

# 초고압 GIS용 에폭시 절연물 배리어 파단 특성

서왕벽<sup>a</sup>

영남대학교 기계IT대학 기계공학부

## Mechanical Fracture Characteristic of Epoxy Insulation Barrier for High Voltage GIS

Wang Byuck Suh<sup>a</sup>

Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received August 9, 2017; Revised August 14, 2017; Accepted August 21, 2017)

**Abstract:** In this study, an epoxy insulation barrier for high voltage GIS was developed using epoxy and a filler with a Young's modulus of 11 GPa. The material was investigated using a simulation of the principal stress, displacement, and safety factors while optimizing the profile shape. The simulation showed that the larger Young's modulus of the  $Al_2O_3$  filler compared to the  $SiO_2$  in the epoxy insulation can contribute to an increase in resistance to mechanical fracturing for the optimized profile barrier in high voltage GIS. In addition, the safety factor was improved by 10%. It can be concluded that the mechanical fracturing properties of the insulation barrier can be enhanced by increasing the content of the elastic filler,  $Al_2O_3$ , for high voltage GIS applications.

**Keywords:** High voltage GIS, Insulation barrier, Filler,  $Al_2O_3$ , Mechanical fracture, Young's modulus

### 1. 서론

전력계통에서 전기설비의 효율적인 전원의 공급, 차단, 운용 등에 사용되고 있는 145 kV 급 이상의 GIS ( $SF_6$  gas insulated switchgear, 가스절연개폐장치)는 산업 설비의 대용량화와 고밀도화, 대도시의 집중화에 따라 고 신뢰성, 소형화와 경량화 측면에서 적용범위를 확대해 나아가고 있는 추세이다 [1,2]. 이러한 145 kV 급 이상의 GIS는 금속제 외함(enclosure) 내에 육불화황( $SF_6$ ) 가스를 충전 하며 차단부, 단로부, 주회로 모선부, 피뢰기 등을 일괄 수납하여 통전부를 교체 절

연물 배리어(barrier)로 지지하고, 배리어는 각각의 가스 구획으로 구분하는 구조로 기계적, 전기적 결합에 의거한 단락사고의 확대를 제어하고 있다 [3,4]. 최적의 GIS 설치 및 사용조건은 가스구획부의 용적을 줄이면서 충전 가스압력도 낮추는 방식으로 나아가야 하지만 이들 조건을 동시에 만족하는 방법은 수립되어 있지 않다 [5]. 따라서 통전부를 지지하고 있는 에폭시(epoxy) 소재의 배리어가 GIS와 연계되어 신뢰성을 기반으로 한 고강도와 소형화의 연구에 집중하고 있는 추세이다 [6].

145 kV급 이상의 초고압 전력계통에 사용되는 고전압용 GIS의 절연물 배리어는 에폭시 수지를 단독으로 사용하지 않으며 경화제를 첨가하여 열경화성의 물질로 변화시켜 사용되고 이 제조과정에서 충전재인  $SiO_2$ (실리카) 또는  $Al_2O_3$ (산화알루미늄)의 필러(filler)를 첨가하여 유전율을 3.8에서 6까지 최적의 혼용비율로 사용되고 있다.

a. Corresponding author; [swbyuck@yu.ac.kr](mailto:swbyuck@yu.ac.kr)

따라서 본 연구에서는 대규모의 정전사고를 사전에 예방하여 신뢰도를 향상 시키고 안정적인 전력계통을 유지할 수 있는 방안으로 145 kV GIS의 에폭시 절연물 배리어를 높은 절연 성능을 요구하는 전기적인 절연성과 고전압 및 고압가스에 의한 기계적인 충격 강도를 향상시키는 방안을 제시하고자 하였다. 따라서 에폭시 절연물 배리어가 대용량 소형화를 구비한 탄성 특성과 인장강도 특성을 만족할 수 있도록 필러의 선택을 중요변수로 하여 이들의 특성변화에 따른 배리어의 기계적 파단 특성을 비교 분석하여 최적의 절연물 소재로서의 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 적용 모델과 설계값

해석에 사용된 145 kV급 GIS용 배리어의 기본모델은 그림 1과 같이 3상 일괄 형태로 M16 볼트로 외함에 균질의 토오크(torque)에 의해 환상형으로 취부 되는 형태이며, solid works를 사용하여 설계하고 DEFORM-3D를 이용하여 해석하였다. 에폭시 절연물 배리어의 외관 형태는 소형 및 경량화의 가능성을 부여하고자 충격강도와 전압에 견딜 수 있는 최소한의 외경과 볼트간의 간격과 도체간의 거리 및 두께를 고려하였다. 에폭시 절연물 배리어의 외관 형상은 배리어 표면에 전계의 영향을 미치지 않도록 말단부에 곡면 처리를 하여 최적의 형상을 기반으로 설계된 형상을 사용하였다. 에폭시 소재의 배리어는 주제와 경화제 이외에 각각의 SiO<sub>2</sub> 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 필러를 다양하게 적용하여 설계 최고 파열압력에서의 변형량과 변형 분포도를 분석하여 기계적 파괴 특성을 구하고, 외형의 표면 설계와 소재 선택의 가능성을 제시하고자 모델링 작업을 수행하였다.

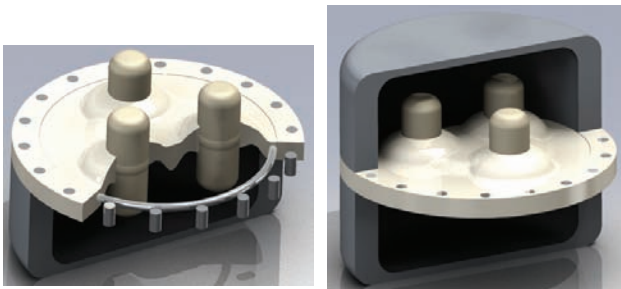


Fig. 1. Geometry of barrier for modeling.

### 2.2 해석 조건

배리어 강도해석을 위한 해석 모델을 그림 2에 표기하였다. 대칭구조의 형태에서 부분 해석을 진행하고 해석에 사용된 파라메타(parameter)는 국내에서 제공되는 에폭시의 필러를 기본으로 하였으며 표 1에 나타내었다. 그림 3은 배리어의 강도해석을 위한 경계조건

Table 1. Calculation parameters.

Classification / Type	I	II	III
Filler	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Young's modulus (GPa)	3.9	11	10
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.35
Permittivity	6	6	3.8
Density (g/cc)	2.37	2.3	1.75
Tensile strength (MPa)	77	85	70
Break down voltage (kV)	780		
Bursting pressure (MPa)	2.5		

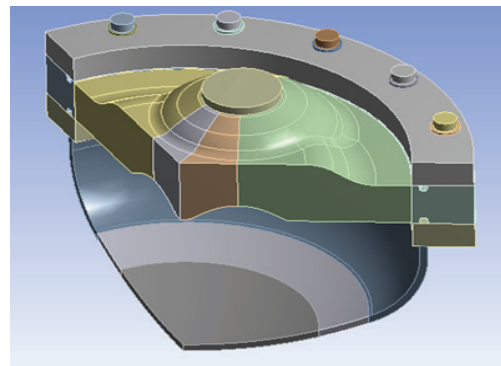


Fig. 2. Analysis of the barrier model.

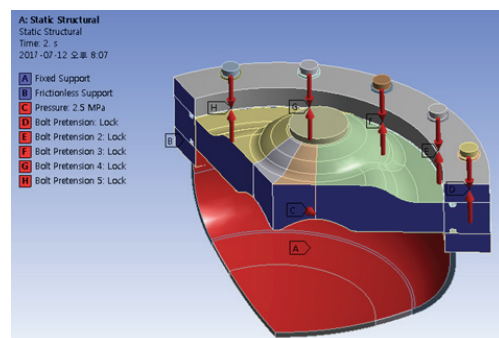


Fig. 3. The boundary condition of barrier for modeling.

로 고정위치 및 축 회전에 대한 구속방향, 내부 파열 압력 설정, 볼트 토크의 부착력에 의거한 수직력 방향 등이 입력된 형상이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 해석 결과

그림 4의 (a), (b), (c)는 파라메타별로 I, II, III을 설계 최고파열 압력을 2.5 MPa 가하였을 때 배리어의 변형량을 나타내고 표 2에 결과값을 표기하였다. 필러의 소재의 변화에도 변형량의 최솟값과 최댓값의 분포도는 동일하였지만 각각의 변형량은 다른 값을 나타내었다. 공통적으로 배리어의 중심부에서 높은 변형량을 일으키며 볼트가 취부되는 외함부에서 낮은 변형량이 나타난다. 특히 배리어 소재의 탄성계수가 3.9 GPa에서는 탄성계수가 2.8배 증가된 11 GPa의 배리어와 비교 하였을 때보다 변형량이 2.3배 증가한 4.48 mm로 확인되었다. 배리어의 필러 소재가 SiO<sub>2</sub> 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와는

**Table 2.** The results of maximum displacement and principal stress according to variation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> filler.

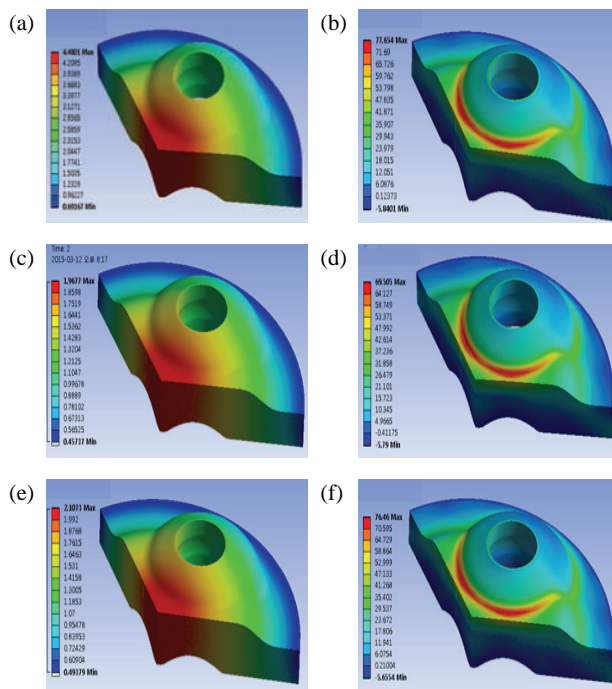
Type	Filler	Young's modulus (GPa)	Maximum	
			Displacement (mm)	Principal stress (MPa)
I	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.9	4.48	71.65
II	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	1.97	69.51
III	SiO <sub>2</sub>	10	2.11	76.46

무관하게 탄성계수가 높을수록 변형량이 적음을 확인하였다.

그림 4의 (d), (e), (f)는 파라메타별로 I, II, III을 설계 최고파열 압력을 2.5 MPa 가하였을 때 배리어의 주응력값을 나타내고 표 2에 결과값을 표기하였다. 필러의 소재의 변화에도 주응력값의 최솟값과 최댓값의 분포도는 동일하였지만 각각의 주응력값은 다른 값을 나타내었다. 공통적으로 배리어의 형상 표면에서 볼록 부분과 평면의 경계면이 만나는 부분이 최대 주응력값이 측정되며 특히 배리어의 반대면의 오목 부분에서의 값이 가장 크게 나타난다. 특히 배리어 소재의 인장강도가 77 MPa에서는 인장강도가 1.1배 증가된 85 MPa의 배리어와 비교 하였을 때보다 최대 주응력 역시 1.1배 감소한 69.5 MPa로 확인되었다. 이는 재료의 최대 주응력값 대비 1.1배의 안전계수임을 확인하였으나, 필러 소재가 SiO<sub>2</sub>인 배리어는 재료의 인장강도 값 대비 최대 주응력값이 77.7 MPa으로 확인되어 0.9배의 안전계수임이 확인되었다. 이러한 결과값에 의거하여 SiO<sub>2</sub> 필러의 선택은 고려해 보아야 한다. 특히 취약한 형상의 부분이 있는 배리어의 볼록 부분과 평면의 경계면에서 크랙이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 배리어의 응력과 변형량에서 가장 취약할 수 있는 부분을 표기하였다. 기하학적으로 배리어의 오목과 볼록 형상으로 인해 전단면이 가장 적은 부분으로 이 라인을 기준으로 분석 하는 내용으로 해석하였다.

그림 6은 기준라인을 기준으로 분포한 주응력값이다. 기준라인 시작점에서 55 mm 지점에서 최대 주응력값이 나타났다. 특히 탄성계수가 높은 것 보다 작은 값이 상대적으로 응력값이 작음을 보여주고 있다. 주응력값에 대한 설계 안전 여부는 허용 인장강도 대비 안전율을 어떤 값으로 선택하는가에 달려있으며 이는 그림 8에서 표기 하였다. 따라서 기준점 40 mm에서 55 mm



**Fig. 4.** The Analysis results of displacement according to variation of filler with (a) I, (b) II, (c) III, and the analysis results of principal stress according to variation of filler with (d) I, (e) II, and (f) III.

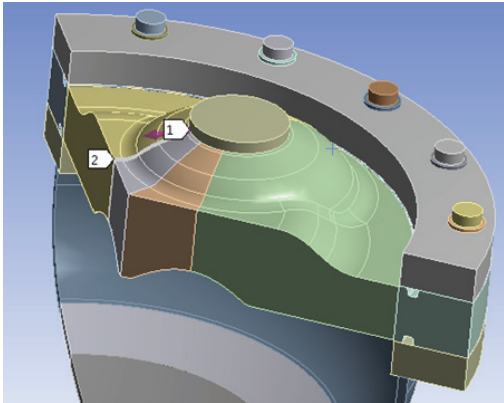


Fig. 5. The line position from 1 to 2 for the weakest profile of barrier.

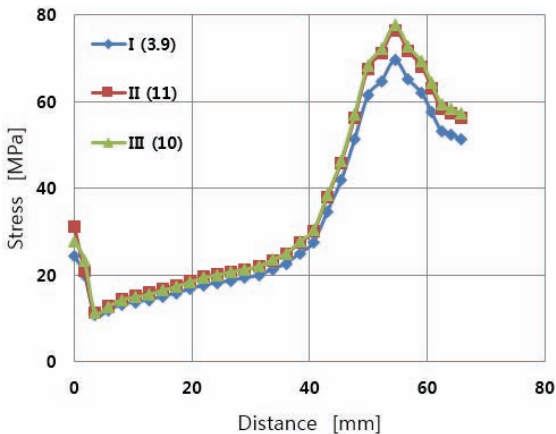


Fig. 6. Comparison of principal stress on barrier surface of line position from 1 to 2.

까지의 응력값이 급격히 상승하는 부분에 대해서는 도체부의 볼록 부분에 대한 형상 변경 및 수정을 통해서 수정 보완할 필요가 있을 것으로 확인되었다.

그림 7은 기준라인을 기준으로 분포한 변형량 값이다. 탄성계수가 높은 필러의 소재가 월등히 변형량에 변화가 없음을 보여주고 있다. 변형량은 배리어의 외형의 형태 보다는 소재의 물성치에 의거하여 변화됨을 확인 하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 탄성계수가 작은 소재는 변형량을 줄이기 위한 방법으로 구속점을 2배 이상 주어야 하겠지만 이로 인한 피로강도 및 파괴강도에 취약할 수 있음을 확인하였다.

그림 8은 일반적으로 설계값 대비 안전율을 10 이상으로 하는 부분에 있어서 많은 취약점을 드러냈음을 확인하였다. 특히 SiO<sub>2</sub>의 소재인 경우는 볼록부분과

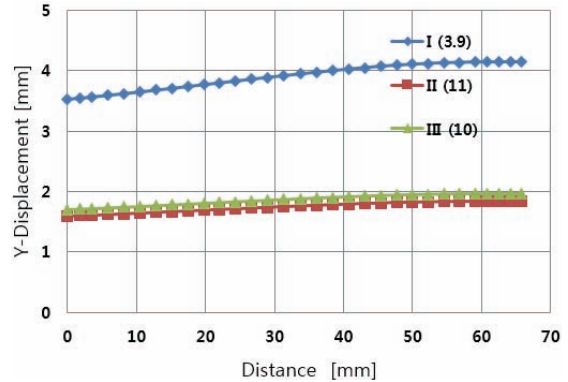


Fig. 7. Comparison of displacement on barrier surface of line position from 1 to 2.

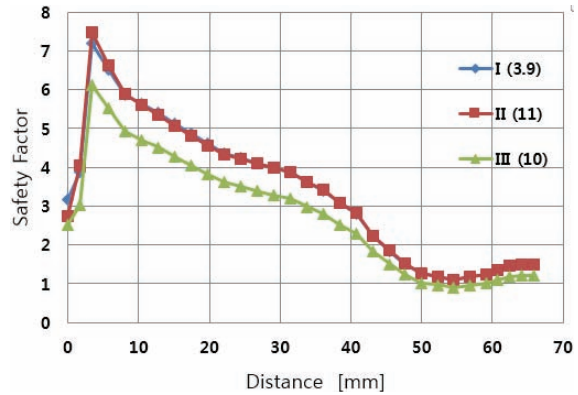


Fig. 8. Comparison of safety factor on barrier surface of line position from 1 to 2.

평면과의 교차면에서 안전율보다 작은 값으로 계산되어 이 부분의 형상 설계 보완을 필요로 하였으며 전반적으로 3개 항목의 분석값으로 보았을 때 사용 여부를 고려해야 할 필요성이 발생하였다.

### 3.2 실험 검증

해석결과에 따라 배리어의 기계적인 파단이 평면과 볼록 부분의 경계와 중심부에서 취약하였음을 확인하고 배리어의 압력시험을 2.5 MPa의 30% 상향시켜 진행한 결과를 그림 9에 표기 하였다. 실험의 필러 소재는 해석 파라메타 II의 내용으로 진행하였으며 압력시험은 0.3 MPa/분 상승으로 수압시험으로 진행하였다. 결과는 해석결과에서 예측하였던 부분으로 파괴가 진행되었음을 확인하였다.



**Fig. 9.** The cracked insulation barrier by performing internal pressure test.

#### 4. 결론

본 연구에서는 145 kV급 GIS에 적용되는 에폭시 절연물 배리어의 기계적 파단에 대한 필러 소재의 선택을 제안하고 그 가능성을 확인하였다. 탄성계수 11 GPa의 필러를 사용한  $Al_2O_3$ 의 에폭시 절연물 배리어는 최고 파열압력에서도 최소 안전계수 1.1에 의거하여 취약부분의 형상인 볼록과 평면의 경계면에서도 어떠한 균열도 발생하지 않아 파단 조건을 정립하였다. 동급의 탄성계수 10 GPa의 필러를 사용한  $SiO_2$ 는 최

소 안전계수 0.9 부분이 확인되어 사용 할 수 없음도 확인 하였다. 확인된 조건을 이용하여  $Al_2O_3$  필러를 사용한 배리어의 최고 파열압력에서의 건전성을 확인하고 30% 이상의 압력으로 파단 시켰을 때의 크랙 최초 지점과 해석결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 절연물의 선정 시 탄성계수와 인장강도를 향상 시키는 방안이 제품의 기계적 파단특성을 우수하게 할 수 있음을 확인하였으므로 이와 관련된 재료의 혼합 물성값에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] Conference EPA : A. Luxa, San Diego, 2002, 21.
- [2] J. H. Lee, Y. J. Kim, S. U. Kim, and M. S. Bang, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Kor.*, **30**, 207 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2017.30.3.207>]
- [3] Y. G. Kim, T. H. Kim, Y. J. Jeong, H. T. Kim, and Y. J. Kim, *J. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **37**, 715 (2013). [DOI: <https://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.5.715>]
- [4] S. Tanigaki and Y. Yoshioka, *Electr. Eng. Jpn.*, **169**, 14 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1002/eej.20741>]
- [5] H. J. Ju, D. K. Kim, and K. C. Ko, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 467 (2012). [DOI: <https://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.6.467>]
- [6] W. B. Suh and D. H. Bae, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 379 (2015). [DOI: <https://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.6.379>]