

170kV급 단로기용 Composite Insulator 설계 및 특성 연구

조한구, 박기호, 한동희, 윤문수\*, 진상용, 송희석, 이동원\*\*  
 \*한국전기연구원, \*\*주) 효성 중공업연구소

A Study Performance and Design Compositor Insulator for 170kV D/S

H.G. Cho, K.H. Park, D.H. Han, M.S. Yoon\*, S.Y. Jin, H.S. Song, D.W. Lee\*\*  
 \*KERI, \*\*Hyosung Corporation

**Abstract** - Recently composite insulators are being used for outdoor high voltage applications. Composite insulators for transmission line have significant advantages over porcelain insulators, especially for ultra-high voltage. Their advantages are light weight, vandalism resistance, and hydro- phobicity.

We developed a 170kV high reliable vertical break disconnecter with good long term electrical and mechanical performance which was achieved by the improvement of electrical performance and light weight. We discuss the outline of the development and the product.

1. 서 론

단로기(disconnecting switch)는 송전선로의 무부하시 개폐뿐만 아니라 회로의 구분 및 접속변경 또는 선로상의 기기 및 송전선로와 변전설비 등의 보수점검을 위하여 기계적인 작동으로 전원을 차단하는데 사용되는 전력기기로 옥외 변전소에 적용된다.

현재 154kV 송전선로에 사용되는 단로기(D/S)에는 자기질의 지지애자가 상용되고 있으나, 전량 수입에 의존하고 있는 것이 오늘의 현실이다. 또한 자기질의 지지애자는 기계적으로 취약하고, 옥외 환경에서 표면이 오염되고 습윤 조건이 형성되면 내오손성능이 좋지 않아 표면방전과 섬락을 일으킬 수 있으므로 주기적인 세정을 요구하는 단점이 있다[1].

이에 반하여 복합애자(composite insulator)는 내열, 내한성, 내오손성 내트래킹성 및 내후성이 우수하고, 기존의 자기질 애자의 단점이었던 발수성을 가지고 있으므로 오손상태에서도 누설전류는 낮아 섬락에 이르는 문제점이 없으므로 태풍이 잦고 섬과 염해지역이 많은 지역에서 더욱 큰 효과가 기대되고 있다. 또한 내부의 기계적인 부담을 담당하는 FRP(fiber reinforced plastics) 소재는 자기에 비하여 높은 기계적 강도를 가지면서 가볍기 때문에 소형화, 경량화를 꾀할 수 있다.

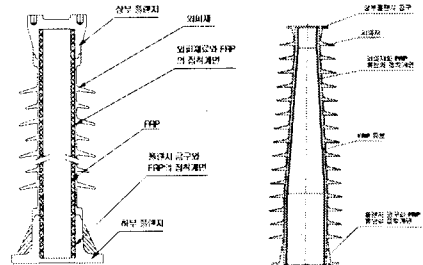
따라서 본 연구에서는 170kV급 수직 개폐형 단로기용 복합애자에 대한 모델 설계와 더불어 일반적으로 초고압에 사용되는 복합애자의 금구와 FRP와의 기계적 압착에 의한 결합 대신 열수축법에 대하여 검토하고[2], 또한, 외피재료로서 사용되는 LSR(liquid silicone rubber)의 특성에 대해 언급하였다.

2. 본 론

2.1 단로기용 복합애자의 형상[3]

복합애자의 형상은 그림 1과 같이 straight와 taper 형상 2종류가 있다. 가스차단기 등의 가스를 삽입하여 사용하는 경우에는 taper 형상이 사용 가스량의 저감, 경량화를 가져오면서도 오손 내전압을 향상할 수 있

며, 기존 자기질 부싱과의 호환성이 용이하며, 적용기기에 장점이 기대되고 있는 경우가 많다. 그러나 taper 형상은 FRP의 제작, 외피의 성형 등 생산 측면에 있어서 어려운 점이 많다. 이에 반하여 straight type은 FRP 제작 및 외피의 성형이 용이하기 때문에 다양하게 적용할 수 있으며, 외피의 성형방법을 표 1에 나타내었다[4].



(a) straight 형상 (b) taper 형상  
 그림 1. 복합애자의 구조

복합애자에는 FRP의 외부에 외피가 성형되어 양자의 경계는 접착 계면이라 부른다. 그 면적은 송전용 폴리머 애자에 비하여 수십배가 크며, 장기절연 신뢰성 측면에서 중요하며 접착 계면의 품질과 직경이 큰 FRP tube에 외피재를 성형하여 생산성은 성형방법과 밀접한 관계로서 성형방법의 선정이 중요하다. 현재 세계적으로 실용화된 성형방법의 특징에 대한 비교를 표 1에 나타내었다[4].

표 1. 외피재 성형방법

항 목	성형방법		Unit 성형	Taper형 권취	Unit 갯 접착
	분 류	사출성형	FRP에 직접 성형	공정별로 제작한 외피재를 FRP에 접착	
외 피 형	방 법	여러 pitch를 나누어 일괄성형	1pitch를 FRP에 연속하여 성형	1pitch를 편상 외피재를 나선형으로 연속권취	성형된 입을 개별적으로 FRP에 접착
		용이	곤란	용이	곤란
성형성	Taper형상	용이	곤란	용이	곤란
외피재/FRP 계면의 접착방법	가압하에 가류접착	대기압하에 가류접착			
외피재/외피재 접착방법	다단 접착	Pitch당 1개씩	나선형 접착	Unit당에 1개씩	
외피재료	LSR			HTV	

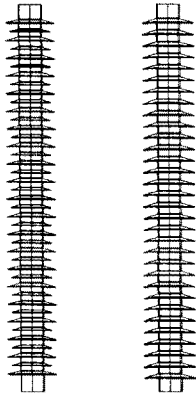
2.2 단로기용 복합애자의 형상설계 및 전계해석

단로기는 2개의 지지애자와 1개의 회전애자로 구성되어 있으며, 복합애자는 단로기의 동작 및 지지하는 역할을 분담하는 것으로 그 특성상 전기적, 기계적으로 문제가 없는 FRP, 외피재와 상/하부 플랜지로 구성되어져 있다[5].

### 2.2.1 형상설계

전력기기의 절연물인 애자의 갓은 규칙갓 또는 교대갓으로 설계한다. 종래에는 규칙갓으로 설계하는 것이 일반적이었지만, 최근에는 교대갓으로도 설계하고 있다. 교대갓의 장점으로는 규칙갓에 비해 동일한 길이에서 누설거리를 증가시킬 수 있으며, 강우시 전교(bridging) 현상을 억제할 수 있고 배수성도 양호하다. 또한, 외피 재료로 사용되는 실리콘 고무의 사용량을 줄일 수 있으므로 경제적인 측면에서도 유리하다고 볼 수 있다.

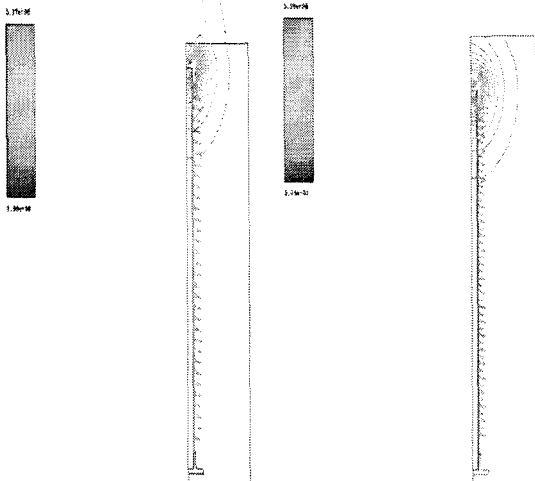
두 가지 형태의 지지애자 중 교대갓을 가진 경우에 있어서, 갓의 돌출거리에 따른 자기 세정비(self cleaning ratio)가 1.46으로서 기준치 이상의 값을 갖도록 설계하였다. 갓의 기울기는 오손물질이 잘 세정될 수 있도록 상부 기울기를 15°, 하부 기울기를 8°로 설정하였으며, 누설거리는 오손등급 III 이상으로 설계되었다. 그림 2는 설계된 복합애자의 형상을 교대갓과 규칙갓의 2D 모델로 형상화하여 나타내었다.



(a) 교대갓 (b) 규칙갓

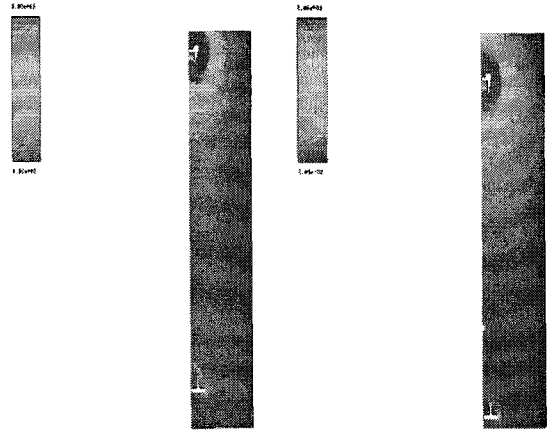
그림 2. 갓 형태의 복합애자 모델

### 2.2.2 전계해석



(a) 규칙갓 (b) 교대갓

그림 3. 모델에 대한 전계분포



(a) 규칙갓 (b) 교대갓

그림 4. 최대 전계값을 낮춘 전계분포

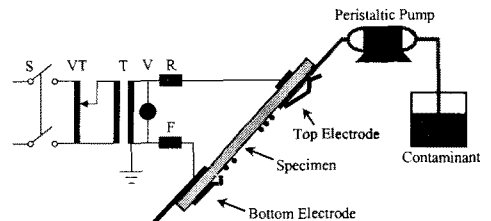
그림 3은 교대갓 및 규칙갓을 가진 모델에 대한 전계 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석된 결과를 보면, 규칙갓 모델의 경우 최대 전계값이  $5.37 \times 10^6$  V/m이며, 교대갓 모델은  $5.08 \times 10^6$  V/m로 나타났다.

이 결과로부터 계산된 최대 전계값은 절연물의 절연파괴강도에는 미치지 않기 때문에 절연상의 문제는 없으며, 규칙갓 모델의 최대 전계값이 교대갓 모델의 최대 전계값 보다 약간 높게 나타났다. 전계의 집중 부위를 살펴보면 두 모델 모두 상부 금구 및 금구와 고무와의 계면에서 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다. 갓에 대한 전계분포 contour 형태를 살펴보면 규칙갓과 교대갓에 있어서 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, 위쪽의 1번 갓과 2, 3번 갓에서 전계분포의 흐름이 약간 다르게 나타나고 있음을 관찰할 수 있기 때문이다.

그림 4는 전계분포 양상을 보다 쉽게 검토하기 위하여 최대 전계값을  $5 \times 10^5$  V/m로 낮추어 해석한 결과를 나타내었다. 이의 분포에서는 전압이 인가된 상태에서 환경 오손인자 등의 축적에 따라 균일하지 못한 형태로 변화하게 된다.

### 2.3 외피재료의 특성

최근 자료에 의하면 복합애자는 전기적·기계적 요인에 의한 사고가 35%를 차지하고 있는데 반면에 장기적인 열화에 의해서 나타나는 사고는 64%이었다. 여기서, 열화에 영향을 미치는 직접적 원인은 주로 오손 및 습윤에 의한 방전에 의해서 일어나게 된다.

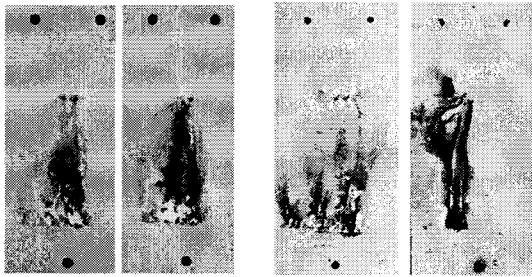


- S : power supply switch
- VT : variable ratio transformer
- T : high voltage transformer
- R : series resistor
- V : voltmeter
- F : overcurrent device, fuse or relay

그림 5. 시험회로 및 전극과 시료의 구성

그림 5는 경사평면법의 시험회로 및 전극과 시료의 전체적인 구성을 나타내었다. 상부 및 하부전극을 시료에 부착하고, 상부전극과 시료 사이에 오손액이 균일하게 흐르도록 8개의 여과지를 겹쳐 상부전극과 시료 사이에 끼워 정량펌프로 오손액을 공급하였다. 시험 주파수는 60Hz, 출력전압은  $\pm 2\%$ 이내에서 6kV까지, 전류는 60mA로 설정하였다. 상부전극과 하부전극의 거리는  $50 \pm 0.5\text{mm}$ 이고, 수평으로부터  $45^\circ$ 로 유지하였으며, 전극은 스테인레스를 사용하였다.

트래킹 파괴에 대한 정의는 두 가지로서 첫째는 고압 회로에 60mA 이상의 전류가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간이며, 두 번째는 도전로(conducting path)가 하부전극으로부터 상부로 25mm 지점까지 형성되는 시간으로 나타낸다. 일반적으로 전자를 내트래킹성 평가기준으로 많이 이용되고 있다.



(a) HTV (b) LSR  
그림 6. 트래킹 실험 후의 표면  
(실험조건 : 4.5kV, 6시간)

그림 6은 4.5kV에서 6시간 동안 트래킹 시험을 한 후의 HTV와 LSR 표면의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 HTV는 하부전극 부분이 침식이 일어났으며, LSR 보다 깊은 침식(erosion)이 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한, HTV, LSR 모두 4.5kV 6시간에서 트래킹 파괴는 일어나지 않았다. 이러한 결과로부터 일반적인 탄화 수소계 고분자와는 달리 실리콘 고무는 침식형의 열화가 주로 발생하며, 탄화에 따른 도전로 형성은 비슷한 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 외피재료로 사용되는 HTV와 LSR의 접촉각 특성을 측정하였다. 전체적으로 HTV가 미소하게 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

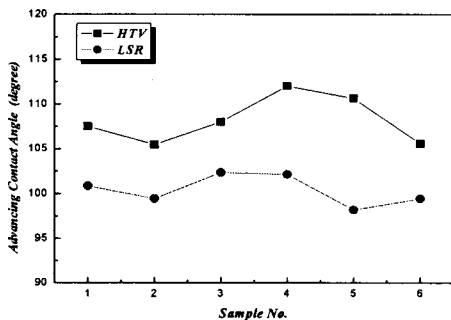


그림 7. 접촉각 특성 비교

#### 2.4 성형된 복합애자

LSR의 주입압력, 주입시간 및 주입 후의 경화시간 등 시험조건을 변화시켰다. 최적조건으로 APG(automatic pressure gelation) 설비에 의하여 성형된 복합애자의 형상을 그림 8에 나타내었다.



그림 8. 성형 복합애자와 비틀림파괴하중시험 지그 설치

### 3. 결 론

본 연구에서는 170kV급 수직 개폐형 단로기용 복합애자에 대한 모델의 설계, 해석 및 외피재료로서 사용되는 LSR의 특성에 대해 간략하게 언급하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 교대갯은 일정한 길이에서 누설거리를 증가시킬 수 있었으며, 강우시 전교 현상을 억제함은 물론 배수성도 양호하였다. 또한, 외피재료의 사용량도 규격값보다는 적으므로 경제적인 측면에서도 유리하다고 볼 수 있었다.
2. LSR은 직경이 큰 절연물을 제조할 경우 인열강도(tear strength)의 우수성으로 인하여 성형성이 우수하였지만, 접촉각 등은 HTV 보다 낮은 값을 나타내었다.
3. 현재까지의 연구 결과 성형성 및 기계적 성능(비틀림 파괴하중, 굽힘파괴하중 및 인장파괴하중) 등은 만족하였으며, 세부적인 시험은 진행중에 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 진상용, 이동원, 송원표, 송희석, 조한구 "170kV급 단로기용 Composite Insulator 제조기술에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회, 2002,
- [2] 박기호, 조한구, 한동희, "154kV급 Hollow Composite Insulator의 기계적 강도해석 및 특성시험", 한국전기전자재료학회 추계학술대회, 2002.
- [3] 전기학회기술보고, "복합 애관, 애자 기술의 현상", 2001.
- [4] T. Nakayama, Y. Fukami, "Development of Polymeric Hollow-Core Insulators", NGK Review, No. 58, 1999.
- [5] "Composite Insulators-Hollow Insulators for Use in Outdoor and Indoor Electrical Equipment-Definitions, Test Methods, Acceptance Criteria and Design", Technical Report IEC 61462.