

XLPE 절연체에서의 열이력에 의한 전기, 물리적 특성 평가

이상진*, 심성익, 전승익
LS전선 중앙연구소 전력기술그룹

Estimation of Electrical & Physical Characteristics by Thermal History in XLPE Insulation

Sang-Jin Lee*, Sung-Ik Shim, Seung-Ik Jeon
Advanced R&D Center Electric Power Technology Group., LS Cable Ltd

Abstract - The aim of this study is to find out the effects of thermal aging condition on dielectric strength and degree of crystallinity of XLPE insulation. Thermal properties of XLPE insulation were investigated by DSC(differential scanning calorimetry) and dielectric strength were analyzed using AC BDV tester. Aging of XLPE samples were conducted through different four conditions. The degree of crystallinity and AC BDV were changed by thermal history. From these results, it can be suggested that DSC and AC BDV test are suitable for diagnostic method of extra high voltage XLPE cable.

3. 결과 및 고찰

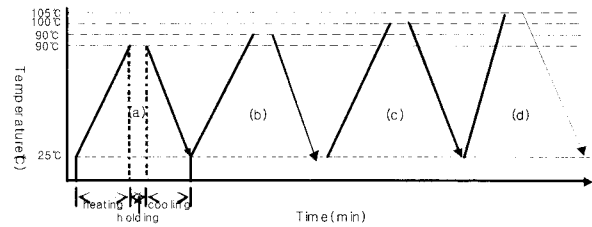
3.1 Heat Cycle Test와 모의시험

IEC 60840, CIGRE WG 21.03에 나타난, heat cycle 조건은 다음과 같다.

- Heat ON : 8hrs
- Heat OFF : 16hrs(자연냉각)
- 도체온도 유지시간 : Min 2hr/95℃~100℃
- 가압 : 2U₀
- Cycle : 20

1. 서 론

가교 폴리에틸렌(XLPE)은 열적-기계적 특성이 우수할 뿐만 아니라 높은 전기적 파괴 강도를 가지고 있어 전력 케이블의 절연 물질로 널리 사용되고 있다. 이러한 폴리에틸렌도 높은 전기적 스트레스에 일정기간 놓여지게 되면 절연파괴로 이어지게 되는데 최근 대도시 전력수요의 증가와 더불어 전력 케이블의 대용량화에 따라 케이블 절연사고가 미처게 될 사회적 경제적 손실은 상당할 것이다. 따라서 이러한 케이블 사고를 방지하기 위해서는 여러 열화 조건하에서 절연체의 수명을 예측하는 기술이 필요하다. 이러한 기술적 접근방법의 일환으로 최근 XLPE 절연체의 열적 환경에 따른 절연 재료의 특성을 연구할 수 있다. 초고압 절연체인 XLPE는 반결정성 폴리마로 분류된다. XLPE의 이러한 구조학적인 특성을 이용하면 제조공정에서의 가공조건 설정이나 제조 후 절연성능 평가시의 열적, 전기적 환경을 추정하는 것이 가능하다. XLPE는 압출, 가교, 냉각, 건조(de-gasing) 공정을 거친 후 케이블로서 완성된다. XLPE의 구조적 특성인 결정화도는 DSC를 이용한 분석 방법으로 조건에 따른 특성 평가가 가능하다. 구조적인 특성 변화에 따른 전기적 특성은 AC 파괴전압에 의한 파괴강도로서 성능평가가 가능하다. 이러한 열이력 특성 peak, 결정화도, 용융열 분율로서 열이력이 가해진 온도 구간에서의 결정화도의 변화와 AC 파괴 특성과의 상관관계를 분석할 수 있었다. 그리고 이러한 결과를 바탕으로 케이블 제조 공정 및 케이블 통전에 발생하는 열적인 분포에 대한 영향도를 알 수 있었다. 본 연구에서는 IEC 60840²⁾에서의 열적, 전기적, 스트레스에서의 케이블 성능평가를 바탕으로 하여 XLPE 절연체에 인가된 열적인 스트레스를 열이력 추정인 DSC 분석으로 측정하고, 온도 변화에 따른 전기적 특성 변화는 AC 파괴 시험 후 비교 평가하였다.



〈그림 1〉 모의 시험 시료의 열처리 방법

그림1. 은 모의 시험한 heat cycle test profile이며 24시간 동안 온도조건은 도체 통전온도 범위 내, 외의 80℃~105℃로 하였고, IEC60840 도체 통전조건과 유사하도록 모의하여 진행하였다.

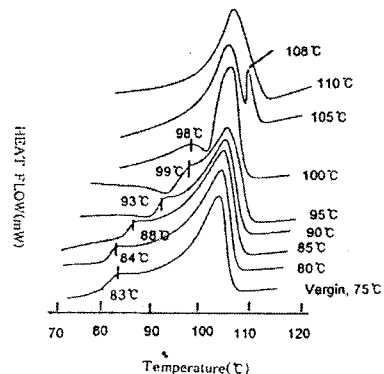
2. 본 론

2.1 시험 방법

DSC 분석기로는 온도조건에 따른 온도분포 및 결정화도, 용융열 분율의 물리적인 결과를 측정하였다. AC BDV 시험기로는 절연체의 온도 변화에 따른 절연파괴 전압의 특성변화를 알아보기 위해 모델 시편을 제작하여 특성 평가를 실시하였다. 시료 준비는 건조가 완료된 220kV XLPE 케이블을 50mm 길이로 자른 후 온도가 자동으로 조절되는 오븐에서 4가지 모의시험을 하였다. 모의 시험의 의미는 정상적인 제조 공정을 거친 신생 케이블 혹은 일반적인 도체 통전 조건 이상온도(over heating)시 (105℃)의 열적 환경을 모의하였다. 열처리 조건은 4가지 온도 조건별로 24시간씩 열처리를 하였다. 완료된 케이블은 50mm×50mm 크기로 자른 후 microtome으로 0.2mm 두께로 슬라이싱하여 측정시료로 준비하였다. DSC는 Perkin Elmer사의 DSC 7을 이용하였고, 무게는 8mg으로 했다. 측정온도의 상승속도는 10℃/min으로 했다. 시험은 각 5회 실시 후 평균값을 적용했다. DSC 측정 후의 열이력 분석 결과로서 온도특성 및 결정화도 특성을 구할 수 있었다. 결정화도는 시료의 온도설정 후에 DSC 분석기로 heating하여 열이력을 조건별 전처리 하였다. 전기적 파괴전압 시험은 PHENIX사의 AC Dielectric Tester를 이용하여 실험 하였다. 전극은 상부는 linch 반구, 하부는 2inch 평판전극을 사용했다. 시료 크기는 50mm×50mm이며, 전압상승 속도는 500V/sec로 절연파괴시 까지 상승시켰다. 파괴시험 후 절연 두께를 측정하여 파괴전계를 계산하였다. 시료의 수는 한 조건당 시편 30개를 파괴 시험 후 평가 하였다.

3.2 모의 등온에 의한 실제온도 추정

DSC 방법에 의한 열이력 측정은 반결정성 XLPE 절연체가 결정 용융 온도 주변에서 열적인 스트레스를 받았을 때 결정들이 재 배열 되어서 변화되는 용융 흡열 peak로부터 측정이 가능하다. 본 연구에서 사용된 XLPE 절연체에 가해진 실제의 온도를 추정하는 기법은 기존 열이력 추정 논문에서 보고 되었다.³⁾ 그 결과를 참고로 하여 온도 분포별 DSC 분석한 열이력 특성 결과는 다음과 같다.



〈그림 2〉 모의 등온에 의한 실제 온도

그림2. thermogram에서 알 수 있듯이 XLPE 절연체가 실제로 가해진 온도보다 3°C~4°C 정도 높은 온도에서 제 2peak가 나타남을 알 수 있다. 이는 중요한 의미를 가지며, 실제로 운전중이거나, 과통전 시험중인 XLPE 케이블에 있어서 정확한 절연체의 온도를 추정하는 근거가 된다. 그리고 이 개념을 발전시키면, 케이블의 통전용량 즉 케이블의 도체온도를 검증하는 수단으로서도 유용하게 이용될 수 있다.

3.3 열이력에 따른 결정화도 특성

결정을 함유하는 고분자는 다형 결정성 특성에 의해 성형조건 및 냉각조건에 따라 배열을 달리하기 때문에^[1] DSC의 측정을 하면 케이블 절연체에 인가된 열이력이 재 결정의 원인으로 작용하여 절연체의 결정구조를 변화시키게 되는 현상을 표1.에서 추정 할 수 있었다.

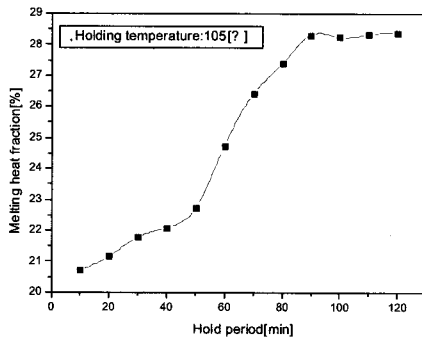
〈표 1〉 결정화도 측정 결과

Temperature(°C)	ΔH(J/g)	Crystallinity(%)
80	88.73	30.42
90	86.21	29.56
100	79.01	27.09
105	79.12	27.13

앞의 결과에서 볼 때, 신생 케이블 혹은 일반적 통전 조건인 80°C에서는 30% 정도의 결정화도의 값을 보이며, 통전 온도가 높아질수록 결정화도는 10%~20% 감소하는 결과를 보였다. 이는 절연체에 가해지는 온도가 낮을수록 분자들의 운동성도 감소하므로 이들 분자간의 거리가 서로 감소하여 가까워진 채로 분자들이 규칙적으로 배열을 하면서 결정을 생성하여 때문에 높은 결정화를 나타낸다. 그러나 온도가 높아지면 분자간의 거리가 멀어지게 되고 분자들의 운동성은 증가하게 되어 분자들의 규칙적인 배열들이 방해되어 결정화도가 낮아지게 된다. 이 결과는 고분자의 종류나 구조, 외력, 냉각속도, 결정화온도, 용해온도 및 시간 등의 물리적 조건에 따라 다르므로^[2] 제조 후 도체 통전 등 시험조건에서의 고온에 의한 특성 환경 변화를 고려하여야 한다.

3.4 등온으로 가해진 열이력의 시간 추정

XLPE 전력 케이블에 있어서 일반적인 운전조건 이상으로 전류가 통전 되었을 경우, 이에 따르는 시간의 추정 목적으로 이 실험을 실시하였다. 그림 3.에서의 시간에 따른 용융열 분율의 결과는 아래와 같다.



〈그림 3〉 용융열 분율 측정 결과

$$\text{용융열 분율(\%)} = \frac{\Delta H_0}{\Delta H_t} \times 100$$

Δ H₀ : 재결정 구간의 용융열
 Δ H_t : 전체 결정 용융열

XLPE 시료에 선정된 온도로 일정, 시간별, 열이력을 모의하여, DSC에 나타난 흡열 용융 peak를 관찰한 일련의 용융열 분율의 관계를 도출하였다. 이 결과로부터 시간이 늘어남에 따라, 열이력이 가해진 온도구간에서 형성 되는 결정의 양이 늘어남을 알 수 있었다. 또한 이번 실험을 통하여 특정 온도구간 결정의 양이 시간에 따라 점차적으로 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 방법으로 특정 온도별 추가적인 모의 실험을 실시 할 경우 인가된 열이력에 대한 머무르는 시간도 추정이 가능 할 수 있다. 향후 이러한 노력들은 전력케이블의 운전조건 혹은 사용조건을 규명하는 도구로 이용되리라 사료된다.

3.5 열이력 온도 조건에 따른 파괴전압 강도 특성 변화

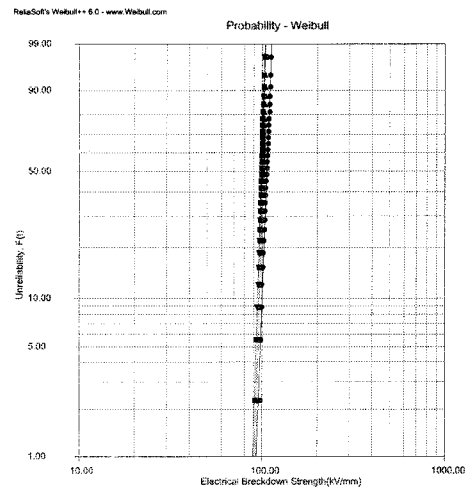
각 온도 조건에서 제작된 시편을 대상으로 절연파괴 시험을 실시하여 와이블 분포 곡선을 그린 후, 파괴확률 10%에서의 절연파괴 전압(E₁₀), 파괴

확률 63.2%의 2 계수 와이블 지수 n 및 평균파괴전압(E_{av})을 비교하여 그 결과를 표2.에 나타내었다.

〈표 2〉 온도별 절연파괴강도 비교

Temperature(°C)	전기적 특성 상수		
	E ₁₀ (kV/mm)	n	E _{av} (kV/mm)
80	100.3	107.3	105.5
90	97.1	101.2	100.1
100	96.1	100.4	99.2
105	95.0	99.8	98.5

온도 조건에 따른 AC 파괴전압특성은 신생 케이블 혹은 일반적 통전 조건의 특성인 80°C에서 가장 높은 특성을 보였다. IEC60840 도체 통전 및 다소 높은 온도 조건인 90°C~105°C 에서의 절연체의 파괴전압 특성값은 온도 조건에 비례하여 낮은 값으로 나타났다. 그림4.는 온도 조건에 따른 AC 파괴전압 시험 후의 와이블 분포 해석 결과를 보여 준다.



〈그림 4〉 열이력 온도 조건에 따른 BDV 특성 결과

이는 온도에 따른 즉 XLPE의 미세한 구조적 변화에 따른 전기적 특성의 차이는 분명히 존재하나, 도체 통전이나 운영상에서의 급격한 열이력 변화가 아닌 경우 절연 특성에는 치명적 영향이 없는 것으로 판단된다. 그러나 이상 조건의 운전이 장기화 되었을 경우 XLPE의 미세한 구조적 변화 이외에 열적 열화가 복합적으로 작용하기 때문에 절연 수명에 치명적 요소로 작용할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상에서와 같이 전력케이블의 통전조건 열이력을 모의하여 실험을 실시 하였다. 통전 조건에 따른 XLPE 절연체의 미세한 구조적 변화를 측정하였고, 전기적 특성과의 상관관계도 분석하였다. 각 온도 조건 변화에 따른 케이블의 파괴전압 특성을 모의한 실험을 종합 해보면 아래와 같다.

- 1) 열이력, 용융열 분율을 이용하면 케이블 선로의 운전조건 및 열적 환경을 추정하는 유용한 수단이 될 수 있다.
- 2) 통전 온도가 올라 갈수록 결정화도가 감소하였으며, 또한 절연파괴 강도도 저하되는 것으로 나타났다.
- 3) 케이블 성능이나 수명 평가시 이와 같은 사용 환경의 추정기법을 보완 하면 케이블 수명 예측 기술로도 유용한 방법이 될 수 있다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] R.J. Young, P.A. Lovell : Introduction to Polymerse". 2nd Edition, Chapman & Hall, pp. 276-290(1991)
- [2] IEC 60840 Specifications : Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30kV(Um=36kV)up to 150kV(Um=170kV)", 23 Aug.(1993)
- [3] Y.H Kim, S.J Lee, G.J. Lee, " Estimation of Thermal History in XL PE Insulated Cable during Heat Cycle Test", 1998 conference of KIE E, pp. 1425-1427(1998)
- [4] W.W. Wendlandt : Thermal Methods of Analysis", 2nd Edition, John-Wiley and SONS, New-York(1974)
- [5] K. Kobayashi, S. Nakayama, T. Niwa, "A New Estimation Method of Thermal History n Crosslinked", 4th ICPADM, pp. 678-681.(1994)