

XLPE 절연체에서의 열이력 추정 연구

이상진* 김영호, 김영성, 박완기
LG전선(주) 전력연구소

Study on the Estimation of Thermal History in XLPE Insulation

Sang-Jin Lee*, Young-Ho Kim, Young-Seong Kim, Wan-Ki Park
Electric Power Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

Abstract

XLPE is widely used as a main insulation in EHV power cables, deeply connected with thermal stress. In this study, the thermal history of XLPE insulation was examined using DSC(Differential Scanning Calorimetry). The principle is on the basis of the phenomenon that crystal in polyethylene is rearranged as it is annealed near/below the melting temperature. From the result, it was possible to define accurate temperature which was really applied on the XLPE insulation and this method was assured as a useful tool in characterization of thermal history in XLPE cable insulation.

1. 서 론

초고압 전력 케이블의 절연체인 XLPE는 반결정성 폴리마로 분류된다. XLPE의 특성을 이용하면 절연성능의 저하요인으로 알려진 열적 stress를 추정하는 것이 가능하다. 실제적으로 전력 케이블 시험 관련 규격들에서는 절연체에 직접 도달하는 열적 stress에 대한 직접적인 규제는 없다. 다만, IEC 840 규격^[1]에서는 주로 열적, 전기적 stress에서의 케이블 성능을 주로 평가하며, 인가 전류 및 전압과 도체의 온도만 규제 되어 있다.

본 연구에서는 실제 시험 환경을 설정하여 XLPE 절연체에 인가된 열적 stress를 열이력 추정 방법의 하나인 DSC(Differential Scanning Calorimetry)분석에 의해 측정하였다. DSC 방법에 의한 열이력은 반결정성 고분자인 XLPE 절연체가 결정 용융 온도 주변에서 열적인 stress를 받았을 때 결정들이 재 배열 되어서 나타나는 DSC 분석의 용융 흡열 peak로부터 측정 될 수 있으며 이러한 현상의 결과로서 열이력의 변화를 알 수 있다. 결정을 함유하는 고분자는 다형 결정성 특성에 의해 성형 조건에 따라 배열을 달리하기 때문에, DSC의 측정을 하면 케이블 절연체에 인가된 열이력이 재결정의 원인으로 작용하여 절연체의 결정구조를 변화시키게 되는^[2] 현상을 추정할 수 있다.

앞서 발표된 바 있는 연구에서는^[4] IEC 840 규격에서의 heating cycle voltage test에서 실제 시험 기간중 XLPE 절연체에 인가된 열적인 stress를 추정 연구하였다. 본 연구에서는 XLPE 시료에 선정된 온도로 일정 시간별, cycle별로 열이력을 모의하여, DSC에 나타난 흡열 용융 peak를 관찰함으로써 일련의 관계를 도출하였다. 또한 전력 케이블의 단락전류 및 과부하시에 절연체에 가해지는 열적 stress가 증가하는 점을 감안하여, 이 온도 구간에서는 더욱 더 세밀한 실험을 실시하였고, 인가된 열이력에 대한 시간도 추정 하고자 하였다. 이러한 노력들은 전력케이블의 운전조건 등을 규명하는 유용한 도구로 이용 될 수 있으리라 확신한다.

2. 본 론

DSC는 시차 주사열량계법으로 온도를 변화시켜 가면서 시료로부터 또는 시료로 흐른 열의 양을 측정하는 방법이다.^[3] 그림2-1은 DSC에 있어서의 온도 감지기(sensors)의 개략도이다. DSC의 측정원리는 측정하고자 하는 시료와 참조시료에 각각 별개의 가열장치를 설계하여 두 시료 사이의 온도차이가 측정되면 이를 보상하기 위하여 각기 다른 열에너지 input을 가하여 같은 온도로 유지시키기 때문에 보다 정밀한 측정이 가능하고 열용량의 절대값을 측정 산출 할 수가 있다.

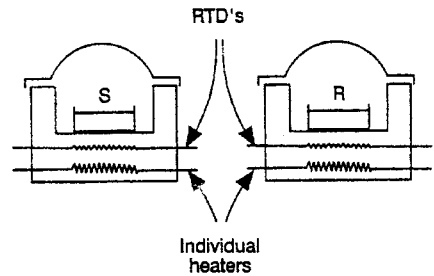


그림2-1 입력보상형 DSC 측정원리

그림2-2는 실험에 사용되어진 DSC 열분석기(DSC7, Perkin-Elmer사)를 나타내었다.

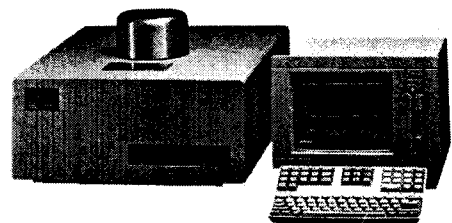


그림2-2 DSC 장치

3. 실 험

본 연구에서는 다음의 세가지 경우에 대해 모의 열이력 실험을 실시하였다. 가해진 등온도와 부peak의 변화, 등온도에서 머무른 시간, 용융점 이하에서 온도가 점진적으로 상승하는 경우와 최고점 온도에서 하강했을 때의 경우를 가정하여 실험을 실시하였다.

3.1 모의 등온에 의한 실제 온도 추정

XLPE 절연체에 가해진 실제의 정확한 온도를 추정하는 기법은 이미 기존 열이력 추정 논문^[4]에서 보고된 바 있고 그 결과는 그림3-1과 같다.

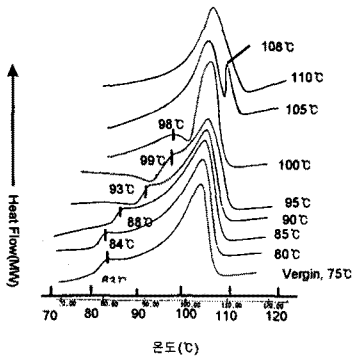


그림3-1 모의 등온에 의한 실제 온도(기존 결과)

그림에서 알수 있듯이 DSC 분석에서 부peak(제2peak)가 실제로 가해진 온도 보다도 3°C~4°C 높게 관찰되었다. 그러나, 95°C~110°C 구간에서는 주peak와 부peak가 겹쳐지는 구간으로 정확한 온도의 추정이 불가능 하였다. 이를 보완하기 위해 이 구간에서는 각 1°C 단위로 정밀하게 열이력을 준 다음, thermogram이 변화하는 추이를 관찰하였고, 그 결과는 그림3-2와 같다.

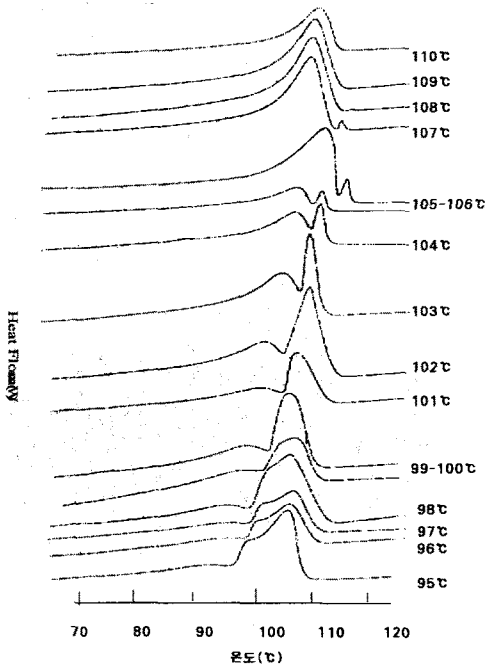
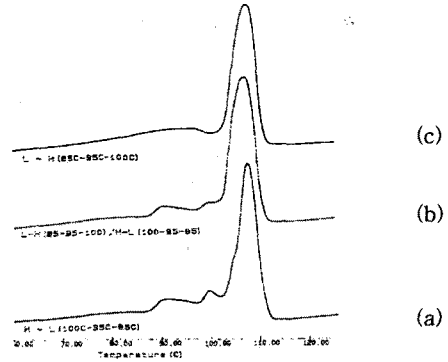


그림3-2 모의 등온에 의한 실제 온도

3.2 온도 상승, 하강에 따른 열이력 추정

전력 케이블이 열이력을 가진다는 것은 제조중 혹은 운전 중에 열이 가해진다는 것을 의미하고, 이는 열이력이 순간적으로 축적되는 것이 아님을 의미한다. 즉, 일련의 cycle을 가지며 열이 가해지는 경우가 보통이다. 이를 모의하기 위해 다음의 세가지 경우에 대해 모의 실험을 실

시하였다. 그 모의 시험의 조건과 결과는 그림3-3과 같다



- (a) 25°C → 승온(1hr) → 100°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 95°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 85°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 25°C
- (b) 25°C → 승온(1hr) → 85°C 유지(3hr) → 승온(1hr) → 95°C 유지(3hr) → 승온(1hr) → 100°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 95°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 85°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 25°C
- (c) 25°C → 승온(1hr) → 85°C 유지(3hr) → 승온(1hr) → 95°C 유지(3hr) → 승온(1hr) → 100°C 유지(3hr) → 냉각(1hr) → 25°C

그림3-3 온도 상승, 하강에 따른 열이력 추정

3.3 등온으로 가해진 열이력의 시간 추정

이 실험은 주로 전력케이블 장기 과동전 시험과 같은 케이블 시료에 있어서, 정확한 시험 조건 검증과 혹은 외적인 요인에 의해 일어날 수도 있는 overheat에 대한 시간을 추정 하고자 실험을 실시하였다. IEC 840에 규정된 XLPE 전력 케이블의 도체 허용온도는 95°C~100°C이다. 본 실험에서는 overheat 조건을 가정하여 105°C에서 시간별 추이에 따라 모의 실험을 실시하였고, 결과를 그림 3-4에 나타내었다.

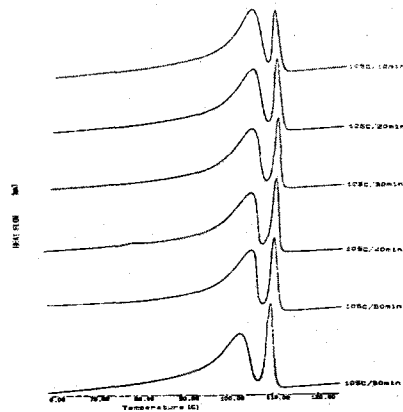


그림3-4 등온으로 가해진 열이력의 시간 추정

4. 실험결과 및 고찰

4.1 모의 등온에 의한 실제 온도 추정

XLPE는 용융점 이하의 온도에서 열이력을 받을 경우, 실제로 가해진 온도 보다도 3°C~4°C 높게 부peak가 나타났다. 그러나, 주결정의 용융 온도(106°C)와 부peak가 겹쳐지는 구간 즉 100°C~103°C구간에서는 부peak를 구

별하기가 어렵고, 다만, peak의 모양으로 실제온도를 추정하는 것이 가능하다. 이 구간에서의 특징은 대칭성 중 모양에서 점진적으로 주용융 peak 오른쪽으로 부peak가 shift 해 감에 따라 peak의 끝단이 sharp해지는 것이 특징이다.

4.2 온도 상승, 하강에 따른 열이력 추정

그림3-3에 나타난 바와 같이 (a)에 나타난 thermogram의 특징은 고온에서 하강 할 때의 그림이고, (c)는 저온에서 고온으로 상승하는 때를 모의 한 것이다. 그리고 (b)는 상승과 하강의 경우를 동시에 모의한 결과이다. 이 결과로부터 알 수 있는 것은 일반적으로 온도가 용융점 이하의 고점으로 상승 했다가 급냉 된 경우, 비록 XLPE에 있어서 재결정이 가능 한 여러 온도에 머물렀다 할지라도, 최고점 온도에 의한 열이력 만이 분석됨을 알 수 있었다(c). 그러나, (a), (b)에서 나타난 바와 같이 냉각의 속도를 조절하여, 최고점의 온도에서 일정시간 머무르게 할 경우에는 머무른 온도의 열이력이 부peak의 형태로 선명하게 나타남을 알 수 있다.^[5] 이는 XLPE 결정들이 열이력에 의한 annealing 효과에 의해 재결정이 일어나는 것을 보여주는 것이다.

4.3 등온으로 가해진 열이력의 시간 추정

XLPE 전력 케이블에 있어서 일반적인 운전조건 이상으로 전류가 통전 되었을 경우, 이에 따르는 시간의 추정 목적으로 이 실험을 실시하였다. 그림3-4에 나타난 결과를 요약하면 아래 표4-1과 같다.

표4-1 용융열 분율 추정 실험 결과

유지 시간(min)	용융열 분율(%)	유지 온도(℃)
10	14	105
20	16	105
30	15.9	105
40	17	105
50	17.8	105
60	19.7	105

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

ΔH_0 : 재결정 구간의 용융열

ΔH_t : 전체 결정 용융열

이 결과로부터 시간이 늘어남에 따라, 열이력이 가해진 온도 구간에서 형성되는 결정의 양이 늘어남을 알 수 있었다. 그러나, 이번 실험을 통하여 구간 결정의 양이 포화되는 시간을 규명하지는 못했지만, 이와 같은 방법으로 모의 실험을 실시 할 경우 열이력에 대한 머무르는 시간도 추정 가능 하리라 확신한다.

5. 결 론

이상에서와 같이 모의 열이력 실험을 실시한 결과, 가해진 등온도와 부peak의 변화, 등온도에서 머무른 시간, 용융점 이하에서 온도가 점진적으로 상승하는 경우와 최고점 온도에서 하강했을 때의 경우를 가정하여 실험을 종합해보면 아래와 같다.

1) 모의로 열이력을 추정하기 위해 온도 및 시간의 변화에 따른 실험을 실시한 결과 운전중인 XLPE 케이블의 단락이나 과부하에 의한 열이력 추정시 유용한 결과 도출을 할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

2) XLPE 절연체의 열이력은 DSC 분석에서 열에 대한, 시간, 냉각속도 등에 따라 그 특성이 달라진다.

3) XLPE 케이블의 도체의 온도 및 절연체의 온도 추정을 통해 향후 DSC를 이용한 XLPE 케이블의 열이력을 검증 및 확인할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC840 Specifications " Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV (Um=36 kV) up to 150 kV (Um=170 kV) " 23 AUG. 1993
- [2] R.J. Young, P.A. Lovell " Introduction to Polymers " 2nd edition, p276-290, Chapman & Hall, 1991.
- [3] w.w. Wendlandt, Thermal Methods of Analysis, 2nd Ed., John-Wiley and Sons, New York (1974)
- [4] 김영호, 이상진, 이진주 "Heat Cycle Test에서 XLPE 절연체에 인가되는 열이력의 추정", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(D), p1425-1427, 1998. 7
- [5] 佐伯富美子, "示差走査熱量計によるCVケーブルの熱履歴推定法", 昭和電線 Review, Vol.24, No3, p101-108, 1974[1]