

송전용 애자의 파전 열화 신뢰성 평가 기술

한세원 조한구 최인혁

한국전기연구원 신소재응용연구그룹, 전력연구원 송변전연구그룹

Technical Aspects on Long term Reliability of Porcelain Insulators for Transmission Line

S. W. Han, H. G. Cho, I. H. Choi\*

Korea Electrotechnology Research Institute, \*Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - The reliability of power transmission lines depends on long-term performance of the suspension insulators used on the lines. The importance of such long-term performance of the insulators has been recently noted, but its evaluation method has not been established yet. In this paper, various causes of insulator deterioration are verified and laboratory test method for evaluating the long term performance of insulators are studied.

1. 서 론

경년 열화 신뢰 특성은 자기재 현수 애자의 장기 신뢰성을 평가하도록 시험이 규정되어있다. 자기재 애자의 장기 신뢰성은 초기 성능 뿐 아니라 장기 성능 측면에서도 평가되어야 한다. 경년 열화 시험은 열적, 기계적 스트레스를 조합한 가속 열화 방식으로 이루어진다. IEC 60575에 이 시험 평가 방법을 규정하고 있다. 한편 또 다른 평가 주요 항목은 시험 목적에 맞게 장기 신뢰성(long term reliability)을 확인하는 방법의 도입이다. 기존 IEC 파전 열화 시험 방법과 경년 열화 시험 방법에 예 IEC 경년 열화 시험을 강화 시킨 방법으로 자기 애자 샘플에 대한 장기 신뢰성을 비교한 결과이다. 여기서 강화된 경년 열화 시험은 그림 23과 같이 기존 IEC 60575에서 규정하고 있는 온도 구배 70°C(-30~40°C)를 70°C(-5~65°C)로 고온 충격을 강화 시켜 시험한다. 기존 파전 열화 시험과 경년 열화 시험 방법으로 시험하고 3 시스템으로 평가한 결과 품질 관리 지수 Qs는 3 이상의 값을 나타내고 있으나 강화된 경년 열화 시험 방법으로 평가한 결과 1 이하의 값으로 기준에 미치지 못하고 있다. 이는 강화된 시험 방법이 시편을 가속 열화 시키고 있음을 잘 보여 준다. 또 다른 요인은 이 시험의 경우 최종 파손의 형태가 기존 금구류 파손에서 자기 파괴나 관통(puncture) 파괴로 바뀌는 것으로 나타났다. 따라서 장기 신뢰성이 떨어지는 제품(열화의 잠재성을 가지고 있는 제품)을 가려내기 위해서는 시험 전과 후에 기계적 강도와 파단 형태의 변화가 없어야 하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국내의에서 시행하는 파전 열화 시험에 의한 신뢰성 평가 기술에 관한 장단점과 유효성을 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 송전용 애자 시료

표 1은 시험에 사용한 경년품 및 신품 애자 시료의 제원(250mm 송전용 자기재 현수애자)을 나타낸 것으로 경년품은 KEPSCO 실선로에서 사용되어진 것을 수거하여 발췌한 것이다. 한편 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.

표 1. 애자 시료의 제원

시료	시료제원	재화 및 제작년도	자기재질	비고
A Sample		국산 (1989년)	Cristoballite	경년품
B Sample		국산 (1995년)	Alumina	경년품
C Sample		국산 (2001년)	Alumina	신품
D Sample		외산	Alumina	신품

송전용 자기재 현수애자의 특성은 한전 표준구매시방서에 준하여 표 2와 같이 나타내었다.

표 2. ES 131-543 규격시험[4]

항목	특성치	
상용주파전조성락전압치 (KV)	80	
상용주파주수심락전압치 (KV)	50	
비충격성락전압치 (KV) (1.2×50μs)	정	125
	부	130
상용주파유중파괴전압치 (KV)	110	
전파장해 전압	상용주파대저간 (rms KV)	10
	최대전파장해전압 (dB, at 500KHz)	37
파전과파하중치 : kg	16,500	
타격내하중치 : kg·cm	104	
인장내하중치 : kg (Lb)	8,250	
장시간내하중치 : kg (Lb)	11,000	
누설거리 : mm (in)	280	

2.2 경년 가속 열화 시험

경년 가속 열화 시험은 그림 1과 같은 조건으로 시험을 실시하였다. 이때 인가되는 기계적 하중은 파전과파 하중의 60%로 하였다. 이것은 기존 ES131 또는 IEC 기준보다 인가 온도와 가속 주기를 강화하여 가속 열화 효과를 높인 것이다.

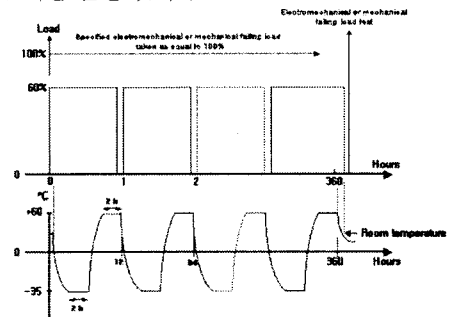


그림 1. 경년 가속 열화 시험 조건

3. 결과 및 고찰

### 3.1 과전 열화 신뢰 특성

과전 열화 시험(Electro-Mechanical test)은 주어진 환경에서 기계적으로나 전기적으로 충분히 견딜 수 있는 강도를 검증하도록 규정되어 있다. IEC 60383 class27에서 제안된 과전 열화 품질 관리 기준은 Xi(개별 과전 파괴 하중값) > 정격 과전 하중값으로 규정하고 있다. 최근 이를 강화시킨 3 시그마(3-Sigma) 평가 방법을 X' > 정격 과전 파괴 하중 + 3S, 여기서 X'는 측정 평균 과전 파괴 하중, S는 표준 편차를 나타낸다.

IEC 60591에서는 이러한 품질 관리 차이에 대한 OC(Operating-Curve) 특성을 세밀히 분석하고 있다. 주어진 룯(lot)의 품질은 결합 애자 수 p의 퍼센트로 알 수 있다. 사실 p 퍼센트는 측정하여 알 수 없고 확률로 추측할 뿐이다. 룯의 합격 확률은 P(p)로 정의된다. 이때 발채된 샘플의 실패 수 p를 확률으로 하고 중측을 합격 확률로 한 곡선을 OC 특성 곡선이라 부른다. 그림 2는 품질 관리 방법을 기존 IEC 방법과 강화된 3 시그마 방법으로 한 경우의 OC 특성을 비교한 것이다.

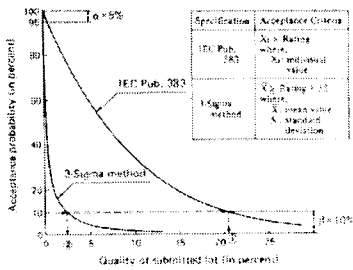


그림 2. 자기 애자의 OC 특성(n=10)

표 3. 위험 관리 비교표(β=10%)

Criteria	Constant Risk acceptance probability of submitted lot	Sample Size	Quality of Submitted Lot (percentage of defects)	Designation in Fig. 2
IEC Pub. 383	10%	n=10	20.6%	①
3-Sigma method	10%	n=10	2.3%	②

예를 들어 표 3에 정리한 바와 같이 합격 확률을 10%(β=10%)로 하는 경우 IEC 60383 기준에 따르면 20.6%의 불합격율이 발생하지만 3 시그마 기준에 따르면 경우 불합격율은 2.3%가 발생한다. 다시 말해 주어진 룯이 20%의 결함을 가지는 경우 IEC 기준은 통과하지만 3 시그마 방법은 통과할 수 없기 때문에 과전 열화에 대한 신뢰성은 크게 증가한다.

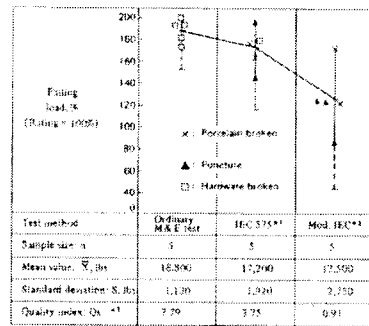
한편 3 시그마 평가 기준에는 보통 "최종 파괴가 발생하기 전 전기적 관통이 없을 것"이라는 항목을 규정하고 있다. 전기적 관통은 높은 기계적 스트레스의 집중이 발생하는 신호이기 때문이다. 이러한 기계적 응력 집중은 실선로 환경에서 장시간 사용하면 시멘트의 변위(displacement)와 금구류의 열화 등으로 더욱 커진다. 이 과정에서 자기부의 파손, 열화의 열화가 발생한다. 이러한 검토로부터 과전 열화 시험에서의 전기적 관통은 자기 애자의 낮은 신뢰 특성을 지적하는 것이다.

### 3.2 경년 열화 신뢰 특성

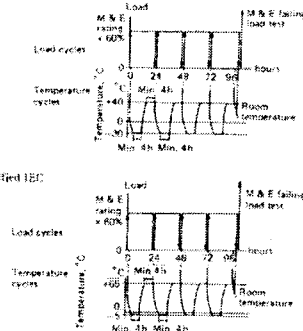
경년 열화 신뢰 특성은 자기재 현수 애자의 장기 신뢰성을 평가하도록 시험이 규정되어 있다. 자기재 애자의 장기 신뢰성은 초기 성능 뿐 아니라 장기 성능 측면에서도 평가되어야 한다. 경년 열화 시험은 열적, 기계적 스트레스를 조합한 가속 열화 방식으로 이루어진다. IEC 60575에 이 시험 평가 방법을 규정하고 있다.

IEC 60575는 최종 기준으로 출판되지 않았기 때문에 합격 기준은 명확히 규정하고 있지 않다. 경년 열화 시험을 규정할 때 평가 범주는 과전 열화 시험과 마찬가지로 중요하다. NGK에서는 경년 열화 평가 방법으로 3 시그마 방법을 채택하고 있다. 또 다른 평가 주요 항목은 시험 목적에 맞게 장기 신뢰성(long term reliability)을 확인하는 방법의 도입이다. 표 4는 기존 IEC 과전 열화 시험 방법과 경년 열화 시험 방법 외에 IEC 경년 열화 시험을 강화시킨 방법으로 자기 애자 샘플에 대한 장기 신뢰성을 비교한 결과이다.

표 4. 경년 열화 시험 방법과 평가 결과 비교



\*\* IEC Pub. 525



\*\* Qn =  $\frac{\bar{X} - Rating}{S}$

그림 3. IEC 60575를 강화시킨 경년 열화 시험

여기서 강화된 경년 열화 시험은 그림 3과 같이 기존 IEC 60575에서 규정하고 있는 온도 구배 70℃(-30~40℃)를 70℃(-5~65℃)로 고온 충격을 강화 시켜 시험한다. 기존 과전 열화 시험과 경년 열화 시험 방법으로 시험하고 3 시그마로 평가한 결과 품질 관리 지수 Qs는 3 이상의 값을 나타내고 있으나 강화된 경년 열화 시험 방법으로 평가한 결과 1 이하의 값으로 기준에 미치지 못하고 있다. 이는 강화된 시험 방법이 시편을 가속 열화시키고 있음을 잘 보여 준다. 또 다른 요인은 이 시험의 경우 최종 파손의 형태가 기존 금구류 파손에서 자기 파괴나 관통(puncture) 파괴로 바뀌는 것으로 나타났다. 따라서 장기 신뢰성이 떨어지는 제품(열화의 잠재성을 가지고 있는 제품)을 가려내기 위해서는 시험 전과 후에 기계적 강도와 파단 형태의 변화가 없어야 하는 것이 중요하다.

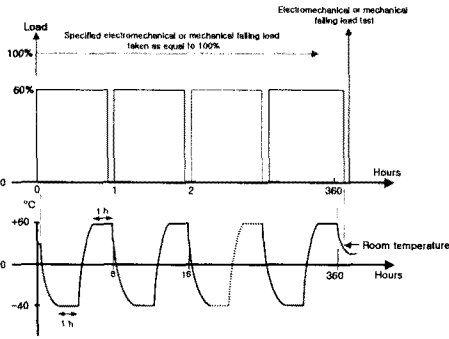


그림 5. 경년 가속 열화 시험 방법(NGK-B)

한편 NGK의 경우 경년 열화 시험을 보다 강화한 NGK-B 방법을 제안하고 있다. 이 것은 그림 5에서 보듯이 100℃(-40~60℃)로 강화 시키면서 최대 시험 시간은 360시간으로 늘리고 기계적 인장 주기(1시간/1사이클)와 열 충격 주기(8시간/1사이클)를 빠르게 하여 경년 과 충격을 가속화 하는 시험이다.

그림 6은 다양한 장기 신뢰성 시험을 실시하여 3 시그마 평가 방법으로 비교한 결과이다. 시편 B는 NGK-B 방법으로 시험 결과 다른 시험 방법과 비교하여 강도의 저하는 발생하지 않고 있다. 열화 이후 파단 형태도 파전 열화 시험과 동일하였다. 이러한 결과는 시편 B 자기 소재 자체가 기계적 강도의 저하는 발생하지 않는 내구성을 가 는 것을 보여준다. 시편 A(시편 B의 금구류를 강화 시킨 제품)의 경우 NGK-B 방법으로 경년 가속 열화 후 심각한 기계적 강도의 저하를 나타낸다. 또한 파단 형태도 소켓 파손 등에서 자기 파손으로 바뀌었다. 또한 전기적 관통 파손도 관측되었다. 이 것은 이러한 경년 가속 열화 시험에서 쉽게 열화가 발생하는 것을 보여준다. 결국 NGK-B 방법은 IEC 방법보다 엄격한 경년 가속을 가져온다.

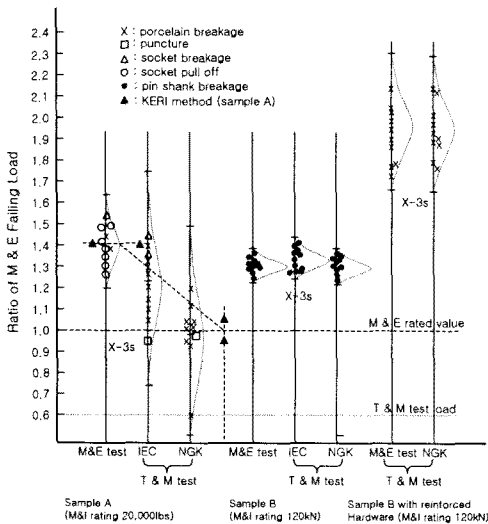


그림 6. 경년 가속 열화 시험 결과 비교

한편 국산 경년품(1989년)에 대한 파전 열화, 경년 열화 시험과 경년 열화 시험을 강화한 시험을 비교한 결과를 그림 6의 결과와 비교하였다. NGK의 실험 결과와 마찬가지로 기존 파전 열화(M&E) 및 경년(T&M) 열화 시험에서는 M&E 기준치 이상의 값이 나타났지만 가속 시험법(KERI)으로 시험한 결과 파괴값이 T&E 기준치

보다 낮아지는 경향이 나타났다.

### 3.3 장기 신뢰성 검증의 범주

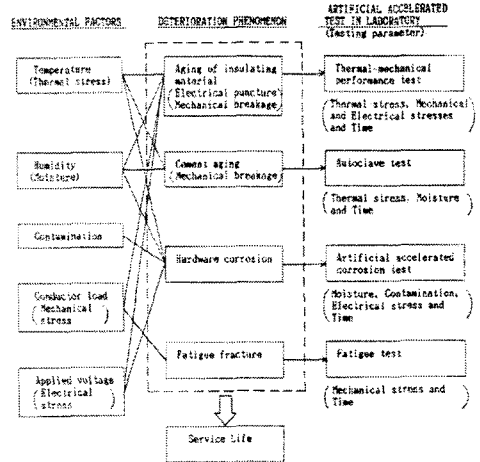


그림 7. 자기애자 열화 요인과 장기 신뢰성 평가

## 4. 결 론

이상과 같이 자기 애자의 성능과 단기, 장기 신뢰성에 대한 시험과 평가 내용을 비교 검토한 결과 전기적, 기계적, 열적 경년의 범주에서 자기 애자의 신뢰성을 검증하는 것이 바람직하다. 기계적 응력 집중은 실선로 환경에서 장시간 사용하면 시멘트의 변위(displacement)와 금구류의 열화 등으로 더욱 커진다. 이 과정에서 자기부의 파손, 자기의 열화가 발생한다. 이러한 파전 열화 시험에서의 전기적 관통은 자기 애자의 낮은 신뢰 특성을 지적하는 것이다. 오히려 도체의 진동 파로에 의한 파괴가 편에서 발생하는 데 적절히 설계되지 않는 경우 이러한 진동 파로가 자기 및 시멘트에 영향을 미쳐 기계적 파단이나 전기적 관통으로 이어질 수도 있다. 이러한 자기 애자의 열화 관계를 살펴보면 단일한 요인이 아닌 복합적인 요인이 작용하기 때문에 정확한 장기 신뢰성을 평가하기 위해서는 사용 환경을 검토하고 사고 요인을 분석하여 적절한 가속 시험 방법과 평가 기법으로 평가하는 것이 무엇보다 중요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1]"Thermal mechanical performance test and mechanical performance test on string insulator units", IEC 575, 1977
- [2]"절연열화진단기술", 일본전기평론, P52, 1990, 11
- [3]Y. Yamada, Y. Kawaguchi, N. Tanaka and T. Kishi, "Slow crack growth of mullite ceramics", 일본세라믹협회, 논문지, 99(6), 1991
- [4]K. Morita, Y. Suzuki and H. Nozaki, "Study on long term reliability of suspension insulators", 일본전기학회, 논문지B, 117(12), 1997
- [5]E. A. Cherney, "Cement growth failure of porcelain suspension insulators", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No.8, 1983
- [6]J. Bellerive, "Performance of porcelain insulator forty years experiences at Hydro Quebec", CEA Peper, March, 1990
- [7]S. W. Han, H. G. Cho, T. Y. Kim, D. I. Lee, and I. H. Choi, "A study on electrical and mechanical simulation for designing porcelain insulators with high strength", International Conference on Electrical Engineering 2002, Vol.3, 2002