

논문 20-7-13

송전용 36,000 lbs 자기애자의 수명 예측 연구

A Study of Life Prediction Assessment of T/L 36,000 lbs Porcelain Insulators

최인혁^{1,a}, 최연규², 이동일¹, 이원교¹, 강병규¹, 박준호¹

(In-Hyuk Choi^{1,a}, Yon-gyu Choi², Dong-Il Lee¹, Won-Kyo Lee¹, Byoung-Kyu Kang¹, and Jun-Ho Park¹)

Abstract

36,000lbs porcelain insulators of D-1995, D-1997 and D-2002 investigated mechanical and electrical qualities, where is process of using in the Korea 154 kV transmission lines. It analyzes the cause of the elapse of a year aging of the transmission insulators. Weibull distribution function, product quality and uniform quality, etc. investigated for prediction to extant life of insulator. It calculate change as statistical elapse of a year through product qualities of used insulator and new insulator, uniform equality and uniformity of insulator. In case of D-1995 year used insulator, it decided to badness decline index k by 0.0237, badness quality index by 1.0 and 3.0. Result of extant confidence life Ym was calculated that remain each 4 years and 0.7 years that uniformity index is considered. Extant life of D-1997 and D-2002 insulators predicted by about 40 years.

Key Words : Insulator, Alumina, Extant life, Power arc, Mechanical

1. 서론

국내 154 kV 송전선로에 운영 중인 자기재 현수애자는 약 450만개 정도로 설치되어 있고 이 중에 1960년~1980년대에 국산화가 되지 않아 대부분 외산 애자를 사용하였다. 그러나 국내 산업의 발달 및 송전 기자재의 국산화 개발의 노력으로 1983년 이후 부터는 개발된 국산 현수애자를 설치하게 되었다. 현재 국내에서 개발된 현수애자는 154 kV용으로 25,000 Lbs(120 kN) 및 36,000 Lbs(160 kN) 애자와 345 kV 선로급에는 210 kN 및 300 kN이 있고 최근에 설치되어 운영 중인 765 kV 선로급의 400 kN 애자도 개발 완료된 상태이다. 애자는 선로에 한번 설치하면 약 40여년 이상 사용하는 내구성 기자재로서 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. 현재 국산화 개발된 애자 중 1995년에 제조되어 설치된 애자의 사고가 빈번하게 발생하고 있어 많은 문제가 되고 있다[1,2]. 따라서 과거 1960~70년대에 설치된 외산 애자는 큰 사고 없이 아직도 실 선로에 사용 중인데 반해 국산화 개발된 애자는 불과 10여년 정도 밖에 사용하지 않았음에도 불구하고 빈번하게 사고가 발생하여 실 선로에서 철거하여 애자의 물리적 특성을 조사하고 또한 전기적 성능시험을 실시하여 사고가 발생한 원인을 분석하고자 한다. 또한 1997년 및 최근 제품인 2002년에 제조된 애자 뿐 아니라 장시간 사용으로 장기신뢰성을 확보한 외산 애자의 물리적 특성 및 전기적 성능을 비교 분석함과 동시에 Weibull 함수를 이용하여 현재 사용 중인 애자의 잔존 수명을 예측하고자 연구하였다.

1. 한국전력공사 전력연구원
(대전시 유성구 문지동 103-16)

2. (주)고려애자

a. Corresponding Author : idhyuk@kepri.re.kr

접수일자 : 2007. 5. 25

1차 심사 : 2007. 6. 12

심사완료 : 2007. 6. 22

2. 실험

2.1 시료채취

154 kV 송전선로에 설치되어 운영 중인 36,000 Lbs 애자 중 사고가 빈번하게 발생한 1995년에 생

표 1. 애자의 시험규격(ES-131).

Table 1. The specification of ES 131.

항 목		종 류	36,000 lbs
상용주파 건조섬락전압(kV)			80
상용주파 주수섬락전압(kV)			50
뇌 충격섬락전압(kV) (1.2×50 μs)	정		125
	부		130
상용주파유중파괴전압치(kV)			110
과전과과하중치: kgf(lbs)			16,500(36,000)
타격내하중치 : kgf-cm(in-lbs)			104(90)
인장내하중치 : kgf(lbs)			8,250(18,000)
경년변화시험 : kgf(lbs)			16,500(36,000)

산한 애자 및 1997년에 생산한 애자의 경년품과 신제품인 2002년에 생산한 애자와 매우 우수한 애자로 알려진 외산 2000년에 생산한 애자를 수집하여 물리적인 특성 및 전기적 성능시험을 실시하여 비교분석하고자 한다.

2.2 분석 및 시험

수집한 애자의 결성상 및 조직을 분석하기 위하여 x-선 회절분석기(XRD, Philips) 및 주사전자현미경(SEM: R. J. Lee)을 이용하였고 열팽창계수 측정을 위하여 dilatometer(tokyo industrial company)를 사용하였다.

2.3 애자의 전기적 성능시험

애자의 전기적 성능을 평가하기 위한 시험 조건은 한국전력공사 구매시방서 ES-131에 명시된 규격에 따라 시험을 실시하였다. 각각의 시험조건은 표 1과 같다.

표 1에 명시된 시험 외에도 추가로 내아크 및 급준파 시험을 실시하였다.

2.3.1 경년변화시험

경년변화시험조건은 과전과과하중치의 60 %의 인장하중을 축심방향으로 인가한 후 챔버 내부의 온도를 저온에서는 -35±5 °C, 고온에서는 40±5 °C로 각각 4시간 이상 인가하여야 하며 냉-열 순으로 24시간을 한 주기로 하여 연속적으로 반복하여 4회 실행하여야 한다. 그림 1에는 경년변화시험의 조건을 계략적으로 도시하였다.

반복적인 주기를 4회 실행한 후 경년에 따른 내구성을 확인하기 위하여 과전과과하중시험을 당일에 실시하여야 한다[3].

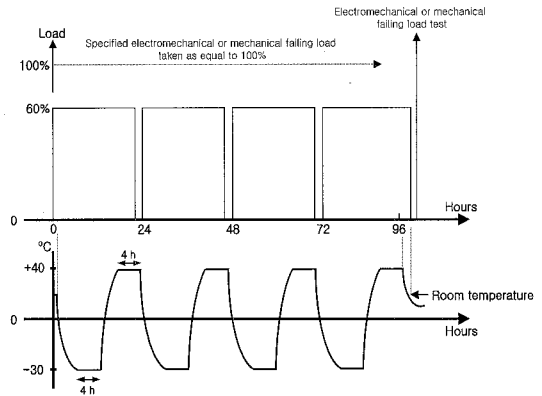


그림 1. 경년변화시험 조건(한전 ES 131).

Fig. 1. The condition of the thermal mechanical load cycle test.

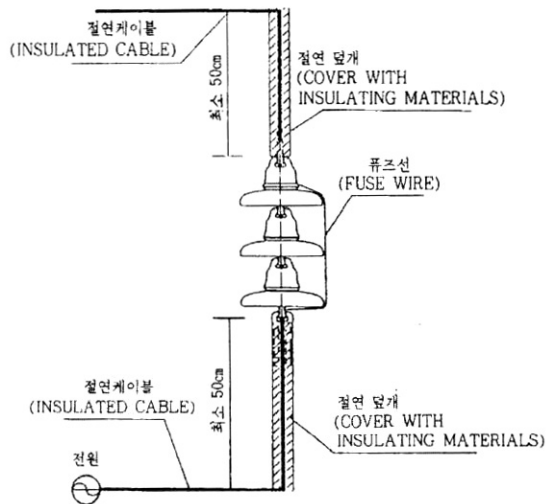


그림 2. 내아크 시험을 위한 시험품 부착 방법.

Fig. 2. Sample installation for power arc test.

2.3.2 내 아크시험(Power arc test)

시험품의 부착 방법은 시험품 3개를 1련으로 그림 2를 참조하여 수직으로 부착한 다음 각 애자에 규정된 장력(14kN)을 인가한 후 시험하는 동안 계속 유지시킨다. 시험 전류는 45~65 Hz의 단상 교류 전류로서 초기 비대칭분은 30 %를 초과해서는 안 된다. 아크(Arc)전류와 지속시간은 12 kA(r.m.s), 0.1초 또는 6 kA(r.m.s), 0.2초로서 아크 지속 전류와 지속 시간과의 곱이 72 kA·Cycle±10 %가 되도록 하여야 한다.

2.3.3 급준파시험(Steep front of wave flashover test)

급준파 전압이란 거의 일정한 준도를 가지고 상승되는 전압으로 준도는 임펄스파형 최대치의 전면 30 %와 90 % 사이를 잇는 직선의 기울기로 결정된다. 시험품의 부착 방법은 IEC. Pub 60-1의 6 및 7항에 따른다. 현재 개정된 ES-131 540 규정에 따르면 각 시험품은 5회의 양(+)극성 급준파 섬락과 5회의 음(-)극성의 급준파 섬락시험을 행한다. 급준파의 최소 유효 상승율은 2,500 kV/ μ s로서 사용되는 파형은 IEC. Pub 60-1에서 정의된 선형 전면 절단 임펄스 파형이다. 이 시험이 끝나자마자 곧바로 시험품 각각에 대하여 3회의 상용주파 건조섬락시험을 행하여 각각의 애자에 대한 평균 건조섬락 전압치가 정격 건조섬락전압치의 95 % 이상이어야 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 애자의 물리적 특성 분석

일반적으로 장석, 도석, 점토 및 알루미늄을 주 원료로 하여 배합비율에 따라 각각의 원료를 혼합하여 애자를 제조하고 있다. 1980년대 초에 처음으로 송전용 현수애자를 제조할 때에는 알루미늄의 함유량을 약 8 wt%로 하였으나 자연재해 및 불가항력적인 이상 과전압으로 인하여 더 높은 애자의 전기적 성능이 요구되어 1995년에는 12 wt% 상향 조정되었으며 애자의 전기적 시험조건이 강화되어 1997년 이후부터는 알루미늄의 첨가량을 17 wt%로 조절하였다. 표 1에는 애자를 제조할 때 첨가한 알루미늄의 양을 나타낸 것이다.

표 2에 나타난 것처럼 애자의 제조기술 발달로 현재에는 외산 애자와 동일하게 알루미늄을 17 wt% 첨가하여 고품질의 애자를 제조하고 있다. 배합비율에 따라 약 1320 $^{\circ}$ C에 소성한 자기의 결정상을 분석하기 위하여 x-선 회절분석기로 시편을 측정하였다.

표 3를 보면 알 수 있듯이 애자의 기계적 특성을 보완하고자 출발원료에 첨가하였던 Al_2O_3 의 양은 소성 후의 결정 양과 비교하여 보면 큰 차이가 없다. 도석 및 장석에 포함된 일부 알루미늄과 순수한 알루미늄이 SiO_2 와 화학 반응하여 mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)를 생성하였다. 1995년도에 제조한 애자와 1997년 이후에 제조한 애자의 결정 양을 비교하여 보면 애자의 기계적 및 전기적 성질을

표 2. 연도별 애자에 첨가된 알루미늄의 양.

Table 2. The added alumina of insulator according to manufacture years.

시편	알루미늄의 첨가량 (wt%)	제품상태
D-1995	12	경년품
D-1997	17	경년품
D-2002	17	신품
F-2000	17	신품

표 3. XRD로 정량 분석한 결정 및 결정 양.

Table 3. The crystalline phase analyzed by x-ray diffraction.

시편 \ 결정	Mullite (%)	Quartz (%)	Cristobalite (%)	Corundum (%)
D-1995	17.11	3.72	5.74	8.1
D-1997	16.5	3.5	0.5	16.5
D-2002	11.39	3.3	0.4	16.8
F-2000	10.65	3.43	-	16.06

표 4. Dilatometer를 이용하여 650 $^{\circ}$ C에서 측정 한 열팽창율.

Table 4. Thermal expansion coefficient of insulator measured at 650 $^{\circ}$ C by dilatometer.

시편	D-1995	D-1997	D-2002	F-2000
열팽창계수 ($\times 10^{-6}/K$)	5.540	5.156	5.143	5.046
열팽창율(%)	0.349	0.328	0.324	0.314

향상시키는 corundum의 양은 증가하였고 반대로 cristobalite의 양은 감소하였다. 특히 열적 특성에 취약한 cristobalite 양의 감소로 한전 구매시방서에 명시된 내아크 시험에 매우 좋은 영향을 나타낼 수 있다. 내아크 시험을 할 때 발생하는 온도는 순간적으로 약 3000~5000 $^{\circ}$ C로 애자의 열적 특성에 많은 영향을 미치는데 열팽창율이 높은 cristobalite 양의 감소로 자기의 열팽창율 감소를 예상할 수 있다. 표 4에는 dilatometer를 이용하여 650 $^{\circ}$ C에 측정 한 열팽창율이다.

표 5. 측정된 vickers 경도, 탄성률, 파괴인성, 절연파괴전압.

Table 5. Result of vickers hardness, young's modulus, fracture toughness and dielectric strength.

시 편	상대 밀도 [%]	탄성률 [GPa]	표면 경도 (Hv) [GPa]	파괴인성 (K _{1c}) [MPa · m ^{1/2}]	절연파괴 전압 [kV/mm]
D-1995	92.6	73.9	6.9	1.3	16.3
D-1997	95.8	94.5	7.0	1.6	18.5
D-2002	96.5	96.2	7.0	1.7	18.8
F-2000	94.5	88.2	6.9	1.6	17.2

열팽창율이 높은 cristobalite 양이 감소함에 따라 열팽창율도 감소하는 것을 볼 수 있고 열팽창율이 외산 F-2000과 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉 열적 특성이 개선되어 내아크 시험을 무사히 통과하리라 생각한다. 자기의 물리적 특성을 조사하고자 상대밀도, 탄성률, vickers 경도, 파괴인성 및 절연파괴전압을 측정하였다[4]. 제조년도에 따라 측정된 기계적 및 전기적 성질을 표 5에 도시하였다.

Archimedes 원리를 이용하여 자기의 치밀도를 조사한 결과 D-1995 자기의 상대밀도는 다른 시편의 상대밀도 보다 약 3 % 정도 낮고, 따라서 다른 물리적 성질도 전반적으로 감소하였다. 즉 배합비율에 맞는 최적의 소결조건에서 소성을 하지 못하였기 때문에 자기의 치밀화가 이루어지지 못했다. 그러나 1997년 이후에 제조한 자기의 물리적 특성을 외산 자기의 물리적 특성과 비교하여 볼 때 최적의 소결조건에서 소성을 하였기 때문에 거의 동등한 기계적 특성을 나타내었다. 이와 같은 자기의 물리적 성질의 결과를 통하여 볼 때 애자의 전기적 성능도 거의 동일하리라 생각된다. 표 4에서 볼 수 있듯이 알루미늄의 첨가량이 12 wt%에서 17 wt%로 증가함에 따라 자기의 기계적 성질 즉 표면경도 및 파괴인성은 각각 6.9 GPa 와 1.3 MPa · m^{1/2}에서 7.0 GPa 와 1.6 MPa · m^{1/2}으로 증가하는 것을 알 수 있다. 애자의 절연 능력을 나타내는 절연파괴전압도 16.3 kV/mm에서 18.8 kV/mm로 약 15 % 증가하였다. 동일하게 알루미늄을 17 wt% 첨가한 국산 및 외산 자기의 절연파괴전압을 비교하여 볼 때 상대밀도 차이에 의하여



그림 3. 내아크 시험과 시험 후 시편 상태.

Fig. 3. Power arc test and sample condition after its test.

D-2002 자기의 절연파괴전압이 F-2000 자기의 절연파괴전압 보다 약 9 % 정도 높다. 즉 절연파괴전압은 세라믹의 기계적 특성을 좌우하는 기공률과 매우 밀접한 관계가 있다[5]. 치밀한 조직으로 이루어진 애자일수록 기계적 특성 뿐 아니라 전기적 특성도 우수하다는 것을 알 수 있다[6]. 다른 년도에 비해 2002년에 제조한 국산애자가 가장 높은 상대밀도를 나타내었기 때문에 높은 물리적 특성을 나타내었다.

3.2 애자의 전기적 성능시험

애자는 일반적으로 자기, 금구 및 시멘트로 구성되어 있다. 송전 선로에서 장시간 사용하다 보면 자연환경변화에 의하여 애자에 기계적 및 전기적 스트레스로 인한 열화 현상이 발생하여 초기 제품에 비해 전기적 성능이 현저하게 감소한다. 즉 장시간 선로에서 바람등과 같은 영향으로 진동의 스트레스가 직접적으로 애자에 영향을 미쳐 피로현상(fatigue)과 같은 기계적 스트레스 및 낙뢰 같은 이상과전압으로 인한 전기적 스트레스 때문에 애자는 경년열화가 되어 애자의 절연능력이 급격히 떨어져 교체해야 한다. 현재 애자에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만 확실하게 수명을 예측한 연구 결과가 보고되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 애자 업체에서 최고 수준을 유지하고 있는 외산 애자의 경년 사용된 자료를 토대로 현재 실 선로에 사용하고 있는 국산 애자의 잔존 수명을 예측하고자 한다. 실 선로에서 사용된 애자의 전기적 성능을 조사하기 위하여 우선 먼저 한진 구매

시방서에 명시된 상용주파건조섬락, 상용주파주수섬락, 뇌충격섬락, 유중파과전압 및 내아크 시험을 실시하였다. 모든 시료는 규격에 명시된 시험 조건을 상회하였다. 그림 3에는 내아크 시험할 때의 현상과 시험 후 애자의 상태를 나타낸 것이다.

그림 3에서 통해서 알 수 있듯이 72 kA·cycle 대 전류가 애자에 흐를 때 아크가 발생하여 애자 주변의 온도가 순간적으로 약 3,000~5,000 °C 상승하여 애자의 유약 표면이 녹아 박리현상이 발생하고 애자의 내구성이 약할 경우 애자의 갯이 파괴되는 경우도 있다. 만약에 애자의 갯이 파괴될 경우 시료는 불합격된다. 시료 D-1995, D-1997 및 D-2002는 내아크 시험 후 그림에서 본 것처럼 외관에 아무런 이상이 없었다. 애자의 전기절연내력을 시험하기 위해서 급준파 시험을 실시하였는데 그 결과를 표 6에 나타내었다. 한전 ES 131에는 급준파 시험을 할 때 정, 부극성 각각 5회로 규정되어 있지만 본 연구에서는 가혹한 조건의 상태에서 애자의 내구성을 측정하고자 각각 10회 실시하였다.

외산인 F-2000 시료도 D-2002 애자와 같이 모두 양호하였다. 자기재 애자의 급준파에 대한 내구성은 크게 두 가지 요소, 즉 자기 애자의 절연강도(소재의 절연강도 특성)와 형상설계에 따른 섬락전압과 관통전압의 연관성에 의해 결정된다. 표 6에 명시된 것처럼 D-1995 애자의 상대밀도가 다른 시편보다 낮기 때문에 기공과 밀접한 관계가 있는 절연파과전압이 상대적으로 낮았다. 따라서 급준파 시험시 인가하는 파형 2,500 kV/μs에 애자의 두부가 관통되어 불량을 나타내었다.

3.3 장기 신뢰성 평가

송전선로는 장거리 및 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. 불량 애자로 인하여 선로가 단락되는 사고가 발생하는 경우 송전 시스템의 사용 중단 등등 심각한 경제적인 피해가 우려된다. 따라서 현재 송전 설비에 관련된 기자재의 신뢰성에 대한 관심이 매우 높고 다른 설비에 비해 과거 많은 사고를 유발하였던 송전용 애자의 신뢰성에 특히 관심이 많다. 국내에 설치되어 있는 송전용 애자의 잔존 수명을 예측하기 위하여 Weibull 통계기법을 사용하였다[7-13].

자기 애자의 기계적 파괴는 재료 고유의 미소 균열에 응력이 집중하여 시작된다. 따라서 주어진

표 6. 한전 ES 131 따른 급준파 시험.

Table 6. Steep front of wave flashover test according to ES 131.

시료 번호	극성	결과		
		D-1995	D-1997	D-2002
1	정극성(+)	불량 2회	양호	양호
	부극성(-)	-	양호	양호
2	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	불량 7회	양호	양호
3	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	양호	양호	양호
4	정극성(+)	불량 5회	양호	양호
	부극성(-)	-	양호	양호
5	정극성(+)	불량 7회	양호	양호
	부극성(-)	-	양호	양호
6	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	불량 9회	양호	양호
7	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	불량 8회	양호	양호
8	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	양호	양호	양호
9	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	양호	양호	양호
10	정극성(+)	양호	양호	양호
	부극성(-)	불량 9회	양호	양호

하중에서 파괴응력은 자기의 체적이 증가할수록 낮아진다. 이와 같은 현상은 체적이 커짐에 따라 임계조건에서 이들 미소균열의 존재 가능성이 점점 커지기 때문에 나타나며 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma \propto \left(\frac{1}{V}\right)^{1/m} \tag{1}$$

자기의 이론적인 기계적 파괴 응력은 자기를 n 개로 등분하여 구할 수 있다. 부하의 종류에 따른 각 부의 파괴 가능성을 다음과 같은 식을 이용할 수 있다.

평균값

$$\mu = \sigma_0 \left(\frac{1}{V}\right)^{1/m} \cdot T \cdot \Pi\left(\frac{1}{m}\right) \tag{2}$$

표준편차

$$s = \sigma_0 \left(\frac{1}{V}\right)^{1/m} \cdot T \cdot \sqrt{\Pi\left(\frac{2}{m}\right) - \Pi^2\left(\frac{1}{m}\right)} \tag{3}$$

편차계수

$$\frac{s}{\mu} = \frac{\sqrt{\Pi\left(\frac{2}{m}\right) - \Pi^2\left(\frac{1}{m}\right)}}{\Pi\left(\frac{1}{m}\right)} \tag{4}$$

- σ_s : 재료의 강도 계수
- m : 재료의 균일 계수
- V : 응력산출체적
- $\Pi(\cdot)$: 가우스의 II함수
- T : 부하의 종류에 따르는 계수

파괴 응력을 Weibull 확률 이론에 적용하기 위해서는 다음과 같은 전제 조건을 갖추어야 한다.

- 1) 자기 재료 내부에 미세한 결함이 단위 체적 당 일정한 밀도로 무질서한 분산형태로 존재하는 경우
- 2) 하중에 의해 발생하는 응력 분포는 응력 왜형의 관계가 파괴에 도달할 때 까지 후크의 법칙에 따라 직선적인 함수관계를 유지
- 3) 자기 표면에는 압축 시유가 시행되어 있어 외부 표면의 결함이 파괴의 원인이 아닌 경우

자기 애자의 파괴분포에 대해서는 취성파괴이론에 기초로 한 Weibull 분포가 이루어지므로 다음과 같이 파괴확률을 구하여 신뢰성을 평가할 수 있다. 자기 애자에서 발생하는 최대응력 σ_s 에서 파괴를 일으키지 않는 확률을 (1-S)로 두면 식(4)로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\sigma_s}{\mu_1} = \log_e(1-s)^{1/m} \frac{1}{\Pi(\frac{1}{m})} \quad (5)$$

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.

$$\frac{\sigma_s}{\mu_1} = S^{\frac{1}{m}} \frac{1}{\Pi(\frac{1}{m})} \quad (6)$$

식(6)에 따르면 어떤 신뢰도를 갖는 하한 규격치 σ_s 는 평균값 μ_1 의 몇 %를 갖는 것이 적당한지에 따라 결정되는데, 정규 분포를 가지고 관정하는 경우에는 평균치의 μ_1 으로부터 표준편차의 몇 배의 차이를 하한 값으로 하는 것 외에는 나타내기 어렵다. 여러 가지 값의 균일지수 m 에 대하여 신뢰도 99 %, 99.9 %, 99.99 %의 하한 표준값을 결정하기 위한 승수 백분율 α 를 표 7에 나타내었다. () 안의 값은 정규 분포로 판정되는 경우 승수 백분율로 제품의 관리 지수로 사용된다.

균일지수 m 은 자기의 미시적 균일성을 나타내는 지표이다. 따라서 균일지수를 구하기 위해서는 자기의 미시적 결함의 분포를 실험하여 통계적으로

표 7. 신뢰도에 따른 하한 표준값 계산.

Table 7. The calculation of minimal standard data according to reliability.

관리수준	신뢰도[%]	균일지수,m	α [%]
I	99	10	66(71)
		15	76(81)
		20	82(86)
		25	85(88)
II	99.9	5	42(55)
		10	66(70)
		15	65(74)
		20	73(81)
III	99.99	25	78(85)
		10	42(55)
		15	56(69)
		20	65(77)
		25	71(81)

표 8. 측정된 파전파괴하중과 HRB 경도 값.

Table 8. The measured data of electro-mechanical and HRB hardness.

시료	1995년			1997년		
	경년	파전	HRB	경년	파전	HRB
#1	20,980	21,020	119.5	22,960	22,450	120
#2	20,560	19,080	119.5	22,400	22,180	119.4
#3	22,160	22,250	121.5	23,100	22,530	120.2
#4	21,820	19,910	119.5	22,710	21,780	120
#5	22,180	20,750	119	21,450	22,140	119.2
#6	13,680	22,220	120	22,690	22,710	119.5
#7	14,940	14,250	119.6	22,750	19,780	118.4
#8	22,160	15,300	119	22,480	21,640	119.8
#9	18,030	19,070	121.5	21,960	22,420	118.8
#10	22,410	22,710	119.5	23,300	22,240	119.5

시료	2002년		
	경년	파전	HRB
#1	22,760	22,740	119.6
#2	23,240	22,490	121.5
#3	23,460	22,380	121.8
#4	22,710	22,580	122
#5	2,140	22,940	122.1
#6	23,270	21,200	122.2
#7	22,790	22,800	122.3
#8	21,940	23,120	122.1
#9	23,270	21,790	122.8
#10	23,410	22,580	121.3

로 확인할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 HRB(Hardness-Rockwell-Brinell) 경도 시험을 실시하여 균일지수 m 을 계산하였다. 표 8은 각각의 시편에 대한 파전파괴하중과 HRB 경도를 측정 한 값이다.

표 9. HRB 경도 시험에 의한 균일 지수 m 비교.
Table 9. Comparison of equality m by HRB hardness test.

신뢰도[%]	균일 지수 m			
	95년	97년	2002년	NGK
99.9	3.6	6.6	10	24
관리지수 a[%]	31	53	66	75

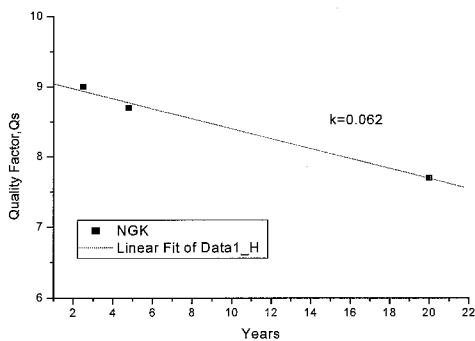


그림 4. 사용 연수에 따른 F-2000(NGK) 제품의 품질 관리 지수 변화.
Fig. 4. Variation of product quality according to using year.

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 9는 외산 제품을 기존 모델로 하여 국산 경년품 및 신제품에 대한 균일지수 m과 관리지수 a를 계산한 결과이다. 품질지수를 근거로 최상의 외산 제품과 비교하면 2002의 경우 관리 저하율이 10% 이상, 1997년 경년품은 20% 이상 그리고 많은 불량 발생을 보이는 1995년 경년품의 경우 40% 이상의 상태를 의미한다.

수명을 예측하기 위해서는 초기 성능 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 4와 같다.

사용 연수에 따른 F-2000 제품의 품질 관리 지수 변화율 k는 다음식과 같다.

표 10. 초기 품질관리지수와 현재 품질관리지수의 비교.

Table 10. Comparison between start quality and present quality.

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

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

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 9의 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 알아보았으며 그 결과를 표 10에 나타내었다.

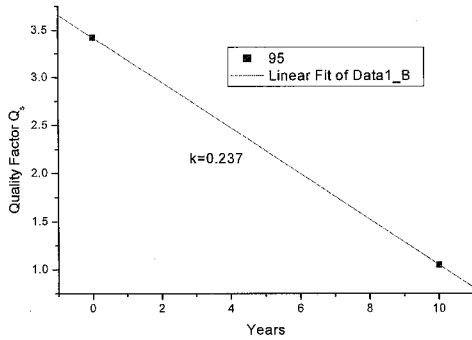
본 연구에서는 불량률은 애자 소지의 균일도와 연관이 있으므로 품질 지수와 균일도의 상관성을 고려한 경년 수명을 통계적으로 계산하여 예측하고자 하였다. 그림 5는 1995년 및 1997년 경년품에 대한 품질 지수 저하 자료를 가지고 변화 지수 k를 구한 것이다.

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

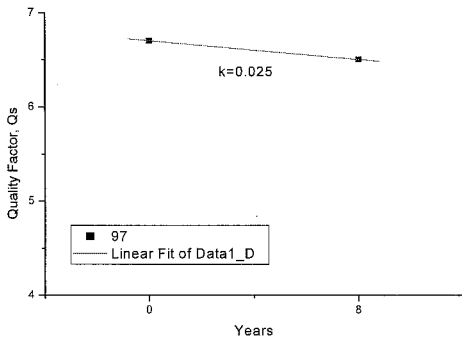
식(8)에서 구한 잔존수명의 값을 사용하여 사용 연수에 따른 애자 제품의 잔존 신뢰 수명 Y_m 은 다음 식으로 정의하며, β 는 애자의 불량 관리 지수율 (α /NGK)을 나타낸다.

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

일반적인 방법으로 '95년도 및 '97년도 경년품과 2002년 신제품을 비교하여 계산한 결과를 표 11에 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 도출할 수 있다. 여기서 앞에서 언급한 자기의 제품 상태를 정의하는 균일 지수 m을 고려하여 수명 평가에 반영할 필요가 있다. NGK 제품의 경우 m(24), a(75%)



(a) D-1995년(1995년에 생산한 예자)



(b) D-1997년(1997년에 생산한 예자)

그림 5. 1995년, 1997년도 경년품의 경년 변화율.
Fig. 5. The aged variation of produced 1995, 1997 insulator.

상태에서 $k=0.062$ 를 유지한다면, 국산 1995년 경년 제품의 경우 $m(3.6)$, $\alpha(31\%)$ 로 하한 규격치(불량율)는 약 2.4배나 높다. 결국 잔존 수명은 식(8)과 같이 균일지수를 고려한 방법으로 계산하는 것이 필요하다. 결국 1995년 경년품의 경우 불량 품질 지수를 1.0과 3.0으로 하고 불량 저하 지수 k 를 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 예자는 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 11. 균일 지수로 계산한 경년 및 신품 예자의 수명 비교.

Table 11. Durability comparison between used insulator and new insulator by calculation of equality m .

신뢰도[%]	99.9 % 신뢰도			
	D-1995 년	D-1997 년	D-2002 년	F-2000
Q_M	3.4	6.7	7.89	-
Q_A	1.1	6.5	10.35	-
불량 Q_a	1-3	3	3	3
균일 지수 m	3.6	6.6	10	24
불량관리지수 α [%]	31	53	66	75
$\beta(\alpha/NGK)$	0.41	0.70	0.88	1
수명저하지수 k	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

4. 결론

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

1. D-1995 시료의 물리적 특성이 D-1997 및 D-2002 시료보다는 전반적으로 약 10 % 정도 낮은 것으로 나타났다. 즉 배합비율에 따른 최적의 조성조건에서 제품을 생산하지 못해 발생한 결과이다.
2. 경년변화시험, 과전과피하중시험, HRB 경도 값에 대한 Weibull 분포 함수를 적용한 결과 상당한 연관성을 있는 것을 확인하였다. 특히 열적응력을 배제하고 시험하는 과전과피하중 시험데이터에 대한 plot 결과는 대수좌표의 선형적 특성에 잘 맞는 것으로 나타났다.
3. 경년품 및 신품의 품질지수, 예자 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 k 를 0.0237로 하여 균일지수가 고려된 잔존 신뢰 수명 Y_m 은 각각 4년과 0.7년이 남은 것으로 계산되었다.

참고 문헌

- [1] “2000년 송전설비 고장분석 및 대책자료”, 1999년-2000년 통계 자료, 한국전력공사.
- [2] “송전용 현수애자의 성능확인 및 특성시험 분석”, 연구기획조사사업, 한국전력공사, 전력연구원, 1999.
- [3] “250 mm 볼소켓형 현수애자”, ES 131-540~543, 한전 구매시방서, 1995.
- [4] K. Niihara, R. Morena, and D. P. H. Hasselman, “Evaluation of KIC of brittle solids by the indentation method with low cracks-to-indent ratio”, J. Mater. Sci. Lett., Vol. 1, p. 13, 1982.
- [5] “초고압(400 kN)용 내장애자 국산화 개발”, 한국전력공사, 고려애자공업(주), 최종보고서, 2002.
- [6] 최인혁, 최장현, 이동일, 최연규, “송전용 자기재 현수애자의 원료변화에 따른 특성 연구”, 전기전자재료학회논문지, 17권, 4호, p. 390, 2004.
- [7] “고신뢰성 자기재 배전용 현수애자 개발”, 한국전력공사, 한국전기연구소, 최종보고서, 1996.
- [8] “송전용 애자의 신뢰성 평가 연구”, 한국전력공사, 전력연구원, 2006.
- [9] 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, 1982.
- [10] 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, 1999.
- [11] “자기 애자 애관의 파괴 강도에 대하여”, NGK Review 30, 1970.
- [12] “절연 열화 진단 기술”, 일본전기평론, p. 52, 1990.
- [13] “がいし”, 日本電氣學會, p. 87, 1984.