

유한요소법을 이용한 500kV급 Composite Bushing 금구류 강도 안전성에 관한 연구

이지훈*, 권현숙*, 김동훈*
대한전선(주) 기술연구소*

A Study on the Strength Safety of the 500kV Composite Bushing Fittings using FEM

Ji-Hun Lee*, Hyun-Sook Kwon*, Dong-Hun Kim*,
Taihan Electric Wire Co., Ltd*

Abstract - 본 논문에서는 500kV급 composite bushing에 사용되는 FRP tube 및 금구류에 대하여 풍하중에 대한 강도안전성을 평가하였다. 제품의 평가는 유한요소법을 이용한 구조해석을 진행하였으며, 해석 결과 풍하중에 대하여 충분한 강도 안전성 및 안전율을 가지고 제품이 설계된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과를 바탕으로 composite bushing은 강도안전성 측면에서 신뢰성 있는 제품으로 개발이 이루어지고 있음을 확인할 수 있으며, 향후 유한요소법을 이용한 해석을 통해 제품 개발 기간의 단축과 소비자에게 보다 향상된 품질을 보증하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서 론

산업 발전에 따른 전력수요의 급증은 전력기기들의 대용량화를 가속화 하고 있으며, 이러한 추세에 따라 전력 케이블의 초고압화와 함께 이에 적합한 부속소재의 개발이 발 빠르게 진행되고 있다.

시대 추세에 맞추어 당사에서 국내 처음으로 단말처리의 핵심부품인 폴리머에관(composite bushing)을 개발하고, 케이블 전압특성에 맞는 자재의 보급에 적극적으로 나서고 있다. 전력산업설비에 쓰이는 전력기기용 부싱(bushing)은 특성상 우수한 절연 특성 및 사용 안전성이 요구된다. 특히 폴리머 에관은 자기재(porcelain) 절연물에 비하여 내충격성, 절연특성 및 가공성이 우수하여 자연재해나 사고에 의한 자재의 비산과 파손 등의 2차적 위험이 적어 최근 송배전분야에 널리 사용되고 있다. 또한 비중이 작은 실리콘의 특성 때문에 경량화가 가능하고, 시공 작업성이 좋아져 접속 품질의 향상으로도 이어질 수 있다. 이에 따라 세계적으로도 폴리머 절연물 접속재의 수요가 크게 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 500kV급 composite bushing의 개발 요구에 따라 제품의 강도 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 노력의 일환으로, 제품이 설치될 극한 환경에서의 안정성을 확보하기 위하여 유한요소해석(FEM; Finite Element Method)을 이용한 composite bushing 및 금구류의 풍하중에 따른 구조해석을 진행하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소해석 모델(solid model)

해석에 사용된 모델은 최근 개발 중인 500kV급 composite bushing의 실모델이며, <그림 1>은 기계발된 동일한 형상의 composite bushing을 나타냈다.



<그림 1> Composite Bushing

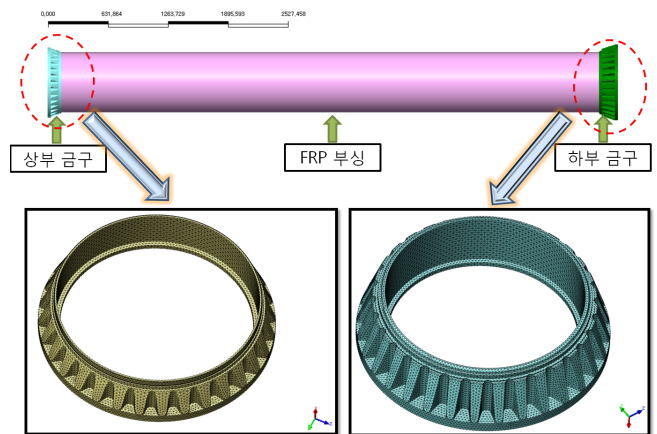
Composite bushing은 크게 절연역할을 하는 실리콘 절연물(폴리머)과 bushing의 내부에서 발생하는 기계적 강도와 내압을 견디도록 하는 FRP tube, 그리고 composite bushing을 풍하중과 같은 외력에서 지지하고, 수직력을 구조화 할 수 있도록 제작된 상·하부 금구류로 구성된다.

FRP의 경우 유리섬유 함양에 따라 경도나 강도가 크게 변하며, 경도가 커지면서 취성이 커지게 되면, FRP Tube는 원하는 하중이나 압축력을 버티지 못하고 깨져버린다. 따라서 제조사의 적절한 배합에 따른 유리섬유의 함양이 중요하다고 하겠다.

2.2 요소망 작업(Pre-processing; mesh modeling)

본 연구에서 유한요소 해석을 위한 요소망은 원형 구조물의 특성을 반영하여 3D tetra mesh 모델링을 적용하였다. 유한요소 모델링은 해석하고자하는 구조물의 기하학적 특징을 위상학을 이용하여 표현하며, 되도록 현상을 반영하고 실제 현상에 대한 왜곡이 없도록 표현되어야 한다. 해의 정확도는 주로 요소망의 품질에 따라 좌우되나 유한요소 모델 자체가 하나 이상의 연속체를 유한개의 요소로 분할하기 때문에 실제 모델의 형상을 항상 어느 정도는 이상화시킨다.

<그림 2>는 해석 모델에 대하여 메쉬 작업을 진행한 모습이다. 상부 금구류와 FRP tube 및 하부금구류로 구성되며, 하부금구류는 composite bushing 자체의 모든 하중 및 외력을 직접적으로 지지하기 때문에 상부 금구류 보다 강도안전성을 가지도록 비교적 크게 설계하는 것이 일반적이다.



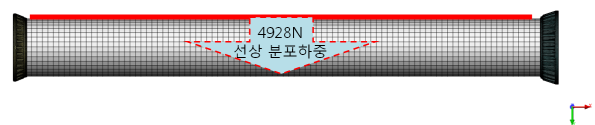
<그림 2> 메쉬 모델(mesh model)

2.3 해석 경계 조건(analysis condition)

해석을 위한 경계조건은 부품과 부품사이의 영향을 최대한 반영하고, 실제 현상에 대한 역학적 이해를 가지고 모델에 적용하여야 한다. 즉, 모델에 표현되지 않은 부품 및 환경적 영향을 확실하게 시뮬레이션화하고, 이에 대한 2 차적 영향을 최소화시켜야 한다.

2.3.1 하중 경계 조건

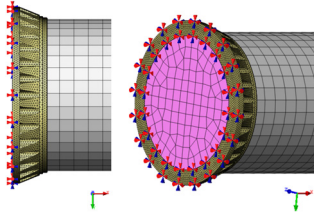
모델에 적용된 하중 조건은 bushing 수직방향선상의 법선 방향으로 4952 [N]의 정하중을 선상의 분포하중으로 <그림 3>과 같이 인가하여 선형정적해석을 수행하였다. 4952 [N]의 하중은 composite bushing에 풍하중이 작용할 때를 가정하였으며, 본 데이터는 자료에 따른 극한 상태에서의 최대 하중이다. 하중은 선형적으로 작용하는 것이며, 크기와 방향 및 분포가 일정하게 작용하는 것을 가정하였다. 또한 정적해석은 동적 거동을 표현하는 특성인 관성력과 감쇠력을 무시하고, 작용하중이 시간에 따라 변하지 않는 근사조건의 해석이다.



<그림 3> 풍하중 적용

2.3.2 구속 경계 조건

해석을 위하여 모델에 적용한 구속 경계조건은 볼트 체결부의 영향을 고려하여 <그림 4>와 같이 금구류 하단 표면상 노드(node)에 완전 구속 조건을 부여하였으며, 이는 X-Y-Z 방향의 구속 뿐 아니라 회전력에 대한 구속을 포함한다.



<그림 4> 금구류 구속 위치

2.3.3 재료 물성

해석에 사용된 재료 물성값을 <표 1>에 나타냈다. 탄성계수와 푸아송비(Poisson's ratio)는 응력 및 변형 해석을 위한 가장 기본적인 재료 데이터이며, 탄성계수(E)는 응력(σ)과 변형률(ϵ)의 비례상수이고, 푸아송비는 수직방향의 변형률(ϵ_{trans})과 수평방향의 변형률(ϵ_{axial})의 비이다.

$$\sigma = E\epsilon, \quad \nu(\text{Poisson's ratio}) = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

<표 1> 재료 물성

물성	소재	금구류 (Al 합금)	FRP tube (Epoxy/Glass composite)
탄성계수 [MPa]		199,948	55,000
푸아송비(Poisson's ratio)		0.3	0.34
항복강도 [MPa]		280	243

금구류에 사용된 재료는 Al 합금이며, 재료의 세부 구성성분은 구체적으로 나타내지 않았다. FRP tube 또한 부품 제작시 포함된 첨가물(carbon fiber, Aramid, Polycarbonate)에 따라 탄성계수 및 항복강도의 물성값은 구성비에 따라 크게 바뀔 수 있다.

2.4 해석 내용 및 이론

본 해석에서는 풍하중 인가에 따른 금구류 강도 해석을 하였으며, 이에 따른 상·하 금구류 고정시의 von Mises stress를 비교하였다.

조합응력 상태의 비틀림 에너지가 단순인장시험의 뒤틀림 에너지와 같아지면 항복이 발생하는 것으로 판단하며, 이와 같은 변형률 에너지를 가설에 기초하여 아래와 같은 von Mises stress 계산식이 제시되었고, 이 von Mises stress가 재료의 항복응력에 도달할 때 항복에 의한 파괴가 발생하는 것으로 판단한다. 이를 일반적으로 von Mises stress 라고 부르며, 최대 비틀림 에너지 이론(maximum distortion energy theory)라고도 부른다. von Mises stress는 <식 2>와 같이 도출된다.

$$\sigma_{\text{von Mises stress}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

2.5 해석 결과

해석에 따른 von Mises stress 및 안전율을 <표 2>에 나타냈으며, 하부 금구류 고정 시 풍하중 인가에 따른 내부 응력은 <그림 5> (a)와 같이 하부 금구류 내부의 하중인가 방향의 90도 위치에서 최대 30.934 [MPa]의 von Mises stress가 작용하게 되었고, 반대로 상부 금구류 고정 시에도 <그림 5> (b)에서와 같이 유사한 위치에서 최대 37.448 [MPa]의 von Mises stress가 작용하였다. 하부 금구류의 경우 풍하중 인가에 따라 작용되는 응력은 금구류(Al 합금)의 항복강도에 대비하여 약 9 정도의 안전율을 가지고 있다고 볼 수 있으며, 상부 금구류는 약 7.5의 안전율을 가지고 있다고 사료된다. 이는 금구류의 응력 거동에서 볼 때 항복강도 이전 즉, 탄성 영역 내에서의 거동이기 때문에 선형적 대입을 통한 비교가 가능하다.

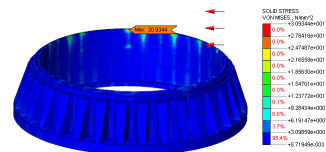
<그림 6>에서는 FRP tube가 받는 응력을 표현하고 있으며, FRP tube가 받는 von Mises stress는 상·하부 금구류가 받는 응력에 비해 작기 때문에 해석상의 과피 기여도에서 큰 역할을 하고 있지 않으며, 이러한 결과는 두 재료의 탄성계수의 차이에서 나타난 현상이다. 대개 탄성계수가 큰 재료는 동일한 변형이 발생하더라도 탄성계수의 영향으로

큰 내부 응력을 받게 된다. 따라서 풍하중에 의해 동일한 변형이 FRP tube와 금구류에 작용하게 되면, FRP tube 보다는 금구류가 더 큰 응력을 받게 되는 것이다.

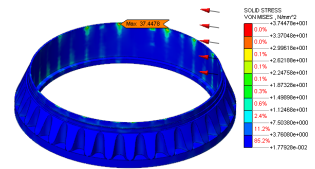
또한, 응력은 단위면적당 인가된 하중(힘)이기 때문에, 유사한 경계조건 해석에서 <그림 5> (a), (b)와 같이 다른 von Mises stress와 안전율을 보이는 것은 금구류의 부피 및 접촉하고 있는 면적의 차이에서 나타난 결과로 사료된다. 또한, <그림 5> (a)의 하부 금구류가 (b)에서의 상부 금구류 보다 더 큰 체적과 면적을 가지고 있으므로, 동일한 하중 하에서 작은 응력 값이 나타나는 것으로 사료된다.

<표 2> 해석결과

경계조건	해석 결과	von Mises stress [MPa]	안전율 ($\frac{\text{항복강도}}{\text{von Mises stress}}$)
하부 금구류 고정		30.934	9.05
상부 금구류 고정		37.448	7.48

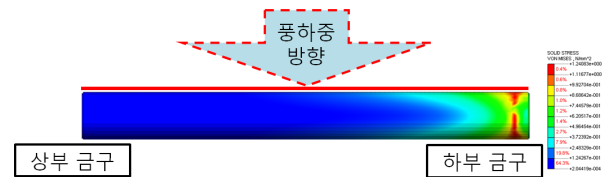


(a) 하부 금구 고정

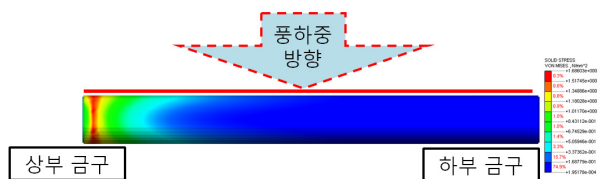


(b) 상부 금구 고정

<그림 5> 상하부 금구류 von Mises stress



(a) 하부 금구 고정



(b) 상부 금구 고정

<그림 6> FRP tube von Mises stress

3. 결 론

유한요소법을 이용하여 500kV급에 적용될 composite bushing의 FRP tube 및 금구류에 대하여 풍하중에 대한 강도 안전성을 평가한 결과, 제품 안전성을 확보할 만한 충분한 강도와 안전율을 가지고 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 토대로 보다 신속한 제품설계와 현장 적용성이 우수한 제품 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 데이터를 바탕으로 소비자로서 하여금 당사 제품에 대한 신뢰성 제고와 지속적인 제품 개발 노력을 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 62067. "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 [kV] up to 500 [kV] - Test methods and requirements
- [2] IEC 61462. "Composite insulators-Hollow insulators for use in outdoor and indoor electrical equipment-Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendation