

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

논문
59P-2-13

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

이도훈[†] · 이석원* · 박석원* · 김영근** · 이종호***
(Do-Hoon Lee · Seog-Won Lee · Seok-Weon Park · Young-Geun Kim · Jhong-Ho Lee)

Abstract - In this paper, mechanical reliability(Life-time) estimation method for 25.8kV SIS(Solid Insulated Switchgear) has been studied. Recently enacted KEPCO's standard includes clause that have to submit a warrantable reliability data for life-time(over B10 25 years) of an epoxy-solid insulating material. Accordingly, this research was carried out on the ALT(Accelerated Life Test) and Life-Estimation method for SIS's insulating material.

Mechanical life-time estimation for SIS's insulating material is to verify reliability for tensile creep & fatigue stress, which is the major mechanical stress of SIS. This study proved that SIS's reliability for mechanical stress and established that confidence for estimation results in further verification test.

Key Words : SIS, Solid Insulated Switchgear, Reliability, Life-Time Estimation, Creep, Fatigue, SIM

1. 서론

차단기(Switchgear)는 1890년대를 시작으로 이미 100년 이상 사용되어 왔으며, 절연기술로서는 기중절연으로부터 1980년대에는 뛰어난 절연성과 기기의 Compact화를 이유로 SF6 가스절연의 형태로 진보해 왔다. 그러나 SF6 가스는 1997년 지구 온난화 방지 교토(Kyoto) 회의에서 온실 효과파가 큰 가스(온난화 계수 23,900)로 지정되어 배출 억제 대상이 되었다. 이에 중전분야에서는 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. [1]

최근 제정된 "25.8kV 가스 및 고체절연 친환경 개폐장치" 한전구대규격에는 "친환경절연 개폐장치(EGIS 및 SIS)에 사

용되는 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 포함되어있으며, 시험항목으로 크리프(Creep) 시험과 피로(Fatigue) 시험을 지정하였다.

2. 본론

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

본 논문에서는 인장(Tensile Creep) 시험방법은 JIS K 7115의 기준을 준수 하였으며, 시험편은 그림 1과 같이 ISO 527-2:Type 1B에 따라 제작되었다.

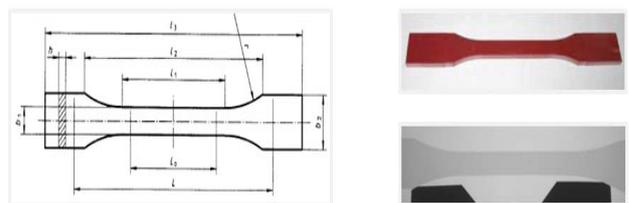


그림 1 가속시험용 시료 (ISO 527-2 : Type 1B)
Fig. 1 Test Piece for ALT (ISO 527-2 : Type 1B)

또한 Creep 시험을 통해 수명을 산출하기 위한 시험방법 및 평가기법은 SIM(Stepped Isothermal Method)를 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

* 비회원 : LS산전 전력연구소 수석연구원
** 정회원 : LS산전 전력연구소 부연구위원 · 공박
*** 비회원 : LS산전 전력연구소 연구소장 · 공박
† 교신저자, 정회원 : LS산전 전력연구소 주임연구원
E-mail : dhlee@lssis.biz
접수일자 : 2009년 8월 21일
최종완료 : 2010년 3월 27일
<본 논문은 본 학회 2009년도 하계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문지에 게재 되었음>

Stress를 인가한 후 단계적으로 승온시켜 크리프 변형률(Creep Strain)을 측정하므로 시험편 간의 편차를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. [2][3]

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. [4]

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, 사용환경 최고온도를 40℃라 할 때 최대부하조건에서 SIS의 최대 열적 스트레스는 약 100℃라 정의할 수 있다.

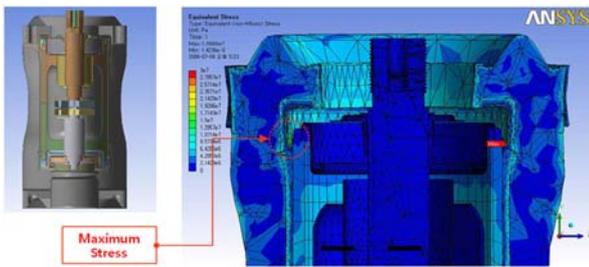


그림 2 온도변화에 따른 응력
Fig. 2 Thermal-Mechanical Stress

그림 2는 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 3은 SIS의 자중(自重)에 의해 발생하는 응력을 해석한 결과이다.

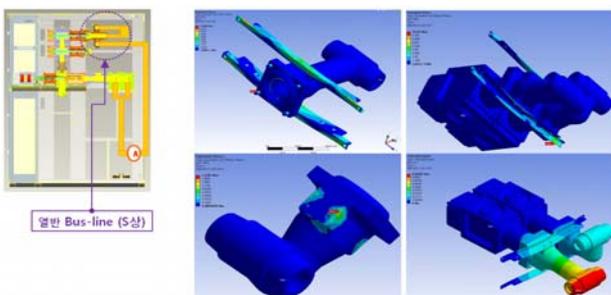


그림 3 자중(自重)에 의한 Mechanical Stress
Fig. 3 Mechanical Stress by self-gravity

위 해석결과에서와 같이 SIS의 크리프 Stress중 최대 응력 스트레스는 하중(自重)에 의한 영향보다는 열팽창에 의한 스트레스가 더 크다는 것을 알 수 있었다.

이러한 실험과 해석을 바탕으로 SIM을 이용한 가속시험의 수준을 결정하고 최대스트레스(Maximum Stress)하에서의 수명을 평가하였다. 인장시험은 그림 4와 같이 Instron社의 시험기를 사용하였다. [5]



그림 4 인장스트레스에 대한 SIM 시험 사진
Fig. 4 SIM Test Setting for Tensile Creep Stress

2.1.2 Reliability(Life-Time) Estimation for Tensile Creep

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

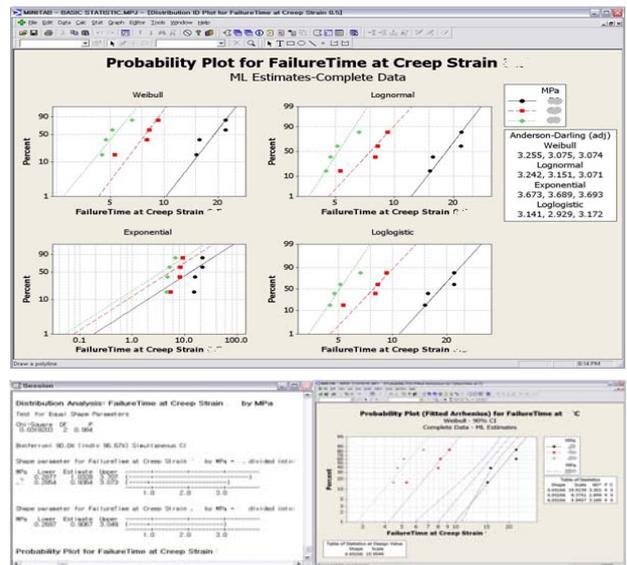


그림 5 Minitab을 이용한 크리프시험 결과에 대한 수명 분석
Fig. 5 Life-Time Analysis for Tensile Creep Using Minitab

그림 5에서는 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.

Arrhenius Life-Stress Model

$$\cdot B_{10L} = 29.9 \text{ [year] at Max. Stress, 90[%] C.L.} \quad (1)$$

Inverse Power Life-Stress Model.

$$\cdot B_{10L} = 34.4 \text{ [year] at Max. Stress, 90[%] C.L.} \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)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.

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 6에 실험사진을 보였으며, MTS社의 피로 시험기를 사용하였다. [6][7]



그림 6 반복피로 스트레스에 대한 시험 사진
Fig. 6 Test Setting for Fatigue Stress

2.2.1 SIS Fatigue Stress during the Switching Time

SIS의 Switching시 발생하는 기계적인 반복피로 스트레스를 정의하기 위하여 그림 7과 같이 해석을 수행하여, Switching 동작 시의 Maximum Fatigue Stress를 산출하였다.

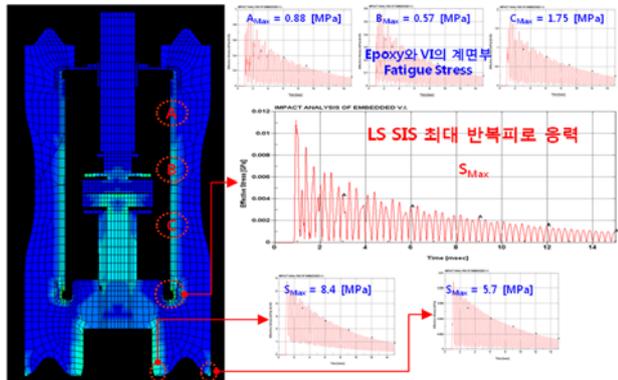


그림 7 Thermal-Mechanical 스트레스에 대한 해석 결과
Fig. 7 Simulation Results for Thermal-Mechanical Stress

2.2.2 Reliability(Life-Time) Estimation for Fatigue Stress

가속 반복피로시험을 진행하여 시험편이 파단 될 때까지의 횟수를 측정하고, SIS의 Maximum Fatigue Stress에서의 시험편이 파단 될 횟수를 그림 8과 같이 통계적 기법을 사용하여 추정하였다.

수식 (3)과 (4)와 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

$$\cdot B_{10L} = 29.9 \text{ [year] at Max. Stress, 90[%] C.L} \quad (3)$$

Inverse Power Life-Stress Model.

$$\cdot B_{10L} = 34.4 \text{ [year] at Max. Stress, 90[%] C.L} \quad (4)$$

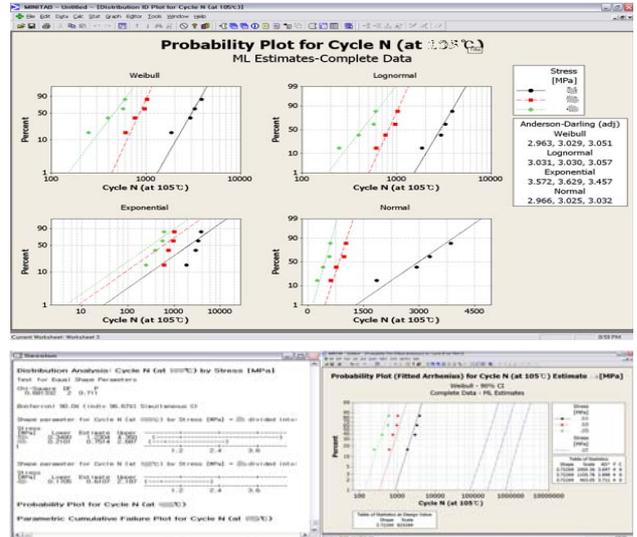


그림 8 Minitab을 이용한 반복피로 시험결과에 대한 수명분석
Fig. 8 Life-Time Analysis for Fatigue Test Results Using Minitab

2.3 Additional Test

이상의 Tensile Creep과 Fatigue Stress에 대한 수명평가의 결과는 시험용 시편에 의한 시험결과로 실제제품에 대한 검증을 위하여 그림 9와 같이 장기 Heat Cycle 시험 및 Embedded VI 차단부에 대한 기계적 수명시험을 진행하였다.

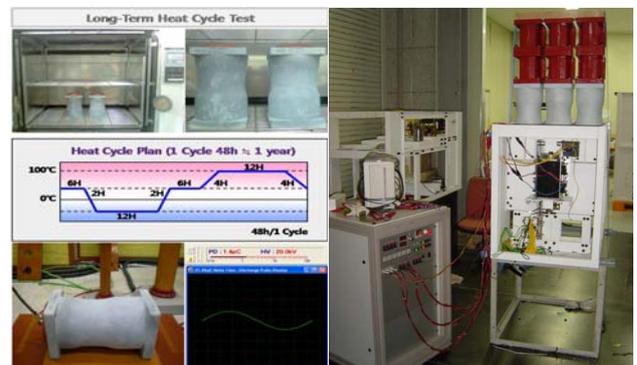


그림 9 장기 Heat Cycle 시험 및 Embedded VI 차단부 기계적 수명 시험
Fig. 9 Long-Term Heat Cycle Test and Mechanical Life Test for Embedded VI

장기 Heat Cycle 시험은Thermal-Mechanical Stress에 대한 검증시험으로 최악의 사용온도 조건을 -20℃~100℃로 산정하고 1Cycle을 48시간으로 설정하였다. 10/20/30 Cycle 후 IEC60270 방법을 이용하여 PD를 측정함으로써 제품의 전기적 이상 유무를 판정한 결과 전기적 성능에는 전혀 이상이 없음을 확인하였다. Embedded VI 차단부에 대한 기계적 수명 시험은 Switching시의 반복 Fatigue Stress에 대한 검증시험으로 15,000회 시험 후 육안검사, X-ray검사, 내진압, 임펄스, PD시험을 진행한 결과 모든 항목에서 규격치

이상으로 충분한 신뢰성이 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 제정된 “25.8kV 가스 및 고체절연 친환경 개폐장치” 한진구매규격에 “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. 또한 실제제품에 대한 추가 검증시험을 통하여 위의 평가 결과에 대한 신뢰도를 입증하였다.

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

참 고 문 헌

- [1] 마지훈, “25.8kV 가스절연 스위치기어(GIS)를 대체한 친환경 고체절연 스위치기어(SIS) 개발”, 대한전기학회 하계학술대회, 2009년, pp.1219-1220
- [2] Hyun-Jin Koo, " Creep Lifetime Prediction of Composite Geogrids using Stepped Isothermal Method", 한국신뢰성학회 학술발표대회 논문집, 2006년, pp.158-164
- [3] Sang-Sik Yeo, "Evaluation of Creep Behavior of Geosynthetics Using Accelerated and Conventional Methods", Drexel University, August 2007
- [4] 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"
- [5] JIS K 7115, "Plastics-Determination of creep behaviour-Part 1 : Tensile creep"
- [6] JIS K 7118, "General rules for testing fatigue of rigid plastics"
- [7] IEC 62271-100, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 100:High-voltage alternating-current circuit-breakers

저 자 소 개



이 도 훈 (李 都 勳)

1976년 3월 25일 생. 2004년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LS산전 전력연구소 주임연구원
E-mail : dhlee@lisis.biz



이 석 원 (李 錫 遠)

1967년 2월 16일 생. 2003년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원
E-mail : seakwon@lisis.biz



박 석 원 (朴 晫 遠)

1964년 10월 08일 생. 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원
E-mail : seokweonp@lisis.biz



김 영 근 (金 永 根)

1960년 7월 21일 생. 2007년 충북대학교 전기공학과 졸업(공학박). 현재 LS산전 전력연구소 부연구원
E-mail : youngk@lisis.biz



이 종 호 (李 鐘 昊)

1958년 4월 20일 생. 1991년 서강대 대학원 화학공학과 졸업(공학박). 현재 LS산전 전력연구소 연구소장
E-mail : jhleeb@lisis.biz