. Kawamoto, Y. Suzuoki, T. Mizutani, and M. Ieda, *Trans. IEEE of Japan*, **108**, 187-192 (1988).
- [6] A. Ahmethodzic, M. Kapetanovic, and Z. Gajic, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, **18**, 4 (2011).