

154kV 전력케이블용 XLPE 절연체와 반도체 재료의 비열 및 열전도

이경용, 양종식, 최용성, 박대희
원광대학교 전기전자 및 정보공학부

Specific Heat and Thermal Conductivity of XLPE Insulator and Semiconductive Materials for 154kV Power Cable

Kyoung-Yong Lee, Jong-Seok Yang, Yong-Sung Choi, and Dae-Hee Park
Wonkwang University

Abstract

To improve mean-life and reliability of power cable, we have investigated specific heat (C_p) and thermal conductivity of XLPE insulator and semiconductive materials in 154kV underground power transmission cable. Specimens were respectively made of sheet form with EVA, EEA and EBA added 30wt%, carbon black, and the other was made of sheet form by cutting XLPE insulator in 154kV power cable. Specific heat (C_p) and thermal conductivity were measured by DSC (Differential Scanning Calorimetry) and Nano Flash Diffusivity. Specific-heat measurement temperature ranges of XLPE insulator were from 20[°C] to 90[°C], and the heating rate was 1[°C/min]. And the measurement temperatures of thermal conductivity were 25[°C], 55[°C] and 90[°C]. In case of semiconductive materials, the measurement temperature ranges of specific heat were from 20[°C] to 60[°C], and the heating rate was 1[°C/min]. And the measurement temperatures of thermal conductivity were 25[°C] and 55[°C]. From these experimental results, both specific heat and thermal conductivity were increased by heating rate because volume of materials was expanded according to rise in temperature.

Key Words : XLPE insulator, Semiconductive Materials, Specific Heat, Thermal Conductivity

1. 서론

현재 우리가 사용하고 있는 전력케이블은 일반적인 경우 도체를 중심으로 도체차폐층 (conductor shield), 절연층 (insulation), 절연차폐층 (insulation shield), 중성선 (neutral wire) 및 외피로 이루어져 있다. 각층은 각기 고유의 역할이 있으며 각 층의 재료가 이상 현상을 보이면 이는 결국 절연층의 절연파괴를 유발하고 전력케이블의 고장으로 이어진다. 지금까지 많은 연구자들이 전력케이블 또는 전력케이블용 재료의 전기적 특성 및 현상 연구에 많은 노력을 기울여왔다. 하지만 본 실험에서는 주로 비열과 열전도도를 다루었다 [1].

만약 전력케이블내 환경에서 반도체 재료가 높은 열전도도를 갖는다면 XLPE 절연체로 급속한 열의 전도와 대류가 이루어질 것이고 또다시 외부로 열을 방출시켜 절연체를 열적 스트레스로부터 보호할 수 있을 것이다. 이것은 XLPE 절연체의 열전도도가 높아야만 가능한 일이라 생각된다.

본래 전력케이블내에 반도체 재료를 사용하는 궁극적인 목적은 도체와 중성선 사이의 불평등 전계를 완화시키는데 있지만 기존에는 수행하지 않은 반도체 재료와 XLPE 절연체가 갖는 열적특성을 비열과 열전도도로 나누어 실험함으로써 상호간의 열적 특성을 분석하고자 하였다. 더 나아가

전력케이블의 평균 수명 및 신뢰성을 만족시키기 위해 XLPE 절연체의 비열과 열전도도를 반도체 재료와 비교하여 적절한 대책을 모색코자 하였다.

2. 시편 및 실험 방법

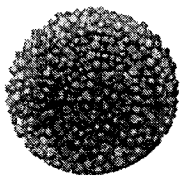
2.1 시편 제작

본 논문에서 XLPE 절연체 시편은 수거된 154kV 전력케이블 내의 XLPE를 적출하여 시트상으로 가공하였다. 반도체 재료는 EVA (Ethylene Vinyl Acetate, 현대석유화학), EEA (Ethylene Ethyl Acrylate, ATOFINA) 및 EBA (Ethylene Butyl Acrylate, Mitsui Dupont)를 기본 재료 (basic materials)로 사용하였다. 이들 재료의 조성비는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 반도체 재료는 전도성 카본블랙의 함량이 30[wt%]이었다. 반도체 재료는 그림 1과 같이

표 1. 시편의 조성표

단위: wt%

Contents	EVA	EEA	EBA	C/B	Additive	Agent	Total
#1	68.6	-	-	30	0.6	0.5	100
#2	-	68.6	-	30	0.6	0.5	100
#3	-	-	68.6	30	0.6	0.5	100
#4	XLPE insulator for 154kV power cable						



(a) 펠렛상



(b) 시트상

그림 1. 반도체 재료의 시편 형태

펠렛 형태의 시료를 70[°C]~100[°C]의 롤러에서 5분간 1차 혼련한 후 180[°C]에서 20분간 200[kg/cm²]의 압력으로 프레스를 하여 시트상으로 제작하였다.

2.2 실험장비 및 방법

비열(Cp)은 μ -Sensor 가 부착된 비열전용 DSC (TA Instrument, DSC 204F1)로 측정하였다. XLPE 절연체의 비열 측정온도 범위는 20[°C]~90[°C]이고 승온속도는 1[°C/min]였다. 반도체 재료의 측정온도 범위는 20[°C]~60[°C]이고 승온속도는 1[°C/min]였다. 열전도도는 Nano Flash Diffusivity (NETZSCH, LFA 447)로 측정하였다. XLPE 절연체의 열전도도 측정온도는 25[°C], 55[°C] 및 90[°C]였다. 반도체 재료의 측정온도는 25[°C]와 55[°C]였다. XLPE 절연체와 반도체 재료의 최대온도를 각각 90[°C]와 55[°C]로 정한 이유는 XLPE 절연체의 유리전이온도가 90[°C], 반도체 재료의 멜팅 온도가 60[°C] 전후로 나타나서 XLPE 절연체는 90[°C], 반도체 재료는 55[°C]까지로 정하였다. 이 장비는 ASTM E1461 규격에 적합한 장비로서 제논 플래시 (Xenon Flash) 램프를 광원으로 채용한다. 제논 플래시 램프는 시편 아래쪽에 위치하여 구동되고 시편의 위쪽으로 전달되는 열은 상단부에 위치한 적외선 센서 (IR detector)에 의해 측정된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비열

그림 2와 3은 XLPE와 반도체 재료의 온도에 따른 비열을 나타낸 것이다. 그림 2에서 XLPE의 비열은 온도가 상승함에 따라 2.034[J/g·°C]~4.049[J/g·°C] 범위에서 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 온도가 상승함에 따라 XLPE는 약 40[°C] 이후부터 비열이 급격히 증가하였다. 설명에 앞서, 본 실험에서 측정된 XLPE의 비열은 정압비열을 나타낸 것이다. 즉, 압력을 일정하게 하고 열을 가했을 때 나타나는 열에너지를 말한다. 일정한 압력 하에서 재료들은 온도가 상승함에 따라 체적이 팽창한다. 따라서 열의 일부가 체적의 팽창이라는 외부로의 일에 소비된다. 그러므로 온도를 높이기 위해서는 그 만큼의 열을 더 가해야 된다. 그래서 XLPE의 비열이 약 40[°C] 이후부터 급격하게 증가하게 된 것이다 [2~4].

그리고 XLPE는 온도가 상승함에 따라 약 60[°C] 부근에서 비열의 최고점을 나타내고 있다. 이후 XLPE는 약간의 비열 감소를 보이다가, 또 다시 증가하려는 경향을 볼 수 있다. 사실, 이 온도

구간은 XLPE의 유리전이온도가 나타나는 부분이다. 따라서 이 구간에서는 XLPE의 체적팽창이 또 다시 작용하는 것이 아니라 XLPE가 유리상에서 고무상으로 변화를 일으키기 위해 열을 흡수하는 영역이다. 더불어 XLPE는 상태 변화를 일으키기 위해 숨은열을 내포하고 있으므로 더 많은 열에너지가 필요하다. 그래서 이 구간에서 비열이 다소 증가하는 경향을 나타내고 있는 것이다 [2~4].

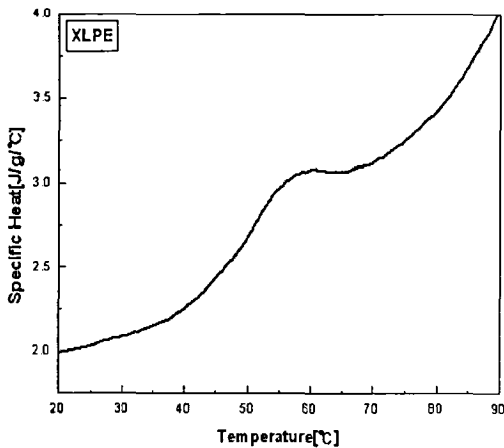


그림 2. 온도에 따른 XLPE 절연체의 비열

그림 3에서 반도체 재료의 비열은 온도가 상승함에 따라 1.693[J/g·°C]~2.398[J/g·°C] 범위에서 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 온도가 상승함에 따라 대부분의 반도체 재료는 약 30[°C] 이후부터 비열이 급격히 증가하였다. XLPE의 비열측정에서 설명한 것과 같이 반도체 재료도 열의 일부가 체적의 팽창이라는 외부로의 일에 소비된다. 그러므로 온도를 높이기 위해서는 그 만큼의 열을 더 가해야 된다. 그래서 반도체 재료의 비열이 약 30[°C] 이후부터 급격하게 증가하게 된 것이다. 그리고 반도체 재료는 온도가 상승함에 따라 약 50[°C] 부근에서 비열의 최고점을 나타내고 있다. 이후 반도체 재료는 약간의 비열 감소세를 보이다가, 또 다시 증가하려는 경향을 볼 수 있다. 사실, 이 온도 구간은 반도체 재료의 용융 온도가 나타나는 부분이다. 따라서 이 구간에서는 반도체 재료의 체적팽창이 또 다시 작용하는 것이 아니라 반도체 재료가 고체상태에서 액체상태로 변화를 일으키기 위해 열을 흡수하는 영역이다. 더불어 반도체 재료는 상태 변화를 일으키기 위해 숨은열을 내포하고 있

으므로 더 많은 열에너지가 필요하다. 그래서 이 구간에서 비열이 다소 증가하는 경향을 나타내고 있는 것이다.

위 실험으로부터 XLPE의 비열은 반도체 재료의 비열보다 다소 높게 측정되었다. 일반적으로 비열이 큰 재료일 수록 똑같은 열을 주어도 쉽게 내부 온도가 변하지 않는다. 즉 비열이 높게 측정된 XLPE의 경우, 반도체 재료보다 외부로부터의 열에 쉽게 반응하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 열전도도 측정에서도 알 수 있었다. 이후 설명은 열전도도 측정에서 언급하겠다.

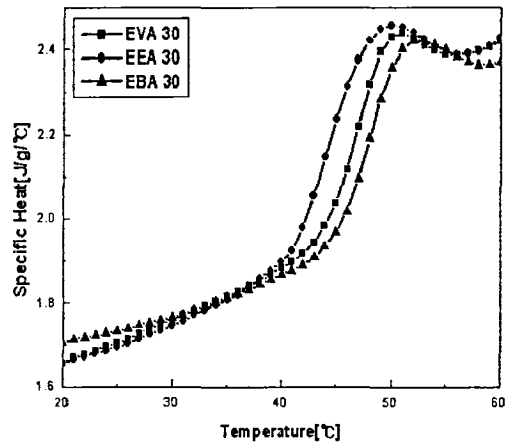


그림 3. 온도에 따른 반도체 재료의 비열

표 2. 카본블랙의 함량과 온도에 따른 반도체 재료의 비열

Specimens	Specific Heat [J/g·°C]		
	25[°C]	55[°C]	90[°C]
XLPE	2.034	2.976	4.049
EVA 30	1.704	2.389	-
EEA 30	1.693	2.397	-
EBA 30	1.733	2.398	-

3.2 열전도도

그림 4는 XLPE의 온도에 따른 열전도도의 변화를 나타내고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 XLPE의 열전도도는 25[°C]에서 0.223[W/mK], 55

[°C]에서 0.267[W/mK] 그리고 90[°C]에서 0.28 [W/mK]를 보이며 증가하고 있다. 이와같이 XLPE는 온도가 상승할 수록 열전도도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 앞서 설명한 비열을 통해서 해석이 된다. 비열은 질량이 1[g]인 재료의 온도를 1[°C] 높이는데 필요한 열에너지라고 정의한다. 이것은 다시 말해서 재료내 입자들이 열에너지를 저장한다고 생각할 수 있다 [4~7]. 비열 측정에서 XLPE는 열을 받게 되면 그 열을 모두 재료내의 온도 상승에 쓰지 않는다. 즉, XLPE내 입자들은 인가된 열에너지를 저장하였다가 어느 임계지점(=재료내 열평형 온도)에 이르면 열에너지를 감당하지 못하고 다른 지점으로 열에너지를 전달한다. 따라서 XLPE는 계속적인 온도의 상승에 따라 열평형이 이루어지는 지점까지 열에너지를 저장하고 남은 여분의 열에너지가 다른 지점으로 전달되는 것이다.

내 열평형 온도)에 이르면 열에너지를 감당하지 못하고 다른 지점으로 열에너지를 전달한다. 따라서 반도체 재료는 계속적인 온도의 상승에 따라 열평형이 이루어지는 지점까지 열에너지를 저장하고 남은 여분의 열에너지가 다른 지점으로 전달되는 것이다.

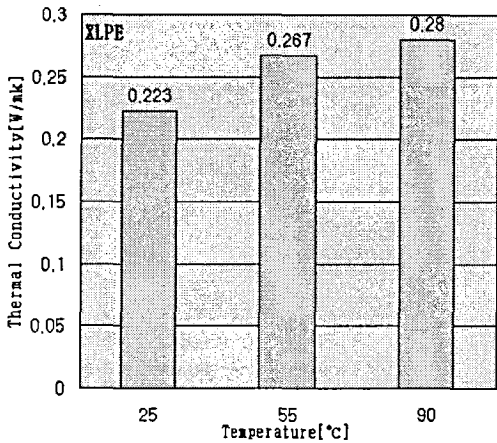
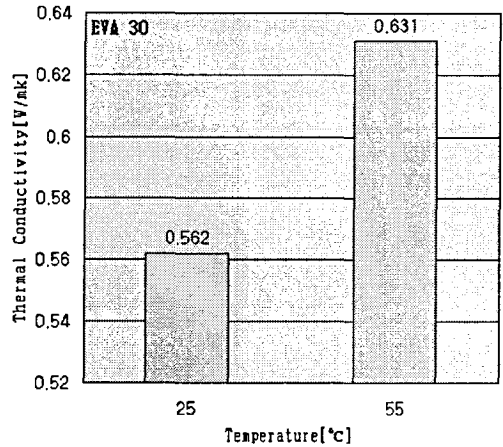


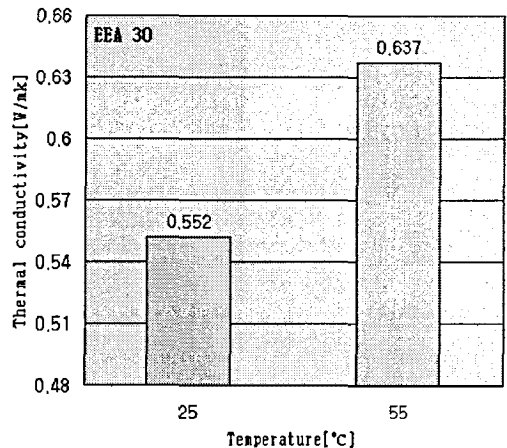
그림 4. 온도에 따른 XLPE 절연체의 열전도도

그림 5는 반도체 재료의 온도에 따른 열전도도의 변화를 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 25[°C]에서 반도체 재료의 열전도도는 0.552 [W/mK]~0.587[W/mK]의 범위에서 증가하고 있으며, 55[°C]에서 반도체 재료의 열전도도는 0.631 [W/mK]~0.673[W/mK]의 범위에서 증가하고 있다. 이와같이 반도체 재료는 온도가 상승할수록 열전도도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

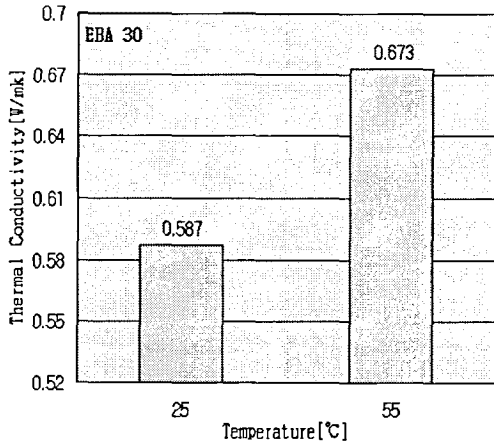
이러한 경향은 앞서 설명한 XLPE의 열전도도 측정에서와 같이, 반도체 재료내 입자들은 인가된 열에너지를 저장하였다가 어느 임계지점(=재료



(a) EVA 30



(b) EEA 30



(c) EBA 30

그림 5. 온도에 따른 반도체 재료의 열전도도

덧붙여, 우수한 열전도성을 갖는 카본블랙이 첨가됨에 따라 베이스 수지의 원자와 카본블랙 열전자간의 열진동이 증가하게 된다. 따라서 반도체 재료의 열전도도가 증가하는 것은 당연하다고 하겠다.

위 결과로부터 XLPE의 열전도도는 반도체 재료에 비해 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 열전도도가 낮다는 것은 재료내에 전달된 열의 전도와 대류가 매우 느리게 진행된다는 것을 의미한다. 이것은 다시 말해 외부로부터의 열에 쉽게 반응을 하지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 비열 측정에서도 알 수 있었다. 즉, 비열이 가장 높게 나타났던 XLPE는 반도체 재료보다 외부의 열에 쉽게 반응을 하지 않았다. 이와같은 결과는 XLPE의 낮은 열전도도를 대변해주는 결과라고 하겠다.

서론에서 언급하였듯이 원천적으로 열전도도가 낮은 XLPE는 열의 전도와 대류가 매우 느리게 진행된다. 본 실험에서 알 수 있듯이 XLPE 내외의 반도체 재료가 높은 열전도도를 갖는다면 도체와 밀접한 내부반도체의 열전도와 증성선과 밀접한 외부반도체의 열전도가 XLPE로 빨리 진행 될 것이다. 이렇게 낮은 열전도도를 갖는 XLPE로 전도된 열은 높은 온도와 산화반응에 의한 경년열화를 발생시켜 절연체의 화학구조를 변화시킬 수 있다. 이와같이 XLPE와 반도체 재료의 불평등한 열전도 특성은 전력케이블의 수명을 단축시킬 수 있다.

따라서 반도체 재료와 XLPE 절연체간의 열평형을 유지해야한다. 이것은 절연체인 XLPE보다 반도체 재료의 개질을 통해 구현을 해야 한다고 판

단된다. 즉, 반도체 재료는 내부에 전도성 카본블랙을 함유하고 있다. 카본블랙은 입자간의 열전자를 수송하는 클러스터를 형성하여 열을 전도시키는 역할을 하므로 적정량의 카본블랙을 선정하여 XLPE와 반도체 재료간의 열평형을 유지하는 것이 바람직할 것이다 [2, 3, 5].

4. 결론

본 논문에서는 온도에 따른 XLPE 절연체와 반도체 재료의 열적 특성을 측정하기 위해 비열과 열전도도를 알아보았다.

비열 측정에서 XLPE의 경우, 온도가 상승함에 따라, XLPE내의 체적 팽창으로 인한 열에너지 소비가 증가하여 약 40[°C] 이후부터 비열이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 완만한 감소를 보이던 비열은 60[°C] 이후 또 다시 증가하려는 경향을 보였는데, 이것은 XLPE의 상태변화에 필요한 열에너지의 증가 때문이었다. 반도체 재료의 경우, 온도가 상승함에 따라, 대부분의 반도체 재료는 약 30[°C] 이후부터 비열이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 완만한 감소를 보이던 비열은 50[°C] 이후 또 다시 증가하려는 경향을 보였는데, 이것은 반도체 재료의 상태변화에 필요한 열에너지의 증가 때문이었다.

마지막으로 열전도도 측정에서 XLPE와 반도체 재료의 경우, 온도가 상승할 수록 열전도도는 증가하였다. 이것은 XLPE와 반도체 재료 내 입자들이 인가된 열에너지를 저장할 하였다가 어느 임계지점(=재료내 열평형 온도)에 이르면 열에너지를 감당하지 못하고 다른 지점으로 열에너지를 전달하기 때문이었다. 또한 반도체 재료의 경우, 우수한 열전도성을 갖는 카본블랙의 첨가가 열전도도를 상승시키는 역할을 하였다.

위 결론으로부터 XLPE는 반도체 재료보다 높은 비열과 낮은 열전도도를 나타내었다. 이것은 열전도도에서 설명된 경년열화와 같은 현상들을 유발할 수 있다. 따라서 반도체 재료내에 첨가되는 카본블랙을 적정량 선정함으로써 반도체 재료와 XLPE 절연체간의 열평형을 유지하는 것이 바람직하다고 하겠다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 전해드립니다.

참고 문헌

- [1] 한재홍, 김상준, 권오형, 강희태, 서광석, “반도전층내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향”, 전기학회논문지, Vol.46, No.1, pp. 19~27, 1997.
- [2] 김성철 외, “고분자공학I”, 회중당, 1994, Chapter 1~14.
- [3] 박정호, 윤영섭, 이상렬, 이승기, 이준신, “전자재료 물성 및 소자”, 2002, Chapter 1, 2.
- [4] 이경용, 양종석, 최용성, 박대회, “반도전재료의 불순물 측정 및 물성에 관한 연구”, 전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 9, pp. 455~458, 2004.
- [5] 전용구, 김재경, 함덕순, 김진석, “EVA의 Vinyl Acetate 함량변화에 따른 열적-기계적 성질 연구”, Polymer(korea), Vol.15, No.4, pp.402~410, 1991.