

22.9[kV]이하 XLPE 전력케이블의 열 충격 시험 및 절연파괴 특성

(The Properties of Dielectric Breakdown and Thermal Stresses
below 22.9[kV] Class XLPE Power Cable)

김영석* · 송길목 · 김선구

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

요 약

2002년부터 시행되어오고 있는 제조물 책임법에 의해 사고케이블의 원인분석과 사고패턴에 대한 데이터베이스화가 중요하다. 더욱이 가속열화상태에서 전력케이블 사고의 패턴 및 모의실험은 데이터베이스 시스템 구축에 필요하다. 본 논문에서는 열 열화 따른 22.9[kV]이하 케이블의 열 충격시험을 수행하였다. 이 시험은 IEC60811-3-1에 따른다. 시험결과로부터, 22.9[kV]급 A사 전력케이블은 표면이 변색되었고 길이방향으로 급격하게 감소되었다. 특히, A사 전력케이블의 열 중량 특성이 심하게 변함에 따라, 케이블 제조상의 문제일 것이라 추측된다. 만약 전력케이블의 제조상의 결함에 의한 것이라면, 피해자들은 PL환경 하에 손해배상을 받을 수 있을 것이다.

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 22.9[kV] 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 22.9[kV] 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 : Power Cable Event, Test for Resistance to Cracking, Defect, Product Liability(PL)

1. 서 론

* 주저자 : 전기안전연구원 설비안전연구원 연구원

Tel : 031-580-3064, Fax : 031-580-3111

E-mail : athens9@naver.com

접수일자 : 2007년 11월 30일

1차심사 : 2007년 12월 6일, 2차심사 : 2008년 1월 22일

3차심사 : 2008년 2월 1일

심사완료 : 2008년 2월 15일

전력수요의 증가에 따라 국내의 기업들은 전기설비의 대형화와 전력기기의 고효율화에 주력할 뿐만 아니라, 제조물 책임법 환경하에서는 자사제품에 대한 신뢰성 및 기업이미지 향상에도 많은 관심을 가

지고 있다. PL법 시행에 따라, 국내에서도 제품사고 발생에 따른 제조물 책임 소송과 PL보험사고[1-2] 발생 건수(2002년 대비 432[%]증가) 등이 해마다 증가되고 있다. 그러나 PL소송과 PL보험건수가 전 산업분야에 확대되어 있는 것은 아니며, 특히, 중전기 기(변압기, 차단기, 전력케이블 등) 부분에서는 PL 인식 부족으로 인해 활성화되지 못하고 있다. 따라서 국제화시대의 PL 중요성과 피해자의 권익보호를 위해서는 PL 분쟁 시의 전력기기 사고의 대처방안 및 정확한 원인규명이 필요하다 하겠다.

국내에서의 전력기기의 사고는 설비의 안전점검, 설비 교체 및 유지관리에도 불구하고 사고가 줄어들지 않고 있는 상황이다. 한국전기안전공사 통계 자료에 의하면[3], 저/고압 케이블에서 발생하는 전력케이블 사고는 총 328건이 발생하였다. 특히, 특/고압 케이블은 수트리, 전기트리 발생[4-5], 접속 불량[6], 절연물 자체의 보이드결함[7] 등에 의해 사고가 발생하고 있다. 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 파괴 사고로 추정할 수 있다. 사고원인으로는 작업자의 시공불량에 의한 사고의 가능성이 크며, 장시간 외부 노출에 따른 열 충격에 의한 전력케이블 열화도 배제할 수 없다.

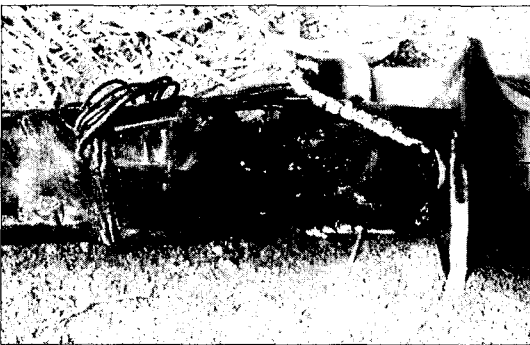


그림 1. 소손된 전력케이블헤드
Fig. 1. An event in cable head

일반적으로 전력케이블의 사용수명은 약 30년으로 절연등급이 높으며, 열악한 환경 외에는 사고 발

생이 적지만, 전력케이블 절연물의 결함에 의한 사고가 종종 발생하고 있다. 특히 자가용 수용가를 대상으로 한 조사에서도 케이블 본체 및 접속부분에 사고가 빈번하게 발생하였다. 또한 전력케이블 절연물의 결함에 의한 전기사고는 PL법이 적용되며 정확한 사고원인 규명과 PL분쟁 해결의 사고 원인규명의 데이터베이스화도 필요하다.

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 22.9[kV]이하 전력케이블을 대상으로 가속열화에 의한 사고를 모의하였다. 사고모의는 일정한 열 충격 시험을 수행하였으며, 열 충격 시험 결과에 따른 케이블 자체의 특성변화 및 절연파괴 특성에 대해 검토하였다.

2. 시료제작 및 실험방법

2.1 전력케이블 열 충격 시험방법

전력케이블은 국내에서 제작되어 현재 많이 이용되고 있는 6.6[kV]급과 22.9[kV]급 단상 전력케이블을 사용하였으며, 표 1에 사양을 나타낸다. 동일사양, 동일 규격의 3개 회사(A사, B사, C사 케이블) 제품을 선정하여 비교하였으며, 케이블의 절연재료는 가교폴리에틸렌(XLPE)이다. 케이블 사양에서 6/10[kV] CV케이블의 공칭단면적은 35[mm²], XLPE두께는 3.4[mm], 22.9[kV] CNCV 케이블은 공칭단면적이 60[mm²], XLPE두께는 6.6[mm]이다.

표 1. 사용된 각 회사 케이블의 사양
Table 1. The parameters of each power cable

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

22.9[kV]이하 XLPE 전력케이블의 열 충격 시험 및 절연파괴 특성

시료는 열 충격시험에 따른 XLPE의 특성변화를 살펴보기 위해 PVC 외피와 차폐도체 등을 모두 제거하였으며, 길이는 600[mm]로 하였다. IEC 60811[8]에 의한 열 충격 시험을 수행하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 2에 나타내며, 온도가변이 -60~150 [°C]까지 가능한 열 충격 시험장치를 사용하였다. 6.6[kV]급과 22.9[kV]급 전력케이블을 각각 10개 씩 열 충격 시험기 내부에 배열하였으며, 제어기를 통해 온도를 그림 3과 같이 120[°C]에서 -20[°C]까지 변화시켰으며, 각각 1시간씩 유지도록 하여 총 500사이클 동안 가속열화 시켰다. 열 충격 시험 후, 전력케이블 수축율은 IEC 60811에 의해 (1) 식으로 계산하였다.

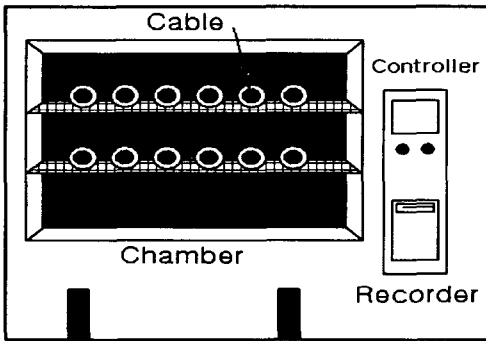


그림 2. 열충격 시험 개략도
Fig. 2. The diagram of test for resistance to cracking

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

여기서 L_1 은 초기길이, L_2 는 수축된 길이이다.

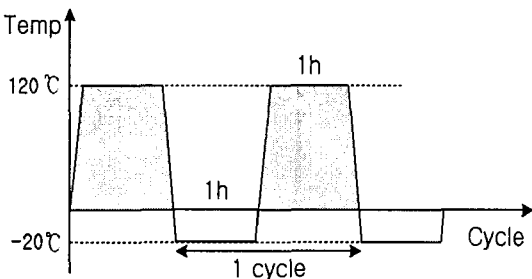


그림 3. 열 사이클
Fig. 3. Cycle of test for resistance to cracking

2.2 시험결과

그림 4와 5는 6.6[kV]급 및 22.9[kV]급 A사 케이블의 열 충격 시험 후의 변화된 형태를 나타낸다. 그림 4에서의 전력케이블 변화를 살펴보면, 정상상태에 비해 250사이클과 500사이클 후의 케이블은 XLPE의 변색이 관측되었지만, 표면의 크랙, 열 수축 현상은 거의 관측되지 않았다.

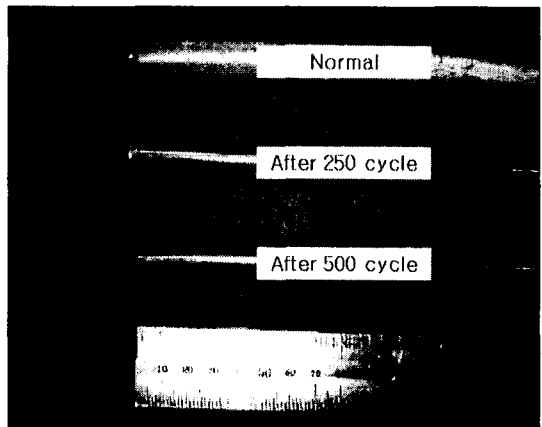


그림 4. 열 충격 시험후의 6.6[kV]급 전력케이블
Fig. 4. Deteriorated 6.6[kV] class power cable after testing for resistance to cracking

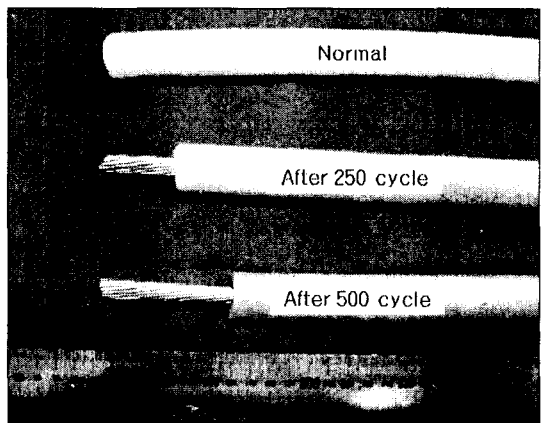


그림 5. 열 충격 시험후의 22.9[kV]급 전력케이블
Fig. 5. Deteriorated 22.9[kV] class power cable after testing for resistance to cracking

그림 5의 22.9[kV]급의 전력케이블 경우는 그림 4와 동일하게 XLPE의 변색은 관측되었지만, 표면의

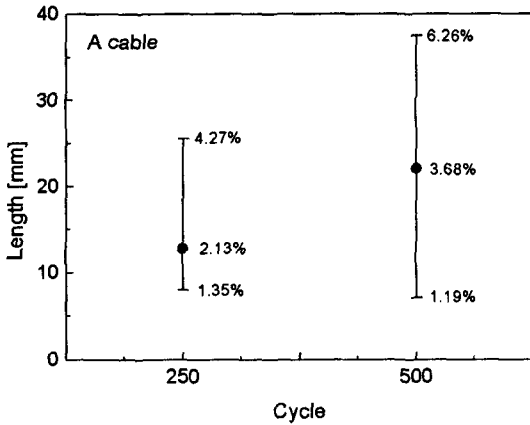


그림 6. A 케이블의 수축길이와 수축율
Fig. 6. Reduction length and rate of A power cable

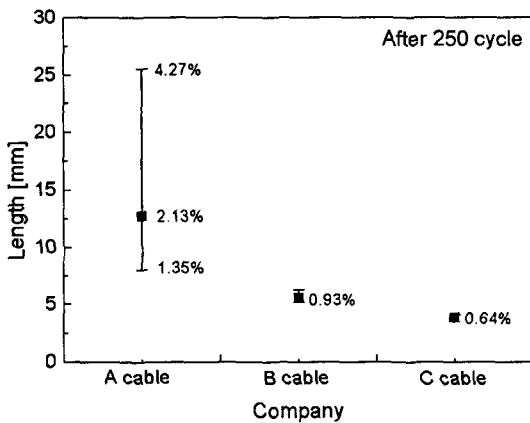


그림 7. 250 사이클 후, 각 케이블의 비교
Fig. 7. The comparison of each 22.9[kV] class power cable after 250 cycles

크랙은 관측되지 않았다. 하지만, 열 사이클 횟수에 따라 길이 방향으로 심각하게 수축되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 6에 22.9[kV]급 A사 케이블의 수축 길이와 수축율을 나타낸다. 수축 길이와 수축율은 250사이클과 500사이클 5개씩을 측정하여 평균값을 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 250사이클 후의 수축 길이는 평균 12.6[mm]였으며, 2.13[%]의 수축율을 보였으며, 500사이클 후에는 평균 21.5[mm]이며, 3.68[%]의 수축율을 나타내었다. 특히 500사이클 후의 시료는 편차(error bar)의 범위가 거의 2배 이상

씩 차이가 나타났다. 시료에 따라 편차가 크게 나타났지만, 열 충격 시험에 의한 A사 전력케이블의 변화가 심하게 나타난 것을 알 수 있다.

그림 7은 250사이클 후, 22.9[kV]급 각 케이블의 열충격 시험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 A 전력케이블회사의 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. 이상의 열 충격 시험을 통해, 전력케이블 헤드 접속부분의 시공불량에 의한 전력케이블 사고뿐만 아니라 제품불량에 의한 전력케이블 손상에 의해 사고가 발생할 가능성이 있다는 것을 추측해 볼 수 있다.

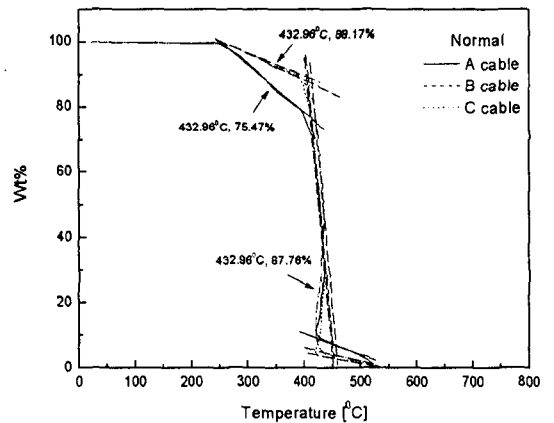


그림 8. 정상상태의 각 전력케이블의 열 중량 결과
Fig. 8. The result of TGA of each power cable on normal state

그림 8은 정상상태의 각 전력케이블 XLPE의 열 중량 분석결과를 나타낸다. 정상상태에서 타사(B, C) 전력케이블의 열 중량 변화는 432.96[°C]에서 각각 87.76[%], 88.17[%]로서 큰 차이가 나타나지 않았지만, A사 전력케이블은 75.47[%]로서 열 중량 특성이 심하게 변한 것을 알 수 있다. 타사 전력케이블의 열 중량 변화는 타사 전력케이블의 결과 값과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 열 중량 분석결과만을 비교해보면, A사 전력케이블은 초기 정상상태에서 열 충격에 의해 심하게 수축되는 것으로 추측되며, 열 충격 후에 안정화된 것을 알 수 있다. 각

22.9[kV]이아 XLPE 전력케이블의 열 충격 시험 및 절연파괴 특성

제조회사에서는 KSC IEC 60502-2[9]에 의해 케이블을 생산과 시험을 거쳐 판매하고 있으므로 규격상의 문제는 없는 것으로 판단된다. 단, A사 전력케이블의 열 수축에 대한 정확한 원인은 회사가 정보제공을 하지 않아 알 수 없으나, 전력케이블의 제조과정상에서 약간의 문제가 있는 것으로 추측된다. 또한 일부 열악한 제조업체의 제품의 경우에 있어서는 케이블 제조과정의 압출 시 온도, 압력 및 압출속도의 문제와 절연재료에 휘발성 물질이 포함되었을 것으로 판단된다.

3. 전력케이블의 절연파괴 특성

3.1 전력케이블 시료제작 및 실험

열 충격 시험에 의해 가속 열화 된 케이블의 절연내력 특성을 살펴보기 위해 그림 9와 같이 케이블을 제작하였다. 시료는 전력케이블 길이를 감안하여 6.6[kV]급만 대상으로 하였으며, 22.9[kV]급 전력케이블의 경우에는 시료의 길이가 600[mm]정도로 짧기 때문에 관통파괴가 아닌 연면 방전이나 기중방전이 발생하였다. 전력케이블 연면 방전을 방지하기 위해 열 수축 테이프를 이용하여 일정한 경사를 가지는 형태로 제작하였으며, 가장자리 부분에서는 전력케이블 헤드캡으로 보강하였다. 또한 전력케이블 가운데 부분에 전극을 설치하여 접지단자로 사용하였다.



그림 9. 전력케이블 단말처리 시료
Fig. 9. The cable sample for breakdown test

제작된 케이블은 그림 10과 같이 챔버(chamber) 내에 설치하고 절연내력 실험을 수행하였다. 이때 고전압 인가는 최대 200[kV]까지 가능한 고전압 장비(Max. 200[kV], Hipotronics, USA)를 이용하였으며, 1[kV/sec]씩 상승시켰다. 또한 절연파괴 시의 전력케이블 사고 패턴은 고속카메라(Max. 10,000[fps], MIKROTRON)를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 이때 주위온도는 27도이며, 습도는 60[%]였다.

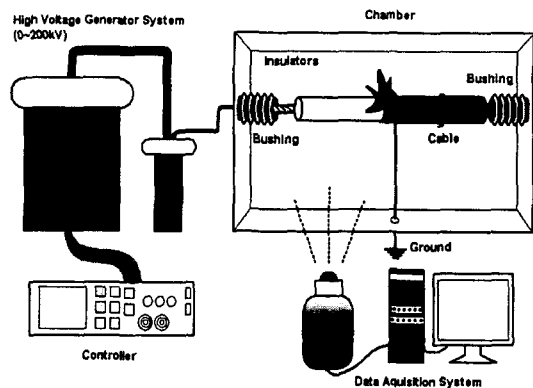


그림 10. 절연파괴 실험개략도
Fig. 10. Breakdown test diagram of power cable

3.2 실험결과 및 검토

그림 11은 6.6[kV]급 A cable의 절연파괴 전압을 나타낸다. 정상상태에서의 절연파괴 전압은 약 93[kV]였 20~30[kV/mm]이기 때문에 절연두께가 3.4[mm]인 케이블의 절연파괴 전압과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 또한 열 충격 시험에 따른 각 열 사이클마다의 절연파괴 전압의 변화는 거의 나타나지 않았다. 6.6[kV]급 A사 전력케이블의 경우는 열 충격 시험에 따른 XLPE의 수축이 거의 나타나지 않았고, 실험의 온도 가변범위가 XLPE 가교시의 온도 180[°C]이하므로 절연파괴에 영향을 줄 수 있는 결함이나 보이드(void)가 형성되지 않았기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

그림 12는 정상상태의 시료의 절연파괴 시의 고속카메라로 촬영한 사진을 나타낸다. 케이블의 절연파괴는 연면 방전이 아닌 관통 파괴가 일어났으며, 그림 (b)에서 초기 불꽃이 발생한 후, 확대되어 소멸되

는 형태를 나타내었다.

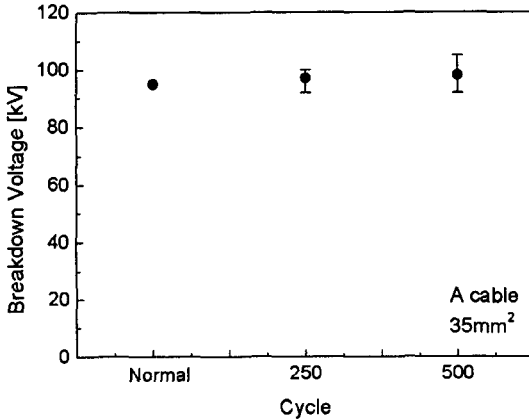


그림 11. 열 사이클에 따른 전력케이블의 절연파괴 전압
Fig. 11. Breakdown voltage of power cable according to thermal cycle

의 나타나지 않았다. 그러나 22.9[kV]급 A사 전력케이블에서는 절연재료 표면의 크랙은 관측되지 않았지만, 변색되고 길이방향으로 심하게 수축되었다. 수축된 길이는 250사이클 후, 평균 12.6[mm], 500사이클 후에는 21.5[mm]가 수축되었다. 따라서 열 충격에 의한 A사 전력케이블의 열 수축의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 A 케이블은 비교한 B와 C 케이블보다 열 충격에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 이는 전력케이블 결합에 의한 전력케이블 헤드의 사고 발생 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

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

따라서 이와 같은 전력케이블을 전기설비에 시설하여 운영 중 사고가 발생할 경우에는 일반적인 시공불량에 의한 사고뿐만 아니라, 케이블 자체의 결합여부도 함께 검토·검증하여 정확한 사고원인 규명과 사용자의 피해를 최소화 시켜야 할 것이다. 또한 연구결과는 PL분쟁 시의 해결방안을 도출하기 위해 사고원인 규명의 객관적인 자료제시 및 DB화 구축에도 활용될 것이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

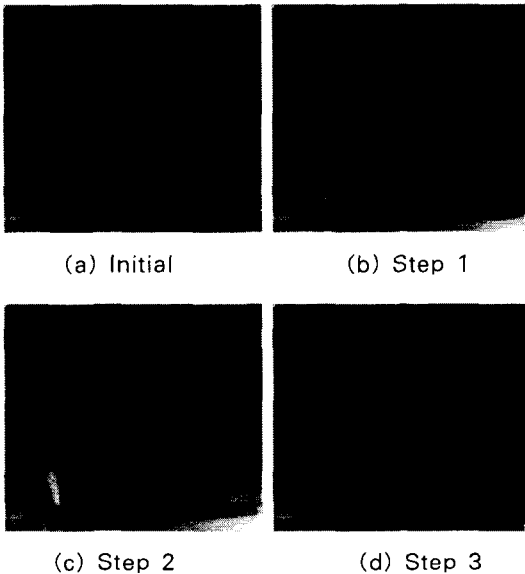


그림 12. 전력케이블의 절연파괴 이미지 사진
Fig. 12. Breakdown images of power cable

4. 결 론

PL법 환경 하에서의 전력케이블 열 충격 시험후의 사고위험성과 절연성능에 관해 살펴보았다. 6.6[kV]급 A사 전력케이블의 경우에는 열 충격에 의한 XLPE의 변색은 관측되었지만, 열 수축변화가 거

References

- (1) 한국피엘협회, “제조물책임(PL) 사고 예방을 위한 기술적 지원방안, 보고서, 2006.
- (2) 중소기업청, “제조물책임(PL) 대응매뉴얼-전기·전자제품분야, 보고서, 2006.
- (3) Korea Electrical Safety Corporation, “A Statistical Analysis on the Electrical Accident”, 15th edition, pp. 7-24, 2006.
- (4) 강동식의 4인, “XLPE케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토”, 대한전기학회, Vol.49C, No.7, pp.400-406, 2000.

22.9[kV]이하 XLPE 전력케이블의 열 충격 시험 및 절연파괴 특성

- (5) J.C. Chan, "Electrical Performance of Oven-Dried XLPE Cable", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.E-13, No. 6, pp.444-447, 1978.
- (6) 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.
- (7) 特別高壓CVケーブル絶縁診断技術調査専門委員会、"特別高壓CVケーブル絶縁熱化形態と絶縁診断技術の動向", 電氣學會技術報告 668号, pp. 40-162.
- (8) IEC 60811, "Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables.
- (9) KSC IEC 60502-2, "정격전압 1~30(kV) 압출 성형 절연 전력 케이블 및 그 부속품-제2부:케이블(6(kV) 및 30(kV)).

◇ 저자소개 ◇

김영석 (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 전기안전연구원 설비안전연구그룹연구원.

Tel : (031)580-3064

Fax : (031)580-3111

E-mail : athens9@naver.com

송길목 (宋信穆)

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 설비안전연구그룹선임연구원.

Tel : (031)580-3065

Fax : (031)580-3111

E-mail : natasder@kesco.or.kr

김선구 (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