

17.5 kV Recloser용 Bushing 2종에 대한 전계강도 연구

신영준, 오연호, 김민규, 이정기, 김수정, 김진기*, 김귀식*, 정정훈**
한국전기연구원, *진광이앤씨, **아주콘트롤

A Study on the Electric Field Strength of Two Bushings for 17.5 kV Recloser

Y.J. Shin, Y.H. Oh, M.K. Kim, J.G. Lee, S.J. Kim, J.K. Kim*, K.S. Kim*, J.H. Jung
KERI, *Jinkwang E&C, **A-Joo Control

Abstract - The study of electric field analyses has been conducted on two kinds of bushings for 17.5kV SF₆ gas insulated recloser.

In this paper, two model bushings and input conditions for the analyses are described in detail. The results of the electric field analyses are presented and compared with to find out the better design in two bushings.

Finally some suggestions are given for improving the insulation characteristics of the bushings.

SF₆ 가스중에서와 지지절연물 연면에서의 절연설계 설계전계강도는 일반적으로 다음 식을 사용하여 계산할 수 있으며, 허용전계강도에 비해 일반적으로 20% 이상의 여유를 가지고 있다. 이는 부품의 가공 및 제작과정에서 오는 오차와 도체표면효과 등을 고려한 것으로 생각할 수 있다. 이 식에서 σ 와 a 는 상수로서 가스 중에서와 지지절연물에서의 값이 서로 다르다.

$$E_d = E_g (1 - 3\sigma)a \text{ [kV/mm]} \text{ ----- (2)}$$

상기 2개의 식을 사용하여 BIL(Basic Impulse Level) 기준으로 절대가스압력의 변화에 따른 SF₆ 가스의 허용전계강도 및 설계전계강도를 계산하면 표 1과 같이 요약될 수 있다.

1. 서 론

배전계통에서 고장구간 분리, 사고범위 축소 등의 목적으로 사용되는 17.5 kV SF₆ 가스절연 리크로저는 순간적 고장 제거 및 재투입의 기능을 가지고 있으며, 현재 동남아 수출용으로 진광이앤씨(주)와 아주콘트롤(주)에서 공동으로 개발 중에 있다.

17.5 kV SF₆ 가스절연 리크로저 개발과정에서 인입·인출구의 부상에 절연상 문제점이 다수 발견되어 이 부분의 절연성능을 개선하기 위하여 집중적인 전계해석이 필요하였다. 리크로저의 인입·인출구에는 최근 절연재료로서 광범위하게 사용되고 있는 합성 고분자 재료인 실리콘을 주 원료로 하여 개발된 폴리머 부상(Polymer Bushing)이 검토 중에 있다.

본 연구에서는 우선 17.5 kV SF₆ 가스절연 리크로저에 사용되는 폴리머 부상에 대한 가스절연 설계기준을 논의하였으며, 리크로저의 절연성능을 개선하기 위하여 적합한 부상 모델을 찾고자 노력하였다. 이를 위해 두 가지 모델의 폴리머 부상을 선정하였으며, 각 모델에 대한 전계해석을 수행하여 절연특성을 비교·분석한 결과를 본 논문에서 기술하고자 한다.

표 1. SF₆ 가스의 허용전계강도 및 설계전계강도 (BIL 기준)

압력 P (kg/cm ² abs)	가스중의 절연설계[kV/mm]		지지절연물 연면 절연설계[kV/mm]	
	허용전계강도	설계전계강도	허용전계강도	설계전계강도
1.0	7.4	5.66이하	10.5	6.90이하
1.5	10.57	8.09이하	13.34	8.76이하
2.0	13.62	10.42이하	15.81	10.39이하
3.0	19.46	14.89이하	20.08	13.19이하

부상의 재료로 쓰이는 에폭시는 시험결과 약 14.6[kV/mm]의 절연내력을 가지며[1], SF₆ 가스 압력에 따른 연면 절연파괴 강도는 표 2와 같다[1]. 또한, 대기압에서의 공기 절연파괴 강도는 문헌에 약 3.0[kV/mm]로 나타나 있다[2].

표 2. 에폭시 연면 절연파괴 강도
(전극간 간격: 15mm, 교류전압)

SF ₆ 가스압력	1회	2회	3회	평균
100 kPa	83 kV	85 kV	80 kV	83 kV
150 kPa	105 kV	100 kV	103 kV	103 kV
200 kPa	120 kV	115 kV	109 kV	116 kV

2. 해석모델 및 입력조건

2.1 SF₆ 가스의 허용전계강도 및 설계전계강도

SF₆ 가스는 절연성능 및 소호성능이 우수하여 각종 차단기 및 개폐기의 절연물질 및 소호물질로 많이 사용되고 있다. 본 리크로저에서도 차단부에는 Vacuum Interrupter를 사용하고 도전부와 탱크 사이의 절연물질로는 SF₆ 가스와 고체절연물을 사용하고 있기 때문에 SF₆ 가스의 전계강도는 매우 중요한 설계 고려사항이 된다.

SF₆ 가스중에서와 지지절연물 연면에서의 절연설계 허용전계강도는 일반적으로 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다. 단, P는 절대압력 값을 나타내며, a와 b는 상수로서 가스중에서와 지지절연물에서의 값이 서로 다르다.

$$E_g = aP^b \text{ [kV/mm]} \text{ ----- (1)}$$

2.2 해석 모델

그림 1은 해석하고자 하는 부상 모델 A와 모델 B의 설계도를 나타내고 있다. 그림에서 ①은 silicone, ②는 epoxy, ③은 bolt, ④는 tank, ⑤는 전압 검출 기능을 갖고 있는 핀(pin)을 나타내고 있다.

볼트 체결부는 4개소(90°), 핀은 부상에 3개소(120°)로 위치하고 있다. 두 모델의 차이점은 그림에서 알 수 있듯이 모델 B가 tank내 bushing의 길이가 32[mm] 짧으며, bolt 체결부가 더욱 복잡한 형상을 가지고 있는 것이다. 전계해석은 해석의 편의와 해석시간의 절약을 위해 2차원 축대칭으로 해석하였으며, 볼트 체결부와 핀의 위치에서는 작은 차이가 발생할 수 있으나 3차원 해석시의 최대전계 값과 큰 차이는 발생하지 않을 것으로

생각된다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 부싱의 등전위선

그림 3은 축대칭 2차원 전계해석 후 부싱의 2가지 모델 A, B의 등전위선을 나타내고 있다. 등전위선의 형상으로는 구별하기 힘들지만 모델 B의 경우 부싱 하부의 길이가 짧은데도 불구하고 등전위선이 비교적 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

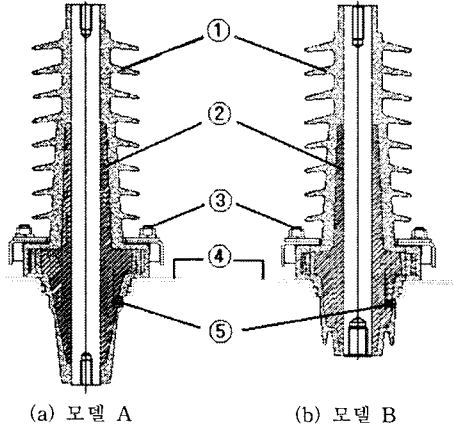


그림 1. 부싱 해석 모델

2.3 매질상수 및 경계조건

해석을 위한 입력조건으로 표 3에 나타나 있는 절연물의 매질상수인 비유전율의 값을 입력하였다.

표 3. 절연물의 매질상수

절연물	비유전율
SF ₆ 가스	1.1
Epoxy	6
Silicone	3.67
O-ring	2.7
Air	1.0

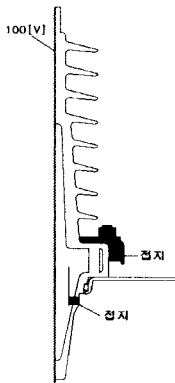


그림 2. 부싱의 경계조건

그림 2는 부싱 경계조건으로 내부의 도전부에는 100 V, ③의 bolt 및 ⑤의 판은 접지로 입력하여 해석하였고, 그 외의 해석경계면에는 자연경계조건을 적용하였다. SF₆ 충전가스압은 1.5[kg/cm²·abs]이므로 이 압력값에서 허용전계강도 및 설계전계강도를 분석하였고, 도전부와 대지간에는 BIL 110 kV를 적용하였다.

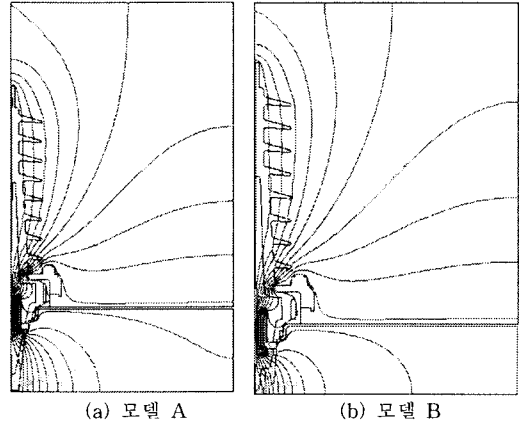


그림 3. 등전위선 결과

3.2 부싱의 최대전계값

모델 A와 모델 B의 전계해석 결과 최대 전계는 핀 부위에서 발생하였으며, 그림 4와 그림 5에 최대전계 발생 부근의 전계분포를 나타내었다.

모델 A와 모델 B의 최대전계는 동일하게 핀 하부에서 발생하였으며, 그림 4와 그림 5에 각각 R1과 R2로 표시되었다. 모델 A의 R1 지점의 값을 100%로 환산하였을 때 모델 B의 최대전계는 70.1%의 값을 나타내고 있다.

모델 A와 모델 B에서 발생한 최대전계값은 에폭시에서의 절연 내력인 14.6[kV/mm]이하이며, 절연파괴에 대한 가능성은 없는 것으로 판단된다.

모델 A와 모델 B의 도체부에서 발생한 최대전계값은 동일하게 60.7%로서 R2와 R3 지점에서 발생하였으며, 에폭시 절연 내력에 대한 설계 기준을 만족한다.

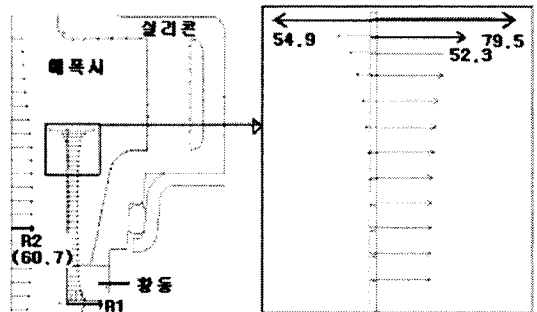


그림 4. 최대전계 부분(모델 A)

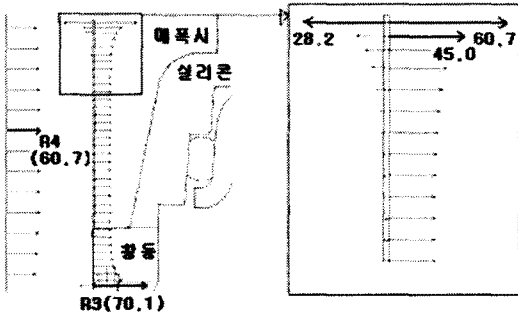


그림 5. 최대전계 부분(모델 B)

3.3 부상연면의 전계분포

그림 6과 그림 7은 모델 A와 모델 B의 부상 연면의 전계 분포를 나타내고 있다.

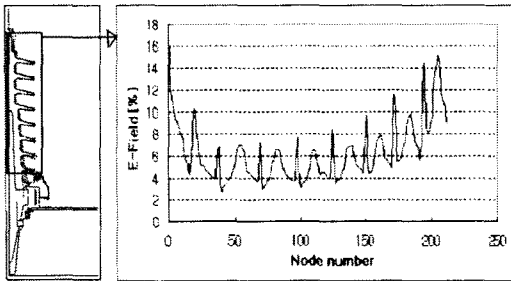


그림 6. 부상 연면의 전계분포(모델 A)

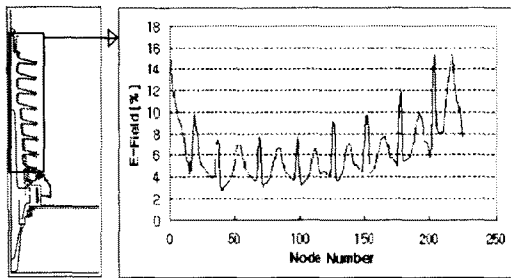


그림 7. 부상 연면의 전계분포(모델 B)

그림 6과 그림 7에서 node number는 외부 공기와 접한 부상 연면의 절점 번호를 나타낸다.

그림 6에서 모델 A의 부상 연면에서의 최대 전계 발생 지점은 볼트 체결부 부근에서 15.8%이 나왔으며, 그림 7의 모델 B는 모델 A와 동일한 지점에서 15.2%가 나왔다. 이 값은 공기 절연내력인 3[kV/mm] 이하이므로 두 모델 모두 절연상의 문제는 없는 것으로 판단된다.

3.2.3 볼트 체결부의 전계분포

그림 8과 그림 9은 볼트 체결부에서의 모델 A와 모델 B의 전계분포를 나타내고 있다. 모델 A의 볼트 체결부의 최대전계 값은 49.7%이며, 모델 B의 볼트 체결부의 최대전계 값은 53.4%로서 단순히 수치로 따지면 공기의 절연내력을 초과한다. 하지만 이 부분은 폴리머로 된 부상 부분과 금속으로 된 볼트 체결부와 주위 공기가 만나는 3중 접합점으로 체결부의 금속 가공시 약간의 곡률을 주거나 가공후 모서리 부분을 사상하여 날카로운 부분을 없앤다면 최대전계값이 공기의 절연내력치 이하로 만들

수가 있다. 왜냐하면 이 3중 접합점의 바로 근처에서는 최대전계값이 충분히 낮기 때문이다. 따라서 절연 파괴의 가능성을 줄이기 위해 이 부분에 대한 전계완화 방안의 하나로 가공시 또는 가공후 적절한 조치가 필요한 것으로 판단된다.

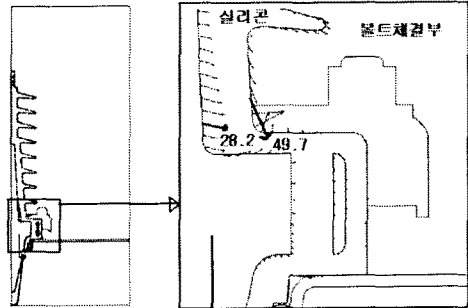


그림 8. 볼트 체결부(모델 A)

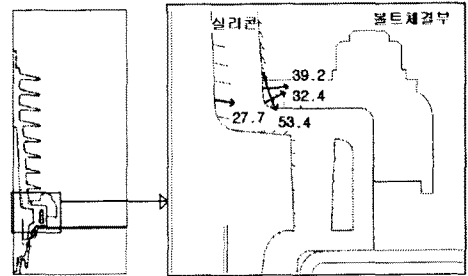


그림 9. 볼트 체결부(모델 B)

3.2.4 탱크 내 전계분포

그림 10과 그림 11은 각각 모델 A와 모델 B의 탱크 내에서의 전계분포를 나타내고 있다. 모델 A와 모델 B의 탱크 내 최대 전계값은 32.0%와 25.1%이며, 이 값은 SF₆ 가스 1.5[kg/cm²·abs]기압에서의 지지절연물 연면 설계전계 강도인 8.76[kV/mm]이하로서 설계기준을 만족한다.

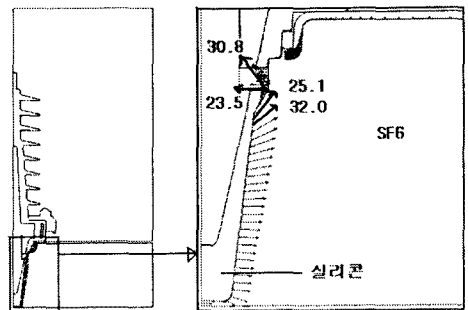


그림 10. 탱크 내 부상(모델 A)

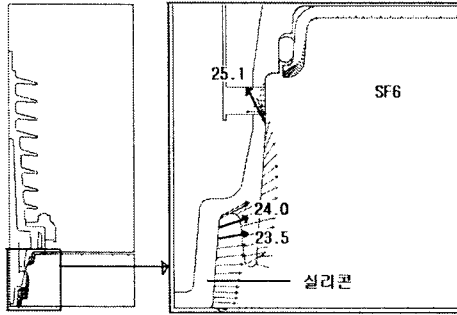


그림 11. 탱크 내 부싱(모델 B)

4. 결 론

본 연구에서는 17.5 kV SF₆ 가스절연 리크로저에 사용할 예정인 2종의 부싱에 대해 절연특성을 해석하고 그 결과를 비교하였다.

모델 A와 모델 B 모두 최대 전계강도는 핀에서 발생하였으며, 모델 B가 모델 A에 비해 상당히 양호한 결과를 나타내었으며 설계기준을 만족하였다. 부싱 연면에서의 전계분포는 모델 A와 모델 B가 모두 공기의 절연내력 이하로서 절연상 문제가 없는 것으로 판단되었다.

볼트 체결부의 경우 모델 A와 모델 B 모두 공기의 절연 내력보다 커 전계완화에 대한 대책으로 가공시 적절한 곡률 부여 또는 가공후 적절한 사상이 필요한 것으로 판단된다.

또한 탱크 내 부싱에서의 전계분포에서 모델 B가 모델 A에 비해 다소 낮은 값을 나타내었으며, 두 모델 모두 설계기준을 만족하고 있다.

따라서, 모델 B가 모델 A에 비해 절연특성에서 좀 더 양호한 결과를 나타내고 있다. 그러나, 모델 B의 경우 모델 A와 비교하여 형상이 다소 복잡하며, 제작 시 금형 가공과 주형 공정이 힘들 것으로 예상된다. 이는 가격 경쟁면에서 불리한 요인으로 작용할 수 있으므로, 여러 가지 조건을 고려하여 알맞은 부싱을 선정해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이병윤 외, "초고압 전력기기 기초설계기술 개발 최종보고서", 산업자원부, pp 365~441, 2000. 9.
- [2] J.M.Meeck and J.D.Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", Wiley, New York, pp 398, 1978
- [3] F.M. clark, "Insulating Materials for Design Engineering Practice", Wiley, New York, p116, 1962
- [4] V.N.Maller and M.S.Naidu, "Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF₆ and Vacuum", Pergamon Press, pp1~65, 1981
- [5] H.W.Anderl, C.L.Wagner and T.H.Dodds, "Insulation coordination for Gas Insulated Substions", IEEE Trans. vol. PAS-92, No.5, PP1622-1630, 1973