

송전용 자기애자의 수명 평가 연구

이원교, 최인혁, 이동일, 최한열*
한전 전력연구원, 한전 중앙교육원*

A Study on Life Expectancy Forecast for Porcelain Insulators

Won Kyo Lee, In-Hyuk Choi, Kab Cheol Hwang, Han Yeol Choi*

KEPRI (Korea Electric Power Research Institute), KEPCO(Korea Electric Power Corporation)*

Abstract -36,000lbs porcelain insulators (D-1995, D-1997, D-2002) investigated mechanical and electrical qualities, which were installed in the Korea 154kV transmission lines. This paper assessed Weibull distribution function, quality index, and uniformity index to forecast the remaining life expectancies of insulators. Applying Weibull distribution function on year lapse change test, electro-mechanical failing load test, and HRB values confirmed asignificant degree of correlation. Statistically calculating the life expectancy through quality indices for aging and new products and uniformity indices that are associated with uniformity of insulation materials revealed.

1. 서 론

현재 국내에서 개발된 현수애자는 154kV용으로 25,000Lbs(120kN) 및 36,000Lbs(160kN)애자와 345kV 선로급에는 210kN 및 300kN이 있고 최근에 설치되어 운영 중인 765kV 선로급의 400kN 애자도 개발 완료된 상태이다. 애자는 선로에 한번 설치하면 약 40여년 이상 사용하는 내구성 기재로서 자기와 금구 및 이 두 부분을 결합시켜주는 시멘트로 구성되어 있다. 개별 재료의 서로 다른 물리적 특성으로 인하여 장시간 사용할 경우 외부의 충격, 예를 들면 낙뢰 또는 이상 과전압 등으로 인하여 애자에 균열이 발생하여 사고를 유발할 수 있다.

송전선로는 장시간 걸쳐 자연 환경 변화에 노출되어 있고 또한 뇌격과 같은 여러 자연적인 현상으로부터 위협받고 있다. 이와 같은 가혹한 자연 조건에서도 애자는 전력용 도체의 지지 및 전기적 절연 책무에 있어 최상의 수준을 유지하여야 한다. 현재 국산화 개발된 애자 중 1995년에 제조되어 설치된 애자의 사고가 빈번하게 발생하고 있어 많은 문제가 되고 있다[1-2].

따라서 장시간 사용으로 장기신뢰성을 확보한 외산 애자와 1995년, 1997년 및 최근 제품인 2002년에 제조된 애자의 물리적 특성 및 전기적 성능을 비교 분석함과 동시에 Weibull 함수를 이용하여 현재 사용 중인 애자의 잔존 수명을 예측하고자 연구하였다[1-4].

2. 본 론

2.1 파괴 확률

자기 애자의 기계적 파괴는 재료 고유의 미소 균열에 응력이 집중하여 시작된다. 따라서 주어진 하중에서 파괴응력은 자기의 체적이 증가할수록 낮아진다. 이와 같은 현상은 체적이 커짐에 따라 임계조건에서 이들 미소균열의 존재 가능성이 점점 커진다. 자기 애자를 V개로 균등하게 구분하여 각 소구역에 일정한 하중 하에서 파괴 확률 S 와의 관계는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$1 - s = (1 - s_0)^V \tag{1}$$

또한 재료의 본질적인 강도(σ_0)는 재료의 균일지수를 m이라고 할 때 응력이 분포는 산출되는 최적률 V 라 할 때 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma_0 \propto \left(\frac{1}{V}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{2}$$

자기 애자의 파괴분포에 대해서는 취성파괴이론에 기초로 한 Weibull 분포가 이루어지므로 다음과 같이 파괴확률을 구하여 신뢰성을 평가할 수 있다.

$$-\log_e(1 - s) = V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \tag{3}$$

인장 응력이 균등하게 분포하는 상태에서 자기 재의 파괴 응력의 평균치는 다음과 같다.

$$\mu = \sigma_0 \left(\frac{1}{V}\right)^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \tag{4}$$

σ_0 : 재료의 강도 계수, m : 재료의 균일 계수, V : 응력산출체적 $\Gamma(\cdot)$: 가우스의 Gammer 함수, T : 부하의 종류에 따르는 계수

자기 애자에서 발생하는 최대응력 σ_s 에서 파괴를 일으키지 않는 확률을 (1-S)로 두면 식 (3)과 (4)로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\sigma_s}{\mu} = \log_e(1 - s)^{\frac{1}{m}} \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \tag{5}$$

식(5)는 인장, 굴곡, 비틀림, 내압등 다양한 하중에 대하여 공통적으로 적용이 가능하다. 파괴에 이를 확률 S를 0.01 이하로 관리한다고 하면 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sigma_s}{\mu} = S^{\frac{1}{m}} \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \tag{6}$$

식(6)에 따르면 어떤 신뢰도를 갖는 하한 규격치 σ_s 는 평균값 μ 의 몇 %를 갖는 것이 적당한지에 따라 결정되는데, 정규 분포를 가지고 관정하는 경우에는 평균치의 μ 으로부터 표준편차의 몇 배의 차이를 하한 값으로 하도록 나타낼 수 있다.

여러 가지 값의 균일지수 m에 대하여 신뢰도 99%, 99.9%의 하한 표준값을 결정하기 위한 승수 백분율 α 를 표 1에 나타내었다. () 안의 값은 정규 분포로 관정되는 경우 승수 백분율로 제품의 관리 지수로 사용된다.

<표 1> 신뢰도에 따른 하한 표준값

신뢰도[%]	균일지수[m]	α [%]
99	10	66(71)
	15	76(81)
	20	82(86)
	25	85(88)
99.9	10	66(70)
	15	65(74)
	20	73(81)
	25	78(85)

2.2 균일 지수

균일지수 m은 자기의 미시적 균일성을 나타내는 지표이다. 따라서 균일지수를 구하기 위해서는 자기의 미시적 결합의 분포를 실험하여 통계적으로 확인할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 HRB(Hardness Rockwell-Brinell) 경도 시험을 실시하여 균일지수 m을 계산하였다. HRB 경도 시험은 경도의 크기 외에 가압점으로 부터 발생하는 균열의 상태를 조사하는 것이 중요하다. 이것은 내부에 존재하는 기공과 미세균열의 상태가 기계적 가압이 가해지는 경우 어떻게 진행되는지를 확인하는 것으로 자기 애자의 장기신뢰성과 밀접한 관련이 있다.

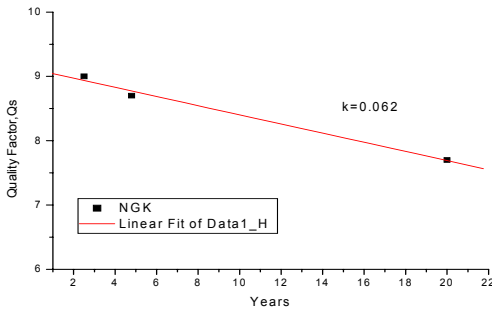
표 2는 각 시험에 대한 과전파괴하중과 HRB 경도를 측정된 값이다.

〈표 2〉 측정된 과전파괴하중과 HRB 경도 값

시료	1995년			1997년			2002년		
	경년	과전	HRB	경년	과전	HRB	경년	과전	HRB
#1	20,980	21,020	119.5	22,960	22,450	120	22,760	22,740	119.6
#2	20,560	19,080	119.5	22,400	22,180	119.4	23,240	22,490	121.5
#3	22,160	22,250	121.5	23,100	22,530	120.2	23,460	22,380	121.8
#4	21,820	19,910	119.5	22,710	21,780	120	22,710	22,580	122
#5	22,180	20,750	119	21,450	22,140	119.2	2,140	22,940	122.1
#6	13,680	22,220	120	22,690	22,710	119.5	23,270	21,200	122.2
#7	14,940	14,250	119.6	22,750	19,780	118.4	22,790	22,800	122.3
#8	22,160	15,300	119	22,480	21,640	119.8	21,940	23,120	122.1
#9	18,030	19,070	121.5	21,960	22,420	118.8	23,270	21,790	122.8
#10	22,410	22,710	119.5	23,300	22,240	119.5	23,410	22,580	121.3

2.3 장기 수명 평가

수명을 예측하기 위해서는 초기 대비 현재 성능의 저하가 발생하는 시험 항목을 취하여 경년 지수와 수명을 도출하는 것이 일반적이다. 외산 제품(F-2000, NGK)의 경우 품질 지수의 감소율은 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 NGK 제품의 품질 지수

사용 연수에 따른 F-2000 제품의 품질 지수 변화를 k는 다음과 같다.

$$k = \frac{(Q_M - Q_A)}{Y_U} \quad (7)$$

여기서 Q_M 은 제작 시 품질 관리 지수, Q_A 는 경년 후 품질 관리 지수 그리고 Y_U 는 사용 연수를 나타낸다. 그림 1의 데이터를 사용하여 식(7)로부터 k를 계산하면 약 0.062의 값을 얻을 수 있다.

국산 애자의 수명을 예측하기 위해 자기애자의 초기 품질관리지수와 현재 품질관리지수를 사용하여 수명저하지수의 변화를 표 3에 나타내었다.

〈표 3〉 초기 품질관리지수와 현재 품질관리지수의 비교

상태	1995년 경년품	1997년 경년품	2002년 신품
초기 Qs	3.4	6.7	7.89
현재 Qs	1.1	6.5	10.35

본 연구에서는 불량률은 애자 소지의 균일도와 연관이 있으므로 품질 지수와 균일도의 상관성을 고려한 경년 수명을 통계적으로 계산하여 예측하고자 하였다. 그림 2는 1995년 및 1997년 경년품에 대한 품질 지수 저하 자료를 가지고 변화 지수 k를 구한 것이다.

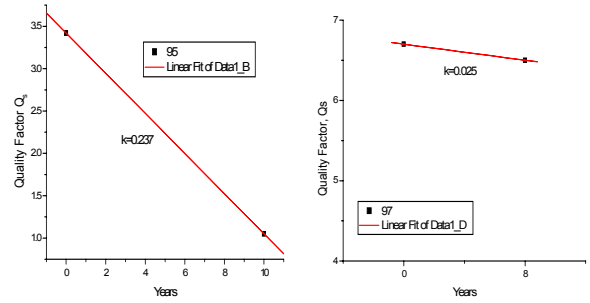
$$Y_u = (Q_M - Q_A) / k \quad (8)$$

식 (8)에서 구한 잔존수명의 값을 사용하여 사용 연수에 따른 애자 제품의 잔존 신뢰 수명 Y_m 은 다음 식으로 정의하며, β 는 애자의 불량 관리 지수율 (α /NGK)을 나타낸다.

$$Y_m = Y_u \cdot \beta \quad (9)$$

일반적인 방법으로 '95년도 및 '97년도 경년품과 2002년 신품을 비교하여 계산한 결과를 표 4에 정리하였다.

D-1995년 경년품에 대하여 다시 계산하기 위해 불량에 이르는 품질 지수 Q_A 를 1.0~3.0, $k=0.237$ 을 적용하는 경우 잔존 수명 Y_U 는 약 1.7~10년으로 상당히 합리적인 값을 도출 할 수 있다.



(a) D-1995

(b) D-1997

〈그림 2〉 1995년, 1997년도 경년품의 경년 변화율

여기서 앞에서 언급한 자기의 제품 상태를 정의하는 균일 지수 m을 고려하여 수명 평가에 반영할 필요가 있다. NGK 제품의 경우 m(24), α (75%) 상태에서 $k=0.062$ 를 유지한다면, 국산 1995년 경년 제품의 경우 m(3.6), α (31%)로 하한 규격치 (불량율)는 약 2.4배나 높다. 결국 잔존 수명은 식 8과 같이 균일지수를 고려한 방법으로 계산하는 것이 필요하다. 결국 1995년 경년품의 경우 불량 품질 지수를 1.0과 3.0으로 하고 불량 저하 지수 k를 0.0237로 하여 계산한 잔존 수명 Y_U 에 β 를 곱하여 주면 잔존 신뢰 수명 Y_m 은 각각 4년과 0.7년이 남는다.

이와 같은 통계방법을 시료 D-1997 및 D-2002에 적용하면 잔존수명이 약 100여 년 동안 사용할 수 있는 결론에 도달한다. 그러나 애자는 내구성도 중요하지만 표면 오손 정도에 따라 심략거리가 감소되어 어느 정도 시간이 경과되면 교체해주어야 한다. 따라서 그 기간에 대한 과학적인 검증방법은 아직 보고가 되어 있지 않지만 선로 운영을 통한 경험적으로는 약 40여년을 최대수명으로 생각한다.

〈표 4〉 균일 지수로 계산한 경년 및 신품 애자의 수명 비교

신뢰도[%]	99.9% 신뢰도			
	D-1995년	D-1997년	D-2002년	F-2000
불량 Qa	1-3	3	3	3
균일 지수 m	3.6	6.6	10	24
불량관리지수 α [%]	31	53	66	75
β (α /NGK)	0.41	0.70	0.88	1
수명저하지수k	0.237	0.025	-	0.062
잔존수명 Y_u	10-1.7년	40년	40년	40년
잔존신뢰수명 Y_m	4.1-0.7년	40년	40년	40년

3. 결 론

본 연구에서는 경년품 및 신품에 대한 애자의 물리적 특성을 분석하였으며 Weibull 분포함수, 품질지수, 균일지수 등을 검토하여 현재 운영 중인 D-1995, D-1997 및 D-2002 애자에 대한 잔존 수명을 예측하였다.

경년변화시험, 과전파괴하중시험, HRB 경도 값에 대한 Weibull 분포 함수를 적용한 결과 상당한 연관성을 있는 것을 확인하였다. 특히 열적 응력을 배제하고 시험하는 과전파괴하중 시험데이터에 대한 plot 결과는 대수좌표의 선형적 특성에 잘 맞는 것으로 나타났다. 또한 경년품 및 신품의 품질지수, 애자 소재의 균일도와 연관된 균일지수 등을 통하여 경년수명을 통계적으로 계산한 결과, D-1995년 경년품의 경우 불량 품질 지수를 1.0과 3.0으로 하고 불량 저하 지수 k를 0.0237로 하여 균일지수가 고려된 잔존 신뢰 수명 Y_m 은 각각 4년과 0.7년이 남은 것으로 계산되었다.

[참 고 문 헌]

[1] “고신뢰성 자기채 배전용 현수애자 개발”, 한국전력공사, 한국전기연구원, 최종보고서, 1996, 5.
 [2] “송전용 애자의 신뢰성 평가 연구”, 한국전력공사, 전력연구원, 2006, 11.
 [3] T. Iwama, K. Kito, K. Naito and T. Irie “Ultra-High Strength Suspension Insulators and Insulator String Assemblies for UHV Transmission Line”, IEEE. Transactions on Power Apparatus and System. Vol. PAS-101. No. 10 October 1982
 [4] K. Naito, R. Matsuoka, T. Irie and K. Kondo “Test Method and Results for Recent Outdoor Insulation in Japan”, IEEE Transactions on Dielectrics and electrical Insulation, Vol. 6 No.5, October 1999“