

가공용 가스절연부하개폐기 가속수명시험

박승재\*, 허종철\*, 김맹현\*, 고희석\*\*  
\*한국전기연구원, \*\*경남대학교

Accelerated life test of SF<sub>6</sub> gas load break switch for overhead line

Park, Seung-Jae\*, Heo, Jong-Chul\*, Kim, Maeng-Hyun\*, Koh, Heui-Seog\*\*  
\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*\*Kyungnam University

**Abstract** - SF<sub>6</sub> gas has been increasingly used as the insulating and arc-suppressing medium in switchgears which are used as the protection devices of power system. Nowadays, with these trends, SF<sub>6</sub> load break switches have rapidly substituted for the air or oil-type load break switches, in order to get higher reliability. And, the national standard was made for reliability assessment of SF<sub>6</sub> gas load break switch and testing facilities was also set in KERI(Korea Electrotechnology Research Institute).

This paper introduces the synopsis for the reliability assessment requirements specified in the standard and the assessment results.

1. 서 론

배전계통에서 정상 상태의 부하전류개폐와 선로의 구분 및 절체를 통하여 안정적인 전력 공급을 위하여 사용되는 개폐기는 기기의 신뢰성 향상을 위하여 SF<sub>6</sub> 가스를 절연 및 소호 매질로 사용하는 가스절연 부하개폐기(이하, 개폐기라 칭함.)의 보급이 확산되어 기존의 기중 또는 유입형 개폐기를 대신하여 사용이 증가하고 있다.

이러한 SF<sub>6</sub> 가스를 이용한 개폐기는 외부 환경의 영향(습도, 염분 등)을 없애기 위하여 금속 용기 안에 절연 및 소호 성능이 탁월한 SF<sub>6</sub> 가스를 충전하여 사용하는 기기로서, 수명기간동안 기기의 전기적 충전 내부는 유지보수를 실시하지 않는 형태로써, 개폐기 내부의 열화정도를 육안으로 확인할 수 없기 때문에 장기간 사용에 대한 신뢰성 추정과 확보가 필수적으로 요구된다.

이러한 개폐기의 신뢰성을 확보하기 위해서는 기본적으로 제품 설계 단계에서 반영되어야 하지만, 국내의 경우에는 신뢰성 확보를 위한 설계 기술 또는 제품의 신뢰성 추정을 위한 평가 기법에 대한 연구 개발 활동이 미약하였다. 이와 같은 신뢰성 확보를 위한 제품 개발을 위해서는 장기간 사용에 대한 경년 열화 및 고장 발생현상 분석 등을 통하여 이에 적합한 가속 수명시험이 필수적이며, 이 결과를 제품 설계에 Feedback 시켜야 한다. 이와 같은 배경으로 개폐기의 신뢰성 향상을 위하여 2003년에 국가 규격으로서 RS C0031(고압 가스절연 부하개폐기)을 제정하였고, 이 규격을 적용하여 국내에서 생산되는 제품에 대하여 최초로 수명시험을 실시한 평가방법 및 결과를 본 논문에서 기술한다.

2. 본 론

2.1 신뢰성 평가를 위한 가속 수명시험법

2.1.1 가속 시험법과 가속계수(A<sub>f</sub>)

차단기, 개폐기와 같은 중전기기의 수명은 보통 20년 정도가 일반적으로 적용되고 있으며, 내부의 유지보수가 불가능한 무보수형 기기의 수명 평가는 아주 중요한 요소가 된다. 이러한 장기간의 수명에 대한 평가를 위해서는 고장의 형태와 열화 요인을 분석하여 고장 요인에 대하여 사용조건보다 가혹한 스트레스를 인가하여 수명평가 시험에

소요되는 시간을 단축시키는 가속 수명시험법이 적용된다. 이러한 가속 시험법을 적용함에 있어서 적용되는 가속 조건에 대한 한계에 주의해야 하는데, 과도하게 큰 가속 계수를 적용할 경우에는 파괴시험 영역에 이르게 되어 가속 시험이 불가능해지고, 너무 낮은 가속계수를 적용할 경우에는 과도한 시험기간이 소요된다. 즉 시료를 파괴시키지 않고 수명시험이 가능한 범위에서 식-(1)로 정의되는 가속계수(A<sub>f</sub>; Acceleration factor)를 선정해야 한다.

$$A_f = \frac{t_1}{t_2} \quad (1)$$

2.1.2 가속 시험법의 종류

수명 평가를 위한 가속 방법은 다음과 같이 크게 3가지로 구분하며, 시험 대상의 특성을 고려하여 복합적으로 적용하고 있다.

①강제 열화법(스트레스 가속법)

정상적인 사용 조건보다 높은 스트레스를 인가하여 수명을 평가하는 방법으로서 가속 시험법의 가장 일반적인 형태이다. 수명을 평가하기 위한 가속 인자로는 온도, 습도, 또는 전압 등을 높게 인가하여 수명 열화를 가속시키는 방법이다.

②시간 가속법

단속 통전의 대안으로서 연속 통전시키는 방법 또는 동작 수명시험의 경우 동작 빈도를 증가시키는 방법(예를 들어, 1회/10초 대신에 1회/1초)으로서 시험종료까지의 시험 시간을 단축시키는 방법이다.

③판정가속법

열화 변화에 따른 고장의 판정기준을 엄격하게 적용해서 단시간에 시험을 완료해서 판정하는 방법이다.

2.1.3 무고장 데이터에 의한 신뢰성 평가

실제로 가속 수명 시험에서 가장 일반적으로 사용되는 강제 열화법을 적용함에 있어서 흔히 겪는 문제의 하나는 관측되는 고장 데이터의 수가 매우 적거나 무고장인 경우가 많다는 점이며, 따라서 전기 부품, 기계류 부품의 수명 분포로 널리 사용되는 와이불 분포(Weibull distribution)의 무고장 데이터 분석법이 주로 이용된다. 중전기기 제품의 경우에는 대형, 고가의 장비가 많고 수명 시험에 소요되는 비용과 시간의 제약으로 불가피하게 소수의 시료(n=1 또는 2)만으로 한정된 시간동안에 시험을 종료해야 하는 경우가 자주 발생한다. 이 경우 고장이 발생할 때까지 무한정 수명시험을 계속하지 않고 보증 수명에 해당하는 시간간안에 고장이 발생하지 않는 무고장 시험에 의한 수명 평가방법이 사용된다.

즉, 무고장 데이터에 의한 B<sub>0</sub> 수명을 100(1-α)% 신뢰 하한에서 평가하고자 하는 경우에는 식-(2)와 같이 T<sub>0</sub> 동안 시험하여 이상이 없었던 합격으로 한다. 그리고 실제 시험 시간(T)은 T<sub>0</sub>를 가속 계수로 나누어 결정한다.

$$T_0 = B_0 \left\{ \frac{\ln(\alpha)}{n \ln(1-\alpha)} \right\}^{1/j} \quad (2)$$

여기서, n : 시료 수, t<sub>0</sub> : B<sub>0</sub> 수명의 일직값, α : 유의 수준

## 2.2 개폐기의 신뢰성 평가 기준

### 2.2.1 고장 모드 및 평가 기법

신뢰성 평가를 위한 기본 조건은 수집된 고장 데이터를 통한 고장 형태와 열화원인 분석을 기초로 한 가속시험법의 설계이다. 가스절연을 사용하는 개폐기의 고장 파괴 모드와 이에 대한 평가 방법은 표-1와 표-2과 같으며, 주요 고장 형태로는 절연파괴가 90% 이상으로서 (1)SF<sub>6</sub> 가스 기밀 유지를 위한 기밀재(O-ring)의 열화, (2)상시 과전 상태인 절연물의 열화로 인한 고장이 주요 요인이다.

표-1 : 고장 파괴 모드 분석

Stresses	고장형태	기밀 성능	절연물	조각 장치	접점	SF <sub>6</sub> 가스
온도		○	◇			
기계적 스트레스				○		
전기적 스트레스	전압 요인		○		◇	
	전류 요인				○	○

\* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ○ 가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통

표-2 : 고장 모드와 평가방법

고장형태	평가방법	내전압	개폐 특성	전류 개폐	고저온	영구압축 변형률	장기 과전
기밀성능		○		◇	○	○	
절연물		○		○		◇	○
조각장치			○	○			
접점			○	○			
SF <sub>6</sub> 가스		○					

\* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ○ 가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통

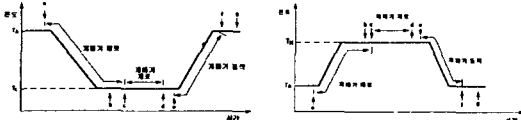
### 2.2.2 가스 기밀재의 평가

#### 2.2.2.1 한계온도 특성

SF<sub>6</sub> 가스의 누기율은 신문의 기밀재를 사용해도 주위 온도에 따라 달라지며, 한계 온도에서 표-3과 같이 상온에서 정상적인 누기율의 최대 6배 높은 값을 허용하고 있으며, 다시 상온에서는 정상치로 복귀해야 한다. 그림-1은 고온 상태와 저온 상태에서의 시험방법이다.

표-3 : 온도에 따른 허용 누기율

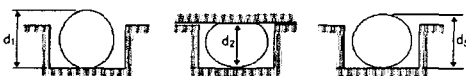
온도 상승(°C)	일시적 누기율의 허용치
+40 및 +50	3F <sub>P</sub>
상온	F <sub>P</sub>
-5/-10/-15/-25/ 40	3F <sub>P</sub>
-50	6F <sub>P</sub>



(a)저온평가 (b)고온평가  
그림-1 : 외부 환경에 대한 평가 방법

#### 2.2.2.2 기밀재의 장기 열화 특성

SF<sub>6</sub> 가스 기밀 유지는 부싱, 가스 주입구, 계기류, 조각 로드 등의 기밀을 위하여 사용하는 오링의 열화 특성에 의해 좌우된다. 일반적으로 그림-2의 영구압축 변형률이 80%를 초과하는 경우 기밀재의 기밀 효과를 상실하게 된다. 그림-2는 오링의 사용조건과 영구 압축 변형률의 정의하고 있고, 그림-3은 기밀재의 사용 기간과 온도에 따른 열화 특성의 예로서, 식-(3)에 정의된 아레니우스 식과의 일치성도 우수하고, 식-(4)의 10°C 반감법칙이 성립한다.



(a)사용 전(신품) (b)사용 중 (c)사용 후

여기서,

$$\text{압축량} : \delta = d_1 - d_2$$

$$\text{영구 압축 변형치} : \delta' = d_1 - d_3$$

$$\text{압축율}(P) = \frac{\text{압축량}}{\text{기밀재 두께}} \times 100 = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{영구압축 변형율}(P_p) = \frac{\text{압축영구 변형치}}{\text{압축량}} \times 100 = \frac{d_1 - d_3}{d_1 - d_2} \times 100 \quad (\%)$$

그림-2 : 기밀재의 영구압축 변형률

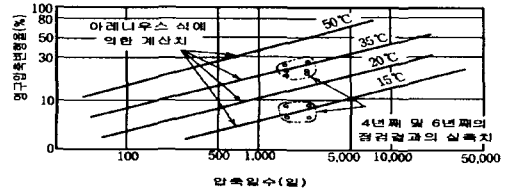


그림-3 : 기밀재의 온도열화 특성

$$\log t_L = -A + \frac{E}{2.303 R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

여기서,  $t_L$  : 수명에 도달하는 시간,  $R$  : 기체 정수

$A$  : 정수(재료에 따라 결정되는 정수),  $T$  : 절대 온도(°K)

$E$  : 활성화 에너지(시료에 따라 결정되는 정수)

$$L = L_0 \times 2^{\frac{T_0 - T}{10}} \quad (4)$$

여기서,  $L$  :  $T$ (°C)에서 수명,  $L_0$  :  $T_0$ (°C)에서 수명

$T$  : 상온(20°C),  $T_0$  : 시험 온도(°C)

### 2.2.3 내부 절연물의 장기 열화 특성

#### 2.2.3.1 장기 과전 특성

절연물에 상시 전압을 인가시켜 놓으면 시간의 경과에 따라 재료의 전기적 특성은 식-(5)의 전압 역누승 법칙에 따른 열화 특성을 나타낸다.

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (5)$$

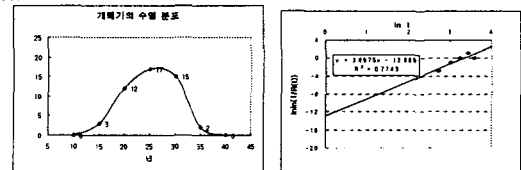
여기서,

$V_1$  : 시험 전압,  $V_2$  : 운전 전압

$T_1$  : 시험 시간,  $T_2$  : 기대 수명

#### 2.2.4 형상 모수( $\beta$ )와 수명시험 조건

와이블 분포를 적용하기 위해서는 평가 요소에 대한 형상 모수( $\beta$ )의 추정이 필수적이다. 이러한 형상 모수를 결정하기 위하여 기밀재로 사용하는 오링은 그동안 실시한 시험 결과  $\beta=1.1 \sim 1.7$ 의 범위이며, 보수적 접근 방법으로 1.1을 채택하였다. 그리고 내부 절연물은 그림-4의 고장 데이터 분석을 기초로 하여 3.9로 추정하였다.



(a)수명 분포 (b)형상 모수  
그림-4 : 개폐기의 수명 분포와 형상 모수

개폐기 신뢰성 평가를 위한 인증 조건은 와이블 분포를 이용한 무고장 조건으로서, 이에 대한 평가 인증 조건은 다음과 같다.

- 보증 수명( $B_{10}$ ) : 20년(7,300일)

- 신뢰 수준 : 90%

위와 같은 조건에서 개폐기의 신뢰성을 평가하기 위한 오링과 절연물의 평가조건은 표-4와 같다.

표-4 : 신뢰성 평가인증 조건

항목	인증 조건		열화 조건	시험기간(일)		가속계수 (Af)
				T0	T	
기밀재	B <sub>10</sub>	20년	시험온도 : 100℃	18,875	74	2 <sup>2</sup> 256
	신뢰수준	95%				
	형상모수	1.1				
	시료 수	10				
절연물	B <sub>10</sub>	20년	과전계수 : 1.4	14,418	130	1.4 <sup>14</sup> 111
	신뢰수준	95%				
	형상모수	3.9				
	시료 수	2				

2.3 실험결과

본 연구의 신뢰성 평가를 위한 실험용 개폐기는 25.8kV, 600A, 12.5kA 가공선로용 개폐기이다.

2.3.1 실험장비

표-4의 개폐기 신뢰성 평가를 위해서는 (1)기밀재의 한계온도 특성과 가속 열화수명시험을 위해서는 대용량의 고저온 항습장치, (2)SF<sub>6</sub> 가스의 누설양을 측정할 수 있는 고감도 SF<sub>6</sub> 가스 detector, (3)절연물의 전압가속 열화시험을 위한 내전압 시험장치가 필요하며, 그림-5는 항온항습 챔버와 SF<sub>6</sub> 가스 detector이다.



(a)고저온 항온항습장치 (b)가스 detector  
그림-5 : 신뢰성 평가시험장비(항온항습 챔버)

2.3.2 한계 온도 시험 결과

개폐기의 사용온도 조건은 -25℃~40℃로서 표-3에서 처럼 SF<sub>6</sub> 가스 누기율이 상온에서보다 3배 이하로 유지되어야 하고, 개폐기가 기계적으로 정상 동작하여야 한다. 그림-1의 온도 cycle에 따른 실험 결과 SF<sub>6</sub> 가스 누기량은 0.05ppm이며 개폐기의 동작도 양호하였다.

2.3.3 가스 기밀재의 장기열화 특성

기밀재로 사용하는 오링은 고분자 재료로서 온도에 따른 열화특성을 가지고 있으며, 그림-2의 영구압축 변형율이 80% 이내에서는 기밀이 유지된다. 표-4의 인증 조건에 따라 100℃의 온도에서 74일간 가속시험을 실시한 결과는 표-5와 같다. 이 실험을 위해서는 개폐기 자체가 고가이므로 그림-6(a)와 같이 오링만을 별도의 압축장치로 하여 실제 개폐기 압축율과 동일하게 압축하여 실시하였다.



(a)오링의 열화실험시료 (b)장기과전실험  
그림-6 : 신뢰성 수명평가 장면

표-5 : 영구압축변형을 열화실험 결과

구분	시험전 (d1,mm)	시험중 (d2,mm)	압축량 (δ d1 d2)	압축율 (P,%)	영구압축 변형치 (δ',mm)	영구압축 변형율 (%)
가동부축	2.46	2.0	0.46	18.7	0.33	71.7
가스커넥터	3.58	2.65	0.93	26.0	0.48	51.6
벨로우즈부	3.16	2.4	0.76	24.1	0.55	72.4
방압변부	5.71	4.5	1.21	21.2	0.63	52.1
부싱부	5.72	4.5	1.22	21.3	0.88	72.1

2.3.4 내부 절연물의 장기과전 실험

개폐기의 충전부 지지와 개폐동작을 위한 절연물은 금속 외함 내부에 설치되므로 개폐기 자체로 실시해야 한다. 이와 같은 한계로 2개의 시료에 대해 시험을 실시하였으며, 가속 과전계수 1.4를 적용하여 20.9kV의 전압을 130일 동안 과전시켜 절연파괴 등 이상이 발생하지 않았다. 그림-6(b)은 장기과전시험 장면이다.

3. 결 론

개폐기는 주로 소형화와 신뢰성을 확보하기 위하여 SF<sub>6</sub> 가스를 이용한 형태의 사용이 일반화되고 있는 추세이다. 이러한 개폐기는 내부 개폐부를 육안으로 검사하여 이상 유무를 판단하는 것이 전혀 불가능하기 때문에 개폐기의 수명을 평가할 수 있는 검증 과정이 필수요소로 된다. 이러한 측면에서 개폐기의 신뢰성을 평가할 수 있는 규격과 시험법의 정립을 통하여 장기 사용에 대한 열화 수준 정도를 평가하여 안정적인 배전계통 운영을 기대할 수 있을 것이며 또한 국내 중전기기 산업 발전과 국제 경쟁력 확보에 공헌할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부 기술표준원, RS C 0031, "고압가스절연부하 개폐기", 2003
- [2] IEC 60265-1, "Switches for rated voltages above 1kV and less than 52kV", 1998
- [3] IEC 62271-100, "High voltage switchgear and controlgear - Part 100 : High voltage alternating current circuit breakers", 2001
- [4] IEC 60694, "Common specifications high voltage switchgear and controlgear standards", 1996
- [5] PS 151 146, 147, 151 170, 180), "25.8kV 가스절연부하개폐기(가공용)", 2001
- [6] PS 151 143, 155, 151 165, 178 : "25.8kV 가스절연부하개폐기(지중용)", 2001
- [7] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제355호, "변전설비의 환경열화시험"
- [8] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제159호, "공장전기설비의 수명과 유지보수에 관한 양케이트 조사보고"
- [9] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제290호, "차단기의 신뢰성 및 진단기술"
- [10] 일본 전기협동연구 제33권 제4호, "SF<sub>6</sub> 가스절연기기보수기준집"
- [11] 일본 전기협동연구 44권 제2호, "가스절연기기의 신뢰성 향상책"