

PL법 대응을 위한 전력케이블의 열 충격 및 절연파괴 특성

(The Properties of Breakdown and Test for Resistance to Cracking of Power Cable for PL Countermeasure)

김영석* · 송길목 · 김선구

(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Sun-Gu Kim)

한국전기안전공사 전기안전연구원

(Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation)

Abstract

It is impossible to database(DB) the patterns of cable events and cause analysis of faulted cable because the product liability(PL) law have been enforced in Korea, since 2002. In additions, simulation and pattern of cable events are needed for DB system under accelerated deterioration. In this paper, we tested for resistance to cracking of cable below the 22.9kV class due to thermal stresses. This method of exam is following IEC 60811-3-1(Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables). First of all, set the cable in the thermal stress instrument, temperature changed from -20 degree to 120 degree. After thermal stress, we observed a surface crack of cable through microscope and carried out AC withstand voltage test.

1. 서론

2002년부터 국내에서는 제조물책임(PL)법이 시행되고 있으며, 제품사고 발생에 따른 제조물 책임 소송과 PL 보험사고 발생 건수(2002년 대비 432%증가) 등이 해마다 증가되고 있다[1]. 그러나 PL소송과 PL보험건수가 전 산업분야에 확대되어 있는 것은 아니며, 특히, 중전기기(변압기, 차단기, 전력케이블 등) 부분에서는 PL 인식 부족으로 인해 활성화되지 못하고 있다[2]. 이런 이유로는 전자기기 사고 시의 정전 등에 따른 사용자 불편, 원인규명까지의 시간적 경제적 비용, 전자기기에의 PL적용 여부 등의 인식부족 등이 있다. 또한 사고원인 규명 전에 쌍방향의에 의한 사건 종료 등으로 PL법이 제대로 적용되지 못하고 있다. 따라서 국제화시대의 PL 중요성과 피해자의 권익보호를 위해서는 PL발생 시의 전자기기 사고의 대처방안 및 정확한 원인규명이 필요하다 하겠다.

국내에서의 전자기기의 사고는 설비의 안전점검, 설비 교체 및 유지관리에도 불구하고 사고가 줄어들지 않고 있는 상황이다[3-5]. 한국전기안전공사 통계 자료에 의하면[6], 저/고압 케이블에서 발생하는 전력케이블 사고는 총 328건이 발생하였다. 특히 특/고압 케이블은 수트리 발생, 접속 불량, 절연물 자체의 결함 등에 의해 사고가 발생하고 있다. 일례로, 그림 1은 전력케이블 헤드에서 사고 난 사례를 나타낸다. 사고 형태는 전력케이블과 전력케이블 헤드의 접속 불량(시공불량)에 의한



그림 1. 소손된 전력케이블헤드
Fig. 1. An event in cable head

갭(gap)이 발생하여 전계 집중에 따른 절연 파괴사고로 추정할 수 있다. 사고원인으로는 작업자의 시공불량에 의한 사고의 가능성이 크며, 장시간 외부 노출에 따른 열 충격에 의한 전력케이블 열화도 배제할 수 없다. 일반적으로 전력케이블의 사용수명은 약 30년으로 절연등급이 높으며, 열악한 환경 외에는 사고 발생이 적지만, 전력케이블 절연물의 결함에 의한 사고가 종종 발생하고 있다. 또한 전력케이블 절연물의 결함에 의한 전기 사고는 PL법이 적용되며 정확한 사고원인 규명과 PL 분쟁 해결의 사고 원인규명의 데이터베이스화도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 전력케이블에서 발생할 수 있는 사고를 모의하기 위해 열 충격 등에 의한 절연물의 가속 열화 실험 따른 케이블의 특성과 사고 시의 PL 대처방안에 대한 검토를 수행하였다.

2. 전력케이블의 열 충격 시험

2.1) 전력케이블 열 충격 시험방법

전력케이블은 국내에서 제작되어 현재 많이 이용되고 있는 6.6kV급과 22.9kV급 단상 전력케이블을 사용하였으며, 표 1에 사양을 나타낸다. 케이블의 절연재료는 동일하게 가교폴리에틸렌(XLPE)이며, 동일 규격의 3회사(A, B, C cable) 제품을 선정하여 비교하였다.

표 1 사용된 케이블의 사양

Table 1. The parameters of power cable

Type	Nominal section [mm ²]	Insulation thickness [mm]	Sheath thickness [mm]
6/10kV CV cable	35	3.4	1.6
22.9kV CNCV cable	60	6.6	3.0

시험은 열 충격시험에 따른 XLPE의 특성변화를 살펴보기 위해 PVC 외피와 차폐도체 등을 모두 제거하였으며, 길이는 600mm로 하였다. IEC 60811[7]에 의한 열충격 시험을 수행하기 위한 시험장치의 개략도를 그림 2에 나타낸다. 열 충격 시험기는 -60~150℃까지 온도 가변이 가능한 장치이다. 먼저 6.6kV급과 22.9kV급 전력케이블을 각각 10개씩 열 충격 시험기 내부에 배열하였으며, 제어기를 통해 온도를 그림 3과 같이 120℃에서 -20℃까지 변화시켰으며, 각각 1시간씩 유지도록 하여 총 500cycle 동안 가속열화시켰다. 열 충격 시험 후, 전력케이블 수축율은 IEC

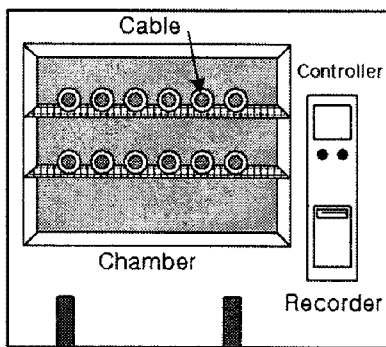


그림 2 열충격 시험 개략도

Fig. 2. The diagram of test for resistance to cracking

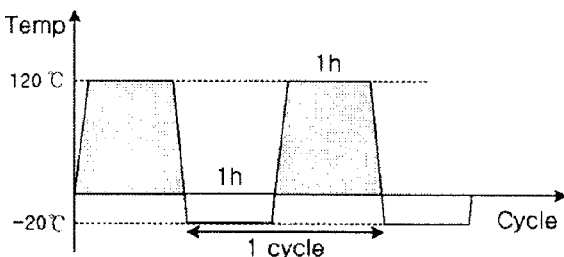


그림 3. 열 사이클

Fig. 3. Cycle of test for resistance to cracking

60811에 의해 1)식으로 계산하였다. 여기서 L1은 초기 길이, L2는 수축된 길이를 나타낸다.

$$\Delta L = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

2.2) 시험결과

그림 4와 5는 6.6kV급 및 22.9kV급 A 케이블의 열 충격 시험 후의 변화된 형태를 나타낸다. 그림 4에서의 전력케이블 변화를 살펴보면, 정상상태에 비해 250cycle과 500cycle 후의 케이블은 XLPE의 변색이 관측되었지만, 표면의 크랙, 열 수축현상은 거의 관측되지 않았다.

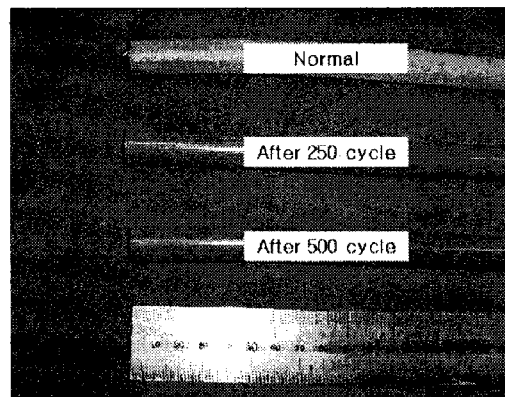


그림 4. 열 충격 시험후의 6.6kV급 전력케이블

Fig. 4. Deteriorated 6.6kV class power cable after testing for resistance to cracking

그림 5의 22.9kV급의 전력케이블 경우는 그림 4와 동일하게 XLPE의 변색은 관측되었지만, 표면의 크랙은 관측되지 않았다. 하지만, 열 사이클 횟수에 따라 길이 방향으로 심각하게 수축되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 6에 22.9kV급 A 케이블의 수축 길이와 수축율을 나타낸다. 수축 길이와 수축율은 250cycle과 500cycle 5개씩을 측정하여 평균값을 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 250cycle후의 수축 길이는 평균 12.6mm였으며,

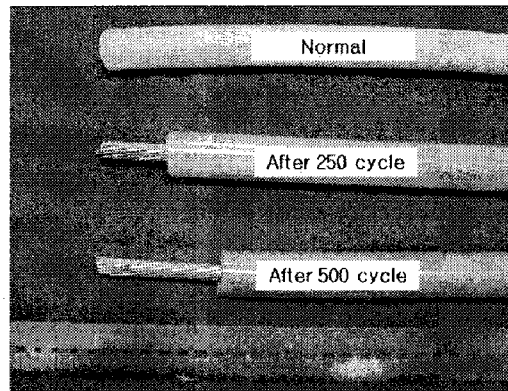


그림 5. 열 충격 시험후의 22.9kV급 전력케이블

Fig. 5. Deteriorated 22.9kV class power cable after testing for resistance to cracking

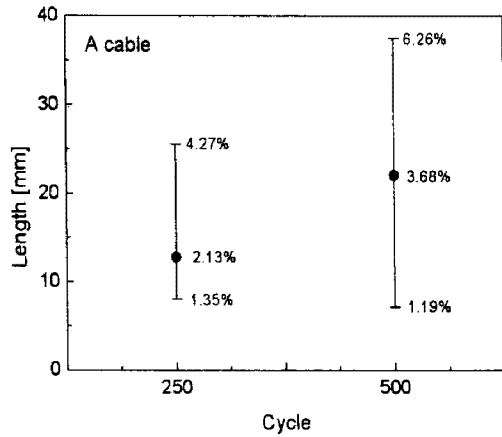


그림 6. A 케이블의 수축길이와 수축율
Fig. 6. Reduction length and rate of A cable

2.13%의 수축율을 보였으며, 500cycle후에는 평균 21.5mm 이며, 3.68%의 수축율을 나타내었다. 특히 500cycle후의 시료는 에러바의 범위가 거의 2배 이상씩 차이가 나타났다. 시료에 따라 에러바가 크게 나타났지만, 열 충격 시험에 의한 A 케이블의 변화가 심하게 나타난 것을 알 수 있다.

그림 7은 250cycle후, 22.9kV급 각 케이블의 열 충격 시험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 A 전력 케이블회사의 제품이 열 충격의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있고 B와 C cable의 경우는 각각 열 수축율이 0.93%, 0.64%였으며, 열 충격에 의한 영향이 경미한 것을 알 수 있다.

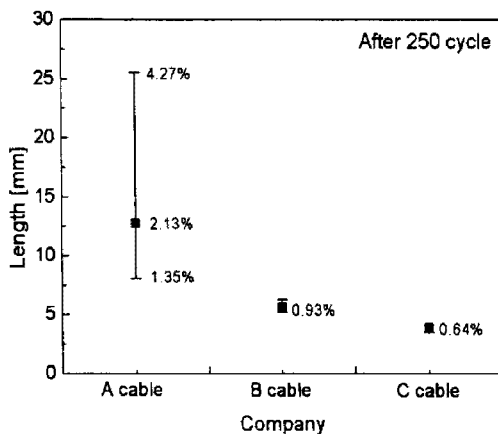


그림 7. 250 cycle후, 각 케이블의 비교
Fig. 7. The comparison of each 22.9kV class power cable after 250 cycles

이상의 열 충격 시험을 통해, 전력케이블 헤드 접속 부분의 시공불량에 의한 전력케이블 사고뿐만 아니라 제품불량에 의한 전력케이블 소손에 의해 사고가 발생할 가능성이 있다는 것을 추측해 볼 수 있다.

3. 전력케이블의 절연파괴 특성

3.1) 전력케이블 시료제작 및 실험

열 충격 시험에 의해 가속 열화 된 케이블의 절연 내력 특성을 살펴보기 위해 그림 8과 같이 케이블을 제작하였다. 시료는 전력케이블 길이를 감안하여 6.6kV급만 대상으로 하였다. 왜냐하면 전력케이블 길이가 짧게 되면, 22.9kV급 전력케이블은 관통파괴가 아닌 연면 방전이나 기중방전이 발생하기 때문이다. 먼저, 전력케이블 연면 방전을 방지하기 위해 열 수축 테이프를 이용하여 일정한 경사를 가지는 형태로 제작하였으며, 가장자리 부분에서는 전력케이블 헤드 캡으로 보강하였다. 또한 전력케이블 가운데 부분에 전극을 설치하여 접지단자로 사용하였다. 제작된 케이블은 그림 9와 같이 챔버 내에 설치하고 절연내력 실험을 수행하였다. 이때 고전압 인가는 최대 200kV까지 가능한 고전압 장비를 이용하였으며, 1kV/sec씩 상승시켰다. 또한 절연파괴 시의 전력 케이블 사고 패턴은 고속카메라(Max. 10,000fps, MIKROTRON)를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 이때 주위온도는 27도이며, 습도는 60%였다.

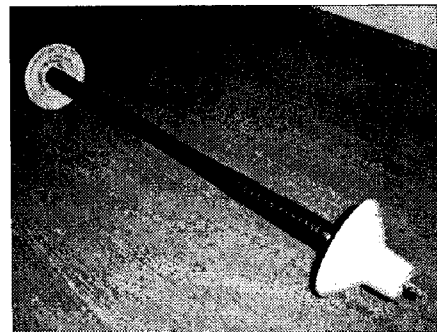


그림 8. 전력케이블 단말처리 시료
Fig. 8. The cable sample for breakdown test

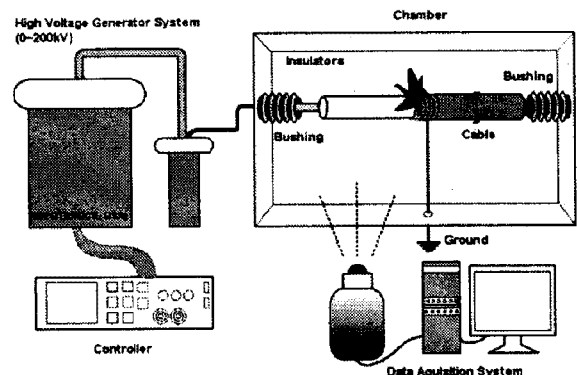


그림 9. 절연파괴 실험개략도
Fig. 9. Breakdown test diagram of power cable

3.2) 실험결과 및 검토

그림 10은 6.6kV급 A cable의 절연파괴 전압을 나타낸다. 정상상태에서의 절연파괴 전압은 약 88kV였다. 보고되고 있는 PE계열의 절연파괴 전압은 20~30kV/mm 이기 때문에 절연두께가 3.4mm인 케이블의 절연파괴 전압과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 또한 열 충격

시험에 따른 각 열 cycle마다의 절연파괴 전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이는 본 실험의 온도 가변범위가 XLPE 가교시의 온도 180°C이하이며, 절연파괴에 영향을 줄 수 있는 결함이나 보이드(void)가 형성되지 않았기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.

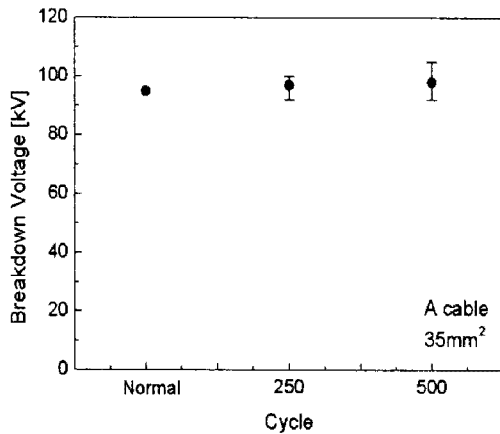


그림 10. 열 cycle에 따른 전력케이블의 절연파괴 전압
Fig. 10. Breakdown voltage of power cable according to thermal cycle

그림 11은 정상상태의 시료의 절연파괴 시의 고속카메라로 촬영한 사진을 나타낸다. 케이블의 절연파괴는 연면 방전이 아닌 관통 파괴가 일어났으며, 그림 (b)에서 초기 불꽃이 발생한 후, 확대되어 소멸되는 형태를 나타내었다.

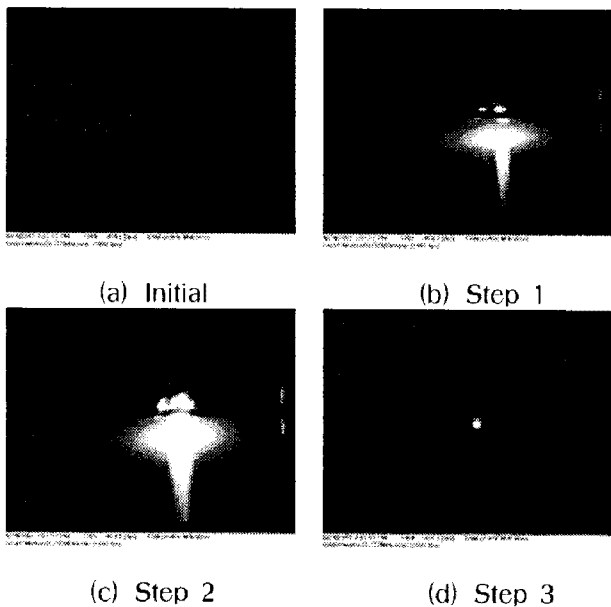


그림 11. 전력케이블의 절연파괴 이미지 사진
Fig. 11. Breakdown images of power cable

4. 결론

전력케이블의 열 충격 시험에 의한 특성변화를 살펴 보았으며, 다음과 같은 결과를 얻었다. 6.6kV급 A 전력

케이블의 경우에는 열 충격에 의한 XLPE의 변색은 관측되었지만, 열 수축변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 22.9kV급 A 전력케이블에서는 절연재료 표면의 크랙은 관측되지 않았지만, 변색되고 길이방향으로 심하게 수축되었다. 수축된 길이는 250cycle 후, 평균 12.6mm, 500cycle 후에는 21.5mm가 수축되었다. 따라서 열 충격에 의한 A 케이블의 열 수축의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 A 케이블은 비교한 B와 C 케이블보다 열 충격에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 이는 전력케이블 결함에 의한 전력케이블 헤드의 사고 발생 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

6.6kV급의 전력케이블의 절연파괴 전압은 88kV 정도였으며, 보고되고 있는 PE 계열의 절연파괴 전압인 20~30kV/mm와 거의 유사한 파괴값을 가졌다. 또한 열 충격 시험에 따른 각 열 cycle마다의 절연파괴 전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이는 본 실험의 온도 가변범위가 XLPE 가교시의 온도 180°C이하이며, 절연파괴에 영향을 줄 수 있는 결함이나 보이드(void)가 형성되지 않았기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.

따라서 이와 같은 전력케이블 사고 발생 시에는 일반적인 시공불량에 의한 사고뿐만 아니라, 케이블 자체의 결함여부도 함께 검토하여 사용자의 피해를 최소화 시킬 수 있는 방향과 PL법 적용에 따른 적절한 보상이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 한국피엘협회, "제조물책임(PL) 사고 예방을 위한 기술적 지원방안, 보고서, 2006.
- [2] 중소기업청, "제조물책임(PL) 대응매뉴얼-전기·전자제품분야, 보고서, 2006.
- [3] Carlos Katz and Michael Walker, "Evaluation of Service Aged 35kV TR-XLPE URD Cables", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp.1-6, 1998.
- [4] G.Katsuta et al, "Influence of Defects on Insulating properties of XLPE Cable, Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.485-489, 1991.
- [5] Jean-Pierre Crine, "Electrical Aging and Breakdown of Crosslinked Polyethylene Cables", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.22-26, 2002.
- [6] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", 14th edition, pp. 7-24, 2005.
- [7] IEC 60811, "Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables.