

## 내부실드 구조에 따른 컴팩트한 폴리머 부싱 설계에 관한 연구

### A Study on the Design of Compact Polymer Bushing with Inner Control Shield

조한구<sup>1,a</sup>, 유대훈<sup>1</sup>, 강형경<sup>1</sup>  
(Han-Goo Cho<sup>1,a</sup>, Dae-Hoon Yoo<sup>1</sup>, and Hyung-kyung Kang<sup>1</sup>)

#### Abstract

This paper describes a study on the design of compact polymer bushing with inner control shield. In the bushing, a high electric stress occurred between field shaper and central conductor by the closely space. Also coaxial cylindrical shield has a great height along the axis to control an electric field. Consequently, all the potentials are raised axially along the field shaper and electric stress is concentrated on a part of the surface of the FRP tube near the upper end of the field shaper. In accordance, the field control can be achieved by means of the designs of such inner control shields. The floating and ring shield designs was decreased electric field concentration at critical parts of the bushing. The shield gaps is formed between field shaper and ring shield. Accordance equipotential lines extend through gaps. As a result, the resulting electrical stress are thus reduced in the range 17~23 % in the bushing with floating and ring shield designs. Maxwell 2D simulator based on the boundary element method was also introduced in order to verify the reliability of the polymer bushing. The optimized design uses internal elements for electric stress grading at critical parts of the bushing.

**Key Words** : Polymer bushing, Field shaper, Floating shield, Ring shield, Electric field

#### 1. 서 론

오늘날 전력산업은 전 세계적으로 가장 빠르게 성장하고 있는 기반산업이다. 또한 산업경제의 급속한 성장으로 인해 전력계통의 부하가 증가하고 대단위의 전력수송이 요구됨에 따라 송전전압의 고압화는 필연적이므로 이에 대한 기반기술의 확보는 물론 관련-전력기기의 개발이 선행되어야 한다[1,2].

한편 전력산업의 고압화는 필연적인 절연내력 저하 및 신뢰성 측면에서 그 문제가 대두되고 있으며 그 중에서도 전력기와 고압선로를 연결하는 초고압 부싱의 신뢰성 확보는 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 최근에는 기존의 자기형 부싱에서 절연성능 및 내오손 특성이 우수한 신소재 폴

리머(polymer) 부싱에 대한 관심이 높아져 가고 있으며 해외 선진 국가의 경우 대부분 폴리머 재질의 부싱을 채택하여 전 세계적으로 수요가 증가하고 있는 추세이다. 하지만 국내의 경우 대부분의 초고압 부싱은 전량 해외에서 수입되고 있으며 기술적 접근은 전무하여 거의 연구가 이루어 지지 않고 있는 실정이다[3,4]. 한편 대부분의 고전압 부싱의 경우 하단부는 전력기기의 외함과 연결되어지며 부싱의 end-fitting 부위에서의 전계집중은 피할 수 없다. 따라서 부싱의 임계부위에서의 전계집중을 억제하기 위한 부싱 내부에 금속 실드(shield)를 형성하는 것은 매우 현명한 선택이다 할 수 있다. 하지만 이로 인한 임계부위에서의 전계집중은 억제할 수 있지만 부싱 내부의 전계를 실드상단부로 집중시키는 결과를 발생시켜 또 다른 전계집중을 초래한다[5-7]. 한편 일본의 경우 부싱의 전기적 취약지점에서의 안정성 확보를 위한 반도전층 FRP tube 제작 및 부싱 내부의 전계완화 장치에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며 이미 500 kV급 이하 부싱의 경우 상용화되어 사용되고

1. 한국전기연구원 나노융합소재연구센터  
(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr  
접수일자 : 2009. 3. 20  
1차 심사 : 2009. 4. 20  
심사완료 : 2009. 4. 24

있다[8]. 하지만 이는 부싱의 제조공정 비용이 증가시켜 부싱의 가격 경쟁력 저하를 가져오는 원인이 되므로 제조비용 절감을 위하여 컴팩트한 부싱 설계 및 전계완화 효과도 우수한 쉴드 설계는 매우 중요하다 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 내부쉴드 구조를 통한 보다 컴팩트한 부싱설계를 위해 2단의 쉴드 구조 및 링 쉴드를 포함한 새로운 형상의 내부 쉴드를 설계하였다. 또한, 부싱의 취약부위인 금속 플랜지의 접합부에서 발생하는 전계집중에 따른 절연과피 감소를 특징으로 하는 절연성능의 극대화가 가능한 부싱을 목적으로 전자계 프로그램 Maxwell 2D simulator를 이용하여 전계분포 거동을 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 Composite hollow bushing의 설계

본 연구에서는 전계해석 응용을 통한 효과적인 설계를 위해 초고압 부싱의 내부 쉴드 형상에 따른 전계분포 특성을 검토하였다. 일반적으로 초고압 부싱은 가스 차단기 등에 사용되는 것으로 이는 비용, 제조공정 그리고 전기적, 기계적인 형상 등의 종합적인 평가를 통하여 제작된다. 이러한 부싱은 그림 1과 같이 기본적으로 외부 하우징과 FRP(fiber reinforced plastics) 튜브(tube) 그리고 금속 플랜지의 압착부위로 구성된다. 먼저 부싱에 사용되는 튜브는 FRP 재료에 의해 제조되어지며 이는 원통형 내부 구조를 가지고 있다. FRP 튜브 내부에는 전류가 흐르는 금속 재질의 중심도체가 위치하고 있으며 금속 플랜지(flange)는 절연물의 양 중단부에 각각 마주보는 형상을 가지며 상부

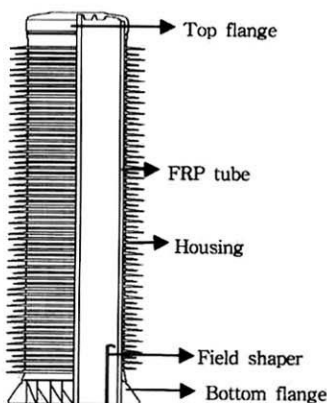


그림 1. Composite hollow 부싱의 개요.  
Fig. 1. Schematic of composite hollow bushing.

플랜지는 중심 도체에 직접적으로 접촉이 되어 높은 전위를 띄고 있는 반면 하부 플랜지는 기기의 외함에 접촉되어 접지(ground)에 가까운 차폐 부분으로 되어있다. 따라서 부싱의 입계부위에서의 전계완화는 필수적이며 이러한 전기적 취약지점에서의 안정성 확보를 위한 금속의 내부 쉴드 사용은 매우 중요한 설계요소이다.

### 2.2 Maxwell 2D simulator를 이용한 전계해석

일반적으로 최근 전력기기 분야에서는 유한요소법을 이용하여 변압기, 애자, 부싱, 케이블 등에 대한 전자계 해석을 많이 연구하고 있다. 특히 유한요소법을 이용한 전계해석 프로그램으로서 상용화되어 있는 패키지는 Flux 2D, 3D 및 Maxwell 2D, 3D 등이 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 floating 쉴드를 포함한 2단의 쉴드 구조 및 ring 쉴드를 포함한 새로운 형상의 내부 쉴드를 설계하여 부싱 내부의 전계분포 특성을 확인하였다. 해석 방식은 전자계 해석 프로그램 Maxwell 2D 축대칭 모델을 통한 인가전압 88.9 kV( $154/\sqrt{3}$  kV : 본 부싱의 경우 단상으로 고려)를 설정하였다. Maxwell 2D Simulator를 이용하여 전계 해석하는 방법은 다음과 같으며 메쉬는 약 12,000개, 에러율(percent error)은 1 % 미만으로 설정하였다. 한편 각 구성요소의 자세한 유전율은 표 1에 나타내었다.

- ① Solver Menu를 선택
- ② 설계하려는 모델을 CAD로 Drawing
- ③ 각 구성요소의 재료특성을 선정
- ④ 경계요소를 선정
- ⑤ 요소분할 및 에러율
- ⑥ Solving
- ⑦ Post Processing를 통해 전계분포 연구

표 1. 재료의 유전율.

Table 1. Permittivity for materials.

구성요소	재료	유전율
하우징	Silicone rubber	3.2
금속 플랜지	AC4C Al	1.0
절연 가스	SF <sub>6</sub> gas	1.0
FRP tube	Glass & epoxy resin	4.4

먼저 2단 쉴드 구조는 2개의 field shaper가 존재하는 것으로 기존의 단일 내부 쉴드에서 중심도체 방향으로 또 하나의 수직축을 가진 floating

shield가 설치되어 있다. 이러한 2중 쉴드의 길이는 기존의 내부 쉴드보다 길게 제작되며 내부 쉴드와 겹쳐지는 부위는 갭(gap)을 형성하여 부싱 내부의 등전위는 더 이상 밀집되지 않게 설계되어 있다. 본 구조의 특징은 부싱 내부에 형성되는 등전위선을 설계된 floating 쉴드를 통해 2단으로 분산시켜 배출시키며 큰 폭의 전위차를 억제하여 전계집중을 완화하기 위해서이며 각 쉴드의 상단부는 체결 볼트를 통해 연결된 구조로 설계하였다.

두 번째로 ring 쉴드 구조의 경우 field shaper의 상단부에 환형의 링 쉴드가 존재하는 것으로 이는 기존의 내부 쉴드에서 발생하는 전계집중을 완화시키기 위함이다. 본 구조는 floating 쉴드와 동일한 방식으로 내부 쉴드와 링 쉴드 사이에는 갭이 형성되어 있어 내부 등전위가 밀집되지 않고 2단으로 배출되는 구조를 지닌다. 따라서 부싱 내부의 전계 집중은 기존의 field shaper 상단부에서 링 쉴드의 표면으로 집중될 것이며 이러한 구조로 인해 내부 쉴드 주변의 표면 전위는 감소하여 컴팩트한 부싱의 설계가 가능하게 된다.

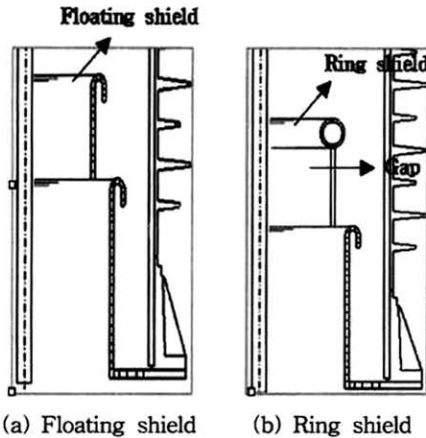


그림 2. 2단 쉴드 구조 및 링 쉴드.  
Fig. 2. Floating shield and ring shield.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Field shaper에 따른 전계분포

그림 3은 A-B(상부 플랜지 및 하우징 계면에서 하부 플랜지 및 하우징 계면까지) 라인설정에 따른 하부 플랜지 부위의 계면에서 전계완화 정도 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 내부 쉴드가 없는 경우  $9.36 \times 10^5$  [V/m]의 값을 나타내지만 내부 쉴드

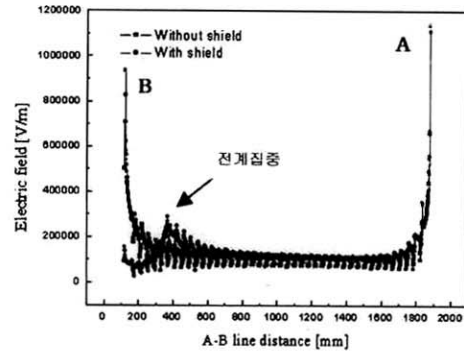


그림 3. Field shaper에 따른 A-B 라인분포.  
Fig. 3. A-B line distribution with field shaper.

가 존재할 경우  $1.57 \times 10^5$  [V/m]으로 전계가 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 내부 쉴드에 의한 부싱 내부의 등전위가 쉴드의 상단부로 상승함에 따라 플랜지 계면부의 전위차는 큰 폭으로 감소하는데 기인하는 결과로 부싱의 임계부위에서의 안정성은 큰 폭으로 향상됨을 알 수 있다. 또한, 부싱의 내부 쉴드 상단부의 전계값이 증가한 것을 알 수 있는데 그 값은  $2.21 \times 10^5$  [V/m] 정도로 나타나며 결과적으로 임계부위에서의 전계집중은 억제할 수 있지만 부싱 내부의 전계를 쉴드 상단부로 집중시키는 결과를 발생시켜 또 다른 전계집중을 초래하는 것으로 확인되었다.

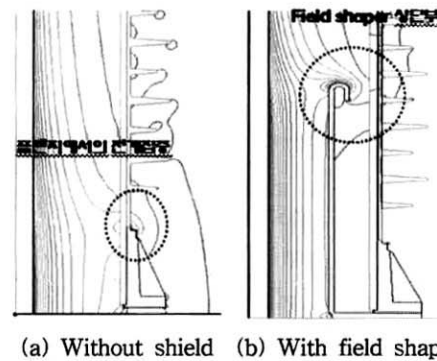


그림 4. Field shaper에 따른 전계분포.  
Fig. 4. Electric field distribution with field shaper.

그림 4는 내부 쉴드 유, 무에 따른 전계분포 특성을 나타낸 것으로 내부 쉴드가 존재하지 않는 그림 4(a)의 경우 플랜지 계면부에 전계가 집중되

고 있음을 알 수 있다. 이러한 계면의 위치는 부싱의 설계에 있어서 절연이 취약한 지점으로 전계의 상승을 가져와 섬락현상의 원인이 되어 하우징의 영구적인 손상을 불러오므로 매우 중요한 부분이다. 반면 그림 4(b)의 경우 플랜지 계면부의 전계 집중은 거의 나타나지 않음을 알 수 있지만 field shaper의 상단부에 높은 전계가 집중되고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 3에서도 알 수 있듯이 부싱의 하우징이 실리콘 고무로 제조되었을 경우 코로나 방전 등에 의해 절연성능의 저하와 부싱의 수명을 저하시키게 된다.

### 3.2 Floating 쉴드에 따른 전계분포

그림 5는 floating 쉴드 설치한 경우 A-B 라인 분포(상부 플랜지 및 하우징 계면에서 하부 플랜지 및 하우징 계면까지)에 따른 전계분포를 나타낸 것으로 하부 플랜지 계면에서의 전계값은  $1.65 \times 10^5$  [V/m]으로 초기  $9.36 \times 10^5$  [V/m]에 비해 큰 폭으로 감소함을 알 수 있으며, 내부 쉴드 상단부의 전계 또한 큰 폭으로 완화됨을 알 수 있다. 한편 그림에서도 알 수 있듯이 전계완화는 다소 왜곡된 형상으로 보이는 것으로 확인되었는데 이는 부싱 내부의 floating 쉴드 면적에 따라 나타나는 것으로 2단의 전계 배출에 의해 밀집된 등전위면이 크게 완화됨을 알 수 있다. 한편, floating 쉴드의 설계에 있어 효과적인 등전위를 배출하기 위해서는 기존의 내부쉴드와의 간격이 최대한 커질 때 나타나지만 이는 부싱의 절연내력의 저하를 야기시키므로 무한정 증가시키기는 어렵다. 따라서 부싱의 요구 절연내력에 따른 중심도체와의 간격을 설정해야 하며 본 설계 부싱의 경우 정격 170 kV, 내전압치(BIL)이 750 kV로써 floating 쉴드의 간격은 중심도체와 최소 90 mm 이상의 간격을 가질 때 요구되는 절연내력을 가질 것으로 확인된다.

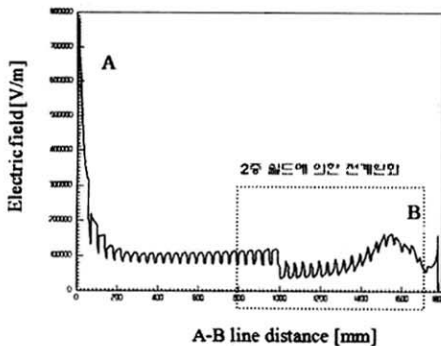


그림 5. Floating 쉴드에 따른 A-B 라인분포.  
Fig. 5. A-B line distribution with floating shield.

그림 6은 Floating 쉴드에 따른 전계분포 특성을 나타낸 것으로 등전위 분포를 나타낸 그림 6(a)의 경우 부싱 내부의 등전위는 2단의 쉴드 구조에 의해 분산되므로 쉴드 상단부에서의 전위차를 큰 폭으로 감소시킬 수 있다. 한편 전계분포를 나타낸 그림 6(b)의 경우 플랜지 계면부의 전계집중은 거의 나타나지 않음을 알 수 있으며 field shaper의 상단부 또한 전계의 집중이 크게 감소한 것을 알 수 있다. 또한 대부분의 전계는 2중 쉴드의 상하단부에 집중되고 있음을 알 수 있는데 따라서 효과적인 전계완화를 위한 모서리 부분의 곡률반경을 적절히 주어 전계집중을 억제해야 할 것으로 판단된다.

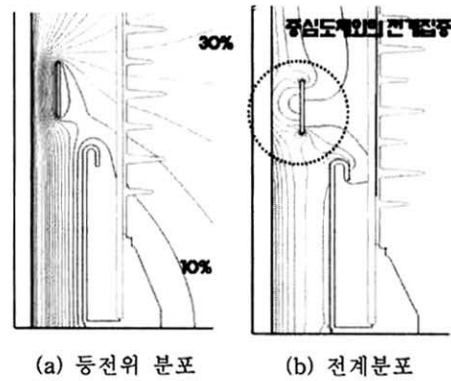


그림 6. Floating 쉴드에 따른 전계분포.  
Fig. 6. Electric field distribution with floating shield.

### 3.3 Ring 쉴드에 따른 전계분포

그림 7은 ring 쉴드 설치한 경우 A-B 라인분포(상부 플랜지 및 하우징 계면에서 하부 플랜지 및

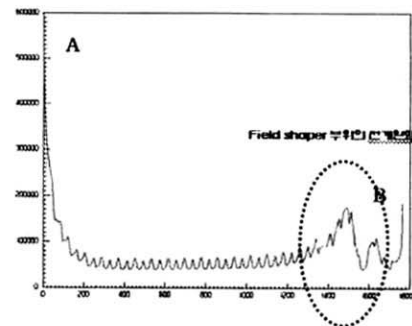


그림 7. Ring 쉴드에 따른 전계분포.  
Fig. 7. Electric field distribution with ring shield.

하우징 계면까지)에 따른 전계분포를 나타낸 것으로 하부 플랜지 계면에서의 전계값은  $1.88 \times 10^5$  [V/m], Field shaper 상단부의 전계값은  $1.85 \times 10^5$  [V/m]의 값으로 큰 폭의 전계완화가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 내부 ring 쉴드의 주변으로 전계가 분산되어 쉴드 상단부의 전위차는 큰 폭으로 감소하는데 기인하는 결과로 부싱의 임계부위에서의 안정성은 큰 폭으로 향상됨을 알 수 있다.

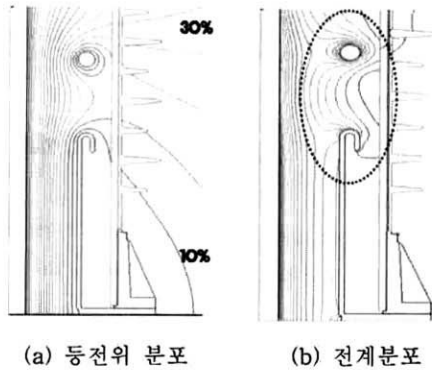


그림 8. Ring 쉴드에 따른 전계분포.  
Fig. 8. Electric field distribution with ring shield.

그림 8은 ring 쉴드에 따른 전계분포 특성을 나타낸 것으로 부싱 내부에 고전압이 인가되면 ring 쉴드의 주변 둘레로 등전위선이 분포하며 몇몇의 등전위선은 쉴드 갭에 의해 바깥으로 분포한다. 결과적으로 절연 튜브내의 전계집중 형상은 크게 감소하게 된다. 따라서 ring 쉴드 사이의 쉴드 갭은 부싱 내부의 전위 분배가 바깥으로 원활히 분배될 수 있도록 설정되며 이러한 구조로 인해 내부 쉴드 주변의 표면 전위는 감소하게 된다.

또한, 내부 쉴드 상단부에서의 전계집중은 대부분 ring 쉴드 주변으로 집중되며 표면 전계 완화 및 부싱의 취약지점인 내부 쉴드에서의 안정성은 큰 폭으로 향상됨을 알 수 있다.

그림 9는 부싱의 내부 쉴드 형상에 따른 전계값 변화를 나타내었다. 먼저, 하부 플랜지 계면부 (ground end)의 전계값을 확인한 결과 field shaper만 있을 경우  $1.57 \times 10^5$  [V/mm]의 값을 나타내며 floating 및 ring shield를 설치할 경우  $1.65 \times 10^5$  [V/mm],  $1.68 \times 10^5$  [V/mm]의 값으로 거의 차이를 보이지 않으며 다소 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 부싱 내부의 등전위가 쉴드의 상단에

집중되는 것을 고려할 때 설계된 내부 쉴드의 형상이 기존의 field shaper의 길이보다 다소 낮아져 급속 플랜지로의 전계 흐름이 커졌기 때문인 것으로 사료된다. 반면 전기적 취약부위인 내부 쉴드 상단부에서의 전계값을 확인한 결과 내부 쉴드가 없을 경우 초기  $1.40 \times 10^5$  [V/mm]으로 가장 낮은 값을 나타내지만 field shaper가 설치될 경우  $2.21 \times 10^5$  [V/mm]으로 전계집중이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 floating 쉴드가 있는 경우  $1.70 \times 10^5$  [V/mm]로 약 23 %의 전계완화가 발생되며 ring 쉴드가 있는 경우  $1.85 \times 10^5$  [V/mm]의 값으로 약 17 % 정도의 전계완화 효과가 있는 것으로 나타났다. 표 2에 자세한 내부쉴드 형상에 따른 전계값을 나타내었다.

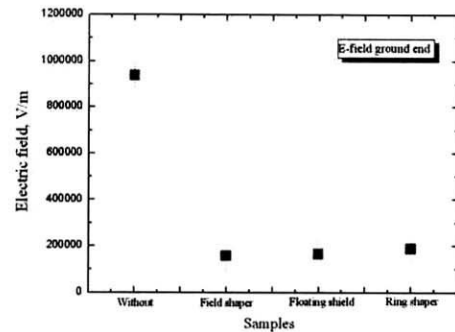


그림 9. 하부 플랜지 계면에서의 전계값.  
Fig. 9. Electric field value of bottom flange.

표 2. 내부 쉴드 형상에 따른 전계값.  
Table 2. Electric field value of shield shape.

Samples	E-field ground end [V/mm]	E-field field shaper [V/mm]	Max E-field
Without shield	$9.36 \times 10^5$	$1.40 \times 10^5$	Field shaper
Field shaper	$1.57 \times 10^5$	$2.21 \times 10^5$	Field shaper
Floating shield	$1.65 \times 10^5$	$1.70 \times 10^5$	Field shaper
Ring shield	$1.68 \times 10^5$	$1.85 \times 10^5$	Field shaper

결과적으로 해석을 통해 임계부위에서의 전계완화를 위해서는 field shaper의 존재는 필수적이지만 중심 도체와 쉴드사이에 밀집된 전위분포를 형성하며 쉴드 상단부의 전계집중을 가져온다는 것을 알 수 있다. 따라서 floating 쉴드 및 ring 쉴드의

설치는 부싱의 내부 전계를 2단으로 분산되어 집중되는 양상을 가지며 부싱의 취약지점인 내부 쉴드 상단부에서의 안정성은 큰 폭으로 향상시킬 수 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 고전압 폴리머 부싱의 절연성능 향상에 매우 중요한 설계요소로 부싱내부의 전계완화장치의 설계만으로도 절연내력 상승을 가져올 수 있다는 것을 보여준다. 일반적으로 부싱의 절연내력을 증가시키기 위해서는 중심도체와 내부쉴드의 간격을 가능한 멀리하여 전기장의 세기를 조절하는 동시에 내부전극의 상단부는 모서리반경이 큰 형상으로 제작되어야 한다. 하지만 이러한 요구는 기본적으로 부싱의 직경을 증가시킬 수 밖에 없으며 내부의 가압된 가스에 따른 큰 기계적 용력을 요구하게 되며 다른 구조의 절연물 부착에 있어서도 많은 어려움이 따르게 된다. 따라서 상용화된 부싱의 가격이 증가하게 된다. 본 논문에 제시된 내부쉴드의 형상은 전계균일화와 절연성능의 극대화를 가능케 하며 나아가 컴팩트한 부싱의 설계에 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전자계 프로그램 Maxwell 2D Simulator를 이용하여 초고압 폴리머 부싱의 내부 쉴드 형상에 따른 전계분포 거동을 고찰하였다.

- 1) Field shaper가 설계된 부싱의 경우 중심 도체와 쉴드사이에 밀집된 전위분포를 형성하며 쉴드 상단부의 전계집중을 가져와 부싱의 새로운 취약지점을 형성하였다.
- 2) Field shaper가 존재할 경우  $1.57 \times 10^5$  [V/m]의 전계값으로 초기  $9.36 \times 10^5$  [V/m]에 비해 전계집중이 적으며 플랜지 계면부의 전위차를 큰 폭으로 감소시킨 것을 알 수 있었다.
- 3) Floating 쉴드의 사용은 2단 쉴드 구조에 의해 부싱 내부의 등전위를 분산시키며 플랜지 계면부의 전계 집중 및 field shaper의 상단부의 전계 집중을 완화시키는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) Ring 쉴드의 쉴드 갭은 부싱 내부의 등전위를 바깥으로 원활히 분배시키며 링 쉴드 주변으로의 전계집중에 의해 표면 전계 완화 및 부싱의

취약지점인 내부 쉴드에서의 안정성이 큰 폭으로 향상되었다.

- 5) 부싱의 하부 플랜지 계면에서의 전계값을 확인한 결과 field shaper만 있을 경우  $1.57 \times 10^5$  [V/mm]에서 floating 및 ring 쉴드가 있는 경우 각각  $1.65 \times 10^5$  [V/mm],  $1.68 \times 10^5$  [V/mm]의 값으로 약 7 %의 전계값이 증가하였다.
- 6) Field shaper의 상단부의 전계값을 확인한 결과 Floating 쉴드가 설치될 경우  $1.70 \times 10^5$  [V/mm], ring 쉴드의 경우  $1.85 \times 10^5$  [V/mm]의 값으로 내부 쉴드가 설치된  $2.21 \times 10^5$  [V/mm]에 비해 각 23 %, 17 % 정도의 전계완화 효과가 있는 것을 알 수 있었다.
- 7) Floating 및 ring 쉴드 구조는 고전압 폴리머 부싱에 있어 효과적인 전계완화 및 절연내력의 증가를 가능케 하며 나아가 컴팩트한 부싱의 설계에 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] H. M. Schneider, J. F. Hall, A. A. Karady, and J. Renowden, "Non-ceramic insulators for transmission lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 4, p. 2214, 1989.
- [2] A. Kobayashi, H. Murase, and M. Shiiki, "Development of 550 kV-8000 A composite insulator gas bushing", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, p. 2294, 2000.
- [3] W. M. Massey, J. L. Chavez, and P. M. Hansen, "High-voltage and high current measurement techniques for a very low frequency(VLF) composite bushing", IEEE Society International Symposium, Vol. 3A, p. 342, 2005.
- [4] T. N. Judge and J. L. Roldan, "Optimization of high voltage equipment design using boundary element method based electromagnetic analysis tools", IEEE High Voltage Engineering Symposium, Vol. 2, No. 467, p. 140, 1999.
- [5] S. Monga, R. S. Gorur, and W. Massey, "Electric field calculations by boundary element method

- for a 230 kV composite bushing", IEEE Society International Symposium, Vol. 3A, p. 338, 2005.
- [6] S. Monga and R. S. Gorur, "Design optimization of High voltage bushing using electric field computations", IEEE, Vol. 13, No. 6, p. 1217, 2006.
- [7] M. M. Rao, M. J. Thomas, and B. P. Singh, "Measurement of transient electric field emission from a 230 kV gas insulated substation model during switching", JEET, Vol. 2, No. 3, p. 306, 2007.
- [8] R. Toshiaki, K. Tatsuro, H. Makoto, and I. Tetsu, "Development of insulation technology in compact SF<sub>6</sub> gas-filled bushings", JEET Extended summary, Vol. 128-B, No. 3, p. 586, 2008.