

A Study on the Performance Evaluation of Transmission Suspension Insulators

宋 一 根* · 金 燦 泳*

(Il Keun Song · Chan Young Kim)

Abstract - This paper presents the results of performance confirmation tests for domestic 20 [Ton] transmission suspension insulators which will be widely utilized in transmission lines. The new test methods such as power arc test, steep-front-of-wave flashover voltage test, and etc. which have been only utilized for the distribution insulators were applied in transmission suspension insulators. The properties of metal and cement used in the 20 [Ton] transmission insulators were also evaluated by the various analysis techniques. Based on the results, we evaluated the performance of the transmission suspension insulators.

Key Words : Transmission Suspension Insulator, Porcelain, Cement, Power arc test, Steep-front-of-wave flashover test

1. 서 론

우리나라에서 사용중인 자기재 송전용 현수애자는 154 [kV]급에서는 국산과 외산을 혼용하여 운용 중에 있고, 345 [kV]급에서는 일부 시사용에 국산을, 765 [kV]급에서는 전량 수입하여 사용하고 있다.

그러나 1999년도에 345 [kV]급 일부 규격의 국산 송전용 현수애자가 개발시험에 합격되어 향후 확대 적용이 예상되고 있다. 현재까지의 현장 적용 현황은 국산애자가 경년열화에 의한 단기 고장이 주로 발생되고 있는 반면, 외산애자는 수명이 반 영구적이고 고장 점유율이 아주 미미한 편이다.

1983년 국산 자기재 송전용 현수애자가 개발되고 실계통에 운용된 이래로 애자 고장으로 인한 송전선로의 고장 점유율이 높은 편이고, 1999년 말 기준으로 볼 때 전력설비 중 2순위를 차지하고 있는 실정이다.

현재까지 개발시험을 완료하였거나 또는 실계통에 사용중인 국산 자기재 송전용 현수애자는 12 [Ton], 16 [Ton], 20 [Ton] 규격이 있으며, 20 [Ton] 규격의 국산애자는 성능을 평가한 후 확대 적용여부를 결정해야 할 시점이다[1].

따라서 국내에서 사용되는 자기재 송전용 현수애자에 대한 성능 평가가 필요하며 송전용 현수애자의 전기적, 기계적, 재료적 특성 연구가 필요하고, 또 현수애자 내부결함의 내재원인을 분석하여 국산애자의 품질향상 기준평가도 필요하다[2].

본 논문에서는 확대 사용예정인 자기재 20 [Ton] 규격의

송전용 현수애자에 대하여 내아크시험과 급준파전압시험으로 전기·기계적 성능을 평가하였다[3]. 내아크시험은 섬락이 발생하였을 경우에 열적 내구성을 확인하고, 급준파전압시험은 낙뢰와 같은 급준파 전압이 인가되었을 경우에 캡 내부의 기계적 강도를 확인하기 위한 시험방법으로써 IEEE1024 Class CI-4에서 제시되었고, 국내 배전용 현수애자의 시험방법으로 채택되어 사용되어 왔으나, 송전용 현수애자의 특성 시험방법으로는 본 연구에서 처음으로 소개되었다. 또한 시멘트와 금구에 대한 기계적·재료적 특성분석을 통하여 애자의 성능을 간접적으로 평가하였으며, 전기적 시험 후 특성이 낮은 애자는 정밀 분석하여 성능향상 대책을 제시하여, 고품질 송전용 현수애자가 생산될 수 있도록 하였다.

2. 시험방법

자기재 송전용 현수애자의 내부결함 검출 및 결함원인을 분석하기 위하여 애자에 대한 내아크시험, 급준파전압시험, 경년변화시험, 과전파괴시험 등을 시험하였고, 핀에 대한 인장시험과 자기와 금구를 접촉하고 있는 포틀랜드 시멘트의 물리적·화학적 특성을 평가하였으며, 전기적 시험에서 파손된 애자에 대하여 정밀분석을 실시하였다.

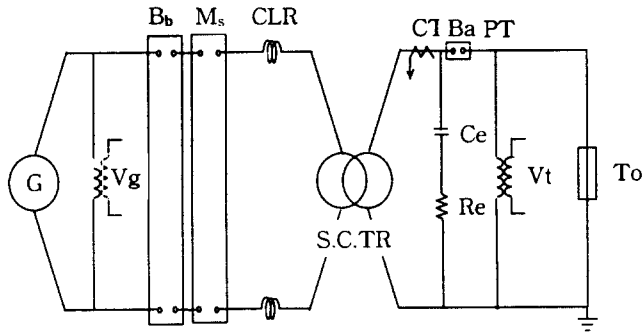
2.1 내아크시험

낙뢰 등으로 인하여 충분히 큰 전류가 유입될 경우에 애자는 손상을 입을 수 있고, 특히 소결상태가 불량하거나 결함이 존재할 경우는 파손될 수도 있다. 이와 같이 섬락전류에 의한 송전용 현수애자의 내구성을 확인하기 위하여 내아크시험을 하였다.

* 正 會 員 : 韓電電力研究院 電力系統研究室 前任研究員 · 工博
 接受日字 : 1999年 12月 22日
 最終完了 : 2000年 6月 17日

가. 시험방법

그림 1에 내아크시험 회로도도를 나타냈다. 직경 0.127 [mm]의 구리단락 퓨즈선으로 애자 양단에 최초 섬락을 발생시켜, 이 섬락이 3 ~ 6 [cycle] 동안 지속할 수 있도록 섬락전류를 인가하였고, 시험전류는 45 ~ 65 [Hz]의 단상교류 전류로써 초기 비대칭분은 30 [%]를 초과하지 않도록 하였다.



- G : Shot Circuit Generator
- Ba : Auxiliary Circuit Breaker
- Bb : Back up Breaker
- To : Test Object
- Ms : Making(closing) switch
- Vg : Generator Voltage
- CLR : Current Limiting Reactor
- Vt : Test Voltage
- S.C. TR : Short Circuit Transformer
- CT : Current Transformer
- PT : Potential Transformer

그림 1 내아크시험 회로도

Fig. 1 Circuit diagram for power arc test

나. 시험조건

시험용 시료는 A사, B사 2종류를 사용하였으며, 송전용 현수애자에 대한 시험규격 기준이 없어 배전용 현수애자 기준(ES 131)을 근거로 송전계통의 고장전류 및 차단시간을 고려하여 150 [kA · Cycle]로 시험하였다. 표 1에 시료의 제원 및 시험조건을 나타냈다.

표 1 시료제원 및 시험조건

Table 1 Specifications and test condition for samples

제원 및 조건 제작사	시료제원		시험조건		
	과전과피강도 [Ton]	인장력[kN] (E-M강도×0.2)	고장전류 [kA]	정격차단시간 [Hz]	에너지 [kA · Cycle]
A사, B사	20	42	30	5	150

2.2 급준파전압시험

이 시험은 대기 중에서 현수애자에 뇌 임펄스 과전압이 인가 되었을 때 자기부 절연과피(내부 절연과피, 관통과피 등) 유무를 확인하는 시험방법이다.

급준뇌 서어지의 크기는 선로의 운전전압, 뇌격전류, 철탑, 가공지선의 뇌격개소, 철탑의 접지저항, 서어지 임피던스 등에 의해 다르다[4]. 예를 들면 송전선로에 발생하는 급준뇌 서어지 크기는 가공지선이 있는 경우는 200 ~ 2,500 [kV/

μs], 도체에 직격일때는 500 ~ 2,500 [kV/μs]의 전압준도를 나타내며, 도체의 서어지 임피던스가 높은 특수한 경우에는 도체 직격시 11,000 [kV/μs]의 전압준도가 관측되고 있다[5].

본 연구에서는 급준뇌 서어지의 유효상승률이 2,500 [kV/μs]인 전압으로 정·부극성 각각 10회씩 시험하였다. 급준파 전압시험의 회로도도는 그림 2와 같다.

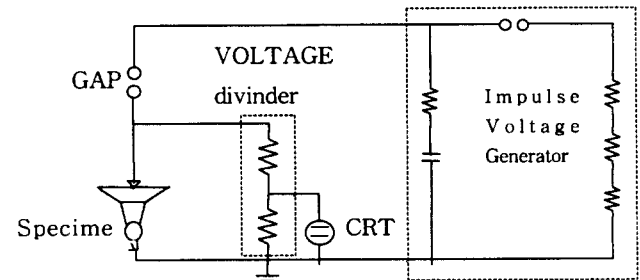


그림 2 급준파전압시험 회로도

Fig. 2 Circuit diagram of steep-front-of-wave flashover voltage test

2.3 경년변화시험

품질이 낮은 현수애자는 전력공급 중 냉열의 반복에 의한 열충격을 받아 균열이 발생하여 전기적 절연이 파괴되고 결국에는 송전선로의 고장을 초래하므로, 경년변화시험을 통한 불량 현수애자의 검출은 필수적이다. 본 연구에서는 경년변화시험 전·후에 과전과피시험을 실시하여 품질관리지수를 계산하여 평가하였다[6, 7]. 또한 송전선로는 고장 발생시 정전범위가 크므로 송전용 현수애자의 고장을 줄이고, 장기 신뢰성을 확보하기 위하여, 일부 시험기준을 제·개정할 필요성이 대두되므로, 본 연구에서는 IEC 575와 ES 131 규격을 강화시킨 기준으로 특성시험을 실시하였고 그 주기는 그림 3과 같다.

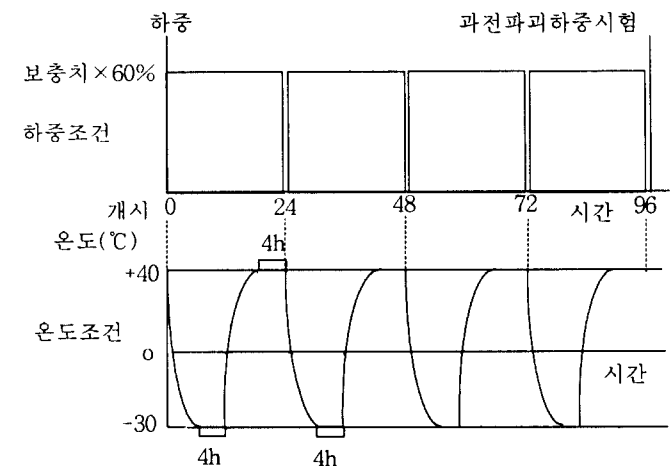


그림 3 경년변화시험 주기

Fig. 3 Period for the thermal-mechanical test

시험품의 두 쇠붙이 사이에 규정의 과전과피 하중치의 60 [%]의 인장하중을 축심방향으로 인가하고, 냉·열순으로 24 시간을 1주기로 4회(총 96시간) 수행하였고, 시료수는 10개로 하였다. 온도주기는 최저·최대온도는 각각 -30 [°C], +40 [°C]로, 유지시간은 4시간으로 하였다.

2.4 과전파괴하중 시험

과전파괴하중시험은 상용주파 건조섬락전압의 75 [%]인 56 [kV]의 전압을 인가한 상태에서 시험품의 축심방향으로 기계적 하중을 가하여 시험품이 파괴될 때까지 하중을 가했다. 시료수는 10개를 사용하였고 품질관리지수는 아래의 공식을 사용하여 계산하였다.

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

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

- Q_s : 품질관리지수
- R_s : 과전파괴 하중
- S : 표준편차
- K : 허용정수
- n : 시료수(개)
- \bar{R} : 측정치의 평균치

2.5 시멘트 특성시험

송전용 현수애자에 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트에 대한 초결·중결 응결시간, 그리고 1일, 3일, 7일, 28일 후의 압축강도를 측정하였다. 또한 분말도를 측정하여 시멘트 입자의 미세정도를 분석하였으며, Autoclave 팽창도, 화학성분 등을 측정하여 팽창정도를 확인하였다.

2.6 핀 인장시험

20 [Ton]의 송전용 현수애자에 사용되고 있는 핀으로 인장시편을 제작하여 시험하였다. 시편의 직경은 6.25 [mm], 평행부 길이(parallel length)는 30 [mm]로 제작하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 내아크시험 결과

A사와 B사 시료에 대하여 동일 조건으로 시험하였다. A사 및 B사 시료에 150 [kA·Cycle]로 1회 재 인가하였을 경우 양사 시료 모두 양호하였다. 같은 시료에 대하여 2회 재 인가하였을 경우 B사 시료는 이상이 없었으나, A사 시료는 파손되었다

3.1.1 특성분석

위에서 언급한 바와 같이, A사 시료는 내아크시험 2회 재 애자가 파손되었다. 내아크시험으로 파손된 애자를 정밀 분석하여 그 파손원인을 추정하였다. 저배율 입체 현미경으로 관찰한 파손된 자기 단면에는 그림 4처럼 1.45 [mm] 크기의 탄화흔적이 관찰되었다. 이 탄화흔적은 육안으로 관찰할 수 있었으며 자기 균열이 시작된 점으로 판단된다.

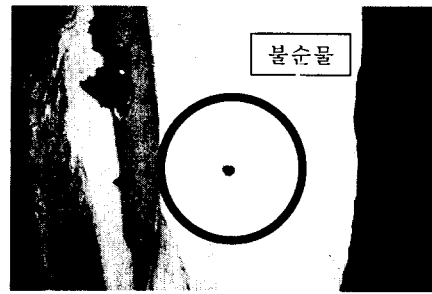
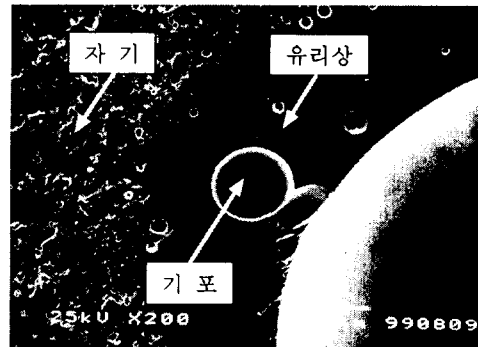


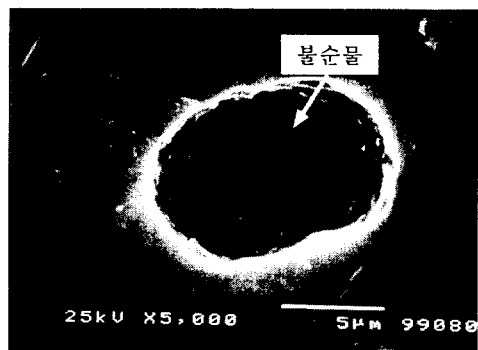
그림 4 파손된 자기의 단면에 나타난 탄화흔적(2배)
Fig. 4 Carbon trace on the cross-sectional picture of broken porcelain

3.1.2 전자현미경(SEM)에 의한 관찰

그림 4의 탄화된 부분을 전자현미경으로 관찰한 사진은 그림 5와 같다. 탄화된 부분은 큰 원형과 작은 원형으로 구성되어 있으며, 원형주위는 기공이 없는 치밀한 형태를 하고 있다. 이와 같은 치밀한 구조는 자기 소성공정에서 자기내부에 존재하던 불순물이 용융되어 유리상(amorphous phase)이 형성되면서 치밀해졌고, 그림 4(a)의 유리상 내에 있는 구형은 불순물이 용융되면서 기체가 발생되어 형성된 것으로 판단된다. 실제로 그림 4(b)와 같이 유리상 내부에 10 [μm] 정도의 작은 불순물 포함되어 있는 것을 확인하였다.



(a) 탄화된 부분(200배)



(b) 유리상 내부의 불순물(5,000배)

그림 5 전자현미경으로 관찰한 탄화흔적의 미세구조
Fig. 5 Microstructure of carbon trace observed by SEM

3.1.3 성분분석

그림 5에 표시한 자기, 유리상, 기포, 불순물 등의 성분을 전자현미경에 장착된 에너지 분산분광기(EDS)로 측정된 스펙트럼을 그림 6에 나타냈다. 그림 6(d)에서와 같이 불순물의 주요 성분은 철인 것으로 확인되었다. 자기, 유리상, 기포, 불순물에 포함된 각각의 철분 함량을 규소(Si) 피크와의 상대비교로서 추정하였다. 그림에서와 같이 background를 제외하고 자기에서의 규소(Si)대비 철(Fe)의 비율은 약 12[%], 유리상에서는 45[%], 기포에서는 62[%] 그리고 불순물에서는 82[%]이다. 따라서 자기, 유리상, 기포, 불순물 순서로 철의 함량이 큰 것을 알 수 있다. 결국 철을 함유한 불순물이 포함되어 있었고, 철의 열팽창계수가 자기보다 약 두 배($12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 이상 크기 때문에, 내아크시험으로 인한 온도상승으로 철이 급격하게 팽창되면서 자기를 파손시켰던 것으로 판단된다. 따라서 자기내부에 존재하는 불순물은 자기파손의 주요 원인이 되고 있고, 내아크시험을 통하여 불순물이 존재여부를 확인할 수 있었다.

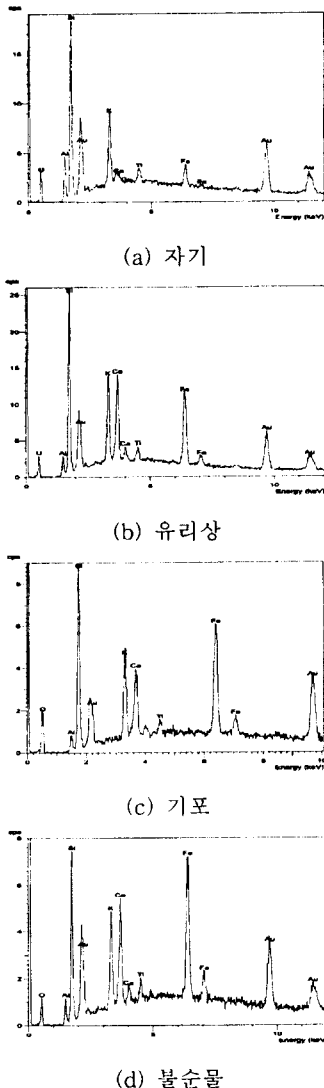


그림 6 자기, 유리상, 기포, 불순물의 화학성분
 Fig. 6 Chemical component of porcelain, amorphous phase, bubble and impurity

3.2 금준과전압시험 결과

금준과전압시험은 정·부극성의 뇌 임펄스를 각각 10회씩 인가하였다. A사 및 B사 시료 모두 내부절연과피 현상이 발생되지 않은 것으로 보아 두부 부분의 절연설계는 이상이 없는 것으로 확인되었다.

3.3 경년변화시험 전·후의 과전과피 하중시험 결과 분석

경년변화시험 전·후의 과전과피 하중시험 결과를 표 2에 나타냈다. 시료 10개에 대한 품질관리지수는 한전 표준구매 사양서(ES 131)에서 허용정수(K)를 1.58로 규정하고 있다. 표에 나타난 것과 같이 20 [Ton] 현수애자의 품질관리지수가 위의 기준치 보다 훨씬 높은 것으로 나타났다. 품질관리지수가 높으면 과전과피하중의 평균값이 높거나 균일하여야 한다. 따라서 A사 시료에 비하여는 B사 시료의 품질이 우수한 것을 확인하였다.

표 2 품질관리지수
 Table 2 Quality standard index

제조회사 애자규격	A사 시료		B사 시료	
	경년변화 시험 전	경년변화 시험 후	경년변화 시험 전	경년변화 시험 후
20 [Ton]	11.4	9.0	33.0	21.9

3.4 시멘트 특성시험

송전용 현수애자에 사용되는 포틀랜드 시멘트는 자기와 금구를 결합해주는 역할을 하는 것으로, 태풍이나, 폭설등에 의해 지속적이고 반복적으로 가해지는 응력에 견디도록 설계되어 있다. 이와 같이 자기재 애자에서 중요한 역할을 담당하고 있는 시멘트가 경화되기 시작하면 부피팽창을 하여 자기에 응력을 가하기 때문에 현수애자 고장의 중요한 원인이 될 수 있다. 따라서 이러한 시멘트의 특성을 평가하기 위해 시험한 포틀랜드 시멘트의 물리·화학적 특성 결과를 표 3에 나타냈다. 표 3에 나타난 바와 같이 응결시간, 압축강도, 분말도, Autoclave 팽창도 등 모두 기준 이상인 것으로 나타났다. 분말도는 1996년 측정치인 3582[cm²/g]보다 증가한 4392[cm²/g]로 나타났고 이것은 B사 애자의 특성과 유사한 것으로 나타났다. Autoclave 팽창도는 응결 시작하여 24시간 경과 후에 22기압에서 찌고 길이를 측정하여 초기치와 비교하여 길이 변화를 측정한 것으로 본 실험에서 사용한 팽창도는 0.02[%]로 팽창이 매우 적었다. 이와 같은 특성분석을 통하여 송전용 현수애자에 사용되는 시멘트의 특성은 양호한 것으로 판단되었다.

3.5 핀 인장시험

그림 7(a)는 20 [Ton] 송전용 현수애자의 핀 사진이다. A사 및 B사 핀의 구조가 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 각각 A사 및 B사 핀의 인장시험 시편이다.

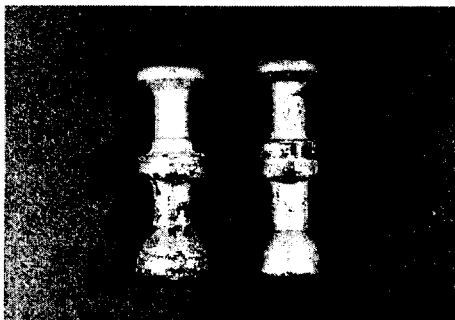
표 4에는 각각 A사 및 B사 시료에 대한 인장시험 결과를 나타냈다. 핀에 대한 최대 인장강도를 측정하여 원래 핀의 직경으로 환산한 인장하중은 A사 시료의 경우에 기준치인 20 [Ton]으로 계산되었고, B사 시료의 경우는 기준치보다 훨씬

표 3 포틀랜드 시멘트의 물리·화학적 특성

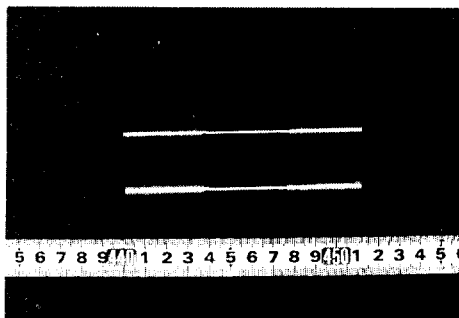
Table 3 Physical and chemical properties of portland cement

구분	기준	측정치	비고	
응결시간	초결(분)	60분 이상	160	양호
	중결(시간)	10시간 미만	4:20	"
압축강도 (kgf/cm ²)	1 일	130 이상	285	"
	3 일	250 이상	351	"
	7 일	280 이상	411	"
	28 일	310 이상	420	"
분말도(cm ² /g)	3300 이상	4392	"	
Autoclave 팽창도(%)	0.8 이하	0.02	"	
화학적 성분 (%)	SO ₃	4.5 이하	4.3	"
	MgO	5.0 이하	3.2	"
	강열감량	3.0 이하	1.4	"

핀 큰 25 [Ton]으로 환산되었다. 핀의 인장하중을 높이기 위해서는 핀의 두께를 늘이거나 강의 인장강도가 높은 재질을 사용함으로써 쉽게 향상시킬 수 있다.



(a) 왼쪽 : A사, 오른쪽 : B사



(b) 인장시험 시편

그림 7 핀의 형태 및 인장시험

Fig. 7 Shapes of pin and specimens of mechanical test

표 4 A사 핀의 인장하중

Table 4 Tensile strength of specimens A

인장하중 제작회사	직경 (mm)	최대 인장강도 (kg/mm ²)	핀 직경 (mm)	Normalized 핀 인장하중 (Ton)
A사	6.25	63.6	20.1	20
B사	6.25	73.8	20.9	25

4. 결 론

본 논문에서는 자기재 20 [Ton] 규격의 송전용 현수애자를 전기적, 기계적, 재료적으로 시험·분석하여 성능을 평가한 것으로써, 연구 결과는 다음과 같다.

1. A사 시료에 내아크시험을 2회 하였을 경우에 자기가 파손되었다. 자기의 파손원인은 자기내부에 철을 함유한 불순물이 다량 포함되어 있었고, 철의 열팽창계수는 자기보다 두 배($12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)이상 크기 때문에 내아크시험의 아크열로 온도가 상승하여 팽창되었기 때문으로 판단된다. 따라서 송전용 현수애자에 도입된 내아크 시험으로 불순물의 존재여부를 확인할 수 있었다.
2. 현수애자에 뇌 임펄스 과전압이 인가 되었을 때 자기부 절연파괴(내부 절연파괴, 관통파괴 등) 유무를 확인하는 시험방법으로 A사 및 B사 시료 모두 급준과전압시험에는 정상인 것으로 판정되었다.
3. 경년변화시험 전·후에 과전과파괴시험을 하였고, A사 및 B사 시료 모두 품질관리지수가 기준을 훨씬 웃도는 것으로 확인되었다. 단, A사 시료는 B사 시료에 비하여 품질관리지수가 낮은 것으로 확인되었다. 품질관리지수가 낮은 이유는 품질의 균일도가 일정하지 않은 것으로 판단된다.
4. 송전용 현수애자에 사용되는 조강도 포틀랜드시멘트는 KS 규격에서 정하고 있는 화학성분 및 물성이 모두 양호한 것으로 나타났다. 특히 분말도는 1996년 측정치인 3582[cm²/g]보다 증가한 4392[cm²/g]로 나타났고 이것은 B사 애자의 특성과 유사한 것으로 나타났다. 또한 Autoclave 팽창도는 기준치인 0.8[%]보다 훨씬 적은 0.02[%]로 매우 안정적이었다.
5. 핀의 인장하중은 A사 시료의 경우에 기준치인 20 [Ton]으로 계산되었고, B사 시료의 경우는 기준치보다 훨씬 큰 25 [Ton]으로 환산되었다. 따라서 금구의 인장하중은 A사 및 B사 모두 양호한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- [1] 송일근, 김찬영, 한재홍, 이병성 “송전용 현수애자의 성능확인 및 특성시험 분석”, 전력연구원, 최종보고서, 1999.

- [2] 송일근, 김상준, 김찬영, 한재홍, 김주용 “배전기자재의 수명예측 기준제정”, 전력연구원, 중간보고서, 1999.
- [3] 김상준, 박구범 “배전용 애자류 품질확보를 위한 경년시험방법에 관한 연구”, 전력연구원, 최종보고서, 1996.
- [4] 송일근, 곽희로, “뇌임펄스를 이용한 자기재 현수애자의 내부결함 검출”, 한국조명전기설비학회, Vol. 8, pp. 83-90, 1995.
- [5] I.K.Song, G.B.Park, P.S.Shin and H.R.Kwak, “Characteristic Analysis of Electric Field for Suspension Insulator using on Optimization Technique with FEM”, ISEM, UK, pp. 918~921, 1995.
- [6] 송일근, 김상준, 김주용, 곽희로, “현수애자의 경년변화 특성에 관한 연구”, 한국조명전기설비학회, Vol. 10, pp. 85-92, 1996.
- [7] 김찬영, 김주용, 송일근, 이병성, “배전용 현수애자의 유풍성에 관한 연구”, 대한전기학회논문지, 통권 48호, 제9호, pp. 641-647, 1999.

저 자 소 개



송 일 근 (宋 一 根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 Project Leader 선임연구원

Tel : 042-865-5920
E-mail : iksong@kepri.re.kr



김 찬 영 (金 燦 泳)

1962년 9월 6일생. 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 미국 콜로라도 스퀴어브 마인즈(CSM) 재료공학 졸업(석사). 1997년 동 대학원 재료공학 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5922
E-mail : kimcy@kepri.re.kr