

## 전력케이블용 XLPE/반도체층의 기계적 및 열분석 특성

### Mechanical and Thermal Characteristics of XLPE/Semiconductor Sheet in Power Cables

이관우<sup>1,a</sup>, 이경용<sup>1</sup>, 최용성<sup>1</sup>, 박대희<sup>1</sup>  
(Kwan-Woo Lee<sup>1,a</sup>, Kyoung Yong Lee<sup>1</sup>, Yong-Sung Choi<sup>1</sup>, and Dae-Hee Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

In this paper, we studied the mechanical and thermal properties on slice XLPE sheet from 22 kV and 154 kV power cables. Interface structures are XLPE/semiconductor and XLPE/water/semiconductor. We evaluated mechanical property, thermal analysis, moisture analysis. Based on mechanical and thermal properties of the 22 kV XLPE sheet, elongation, mechanical strength, and melting point were evaluated to be 486.48 %, 1.74 kgf/mm<sup>2</sup> and 102.48 °C, respectively. It was also evaluated from the mechanical and thermal properties of 154 kV XLPE sheet that elongation, mechanical strength, and melting point are 507.81 %, 1.8 kgf/mm<sup>2</sup>, 106.9 °C, respectively. A region shows a rapid increase in tension strength, and B region only shows increase in elongation under 1.0 kgf/mm<sup>2</sup>, C region shows increase in both elongation and tension strength. Difference of melting point came from the chain of XLPE polymer and the difference of crystallization. Moisture density of semiconductor showed 800~1200 ppm before extrude, 14000~24000 ppm after extrude. These values were higher than the moisture density of XLPE (300~560) ppm.

**Key Words** : XLPE sheet, Semiconductor, Elongation, Mechanical and thermal properties

#### 1. 서 론

최근 전력수요의 증가와 함께 전력설비의 초고압화와 대용량화가 진행되고 있으며, 전력수송을 위한 송배전선에 있어서 전력케이블의 수요가 급격하게 확대되고 있다. 특히, 대도시에 있어서 송배전의 지중화는 필수적으로서 전력 케이블의 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 전력케이블은 지금까지 도시내에서 배전급에 많이 사용되어 왔으나, 과밀도시의 전력수요를 공급하기 위하여 송전을 지중 방식으로 전력 케이블을 포설하고 있다[1,2].

전력 케이블의 절연은 고분자 화학의 발전과 함께 절연성능, 내열성이 우수한 가교 폴리에틸렌을 사용하여, 이것을 절연체로 사용한 CV (XLPE) (Cross-linked Polyethylene Polyvinyl Chloride Sheath Cable) 케이블이 개발되어졌다[3]. 이 XLPE 전력 케이블은 포설, 접속, 보수 등이 용이하여 수요가 급격하게 증가하고 있으며, 배전만이 아니고, 송전용 케이블로서 이용되고 있다.

XLPE 전력케이블은 안정된 절연특성으로 인하여 많이 포설되어 있으나, 고분자 재료의 열화 현상이 문제가 되고 있다. 초기의 XLPE 전력케이블에는 비교적 큰 보이드, 이물, 돌기 등의 결함이 존재하였으며[4,5], 이러한 결함원인에 의해 발생하는 부분방전 열화, 트리 열화가 큰 문제로 되어 있었다. 이와 같은 열화 현상에 대하여, 현상의 규명 과 함께 결함을 보다 작고, 적게 하기 위한 재료, 제조 기술면에서의 개선·개량이 진행되어져 있다

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부  
(전북 익산시 신용동 344-2)  
a. Corresponding Author : ygu0000@wonkwang.ac.kr  
접수일자 : 2004. 2. 3  
1차 심사 : 2004. 3. 22  
2차 심사 : 2004. 5. 20  
심사완료 : 2004. 6. 6

[6]. 그 결과, XLPE 전력 케이블의 전기적인 특성은 대폭적으로 향상되고, 보다 높은 전압에서 XLPE 케이블을 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[7].

일반적으로 XLPE 전력케이블은 수트리의 발생으로 전기적인 특성이 급격하게 저하되는 것으로 판명되고, 절연두께가 얇은 전력 케이블에서는 현저하게 나타나며, 심각한 문제로 되고 있다. 지금까지 XLPE 전력 케이블은 흡수량이 적어 내수성이 우수하다고 생각되어 왔으나, 수트리 문제가 표면화되면서 주요 이슈로 되고 있다. 뿐만 아니라, XLPE 전력케이블의 사용전압이 높아짐에 따라서 반도체층과 XLPE간의 계면에서 일어나는 절연사고의 빈도가 높아지고 개선이 요구되고 있다[8,9].

이러한 배경으로, 전력케이블에 있어서 절연층/반도체층, 흡수후 절연성능의 저하문제, 최적 설계를 위한 절연두께의 저감책, 접속자재에 있어서 에폭시/고무의 계면[10] 등이 주요 이슈로 되고 있다. 요즘 전력케이블 접속자재의 조립식/소형화를 위한 과정으로서 반도체층 연구가 집중적으로 필요한 것으로 사료된다. 전력케이블에 있어서 계면의 문제를 개선하기 위한 제조공정으로서 3중 압출방법이 사용되고 있으나, 반도체층내의 이물 및 수분은 고전계하에서 트리의 진전을 가속시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

또한 케이블에 기계적 압력이 가해지는 경우, 이 압력은 케이블의 절연 파괴강도를 크게 떨어트리는 것으로 알려져 있다. 그러므로 계면에 압력을 가할 경우 이 압력은 유전특성을 변형시키는 것으로 실험적으로 나타났다. 고압 및 저압 케이블의 파괴시험을 행할 경우 U형을 만들어 파괴시험을 하는 것도 이 때문이다.

이러한 배경으로, 본 논문은 계면을 갖는 XLPE 시이트의 기계적 및 열적 특성[11]을 각각 평가하였다. 22 kV, 154 kV XLPE 전력케이블의 폴리에틸렌과 반도체층을 각각 시이트로 제작하고, 계면을 갖는 구조를 XLPE/반도체층, XLPE/수분/반도체층으로 준비하여, 각각 시료의 기계적 특성, 열분석, 미량수분 등을 고찰하였다.

## 2. 시료 및 측정 장치

### 2.1 시료

22 kV, 154 kV XLPE 전력케이블을 준비하고, 케이블을 원통 방향으로 슬라이싱하여 케이블 절

연체를 20 x 20 x t(0.4 ~ 1.2) mm로 XLPE 시이트를 제작하였고, 반도체층 시이트는 물을 사용하여 각각 제작하였다. 시료의 구조는 그림 1과 같은 XLPE/반도체층, XLPE/수분/반도체층의 시이트이다.

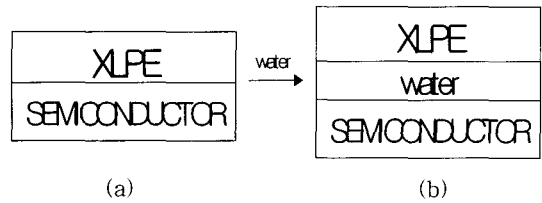


그림 1. XLPE의 계면구조.

Fig. 1. Interface structure of XLPE sheet.

### 2.2 측정 장치

XLPE 시이트의 기계적, 열적 특성의 평가는 인장강도 시험기 (Instron 5566)와 DSC와 TGA를 각각 사용하였다. 열분석은 주사열량측정 (DSC : differential scanning calorimetry)와 열중량측정 (TG: thermogravimetry)을 실온~200 °C 범위에서 질소가스 30 ml/min의 분위기와 10 mg의 크기로 10 °C/min의 승온 속도로 가열하여 측정하였다.

XLPE의 기계적 평가는 인장강도 시험기를 사용하고, 크로스헤드의 속도는 200 mm/min이며, 시료의 형태는 담벨 상이며, 5회 시험한 후에 평균으로 신율과 인장 강도를 구하였다.

미량수분의 측정은 미스비시 수분 측정장치 (CA-06)를 이용하여 160 °C의 질소 가스 내에서 가열하면서 각각 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기계적 특성

시이트의 형태는 그림 2와 같다. 케이블의 절연체로부터 가공한 XLPE 시이트의 기계적 특성을 각각 하기와 같이 평가하였다. 기계적 특성은 XLPE 시이트만으로 하였다. 케이블 절연재료의 인장강도와 신율은 고분자의 물리적인 성질을 평가하기 위한 목적으로 측정되며, 가속 열화 시킨 후에 평가 항목으로 이용되고 있다. 본 특성의 평가는 22 kV, 154 kV급 XLPE 시이트를 비교하고, 기계적인 특성을 고찰하였다.

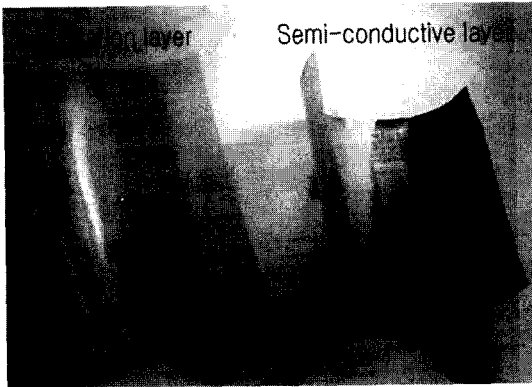
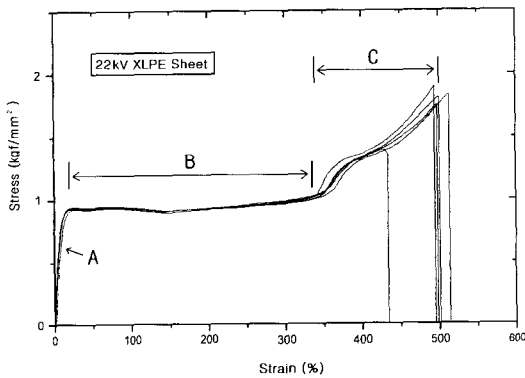


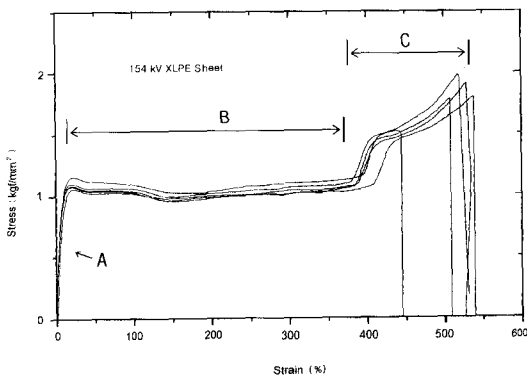
그림 2. 154 kV XLPE 시트.  
Fig. 2. 154 kV XLPE sheet for test.

그림 3 (a)는 22 kV XLPE 시이트의 기계적 특성의 측정 결과이다. 측정회수는 5회를 실시하고, 최저를 제외한 측정결과를 각각 평균하였다. XLPE 시이트의 신율은 486 %, 인장강도는 1.74 kgf/mm<sup>2</sup>로 나타났다. 본 결과의 인장강도와 신율의 관계를 보면, 초기 신율 하에서 급격하게 인장강도가 증가하는 A 영역과 1.0 kgf/mm<sup>2</sup>의 일정 인장강도 하에서 신율만 증가하는 B 영역, 다시 신율과 인장강도의 증가와 함께 하는 C 영역으로 구분되어지는 것을 확인할 수 있었다. 이같은 각 영역은 XLPE의 고분자 쇠(쇄인), 결정 구조의 변형으로 각각 구분할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 3 (b)는 154 kV XLPE 시이트의 기계적 특성의 측정 결과이다. 본 시이트의 신율 및 인장강도는 각각 507 %, 1.80 kgf/mm<sup>2</sup>이며, 22 kV보다는 다소 증가된 결과이나, 기본적인 패턴은 동일한 형태를 지니는 것을 알 수 있었다. 그러나, B 영역은 다소 변위가 크며, 신율이 22 kV급에 비해서 증가되었다. 이와 같은 차는 22 kV급과 154 kV급의 가교도의 차에 의한 것으로 예측되며, C 영역에서의 급격한 인장강도의 증가는 XLPE의 2차 탄성력과 연관되는 것으로 추측된다.



(a) 22 kV XLPE



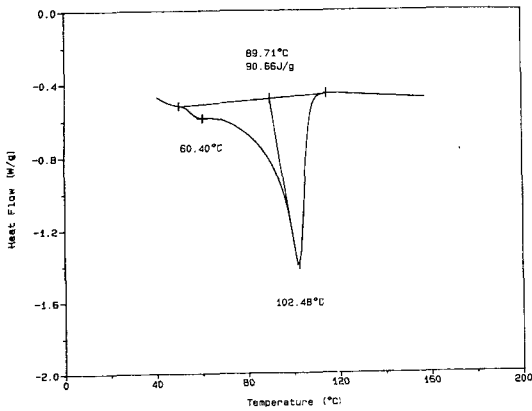
(b) 154 kV XLPE

### 3.2 열적 특성

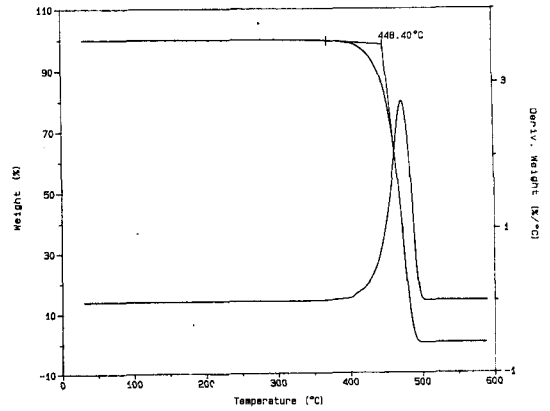
XLPE의 열분석에 사용한 케이블은 시이트상으로 만든 샘플을 사용하였다. XLPE의 열분석은 물리적 성질을 온도의 함수로서 측정하는 것으로 용점 및 전이온도를 평가할 수 있다. 동일한 고분자의 경우에도 결정영역과 비 결정 영역의 혼재율에 따라서 온도특성이 다르며, 또한 전기적인 특성에도 영향을 미치는 것으로 추측된다. 따라서 고분자 재료의 열분석은 전기적인 특성과 관련되어 많은 연구가 진행되고 있다.

그림 4 (a) 22 kV급 XLPE의 DSC 측정 결과이다. 이 결과로부터 60 °C, 102 °C에서 각각의 피크가 나타나는 것을 알 수 있었으며, 용융 온도는 102 °C로서 얻어졌고, 저온측의 피크는 XLPE 전이온도로 예측된다. 그림 4 (b)는 154 kV XLPE의 DSC 측정 결과이다. 154 kV의 용점은 106 °C, 전이온도는 90 °C를 나타내고 있으며, 22 kV급 보다 약간 높은 온도를 나타내고 있다. 이와 같이 상이한 온도 결과는 XLPE의 결정구조 및 분포의 차에 의해서 얻어지는 것으로 사료된다. 이와 같은 열분석과 전기적인 특성의 연관성은 아직 확실한 보고가 없으나, 향후에 검토가 필요하다.

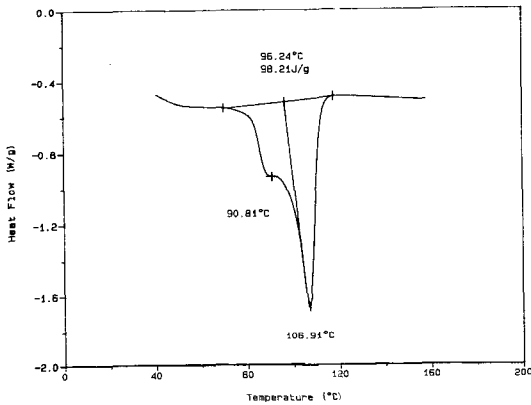
그림 3. XLPE의 신율의 인장강도 의존성  
Fig. 3. Tensile strength dependence of elongation for XLPE.



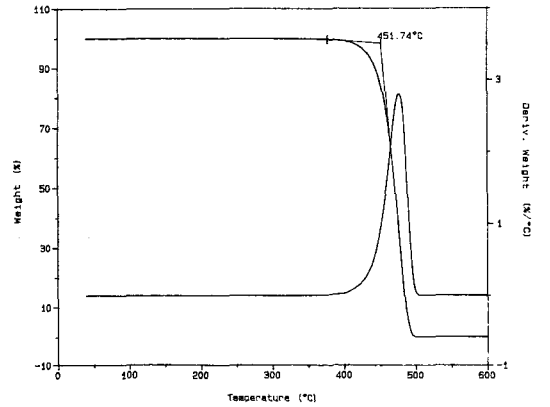
(a) 22 kV XLPE



(a) 22 kV XLPE



(b) 154 kV XLPE



(b) 154 kV XLPE

그림 4. XLPE의 DSC 그래프.

Fig. 4. DSC curves of XLPE.

그림 5 (a)는 22 kV XLPE의 열중량 측정 결과이다. 이 결과로부터 XLPE의 열중량 감소의 개시 온도는 약 400에서 500 °C 이하내에서 급격하게 나타나며, 발열 피크 온도는 450~500 °C내에서 나타나는 것을 확인하였다. 그림 5 (b)는 154 kV급 XLPE의 열중량 측정 결과이다. 전체적으로 22 kV와 큰 차를 보이지 않고 있다. 본 열중량의 결과를 통하여 XLPE의 열분석이 갖는 의미는 케이블이 연속적으로 사용되는 온도와 본 측정의 온도범위와 큰 차를 지니고 있다. 그러나 분자량의 균일한 분포 및 순도는 열중량 곡선에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 열중량 곡선은 절연평가보다 XLPE의 재료개발 측면에서 접근이 바람직하다.

그림 5. XLPE의 열중량곡선.

Fig. 5. Thermogravimetry curve of XLPE.

### 3.3 반도체층의 미량 수분 특성

다음은 22 kV급 케이블 반도체층의 미량수분을 측정하였다. 시판 반도체층과 케이블에서 채취한 반도체층을 시료로 하고, 10시간 동안 흡습시킨 후로 나누어 각각 측정하였다.

표 1은 측정결과이며, 시판 반도체층의 수분량은 800~1,200 ppm, 케이블의 반도체층은 14,000~24,000 ppm의 범위를 나타내었다. 각 시료를 흡습시킨 후의 수분량은 증가를 보이며, 특히 시판 반도체층의 경우에는 30 % 정도로 얻어졌다. XLPE의 미량 수분량은 300~560 ppm으로서 반도체층에 비해서 크게 적은 것으로 알 수 있다. 이와 같은 반도체층의 미량 수분은 절연체의 열화를 가속시키는 역할로서 영향을 미치는 것으로 보고되고

있으며, 반도체층은 반도체층내의 수분 흡습의 영향이 있기 때문에 반도체층의 흡습은 케이블의 절연 열화에 많은 영향을 주기 때문에 향후에는 반도체층의 미량 수분량의 측정을 평가항목으로 도입이 바람직할 것으로 사료된다.

표 1. 반도체층의 미량 수분량.

Table 1. Water absorption ratio of Semiconductive layer.

구분	침수전(ppm)	침수후(ppm)	증가율(%)
시판 내도	710	930	132
시판 외도	1,090	1,450	133
22kV 내도	14,750	15,880	107
22kV 외도	24,780	58,000	234

#### 4. 결론

본 논문에서는 계면을 갖는 XLPE 시이트의 기계적 및 열적 특성을 각각 평가하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. XLPE 시이트의 기계적인 특성은 인장강도가 증가하는 A 영역과 신율만 증가하는 B 영역, 그리고 신율과 인장강도가 함께 증가하는 C 영역으로 구분되어지는 것을 확인하였다. 이와 같은 각 영역은 XLPE의 고분자쇄 (체인)와 결정 구조의 변형 등에 의해서 구분되는 것으로 사료된다.

2. 22kV, 154 kV XLPE에서 기계적 특성인 신율은 486 %, 507 %이며, 인장강도는 1.74 kgf/mm<sup>2</sup>, 1.80 kgf/mm<sup>2</sup>로 얻어졌고 용융 온도는 102 °C, 106 °C로 각각 측정되었다.

3. 압출된 반도체층의 수분량은 800~1,200 ppm 이고, 케이블의 반도체층은 14,000 ~ 24,000 ppm로 측정되었으며, 각 시료를 10시간 동안 흡습시킨 후의 수분량은 30 % 정도의 증가를 나타내었다. 또한 XLPE의 300~560 ppm에 비해서 대단히 큰 것을 알 수 있었다.

이상의 결과는 XLPE 케이블 절연체의 기계적, 열적 신뢰성 향상을 위한 기초 연구로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-335)주관으로 수행된 과제임.

#### 참고 문헌

- [1] Devaux, A, Oudib, J. M. Rerolle, Y., Jocteur, R. Noirclerc, and A. Osty, "Reliability and Develop towards High Voltage of Synthetic Insulated Cables", CIGRE, 2, Paris, 1968.
- [2] W. Tiller Shugg, "Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials", Van Nostrand Reinhold, NY. 310, 1986.
- [3] Metra, P., Occhini, E., and Portinari, G., "High voltage Cables with extruded insulation and statistical controls and reliability evaluation", IEEE Trans. Power Appr. Syst., 94(3), 967, 1975.
- [4] M. Fukuma, M. Nagao and M. Kosaki, "Space Charge Effect on Electrical Breakdown In Polypropylene Film", IEEJ., p. 361, 1993
- [5] C. Mayoux, "Aging of polymeric insulation material in power cable", IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 4, No. 6, p. 665, 1997.
- [6] H. Craig Miller, "Surface flashover of insulators", IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 24, No. 5, p. 765, 1989.
- [7] T. Okamoto, "Breakdown Strength Affected by the Interface Roughness at the Semiconducting Layer in XLPE Power Cables", ICPADM 92, p. 127, 1991.
- [8] Robert Ross, "Dealing with interface problems in polymer cable termination", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No.4, p. 5, 1999.
- [9] H. C. Kaerner and M. Ieda, "Technical Aspects of Interfacial Phenomena in Solid Insulating Systems", 3rd ICPADAM, July 8-12, p. 598, 1991.
- [10] D. H. Park, D. S. Kim, and S. O. Han, "Dependency on temperature, electric field, pressure and dielectric properties of XLPE/EPDM", J. of KIEEME, Vol. 12, No. 3, p. 248, 1999.
- [11] H. G. Cho, U. H. Lee, and K. D. Park, "The Thermal analysis of pole mount mold transformer with one-body molding by duct condition", J. of KIEEME, Vol. 17, No. 3, p. 348, 2004.