

전력케이블용 반도체층의 유전/절연특성과 온도 의존성

이종찬*, 허인성, 김광수, 박대희, 이재관, 김동찬
원광대. 한국전력공사

A Temperature dependency and dielectric/insulation properties for power cables

Jong-Chan Lee, In-Sung Her, Kwang-Soo Kim, Jae-Kwan Lee, Dong-Chan Kim
Wonkwang university, Korea Electric Power Corporation

Abstract - In this paper, the thermal analysis and dielectric/insulation properties were investigated with considering the temperature dependence Using the sheet of semi-conductor/XLPE came from 22 kV power cables, the dielectric/insulation properties and temperature dependence were measured under 1kHz.

According to the results we can verify that only semi-conductor sheet changed linearly, and with the unstable results, the dielectric/insulation properties of the semi-conductor/XLPE sheet show the highest value in the range of 40 °C and 50 °C and are rely on XLPE rather than semi-conductor in terms of the temperature.

1. 서 론

전력 케이블의 도체-절연체, 절연체-외부차폐간에는 계면에 있어서 부분방전을 방지하고, 국부적인 전기 스트레스의 집중을 완화하는 것을 목적으로 반도체층이 이용된다. 현재 전력케이블의 반도체층은 압출 방법이 대단히 안정화되어져 있으며, 일반적인 구조로 되어져 있고, 절연체와 같은 고분자에 도전성 카이본 블랙을 혼련하는 것에 의해서 도전성이 주어진다. 이와 같이 카이본 블랙을 혼련한 반도체성 조성물의 경우, 그의 제 특성은 첨가하는 카이본의 종류나 이용되는 고분자의 성질에 의해서 큰 영향을 받는다. 한편, 도전성을 주는 카이본 블랙의 종류에 의해서 도전성의 특성이 좌우되어지며, 케이블의 수명에도 영향을 미친다.

카이본 블랙을 고분자에 혼련하는 경우의 도전 기구는 대단히 복잡하고, 여러 가지 설이 제안되고 있으나, 일반적으로 다음 2가지가 있다.

- ①침상에 연결된 카이본 블랙 입자쇄에 의한 도전통로설
- ②분산된 카이본 블랙입자의 갭을 전자점프로 전기가 흐르는 터널 효과등이 있다.

카이본 블랙의 기본적인 성질을 결정하는 인자는 입자경, 표면적, 구조 혹은 응집에 의한 연쇄구조등이 있으나, 필요한 성질은 다음과 같은 것이 있다. ①구조가 발달하여 있을 것(연쇄구조) ②입자경이 작을 것 ③표면적이 클 것 ④표면에 전자를 포획하는 불순물이 적을 것 ⑤결정화가 진행될 것. 케이블의 반도체 층으로 사용되기 위한 입자경은 20~50 nm, 질소 흡착 비 표면적은 수십~수백 m²/mg, pH치는 10.0이하에서 선택이 되고 있으며, 수지는 EEA, EVA, LDPE, VLDPE등이 선택된다. 반도체층의 물성은 카이본 블랙의 입자 직경이 증가됨에 따라서 체적 저항은 증가하며, 비 표면적이 증가됨에 따라서 체적 저항은 감소하는 경향을 각각 나타내며, 특히 온도의존성은 고분자 수지의 영향을 받는다. 반도체층의 흡수성은 카이본 블랙의 입자경이 작

을수록 수분량이 낮아지며, 비표면적이 증가할수록 포화 수분량은 증가하며, 이 같은 경향은 반도체 층내의 카이본 블랙의 구조의 발달정도가 흡수성에도 영향을 미치는 것으로 보고가 있다. 반도체층의 가교 도는 카이본 블랙의 입자경과 비 표면적과 관련성이 있으며, 입자경이 커지면 증가하고, 비 표면적이 증가하면 낮아지는 경향을 보고하고 있다.

본 연구는 주어진 반도체 재료에 대한 열 분석과 유전 특성의 온도의존성을 각각 평가하고, 전력 케이블의 성능에 미치는 영향에 대하여 검토하고자 한다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 시료는 22 kV 케이블의 내/외 반도체층과 폴리에틸렌이 부착된 반도체층 시료, 대양소재에서 제조된 내/외 반도체층을 각각 준비하였다. 각 시료의 측정은 열분석, 수분량 및 유전/절연특성을 평가하였다. 반도체 층의 미량수분의 측정은 미스비시 수분 측정장치(CA-06)를 이용하여 160°C의 질소 가스 내에서 가열하면서 각각 평가하였다. 열 분석은 Perkin-Elmer 장치를 이용하고, 10°C/min의 속도로 질소가스 분위기에서 가열하고 냉각한 후 다시 가열하면서 DSC와 TGA를 측정하였다.

유전특성은 Dielectric Thermal Analyzer(Nove Control사) 장치이며, 시이트상의 유전손실과 체적저항을 직접 측정하고, 측정 주파수는 1kHz이며, 측정온도는 상온~90°C, 전극은 평판의 직경 20mm ϕ이다.

3. 실험결과

3.1 미량수분 및 열분석

표 1. 반도체층의 미량 수분량

구분	Virgine(ppm)	After water (ppm)	증가율(%)
대양소재 내도	19,710	26,030	132.0
대양소재 외도	11,090	14,800	133.4
22kV 내도	14,750	15,880	107.6
22kV 외도	24,780	58,000	234.0

각 반도체 층의 미량수분은 대양소재와 케이블에서 채취한 반도체 층과 10시간 동안 흡습을 시킨 후로 나누어 각각 측정하고, 표 1은 결과이다. 대양소재 반도체 층의 수분량은 10000~20000ppm, 케이블의 반도체 층은 14000~24000ppm의 범위를 나타내며, 흡습후에 수분량은 30%이상 증가하는 것으로 얻어졌으며, 실제 케이블 상에서 전계와 도체의 온도가 높아지는 경우에는

더욱 흡습량의 증가가 될 것으로 예측된다. XLPE의 미량 수분량은 300~560ppm으로서 반도체 층에 비해서 크게 적은 것으로 알 수 있다.

각 시료의 열적 성질(thermal property)을 열량계(differential scanning calorimeter : DSC)와 열중량계(thermogravimetry analysis, TG)를 이용하여 측정하였다.

그림 1과 2는 반도체 층의 열중량 변화와 주사열량 측정의 결과이다. 이들의 열분석의 결과로부터 얻어진 각 반도체 층의 용융 온도와 카아본 블랙의 양은 표 2에 나타났다. 반도체 층의 용융 온도는 85~103°C의 범위에 존재하며, 카아본의 함유량은 30~40%범위로 나타났다.

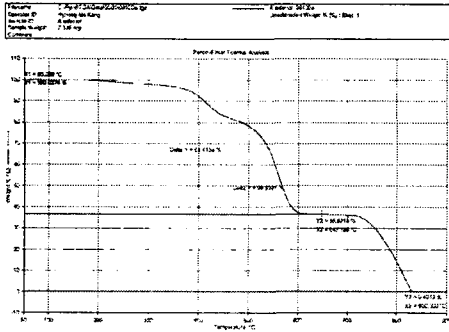


그림 1. 반도체 층의 TGA결과

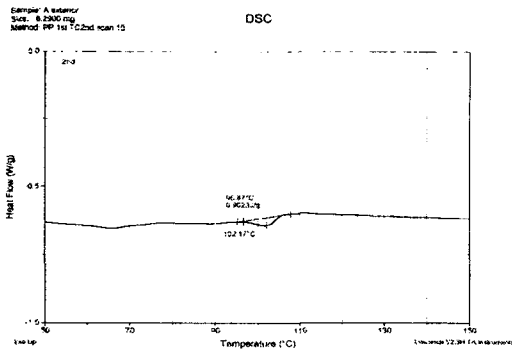


그림 2. 반도체 층의 DSC결과(예)

표 2. 반도체 층의 용융온도와 카아본 함유량

반도체층 종류	용융온도 (°C)			카아본 함량(%)	
	가열	냉각	2차 가열		
대양 소재	내도	86.2	87.4	82.6	40.2
	외도	94.2	91.2	102.1	36.6
22kV 케이블	내도	87.3/104	91.0/72	87.1/104	33.8
	외도	102.7	89.8	102.2	39.3

3.2 유전/절연특성

다음에는 각 반도체층의 유전특성(유전율, $\tan \delta$) 및 체적 저항과 온도의존성을 평가하였다. 유전특성은 케이

블의 장기 열화 및 신뢰성을 좌우하는 성능이며, 반도체 층의 온도 의존성은 케이블의 절연 성능에 영향을 미치며, AEIC등의 규격에 적용이 되고 있다. 반도체층의 요구성능은 절연체와 복합 유전체로서 $\tan \delta$ 가 작고, 케이블의 길이 방향으로 균일한 성능을 지녀야 되며, 온도 상승과 함께 도전율의 변화가 적어야 한다.

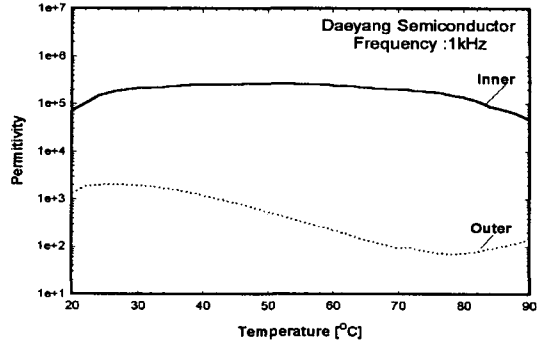


그림 3. 내외도 반도체층 유전율의 온도의존성

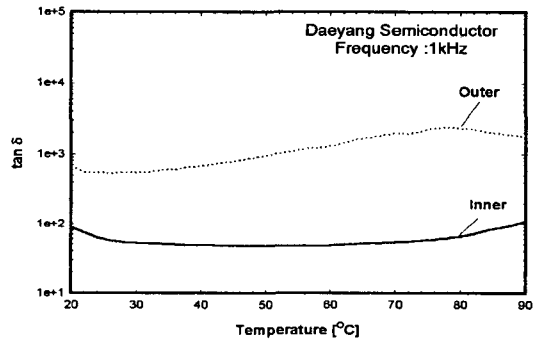


그림 4. 내외도 반도체층 $\tan \delta$ 의 온도의존성

그림 3은 내/외도 반도체 층의 시이트를 1kHz에서 유전율의 온도 의존성을 나타냈다. 측정온도 범위는 상온에서 90°C미만으로 외도 반도체층의 유전율은 상온에서 2.0×10^5 정도이며, 온도증가와 함께 감소하는 경향을 확인 할 수 있었으며, 내도 반도체 층은 상온에서 4.7×10^4 을 나타내며, 온도 증가와 함께 다소 변화를 보이고 있다.

그림 4은 내외도 반도체 층의 시이트를 1kHz에서 유전손실의 온도의존성을 나타냈다. 외도 반도체 층의 $\tan \delta$ 는 동일한 온도 범위내에서 온도의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이며, 내도 반도체 층의 경우는 외도보다 큰 유전손실을 나타낸다. 유전손실은 반도체층의 유전체를 가열시키는 역할을 함으로 도전율에 영향을 미친다. 따라서 유전손실의 온도의존성은 케이블의 장기 절연성능 평가에 주요한 항목이다.

그림 5은 내외도 반도체층의 시이트의 교류 체적저항의 온도의존성을 나타냈다. 일반적으로 체적저항은 직류 전압 하에서 측정을 하며, 본 측정은 교류전압 1kHz하에서 반도체층의 체적저항을 측정하였다. 내도 반도체층은 외도 반도체 층보다 작으며, 상온에서 $180 \Omega \cdot \text{cm}$ 로서 온도증가와 함께 증가하는 경향을 보인다. 특히 외도 반도체 층의 체적저항은 온도증가와 함께 내도 반도체 층과 비교해서 크게 증가하는 경향을 보인다. 케이블의

규격 상에서 체적저항은 1000Ω·cm미만을 요구하고 있으며, 그림 4, 5로부터 체적저항과 유전특성은 깊은 관련성을 지니고 있음을 알 수 있었다. 체적저항과 유전특성이 미치는 영향은 현 단계에서는 교류전압 하에서 누설전류와 충전전류의 비(유전손실)와 교류저항의 관련성의 검토가 필요하다. 복합유전체의 반도체층은 카이본블랙의 입자크기, 표면상태와 base 고분자의 종류에 따라서 전기적, 열적 특성에 영향을 미치는 것으로 많은 연구가 되고있다.

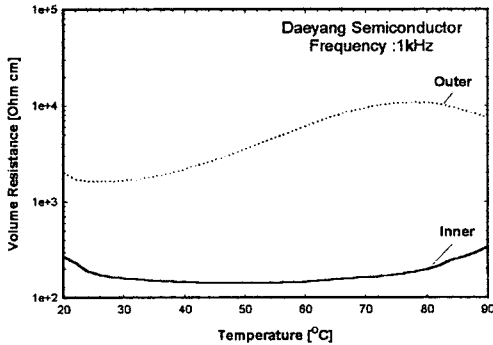


그림 5. 내외도 반도체층 체적저항의 온도의존성

다음에는 22kV XLPE 케이블로 부터 외부 반도체층의 시이트를 제작하여 유전율의 온도의존성을 측정하였다. 그림 6은 케이블 외도 반도체층의 유전율의 온도의존성을 나타냈다. 유전율은 상온에서 43정도를 나타내며, 50°C에서는 급격하게 저하된 6을 나타낸다. 또한 68°C부근에서 800이라는 값을 지니고, 86°C까지는 다시 감소하며 다시 증가하는 경향을 보인다. 이 같은 불규칙한 유전특성은 시이트와 다른 경향을 나타내는 것으로 반도체층이 실제 케이블상에서 다른 물성을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

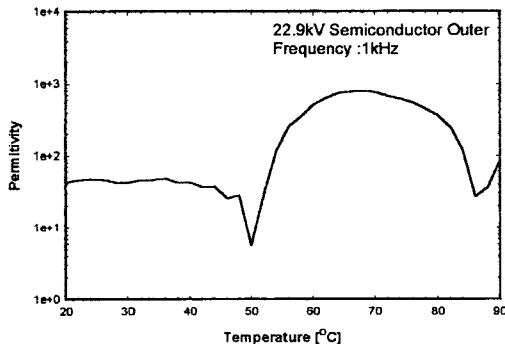


그림 6. 케이블 외도 반도체층 유전율의 온도의존성

다음에는 케이블의 외도 반도체층 시이트의 유전손실 ($\tan \delta$)의 온도의존성을 그림 7에 나타냈다. 상온에서 2800정도를 나타내고, 50°C에서 50000이상의 피크를 나타내며, 다시 온도증가와 함께 실온 보다 낮은 900을 나타낸다. 다시 86°C부근에서 7000이상의 피크를 보이며 감소하는 특성을 나타내는 불안정된 의존성을 보인다. 이 같은 결과들은 그림 6의 유전율과 $\tan \delta$ 의 온도의존성은 유사한 특성을 지니는 것으로 얻어졌다.

다음에는 동일 반도체층의 시이트의 체적저항과 온도의존성을 그림 8에 나타냈다. 체적저항은 상온에서 15kΩ·cm이며, 온도증가와 함께 60°C까지 감소하다가 다시 온도 증가와 함께 선형적으로 체적저항이 증가하는 특성을 나타내고 있다.

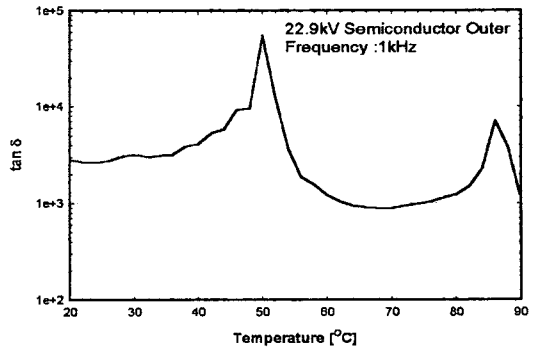


그림 7. 케이블 외도 반도체층 $\tan \delta$ 의 온도의존성

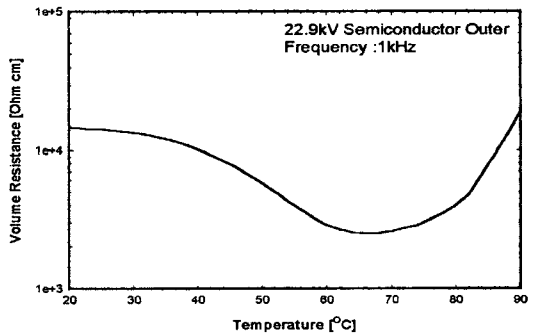


그림 8. 케이블 외도 반도체층 체적저항의 온도의존성

다음에는 22.9kV 전력 케이블로부터 제작한 계면을 갖는 반도체층/XLPE의 시이트에 관한 유전특성과 체적저항의 온도의존성을 각각 평가하였다.

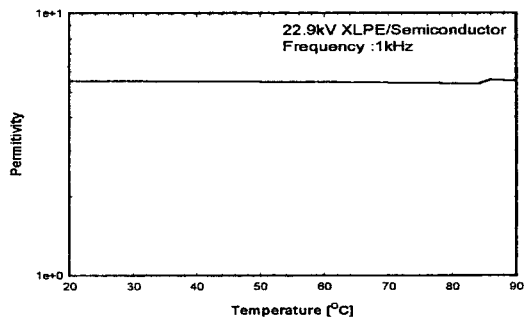


그림 9. 반도체층/XLPE 유전율의 온도의존성

그림 9는 반도체층/XLPE의 유전율과 온도의존성을 나타냈다. 유전율은 5.5로서 반도체층보다 작으며,

XLPE의 유전율에 가까운 특성을 보이며 온도의존성을 보이지 않고 XLPE의 특성을 보이고 있다.

다음에는 계면을 갖는 반도체층/XLPE의 $\tan \delta$ 의 온도의존성을 그림 10에 나타냈다. $\tan \delta$ 는 XLPE의 2.2×10^{-4} 를 보이나, 온도증가와 함께 다소 불안정된 값을 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 40~50°C범위에서 0.007의 크기를 갖는 피크를 보이며, 온도 증가와 함께 다시 감소하며 다소 변화가 심한 특성을 나타내고 있다. 이 같은 결과는 반도체층만의 측정에서와 다른 경향을 나타내는 것으로, 아직 미확인 중에 있다.

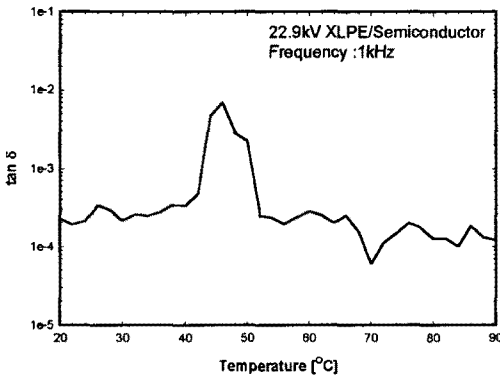


그림 10. 반도체층/XLPE $\tan \delta$ 의 온도의존성

다음에는 계면을 갖는 22kV급 전력케이블의 반도체층/XLPE 시이트의 유전특성과 온도의존성을 그림 11에 나타냈다. 시이트의 체적저항은 XLPE와 비슷한 값을 나타내고, 유전특성의 현상과 같은 온도의 증가와 함께 불안정한 값을 보이고 있다. 또한 체적저항의 값은 반도체층보다 XLPE에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타났다.

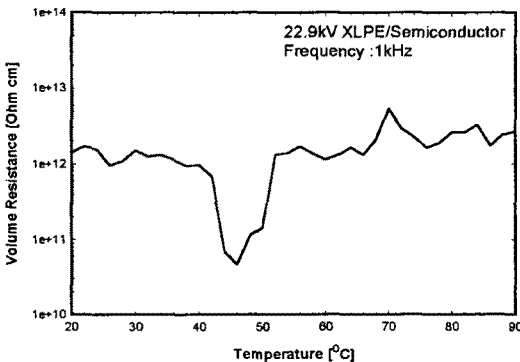


그림 11. 반도체층/XLPE 체적저항의 온도의존성

4. 결 론

반도체층과 반도체층/XLPE 시이트의 열분석과 유전/절연특성의 평가를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 각 반도체층의 시이트의 수분량은 10000~20000ppm, 케이블의 반도체층은 14000~24000ppm의 범위를 나타내며, 10시간 흡습후에 수분량은 30% 이상 증가하였다.

2. 반도체층의 열분석을 통하여 용융온도는 85~103°C의 범위에 존재하며, 카아본의 함유량은 30~40% 미만으로 나타났다.

3. 내/외도 반도체층 시이트의 유전율은 외도 반도체층은 2.0×10^5 정도이며, 온도증가와 함께 감소하는 경향을 확인 할 수 있었으며, 내도 반도체층은 4.7×10^6 을 나타내며, 온도에는 큰 의존성을 보이지 않고 있다.

4. 내/외도 반도체층의 시이트의 $\tan \delta$ 은 외도 반도체층의 경우 600이며, 온도의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이며, 내도 반도체층의 경우는 90이며, 온도증가와 함께 감소와 함께 증가하는 경향을 나타냈다.

5. 내외도 반도체층 시이트의 체적저항은 내도 보다 외도가 크며, 상온에서 $180 \Omega \cdot \text{cm}$ 로서 온도증가와 함께 증가하는 경향을 보인다. 외도 반도체층의 체적저항은 온도증가와 함께 내도 반도체층과 비교해서 크게 증가하는 경향을 보인다.

6. 케이블 외도 반도체층 시이트의 유전율은 상온에서 43이며, 50°C에서는 급격하게 저하된 6을 나타낸다. 또한 68°C부근에서 800이라는 값을 지니고, 86°C까지는 다시 감소하며 다시 증가하는 경향을 보인다.

7. 케이블 외도 반도체층 시이트의 유전손실($\tan \delta$)은 상온에서 2800이며, 50°C에서 50000이상의 피크와 함께, 다시 온도증가와 함께 실온 보다 낮은 900을 보이며, 다시 86°C부근에서 7000이상의 피크를 보이며 감소하는 특성을 나타낸다.

8. 케이블상의 반도체층/XLPE 시이트의 유전율, $\tan \delta$ 및 체적저항은 5.5, 0.007, $1.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 이고, 반도체층보다 XLPE에 큰 의존성을 나타냈다. 온도의존성은 불안정하며, 특히 40~50°C범위내에서 피크 특성을 보이고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] K.Ohata, et al., "Development of XLPE-Moulded Joint for High Voltage XLPE Insulated Cable", IEEE Trans. PAS Vol. PAS-102, No.7, pp.1935-1940, 1983.
- [2] 固体絶縁材料の界面調査専門委員会, "固体絶縁材料の界面效果", 日本電氣學會 技術報告, 第488號, pp.3-4, 1994.
- [3] Shiono, T. Shahrzad, F. Aida and E. Hosokawa, "Improvement of voltage Endurance by Additives in Semiconductive Shields of XLPE cable", Technical Bulletin, Showa Wire and cable Co., Vol. 34, pp. 59-63, 1984.
- [4] 한상욱 외, "전력케이블용 절연재료의 계면향상기술(최종보고서)", 기초전력공학공동연구소, 1998.
- [5] 한재홍 외, "반도체층내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향" 대한전기학회지 제 46권 1호, pp.19-17, 1997.
- [6] T.Tanaka, et al., Advanced Power cable Technology, CRC Press, Florida, 1983
- [7] R. Ross, "Dealing with Interface Problems in Polymer Cable Terminations", IEEE Insulation Magazine, Vol. 15, pp 5-9, 1999.
- [8] C. Dang, et al., "Dielectric Performance of Interfaces in Premolded Cable Joints", IEEE Trans. on PD, Vol 12, No.1, pp.29-32, 1997.
- [9] G. Bahder, "Performance of Supersmooth, Extra Clean Semiconductive Shields in XLPE Insulated Power Cable", IEEE Int. Symp. on Elec Ins. pp. 272-276, 1990.