

25.8kV 고체절연차단기(Solid Insulated Switchgear)에 대한 기계적 신뢰성(수명) 평가

이도훈*, 강원중*, 이석원*, 신철호*, 김영근*, 이규철**, 이승엽**, 김호근**
 LS산전(주) 전력연구소*, 한국전력공사**

Mechanical Reliability(Life-time) Estimation for 25.8kV Solid Insulated Switchgear

Do-Hoon Lee*, Won-Jong Kang*, Seog-Won Lee*, Chul-Ho Shin*, Young-Geun Kim*, Kyu-Chul Lee**, Seung-Yeup Lee**, Ho-Keun Kim**
 LS Industrial Systems*, KEPCO**

Abstract - 본 논문은 SF₆ 가스절연차단기를 대체할 고체절연차단기(Solid Insulated Switchgear:SIS)의 기계적 신뢰성 평가에 대한 연구 결과이다. 최근 제정된 “25.8kV 가스 및 고체절연 친환경 개폐장치” 한전구매규격에는 “Epoxy 고체절연물에 대한 기계적 신뢰성(수명)이 25년 이상”임을 보증할 수 있는 신뢰성 데이터를 제출해야 한다는 조항이 포함되어 있다. 이에 개발된 고체절연차단기의 Epoxy 고체절연물에 대한 기계적 신뢰성(수명)이 25년 이상임을 보증할 수 있는 신뢰성 시험과 분석 기법에 대한 연구가 진행되었다.

1. 서 론

차단기(Switchgear)는 1890년대를 시작으로 이미 100년 이상 사용되어 왔으며, 절연기술로서는 기중절연으로부터 1980년대에는 뛰어난 절연 성능과 기기의 Compact화를 이유로 SF₆ 가스절연의 형태로 진보해 왔다. 그러나 SF₆ 가스는 1997년 지구 온난화 방지 교토(Kyoto) 회의에서 온실 효과가 큰 가스(온난화 계수 23,900)로 지정되어 배출 억제 대상이 되었다. 이에 중진분야에서는 SF₆ 가스를 대체할 절연방식으로 친환경 가스절연 방식과 고체절연 방식이 연구되고 있으며, 이중 Compact화가 가능한 고체절연 방식이 먼저 상용화를 시작하였다.

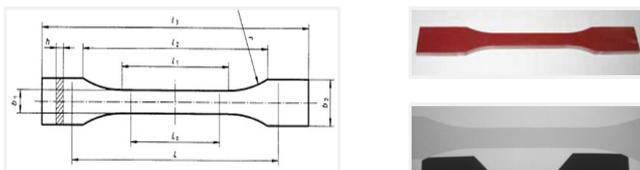
고체절연차단기(SIS)는 환경과의 조화, Compact화, 신뢰성, 안전성, 보수성 등 사용자의 요구와 사회적 요구에 대해 구체적인 기술적 과제를 목표로 개발이 추진되었으며, 본 논문은 이러한 기술적 과제 중 기계적 신뢰성 평가에 관한 연구내용이다. 고체절연차단기의 신뢰성 평가항목은 크게 기계적 신뢰성 평가와 전기적 평가로 구분된다.

최근 제정된 “25.8kV 가스 및 고체절연 친환경 개폐장치” 한전구매규격에는 “친환경절연 개폐장치(EGIS 및 SIS)에 사용되는 Epoxy 고체절연물은 JIS K 7115(또는 KS M ISO 899-1), JIS K 7118(또는 KS M 3058) 및 일본 전기협동연구 제 44권 제2호 가스절연기기 신뢰성향상방안 등을 참조하여 기계적 수명 25년 이상을 보증하는 신뢰성 데이터를 제출하여야 한다.”라는 항목이 포함되어 있으며, 시험항목으로 크리프(Creep) 시험과 피로(Fatigue) 시험을 지정하였다.

2. 본 론

2.1 Reliability(Life-Time) Test for Tensile Creep Stress

본 논문에서는 인장(Tensile Creep) 시험방법은 JIS K 7115의 기준을 준수 하였으며, 시험편은 <그림 1>과 같이 ISO 527-2:Type 1B에 따라 제작되었다. 또한 Creep 시험을 통해 수명을 산출하기 위한 시험방법 및 평가기법은 SIM(Stepped Isothermal Method)을 이용하였다. SIM은 경험적 이동인자(Shift factor)를 적용하므로 TTS(Time-Temperature Superposition) 기법의 WLF(Williams-Landel-Ferry) 이동인자로부터 오는 불확실도(Uncertainty rate)를 최소화 할 수 있으며, 하나의 시료에 Stress를 인가한 후 단계적으로 승온시켜 크리프 변형율(Creep Strain)을 측정하므로 시험편 간의 편차를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.



<그림 1> Test Piece (ISO 527-2 : Type 1B)

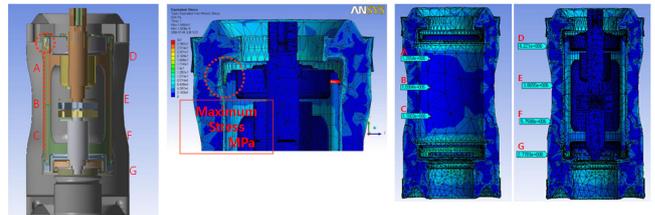
본격적인 SIM 시험에 앞서 가속스트레스수준(Accelerated Stress Level)을 결정하고 경험적 이동인자로부터 마스터 곡선(Master Curve)을 만들어내기 위해서 시험편에 대한 기본물성시험 및 Ramp&Hold 시험을 진행하였다.

<표 1> Comparison of Creep Tests and Estimation Methods

항목	장기 Creep 시험 (Conventional Creep Test)	시간-온도 중첩원리 (Time-Temperature Superposition)	단계 등온법 (Stepped Isothermal Method)
시료	1 개의 시료	온도 수준당 1개 (최소 3개의 시료/최소 3수준의 온도)	1 개의 시료 (1개의 시료/최소 5단계의 온도스텝)
최소 시험시간	10,000 시간 (약 1.2년)	3,000 시간(약125일)	34 시간
장기 크리프 예측가능시간	-	100년 이상	100년 이상
이동인자	없음	WLF 이동인자	경험적인 이동인자
시험방법	ASTM D 5262 KS K ISO 13431	ASTM D 2990 RS K 0022	ASTM D 6992 RS K 0023

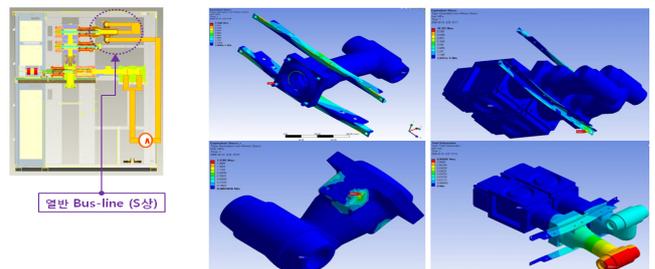
2.1.1 Definition of SIS Creep Stress in using condition

SIS의 사용 및 환경적 조건에서의 크리프 Stress를 정의하기 위해서 다음과 같은 시험과 해석이 이루어 졌다. 먼저 SIS의 사용조건에서의 열적 스트레스(Thermal stress)를 정의하기위해 온도상승시험을 진행한 결과 최대부하 2000[A]에서 기기 최고온도상승 ΔK가 59K로 측정되었다. 즉, 사용 환경 최고온도를 40℃라 할 때 최대부하조건에서 SIS의 최대 열적 스트레스는 약 100℃라 정의할 수 있다.



<그림 2> Thermal-Mechanical Stress

<그림 2>는 서로 다른 열팽창(Thermal expansion) 계수를 갖는 물질이 결합되어 있는 경우 온도변화에 의해 부피가 변하게 되며 이때의 차수 변화에 의해 발생하는 응력(Stress)을 해석한 결과이며, <그림 3>은 SIS의 자체 하중(自重)에 의해 발생하는 응력을 해석한 결과이다.



<그림 3> 자중(自重)에 의한 Mechanical Stress

이러한 실험과 해석을 바탕으로 SIM을 이용한 가속시험의 수준을 결정하고 최대스트레스(Maximum Stress)하에서의 수명을 평가하였다. 인장시험은 <그림 3>과 같이 Instron사의 시험기를 사용하였다.

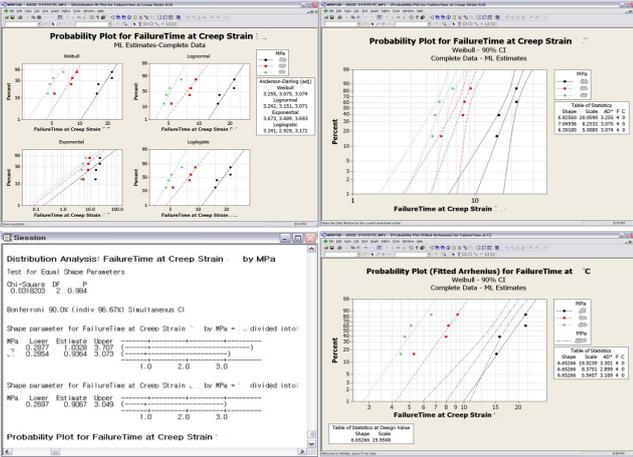
2.1.2 Reliability(Life-Time) Estimation for Tensile Creep

단계등온(Stepped Isothermal) 시험법을 이용하여 Creep Strain을 측정 한 후 Reference Temp.에 대한 경험적 이동인자를 적용하면 결과적으로 시료 한 개에 대한 Master Curve를 도출할 수 있게 된다. 도출된 Master Curve에서 SIS 시료의 고장관정기준(Failure level) X%에서의 시간을 산출하였으며, 이 시점을 고장시간(Failure time)으로 판정하였다.



〈그림 4〉 Tensile Creep Test Setting

〈그림 5〉에서는 SIM을 이용해 산출한 고장시간을 이용하여 Tensile Creep Stress에 대한 수명을 산출하는 과정을 보였다. A-D 적합도 검정을 통해 와이블(Weibull)분포를 가정하였으며, P-Value 및 Bonferroni 가설검정을 통하여 가속성 검정을 수행하였다.



〈그림 5〉 Life-Time Estimation for Tensile Creep

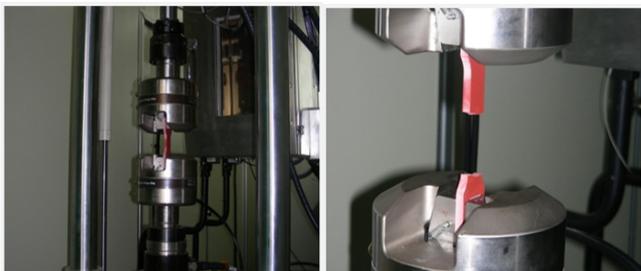
〈그림 6〉에 Tensile Creep에 대한 수명평가 결과를 보인바와 같이 두 가지 수명-스트레스 모델(Life-Stress Model)에 대해 모두 90% 신뢰수준에서 B₁₀ 신뢰하한 값이 25년 이상임을 증명하였다.

- ✓ Arrhenius Life-Stress Model
 - B_{10L} = 29.9 [year] at Max. Stress[MPa], 105[°C], 90[%] C.L
- ✓ Inverse Power Life-Stress Model
 - B_{10L} = 34.36 [year] at Max. Stress[MPa], 105[°C], 90[%] C.L

〈그림 6〉 Life-Time Estimation Results for Tensile Creep

2.2 Reliability Test for Fatigue Stress

피로(Fatigue) 시험은 차단기 규격 IEC62271-100에 정의된 차단기 동작회수 10,000회에 대한 기계적 피로에 대한 신뢰성을 검증하기 위한 시험으로 실험방법은 JIS K 7118의 기준을 준수 하고 시험편은 KS M 3036에 따라 제작되었다.

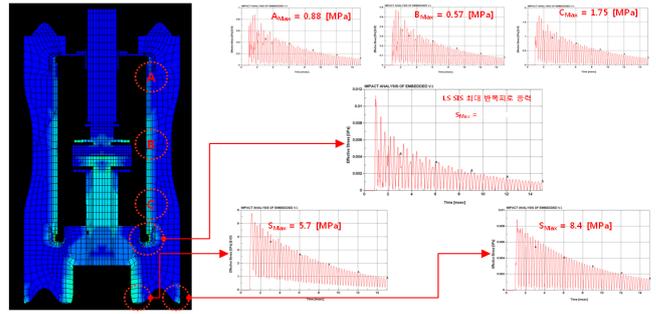


〈그림 7〉 Fatigue Test Setting

〈그림 7〉에 실험사진을 보였으며, MTS社의 피로 시험기를 사용하였다.

2.2.1 SIS Fatigue Stress during the Switching Time

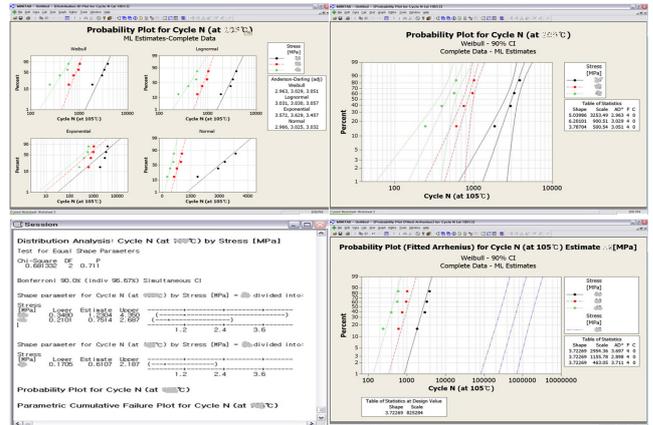
SIS의 Switching시 발생하는 기계적인 반복피로 스트레스를 정의하기 위하여 〈그림 8〉과 같이 해석을 수행하여, Switching 동작 시의 Maximum Fatigue Stress를 산출하였다.



〈그림 8〉 Thermal-Mechanical Stress

2.2.2 Reliability(Life-Time) Estimation for Fatigue Stress

〈그림 7〉과 같이 가속 반복피로시험을 진행하여 시험편이 파단 될 때까지의 횟수를 측정하고, SIS의 Maximum Fatigue Stress에서의 시험편이 파단 될 횟수를 통계적 기법을 사용하여 추정하였다.



〈그림 9〉 Life-Time Estimation for Fatigue

〈그림 10〉과 같이 SIS Maximum Stress하에서의 기계적인 피로 평가 결과가 IEC62271-100에 정의된 차단기 동작회수 10,000회 보다 충분히 크므로 신뢰성이 있다는 것을 증명하였다.

- ✓ Arrhenius Life-Stress Model
 - B_{10L} = 166,189 [cycle] at Max. Stress[MPa], 105[°C], 90[%] C.L
- ✓ Inverse Power Life-Stress Model
 - B_{10L} = 3,652,027 [year] at Max. Stress[MPa], 105[°C], 90[%] C.L

〈그림 10〉 Life-Time Estimation Results for Tensile Creep

3. 결 론

본 논문에서는 최근 제정된 “25.8kV 가스 및 고체절연 친환경 개폐장치” 한전주매규격에 “Epoxy 고체절연물에 대한 기계적 신뢰성(수명)이 25년 이상”임을 보증할 수 있는 신뢰성 데이터를 요구에 대응하기 위한 SIS의 기계적 신뢰성 평가 기법에 대한 연구가 진행되었다.

기계적 신뢰성 평가는 Creep Stress 과 Fatigue Stress에 대한 SIS의 신뢰성을 검증하는 시험으로 연구결과 SIS의 Maximum Creep Stress에 대한 기계적 수명은 90%신뢰수준에서 B₁₀ 신뢰하한 값이 약 30년 이상임을 증명하였고, Maximum Fatigue Stress에 대한 기계적 동작수명은 약 160,000회 이상으로 IEC62271-100에 정의된 차단기 동작회수 10,000회 보다 높은 것을 증명하였다.

위와 같은 평가결과를 바탕으로 개발된 SIS는 열적/기계적 스트레스에 대해 충분히 신뢰성이 있는 것으로 판단할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Sang-Sik Yeo, “Evaluation of Creep Behavior of Geosynthetics Using Accelerated and Conventional Methods, Drexel University, August 2007
 [2] ASTM D 6992, “Standard test methods for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method”