

인장시험에 의한 자기재 현수애자의 수명평가에 관한 연구

김진영, 송일근, 김주용, 이병성, 한재홍, 윤태상  
한국전력공사 전력연구원

A Study on the Lifetime Evaluation of Porcelain Suspension Insulator Using Tensile Test

Chan Young Kim, Il Kaun Song, Ju Yong Kim, Byung Sung Lee, Jae Hong Han, Tae Sang Yoon  
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

**Abstract** - This paper presents the results of lifetime evaluation for porcelain suspension insulator using tensile test. The specimens were collected from the branch offices of the KEPCO. The tensile tests were performed with the instron which had the speed of 1 mm per minutes. The factors of quality were calculated with the maximum tensile strength measured from each specimens. With the quality factors, a factor of lifetime was determined. The lifetime of porcelain suspension insulator as a factor of fabricated years was evaluated.

1. 서 론

현수애자에 대한 인장시험은 애자의 신뢰성을 직접적으로 평가할 수 있다는 점에서 매우 중요한 시험이다. 자기, 금구, 시멘트 중에서 인장응력이 가장 낮은 부분이 파손되기 때문에 가장 취약한 부분을 파악할 수 있고, 취약한 부분에 대한 특성을 향상시킴으로써 애자의 성능을 향상시킬 수 있다.

배전용 자기재 현수애자의 기계적 특성은 주로 제작 당시의 원료 및 소성조건과 밀접한 관련이 있다. 이와 같이 결정된 초기의 특성은 고장이 발생할 때까지 경년변화가 매우 서서히 진행된다. 금구와 자기의 접촉에 사용되는 시멘트의 경화 및 금구류의 부식으로 애자의 특성이 경년에 따라 감소된다.

본 연구에서는 현장에서 사용되던 배전용 자기재 현수애자를 발취하여 최대 인장강도를 측정하였고, 사용연도에 따른 품질관리지수를 계산하여 수명인자를 결정하였으며, 이 수명인자로 배전용 자기재 현수애자의 수명을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 시험방법

배전선로에서 수년에서 수십년 동안 사용되었던 국산 및 외산 현수애자의 시료수 및 제작년도는 표 1과 같다. 국산애자는 41개의 시료, 외산애자는 21개의 시료를 전국의 배전사업소에서 발취하였다. 발취된 애자는 표면을 깨끗이 세정하여 인장시험기(Instron)를 사용하여 분당 1mm의 속도로 애자가 파손될 때까지 인장력을 가하였다. 측정된 최대 인장강도를 사용하여 품질관리지수를 계산하였다.

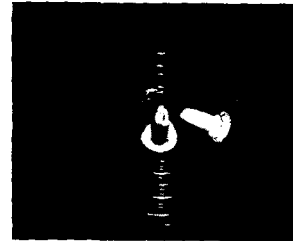
2.2 현수애자 인장시험

배전용 자기재 현수애자(191 mm)가 인장응력을 받아 파손되는 형태는 크게 3가지로 나타났다. 첫 번째 형태는 그림 1(a)와 같이 편이 신연(伸延)되어 절단되는 경우로써 국산애자에서 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 이 경우는 편에 사용되는 금속재질을 향상시킴으로써 쉽게 인장응력을 높일 수 있다. 두 번째 형태는 그림

표 1. 시험 시료  
Table 1. Test specimens

	제작년도	시료수(개)
국산애자	'88	7
	'89	2
	'95	5
	'96	7
	'97	10
	'99	10
소 계		41
외산애자	'78	2
	'79	1
	'95	8
	'97	10
소 계		21

1(b)와 같이 캡이 파손되는 형태로써 외산 애자에서 주로 발생하였다. 세 번째 형태는 그림 1(c)와 같이 자기가 파손되는 경우로써 이러한 파손형태는 특정년도의 국산애자에서 발생하였다. 자기가 파손되었다는 것은 애자의 3대 구성요건인 자기 금구 시멘트 중에서 자기가 가장 취약하다는 것을 의미한다. 본 실험에서는 그 동안 현장에서 발생된 것으로 보고되었던 시멘트 파손으로 인한 편이 이탈은 본 실험동안에는 발생되지 않았다.



(a) 편 절단



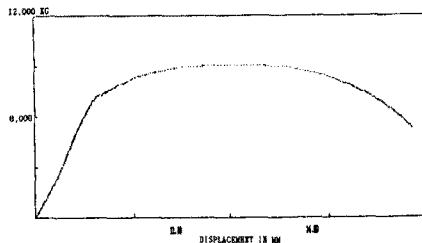
(b) 캡 파손



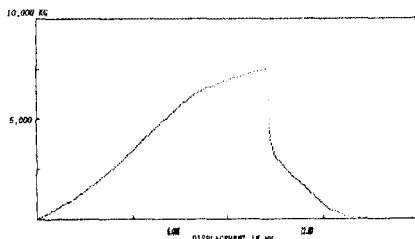
(c) 자기 파손

그림 1. 배전용 현수애자의 파손 형태  
Fig. 1. Types of failure for distribution suspension insulators

그림 2는 '98년에 제작된 국산애자의 인장시험 결과인 load-elongation 그래프이다. 편이 신연(elongation) 되어 절단되는 경우는 편이 연신되어 최대인장하중치에 도달한 다음 파손에 이르게 된다. 국내 배전선로에서 편이 연신되어 고장이 발생한 사례는 보고되지 않았다. 그렇지만 자기가 파손될 경우는 신연이 없고 순간적으로 파손되어 배전선로에 치명적인 고장을 일으킬 수 있으며 국내 배전선로에서 빈번하게 발생하였던 것으로 보고 되었다. 그림 2에 나타난 load-elongation 그래프는 모두 규정하중치인 7,000 [kg] 이상에서 파손되었음을 보여준다. 편이 절단된 애자의 최대인장하중은 9,139 [kg] 그리고 자기가 파손된 애자의 최대인장하중은 7,490 [kg]으로 나타났다.



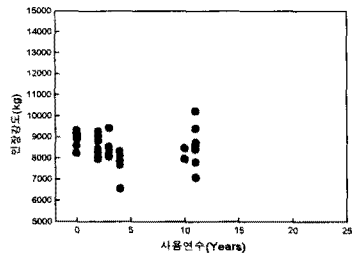
(a) 편이 신연에 의한 고장



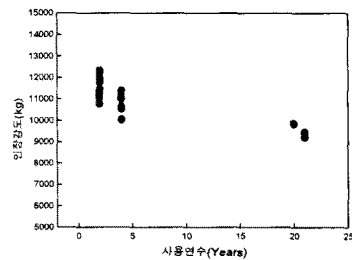
(b) 자기가 파손에 의한 고장

그림 2. 배전용 현수애자의 load-elongation 그래프  
Fig. 2. Graph of load-elongation for distribution suspension insulator

그림 3은 현수애자의 사용연수에 따른 인장강도 시험 결과를 나타낸 것이다. 10년 동안 사용된 국산애자의 인장강도는 제품에 따라 차이가 많음을 알 수 있다. 그렇지만 최근에 제작된 애자는 제품에 따라서 차이가 적고 품질이 균일한 것을 알 수 있다. 외산애자는 제품간의 품질이 균일하고 '97년에 제작된 국산애자의 평균치와 비교하여 약 2900 kg 높게 측정되었다.



(a) 국산애자



(b) 외산애자

그림 3. 자기재 현수애자의 인장강도  
Fig. 3. Tensile strength of porcelain suspension insulators

### 2.3 품질관리지수 계산

인장시험기로 측정된 최대인장 하중 측정값을 사용하여 아래의 공식을 사용하여 표준편차를 계산하였고 표준편차(S)로 품질관리지수를 계산하였다.

$$S = \sqrt{\frac{(R_1 - \bar{R})^2 + (R_2 - \bar{R})^2 + \dots + (R_n - \bar{R})^2}{n-1}}$$

S = 표준편차

$\bar{R}$  = 측정치의 평균치

$R_s$  = 과전파괴하중

한국전력공사에서는 품질관리지수를 일정상수  $K=3$  이상으로 설정하여 양부를 결정하도록 하고 있다.

$$Q_s = \frac{\bar{R} - R_s}{S} \geq K$$

$Q_s$  = 품질관리지수

K = 상수

표 2에 최대 인장하중으로 계산한 국산애자의 품질관리지수를 기록하였다. '88년 ~ '89년에 제작된 애자는 최대인장하중에 도달하기 전에 자기가 파손된 애자가 포함되어 있었다. 자기가 먼저 파손된 애자를 제외하고 계산한 품질관리지수는 1.60로 나타났다. '95년에 제작된 현수애자의 인장시험은 시료 5개를 측정하였고, 이 중 한 개가 기준값 이하에서 파손되었으며, 품질관리지수는 2.55로 계산되었다. '96년 제품은 시료 7개를 사용하여 품질관리지수가 2.95. '97년에 현수애자는 3.49로 기준값인 3이상으로 나타났다. '99년 제작된 고려현수 애자는 품질관리지수가 6.16으로 그 동안 제작된 애자중에서 가장 높았으며, 이것은 품질이 향상되었다는 것을 의미한다.

외산애자의 품질관리지수는 대체로 균일하였다. '78년

~'79년에 제작된 애자의 품질관리지수는 7.85, '95년 제품은 8.89, '97년 제품은 9.04로 나타났다. 따라서 외산애자는 국내의 품질관리지수 기준인 3보다 훨씬 높은 것으로 나타났다.

표 2. 품질관리지수  
Table 2. Quality factor

제작사	품질지수	제작년도	품질관리 지수
국산애자		'88년 ~ '89년	1.60
		'95년	2.55
		'96년	2.95
		'97년	3.49
외산애자		'78년 ~ '79년	7.85
		'95년	8.89
		'97년	9.04

#### 2.4 경년에 따른 수명인자

외산애자에 대한 성분분석 결과, 제조공정 및 재질이 약 20년 동안 거의 일정하였던 것으로 확인되었다. 따라서 외산애자에 대한 품질관리지수를 경년에 따라 관찰함으로써 자기재 현수애자 경년변화율을 측정하였다. 그림 4는 외산애자의 사용연수에 대한 품질관리지수를 나타냈다.

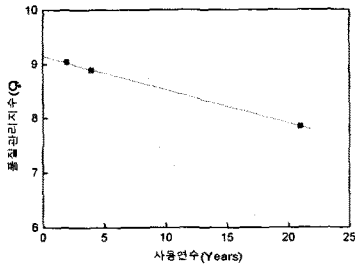


그림 4. 사용연수에 따른 외산애자의 품질관리지수  
Fig. 4. Quality factor of imported insulators as a function of used years

사용연수에 따라 측정된 품질관리지수 기울기로 경년 변화율을 계산하였다. 따라서 사용연수에 따른 외산애자의 품질관리지수 변화율은 다음과 같다.

$$Q_s = Q_{s1} - k \times Y$$

- $Q_{s1}$  : 제작시 품질관리지수 ( $Q_{s1} = 9.1$ )
- $Q_s$  : 품질관리지수
- $k$  : 품질관리지수의 변화율 ( $k = 0.062$ )
- $Y$  : 사용연수

국산애자는 제작년도에 따라 재질이 변화되었기 때문에 사용연수에 대한 품질관리지수 기울기를 구할 수가 없다. 다만 자기재 애자의 기계적 특성은 제조시에 결정되며 시멘트 부식 등에 의해 열화되는 정도가 비슷하다면 외산애자의 품질관리지수를 이용하여 국산애자의 수명을 예측할 수 있다. 그림 5에 사용연도에 따른 국산애자의 품질관리지수를 나타냈다.

측정된 각각의 품질관리지수를 사용하여 제작년도 당시의 품질관리지수를 계산하여 표 3에 기록하였다. 제작 당시 품질관리지수가 3.0이상였던 애자는 '96년, '97년, 그리고 '99년 제품으로 나타났다.

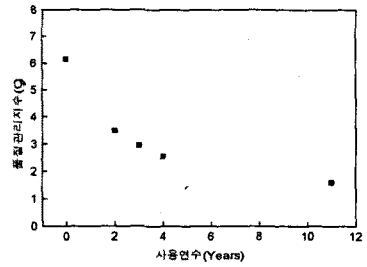


그림 5. 사용연수에 따른 국산애자의 품질관리지수  
Fig. 5. Quality factor of domestic insulators as a function of used years

표 3. 표준화된 품질관리지수  
Table 3. Normalized quality factor

제작년도	시료수	측정된 품질관리 지수	제작시 품질관리지수
'95년	5개	2.55	2.80
'96년	7개	2.95	3.14
'97년	10개	3.49	3.61
'99년	10개	6.16	6.16

국산애자의 품질관리지수가 외산애자의 품질관리지수 감소율로 감소된다는 가정하에 수명을 예측하였다. 애자의 한계수명은 불량 발생 확률이 40%일 때로 정했다. 따라서 불량률이 40%인 경우의 품질관리지수는 0.83이므로 만일 제작당시의 품질관리지수가 3일 경우에 품질관리지수가 0.83에 도달할 때까지 약 35년이 걸린다.

따라서 제작당시의 품질관리지수가 경년에 따라 감소하여 품질관리지수가 0.83에 도달할 때까지를 예측수명으로 하여 표 4에 기록하였다.

표 4. 자기재 현수애자의 예측수명  
Table 4. Estimated lifetime of porcelain suspension insulators

제작년도	제작시 품질관리지수	예측수명*
95년	2.80	31년
96년	3.14	37년
97년	3.61	44년
99년	6.16	85년

### 3. 결 론

최대 인장강도를 이용하여 배전용 자기재 현수애자의 수명을 예측하였다. 자기재 현수애자의 수명은 제품의 특성과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 발표한 최대 인장강도를 이용하는 방법만으로는 수명을 정확하게 예측하기는 매우 어려운 실정이다. 그렇지만 본 논문에도 포함되지 않은 정밀분석 결과 및 전기적 특성평가 결과를 감안한다면 인장시험으로 예측한 수명은 실제 수명과 상반성이 매우 높음을 확인하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 심재명, 김영달, 김성덕, 강지원, "인장특성을 이용한 ACSR 수명예측에 관한 연구," 조명·전기설비학회논문지, 13권, 4호, pp. 120-126, 1999.
- [2] 송일근외, "배전기재의 수명예측 기준제정", 한국전력공사 전력연구원 보고서, pp. 11-19, 1999.