

# 폐쇄배전반내 모선의 절연이격거리

손 재현, 김 선구

한국전기안전공사 전기안전시험연구원

## A study on the air clearance in the metal-enclosed switchgear

Jae-Hyun Son, Sun-Ku Kim

Electrical Safety Laboratory Research Institute  
Korea Electrical Safety Corporation

### Abstract

This paper aims to extract the air clearance in 22.9KV the metal enclosed switchgear. First, we investigated the actual conditions on the clearance in the metal enclosed switchgear which has been used in domestic. The test model and 9 test electrodes for the air insulation strength tests have been designed and manufactured based on the investigation results. To find optimal clearance in the metal enclosed switchgear, we performed 50% flash-over test by the up and down method and lightning impulse withstand voltage test. And we obtained results that the clearance of phase-to-phase is 230 [mm] and clearance of phase-to-earth is 210[mm].

### I. 서 론

최근 절연설계에 관한 연구의 일환으로 계통의 사용전압별 나모선의 절연이격거리에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다 [1,2,3]. 그러나 폐쇄배전반을 비롯한 전기기기의 경우 고압 및 저압용을 제외한 특고압용 22.9KV 급에 대한 연구는 상대적으로 미약한 실정이다. 물론 폐쇄배전반에 관한 세계 각국의 제 규격들은 그들 나름대로 각 전압 및 기준절연 강도에 대해서 필요한 기준 절연 이격거리에 대한 표준치를 규정하고 있으나 이는 매우 제한적이며, 적용조건 및 이격거리도 상당히 큰 차이가 있다. 또한 국내 규격 및 제규격들은 수치적인 절연이격거리로 규정되지 않고 절연강도에 대한 내전압치로 규정되어 있으나 실제 폐쇄배전반 제작시 내전압시험(뇌충격시험)을 통한 절연강도를 확인할 수 없는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 우리 국내 현실에 맞는 보충된 절연이격거리에 관한 규정이 절실히 요구되고있다.

본 연구에서는 전력계통의 절연 중 가장 많이 사용되는 공기 절연에 대해서 연구하나, 연구의 범위를 22.9KV 급 폐쇄배전반내 모선의 절연이격 거리를 표준화 하는 것으로 한정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 현재 전극의 수용가에서 설치 사용중인 폐쇄배전반에 대한 상과 상, 상과 대지간 이격거리에 대한 사용실태를 조사, 분석하여 실증시험을 위한 기초자료로 사용하였다. 즉 이 결과로 부터 실증시험의 대표성 및 객관성을 확보하기 위한 폐쇄배전반의 시험모델을 구성하였고, 폐쇄배전반 내에서 발생할 수 있는 모든 경우의 모선배치 및 형상을 고려하여 9 개의 모의전극을 설계, 제작하였으며 모선의 종류 및 규격을 결정하여 절연이격거리 도출을 위한 실증시험을 수행하였다. 절연이격거리 도출을 위한 실증시험은 승강법에 의한 50% 섬락전압과 뇌임펄스 내전압치인 125[KV]를 직접 인가하여 5% 방전율을 구하는 시험법의 두 가지 접근법으로 수행하였다.

### II. 시험장치 및 방법

#### 1> 시료

고전압 계통에서 공기절연 특성 파악을 위한 연구 도구로서 주로 모의 전극을 이용하여왔다. 즉 전극의 기하학적 형상에 따라 섬락전압이 달라지므로 전극은 실제로 존재하는 전력계통 구조물의 모든 가능한 섬락부위를 고려하여 여러가지 형상으로 설계될 수 있다. 본 연구에서는 실제 폐쇄배전반내에서 발생할 수 있는 모든 가능한 경우의 모선 배치 형태를 종류별로 분류하여 그 중 가장 극한 조건의 모선 배치 형태를 선정하여 전극을 설계, 제작하였으며 이를 실증시험에 사용하였다. 사용된 전극은 모선의 형태[평각모선(5×50mm), 원형모선(φ10mm)]별로 상간 및 상-대지간 시험용 전극으로 구분되며 대지간 시험전극은 상간시험 전극보다 주변 구조물의 형상이 복잡하기 때문에 다양하게 고려하였으며 그림 1 과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 봉 - 봉 (도체단말-도체단말) 전극  
2 개의 동일 봉전극이 서로 대치되는 형상이며, 각 봉전극은 각을 이론것을 90° 로 절단한 것
- (2) 평행도체 (도체간 평행배열)  
2개의 평각도체를 커넥터로 연결하여 구성된 2개의 결합도체가 평행으로 배열된 형상
- (3) 봉 - 평판 (도체단말-외함내벽) 전극  
봉전극은 한상의 모선이 각을 이론것을 절단한 것이며 평판은 폐쇄배전반 외함 내벽을 사용
- (4) 도체 - 돌출평판 (도체-돌출내벽) 전극  
한상의 모선이 실제 폐쇄배전반내 외함 내벽의 돌출부분과 수직으로 배치된 형상으로 폭 50 mm 를 사용
- (5) 돌출도체 - 평판 (돌출도체-외함내벽) 전극  
돌출도체는 모선연결부의 볼트 혹은 모선 부속물들 모의

#### 2> 시험장치

그림 2 는 본 연구에서 사용한 시험장치 및 회로도를 나타낸다. 사용된 전원은 뇌충격 발생장치(400KV)로 부터 발생되었으며, 사용전압 23[KV]급 표준 뇌충격 전압 파형 125[KV](1.2×50 μs)를 발생시키기 위해 회로의 각 소자값을 설계하였다. 여기서 C<sub>g</sub>(충전 캐패시터)-1 [μF], R<sub>1</sub>(파미터항)-600 [Ω], R<sub>2</sub>(파두저항)-450 [Ω], C<sub>u</sub>(부하용 캐패시터)-1442 [pF], R<sub>ch</sub>(충전저항)-23 [K.Ω], S<sub>g</sub>(각 단의 구 Gap), TO(Target Object), Divider(전압 계측용 분압기) : 1442[pF], 74.6[Ω] 이다.

#### 3> 시험방법

폐쇄배전반내 모선의 상간, 대지간의 최적 절연이격거리를 도출하기 위하여 두 가지 접근법으로 실증 시험을 수행하였다.

전극 형태	상 - 상		상 - 대지		
	봉-봉 (도체단말-도체단말)	평행도체 (도체간 평행배열)	봉-평면 (도체단말-외형내벽)	도체-평출판 (도체-평출내벽)	평출도체-평면 (평출도체-외형내벽)
상대전극					
상대전극					

그림 1. 시험용 모의전극

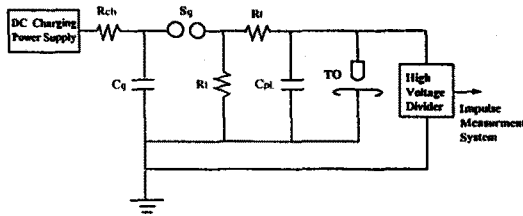


그림 2. 시험장치 및 회로도

첫번째 접근법은 50% 섬락전압을 구하여 절연 이격거리를 통계학적인 방법으로 산정하는 방법이다. 50% 섬락전압은 각 모의전극에 대해 공간거리를 10[mm] 간격으로 변화시켜서 IEC 60에 따라 승강법(Up and Down Method)으로 구했다. 각 시험전극에 대한 이격거리마다 30 회 이상 뇌 충격 전압을 인가하여 각각의 섬락여부와 패턴, 그때의 전압을 측정하였다. 결과치는 IEC 60-1에 의해 표준대기 상태(20°C, 1013 mbar, 11g/m³)로 전압보정 하였으며, 이때 습도는 KS 0078에 따라 상대습도를 측정하여 절대습도로 환산하여 사용하였다.

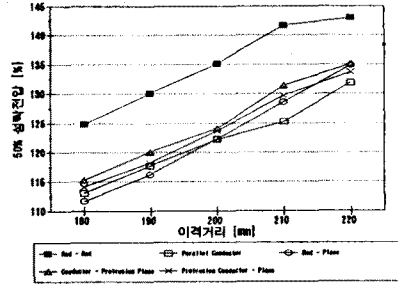
두번째 접근법은 계통전압 22.9KV 의 뇌충격 내전압치인 125[KV]를 직접인가하고 각 시험전극에 대한 이격거리를 5mm 간격으로 가변시키면서 방전율을 구하는 방법이다. 즉, 각 전극에 대한 이격거리 마다 20회 이상 전압을 인가하여 방전여부 및 방전 패턴을 측정하여 5 [%] 방전율 이격거리를 구하였다.

이와같은 과정으로 두가지 접근법의 결과치를 서로 비교하여 안전성이 더욱 보장되는 쪽을 선택하여 최소절연이격거리로 선정하였다. 또한 두가지 접근법에 의한 이격거리 도출법은 각 접근법에 의한 시험데이터를 상대비교하여 시험과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소한으로 감소시켜 시험데이터의 신뢰성을 확보하고 정확성을 확인하기 위한 방법으로서의 의미도 내포한다.

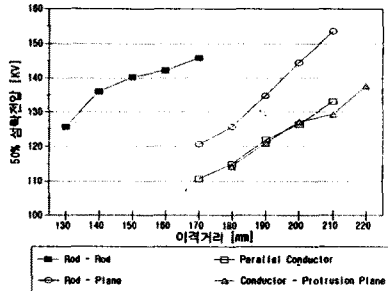
### III. 시험결과

평각 및 원형의 각 시험전극에 뇌충격전압을 인가하였을때의 50% 섬락전압을 측정된 결과와 방전율을 도시하면 각각 그림 3(a)(b), 4(a)(b) 와 같다.

그림 3 에서와 같이 뇌충격전압을 평각 및 원형 모선에 따른 각 모의 전극에 인가할 경우 50% 섬락전압은 전극간 이격거리에 비례함을 알 수 있다. 동일한 이격거리에 대해 가장 높은 섬락전압 특성을 갖는 것은 봉-봉 전극이며, 평행도체는 이격거리가 증가될수록 섬락전압의 증가율이 다소 감소하는 특성을 갖는다. 그러나 봉-봉 전극을 제외한 전극들의 전체적인 섬락 특성은 상간 및 대지간 전극으로 구별되지 않으며, 최대 5KV이내의 섬락전압의 차이만을 나타낸다. 이것은 절연강도에 따른 내전압 시험전압을 상간 및 대지간으로 구분하지 않는 이유로 해석될 수 있다.

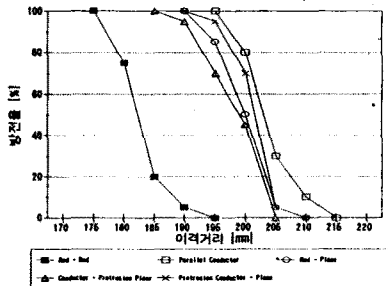


(a) 평각모선

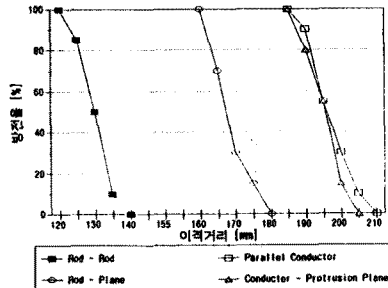


(b) 원형모선

그림 3. 시험전극 형태별 50% 섬락 전압



(a) 평각모선



(b) 원형모선

그림 4. 시험전극 형태별 방전율 특성

그림 4 의 각 전극 이격거리에 따른 방전율에서도 50% 섬락전압 특성과 거의 유사한 결과를 나타냈다. 즉, 봉-봉 전극이 125 KV BIL 뇌충격전압에 대해서 0 [%] 를 보장하는 이격거리가 가장 짧은 것으로 나타났으며, 그 외의 전극들은 동일 섬락율에 대해서 이격거리가 10 [mm] 정도의 편차를 나타냈다. 또한 동일 전극 형태에 대해 평각 및 원형모선의 차이는 동일 이격거리에 대해 원형모선의 경우가 평각모선의 경우보다 섬락전압이 높았으며, 전체적인 섬락특성은 큰 차이를 나타내지 않았다.

#### IV. 절연이격거리 산출

일반적으로 개폐장치 내부와 같이 불평등 전계가 형성되는 전극배치에서는 충격전압에 대한 섬락특성이 많은 편차를 갖는다. 그러나 인가전압과 섬락율과의 관계를 구하면 그림 5의 실선(b)와 같은 방전율곡선이 얻어지고 방전율이 높은 부분과 낮은 부분을 제외하면 이 곡선은 식 1로 표시되는 정규분포곡선으로 근사화 시킬 수 있으며, 이것은 (a)으로 표시된 Gauss의 정규분포 곡선과 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(V-V_{50})^2}{2\sigma^2}} dV \dots\dots (1)$$

여기서, P는 방전율,  $\sigma$ 는 표준편차,  $V_{50}$ 은 50% 섬락전압

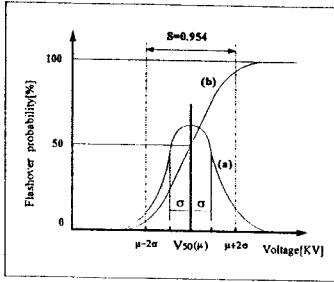


그림 5. 정규분포곡선과 방전율 곡선

정규분포곡선의 0% 섬락전압과 100% 섬락전압의 차, 즉 전체 방전율의 변동범위는  $4\sigma \sim 5\sigma$ 로 볼 수 있다. 따라서  $V_{50} \pm 1.645\sigma$ 는 대략 5% 및 95% 섬락전압이 된다.

IEC pub 298, BS 5227에 의하면 개폐장치의 내전압 시험은 내전압치에 상당하는 전압을 15회 인가하여 섬락이 2회를 초과하지 않으면 그 시험은 합격이라고 보고  $2/15 \times 100 = 13.3\%$ 의 섬락율을 인정한다. 그러나 본 연구에서는 위에서 기술한 5% 섬락전압  $V_5 = (V_{50} - 1.645\sigma)$ 가 내충격 내전압치가 되는 이격거리를 기준으로 최소 절연이격거리를 산정하였다. 즉, 절연이격거리의 최소치는 식 2가 성립할때의 이격거리로 결정될 수 있다.

$$V_{BIL} = V_5 = V_{50} - 1.645\sigma \dots\dots (2)$$

여기서,  $V_{BIL}$ : BIL의 내전압치(125 KV)

$V_{50}$ : 전극 배치에서의 50% 섬락전압[KV]

$\sigma$ : 전극 배치에서의 표준편차[KV]

따라서 각 전극 배치에 따라 승강법에 의해 구한  $V_{50}$  전압과 표준편차 전압  $\sigma$ 를 계산하여 식 2를 만족하는 이격거리를 구하였다. 표 1은 산출된 5% 섬락전압( $V_5$ )에 대한 이격거리를 나타낸다.

표 1. 5% 섬락전압에 대한 이격거리

전극 $V_5$ [mm]	봉-봉	평행도체	봉-평판	도체 - 출출평판	출출도체 - 평판
$V_5$ 섬락 거리	190	212	205	200	203
원형 모선	135	205	185	200	-

##### (1) 시험치 단일화 거리

시험치 단일화 거리는 각 모의 전극의 5% 섬락전압에 대한 이격거리와 이격거리 변화에 따른 방전율 실험에서의 5% 방전율 거리를 서로 비교하여 이격거리가 큰 쪽을 선정하여 단일화한 것을 의미한다. 이 과정은 표 2의 제 ①, ②, ③ 열에 나타내었다.

##### (2) 최소절연 이격거리

최소절연이격거리는 어떠한 경우에도 모선과 대지, 모선 상호간의 공간거리가 이 이하로 되어서는 안되는 수치로, 상·대지간 이격거리는 표 2에서 제 ③ 열의 시험치 단일화 거리를 그대로 사용하며, 상간은 섬락사고를 대지간으로 유도하기 위해 대지간 이격거리 보다 크게 설정하였다. 전력계통의 절연설계시 대지간 이격거리보다 상간거리를 5~20[%] 정도 크게 하는 것이 일반적이므로 본 연구에서는 205[mm] 보다 5[%] 큰 215[mm]로 설정하였다.

##### (3) 추천 이격거리

지배재자의 오염상태등을 고려하여 충분한 보정을 해야하나 국내 22.9KV 급 폐쇄배전반에 사용되는 애자의 수직 길이는 210[mm]이므로 그 이상으로 이격거리를 설정할 경우 또 다른 문제가 야기될 수 있다. 따라서 대지간의 이격거리는 표 2의 제 ③ 열의 결과치에 +5[mm]를 더한 수치로 선정하였다. 상간 사고 확률을 대지간 사고확률보다 감소시키기위해 대지간 이격거리를 10[%] 증가하여 상간 이격거리로 설정하였다.

표 2. 절연이격거리 산출

전극배치	이격거리 [mm]	①	②	③	④	⑤
		$V_5$ 이격거리	5 $\sigma$ 방전율 거리	단일화 거리	최소절연 이격거리	추천거리
상 - 상	봉 - 봉	190	190	190	215	230
	원형	135	140	140		
	평행도체	212	210	212		
상 - 대지	봉 - 봉	205	200	205	205	210
	원형	185	185	185		
	도체 - 출출평판	200	200	200		
	원형	203	200	200		
	출출도체 - 평판	200	205	205		
	원형	-	-	-		

#### V. 결론

본 연구는 현재 잠정적으로 사용하고 있는 22.9KV급 폐쇄전반내 모선의 안전한 절연이격거리를 정립하여 수용가의 안전을 보장하고 폐쇄배전반 제작의 규격화 및 표준화를 유도하며 전기안전을 위한 원활한 검사업무를 도모하기 위해 연구를 수행하였다. 이를 위하여 폐쇄배전반내 모선종류 및 배치상황에 따라 9개의 모의전극을 설계·제작하여 절연강도 시험을 수행하였다. 시험 결과치를 통계적으로 처리하여 절연이격거리 표준치를 대지간 210[mm], 상간 230[mm]로 도출하였다.

##### [참고 문헌]

- (1) IEEE Working Group 59, "Minimum Line-to-ground Electrical clearances for EHV Substations Based on Switching Surge Requirement", IEEE Trans., PAS-91, 1972, pp 1924-1930
- (2) L. Paris, A. Taschni, K.H. Schneider, K.H. Weck, "Phase-to-Ground and Phase-to-Phase Air Clearances in Substation", Electra No. 29, 1973, pp 29-44
- (3) 伊佐 弘, "球對球, 棒對平板 電極의 電界計算とその絶緣破壊 電壓の計算への應用", 日本電氣學會雜誌, Vol. 91, No. 9, 1971
- (4) 千葉 政邦, 開原 万里, 日高 邦彦, 河野 照哉, "大氣中ストリ-マ基礎特性", EP-90-47, ED 90-66, pp. 71-77, 1990
- (5) 발변전소 절연간격 표준에 대한 연구. 한국전력공사, 1987. 2