

PL법 환경하에서 열 충격에 따른 전력케이블의 재료분석 및 사고위험성

論 文
57-1-14

The Accident Hazard and Material Analysis of Power Cable due to Thermal Stress under PL System

金榮錫* · 宋佶穆* · 鄭鎮洙* · 鄭鍾旭* · 金善球* · 金相賢**

(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Jin-Su Jung · Jong-Wook Jung · Sun-Gu Kim · Sang-Hyun Kim)

Abstract - It is impossible to database(DB) the patterns of power 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 power 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). From the results, The 22.9kV calss A power cable was discolored on the surface and significantly reduced in the longitudinal direction. As the thermal weight properties of A power cable was definitely varied, we are able to guess the problem of manufacture. If the cable was defect by the manufacture, the victims would be able to claim for damage in the PL system.

Key Words : Product liability, Power cable, Resistance to cracking, Thermal stress, Accident hazard

1. 서 론

제조물책임(Product Liability, 이하 PL)법은 2002년 7월부터 국내에서 시행되고 있으며, 대기업뿐만 아니라 중소기업에서도 자사제품에 대한 신뢰성과 제품향상을 위해 많은 관심을 가지고 있다. 실제로 국내에서 제품사고 발생에 따른 제조물 책임 소송과 PL보험사고 발생 건수(2002년 대비 432%증가) 등이 해마다 증가되고 있으며, 미국의 경우는 기업들의 설문조사를 통해 기업 활동에 가장 어려움으로 PL 소송을 들었으며, 전체 35%를 점유하였다[1-3]. 하지만, 전기산업분야에서의 PL에 대한 인식과 대응전략은 가전제품, 의료기기, 자동차 등의 분야에 비해 현저하게 떨어지고 있다. 특히, 중전기(변압기, 차단기, 전력케이블 등) 부분에서의 PL은 인식이 더욱 부족하고, 화재사고, 설비사고, 인명피해 및 복구에 많은 어려움이 있으며, 사고 발생 시에는 경제적 피해뿐만 아니라 모 기업의 주가하락 등의 기업이미지에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 사고원인의 규명에 많은 시간과 비용이 소요되고 원인분석 결과에 대한 불확실성과 전문인력의 부족 등의 어려움이 있으며, 전력기기 사고 시의 정전 등에 따른 사용자 불편, 쌍방향의에 의한 사건 종료 등으로 PL법이 제대로 적용되지 못하고 있다. 국제화시대에서는 소비자 중심으로 바뀌고 있기 때문에 PL이 중요한 요소를 차지하며, 국내에서는 피해자의 권익보호를 위해 PL교육과

공제보험, 상담센터 등이 서비스되고 있다. 하지만, 전력기기 사고 발생 시의 대처방안 및 정확한 원인규명, 데이터베이스화가 부족한 실정이다.

국내에서의 전력기기의 사고는 설비의 안전점검, 설비 교체 및 유지관리에도 불구하고 사고가 줄어들지 않고 있는 상황이다. 한국전기안전공사 통계 자료에 의하면[4], 저/고압 케이블에서 발생하는 전력케이블 사고는 총 328건이 발생하였다. 특히 특/고압 케이블은 수트리(Water tree) 발생, 접속 불량, 절연물 자체의 결함 등에 의해 사고가 발생하고 있다[5-10]. 일례로, 그림 1은 전력케이블 헤드에서 사고 난 사례를 나타낸다. 사고 형태는 전력케이블과 전력케이블 헤드의 접속 불량(시공불량)에 의한 갭(gap)이 발생하여 전계 집중에 따른 절연 파괴사고로 추정할 수 있다. 사고원인으로는 작업자의 시공불량에 의한 사고의 가능성이 크며, 장시간 외부 노출에 따른 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. 전력케이블 절연물의 결함에 의한 전기사고는 PL법이 적용되며

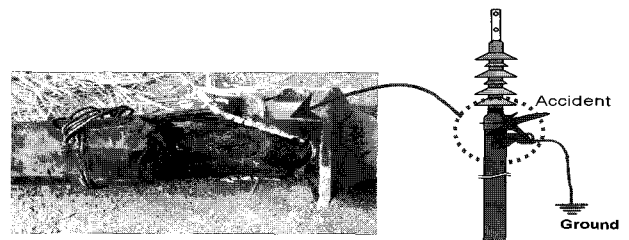


그림 1 소손된 전력케이블헤드
Fig. 1 An event in power cable head

* 교신저자, 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院
E-mail : athens9@kesco.or.kr

* 正會員 : 韓國電氣安全公社 電氣安全研究院

** 正會員 : 慶尙大學校 電氣工學科 教授 · 工學研究員

接受日字 : 2007年 11月 28日

最終完了 : 2007年 12月 13日

정확한 사고원인 규명과 PL분쟁 해결의 사고 원인규명의 데이터베이스화도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 전력케이블을 대상으로 제품의 신뢰성과 사고 가능성에 대해 조사하였다. 전력케이블에 가속열화 시험 즉, 열 충격 시험을 실시하여 절연재료의 특성을 살펴보고 제품의 PL적용여부, PL 대처방안에 대해 검토해 보았다.

2. 전력케이블 열 충격 시험 및 실험방법

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 전력케이블의 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

시료는 열 충격시험에 따른 XLPE의 특성변화를 살펴 보기 위해 PVC 외피와 차폐도체 등을 모두 제거하였으며, 길이는 600mm로 하였다. IEC 60811[11]에 의한 열충격 시험을 수행하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 2에 나타낸다. 온도는 -60℃~150℃까지 가변이 가능한 열 충격 시험기 (JEIO Tech, Korea)를 사용하였다. 6.6kV급과 22.9kV급 전력케이블을 각각 10개 씩 열 충격 시험기 배열하였으며, 제어기를 통해 온도를 그림 3과 같이 120℃에서 -200℃까지 변화시켰으며, 각각 1시간씩 유지도록 하여 총 500사이클 (cycle) 동안 가속열화 시켰다. 열 충격 시험 후, 전력케이블 수축율은 IEC 60811에 의해 식(1)으로 계산하였다. 여기서 L1은 초기길이, L2는 수축된 길이이다.

$$\Delta L = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100[\%] \tag{1}$$

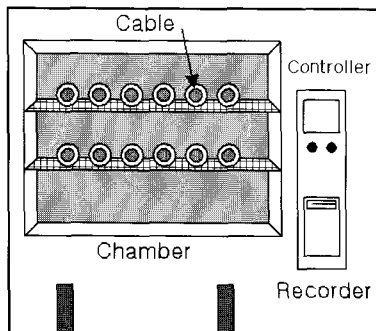


그림 2 열 충격 시험 개략도
Fig. 2 The diagram of test for resistance to cracking

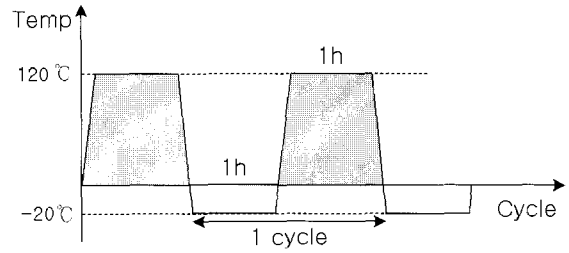


그림 3 열 충격시험의 사이클
Fig. 3 Cycle of test for resistance to cracking

열 충격 시험에 의해 가속 열화 된 케이블의 절연 내력 특성을 살펴보기 위해 그림 4와 같이 케이블을 제작하였다. 시료는 전력케이블 길이를 감안하여 6.6kV급만 대상으로 하였으며, 22.9kV급 전력케이블의 경우에는 시료의 길이가 600mm정도로 짧기 때문에 관통과과가 아닌 연면 방전이나 기중방전이 발생하였다. 6.6kV급 전력케이블의 연면 방전을 방지하기 위해 열 수축 테이프를 이용하여 일정한 경사를 가지는 형태로 제작하였으며, 가장자리 부분에서는 전력케이블 헤드 캡으로 보강하였다. 또한 전력케이블 중앙 부분에 전극을 설치하여 접지단자로 사용하였다. 제작된 전력케이블은 그림 5와 같이 챔버 내에 설치하고 절연내력 실험을 수행하였다. 이때 고전압 인가는 최대 200kV까지 가능한 고전압 장비(Max. 200kV, Hipotronics, USA)를 이용하였으며, 1kV/sec씩 상승시켰다. 이때 주위온도는 27℃이며, 습도는 60%였다.

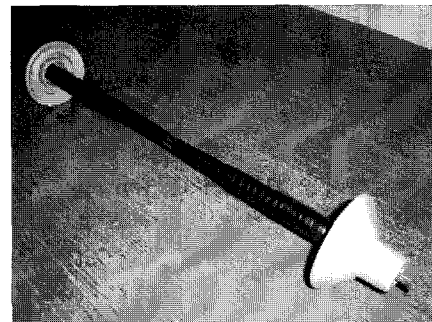


그림 4 전력케이블 단말처리 시료
Fig. 4 The cable sample for breakdown test

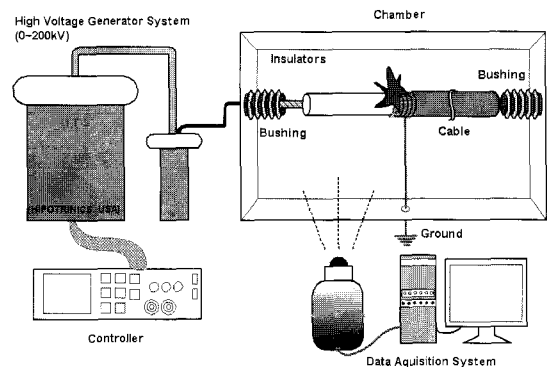


그림 5 절연파괴 실험개략도
Fig. 5 Breakdown test diagram of power cable

3. 결과 및 검토

그림 6과 7은 6.6kV급 및 22.9kV급 A사 케이블의 열 충격 시험 후의 변화된 형태를 나타낸다. 그림 6의 6.6kV급 전력케이블에서의 250사이클과 500사이클 후의 케이블은 XLPE의 변색이 관측되었을 뿐, IEC 60811-3-1에서 규정하고 있는 균열은 나타나지 않았으며, 열 수축율은 정상상태에 비해 0.2%미만의 변화를 보였다.

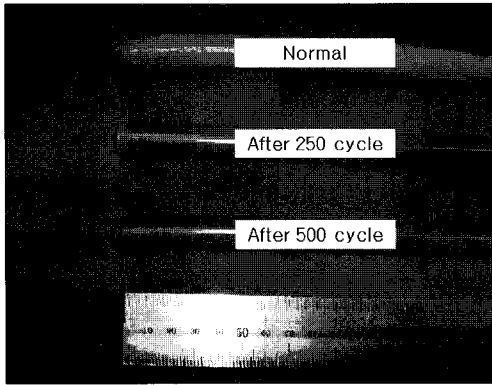


그림 6 열 충격 시험후의 6.6kV급 A 전력케이블
Fig. 6 Deteriorated 6.6kV class A power cable after thermal stress

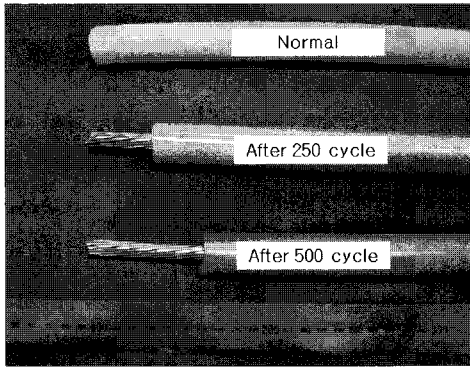


그림 7 열 충격 시험후의 22.9kV급 A 전력케이블
Fig. 7 Deteriorated 22.9kV class A power cable after thermal stress

그림 8의 22.9kV급의 A사 전력케이블 경우는 그림 6과 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 A사 케이블의 수축 길이와 수축율을 나타낸다. 수축 길이와 수축율은 250사이클과 500사이클 5개씩을 측정하여 평균값을 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 250사이클 후의 수축 길이는 평균 12.6mm였으며, 2.13%의 수축율을 보였으며, 500사이클 후에는 평균 21.5mm 이며, 3.68%의 수축율을 나타내었다. 특히 500사이클 후의 시료는 편차(error bar)의 범위가 거의 2배 이상씩 차이가 나타났다. 시료에 따라 편차가 크게 나타났지만, 열 충격 시험에 의한 A 케이블의 변화가 심하게 나타난 것을 알 수 있다. 그림 9은 250사

이클 후, 22.9kV급 각 케이블의 열 충격 시험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 A사 전력케이블의 제품이 열 충격의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있고 B와 C사 전력케이블의 경우는 각각 열 수축율이 0.93%, 0.64%였으며, 열 충격에 의한 영향이 적은 것을 알 수 있다. 이상의 열 충격 시험을 통해, 전력케이블 헤드 접속부분의 시공불량에 의한 전력케이블 사고뿐만 아니라 제품불량에 의한 전력케이블 소손에 의해 사고가 발생할 가능성이 있다는 것을 추측해 볼 수 있다.

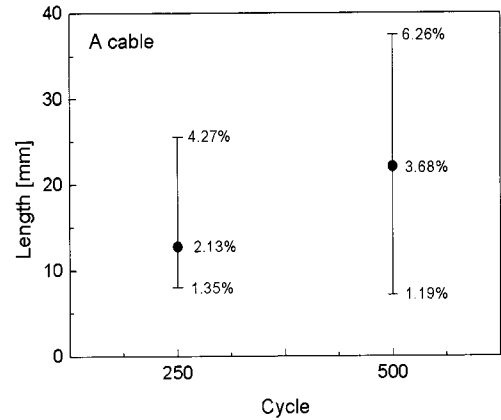


그림 8 22.9kV급 A사 전력케이블의 수축 길이와 수축율
Fig. 8 Reduction length and rate of 22.9kV class A power cable

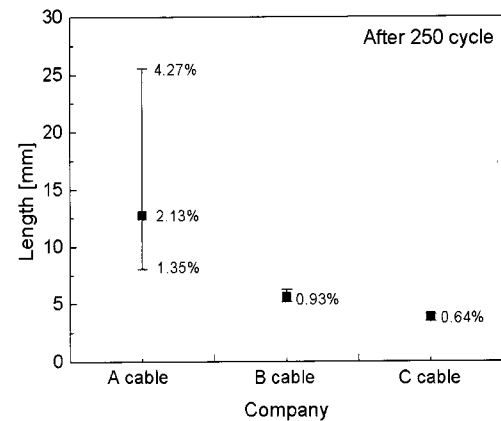


그림 9 250 cycle후, 각 케이블의 비교
Fig. 9 The comparison of each 22.9kV class power cable after 250 cycles

그림 10과 11은 사용된 전력케이블 XLPE의 FT-IR분석 결과를 나타낸다. 그림 10은 22.9kV급 A 전력케이블의 FT-IR 분석결과로서, 2800~2900cm⁻¹에서 흡광피크가 발생하였다. 방향족 화합물의 일반적인 C-H간의 신축진동 특성이며, 고분자 PE계열의 일반적인 특성을 나타내었다. 그림 11의 정상상태에서 각 회사의 케이블 절연물을 비교해보면, 동일한 흡광피크 특성을 나타내어 각 회사의 절연물은 동일하다는 것을 알 수 있다.

그림 12는 열 충격 시험후의 A사 전력케이블 XLPE의 열 중량(TGA)분석결과를 나타낸다. A사 전력케이블의 열 중량

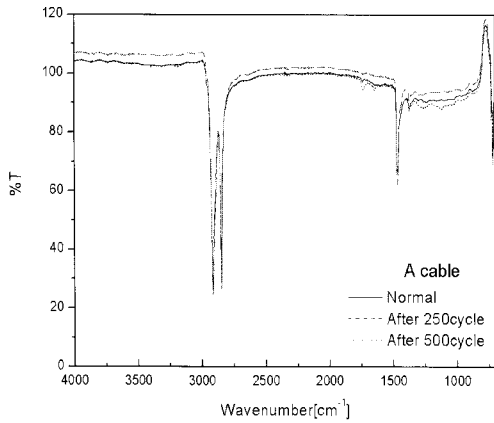


그림 10 A사 전력케이블의 FT-IR 분석
Fig. 10 FT-IR analysis of A power cable

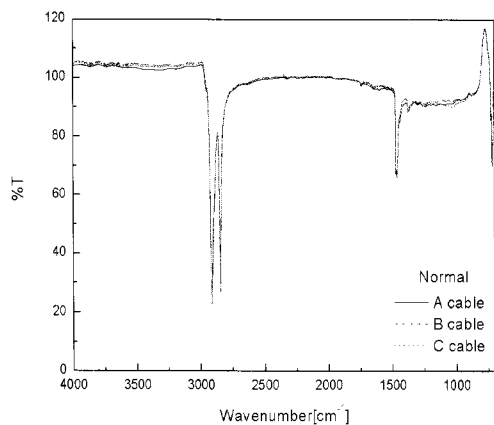


그림 11 각 전력케이블의 FT-IR 비교
Fig. 11 FT-IR comparison of each power cable

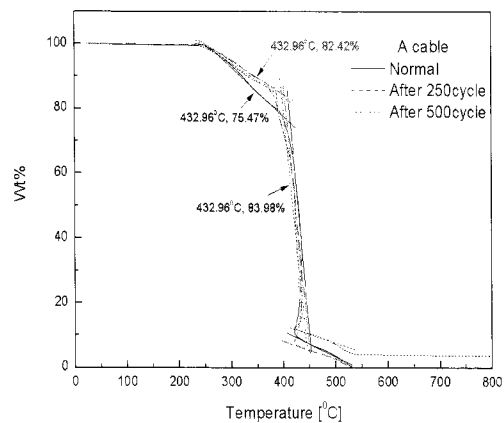


그림 12 A 전력케이블의 열중량 결과
Fig. 12 The result of TGA of A power cable

분석결과 시료는 432.96°C에서 큰 변화가 일어난 것을 알 수 있다. 정상상태에서는 432.96°C에서 75.47%의 열 중량 변화가 나타났으며, 250사이클과 500사이클에서는 각각 82.42%, 83.98%의 변화가 나타났다. 특히 정상상태에서 열 중량 변화가 심한 것을 알 수 있다.

그림 13과 14는 정상상태와 250사이클 후의 각 전력케이블

의 열 중량 분석결과를 나타낸다. 그림 13의 정상 상태에서 타사(B, C) 전력케이블의 열 중량 변화는 432.96°C에서 각각 87.76%, 88.17%로서 큰 차이가 나타나지 않았지만, A사 전력케이블은 75.47%로서 열 중량 특성이 심하게 변한 것을 알 수 있다. 그림 14의 250사이클 후의 A사 전력케이블의 열 중량 변화는 타사 전력케이블의 결과 값과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 FT-IR분석과 열 중량 분석결과만을 비교해보면, A사 전력케이블은 초기 정상 상태에서 열 충격에 의해 심하게 수축되는 것으로 추측되며, 열 충격 후에 안정화된 것을 알 수 있다. 이에 대한 정확한 원인은 알 수 없으나, 전력케이블의 제조과정에서 약간의 문제가 있는 것으로 추측되며, 열악한 제조업체의 제품의 경우에 있어서는 케이블 제조과정의 압출 시 온도, 압력 및 압출속도의 문제와 절연재료에 휘발성 물질이 포함되었을 것으로 판단된다.

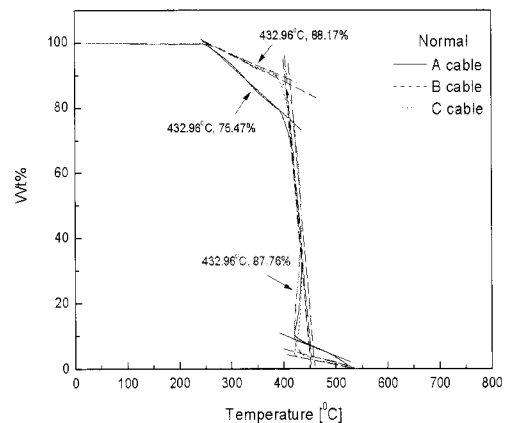


그림 13 정상상태의 각 전력케이블의 열 중량 결과
Fig. 13 The result of TGA of each power cable on normal state

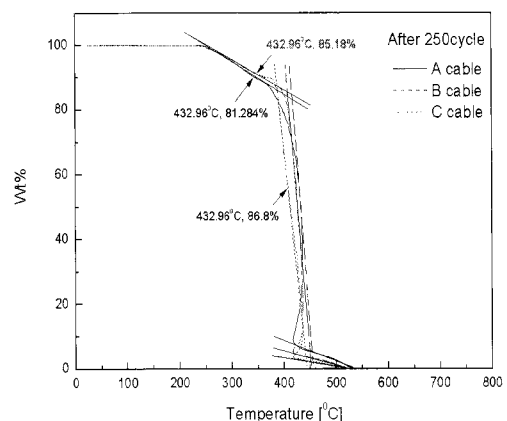


그림 14 250cycle 후 각 전력케이블의 열 중량 결과
Fig. 14 The result of TGA of each power cable after 250cycle

그림 15는 6.6kV급 A사 전력케이블의 절연과피 전압을 나타낸다. 정상상태에서의 절연과피 전압은 약 93kV였다. 보고되고 있는 PE계열의 절연과피 전압은 20~30kV/mm이기 때문에 절연두께가 3.4mm인 케이블의 절연과피 전압과

거의 유사한 경향을 나타내었다. 또한 열 충격 시험에 따른 각 열 사이클마다의 절연파괴 전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 6.6kV급 A사 전력케이블의 경우는 열 충격 시험에 따른 XLPE의 수축이 거의 나타나지 않았고, 실험의 온도가변범위가 XLPE 가교시의 온도 180°C이하므로 절연파괴에 영향을 줄 수 있는 결함이나 보이드(void)가 형성되지 않았기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

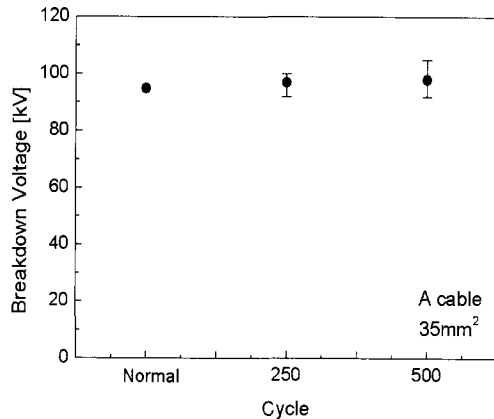


그림 15 열 cycle에 따른 전력케이블의 절연파괴 전압
Fig. 15 Breakdown voltage of power cable according to thermal cycle

4. 결 론

PL법 환경 하에서의 전력기에 대한 대응방안 마련과 정확한 원인규명의 데이터베이스화를 위하여 전력케이블의 열 충격 시험에 의한 사고위험성을 살펴보았다. 6.6kV급 A사 전력케이블의 경우에는 열 충격에 의한 XLPE의 변색은 관측되었지만, 열 수축변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 22.9kV급 A사 전력케이블에서는 절연재료 표면의 크랙은 관측되지 않았지만, 변색되고 길이방향으로 심하게 수축된 형상이 관측되었다. 수축된 길이는 250사이클 후, 평균 12.6mm, 500사이클 후에는 21.5mm가 수축되었다. 따라서 열 충격에 의한 A사 전력케이블의 열 수축의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 A사 전력케이블은 비교한 B와 C사 전력케이블보다 열 충격에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 이는 정상상태와 열 충격 시험후의 A사 전력케이블을 타사(B, C) 전력케이블의 열 중량 분석 결과로서 일부 확인할 수 있었다. 비교된 전력케이블은 432.96°C에서 큰 열 중량 변화가 나타났으며, 열 충격 시험 후 A사 전력케이블은 타사 케이블과 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 A사 전력케이블은 초기 정상상태에서 열 충격에 의해 심하게 수축되는 것으로 추측되며, 열 충격 후에 안정화된 것을 알 수 있다. 이에 대한 정확한 원인은 알 수 없으나, 전력케이블의 제조 공정에서 약간의 문제가 있는 것으로 추측된다.

6.6kV급 A사 전력케이블의 절연파괴 전압은 93kV 정도였으며, 보고되고 있는 PE 계열의 절연파괴 전압인 20~30kV/mm와 거의 유사한 절연파괴 값을 가졌다. 또한 열 충격 시험에 따른 각 열 사이클마다의 절연파괴 전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 6.6kV급 A사 전력케이블의 경

우는 열 충격 시험에 따른 XLPE의 수축이 거의 나타나지 않았고, 실험의 온도 가변범위가 XLPE 가교시의 온도 180°C이하므로 절연파괴에 영향을 줄 수 있는 결함이나 보이드(void)가 형성되지 않았기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이와 같은 전력케이블을 전기설비에 시설하여 운영 중 사고가 발생할 경우에는 일반적인 시공불량에 의한 사고뿐만 아니라, 케이블 자체의 결함여부도 함께 검토·검증하여 정확한 사고원인 규명과 PL법 적용에 따른 피해자의 적절할 보상체계가 구축되어야 할 것이다. 또한 전력기기 사고에 대한 데이터베이스화를 구축하여 기업의 제품향상과 사고예방, PL적용 시에 데이터로 활용되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국피엘협회, "제조물책임(PL) 사고 예방을 위한 기술적 지원방안, 보고서, 2006.
- [2] 중소기업청, "제조물책임(PL) 대응매뉴얼-전기·전자제품분야, 보고서, 2006.
- [3] 홍한국, 강병영, "산업안전 분야에서의 PL사고 유형 분석", 한국안전학회, Vol. 20, No. 2, pp.140-145, 2005.
- [4] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", 14th edition, pp. 7-24, 2005.
- [5] 강동식의 4인, "XLPE케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토", 대한전기학회, Vol.49C, No.7, pp.400-406, 2000.
- [6] 이우선 외 5인, "지중배전 케이블의 노화에 의한 가교도 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1566-1568, 2000.
- [7] 조영신, 심미자, 김상욱, "XLPE의 절연파괴특성에 미치는 휘발성 불순물의 영향", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.301-304, 1997.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] IEC 60811, "Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables.

저 자 소 개



김 영 석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원
Tel : 031-580-3064, Fax : 031-580-3111
E-mail : athens9@naver.com



정 종 욱 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생, 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.
Tel : 031-580-3063, Fax : 031-580-3111
E-mail : phdjung@korea.com



송 길 목 (宋佶穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 전기안전연구원 선임연구원.
Tel : 031-580-3065, Fax : 031-580-3111
E-mail : natasder@kesco.or.kr



김 선 구 (金善球)

1961년 2월 25일생. 1985년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991~2002년 한국전기안전공사 재직. 2002년~현재 전기안전연구원 설비안전연구그룹 그룹장(책임연구원).
Tel : 031-580-3071, Fax:031-580-3111
E-mail : ksk@kesco.or.kr



정 진 수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생, 2003년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원.
Tel : 031-580-3067, Fax : 031-580-3111
E-mail : mirmir0822@hanmail.net



김 상 현 (金相賢)

1950년 2월 7일생. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 오사카대학 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~2003년 한국 초전도·저온공학회 회장. 1989년~현재 경상대학교 전기공학과 교수.
Tel : 055-751-5345 Fax : 055-759-2723
E-mail : shkim@gsnu.ac.kr