

나노복합체를 함유한 XLPE의 전류밀도에 미치는 온도의 영향

정현정^{ID}, 양이슬, 남진호, 남기준, 김동욱

LS전선

Effect of Temperature on Current Density of Nano Composite XLPE Material

Hyun-Jung Jung, Yi-Seul Yang, Jin-Ho Nam, Gi-Joon Nam, and Dong-Wook Kim
 LS Cable and System, Gunpo 15845, Korea

(Received April 10, 2019; Revised May 15, 2019 Accepted May 28, 2019)

Abstract: In this study, the volume resistivity of XLPE materials with various voltage ratings was discussed. The volume resistivity of the developed XPLE nanocomposite was measured, and the conductivity mechanism of the material was also examined. The ASTM D 257 and IEC 60093 measurement methods were used for these tests. The equipment was designed to measure up to a temperature of 200°C, and the electrode structure was designed to maintain the thickness and temperature uniformity of the sample. The conductivity of the sample decreased with temperature, and the samples reached saturation within 500s, after which the conductivity leveled off. By analyzing the current density and the electric field, we can well explain the electric conductivity behavior of our sample with the Schottky mechanism.

Keywords: Nano composite, XLPE, Electrical conductivity, Volume resistivity, Schottky mechanism

1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 대륙 간 연계 및 장거리 전력 수송을 위한 고품질의 초고압/해저 케이블과 풍력/태양광 발전 등 분산전원의 전력 수송을 위한 배전 케이블의 수요가 급격히 증가되고 있다. 이에 따라 송배전선로의 안정성과 효율증대를 위한 새로운 케이블 개발이 다방면으로 진행되고 있으며, 이를 위해서는 케이블 재료, 설계 및 평가기술에 대한 연구가 매우 중요하다.

전력케이블에 사용되는 절연재료는 가교 폴리에틸렌(cross-linked polyethylene, XLPE), 함침 컴파운드 적용 절연지(mass impregnated paper, MI Type),

저점도 오일 함침 절연지(oil filled paper, OF Type) 등이 있다. 이 중 OF 케이블의 경우는 오일을 지속적으로 관리 제어해야 하는 단점으로 인해 장거리 송전용으로는 제한이 있으며, MI케이블의 경우는 허용온도가 상대적으로 낮거나 제조 생산성이 낮은 단점이 있다.

한편 XLPE는 높은 기계적 물성과 내열성, 우수한 전기적 특성과 더불어 환경 친화적 소재일 뿐만 아니라 포설과 유지관리가 용이하다는 장점으로 AC 송전 케이블에 주로 사용되어 왔으며, 최근에는 그 적용이 DC 케이블로도 적극적으로 확대되고 있다.

기존의 AC XLPE 소재의 DC 전기적 특성의 취약성을 개선하기 위해 여러 가지 연구가 진행되고 있으며, 특히 공간전하 축적 억제 특성과 체적저항률을 높이기 위한 재료 기술이 연구되어 왔다. 이 가운데 나노입자를 첨가하여 나노 복합 재료화하는 많은 연구가 일본과 국내에서도 진행되어 왔다. 기존의 나노입자를 적용한 고분자 복합소재 연구는 주로 재료의 기계적 및 열적 물성의 향상을 위한 연구에 집중되어 있으나, 초고압 전기절연용 나노복합소재에 대한 연구는 전기적 특

✉ Hyun-Jung Jung; hyunjung@lscns.com

성과 기계적 특성을 동시에 향상시키는 방향으로 진행 되는 것이 특징이다.

특히 전기절연용 재료에 대해서는 일본 연구진들에 의해 나노 크기의 무기 충전제와 혼합된 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene, LDPE) 나노 복합체가 다양한 온도와 고전계하에서 우수한 체적저항률과 공간 전하 축적을 가지는 것으로 보고된 바 있다 [1,2]. 본 연구팀 또한 최근 수년간 케이블용 나노 복합 XLPE 절연체에 대한 연구를 진행하여 왔으며, 이를 통해 나노 입자의 합성, 표면 처리 및 복합재료 제조 공정 등을 개발한 바 있다 [3,4]. 이러한 연구의 일환으로 본 논문에서는 나노 복합 재료 기술을 적용한 XLPE에 대해 전기 전도도를 측정하였고 그 메커니즘을 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 샘플 준비

나노 복합 재료에서 나노 입자의 분산은 재료의 성능과 특성을 결정하는 데 매우 중요한 요소이며, 본 연구에서는 사용한 나노 입자와 LDPE의 상용성 향상을 위해 다양한 표면 처리 물질과 방법으로 개질하였다 [3,4]. 표면 개질 된 나노 입자는 LDPE와 용융 혼련법으로 혼합하고 가교제를 투입하여 나노 복합 XLPE를 제조하였으며, 프레스를 사용하여 시료를 성형하였다. 이렇게 제조한 샘플을 대상으로 분산성 평가, 전기전도도 평가를 진행하였다.

XLPE 매트릭스에서의 나노 입자의 분산은 주사전자

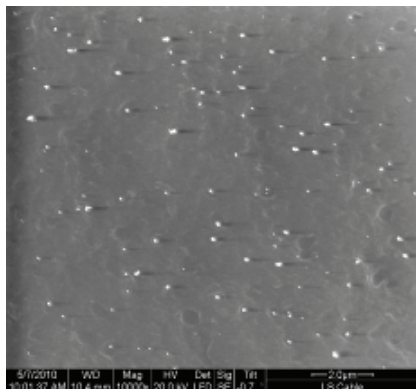


Fig. 1. SEM image of nano XLPE composite (x10000, scale=2.0 μm).

현미경(scanning electron microscope, SEM)을 통해 관찰하였으며, 그 결과를 그림 1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 나노 복합 XLPE에서 검정색이 XLPE 매트릭스며 흰색이 분산된 무기나노입자인데, 나노입자가 작은 크기로 매우 균일하게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

2.2 전기 전도도 측정

절연 재료의 전기 전도는 다소 복잡한 과정을 통해 진행되며, 다양한 이론이 문헌에서 제안된 바 있다 [5,6]. 본 연구에서는 전기 전도도 측정을 ASTM D 257에 기반하여 진행하였는데, 그 전극 구성과 전기 전도 측정 설비의 개념도는 그림 2와 같다.

이 장비를 오븐에 설치하여 최대 200°C까지 전기 전도도를 측정할 수 있다. 장비에 사용된 DC 전압 공급은 Keithley-248을 사용하였고 시료의 두께를 50~200 μm로 조정하여 최대 20~100 kV/mm의 고전계까지 측정할 수 있도록 제작하였다. 미세 전류는 Keithley-617 electrometer를 적용하였으며, LabVIEW 소프트웨어와 GPIB 통신을 이용하여 측정 신호를 제어하였다. 전극 구조는 ASTM에서 최소 50 mm 또는 100 mm 직경의 sample을 추천하나 이는 1 mm 두께에 500 V나 1,000 V를 적용할 때 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 고전계와 두께 균일성 확보를 위해 샘플 사이즈를 최소화하여 실험을 진행하였으며 전극 구조는 그림 3과 같다. 아래의 그림에서 D1은 measuring electrode (electrode No.1)의 크기이며, D2는 measuring electrode와 guard electrode의 크기이다. D3는 counter electrode의 크기로 그림에서 electrode No.3로 표기하였다.

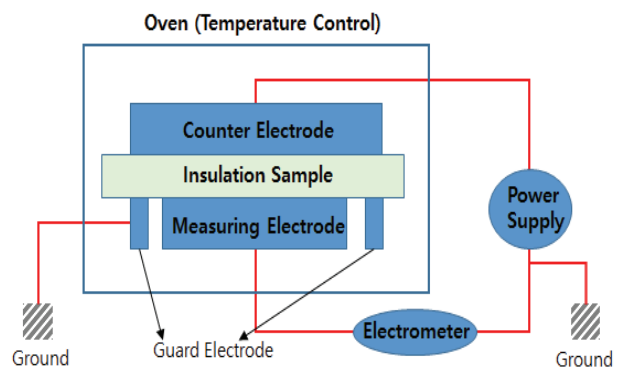


Fig. 2. Electrical conduction measurement system.

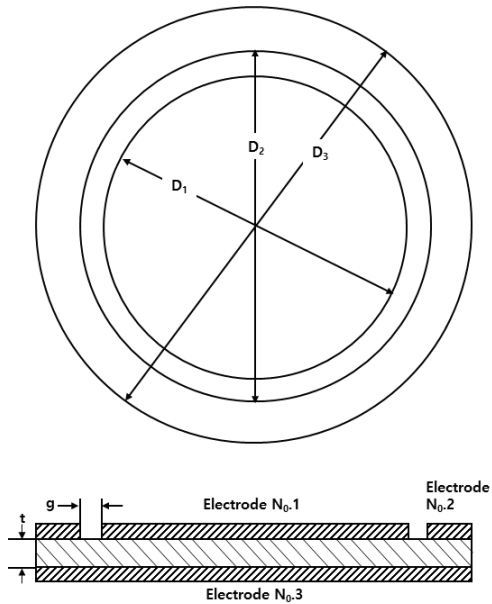


Fig. 3. Modified electrode structure (ASTM D 257). $D_1=28$ mm, $D_2=34$ mm, $D_3=40$ mm.

3. 결과 및 고찰

3.1 체적저항률 측정 결과

체적저항률은 절연재료의 절연특성을 결정짓는 매우 중요한 물성인데, 본 연구에서는 상온(25°C)에서 90°C 까지 전계(kV/mm)의 함수로 체적저항률을 측정하였다. 90°C에서 1시간 동안 30 kV/mm의 전계를 인가했을 때 정상 상태에 도달하는 전도 전류 데이터를 그림 4에 나타내었다. 본 결과에서 XLPE 유전체에서 전도 전류는 500초까지 급격히 떨어지고 이후 안정화됨을 확인할 수 있다. 이는 직류전압을 인가한 후 충전 전류는 곧 없어지고 다양한 원인에 의한 흡수전류가 500초까지 감소되어 결국 사라짐에 따라 절연저항에 의한 누설전류만 흐르는 상태가 됨을 알 수 있다.

전류 밀도는 체적 저항률의 기본 구성 요소로부터 계산되며, 다양한 온도에서 시편의 체적 저항률에 대한 전기장의 의존성은 그림 5에 나타난 바와 같다. 온도가 높아질수록 전기장에 대한 체적저항률은 급격하게 감소함을 알 수 있다. 또한 저온에서는 전계에 따라 체적저항률이 급격하게 낮아지는 반면, 고온에서는 그 변화율이 작아짐을 확인하였다. 특히 50°C 이상의 온도에서 10 kV/mm 이상의 전계에서 체적저항률이 일정하게 수렴하였다.

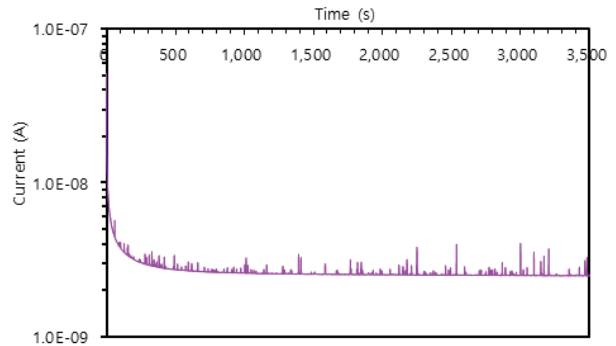


Fig. 4. Conduction current at 90°C and 30 kV/mm.

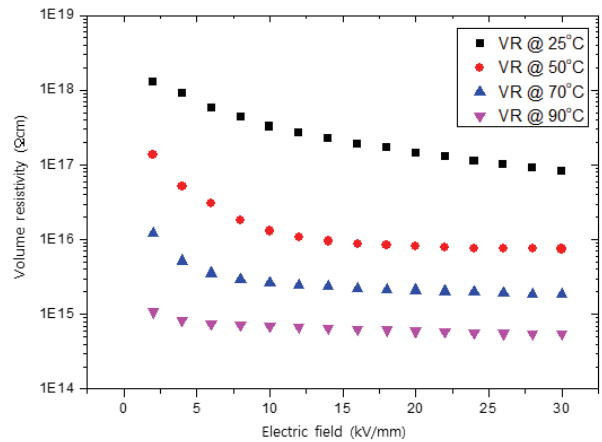


Fig. 5. Volume resistivity with electric fields and temperatures.

3.2 전도 메커니즘 해석

시편의 전류 밀도와 인가된 전계의 관계를 그림 6에 나타내었다. 이것은 $\log J$ 와 $E^{1/2}$ 사이의 관계를 나타낸 Schottky plot이다. 그림에서 보는 바와 같이, 높은 전기장에서 직선적인 관계가 얻어지는 것을 확인하였다. Schottky plot에 따라 절연저항에 의한 누설전류가 흐를 때 전류 밀도 J 는 아래 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{(\phi - \beta_s E^{1/2})}{kT}\right) \quad (1)$$

$$\beta_s = \left(\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}\right)^{1/2} \quad (2)$$

여기에서 β_s 는 Schottky 상수, A 는 Richardson 상수(6.5×10^5 A/deg.m²), T 는 온도, ϕ 는

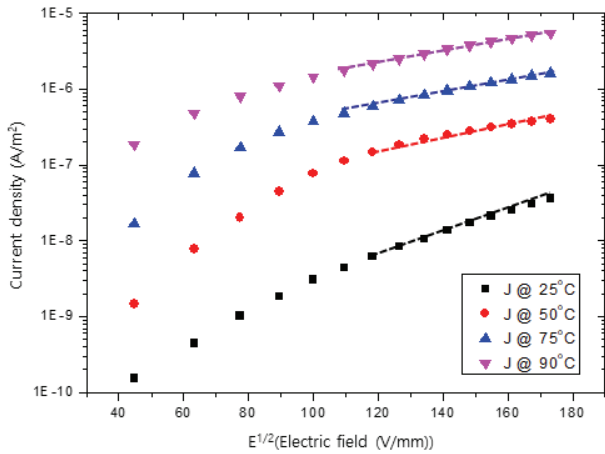


Fig. 6. The schottky plot ($\log J$ vs $E^{1/2}$) with measuring temperatures.

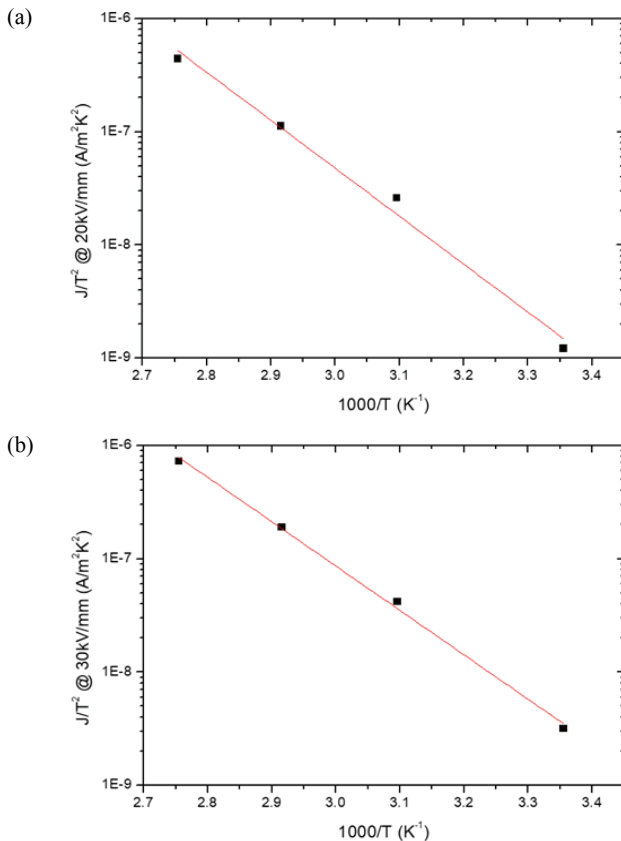


Fig. 7. The schottky plot of $\log J/T^2$ vs $1,000/T$ at the applied electric fields of (a) 20 kV/mm and (b) 30 kV/mm.

유효 일함수(전극 및 폴리머), E 는 전기장, k 는 볼츠만 상수(1.38×10^{-23} J/K), e 는 전자 전하, ϵ_r 은 비유전율, ϵ_0 는 진공의 유전율(8.854×10^{-12} F/m)이다.

Schottky plot에 대한 상수인 β_s 는 식 (3)을 통해서 각각의 온도에서 그림 6의 직선 관계의 기울기로부터 구할 수 있다.

$$\log J = \log(AT^2) - \frac{(\phi - \beta_s E^{1/2})}{(kT)} \quad (3)$$

유전율의 경우는 식 (2)를 이용하여 계산될 수 있으며, 이와 같이 얻은 ϵ_r 은 약 2.1~2.7이다. 이 값은 XLPE의 유전율과 유사하며 그 차이는 폴리에틸렌의 일반적인 현상이다 [7,8].

그림 7에서는 Schottky conduction을 $\log J/T^2$ 및 $1,000/T$ 에 대해서 plot을 나타내었다. 그림 7(a)의 경우는 전계가 20 kV/mm, 7(b)는 30 kV/mm 전기장을 나타내었는데, 그래프의 도시된 바와 같이 직선 관계가 얻어진 것을 알 수 있다. 그림 6 및 그림 7의 직선관계를 통해, 본 연구에서 사용된 XLPE의 전도 메카니즘은 10 kV/mm 이상에서는 Schottky 효과에 의한 전자 방출이 주요 전도 메카니즘인 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 나노 무기입자를 함유한 XLPE 나노 복합재료를 사용하였으며, 샘플의 체적저항률 측정을 다양한 전계 및 온도에서 진행하였다. 이를 통해 전류 밀도의 값은 온도가 증가함에 따라 높은 값을 나타냄을 확인하였고 이는 온도가 증가함에 따라 전하 밀도가 증가하는 현상에 의한 것으로 설명될 수 있다. 또한 전류 밀도의 증가율은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 나노 복합 XLPE의 전기전도 메카니즘을 이해하기 위해 $\log J$ 와 $E^{1/2}$ 및 $\log J/T^2$ 대 $1,000/T$ 의 상관관계를 확인한 결과, 시료의 전류 밀도 및 전기장 특성을 살펴보면 전류 밀도와 전기장 사이의 직선적인 선형의 관계를 가지고 있음을 확인하였다. 또한 전류 밀도와 전계도 직선적인 관계를 확인하였으며 이를 통해 본 연구에서 사용한 나노 복합 XLPE는 Schottky 메카니즘을 따르는 것으로 결론 내릴 수 있다.

ORCID

Hyun-Jung Jung

<https://orcid.org/0000-0002-2309-1262>

감사의 글

This work was supported by the Smart Grid Development of Core Technology Project of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea) (No.20171210201080).

REFERENCES

- [1] Y. Murata, Y. Sekiguchi, Y. Inoue, and M. Kanaoka, *Proc. Proceeding of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005 (ISEIM 2005)* (IEEE, Kitakyushu, Japan, 2005) p. 650. [DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2005.193453>]
- [2] Y. Hayase, H. Aoyama, Y. Tananka, T. Takada, and Y. Murata, *Proc. 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials* (IEEE, Bali, Indonesia, 2006) p. 159. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284142>]
- [3] J. H. Nam, H. J. Jung, Y. S. Yang, T. H. Lee, W. K. Park, J. T. Kim, and J. H. Lee, *Proc. Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials* (IEEE, Niigata, Japan, 2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2014.6870814>]
- [4] Y. J. Kim, S. T. Ha, G. J. Lee, J. H. Nam, I. H. Ryu, S. H. Nam, C. M. Park, I. In, J. Kim, and C. J. Han, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **13**, 3464 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7276>]
- [5] Y. J. Park, J. Y. Sim, K. J. Lim, J. H. Nam, and W. G. Park, *J. Korean Phys. Soc.*, **65**, 248 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.65.248>]
- [6] K. S. Suh, C. R. Lee, J. S. Noh, J. Tanaka, and D. H. Damon, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **1**, 224 (1994). [DOI: <https://doi.org/10.1109/94.300254>]
- [7] R. Nath, T. Kaura, and M. M. Perlman, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **25** (2), 419 (1990). [DOI: <https://doi.org/10.1109/14.52393>]
- [8] D. K. Das-Gupta and R. S. Brockley, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **11**, 955 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/11/6/015>]