懸垂碍子의 經年變化 特性에 관한 硏究

(A study on the aging characteristics of Suspension insulators)

宋一根* · 金相俊** · 金周勇*** · 郭熙魯****
(Il-Keun Song · San-Joon Kim · Ju-Yong Kim · Hee-Ro Kwak)

要 約

본 논문에서는 현수애자의 경년변화 분석을 위해 과전파괴 시험과 장기강도 기계적 하중시험을 신품과 사용품에 대하여 비교, 시험하였다. 현수애자의 경년변화에 따라 애자표면 온도가 대기보다 약 2[℃] 상승에서 약 7~8[℃] 상승이 발생하였고, 접착제로 사용한 포틀랜드 시멘트의 오토크래브 팽창율도 경년변화 사고가 많은 시료(오토크래브 팽창율의 측정치 : 0.37[%])가 사고가 적은 시료(오토크래브 팽창율 : 0.1[%])보다 높게 나타났다. 또한, 신품보다 사용품의 품질관리지수 Qs와 인장강도가 현저히 저하됨을 알수 있어, 우리나라의 기후조건에 맞도록 경년변화 시험 기준 개정도 요구된다.

Abstract

This paper describes thermal-mechanical performance and ultimate mechanical-strength test for the purpose of aging analysis of suspension insulator. The temperature of insulator surface according to the aging of suspension insulator was rised about 2[℃] to 7~8[℃] difference comparing with the atmospheric temperature.

The autoclave expansion of portland cement at the specimen that had much puncture insulator(autoclave measuring value : 0.37[%]) was higher than those of a little puncture insulator (autoclave measuring value : 0.1[%]). Quality standard and mechanical-strength of used suspension insulator deteriorate more remarkably than those of new suspension insulator.

It is required that thermal-mechanical performance test standard be revised in the future.

1. 서 론

우리나라의 배전용 현수애자는 단기간의 경년변화에 의해서 사고가 발생하는 유형이 대부분이며,이중 내부절연 파괴와 몸체및 날개의 파손사고 유형이 주로 차지하고 있다. [1]

원칙적으로 품질관리가 잘된 자기제 애자의 수명은 반영구적으로 사용되어 져야 하나, 실계통

*正會員 : 電力硏究院 電力系統硏究室 先任硏究員
**正會員 : 電力硏究院 電力系統硏究室 責任硏究員
***正會員 : 電力硏究院 電力系統硏究室 一般硏究員
****正會員 : 崇實大 工大 電氣工學科 敎授
接受日字 : 1996年 5月 20日

에서 약 5~10년 정도 사용 후 단기 경년열화 사고가 빈번히 발생하고 있는 실정이다.[2] 이러한 사고들을 유발시킬 수 있는 열화요인들은 자기의 흡습, 애자 각부의 열팽창 차이, 시멘트의 팽창과 수축, 자기의 내재결함, 편열 파괴 및 금구의 부식 등을 들 수 있다.[3]

또한 설계와 제조공정이 적절하다고 하여도 현수애자가 사용 중 경년에 따라 인장강도가 저하하고 두부에 균열이 발생하며, 전기적 절연이 저하하는 원인에 대하여 명확하게 설명되지 못하고 있다.[4], [5]

한편, 열화의 요인들을 두 가지로 크게 대별하면 자기강도가 낮아져 사용중의 스트레스에 의해 발생하는 정적피로이고, 사용환경에 따른 과대응력에 의해서 발생하는 자기열화로 구별할 수 있다.

전자는 주로 재질과 제조면에 의한 열화 요인이고, 후자는 설계면에 원인이 있는 것으로 추측할 수 있다.[6], [7]

따라서 이러한 단기간의 경년변화들을 종합적으로 평가하고 검사 할 수 있는 IEC 575 시험방법은 우리나라의 기후적 조건과 품질관리지수 등을 고려하여 새로운 경년변화시험 규격(안)을 제정하여야 하며, 새로운 시험 규격(안)을 기준으로 하여 국내외 시료의 품질관리지수, 애자의 표면온도 측정, 및 과전파괴시험 등 경년변화 특성을 시험, 분석하였다.

2. 장기강도 성능검증 시험

장기간 현장 사용시 과전 상태에서 기계적 인장강도 성능의 유무를 평가하기 위한 시험방법이며, 1977년 형식 시험법으로 기계적 반복하중에 온도주기를 중첩시킨 thermal-mechanical performance test가 IEC 575로 제정되어 각국의 전력회사에서 채택 사용해 오고 있다.[11], [12] 이 시험방법은 필요 최저한의 장기성능의 유무를 평가하는 방법으로써 유효하고, 현재의 경년변화시험 기준은 1977년에 제정된 시험 기준으로 그림 1과 같이 실시해 오고 있다.

그러나 그 나라의 기후조건과 환경변화 등을 고려할 때 보다 신뢰성이 높은 우수한 애자를 선별한다든지, 아니면 우리나라와 같이 단기간의 경년변화 사고가 광범위하게 발생할 경우에는 보다 더 가혹한 시험방법이 모색되어야 한다.[8], [9]

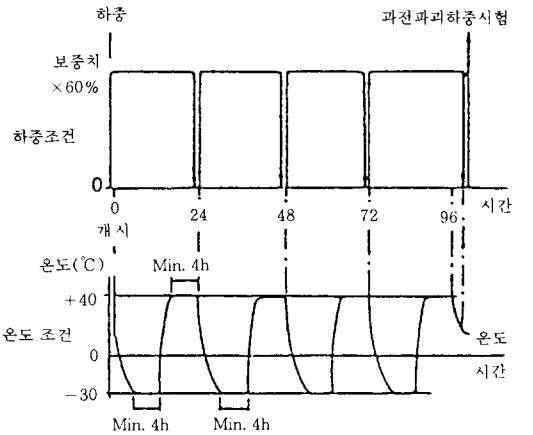
한편 선진외국의 시험방법의 골격은 IEC 575와 같으나 그 나라의 기후조건에 따라 시험조건이 다르며, 특히 기계적 하중치와 하중시간, 온도변화의 범위와 시간, 그리고 반복 하중횟수 등을 다르게 정하여 적용하고 있다.[14]

각국의 온도, 기계 하중시험 비교는 표 1과 같다.

2.1 품질관리지수(Quality standard)

IEC 591 규격에서는 운영특성곡선(operating characteristic curve, 약칭 OC곡선)에 대하여 납품 lot의 질은 결함율로 사정하며, 시료에서 예측하고 합의된 확률에 의해 결정한다고 언급하고 있다.[14] 운영특성 곡선은 그림 2와 같다. 좌표의 가로축에 결함율을, 세로축에 합의된 확률을 표시하여 운영특성 곡선을 작성하며, 생산자는 위험 부담율(α)을 5[%]로 주장하나 소비자는 위험부담율(β)을 10[%]로 주장하고 있다.

소비자의 위험부담율 β=10[%]일때의 결함율은 IEC 383(A곡선)에서 20.6[%] ANSI C29.2 (B곡선)에서 21.4[%]이나 Qs=3.0(C곡선, 속



· R−1.58S≧Rs(N=10)
· Ri≧Rs

그림 1. 경년변화시험 기준
Fig. 1 The aging test criteria

칭 3-sigma method)에서는 2.3[%]로 소비자의 위험부담율이 현저하게 줄고 있다. 그러나 생산자가 주장하는 위험부담율 α=5[%]에서는 결함율이 A곡선 0.5[%], B곡선 4.2[%], C곡선 0.1[%]로 나타나고 있고, IEC 383(A곡선)은 고품질의 평가방법으로 기대하기는 어렵다.

한편 외국의 규격을 보더라도 대부분의 나라에서 IEC 383을 기준으로 하되, 자국의 기후조건을 고려한 온도범위 설정과 품질관리지수 Qs=3.0이상을 채택하고 있다.[2]

2.2 애자의 표면온도 분석

우리나라의 온도특성을 분석하여 본 결과 1961년부터 최근까지 남한의 최저 온도는 −32[℃]이고, 여름철 최고 온도는 40[℃]까지 올라간 기록이 있으며, 최근에는 39.4[℃]까지 기록된 적이 있다.[16]

또한 애자의 표면온도를 제조회사별로 실측하여 분석하였으며, 애자 표면 온도 측정 설치도는 그림 3과 같다. 온도측정 지상고는 실계통의 전주 높이를 고려하여 지표상 13[m] 상공에 애자를 설치하여 무전압 상태에서 압전 온도센서를 애자표면에 부착하였으며, 풍향과 제조회사별 위치를 고려하여 설치 위치를 번갈아 가면서 아날로그 측정설비로 지속적으로 측정하였다.

시료는 신품과 사용품을 측정하였으며, 신품은 제조회사별로 비교 측정하였다. 이때 신품시료는 제조회사별 각 1개씩(총3개)실측하였으며, 내부 절연파괴 사고가 가장 많은 제조회사의 시료가 애자표면 온도가 제일 높은 7~8[℃] 상승하였고, 사고율이 다음으로 높은 시료가 약 5[℃] 정도 차이가 있었다. 그러나 내부 절연파괴 사고가 전혀 없는 제조회사의 시료는 온도 상승이 약 3~4[℃]정도에 지나지 않았다. 사용품의 시료는 전체적으로 볼때 신품 애자의 표면 온도보다 약 2[℃] 정도의 차이가 나타났으며, 이는 장기간의

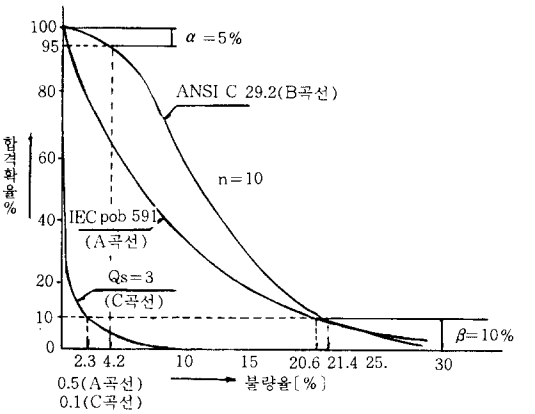


그림 2. 운영특성곡선
Fig. 2. The operating characteristic curve

표 1. 온도−기계 하중시험 비교
Table 1. Thermal-mechanical performance test comparison

전력회사 표준규격	국 명	시 험 조 건	판 정
IEC 575	−	온도 : −30[℃]~+40[℃] 기계적하중 : 60[%](과전파괴치의) 온도주기 : 4주기(냉, 열 각4시간) 하중주기 : 4주기(24시간) 시험계속시간 : 96시간	○ $R-1.58S \geq Rs(N=10)$ R : 측정치의 평균치 Rs : 규정과전 파괴하중치 S : 표준편차 N : 시료수 K : 허용정수, N=10일때 1.58 Qs : 품질관리자수, $Qs=(R-R_S)/S=K$
ES	한국	IEC 규격과 같음	○ $R-1.58S \geq R_S(N=10)$ ○ $Ri \geq Rs$, Ri : 개별측정치
SCECO SOUTH	사우디아라비아	IEC 규격과 같음	○ $R-5S \geq Rs(N=10)$
카나다표준 규격	카나다	온도 : −50[℃]~+50[℃] 기계적하중 : 70[%](과전파괴치의) 기타 : IEC 규격과 같음	○ $R-3S \geq Rs$ ○ $Ri \geq Rs$

사용에 따라 경년변화가 더욱 더 심하게 나타난 것을 알 수 있다. 온도측정 결과는 그림 4와 같다.

특히 우리나라와 같이 단기간 사용 후의 경년변화 사고가 많이 발생하고 있는 점으로 볼 때, 기계적 반복하중에 온도주기, 기후조건 및 환경조건 등을 고려하여 애자의 장기강도 성능을 검증할 필요성이 대두되고 있다.

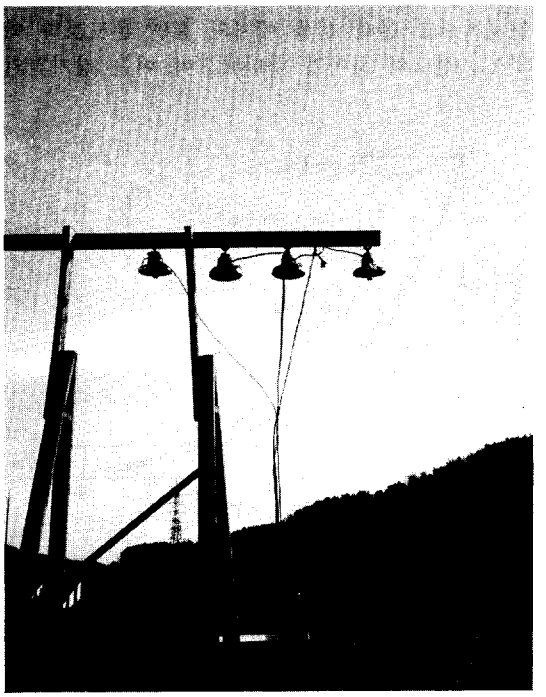


그림 3. 애자표면온도 측정 설치도
Fig. 3. The measuring equipment of insulator surface temperature

3. 실험장치 및 실험방법

현수애자의 단기 기계적강도를 검증하고, 장기사용 상태하에서의 경년변화를 검증하기 위해서는 기계적 반복하중에 온도주기를 중첩시킨 IEC 575 규격에 그 나라의 여러조건을 고려하여 시험하도록 규정되어 있다. [14]

이 시험 방법은 −30〔℃〕 상태로 4시간을 챔버내에서 유지한 후 8시간 동안 서서히 40〔℃〕로 상승하여 그 상태로 4시간을 유지하며, 총 96시간 기계적 반복하중에 온도주기 −30〔℃〕, +40〔℃〕를 각 4시간을 한 주기로 중첩한 온도−기계적 성능 시험법이다.

시험품의 두 쇠붙이 사이에 규정의 과전파괴 하중치의 60〔%〕 인장하중을 축심 방향으로 인가하고, 냉열순으로 24시간을 1주기로 96시간 수행하였다. 이때 시험설비가 유지해야 할 온도와 시간은 저온에서는 −30±5〔℃〕, 고온에서는 +40±5〔℃〕로 각각 4시간 이상이어야 하며, 시

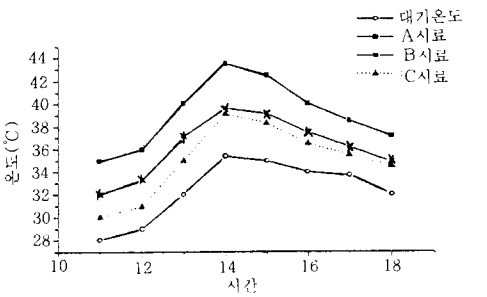


그림 4. 애자표면 온도측정 결과치
Fig. 4. Results value of measuring temperature in surface insulator

표 2. 품질관리 규격비교
Table 2. Quality standard comparison

규 격	합 격 조 건	비 고
IEC 383(A곡선)	R−1.58S≧Rs(N=10) Ri≧Rs	Ri : 개개의 과전파괴 하중치 Rs : 규정 과전파괴 하중치 R : 개개 과전파괴 하중치의 평균치 S : 표준편차 S : 평균 표준편차(ANSI규격에서 생산자가 제시) N : 시료수 Qs : 품질관리지수 Qs : (R=Rs)/S≧K K : 허용정수
ANSI C29.2(B곡선)	R−1.2S≧Rs S≧1.72S(N=10)	
Qs=3.0(C곡선)	R−3S≧Rs Ri≧Rs	

험장치는 국내 K사 제품을 사용하였고, 경년변화 시험장치는 그림 5와 같다.

열 초기에는 실온상태이어야 하고, 최종과정을 제외 한 매회 가열과정의 종료시점에서 인장하중을 완전히 제거하여 당일 과전파괴 하중시험을 실시하였다. 과전파괴 하중시험이 끝난 시료의 시험 결과는 다음 식의 품질관리 지수〔Quality standard : 약칭 Qs〕가 소정의 합격판정 계수 이상이면, 합격으로 평가한다.

$$Qs=\frac{(\bar{R}-R_s)}{S}\geq K \cdots\cdots (1)$$

여기서, Qs : 품질관리지수

$\bar{R}$: 측정치의 평균치〔$\frac{R_1+R_2+\cdots+R_n}{n}$〕

R_s : 규정의 과전파괴 하중치

S : 표준편차

$$\sqrt{\frac{(R_1-R_s)^2+(R_2-R_s)^2+\cdots+(R_n-R_s)^2}{n-1}}$$

K : 허용정수 (n=5일때, 1.4, n=10일때 1.58)

품질관리지수는 각 시료(총10개)의 과전파괴 하중치 편차가 적을수록, 또한 개개의 하중치가 7,000〔kg〕 보다 클수록 크게 나타나기 때문에, 애자의 품질과 경년변화 특성, 인장강도 및 제조

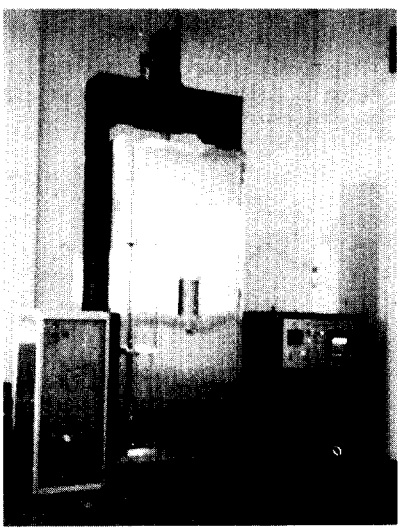


그림 5. 경년변화 시험장치
Fig. 5. The aging test equipment

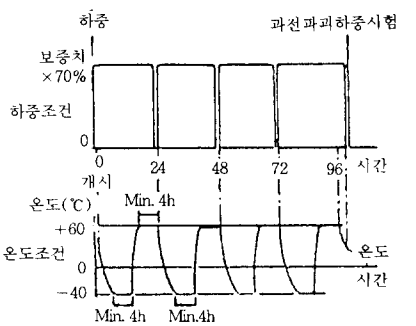
결함 등을 종합적으로 비교, 분석할 수 있는 검사지표 중의 하나이다.

이때 R_s의 인장하중치는 현 ES(한전 표준규격)규격의 7,000〔kg〕을 적용하였다. 한편 1962년 AEP(American electric power service corp.)의 Zobel씨가 electrical world지에 발표한 것에 의하면 사용한 현수애자의 과전파괴 강도는 실계통 사용 후 2~3년에 10〔%〕 이상의 강도저하, 수년이 경과하면 강도가 20~30〔%〕 저하하고, 경년열화의 애자파괴 부위는 거의 모두가 자기두부로 밝혀졌다. 또한 자기강도가 큰 애자는 경년변화로 인한 강도 저하가 거의 없고 신품 애자의 강도와 비슷하게 나타난 것으로 보고 되고 있다.[4].

특히 사용품의 애자사고 부위가 자기두부로써 우리나라의 단기 경년변화사고와 매우 유사하며, 과전파괴강도 저하도 비슷한 감소 결과를 나타냈다.

경년변화 시험이 종합적인 검수시험법으로써 어느 정도는 IEC 575 규격에 의해서 가능하며, 본 연구에서는 장기사용 상태하에서의 경년변화를 검증하기 위하여, 제작소별 신품과 사용품에 대하여 경년변화 시험과 과전파괴 하중시험을 실시하였다. 신품 시료는 제작년도가 '93~'95년도에 제작한 시료이며, 사용품은 제작년도가 '81~'90년도에 제작한 시료가 주류를 이루었다.

따라서 본 고에서는 우리나라의 실정에 맞는 ES 131-537 규격 개정(안)으로 비교, 실험하여 분석하였다.



· R-3S≧Rs(N=10)
· Ri≧Rs

그림 6. 새로운 경년변화시험 기준
Fig. 6. The new criteria of aging test

개정(안)의 기준은 IEC 575 규격과 동일하나 시험설비가 유지해야 할 온도와 시간은 저온에서는 −35±5[℃], 고온에서는 +60±5[℃]로 각각 4시간 이상이어야 하며, 과전파괴하중치는 인장하중치의 7,000[kg]의 70[%]를 적용하였다.

이때 품질관리지수 1.58은 우리나라의 환경여건에 맞는 3.0을 적용시켜서 신품시료와 사용품의 시료를 비교, 실험하였다.

5. 실험결과 및 고찰

현수애자의 설계와 제조공정이 적절하다고 하여도 사용 중 경년에 따라 인장강도가 저하하고, 두부에 균열이 발생하며, 전기적 절연이 저하하는 원인규명 시험법의 완벽한 검수시험 방법은 아직까지 개발되지 못하고 있다.

그림 7은 제작소별 신품에 대한 경년변화 시험 결과이고, 그림 8은 제작소별 사용품에 대한 경년변화 시험 결과치이다.

시험 결과 실계통 사용 후의 인장강도가 현저히 저하한 것을 알 수 있으며, 경년에 따라 품질관리지수 Qs도 시험 기준치 3.0보다 그 이하로 떨어진 시료도 나타났다.

그림 9는 제작소별 신품에 대한 과전파괴 시험결과이고, 그림 10은 제작소별 사용품에 대한 과전파괴 시험 결과치이다.

과전파괴 시험 결과도 경년변화 시험 결과와 마찬가지로 경년에 따라 인장강도와 품질관리지수 Qs가 떨어진 것을 알 수 있다.

결과적으로 현수애자는 실 계통 사용 후 인장강도와 품질관리지수가 저하하기 때문에 신품 애자에 대하여 검수시험 기준과 시험방법이 절대적으로 중요하다. 본 연구의 시험 결과 현수애자의

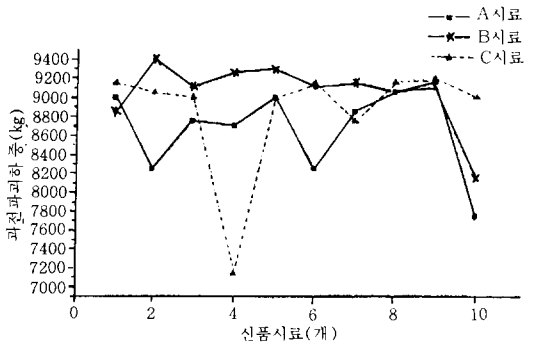


그림 7. 제작소별 신품에 대한 경년변화시험 결과
Fig. 7. Result of thermal-mechanical test per new insulator

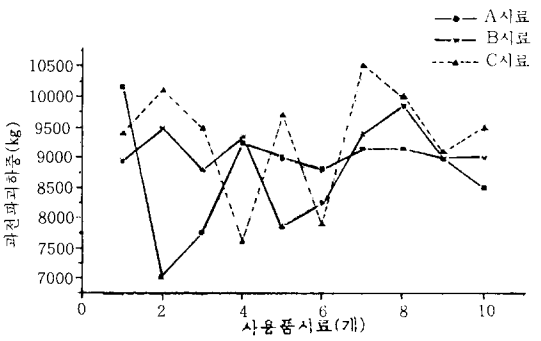


그림 8. 제작소별 사용품에 대한 경년변화시험 결과
Fig. 8. Result of thermal-mechanical test per used insulator

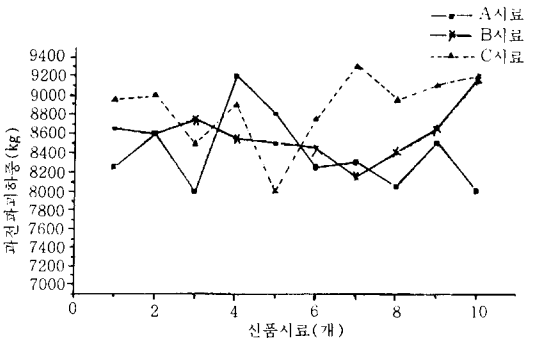


그림 9. 제작소별 신품에 대한 과전파괴시험 결과
Fig. 9. Result of ultimate mechanical-strength test per new insulator

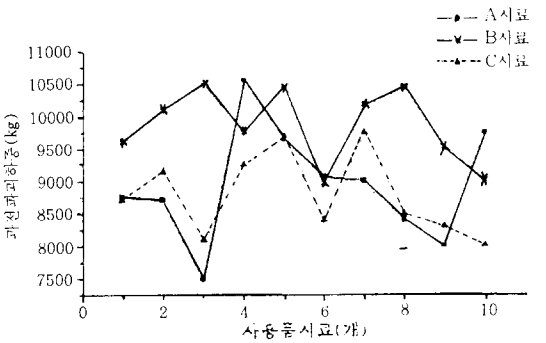


그림 10. 제작소별 철거품에 대한 과전파괴시험 결과
Fig. 10. Result of ultimate mechanical-strength test per used insulator

파괴부위를 분석하여보면 A사의 시료는 전량 자기두부에서 weak point가 발생하였고, B사의 시료는 핀에서 가장 먼저 사고가 발생하였으며, C사의 시료는 캡의 감합부에서 파괴되었다.

특히 파괴부위가 자기 두부에서 발생된 시료는 현수애자의 자기강도가 핀이나 캡보다 약하고, 시멘트의 접착 특성과도 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 현수애자의 구성은 자기부, 시멘트 및 전극(철)으로 구성되어 있기 때문에, 열팽창계수의 차이로 인한 시멘트의 수축, 팽창으로 자기부에 국부적인 선단하중을 주게 되어서, 결국에는 자기가 균열을 일으키거나 기계적인 인장강도가 저하하는 원인으로 분석되었다. 파괴부위가 자기두부에서 발생된 시료의 시멘트 오토크래브 팽창율 시험결과 0.37[%]이나, 파괴부위가 핀에서 발생된 시료의 시멘트 오토크래브 팽창율은 0.1[%]이었다.

한편 애자용 시멘트의 오토크래브의 팽창율 국제 규격은 0.12[%] 미만으로 제시되어 있으며, 시멘트의 오토크래브 팽창율 측정값이 크면 클수록 경년변화에 의한 열화사고 가능성이 클 것으로 예측되었다.

결과적으로 경년변화에 영향을 미치는 중요한 요인들은 제조상의 결함에 의한 자기강도 부족과 이종 물질과의 열팽창계수 차이로 인한 과대응력 집중 및 경년변화 규격 기준이 완화되어 있어서 제조 후 검수시험에는 시험에 통과되지만 단기간에 경년변화가 빨리 도래되고 있다는 점이 고찰되었다.

5. 결 론

현수애자의 사용 중 경년변화에 의한 사고 감소를 위해서는 다음과 같이 시험규격을 개정하여야 하며, 규격개정(안)으로 실험한 결과는 아래와같이 요약할 수 있다.

1) 경년변화 시험기준은 IEC 575 규격과 동일하나, 과전파괴 하중치는 인장하중치의 7,000[kg]의 70[%], 최저온도 기준은 −35±5[℃], 최대온도 기준은 60±5[℃], 품질관리지수 1.58은 우리나라의 환경여건에 맞는 3.0으로 개정하여야 한다.

2) 애자의 표면온도 측정결과 내부절연 파괴가 많은 시료는 대기온도 보다 약 7~8[℃] 상승하였고, 경년변화 사고가 적은 시료는 약 2~3[℃]상승하였다.

3) 시멘트의 오토크래브 팽창율은 내부 절연파괴가 많은 시료가 0.37[%], 사고율이 적은 시료는 0.1[%]를 나타내 접착제로 사용된 시멘트의 팽창율이 열화사고 요인과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

4) 과전파괴 시험결과 신품 시료의 Qs가 3.6, 6.11, 4.93이나, 사용품의 시료의 Qs값은 2.16, 4.95, 2.77로 나타났으며, 경년변화 시험결과와 마찬가지로 실계통 사용 후 기계적 인장강도가 저하한 것으로 나타났다.

5) 경년변화 시험결과 신품 시료의 Qs는 3.71, 5.87, 3.02이며, 사용품 시료의 Qs값은 1.96, 3.35, 2.51로 나타나, 약 5~7년 사용후 인장강도가 현저히 저하 한 것을 알 수 있었다.

6) 실계통 사용 후 현격히 기계적강도가 저하하였으며, 품질관리지수 Qs도 경년에 따라 기준치 3.0이하로 나타난 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1) 곽희로, 송일근, "뇌 임펄스를 이용한 현수애자의 내부결함 검출," 한국조명·전기설비학회 논문지, Vol. 40, No.12, 1995.12.

2) 박구범 외, "배전용 애자류 품질확보를 위한 경년시험방법에 관한 연구,"의 최종연구보고서, 전력연구원, 1996. 2.

3) 鬼頭, "標準懸垂碍子課電破壞強度の經年特性," 昭知40年連合大會論文集,

4) E.S. Zobel, "Insulators lose strenght with age," Electrical World, pp.40,

5) 有動, "衝擊電壓による懸垂碍子の破壞現象とその防止法, 電氣學會雜誌," Vol. 83, No. 892

6) 森田, "碍子の耐震設計," 碍子レビコ-, No. 36, pp. 17, 1981

7) I.L.Song, H.R. Kwak, "Characteristic analysis of electric field for suspension insulator using an optimization technique with FEM," ISEM, U.K., 1995

8) "碍子の耐アーワ性能," 電氣協同硏究, 第17卷 第2號

9) 박종화 "23kv 배전용애자의 내아크 특성에 관한 연구," 전기통신, 1984

10) IEC doc. 42(S)98, "High voltage testing technique,

Part 2 : Measuring systems," 1993
11) CAN/CSA－C411.1-M89 AC Suspension Insulators, "A National Standard of Canada"
12) AS 2947.1-1989, "Insulators-Porcelain and glass for overhead power lines-Voltage greater than 1,000V a.c. Part 1 : Test Methos Austrian Standard"
13. ANSI C29.9, "Wet-process porcelain and toughened glass-suspension type," 1992
14) "Recommended practice for the preparation of test procedures for the thermal evaluation of insulation systems for electric equipment", IEEE,1990
15) TN-87107 Rev.1, "Electro-Mechanical failing load test," NGK LTD, 1994
16) 한국 기후표(1961～1990 월별 평균값), 기상청, 1991

◇ 著 者 紹 介 ◇

송 일 근(宋一根)

1961年 3月 3日生. 1984年 崇實大 工大 電氣工學科 卒. 1986年 同 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 現在 同 大學院 電氣工學科 博士修了. 電力研究院 電力系統研究室 先任研究員.

김 상 준(金相俊)

1951年 2月 7日生. 1986年 서울産業大 工大 電氣工學科 卒. 1987年 發送配電 電氣技術士. 1991年 서울大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 現在 電力研究院 電力系統研究室 配電自動化 그룹장 / 責任研究員.

김 주 용(金周勇)

1969年 9月 27日生. 1992年 慶北大 工大 電氣工學科 卒. 1994年 同 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 現在 電力研究院 電力系統研究室 勤務.

곽 희 로(郭熙魯)

1942年 3月 1日生. 1967年 서울工大 電氣工學科 卒. 1978年 호주 New South Wales 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1986年 中央大 大學院 電氣工學科 卒(博士). 1967年 韓電勤務. 1986年 美國 M.I.T Visiting Scientist. 現在 崇實大學校 工大 學長, 電氣工學科 敎授, 當學會 副會長.