

논문 16-9-16

송전용 자기재 애자의 성능평가 및 가속열화시험

Study on Performance and Aging Test of Porcelain Insulators for Transmission Line

한세원*, 조한구*, 박기호*, 이동일**, 최인혁**

(S. W. Han*, H. G. Cho*, K. H. Park*, D. I. Lee**, and I. H. Choi**)

Abstract

The suspension insulators are subjected to harsh environments in service for a long time. The long-term reliability of the insulators is required for both mechanical and electrical performances. This study describes some basic performance tests and accelerated aging test by cool-heat cycling methods and thermal mechanical performance test methods on alumina porcelain insulators (new and aged) used for transmission line in KOREA. There was no fail in electrical and mechanical performance tests such as a high voltage strength, a flashover voltage, and an impact strength in all samples. But in the case of accelerating aging tests which have above 90°C temperature gradient, fracture phenomena was happened by a thermal shock in the aged sample(sample A) with low alumina porcelain body. It was indicated that sample A was more severely aged than other samples. According to results of HRB test and microstructural analysis, it was reasoned that insulator bodies with the matrix reinforced with alumina crystalline phase have advantages over the suppression of crack advance. And cool-heat aging and mechanical thermal ageing tests shows that a temperature gradient is more effective to accelerating than a cycling number.

Key Words : Porcelain insulator, Accelerating Aging Test, HRB test, Transmission line, Cool-heat test, Thermal mechanical test

1. 서론

국내에서 사용되는 송전 선로용 절연물의 99% 이상이 자기재 애자(porcelain insulators)이다. 최근 산업 규모의 확장과 더불어 송전량이 증대되면서 주요 송전선로의 절연물 사고는 계통 신뢰도에

직접적인 영향 미친다. 따라서 외국 전력 선진국의 경우 송전용 절연물의 사고를 줄이기 위한 다양한 사고 원인 및 대책 연구를 추진하여 계통의 안정성 확보와 고품질의 송전용 절연물 제조에 적극 활용하고 있으나, 국내의 경우 이러한 분야의 연구 실적은 다소 미흡한 실정이다[1,9].

국내 송전 절연물 사고의 대표적인 원인으로서는 애자 및 금구에서 발생하는 문제가 크다. 2000년 송전설비 고장 분석 및 대책 자료에 따르면 '96년~'00년 사이 애자 사고 사례가 전체 설비의 39%로 가장 많으며, 원인별로는 자기 파손 또는 시멘트-자기 접합부의 경년에 따른 강도 저하에 의한 것이 대부분으로 외국의 사고 경우와 유사한

* : 한국전기연구원 신소재응용연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1,
Fax : 055-280-1590

Corresponding Author : swhan@keri.re.kr
** : 전력연구원 송전기술연구팀
2003년 2월 17일 접수, 2003년 3월 28일 1차 심사완료,
2003년 4월 11일 최종 심사완료

것으로 조사되었다[2]. 이러한 사고를 방지하기 위하여 송전용 애자의 수명과 유지 보수의 관점에서 송전용 애자의 열화 요인을 규명하고 가속 열화 방법을 적용하여 성능을 비교 평가하는 것이 필요하다.

본 연구는 국내 송전 선로용으로 사용되는 자기재 애자의 경년품(89, 95년 제작품)과 신품(01제작품)에 대하여 주요 단품 시험으로 성능을 확인하였다. 그리고 가속 열화 시험(냉열 및 경년 변화 시험)을 실시하여 송전용 애자의 적절한 가속 열화 기법을 연구하고 장기 열화의 주요 원인 등을 분석하였다.

2. 실험

2.1 자기재 애자의 열화

자기재 애자는 전기적 절연을 위한 자기부, 기계적 강도를 유지하는 금구부 및 자기와 금구를 접합시키는 시멘트부로 구성되어 있다. 열화의 주요인으로는 전기적 절연 내력의 저하와 기계적 강도 저하를 일으키는 것으로 나누어진다. 전형적인 자기재 애자의 열화 진전 메카니즘은 그림 1과 같다[3]. 열화를 일으키는 원인으로는 자기의 손상, 시멘트의 경년 팽창, 애자 각부의 열팽창 차이, 내아크, 자기 흡습성, 응력, 핀 부식 등으로 대별할 수 있으며, 열화가 발행하면 누설 전류 증가, 유전 특성 변화, 전자파 발생, 열 발생, 분담 전압 저하 등의 다양한 형태로 나타난다.

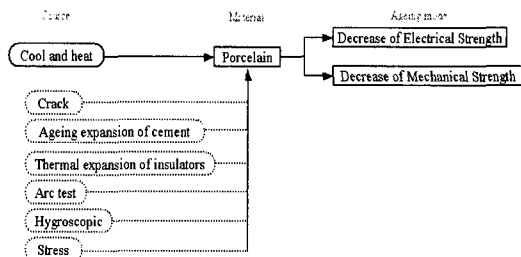


그림 1. 자기재 애자의 열화 진전 메카니즘.
Fig. 1. Aging mechanism of porcelain insulators.

2.2 송전용 애자 시료

표 1은 시험에 사용한 경년품 및 신품 애자의 제원(36,000lbs 송전용 자기재 현수 애자)을 나타낸 것으로 경년품은 KEPCO 실선로에서 사용되어진

표 1. 애자 시료의 제원.

Table 1. Test insulator specimens.

Samples	Products	Alumina Content	State
A	Domestic(1989)	8%	Aged
B	Domestic(1995)	12%	Aged
C	Domestic(2001)	17%	New
D	Foreign (2001)	17%	New

것을 수거하여 발췌한 것이다. 신품은 실선로에 사용되지 않은 것으로 최근 제작된 국산 및 외산품으로 규격 시험에 따른 단품 시험 및 가속 열화 시험을 통하여 애자의 열화 요인을 시험·분석하였다. ES 131-543 규격 시험 기준에 따른 송전용 자기재 현수 애자의 주요 특성 항목을 표 2에 나타내었다[4].

표 2. ES 131-543 규격 시험 기준.

Table 2. The specification of ES 131-543.

Items		Requirement
Dry Power-Frequency Flashover Voltage(kV)		80
Wet Power-Frequency Flashover Voltage(kV)		50
Critical Impulse Flashover Voltage(kV)	Positive	125
	Negative	130
Power-Frequency Puncture Voltage(kV)		110
Radio-Influence Voltage	Low Freq. Test Voltage(rms kV)	10
	Max. RIV(dB. At 500kHz)	37
Electro Mechanical Failing Load(kg)		16,500
Mechanical Impact Test Load(kg-cm)		104
Tensile Test Load(kg)		8,250
Mechanical Routine Test Load(kg)		11,000
Leakage Distance(mm)		280

2.3 가속 열화 시험

애자의 장기 성능을 평가하는 각종 시험 중에서 냉열, 경년 변화 시험 및 고주파 시험 등은 제조 공정 중에 있어 애자 결함을 검출하고, 품질 관리 시험에서도 활용되어지는 항목이다. 특히 자기재 애자의 경우 냉열 시험은 절연 자기재 또는 자기-시멘트의 내부 계면 결함의 요인을 검출하는 중요한 시험이다.

그림 2는 냉열 가속 열화 시험 조건으로 경년 과정을 추적하기 위해 기존 규격 시험의 냉열 온도차인 92℃보다 낮은 온도차인 84℃로 하여 1Cycle 당 각각 10분씩 냉·열을 교번하면서 총 50회까지 실시하였다. 냉열 가속에 따른 시편의 열화 양상은 누설 전류, 유전 특성(유전 정접, 유전율), 고주파 내전압, 주수 및 건조 내전압 시험 등을 실시하여 그 성능을 확인하였다.

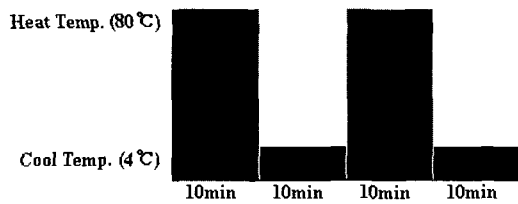


그림 2. 냉열 가속 열화 시험 (1Cycle).
Fig. 2. The cool-heat accelerating test (1Cycle).

경년 가속 열화 시험은 그림 3과 같은 조건으로 시험하였다. 이때 인가되는 기계적 하중은 과전 파괴 하중의 60%이다. 또한 기존 ES 131 또는 IEC 575 기준보다 인가 온도를 높인 95℃와 가속 주기를 2배 강화하여 가속 열화 효과를 높였다[5].

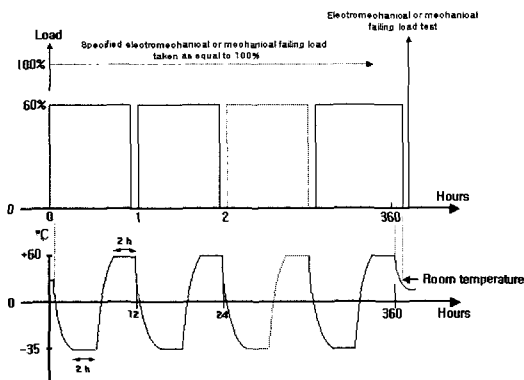


그림 3. 경년 가속 열화 시험.
Fig. 3. The thermal mechanical accelerating test.

2.4 HRB 시험

경년 및 가속 경년에 따른 애자의 미세 조직 상태를 확인하는 방안으로 실시한 HRB 시험은 로크웰(Rockwell) 경도계의 B 스케일(1/16 강구(鋼球), 100kg 하중)를 사용하여, 자기부의 내재된 불량 요

인의 유무를 알 수 있는 시험 방법이다[3]. 자기 소지는 알루미늄, 크리스토팔라이트, 플라이트 및 석영 등의 결정 입자가 비정질 유리상 내에 분산 강화되어있다. 불량 요인이 있는 자기 소지는 결정 조직이 조대하며, 비정질 유리 조직의 응력도 약하여, 강구 압자의 가압에 취약한 특성을 갖는다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성능 평가 시험

자기재 애자의 성능은 우선 자기재 애자의 시험 규격에 따른 단품 성능 평가 시험을 통해 확인이 가능하다. 본 연구에서 선정된 주요 단품 시험은 송전용 자기재 애자의 주요 요소, 즉 절연을 유지하는 자기재 갓, 기계적 강도를 유지하는 편, 캡의 굽구류 및 시멘트의 계면결합의 성능을 확인하는 기본적 규격 시험을 ES-131에 따라 실시하여 성능을 평가하였다.

3.1.1 흡습 시험

일반적으로 자기의 흡습 불량량의 원인은 소성 온도의 부족 등으로 주로 발생하며 그 특성은 열처리 공정이 완료되면서 결정되는 전형적인 제조적 결함이다. 따라서 이러한 불량 요인은 현장에서 경년과 더불어 성장하거나 진행하지 않는다. 표 3의 흡습 시험 결과에서 신품과 경년품 모두 흡선이 자기 소재 내부로 침투되는 불량량은 발생하지 않는 결과를 나타내었다. 흡습이 불량한 자기 소재가 현장의 애자편에 걸려 있는 경우 습도의 장기적인 노출시 수분의 출입으로 누설 전류의 증가 및 내절연성 저하 등으로 치명적인 사고를 유발할 수도 있다. 최근 국내에 사용되는 송전용 자기재 애자의 대부분은 고강도 알루미늄질 자기 소재가 도입되고 소결 기술의 안정화로 이러한 흡습 불량량을 포함하는 애자 소지는 실험적으로 거의 나타나지 않고 있다.

표 3. 흡습 시험 결과.

Table 3. The result of porosity test.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	153kg/cm ² , 12hrs.	PASS	PASS	PASS	PASS
2	153kg/cm ² , 12hrs.	PASS	PASS	PASS	PASS
3	153kg/cm ² , 12hrs.	PASS	PASS	PASS	PASS

3.1.2 내전압 및 섬락 전압 시험

내전압 및 섬락 전압 시험은 ES 131(6.1.4)에 따

라 시험하였다. 인가 전압은 시험 전압의 약 75% 까지 상승시킨 후 매초 시험 전압의 약 2%의 상승률로 상승시키면서 내전압과 섬락값을 측정한다. 규정된 전압을 1분간 인가하여 시편에서 섬락이나 절연 파괴가 일어나는지 확인한다. 내전압 및 섬락 전압 특성 시험은 전형적인 애자의 외부 절연 성능을 확인하는 시험으로 전기적 설계의 적절성을 판단할 수 있다.

표 4는 건조 내전압 시험 결과를 정리한 것이다. 건조 시는 내전압 규정값이 75kV에서 1분간 견디도록 되어 있으며, 섬락 전압은 80kV이상 되어야 건전한 시편으로 판정된다. 시험 결과에서 알 수 있듯이 건조 시 내전압 시험과 섬락 전압 특성은 모두 양호한 것으로 나타났다.

표 4. 내전압 특성 시험 결과.

Table 4. The result of impulse withstand voltage test.

Items		Samples			
		A	B	C	D
Dry	Withstand (75kV, 1min.)	PASS	PASS	PASS	PASS
	Flashover (above 80kV)	92kV	93.8kV	95kV	94kV

3.1.3 유중 파괴 시험

유중 파괴 전압 시험은 체적 저항 $10^6 \sim 10^9 \Omega m$ 또는 절연 파괴 전압 12.5kV/mm 이상의 절연유에서 실시하였다. 이때 시험 애자와 용기와의 최단거리는 시험 애자의 최대 지름의 1.5배 이상이다. 표 5의 실험 결과에서 알 수 있듯이 송전용 애자의 상용 주파 유중 파괴 전압의 기준치는 110kV 이상이면 만족하는 것으로 규정되어 있다. 경년품과 신품 모두 150kV이상의 높은 상용 주파 내전압을 유지하였다. 이러한 결과는 절연을 유지하는 자기 소재의 전기적 절연 내력이 설계상 안전한 범위에 있음을 확인할 수 있다.

표 5. 유중 파괴 전압 시험 결과.

Table 5. The result of breakdown voltage test in oil.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	110kV	162kV	172kV	164kV	150kV
2	110kV	165kV	158kV	156kV	150kV

3.1.4 과전 파괴 하중 시험

과전 파괴 하중 시험에 요구되는 시험 조건은 상용 주파 건조 섬락 전압치의 75% 이상의 전압을 인가한 상태에서 인장 하중을 가한다. 하중은 0에서 75%까지는 급속히 상승한 후 25% 하중은 15~45초 이내에 과전 파괴 하중치에 도달하도록 제어하여 관통 파괴(puncture)가 일어날 때까지 전압을 상승시킨 값을 기록하여 기준치와 비교한다. 표 6은 이 실험의 결과를 정리한 것이다. 과전 파괴 하중시험 기준치는 16,500kgf로 경년품 및 신품 모두 기준치보다 약 40% 이상의 내구성을 갖는 것으로 나타났다. 이 실험은 자기의 내전압특성보다 기계적 접촉 강도를 유지하는 계면부(핀/시멘트/자기/금구)의 유기적 내구성을 확인하는데 그 의미가 더 크다. 시험품 모두가 높은 접촉 강도를 유지하고 있어 이러한 특성은 양호한 것으로 확인되었으며 일반적으로 최종적인 파괴 형태가 자기나 시멘트 분리 보다는 시편 B와 같은 핀넬링 현상이 더 바람직한 것으로 알려져 있다[2].

표 6. 과전 파괴 하중 시험 결과.

Table 6. The result of electro-mechanical breakdown test.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	16,500 kgf	25,600kgf (Socket Separation)	21,500kgf (Pin Stretch)	22,100kgf (Socket Separation)	25,500kgf (Socket Separation)
2	16,500 kgf	above 16,500kgf	above 16,500kgf	above 16,500kgf	above 16,500kgf
3	16,500 kgf	"	"	"	"
4	16,500 kgf	"	"	"	"
5	16,500 kgf	"	"	"	"

3.1.5 타격 내하중 시험

타격 내하중 시험은 1,000kgf(9,800N)의 타격 하중을 가하여 시험한다. 자기부의 기계적 충격 강도의 성능을 확인하는 전형적인 시험 항목이다. 자기 소재는 세라믹 소재이기 때문에 타격 내하중 강도는 취약할 수 있다. 따라서 이러한 기계적 강도에 견딜 수 있는 자기 소재의 개발과 제조 공정이 요구된다. 더욱이 충격 에너지가 큰 낙뢰 등의 파워 아크(power arc)가 엄습하는 경우 송전용 자기 애자는 이에 대한 내구성이 검증되어야 한다. 물론

최근에는 내아크 시험 방법이 도입되어 참고 또는 검수 시험으로 시험되고 있다.

표 7. 타격 내하중 시험 결과.

Table 7. The result of mechanical impact test.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	104 kg-cm	PASS	PASS	PASS	PASS
2	104 kg-cm	PASS	PASS	PASS	PASS

경년품 및 신품 시편의 경우 타격 내하중 시험에서 표 7의 시험 결과와 같이 기준치인 104kg-cm의 타격에서 별다른 외관적 균열이나 이상이 발견되지 않았다. 이러한 결과는 1990년 초반 이후부터 타격 강도가 상대적으로 높은 고강도 알루미늄의 첨가량이 높은 소지로 교체되면서 이러한 내구성은 크게 향상된 것으로 판단되며 이에 대한 이전 결과에서도 별다른 이상이 없는 것으로 조사되었다.

3.2 가속 열화 시험

3.2.1 냉열 시험

냉열 시험에 사용되는 온수와 냉수와의 담금 횟수는 각각 3회로 수조 사이의 이동시간은 30초 이내로 하여 실험하였다. 이때 온수조 온도는 96℃, 냉수조 온도는 4℃로 하였다. 침적 시간은 15분으로 하였으며, 시험품의 담금에 따른 수온이 5℃이상 변화하지 않도록 충분한 양으로 실험하였다. 냉열을 가한 이후, 외관 검사 및 상용주파 전압 시험을 실시하여 이상 유무를 조사하였다. 냉열 시험은 전형적으로 자기소재의 결함이 존재하는 경우 불량률 가져오는 성능 평가 항목으로 전수 시험을 통해 확인하는 시험 항목이다. 경년품과 신품에 대한 냉열 시험 결과, 시편A의 2번째 냉열 시험에서 불량률이 발생하였다(표 8). 냉열시험 후 시편A(89년 경년품)의 경우 심각한 자기 갖의 파손이 발생하였다. 이는 89년도 제작된 경년 시편의 자기소재의 열화 상태를 확인해 주는 결과로 보다 구체적인 점검 항목으로 주목할 필요가 있다. 하지만 경년품

표 8. 냉열 시험 결과.

Table 8. The result of cool-heat thermal shock test.

No.	Samples			
	Aged		New	
	A	B	C	D
1	PASS	PASS	PASS	PASS
2	Fail(at 2nd)	PASS	PASS	PASS

인 95년도 제작된 시편B와 신품인 시편C, D의 경우는 냉열 시험 및 시험 후 상용 주파 내전압 시험에서 아무런 이상이 없는 것으로 확인되었다.

3.2.2 냉열 가속 시험

냉열 가속 열화 시험은 앞 절의 냉열 단품 시험의 일련의 조합으로 구성된 경년 가속 시험 방법으로 그림 4와 같은 스케줄에 따라 시험을 실시하였

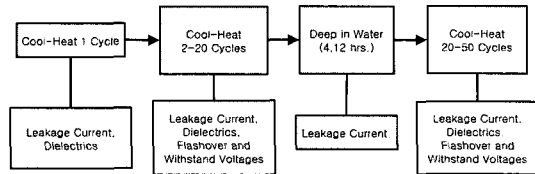


그림 4. 냉열 가속 열화 시험 스케줄.

Fig. 4. The schedule of cool-heat accelerating ageing test.

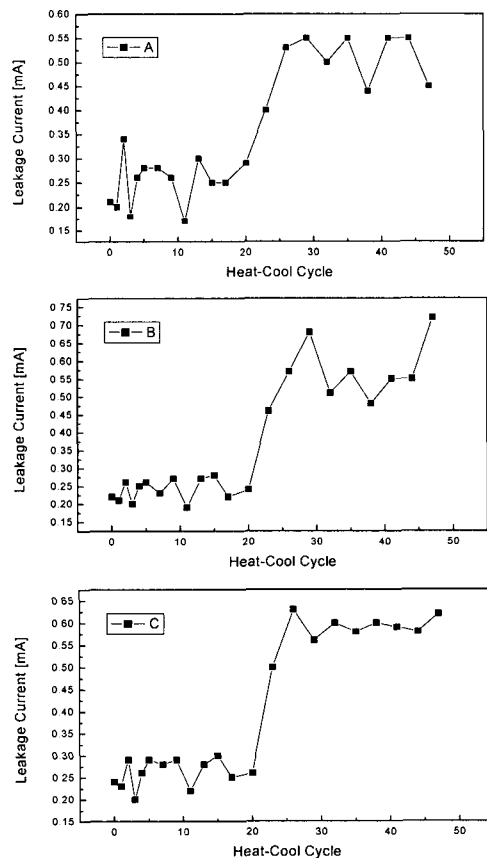


그림 5. 냉열 가속 주기에 따른 누설 전류 변화.

Fig. 5. The leakage current with cool-heat accelerating cycling.

다. 이때 냉열 온도차는 온도 경년성을 모니터링하기 위해 저온 4℃와 고온 80℃로 하여 실험하였다.

냉열 가속 열화에 따른 누설 전류 특성은 온도, 습도, 주수 및 건조 상태를 제어할 수 있는 열화 챔버를 이용하여 시험하였다. 주수시 누설 전류를 측정할 때 주수량은 분당 3ml를 기준으로 하였다. 애자에서 자기의 손상에 의한 내부 균열, 특히 두부의 균열에 의한 열화가 발생하면 누설 전류가 크게 증가하면서 온도가 상승하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 주수 시 누설 전류가 나타나며 이때 수십 mA까지 증가한다. 그림 5는 냉-열 열화 가속 주기에 따른 누설 전류(실효치)의 변화를 측정된 것이다. 경년품 및 신품 모두 50회의 냉열 가속에서 1mA이하의 매우 낮은 누설 전류 값을 나타내었다. 이것은 앞절의 92℃의 온도차를 두고 실시한 단품 냉열 시험 결과와는 달리 시편A에서도 두부와 갓 자기내의 심각한 관통이나 균열에 의한 열화가 진행되어 있지 않은 상태임을 확인하여 주었다. 이러한 실험 결과로부터 자기 애자의 냉열 내구성은 냉열 인가 횟수에 의한 것 보다 가속 온도차 크기에 영향을 크게 받는다는 것을 확인할 수 있다. 한편 20회의 냉열 가속 후 시편을 수조에 4시간, 12시간 동안 침수시켜 애자의 누설전류 변화를 실험하였다. 그림 7에서 보듯이 20회 이후 누설 전류 값은 0.5~0.8mA 정도로 증가하는 현상을 나타내었다. 하지만 그 크기는 열화가 가속된 정도의 누설 전류 변화와는 상관없는 미미한 증가로 이는 시멘트의 흡습에 기인한 것으로 판단된다 [6].

3.2.3 경년 변화 시험

경년 변화 시험은 1977년 기계적 내구성 시험인 IEC 383을 보완하여 기계적 부하 변화와 온도 변화에 대한 애자의 특성을 검증하는 내용을 포함한 IEC 575(Thermal mechanical performance test and mechanical performance test on string insulator units)가 제정되면서 주요 시험으로 인정되고 국내 ES 규격에서도 이와 동일한 시험 과정으로 실시하고 있다[3]. 경년 변화 시험에 적용되는 시험 조건은 과전 파괴 하중치의 60%의 인장 하중을 축심 방향으로 인가한 후 주변 온도를 냉, 열순으로 24시간을 1주기로 하여 4회 수행한다. 온도 및 시간은 저온에서 -30±5℃, 고온에서는 40±5℃로 각각 4시간 이상 인가해야 한다. 열주기 초기에는 실온 상태이어야 하고 최종 과정을 제외한 매회 종료 시점에서 인장 하중을 완전히 제거한 후 다시 하중을 인가하는 것을 원칙으로 시험한다.

4회 시험 종료한 후, 시험 당일에 과전 파괴 하중 시험을 실시하여 기준치와 비교하여 경년 내구성을 확인한다. 표 9는 경년 변화 시험 후 과전 파괴 하중을 시험한 결과이다. 이 규격에 따른 경년 조건은 경년품 및 신품 모두에서 과전 파괴 하중치에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 냉열 및 냉열 가속 시험에서 검토한 바와 같이 냉열 온도차가 70℃인 시험 조건의 경우 규정된 기계적 파로가 가해진다 해도 파손이나 균열 등의 심각한 가속 열화는 진행되지 않는 것을 보여준다.

표 9. 경년변화시험 후 과전파괴하중시험 결과.
Table 9. The result of electro mechanical test after thermal mechanical aging.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	16,500 kgf	29,300kgf (Pin Stretch)	21,500kgf (Pin Stretch)	21,900kgf (Socket Separation)	26,700kgf (Socket Separation)
2	16,500 kgf	28,000kgf (Pin Stretch)	21,800kgf (Pin Stretch)	22,100kgf (Socket Separation)	25,900kgf (Socket Separation)
3	16,500 kgf	25,700kgf (Pin Stretch)	21,600kgf (Pin Stretch)	18,500kgf (Socket Separation)	26,500kgf (Socket Separation)

3.2.4 경년 가속 열화 시험

현재 가장 우수한 자기 애자를 생산하고 있는 일본 NGK의 경우 이러한 열-기계적 경년시험의 중요성을 인식하여 보다 고신뢰성의 제품을 확보하기 위해 보다 가혹한 조건으로 가속하는 NGK의 독자적인 열-기계 경년 시험 기준(NGK-B법, NGK-C법)을 가지고 시험을 실시하고 있다[2]. 본 연구의 경년 가속 열화 시험은 앞에서 설명한 가속 열화 시험 스케줄(그림 3)에 따라 시험을 실시하였다. 이때 인가되는 기계적 하중은 과전 파괴 하중의 60%의 값으로 하여 가속 주기를 증가하였다. 특히 냉열 가속 효과를 높이기 위해 냉열 온도차를 저온 -35℃, 고온 60℃의 95℃로 기존 ES 131 또는 IEC 575 기준보다 인가 온도와 가속 주기를 강화하여 가속 열화 효과를 강화하였다. 표 10은 시험 결과를 요약한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 경년품인 시편A에서 경년 가속 시험 후 과

전 파괴 하중이 규정값인 16,500kgf 이하에서 파손되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 냉열시험에서 예측된 바와 같이 온도차가 90℃이상의 가속 조건에서 크리스토팔라이트 결정상이 발달한 경년 시편A에서 자기부의 균열 또는 이상이 발생한 가능성이 높은 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

경년 가속 시험 후 파전 파괴 하중에서 파손된 시편A의 파손의 형태는 냉열 시험의 경우 자기 깃 부위가 열충격에 의한 균열로 나타나지만 경년 가속 시험의 경우 기계적 피로가 집중되는 두부 소켓부가 분리되었다. 하지만 신품과 다른 경년품의 경우 가혹한 경년 가속 시험에서 문제점이 발생하지 않았으며 시험 후 파전 파괴 하중 시험에서도 규정치 이상의 파전, 기계적 내구성을 유지하는 것으로 나타났다[9,10].

표 10. 경년가속시험 후 파전파괴하중시험 결과.
Table 10. The result of electro mechanical test after thermal mechanical accelerating ageing.

No.	Standard	Samples			
		Aged		New	
		A	B	C	D
1	16,500 kgf	Fail	PASS	PASS	PASS
2	16,500 kgf	PASS	"	"	"

3.3 HRB 경도 및 미세 조직 분석

각 시편의 자기 소지에 대한 HRB 경도 특성을 그림 6에 비교하였다. 로크웰 시험기(SGA-133-D)를 사용하여 각 시료에 대해 30point 이상의 값을 측정하여 분석하였다. HRB 경도값에 대한 정규 분포(Normal Distribution)를 분석한 결과 전체적으로 HRB 값의 범위가 120이상으로 이는 경년 사고품의 HRB 한계값 이상의 안정한 특성을 갖는 것으로 나타났다[3].

HRB의 최대값은 시편A에서 시편D 순서로 그 값이 증가하는데 이는 시편C, D 자기 소지의 미세 경도 내구성이 우수한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

미세 경도 내구성은 가압에 대한 미세 조직의 저항성, 즉 결정상과 비정질 유리상의 강화 상태에 따라 결정된다. 그림 7은 자기소지의 HRB 시험 후 SEM 분석 사진이다. 시편D의 경우 가압에 의한 크랙의 진전이 방사상으로 진전되지 않고 알루미늄 등의 결정상에 의해 억제되는 반면 시편A의

경우는 크랙이 방사상으로 크게 확장되면서 충격 부위가 넓게 확산되어 결합 강도가 크게 낮아지는 원인으로 작용한다. 이러한 미세 조직상의 특성은 온도차 및 이상 서지에 의한 열충격이 자기 소지에 가해지는 경우 균열이나 파손으로 이어지는 주요한 요인으로 작용하게 된다. 냉열 온도차에 의한 경년 시험에서 취약한 것으로 나타난 시편A의 경우 이러한 현상과 무관하지 않다.

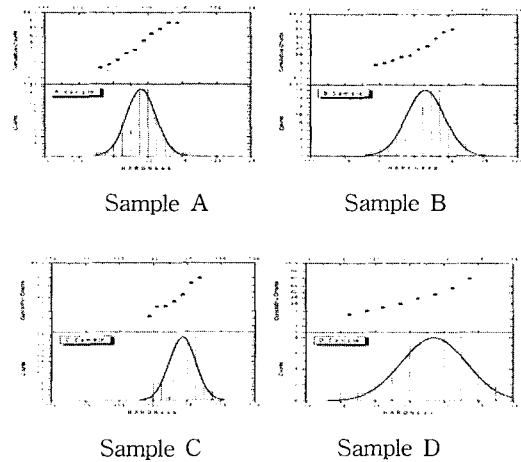


그림 6. 자기 시편의 HRB 분포.
Fig. 6. HRB distribution of test samples.

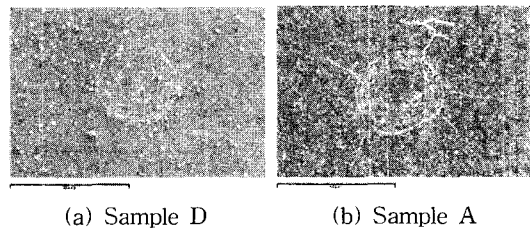


그림 7. HRB 가압부의 전자 현미경 사진.
Fig. 7. The SEM pictures after HRB test.

온도차가 90℃이상의 조건으로 실험된 냉열 또는 경년 가속 시험에서 파손된 시편A의 경우 미세 결정 조직(표 11)을 분석한 결과 다른 경년 또는 신품과 구별되는 몇 가지 특성이 나타났다. 우선 기계적, 열적 내충격 강도에 결정적인 영향을 미치는 알루미늄 결정상의 양이 다른 시편보다 상당히 적어 분산 강화 효과가 적다. 95년도 경년품은 알

루미나 결정이 12% 그리고 신품의 경우 17%로 89년도 경년품인 시편A 보다 2배 이상 높았다. 다음으로 주목할 필요가 있는 것은 크리스토팔라이트 결정상이다. 크리스토팔라이트 결정상은 과거 기계적 인장 강도가 우수하여 많이 사용하였지만 애자로서 중요한 충격 강도(thoughtness strength)가 취약하여 가능하면 이를 억제하고 알루미늄 및 몰라이트 결정상 등을 강화하여 열적, 기계적 충격 강도를 높이고 있다. 시편A와 시편B의 경우 크리스토팔라이트 결정이 약 5%정도, 시편C, D는 0.5%이하로 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 냉열 온도차가 큰 경우 크리스토팔라이트는 열팽창계수가 알루미늄 결정상보다 2배 이상 크기 때문에 냉열 경년에 따른 내부 열충격 가속은 심화될 수밖에 없다. 이러한 미시적 결정 구조가 냉열 가속 시험에 중요한 영향을 미친 것으로 생각된다 [7,8].

표 11. XRD 결정상 정량 분석.

Table 11. The XRD crystalline phase analysis.

Crystalline Phase	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Mullite[%]	12.7	17.11	11.8	10.65
Quartz[%]	5.46	3.72	3.3	3.43
Cristobalite[%]	4.0	5.74	0.5	-
Alumina[%]	8.10	9.08	16.4	16.06

4. 결론

본 연구에서는 국내 송전 선로용으로 사용되는 자기재 애자의 경년품(89, 95년 제작품)과 신품(01 제작품)에 대하여 주요 단품 시험과 가속 열화 시험(냉열 및 경년 변화 시험)을 실시하여 송전용 애자의 적절한 가속 열화 기법을 연구하고 장기 열화의 주요 원인 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단품 규격 시험으로 전기적 절연 성능을 확인하는 유중 파괴 시험, 내전압 시험 및 섭락 시험에서 경년품 및 신품 모두 규정된 값 이상의 양호한 성능을 나타내었다.

2) 애자 자기부의 기계적 충격 강도의 성능을 확인하는 타격 내하중 시험과 자기 소지의 소성 결함을 확인하는 흡습 시험 항목에서 기준치 이상의 양호한 성능을 나타내었다.

3) 가속 열화 시험으로 실시한 냉열 및 경년 시험에서 온도차 90℃ 이상을 유지하는 냉열 시험과 경년 가속 시험에서 경년품인 시편A에서 파손이 발생하였다. 한편 냉열 온도차를 80℃ 이하로 낮추고 가속 주기를 강화한 냉열 가속 및 경년 시험의 경우 모든 시편에서 특별한 균열이나 파손이 발생하지 않았다. 이러한 실험 결과는 자기 애자의 경년 가속 내구성은 냉열 인가 횟수에 의한 것 보다 가속 온도차 크기에 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있었다.

4) 냉열 충격에 약한 경년 시편A에 대한 미세 조직 분석과 HRB 경도 시험을 실시한 결과 자기 애자의 충격 강도를 강화시키는 알루미늄 결정상이 상대적으로 부족하여 HRB 경도 시험과 같은 미시 균열 진전 비교 시험에서 충격 시 균열의 확산을 억제하지 못하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 열팽창 계수가 큰 크리스토팔라이트 결정상이 많아 냉열 경년에 따른 내부 열충격 가속은 심화될 수밖에 없다. 이러한 미시적 결정 구조가 냉열 가속 시험에 중요한 영향을 미친 것으로 분석된다.

참고 문헌

[1] “2000년 송전설비 고장분석 및 대책자료”, 1999년-2000년 통계.
 [2] Kenji Morita, Yoshihiro Suzuki, and Hiroshi Noazki, “현수애자의 장기신뢰성에 관한 연구”, TIEE, Japan, Vol. 117-B, No. 12, p. 1529, 1997.
 [3] “배전선 절연사고 방지대책”, 전기협동연구, 27권, 3호.
 [4] “250mm 소켓형 현수애자”, ES 131-540~543, 한전 구매시방서, 1995.
 [5] “Thermal Mechanical Performance Test and Mechanical Performance Test on String Insulator Units”, IEC 575, 1977.
 [6] “애자”, 일본전기학회, 애자전문위원회, 1983.
 [7] E. A. Cherney, “Cement growth failure of porcelain suspension insulators”, IEEE PAS, Vol. PAS-102, No. 8, p. 2765, 1983.
 [8] E. A. Cherney, “Cement growth failure of porcelain suspension insulators”, IEEE PAS,

J. of KIEEME(in Korean), Vol. 16, No. 9, September 2003.

Vol. PAS-102, No. 8, p. 2765, 1983.

- [9] 한세원, 조한구, 박기호, “송전용 자기재 애자의 열화시험 평가기술”, 전기전자재료학회 2002년 추계학술대회논문집, Vol. 15, p. 480, 2002.
- [10] 한세원, 조한구, 우병철, “송전용 자기재 애자의 시멘트 변위응력에 관한 시뮬레이션”, 전기전자재료학회 2002년추계학술대회논문집, Vol. 15, p. 476, 2002.