
친환경적인 콤팩트 송전탑용 폴리머 절연암의 성능평가에 관한 연구

송홍준* · 박기호** · 김관형*** · 변기식* · 황용연*+

The performance evaluation of the polymer arm insulator for a compact
transmission line tower

Hong-jun Song* · Gwan-hyung Kim** · Gi-sik Byun* · Yeong-yeun Hwang*+

요 약

최근 고압송전선 시설에 대한 경과지 확보가 점점 어려워짐에 따라 환경 친화적인 콤팩트한 송전탑 설계가 요구되어 지고 있다. 콤팩트한 송전탑용 절연재료로서 폴리머에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 철탑암의 재료로서 폴리머 재질이 몇몇 선진국에서 적용되어 좋은 결과를 얻고 있다. 그러나 국내에서는 송전용 철탑암에 대한 폴리머재질의 적용은 미흡한 실정이었는데, 이제는 폴리머에 대한 고강도, 고기능화 기술이 개발되고 있으므로, 이를 송전용 철탑암에 적용하게 되면 급격한 전력수요의 증가에 따른 송전공급의 증대에 민첩하게 대응할 수 있는 방안으로 판단된다. 본 연구에서는 송전탑용 폴리머 절연암을 설계하고, 그것의 전기적 특성을 해석하고, 기존 철탑에 적용한 콤팩트 송전탑을 설계하여 기계적 안정성을 시험하였다.

ABSTRACT

As a right-of-way security for the high power transmission line tower construction is becoming more and more difficult, the friendly environmental compact tower design is required. For a proper insulation for the compact tower, the polymer material are being tried. Some countries has already adapted, in the various polymer application and management data, polymer arm insulator to the transmission tower, and showd a stable operation. However, in our country, the polymer arm insulator has left much to be desired in the installation on the transmission line tower. But polymer material has been developed by high strength and technology and is expected to be used in various electric equipments. The polymer arm insulator is a one of good electric insulation materials to expand the power supply capacity in the rapid power demand increasement In this research, the new polymer arm insulator is designed and its electric specifications are analyzed. Its mechanical specifications is verified through the field test on the compact tower which is modified by the polymer arm insulator.

키워드

Polymer Arm, Transmission Line, Compact Tower, Insulator

* 부경대학교
** (주)티와이테크
*** 동명대학교
+ 교신저자

I. 서 론

생활수준의 향상으로 전력사용의 증가에 따라 생활 주변에 전력설비가 늘어나고 있으며, 국민들의 환경에 대한 의식수준의 향상으로 전기환경에 대한 관심도 점점 증가되고 있다[1]. 따라서 전력수요의 지속적인 증가와 전력생산과 수요의 지역적 불균형으로 송전설비의 건설은 불가피하지만 토지구입비 상승 및 님비현상 등에 따른 토지구입난 등의 건설여건의 악화에 따라 송전선로용 경과지 확보는 국토가 좁은 우리나라에서는 이미 전력산업의 최대 현안으로 부각되고 있으며, 토지보상비와 건설비가 크게 증가될 것으로 예상되고 있다. 기존의 송전선로가 도시미관 및 국토발전에 부정적인 요소가 크므로 이것의 개선과 대용량 송전이 가능한 새로운 환경 친화적 송전설비 기술의 도입이 요구되고 있다 [2]. 이러한 기존의 송전선의 전력공급 증강대책으로 첩탑의 일부개조와 지지물의 절연화에 의한 송전전압의 증대를 현안으로 대책을 고안하고 있는 실정이다[3].

II. 본 론

2.1 폴리머 절연암 형상설계

소재기술의 발달로 송·배전선로에 요구되는 기계적·전기적 성능을 만족하는 폴리머 절연물 개발은 80년대 초부터 진척이 되었으며, 최근에는 초고압 절연 특성을 만족하는 폴리머 소재가 송전탑의 암 절연물로 적용되면서 새로운 개념의 송전설비 형태가 태동하기 시작하였다. 최근에는 미국, 캐나다, 호주 등지에서 폴리머 절연암을 이용한 구현과 경제성 측면에서 매우 우수한 성능을 얻게 되었다.

절연암에 사용되는 주재에 대한 형상설계는 일반적인 송전선로의 애자의 설계 기준을 따른다. 표 1에서 보는 바와 같이 애자를 사용하는 송전전압 154[kV]에 대한 절연거리는 오손등급 A등급 환경에서 식(1)과 같다[4].

$$318[\text{mm}] \times 12[\text{개}] = 3,816[\text{mm}] \quad (1)$$

여기서 318[mm]는 120[kV] 현수애자의 최소 누설거리이다. 본 연구에서는 이 누설거리를 폴리머 절연암으

로 실현하기 위해서 다음 식(2)와 같은 최소 절연거리를 설계기준으로 삼는다.

$$19.1[\text{mm/kV}] \times 170[\text{kV}] = 3,247\text{mm} \quad (2)$$

여기서 170[kV]는 송전전압 150[kV]의 상시전압이다. 한편, 이 누설거리에 안전율 20[%]를 적용하면, 식(3)과 같이 되어 154[kV]에 대한 절연거리 기준을 3,896[mm]로 둔다.

$$3,247[\text{mm}] \times 120\%(\text{안전율}) = 3,896\text{mm} \quad (3)$$

표 1. 연면누설거리 방식에 의한 애자의 수량
Table. 1 Number of insulator determined by creeping leakage distance

전압별	애자 규격	오손구분 ESDD (mg/cm ²)	청정 지역 0.03 이하	오손등급			
				A	B	C	D
				0.06 3	0.12 5	0.25	0.5
154 kV	120kV 보통 (현수)	누설거리[mm/kV]	-	19.1	22.9	25.4	28.0
		애자갯수[개]	-	12	14	16	17
	120kV 보통 (현수)	누설거리[mm/kV]	-	17.8	20.3	24.1	26.7
		애자갯수[개]	-	8	9	10	11
	120kV 보통 (내장)	누설거리[mm/kV]	-	19.1	22.9	25.4	28.0
		애자갯수[개]	-	11	13	14	16

한편 송전전압 154[kV]에 상간 공기 절연간격은 표 2에서 보는 바와 같이 1,500[mm]이므로, 이들 상간 절연거리와 공기절연간격을 고려한 폴리머 절연암의 주재에 대한 형상은 그림 1과 같이 설계된다[7].

표 2. 공기절연간격
Table. 2 The distance of Air insulation

전압별	구분	절연간격	
154kV	표준절연간격(mm)	현 수	1,300
		내 장	1,300
	최소절연간격(mm)	현 수	1,150
		내 장	1,150
	이상시 절연간격(mm)		450
	상간 절연간격(mm)(주)		1,500

(주) 상간절연간격은 충전부간(Metal-to-metal)에 유지하여야 하는 최소 절연간격

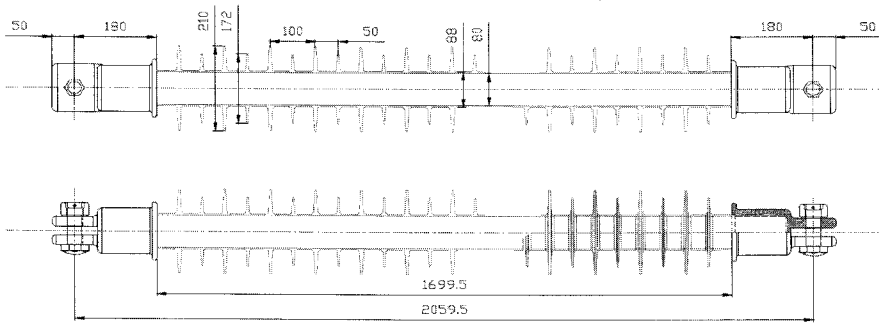


그림 1 절연암용 주재의 형상설계
Fig. 1 Shape design of main material insulation arm

여기서 사용되는 주재는 길이 1959.5[mm], 직경 $\Phi 80$ [mm]의 FRP Rod를 사용하며, 이 Rod에 사용되는 갓은 교대갓으로서 큰 갓은 $\Phi 210$ [mm]짜리 17개, 작은 갓은 $\Phi 172$ [mm]짜리 17개씩 사용한다. 이렇게 설계된 절연암 주재의 절연거리는 4,750[mm], 건조섬락거리(공기 절연 간격) 1,699.5[mm]가 되어 충분한 절연거리가 유지된다. 이와 같이 설계된 주재 2개와 기존 154[kV]급 폴리머 절연물로 된 조재 2개를 사용하여 형상 설계되는 폴리머 절연암은 그림 2와 같이 구성한다.

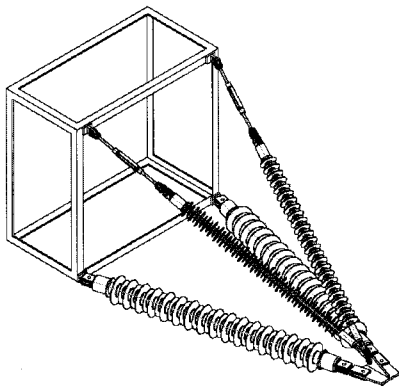


그림 2 앵글 철탑용 절연암의 형상설계
Fig. 2 Shape design of angle steel tower insulation arm

2.2 폴리머 절연암의 전계 해석

폴리머 절연암이 설치되는 철탑의 경우 송전선로간의 충분한 절연설계에 따른 전계해석을 통하여 안정성을 검토할 필요가 있다. 이를 위해서 절연암에 사용된 주

재 및 부재에 대하여 인가전압에 따른 부위별 전계해석을 Maxwell 2D Field Simulator를 이용하여 검토하였다. 전계해석은 축대칭 전장 모델링을 구하여 그림 3과 같은 순서로 진행하게 되며, 갓 형상에 따른 전계분포의 차이를 분석하고 검토할 수 있다. 여기서 사용된 폴리머 절연암의 재료 특성은 표 3과 같은 유전율로 선정하였으며 인가전압은 154[kV]로 설정하였다.

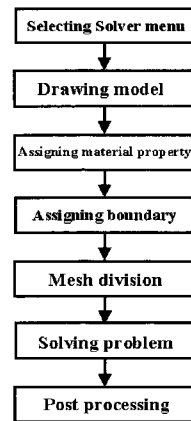


그림 3 전계 해석순서
Fig. 3 Electric field interpretation order

표 3. 각 구성재료의 설정 유전율
Table. 3 Set dielectric constant of composition material

구성요소	재료	유전율(ϵ_r)
하우징	Silicone rubber	3.2
전극	금속	1
FRP 심재	FRP	4.4

그림 4는 폴리머 절연암의 2D 축방향 모델링을 통하여 도체부에 154kV를 인가할 때 부위별 최대 전압분포를 해석한 결과로서 전체적으로 전압이 도체부 및 폴리머에 영향을 미치고 있으며, 특히 3번째 갓까지 전압의 인가에 따른 영향을 받고 있으나 전체적으로 폴리머의 몸체 및 갓부근에서 큰 영향을 보여주고 있지 않음을 알 수 있다.

그림 5의 (a)에서는 전계분포를 나타낸 것으로 대부분 전압의 인가 측 쪽의 전극 및 전극과 하우징 사이에 대부분 집중되는 양상을 보여주고 있으며, 그 이외의 부분에서는 전계값은 낮게 형성됨을 알 수 있다.

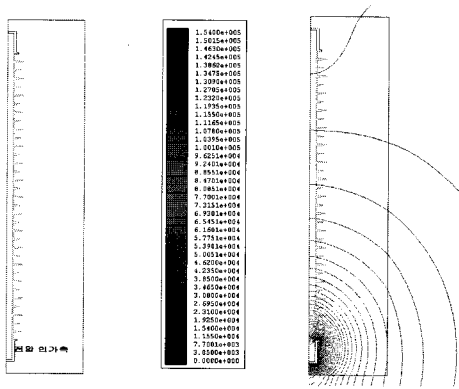


그림 4 절연암 주재에 대한 모델링 및 최대전압분포(contour plot)
Fig. 4 About insulation arm of main material modeling and peak voltage distribution

또한 (b)는 전계 집중부위를 확대하여 나타낸 것으로 최대 전계값은 $4.98e+6[V/m]$ 이었으며, 전극과 하우징 계면에서의 전계값은 $3.11e+6[V/m]$ 이었다. 계산된 최대 전계값은 절연물의 절연과과강도에 미치지 않기 때문에 절연상의 문제는 없다. 그리고 하우징의 6번째 갓의 경우에는 약 $2.49e+5[V/m]$ 정도로 낮은 전계분포 양상을 보여주고 있어서 큰 문제가 되지 않았다. 결론적으로 송전선이 고정되는 도체부근에서 최대전압 및 전계분포가 발생하며, 도체부와 폴리머(실리콘)가 연결되는 부분에서 전위차, 전계가 매우 크게 발생함을 알 수 있다.

III. 폴리머 절연암이 부착된 콤팩트 송전탑 시공

폴리머 절연암을 이용한 친환경 콤팩트 송전 철탑은 관형철탑, 앵글철탑에 적용하는 방안으로 크게 대별될 수 있다.

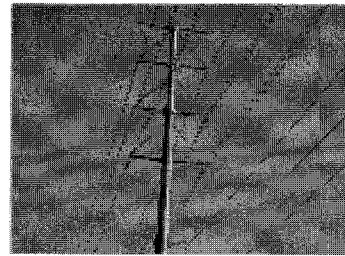


그림 6. 관형 철탑을 이용한 폴리머 절연암
Fig. 6 The Polymer insulation arm which uses the tubular type steel tower

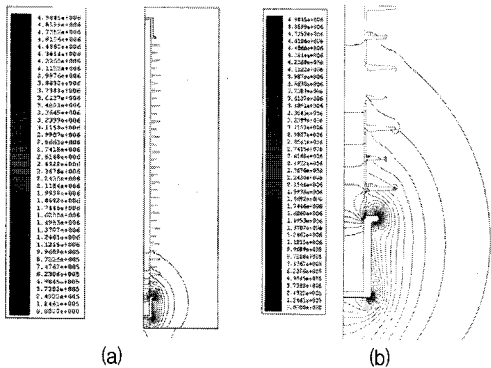


그림 5 주재에 대한 전계해석 (최대 전계값= $4.98e+6[V/m]$)
Fig. 5 Electric field interpretation of main material(maximum electric field value= $4.98e+6[V/m]$)

그림 6는 미국, 호주, 캐나다 등지에서 관형 철탑에 폴리머 절연암을 적용하여 콤팩트화 된 철탑을 보여주고 있다. 이 철탑의 시공은 관형 철탑에 폴리머 암의 주재암과 조재암을 적용한 예이다. 본 연구에서는 기존 앵글철탑의 앵글 철재암을 철거 및 보강을 통하여 폴리머 절연암의 대체에 따른 시공방법으로서, 그림 7에서 살펴본 바와 같이 애자연을 철거한 이후 철재암 절단하고, 절단되어진 앵글철탑에 보강판으로 철탑을 보강한 이후 폴리머 절연암을 시공하는 방법으로 콤팩트화된 철탑을 완성하였다.

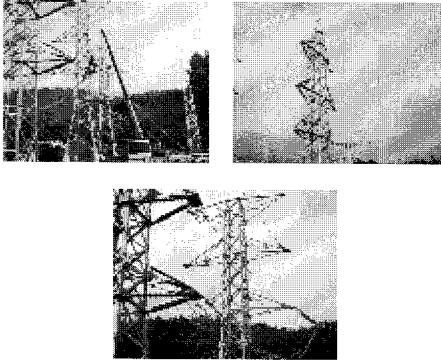


그림 7. 본 연구에서 제안하는 앵글 철탑에 폴리머 절연암을 적용하는 과정

Fig. 7 The process which applies the Polymer insulation arm in the angle steel tower which proposes from the research paper

IV. 콤팩트 송전탑의 절연암에 대한 성능평가

4.1 전기적 성능평가

폴리머 절연암의 경우 일반적인 절연물과 동일한 조건으로 전기적 성능시험을 실시한다. 그림 8은 상용주파 건조섬락전압으로서 AC 내전압기를 통하여 인가전압을 시험전압 500[kV]의 약 75%까지 적당히 상승시키고 이후 매초 시험전압의 약 2%의 상승률로 상승시켜 섬락전압을 확인한 결과 평균 650[kV] 섬락전압을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 시료로서 뇌충격 섬락전압치 정/부극성(850/-850kV)을 각각 15회씩 인가하여 시제품의 절연상태 이상유무를 확인한 결과 이상이 없었다.



그림 8 설계된 폴리머 절연암에 대한 전기적 성능시험 (한국전기연구원)

Fig. 8 Electric performance test on the polymer insulation arm

4.2 기계적 성능평가

폴리머 절연암을 이용한 콤팩트 철탑의 경우 실제 전선하중에 의한 절연암에 미치는 영향을 검토하는 시험을 행하는 것으로서 수평하중 시험과 수직하중시험을 실시한다. 수평하중시험은 철탑제작기준의 피시험 지지물에 상시 상정하중의 1.5배 또는 이상시 상정하중의 1.0배를 1분간 가한 후 하중을 제거하고 각부의 이상유무 및 영구변형 확인하게 된다. 그림 9은 수평하중시험으로서 시험기준 4,600[kgf] 이상의 하중을 1분간 인가하여 폴리머 절연암 및 취부용 금구에 이상유무를 확인한 결과 이상이 없었다.

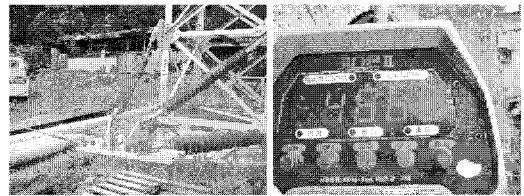


그림 9 폴리머 절연암에 대한 수평하중시험 (고창 한전전력시험센터)

Fig. 9 Horizontal load test on polymer insulation arm

일반적으로 수직하중시험의 기준은 4,000[kgf] 이상의 하중에 문제가 없음을 확인하는 시험으로서, 본 성능평가에서는 그림 10과 같이 실제 철탑에 시공되어진 폴리머 절연암의 상단 플레이트 부분에서 하단방향의 수직방향으로 하중을 가하는 시험을 실시하여 편심이 발생하였는가를 평가하였다. 본 시험을 통하여 수직방향으로 4,000[kgf] 이상의 하중을 가한 결과 이상이 없었다.

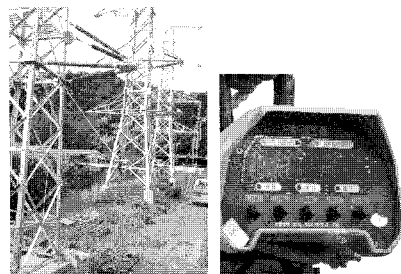


그림 10 폴리머 절연암에 대한 수직하중시험 (고창 한전전력시험센터)

Fig. 10 Vertical load test on polymer insulation arm

이상과 같이 설계된 폴리머 절연암의 전기적/기계적 성능을 표4와 같이 요약하였으며, 이를 기존 154[kV] 송전철탐에 적용하여 콤팩트화를 이룬 결과 표 5와 같이 용지부담이나 고도를 낮출 수 있는 우수한 점을 확인할 수 있었다.

표 4. 설계된 절연암의 전기적/기계적 성능
Table. 4 Electrical/Mechanical characteristic of the designed polymer insulation arm

주요사항		특성치	
절연암 성능	상용주파 건조섬락	500 KV	
	상용주파 주수섬락	420 KV	
	뇌충격섬락	정극성	850 KV
		부극성	850 KV
	인장내하중	6,000 kgf	
	굽힘파괴하중	1,500 kgf	
	수평하중	4,600 kgf	
수직하중	4,000 kgf		

표 5. 기존 송전철탐과 콤팩트 송전철탐의 비교
Table. 5 The comparison of existing tower with compact tower

항 목	기존 154kV 철탐	154kV 콤팩트화 철탐
회 선	2회선용	
전 선 경	ACSR 410mm ² , 최대사용장력 5,000kgf	
경간길이	300mm	
수평 선간거리	8.0m	5.6m
수직 상간거리	4.5m	3.0m
철탐지상고	49.0m	42.0m
애자류 형태	자기재 현수애자	폴리머 절연암, 폴리머 애자
철탐 용지비	높 음	낮 음

V. 결 론

현재 선진국에서는 폴리머 절연암의 다양한 적용방안 및 사후 관리에 대한 연구가 추진되어져 안정화를 확보하고 고품질의 절연암을 제조하여 적극적으로 활용하고 있는 실정이나 국내에서는 이에 대한 적극적인 연구 및 적용이 부족하다.

본 연구에서는 친환경적인 콤팩트 송전철탐용 폴리머 절연암의 설계와 성능평가를 검토하였다. 폴리머 절연암의 형상설계 및 전계해석을 통하여 제작되어진 실

제품에 대하여 154[kV] 송전철탐에 대한 전기적·기계적 성능평가를 통하여 특성이 매우 우수함을 확인하였고, 기존 154[kV] 송전철탐의 암을 폴리머 절연암으로 콤팩트화하면 전체적으로 자재가격, 공유면적, 시공비 등이 25% 감소할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 장기간 그에 따른 성능과 효과를 평가 중에 있으며 이를 바탕으로 필드 적용이 예상되고 있다.

참고문헌

- [1] 초고압 송전에 관한 II 단계연구III, 한전전력연구원 보고서 1994.
- [2] 154kV 송전철탐용 폴리머 절연암 개발, KEPCO-05-C23 2007.
- [3] 沼尻 一正 “66kV 송전선의 154kV화의 대한 콤팩트화 기술의 개발”, 전기현상기술, pp 21-27,
- [4] 한전 송변전설비 설계기준, “직접접지방식 송변전설비 절연협조 기준(해설서)”
- [5] 전기협동연구, “가공송전선용 유기애자의 현상과 미래의 전망”, 제 56권, 제 1호, pp. 102-117, May, 2000.

저자소개



송홍준(Hong-Jun, Song)

2009년 부경대학교 제어계측학과 공학박사
1977년~현재 (주)티와이테크 대표이사

※관심분야: 전기절연물의 전자계 특성, 폴리머 애자의 성능분석, FRP 기계적특성

박기호(Ki-Ho, Park)



1999년 부경대학교 제어기계공학과 공학석사
2004년~현재 (주)티와이테크 개발실장

※관심분야: 전기절연물의 전자계 특성, 폴리머 애자의 성능분석, FRP 기계적특성



김관형(Gwan-hyung Kim)

2001년 한국해양대학교
전자통신공학과 공학박사
2000년~현재 동명대학교 컴퓨터
공학과 전임강사

※관심분야: USN, 최적제어, 인공지능, ASIC 설계, 임베디드 시스템 설계



변기식(Gi-Sig Byun)

1990년 Wichita State University
전기공학과 공학박사
1990년~현재 부경대학교
전기제어공학부 정교수

※관심분야: 디지털제어, 비선형제어, 신호처리, 전력선통신, 전력선 진동해석



황용연(Yeong-Yeun Hwang)

1992년 일본 요코하마국립대학
생산공학과 공학박사
1992년~현재 부경대학교
전기제어공학부 교수

※관심분야: 지능제어 시스템, 동역학, 로봇제어 및 설계