

Heat Cycle Test에서 XLPE 절연체에 인가되는 열이력의 추정

*김영호, 이상진, 이근주
LG전선(주) 전력연구소

Estimation of Thermal History in XLPE Insulated Cable during Heat Cycle Test

*Young-Ho Kim, Sang-Jin Lee, Gun-Joo Lee,
LG Cable & Machinery Ltd. Electric Power Research & Technology Center

Abstract

The thermal history of XLPE insulated cable during heating cycle voltage test specified by IEC 840 was examined by DSC(differential scanning calorimetry) method, of which the principal is on the basis of the phenomenon that the crystals in polyethylene are rearranged as it is annealed near/below the melting temperature. From the result, it can be estimated that XLPE insulation near the conductor was exposed at the temperature of about 100°C with the electrical stress through the test.

1. 서론

전력 케이블 절연재료의 열화 요인으로는 열적, 전기적 및 기계적 stress와 각종 환경적인 인자들을 들 수 있다. 특히, 전기적인 stress와 열적인 stress가 복합되어 질 경우 절연성능이 크게 저하된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 이유로 인하여 IEC840 등 전력 케이블 관련 규격들에서는 주로 열적, 그리고 전기적 stress에서의 케이블 성능을 평가하고 있다. 그러나, 대부분의 시험에서는 인가전류, 전압과 도체의 예측 온도만이 규제되어 있을 뿐, 실제 절연체에 가해진 열적인 stress에 대해서는 언급되어 있지 않다.

본 연구에서는 IEC840 규격⁽¹⁾에서의 heating cycle voltage test (5.5.6항)에서 실제 시험기간 중 XLPE 절연체에 인가된 열적인 stress를 DSC 방법에 의해 추정하고자 하였다. DSC 방법에 의한 열이력 추정은 반결정성인 XLPE 절연체가 결정용융 온도 주변에서 열적인 stress (annealing)를 받았을 때 결정들이 재배열 되어 DSC 시험에서 용융 흡열 peak로 나타난다는 점을 이용한 것이다. 결정을 함유하는 고분자는 다형결정성 특성에 의해 결정 형성조건에 따라 결정 배열을 달리 하기 때문에⁽²⁾ 케이블 절연체에 인가된 열이력이 재결정의 원인으로 작용하여 절연체의 결정구조를 변화시키게 되고, 이를 DSC 시험에서 분석 함으로써 절연체에 인가된 열이력을 추정하게 된다.

이러한 원리를 이용하여 일정한 통전환경에 놓여 있던 케이블 시료를 대상으로 측정한 열이력과, 비슷한 환경을 모의한 시료의 열이력 간의 일정한 관계를 도출 할 경우, 실제로 heat cycle test에 사용되었던 XLPE 절연체의 열이력 추정이 가능 할 것으로 기대 되었고, 또한, 이러한 노력들이 운전중인 XLPE 케이블의 과부하나 급격한 단락전류에 의한 절연체의 열이력을 추정하는데 유용한 도구로 이용되어 질 수 있을 것으로 생각된다.

2. XLPE 절연체의 열이력 추정원리

DSC는 그림2-1에 나타난 바와 같이 온도에 따르는 미세한 열량의 변화를 측정하는 설비로서 결정성 고분자의 결정용융온도 및 결정화도를 측정하는데 널리 사용되고 있다⁽³⁾.

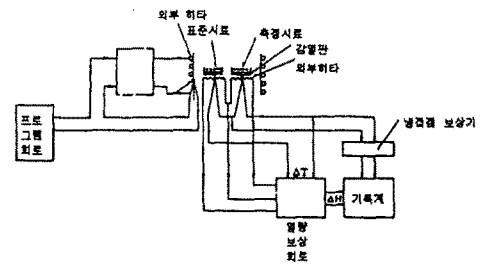


그림2-1 DSC 원리도

그림2-2는 전력 케이블에서 채취된 XLPE의 전형적인 DSC thermogram을 나타낸 것이다.

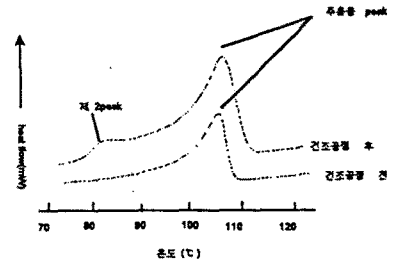


그림2-2 열처리에 의한 열이력 효과

그림2-2에서는 주용융점 이상의 온도로 머무르다 일정한 속도로 냉각된 경우(건조공정을 거치지 않은 경우)와 건조공정을 거친 케이블 절연체 간에 DSC thermogram을 보여준다. 두 thermogram의 비교로부터 확연한 차이를 발견할 수 있고, 건조공정을 거친 시료의 경우 실제 케이블이 놓여 있던 열적 환경을 대변하는 80°C 근처에 제2peak가 형성되어, 케이블이 받은 열이력을 표시해 준다. 또한 XLPE 케이블에서 열처리에 의한 제2peak의 특성은 재결정화가 가능한 온도에서 1분 정도면 나타나지만, 10분 정도의 시간이 지나야 충분히 thermogram이 안

정적인 형태를 보인다⁽⁴⁾. 이와 같은 근본적인 원리를 이용하여 XLPE 절연체의 열이력을 추정한다. 물론, XLPE 절연체의 열이력은 열에 대한 온도, 시간, 냉각속도 등에 따라 그 특성이 달라지게 된다⁽⁵⁾.

3. 케이블 시험조건 및 XLPE 열이력

3.1 Heat Cycle Test 와 모의시험

IEC840, CIGRE WG21.03에 나타난 heat cycle의 조건은 다음과 같다.

on 8hr
off 16hr(자연냉각)
도체온도 :
도체온도 유지시간 : 최소 2시간
가압 : 2U₀
Cycle : 20

이상의 조건에서, 케이블 도체에 가해진 온도 profile은 8시간에 걸쳐 heating 되어졌고, 최소 2시간에 걸쳐 95-100℃의 온도구간에 케이블 도체가 머물렀다. 그리고 16시간에 걸쳐 자연냉각 되어졌다. 이와 비슷한 상황을 모의하기 위하여 4가지의 경우를 온도가 자동으로 조절되는 오븐에서 모의하였다. 온도구간은 IEC840 규격에 정해진 구간의 상하한치, 이 구간을 넘어 과열되는 온도로 구분하였다. 그리고 냉각속도에 의한 차이를 알아보기 서냉과 급냉으로 구분한 모의시험도 수행했다. 이들에 대한 온도 profile은 그림3-1의 (b~e)와 같다. 물론 그림3-1 (b~e)의 경우는 도체 온도에 대한 온도 profile이 아니라 절연체 자체의 온도 profile이다. 이는 도체의 온도와 절연체 특히 내도반도전층 직상 절연체의 경우 도체와 같은 열적 profile을 가지는 것으로 가정했다.

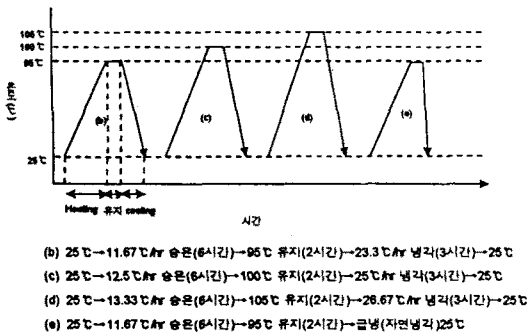


그림3-1 모의시험 시료들의 열처리 방법

Heat cycle test를 마친 154kV 2000SQ XLPE 케이블에서 채취한 시료를 (a)라 하고, 여기에서 절연체 내층(내부 반도전층 직상 부위), 중간층, 외층(외부 반도전층 직상부위) 3종류의 시편을 채취하였다. 그리고, (b), (c), (d), (e) 시료에서는 각각에 대해서 내부반도전층 직상 절연체 1종류만 채취하였다. 이렇게 하여 실제 케이블의 통전상태 때와 오븐에서 모의한 때의 XLPE 절연체 열이력의 차이점을 알아 보고자 하였다. 이 시험을 위해 Perkin Elmer DSC 7을 사용하였고, 측정시료량은 모두 7.8mg으로 했다. 측정온도의 상승속도는 10℃/min으로 했다.

그림3-2는 각각 이들에 대한 thermogram을 나타낸다.

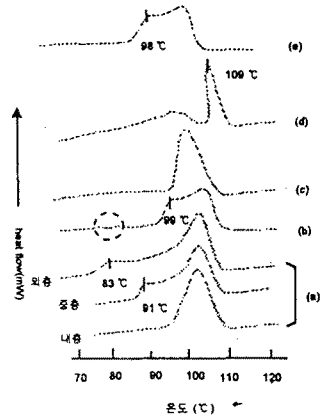


그림3-2 실.모의시험에 따른 DSC thermogram

3.2 XLPE 절연체의 열이력 모의시험

XLPE 절연체는 통전중 혹은 케이블 생산공정에서 열이력을 받는다는 점에 착안하여, 본 시험에 열이력의 추정 대상이 되는 154kV 2000SQ XLPE 케이블 vergin시료 즉 heat cycle test에 들어가기 전 시료를 대상으로 시간별, 온도별로 열이력을 모의한 다음 DSC를 측정하였다. 측정 조건은 2.1절의 조건과 동일하게 실시하였다.

먼저 온도를 100℃로 고정하고 100℃에서 5, 10, 15, 20, 40초 동안 유지시켜 DSC thermogram을 측정하였다. 그 결과는 그림3-3과 같다.

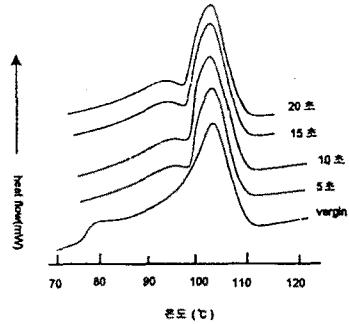


그림3-3 시간에 따른 DSC thermogram.

그림3-3에서 알수 있듯이 XLPE의 재결정 가능 온도 범위의 단 수초만에 기존에 XLPE 절연체가 가졌던 열이력이 변화되었다. 5초에서 이미 생산공정d에서 생성된 83℃의 제 2peak 소멸되고, 100℃에 대한 열이력이 나타나기 시작했다.

이와 같이 XLPE 절연체는 재결정 가능 온도 범위에서 수초 간 머무르는 것 만으로 절연체에 열이력이 나타남을 확인하고, 이번에는 시간을 고정하고 온도를 변형시켜 가며 열이력을 조사하였다. 온도의 결정은 XLPE 케이블의 일반적인 운전조건과 XLPE정 온도, 주유점 온도를 고려하여 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110℃로 정하였다. 절연체가 머무르는 온도의 시간은 앞에서 확인한 바와 같이 수초만에 이미 열이력이 관찰되므로, 1분이면 충분한 변화의 추이를 관찰할 수 있을 것으로 판단되어 1분으로 정했다.

이렇게 모의한 시료를 DSC를 사용하여 열이력을 측정하였고, 결과는 그림3-4에 나타난 바와 같다.

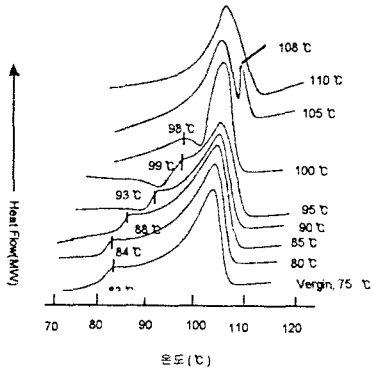


그림
3-4 온도변화에 따르는 DSC thermogram.

그림3-4의 thermogram에서 알수 있듯이 XLPE 절연체가 실제로 놓여졌던 온도보다 3-4°C 정도 높은 온도에서 제2peak가 나타남을 알수 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 이용될수 있다.

4. 결과 및 고찰

154kV 2000SQ XLPE 케이블을 IEC 840 § 5.5.6 규격에 의해 heat cycle test를 실시했고, 그 결과로 XLPE 절연체가 실제로 놓여졌던 온도는 주용융 peak의 모양이나 생성된 제2peak의 위치가 오븐 모의시험, 온도변이, 시간변이를 모의하여 시험한 결과와 비교하여 볼 때 절연체가 시험 당시 놓여졌던 온도는 내도직상이 100°C, 중간층이 88°C, 외층은 80°C이하로 추정되어진다.

시간변이를 모의한 XLPE DSC thermogram에서 5초만에 열이력이 나타난 것은 운전케이블이나 과통전시험 등에서 과부하에 의한 도체온도의 상승이나, 단락에 의한 도체온도의 상승을 추정하는 유용한 도구로 사용되어 질수 있는 가능성을 보았다.

XLPE 절연체의 열이력에 의해 생성된 제2peak는 실제로 자신이 놓여졌던 온도보다도 3-4°C 높은 위치에서 나타났다. 그러나 100°C의 경우는 98°C로 낮은 위치에 제 2peak가 생성되고, 주용융 peak는 종모양으로 보다 sharp하게 나타났다. 105°C의 경우는 제2peak가 주용융 peak보다도 높은 위치에서 나타났고, peak모양도 매우 sharp하게 나타남을 알수 있었다. 110°C이상의 온도에 놓여졌을 경우 이 온도 이하에서 생성된 열이력이 완전히 사라졌다. 따라서 이 온도 이후에는 냉각조건에 의해 열이력이 나타난다. 냉각조건에 의한 열이력의 변화는 (b)와 (e)의 DSC thermogram을 관찰하면 냉각될 때 생긴 열이력이 (e)에서는 나타나지 않지만, (b)에서는 관찰됨을 알수 있었다.

결국 열처리 된 XLPE 절연체의 추정 가능한 온도는 재결정이 일어날 수 있는 온도와 주용융점 근방 까지에서만 가능하며, 주용융점 이상에서는 정확한 온도를 추정할 수는 없고 단지 그 온도 이상으로 존재했다는 근거만을 제시할 수가 있다.

5. 결 론

1) DSC를 통한 XLPE 절연체의 열이력을 이용하여 과통전시험에 사용되었던 154kV 2000SQ

XLPE 케이블 절연체의 도달 온도를 추정할 수 있었고, 이를 통해 정확한 조건으로 시험이 진행된 것을 검증할 수 있었다.

2) 온도, 시간 변이를 이용한 모의시험 결과로 운전 중인 XLPE 케이블의 단락이나 과부하에 의한 사고를 검증하는 유용한 수단으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC840 Specifications " Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV ($U_m=36$ kV) up to 150 kV ($U_m=170$ kV) " 23 AUG, 1993
- [2] R.J. Young, P.A. Lovell " Introduction to Polymers" 2nd edition, p276-290, Chapman & Hall, 1991.
- [3] Edith A. Turi, "Thermal Characterization of Polymeric Materials, p256-257, Academic Press, 1983
- [4] Moret-sur-loing, "Optimization of physical and chemical procedures ageing, insulation for power cables", p481-487, 25-29 June, Fourth international conference on insulated power cable, Jicable, 1995
- [5] 佐佰富美子, "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