

## 에폭시 수지를 이용한 전기 절연물의 기계적 해석 방법에 관한 연구

정대석, 박창우, 조정환, 김정배

(주)효성 중공업연구소

### The Study of Mechanical Analysis for Electric Insulator using Epoxy Resin

Dae-Seok Jung, Chang-Woo Park, Jung-Hwan Cho and Jeong-Bae Kim

HYOSUNG Co.

**Abstract :** Epoxy resin is used to insulate electricity in the gas insulated switchgear. There were many research to find out characteristics of the epoxy resin. But there is a poor research for the mechanical investigations. In this paper, we made an experiment and evaluated mechanical properties with specimens of the epoxy resin. Using Spacer which is a part of high voltage switchgear, and we studied the structural analysis methods and made an overture a how to analysis in order to solve problems.

**Key Words :** Epoxy Resin, Finite Element Analysis, Spacer, Switchgear, Insulator

#### 1. 서론

에폭시 수지는 우수한 절연 특성은 물론 강도, 내수성, 내약품성 및 뛰어난 접착력 등으로 인하여 중전기 분야의 절연체로 널리 사용되고 있다. 에폭시 소재를 이용한 절연물에 대한 연구는 대부분 전기적인 특성에 대해서만 수행되어 왔을 뿐 구조적인 특성에 대해서는 연구가 미약한 실정이다. 이는 에폭시 수지의 제조시 첨가되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 실리카 등의 첨가제에 따라 기계적 특성이 상이하므로 일반적인 재료의 물리적 성질을 정의하기가 어렵고, 제조시의 성형 조건에 따라 각기 다른 특성을 나타내기 때문이다.

에폭시 수지를 이용한 절연물의 설계는 일반적으로 절연 성능을 만족하는 형상을 설계한 후 구조적 안전성을 만족하는 최종 형상을 결정한다. 설계된 모델은 수치해석 기법을 통하여 최적화를 수행하고 신뢰성 시험을 통해 제품의 성능을 확인한다. 그러나 수치해석을 통한 최적화 연구 자료는 대부분 전기적 특성에 관한 것이 대부분이다.

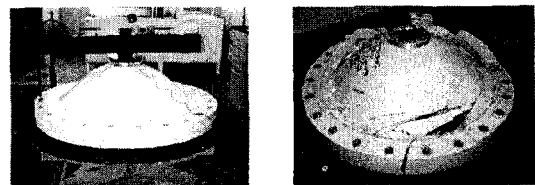
본 연구에서는 에폭시 수지를 이용한 초고압 차단기에 사용되는 절연물(이하 Spacer)을 대하여 기존의 설계시 수행하고 있는 일반적인 수치해석 방법에 대해 검토하고, 보다 신뢰성 있는 결과를 위한 수치해석 방법을 검토하였다. 해석은 상용 유한요소해석(Finite Element Analysis) 프로그램 이용하여 실시하였으며, 재료의 물성을 파악하기 위하여 인장시험을 실시하였다.

#### 2. Spacer 설계 및 시험

차단기에 사용되는 Spacer는 가스 구획의 분할 및 도체를 지지해야 한다. 따라서 구조설계는 도체의 자중과 통전시의 전자기력 의한 영향 및 절연 사고 시 발생하는 내부 아크에 의한 압력상승에 견뎌야한다. 이에 대하여 한전에서는 수압 또는 가스압을 이용한 파티션 압력시험(ES 150-579)의 규정을 통해 내부 압력상승에 대한 안정성을

확보하도록 하였다.

파티션 압력시험에 대한 Spacer의 파괴 유형을 살펴보면 대부분이 중심도와의 결합부에서 파괴 또는 최단 두께 부 및 Flange와의 결합부에서 파괴가 발생한다. 그림 1의 (a)에는 초고압용 차단기에 사용 되는 Spacer의 형상을 나타내었고, (b)에는 파티션 압력시험을 통해 파괴된 Spacer의 모습을 나타내고 있다.



(a)

(b)

그림 1. 초고압 Spacer 형상(a) 및 파괴 형상(b)

에폭시 수지의 기계적 성질을 확인하기 위하여 인장시험을 실시하였으며 그 결과를 표 1에 나타내었다. 시험 방법은 KS M 3015에 따라 실시하였다. 인장시험을 통해 에폭시 수지는 전형적인 취성의 성질을 나타내며, 연신율이 매우 낮고, 항복점이 없이 탄성변형 후 바로 파단되는 특징을 확인하였다.

표 1. 에폭시 수지의 기계적 물성

인장탄성율 (GPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장율 (%)
16.7	83.0	-	0.69

#### 3. Spacer의 유한요소해석

Spacer의 구조해석은 파티션 압력시험의 시험조건을 적용하여 수행하였다. 구조 해석 방법은 3D 해석과 2D 해석의 두 가지 방법에 대해 검토하였다. 3D의 경우는 볼트

체결부를 완전구속하였고, Flange 접합면은 축방향의 자유도를 구속하였다. 해석 모델은 대칭성을 고려하여 1/12 부분으로 분할하여 모델링을 하였고, 단면에는 대칭 경계조건을 적용하였다. 하중 조건으로는 0.1MPa(1kgf/cm<sup>2</sup>)의 단위하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석은 동일한 Size에 대하여 Element Type에 따른 결과와 동일한 Element Type에 대해 Size에 따른 결과를 비교하였다.

2D 해석은 Flange의 결합에 의한 예응력을 고려하기 위해 초기조건으로 Flange와 Spacer의 접촉해석을 수행한 후 단위 하중을 적용하였다. 해석 모델로는 Spacer의 단면에 대하여 Axis-Symmetry 조건을 적용하였다. Flange 결합을 위한 하중조건으로는 볼트 체결시의 회전토크(T)에 관한 식 (1)을 이용하여 축 방향 하중(Q)을 구하고 이를 Flange의 체결 압력으로 환산하여 적용하였다.

$$T = T_1 + T_2$$

$$T_1 = \mu_n \cdot r_n \cdot Q$$

$$T_2 = \frac{d_2}{2} \cdot Q \cdot \tan(\rho' + \alpha)$$
(1)

여기서  $T_1$ 은 너트와 와셔 사이의 마찰로 인한 토크저항이고  $T_2$ 는 나사면과 와셔의 마찰을 고려한 체결토크이다.  $\mu_n$ ,  $r_n$ 는 너트 또는 와셔의 자리면의 마찰계수와 평균 반지름이고,  $\rho'$ 는 삼각 나사의 상당 마찰계수에 대한 상당의 마찰각이다.

2D의 해석 결과를 3D의 결과와 비교하여 해석의 타당성에 대해 검토하였다. 표 2에는 Element Type과 Element Size에 따른 해석 조건 및 2D 및 3D에 따른 해석 조건을 나타내었다.

표 2. 강도해석 조건

	Dimension	Min. Element Size	Element Type	Element Num
Case 1	3D	10	Tetra.	124,651
Case 2	3D	10	Hexa.	56,468
Case 3	3D	5	Hexa.	106941
Case 4	2D	5	Hexa.	1,908

#### 4. 결과 및 검토

Spacer의 구조해석 결과는 von-Mises 응력을 이용하여 서로 비교하였으며, 각 해석에 대한 결과를 표 3에 나타내었다. Case 1과 Case 2의 해석 결과 Element Type에 따라 Flange

표 3. 해석 조건에 따른 응력 해석 결과

	Max. von-Mises Stress (MPa)		
	Flange 접촉부	Min thickness.	O-Ring
Case 1	3.005	0.912	1.282
Case 2	2.159	0.909	1.415
Case 3	1.802	0.913	1.784
Case 4	2.139	0.953	1.771

접촉부의 응력이 39%의 차이를 보이고, 최소 두께부 및 O-Ring부의 경우 응력은 각각 0.3% 및 9.4%의 결과의 차이를 발생하였다. Case 2와 Case 3의 해석을 통하여 Element 수에 따른 응력의 차이를 비교하기 하였다. 그 결과 최대 응력 차이는 Flange 접합부에서 16.5%로 나타났고, 최단 두께부 및 O-Ring부는 각각 0.4%와 4.5%의 차이를 나타내었다.

Case 4는 비선형 접촉해석을 통해 Flange 결합에 의한 예응력 및 실제의 조건을 고려한 해석을 통하여 Case 3과 비교하였다. 그 결과 Flange 접촉부의 최대응력은 2.139 MPa로 나타났지만, Case 3과는 다른 위치에서 최대응력이 발생하였다. 이는 3D 선형해석 시 Flange 접촉부의 자유도를 강제 구속하였기 때문에 실제와는 다른 결과를 나타내었다. 그 외의 최소 두께부 및 O-Ring부는 각각 0.3% 및 0.1%의 차이를 나타내었다. Case 3 및 Case 4의 각 해석의 응력 결과를 그림 2에 나타내었다.

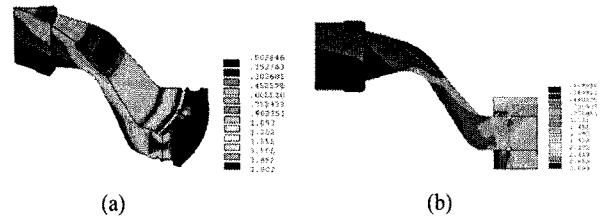


그림 2 Spacer의 구조해석 결과 : Case 3(a), 및 Case 4(b).

#### 5. 결론

초고압용 차단기에 사용되는 Spacer를 이용하여, 다양한 조건에 따른 Spacer의 구조 해석에 대한 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Element Type의 경우 Tetrahedron 보다 Hexahedron Type의 Element를 사용함으로써 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있었고, 모델의 형상이 급변하는 부위에 대하여 Element의 Size를 작게 함으로써 더욱 정확한 결과를 구할 수 있었다. 또한 선형 해석보다는 실제의 조건을 고려한 접촉해석을 통하여 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에는 파티션 압력시험의 조건만을 고려하였고, 전자력 및 도체의 자중에 대한 고려는 하지 않았다. 추후의 연구에서는 실제의 운전 시의 하중을 적용함으로써 사고 발생시 제품의 안정성에 대하여 평가하도록 하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] J. S. Wnag, Y. H. Kim and W. S. Lee, "A Study on the Comparison of Triangular and Quadrilateral Elements for the Analysis of 3 Dimensional Plate Structure", 한국박용기관학회, 26권, 3호, p. 9, 2002.
- [2] H. K. Cho and U. Y. Lee, "월드 절연물의 해석기술", 전기전자재료학회, p. 6, 2002.
- [3] J. P. Hong, "기계설계 이론과 실제"
- [4] "ANSYS USER MANUAL"