

## Electrical Life Time Constant Estimation of Ceramic Element for Sensor

정주영<sup>†</sup> · 강동식<sup>\*</sup> · 선종호<sup>\*\*</sup> · 허중철<sup>\*\*\*</sup> · 추영배<sup>§</sup> · 박정후<sup>§§</sup>  
 (Joo-Young Jeong · Dong-Sik Kang · Jong-Ho Sun · Jong-Cheol Heo ·  
 Young-Bae Choo · Chung-Hoo Park)

**Abstract** - A partial discharge(PD) measurement is a very effective method to assess the insulation condition of high-voltage machines. It is necessary that the life time of the on-line PD measurement sensor is assessed. Therefore, the electrical life time assessment method of ceramic element was reviewed in order to estimate the life time of the on-line PD measurement sensor. The samples were prepared according to the reviewed method and were tested at 8kV, 9kV and 10kV. Based on the obtained results, the life time constant is shown above 59. Also, it is assumed that the estimated life time constant can be used to anticipate the life time and to assess the conformity of the on-line PD measurement sensor.

**Key Words** : Partial, Life time constant, Ceramic sensor, Accelerated aging

### 1. 서론

일반적으로 에폭시와 마이카로 구성된 발전기 고정자 권선의 절연체는 운전 중 연속해서 전기적, 기계적, 열적 스트레스를 단독 또는 복합적으로 받으며 일단 고장이 발생하면 고체 절연의 특성상 절연의 회복이 불가능하다[1]. 그러므로 고정자 권선의 절연상태의 연속적인 감시와 적절한 유지보수는 발전기의 수명 연장에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 발전기 고정자 권선의 열화 원인은 여러 가지가 있지만 주요 고장 원인은 부분방전으로 알려져 있다[1]. 과거에는 발전기의 부분방전 검출을 위하여 주로 오프라인 부분방전 실험을 수행하였지만 최근 디지털 및 센서기술의 발전과 더불어 온라인으로 고정자 권선의 부분방전을 측정하는 것이 가능해 졌다. 특히, 센서를 고전압 인가부위에 직접 접촉시켜 권선에서 발생하는 부분방전의 측정을 가능하게 한 접촉식 측정법에 대하여 다수의 연구결과가 보고되고 있으며 저자 등도 접촉식 센서 개발에 대한 연구 결과를 보고한 바 있다[2-5].

저자 등이 개발한 온라인 부분방전 측정용 세라믹 센서는

부분방전을 검출하는 소체와 소체의 연면절연을 보장하기 위하여 소체의 주위를 에폭시로 몰딩한 몰딩부로 구성되며, 소체는 세라믹 재료인 SrTiO<sub>3</sub> 및 첨가물을 압축소결 성형하여 제작한다. 세라믹 센서는 발전기 출력 전압에 직접 접촉되므로 센서의 장시간 사용을 위한 신뢰성 확보는 발전기 운용에 매우 중요하다. 따라서 실 사용 전 가속열화실험을 통하여 센서에 대한 충분한 전기적 수명을 확보하여야 한다. 일반적으로 절연물에 대한 전기적 가속열화실험을 통한 수명 계산에 V-t 특성식을 이용하며, 이를 위하여 각 절연물의 수명지수 n 값을 결정한다. 최근의 연구결과에 따르면 에폭시에 대한 수명지수가 12~19로 보고되고 있으나[6-7], 소체 재료인 세라믹 SrTiO<sub>3</sub> 및 첨가물에 대한 정확한 전기적 수명지수는 보고된 바가 없다. 따라서, 센서의 수명 산정을 위하여 소체에 대한 전기적 수명지수 평가 연구가 필요하다.

본 연구는 온라인 부분방전 측정 센서용 세라믹 소체의 수명지수에 관한 연구를 기술하고 있다. 센서용 세라믹 소체와 동일한 재료 및 제작방법을 이용하여 두께 2.6mm 직경 70mm의 판상 모델시료를 제작하였으며, 제작한 시료에 3가지의 실험전압을 인가하여 각 인가전압에 대한 파괴시간을 구하였다. 구해진 V-t 관계로부터 와이블 분포의 신뢰성 해석을 통하여 평균수명 및 누적고장율 10%에 대한 수명시간인 B<sub>10</sub>에 대한 수명지수 n을 구하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 이론적 고찰

Endicott와 Eyring은 화학반응속도 정수의 스트레스 합수를 변형하여, 전기적 열화를 표현하는데 사용하는 과전수명식 (1)을 나타내었다.

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 고전압평가실 실장  
 E-mail : jyjeong@keri.re.kr

<sup>\*</sup> 정 회원 : 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹  
 책임연구원 · 공박

<sup>\*\*</sup> 정 회원 : 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹  
 책임연구원 · 공박

<sup>\*\*\*</sup> 정 회원 : 한국전기연구원 고전압평가실 책임기술원

<sup>§</sup> 정 회원 : 거제대학 선박기술계열 부교수 · 공박

<sup>§§</sup> 펠로우회원 : 부산대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 7월 29일

최종완료 : 2009년 8월 27일

$$V^n \times t = constant \tag{1}$$

식 (1)에서 n : 전기적 열화 종류 및 절연재료에 따른 정수 (수명지수)이다.

Simoni는 식 (1)을 변형한 식 (2)를 수명 식으로 이용하였다. 또한, 일반적으로 양 대수로 표시되는 이 식은 2개의 변곡점을 지나는 경우가 많으며, 이를 부분방전발생전압 및 트리발생전압으로 설명하였다. 즉, 트리발생전압 이하에서는 열화가 진전되지 않으므로 수명을 무한대로 보며, 전압인가와 동시에 부분방전이 발생되면 트리가 급속하게 진전되어 절연파괴가 진행된다. 따라서, 인가전압을 트리발생전압과 부분방전개시전압 사이로 결정하면 식 (2)를 만족하는 전기적 열화가 진행되므로, 식 (2)의 조건에 적합한 가속열화실험을 실시하면 수명지수 n을 산출할 수 있다.

$$\left(\frac{L}{L_0}\right) = \left(\frac{V_0}{V}\right)^n \tag{2}$$

식 (2)에서 V : 인가전압, L : 전압 V에서의 수명시간, V<sub>0</sub> : 전기적열화가 발생되지 않는 전압, L<sub>0</sub> : 전압 V ≤ V<sub>0</sub> 조건에서의 수명시간이다.

고전압에 사용하는 기기의 수명 예측은 평균고장시간 또는 10% 누적고장 확률에 따른 고장시간을 이용하므로, 초기 10% 누적고장확률시간 및 평균고장시간을 산출하고, 그 결과를 이용한 수명지수를 산출하여 최소값을 적용한다면 기기의 안전한 사용을 보장할 수 있다. 따라서, V-t 특성 실험 결과를 이용한 수명 예측을 위하여 와이블 분포 통계처리를 하여 누적파괴확률, 척도 파라미터 및 형상 파라미터 등을 구한다. 수명분포가 와이블 분포를 따른다면 식 (3)의 분포함수를 얻을 수 있으며, 평균수명은 (4)와 같다.

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\} \tag{3}$$

$$\text{평균수명} = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{4}$$

식 (3), (4)에서 α는 척도 파라미터(scale parameter)이며, β는 형상 파라미터(shape parameter)이다. 또한, 와이블 분포의 분포함수 F(t)에서  $F\left(\frac{B_q}{\alpha}\right) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{B_q}{\alpha}\right)^\beta\right\} = q$ 의 관계를 이용하여 백분위 수명 B<sub>10</sub>을 구하면 식 (5)와 같다.

$$B_{10} = \alpha \{-\ln(1-0.1)\}^{1/\beta} \tag{5}$$

**2.2 모델시료 제작 및 실험방법**

부분방전 측정용 온라인 세라믹 센서는 부분방전 펄스를 측정하는 세라믹소체와 공기와 접하는 소체면의 절연을 강화시키기 위하여 소체 주위에 형성하는 몰딩폼 2가지로 구성된다. 소체는 온도에 민감하지 않은 세라믹 컴파운드로 되어 있으며 고온 고압에서 성형하고 전기적으로는 커패시티브 특성을 보유하며, 재질의 물성은 표 1과 같다. 1개의 세라믹 소체는 두께 1.5cm 정도의 원통형 구조이며 측정

대상 고전압 기기의 사용전압에 따라 여러 개의 소체를 직렬로 적층하여 사용한다. 소체의 고압 및 접지 전극 양단에는 사용전압에 따른 고전압이 인가되므로 소체는 장시간에 걸쳐 열화된다. 전기적 열화에 대한 수명의 확보는 세라믹 센서의 안정적인 사용을 위하여 매우 중요하며, 이를 위해서는 소체의 수명이 평가되어야 한다. 본 연구에서는 소체의 전기적 수명지수 결정을 위하여 모델시료를 제작하였고 그에 대한 전기적 가속열화실험을 수행하였다.

표 1 소체 재질의 물성

Table 1 Characteristics of ceramic element's material

항목	특성
Dielectric Constant	490±24.5
Capacitance	735pF/14.0±0.5mm, at 1kHz, 25℃

수명지수 산출을 위한 V-t 특성실험을 실시하기 위한 모델시료는 소체 제작공정과 동일한 방식으로 SrTiO<sub>3</sub>를 주성분으로 하는 세라믹 컴파운드를 압력 60(ton/cm<sup>2</sup>) 이상으로 성형하여 1400℃에서 4시간 이상을 소성한 후 양면을 연마하였으며, KS C 2135(2006)에 따라 한 쪽 면을 접지 전극으로 사용하고자 75% Ag를 프린팅한 후 소성온도 750℃에서 금속 전극을 제작하였다. 제작한 모델시료는 두께 2.6mm 직경 70mm이고, 그림 1과 같다.

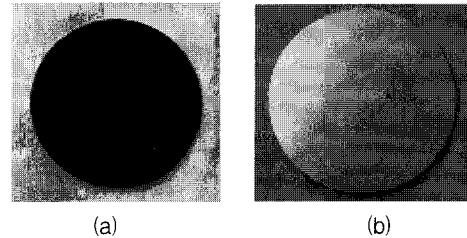


그림 1 소체의 모델시료 (a) 고압 인가 면 (b) 접지면(은도금)  
Fig. 1 (a) High-voltage side and (b) Earthing side(Silver coated) of sample

모델시료는 메틸알코올로 세척한 후 질소가스로 표면을 건조시켰다. 모델시료의 전압인가를 위하여 구대 평판 전극을 사용하였으며, 고전압 인가를 위한 전극은 KS C IEC 60243-1(2007)에 따라 스테인레스강으로 지름 20mm 구형 전극으로 제작하였으며 접지는 지름 50mm 원형 동판 전극을 이용하였다. 양 전극의 표면에 존재할 수 있는 유기질 불순물을 제거하기 위하여 아세톤에 약 1시간 정도 두면서 초음파 세척을 하였다. 실험장치의 외함은 투명 아크릴로 제작하고 모델시료 및 전극 설치를 위한 보조장치는 FRP로 제작하였다. 전압인가를 위하여 모델시료의 접지용 전극 하단에 동판 전극을 설치하고 시료 상단에 구형 전극을 설치하였다. 또한 인가전압에 의한 시료의 표면 방전을 방지하기 위하여 내부는 실리콘유를 충전하였고, 전극과 모델시료와의 접촉력을 강화하기 위하여 고무밴드를 설치하였다.

또한 여러 개의 모델시료를 동시에 실험할 수 있도록 모델시료 설치용 실험장치를 5개 제작하였고, 전압인가장치(동경전자, IPH)와 전압검출장치(Textronics, P6015A) 그리

고 기록 장치 Oscilloscope(Yokogawa, MV 2000)를 사용하여 각 전압에 대한 파괴시간을 측정하였다. 그림 2는 V-t 실험을 위한 실험장치 및 전압인가 구조도이다.

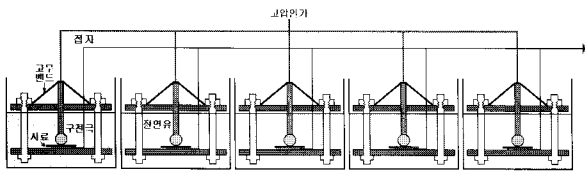


그림 2 실험장치 및 전압인가 구조도

Fig. 2 Schematic diagram of test devices and voltage application

또한 가속열화 수명 실험을 실시하기 위한 전압의 선정을 위하여 모델시료에 대한 상용주파전압 파괴실험을 실시한 결과 약 11kV에서 모델시료의 관통 파괴가 발생하여 수명지수 산출을 위한 최대 실험전압으로 10kV를 설정하였고, 1kV 씩 감소시켜 9kV 및 8kV에서 실험을 실시하였다. 각 실험전압에 따른 모델시료는 8kV 8개, 9kV 9개, 10kV 7개 로 실험을 실시하였다. 실험 후 각 V-t 실험 결과에 대한 와이بل 분포 해석을 실시하였고 분석결과로부터 평균고장시간인 평균수명 및 수명시간 산출 시 최소 누적확률인 10%에서의 사용시간인 B<sub>10</sub>을 구하였고, 평균수명 및 B<sub>10</sub>에서의 수명지수 n을 각각 구하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

표 2는 인가전압에 따른 모델시료의 V-t 실험을 8kV에서 8개, 9kV에서 9개, 10kV에서 7개의 시료에 대하여 실시한 결과를 보여주고 있다. 특히, 8kV에서는 전 시료에서 절연 파괴가 발생하지 않아 실험을 중단하고, 이 시간을 최소파괴 시간으로 처리하였다.

표 2 V-t 실험 결과

Table 2 Results of V-t test

시료	인가전압 8kV	시료	인가전압 9kV	시료	인가전압 10kV
	파괴시간(초)		파괴시간(초)		파괴시간(초)
1	4,147,200 까지 비파괴	9	120	18	1
2		10	120	19	1
3		11	135	20	2
4		12	200	21	7
5		13	277	22	14
6		14	485	23	16
7		15	725	24	16
8		16	1625		
		17	2160		

그림 3은 표 2의 V-t 실험 결과에 대하여 Minitab 프로 그래를 이용한 인가전압에 따른 파괴시간의 와이بل 분포도이며, 추세선이 선형성을 보이므로 수명분포가 와이بل 분포를 따름을 알 수 있다. 그림 3의 분포로부터 9kV와 10kV에서의 형상 파라미터는 각각 0.97과 1.06 그리고 척도 파라미터는 각각 638.6과 8.316으로 계산되었고 식 (4)와 식 (5)를 사용하여 평균수명 및 B<sub>10</sub> 수명을 구하면 표 3과 같다.

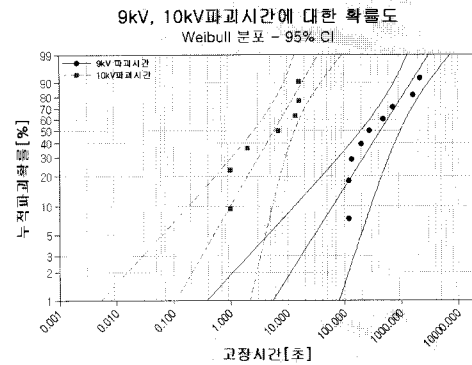


그림 3 와이블 분포도

Fig. 3 Weibull plot

표 3 인가전압에 따른 평균수명 및 B<sub>10</sub> 수명

Table 3 Mean life time and B<sub>10</sub> life time with applied voltage

인가전압 (kV)	평균수명 (초)	B <sub>10</sub> (초)
8	4,147,200 이상	4,147,200 이상
9	648.4	62.2
10	8.1	1.0

그림 4는 모델시료의 V-t 실험 결과에 따른 평균수명 및 B<sub>10</sub> 수명시간을 이용하여 수명지수를 나타낸 그림이며, 평균수명에 의한 수명지수는 59, B<sub>10</sub> 수명시간에 의한 수명지수는 69와 같다. 이와 같은 결과로부터 소체의 수명지수 n은 약 59 정도로 계산되지만, 실제 8kV 인가전압에서 절연파괴가 발생한 시료가 없었으므로 8kV에서의 파괴시간이 표 3의 해당 값 이상인 점을 감안하면 V-t 특성의 기울기는 더 커져서 수명지수 n은 59 이상으로 생각할 수 있다.

따라서, 모델시료의 수명지수가 에폭시에 대한 최근 연구 결과인 12~19보다 3배 이상 크게 나타났으므로, 소체의 재질 및 제작방법이 적절함을 알 수 있다. 또한 소체의 수명지수가 에폭시보다 높게 나타나므로 부분방전 측정용 센서의 수명은 에폭시의 수명에 의존함을 알 수 있다.

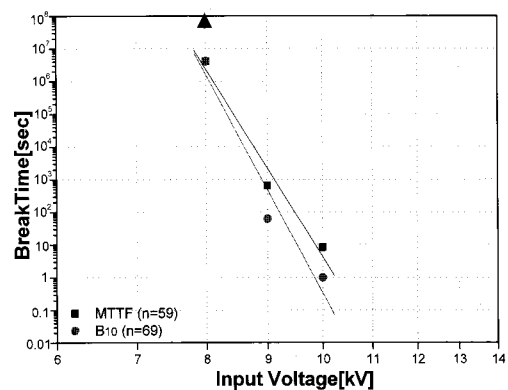
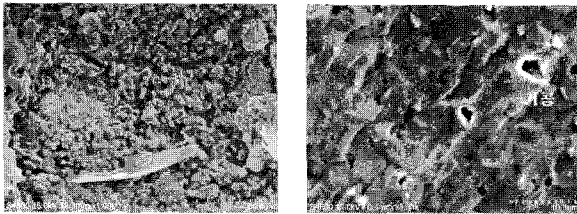


그림 4 V-t 실험 결과에 따른 수명지수

Fig. 4 Life time constant with V-t test results

그림 5는 실험 중 관통 절연파괴된 시료 부위와 건전한 시료의 단면을 보여주고 있다. 그림 (a)에서와 같이 절연파괴된 부분의 단면은 파괴 시 시료의 파면으로 생각되는 부산물이 흐트러져 있지만, 비파괴 부위인 (b)에서는 단면이 깨끗한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 (b)에 표시한 바와 같이 시료 단면에 최대 지름 3~4 $\mu$ m의 기공이 존재하는 것으로 관측되었다. 이와 같이 제조 공정 중 발생한 기공에 임계전압 이상의 전압이 인가되어 부분방전이 발생되고 부분방전은 주위의 절연물을 점차 침식시켜 최종적으로 전극간 관통파괴가 발생하는 것으로 추정할 수 있다.



(a) 절연파괴 부위의 단면 (b) 건전부위의 단면

그림 5 시료의 단면

Fig. 5 Sections of (a) dielectric failure part and (b) normal condition part

### 3. 결 론

센서의 소체와 동일한 재료로 모델시료를 제작하여 V-t 특성을 실험한 결과 각 인가전압, 평균수명 및 B<sub>10</sub> 수명과 관계로부터 평균수명에 대한 수명지수 n은 59 이상이고, B<sub>10</sub> 수명에 대한 수명지수 n은 69 이상으로 계산되었으며, 8kV 인가전압에서 절연파괴가 발생한 시료가 없었으므로 V-t 특성의 기울기는 더 커져서 소체의 수명지수는 최소 59 이상임을 알 수 있었다. 또한 시료에 존재하는 최대 지름 3~4  $\mu$ m의 기공이 절연파괴의 원인인 것으로 분석되었다.

### 참 고 문 헌

[1] H. Yoshida et al., "Insulation Diagnosis for rotating machine insulation", IEEE Trans. on EI-21 No. 6, Dec. 1986

[2] Culbert, I.M., Dhirani, H., and Stone, G.C. : "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines" (Power Plant Electrical Reference Series vol. 16, EPRI publication EL-5036, 1989)

[3] Zhu, H., Green, V., Sasic, M., and Halliburton, S.: "Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-service PD Measurement in Rotating Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14, (4), pp. 1184-1192.

[4] J. Y. Jeong, et al., "Assessment of 23kV Capacitive Coupler for On-line Partial Discharge Measurements", Journal of Electrical Engineering &

Technology Vol 4. No.1, pp 123-130, 2009

[5] Dong-Sik Kang, et al., "Characteristics of Ceramic Coupler for On-line Partial Discharge Measurement in High Voltage Rotating Machines", Trans. KIEE. Vol. 51C, No. 5, pp 205-212, May. 2002

[6] Y. S. Cho, et al., "Characteristics of polymer insulator materials: Voltage-lifetime characteristics of DGEBA/MDA/SN system", Materials Chemistry and Physics 66, pp 70-76, 2000

[7] D. I. YANG, et al., "RELIABILITY OF EPOXY SPACER FOR EHV-CLASS GAS INSULATED SWITCHGEAR", IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, pp 121-124, June. 2001

## 저 자 소 개



### 정 주 영 (鄭周榮)

1962년 11월 26일생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대 전기공학과 박사과정, 2008년~현재 한국전기연구원 고전압평가실 실장  
Tel : 055-280-1526  
Fax : 055-280-1512  
E-mail : jyjeong@keri.re.kr



### 신 종 호 (宣宗鎬)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단 연구그룹 책임연구원  
Tel : 055-280-1578  
Fax : 055-280-1547  
E-mail : jhsun@keri.re.kr



### 강 동 식 (姜東植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~현재 한국전기연구원 책임연구원, 현재 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹장  
Tel : 055-280-1405  
Fax : 055-280-1547  
E-mail : dskang@keri.re.kr



**선 종 호 (宣宗鎬)**

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단 연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1578

Fax : 055-280-1547

E-mail : jhsun@keri.re.kr



**허 종 철 (許宗喆)**

1961년 1월 11일생. 1989년 경남대 전기공학과 졸업, 1998 창원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대 전기공학과 박사과정, 1989년~현재 한국전기연구원 고전압평가실 책임기술원

Tel : 055-280-1518

Fax : 055-280-1512

E-mail : jcheo@keri.re.kr



**추 영 배 (秋榮培)**

1955년 6월 23일생. 1982년 부산대 공대 전기기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1984년~1985년 (주)효성중공업 근무. 1986년~1991년 한국전기연구원 근무. 현재 거제대학 선박기술계열 부교수

Tel : 055-680-1606

Fax : 055-680-1517

E-mail : ybchoo@koje.ac.kr



**박 정 후 (朴正后)**

1945년 4월8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980~1983년 일본 구주대학대학원졸업 (공학박사). 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 051-510-2369

Fax : 051-513-0212

E-mail : parkch@pusan.ac.kr