

새로운 지중배전케이블용 절연재료의 공간전하 거동

Space Charge Behaviors of New Insulating Materials for URD cables

고정우 고려대학교 재료공학과
서광석 고려대학교 재료공학과
김중은 고려대학교 재료공학과
남윤선 LG 화학 테크센터 PE팀
김덕주 LG 화학 테크센터 PE팀

Jung Woo Ko Department of Materials Science , Korea University
Kwang S. Suh Department of Materials Science, Korea University
Jong Eun Kim Department of Materials Science, Korea University
Yoon Sun Nam PE team Tech. Center, LG chemical
Duck Joo Kim PE team Tech. Center, LG chemical

Abstract

Electrical properties such as space charge distribution and electrical conduction of XLPE/VLDPE blends were studied. When the VLDPE is blended, residual charge inside XLPE increases. In case of electrical conduction characteristics, there were no changes in electrical conduction mechanism, space charge limited conduction. XLPE/VLDPE blend including crosslinking coagent showed relatively small current density. It might be due to the carbonyl group in crosslinking coagent.

Key Words : Tree retardant XLPE, Water tree, Breakdown strength, Underground distribution cables

1. 서론

지중배전케이블은 고분자 절연체인 가교 폴리에틸렌 (crosslinked polyethylene; XLPE)으로 절연되어 있는데, 이는 사용 도중에 수트리 현상에 의해 급속히 열화되어 결국에는 절연파괴되는 경우가 많으므로 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 수트리 현상에 대한 연구 중에서 수트리 열화에 저항성이 강한 고분자 절연체의 개발은 전력케이블의 수명을 연장한다는 의미에서 매우 중요한 연구과제로 취급되어 왔다.

내수트리성 가교폴리에틸렌 (tree retardant crosslinked polyethylene; TR-XLPE)의 개발은 초기에는 첨가제를 혼합하는 형태의 연구가 주종을 이루었으나, 첨가제는 사용 도중에 소멸될 수 있다는 단점 때문에 최근에는 블렌드 또는 공중합체를 이용하는 방법을 주로 사용하고 있다¹⁾.

이 중 블렌드에 대한 연구는 주로 폴리에틸렌에 에틸렌비닐아세테이트 (ethylene vinylacetate;

EVA) 또는 에틸렌에틸아크릴레이트 (ethylene ethyl acrylate; EEA) 등의 에틸렌계 공중합체를 혼합하는 방법을 이용하였다²⁾. 그러나 이들 에틸렌계 공중합체는 극성기를 가지고 있어 극성이 낮은 폴리에틸렌과의 상용성 문제가 발생하여 적용이 어렵다³⁾. 따라서 폴리에틸렌과 기본적 화학구조가 동일한 극저밀도 폴리에틸렌 (very low density polyethylene; VLDPE)을 이용해 XLPE/VLDPE 블렌드를 제조한 후 이 블렌드에 대한 수트리, 절연파괴 특성, 등의 전기적 성질을 평가한 바 있다⁴⁾. 그러나 이 재료가 두 고분자를 혼합하여 제조된 만큼 계면의 존재 가능성이 높고, 이에 따른 전기적 성질의 변화가 있을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 좋은 수트리 특성을 보인 XLPE/VLDPE 블렌드를 선택하여 이들 재료에 대하여 또 다른 절연파괴의 한 요인인 공간전하 축적에 대한 실험을 실시하고, 전기전도 특성에 대해서도 알아보았다.

2. 실험

2.1. 시료 제작

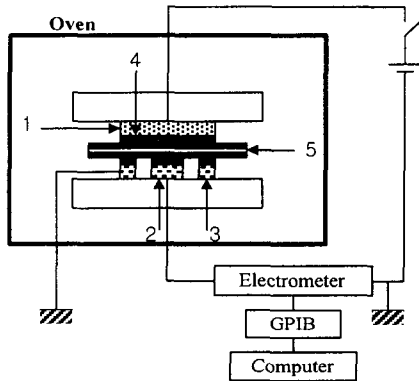
본 연구에서 기준수지로 사용된 폴리에틸렌은 LG 화학에서 생산되는 LDPE를 사용하였는데, 밀도는 0.920 g/cm^3 이고 용융지수는 2.0 g/10 min 이다.

블렌드의 제조는 이축압출기 (twin screw extruder)를 사용하였는데, 그 자세한 내용은 이전 발표한 바와 동일하다⁶⁾.

2.2. 공간전하 분포 실험

공간전하 분포의 측정은 전기음향 펄스 방법 (Pulsed electroacoustic method)을 사용하였고, 이에 대한 원리는 기존에 발표된 바와 같다⁷⁾. 공간전하 분포 측정에 사용된 시편은 hot press를 이용하여 180°C 에서 10분간 가교시키며 압축성형하였고, 이 시편의 양면에 80°C 에서 100시간 동안 진공처리한 반도체성 전극을 열과 압력을 가하여 부착하였다.

공간전하 분포의 측정은 10 kV/mm 부터 40 kV/mm 까지의 직류 전기장을 5 kV/mm 씩 단계적으로 증가시켜 각각 30분 동안 인가하고 단락시킨 직후 폭이 10 ns , 크기가 2 kV 인 전기펄스를 가하여 측정하였다. 또한 40 kV/mm 의 전기장을 인가하고 나서 측정한 후에 계속 방전을 시키면서 시간에 따른 음전극 쪽의 잔류전하량을 측정하였다.



1: Counter electrode, 2: Measuring electrode
3: Guard ring, 4: Semicon electrode, 5: Test film

그림 1. 전기전도 실험 장치의 개략도

2.3. 전기전도 실험

전기전도도 측정을 위하여 hot press를 사용하여

두께 약 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 시편을 제작하여 양 쪽 면에 80°C 에서 100시간 동안 진공처리한 필름 형태의 반도체성 전극을 전하분포 측정용 시편과 같은 방법으로 부착하였다. 전기전도도 측정에 사용된 장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 측정전극의 면적은 6.202 cm^2 이며, 전극 시스템은 온도 조절이 가능한 오븐 내에 장치하였으며, $30 \sim 85^\circ\text{C}$ 의 온도 구간에서 온도를 증가시키면서 전압의 증가에 따른 전도전류의 변화를 살펴보았다. 본 실험에서는 $50 \sim 1400 \text{ V}$ 의 직류전압을 가하고 30분이 지난 후의 전류 값을 정상 상태 전도전류 (steady state conduction current)로 가정하여 마지막 열 개의 측정치를 평균하여 일정 온도와 일정 전압에서의 전도전류로 택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 새 절연재료의 전기적 성질

표 1에 XLPE와 VLDPE의 블렌딩을 통한 새 절연재료의 수트리 길이, 절연파괴강도 등의 전기적 성질을 나타내었다.

표 1. 새 절연재료의 전기적 성질

	수트리 길이 (μm)	AC breakdown strength (kV/mm, Weibull parameter)		
		E_{avg} (Average strength)	E_0 (Minimum strength, $P = 1\%$)	θ (Characteristic strength, $P = 63.2\%$)
XLPE/VLDPE	190	226	176	232
XLPE/VLDPE + 가교조제	177	191	130	200
경쟁수지 A	252			
경쟁수지 B	280			

3.2. 공간 전하 분포 특성

그림 2에 본 연구에 사용된 기준 XLPE, XLPE/VLDPE 블렌드, 그리고 가교조제가 첨가된 XLPE/VLDPE 블렌드의 공간전하 분포를 나타냈다.

세 시료에서 공통적으로 나타난 현상은 낮은 전기장 - 10 내지 20 kV/mm -에서는 전형적인 이중전하의 경향을 나타내면서 전기장의 증가에 따라

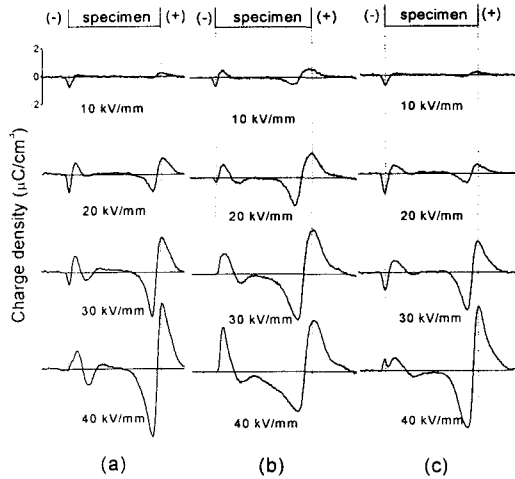


그림 2. 각 시료의 공간전하 분포도 (a) XLPE (b) XLPE/VLDPE 블렌드 (c) 가교조제를 첨가한 XLPE/VLDPE 블렌드

이종전하의 양이 늘어났고, 가해준 전기장이 20 내지 30 kV/mm로 증가하면서부터 시료 내부에 음전하가 축적되는 것이다. 블렌드 시료의 경우 시료 내부의 더 넓은 범위에 걸쳐 전하가 축적된 것은 두 물질간의 계면이 전하 저장장소로 작용한 때문이라 생각된다⁴.

3.2 전기전도 특성

그림 3에 각각 세 시료의 전기장에 따른 전류밀도를 나타내었다. 세 시료 모두 전기장과 온도에 따라 전류밀도가 증가함을 알 수 있다. J-E 특성 곡선은 대략 세 구역으로 나눌 수 있고, 각 구역에서의 전류밀도는 전기장에 대해서 직선적인 관계를 나타낸다. $J \propto E^n$ 의 관계에서 $n=1$ 이면 ohmic성 전도를 의미하고 $n=2\sim6$ 면 SCLC성 전도 (공간전하제한전도)를 의미한다. 이들 세 시료는 공통적으로 낮은 전기장 범위에서는 이온성의 ohmic 전도가, 그리고 높은 전기장 범위에서는 주입된 전류와 재료 내의 전류와의 비평형으로 인한 공간전하제한전도가 주된 전도기구인 것으로 보여진다. 그리고 SCLC성 전도기구는 전류밀도의 시료두께 의존성으로써 확인할 수 있는데, 이것은 다음 식에 의해 확인할 수 있는 것이 일반적이다.

한전도)를 의미한다. 이들 세 시료는 공통적으로 낮은 전기장 범위에서는 이온성의 ohmic 전도가, 그리고 높은 전기장 범위에서는 주입된 전류와 재료 내의 전류와의 비평형으로 인한 공간전하제한전도가 주된 전도기구인 것으로 보여진다. 그리고 SCLC성 전도기구는 전류밀도의 시료두께 의존성으로써 확인할 수 있는데, 이것은 다음 식에 의해 확인할 수 있는 것이 일반적이다.

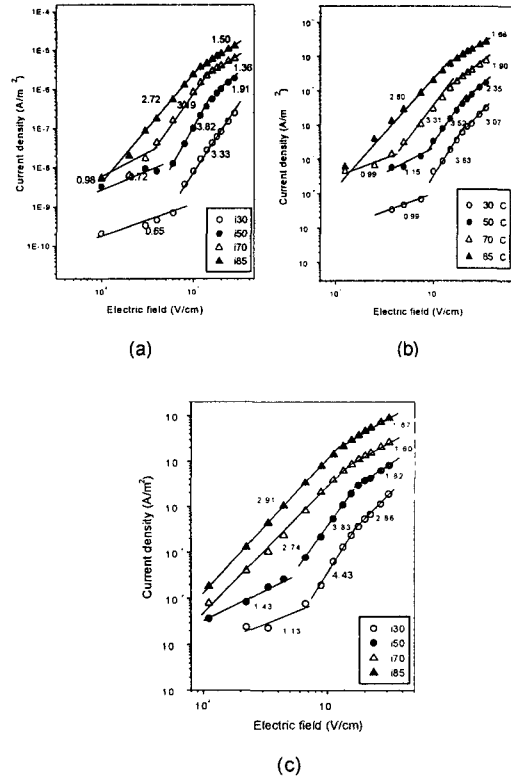


그림 3. 각 시료의 J-E 곡선 (a) XLPE (b) XLPE/VLDPE 블렌드 (c) 가교조제를 첨가한 XLPE/VLDPE 블렌드

$$J = (9 \epsilon \epsilon_0 \mu V^2) / (8d^3)$$

위의 식은 trap-free인 절연체에 대한 Child 법칙이라 알려져 있다 (Mott and Gurney, 1940). log-log scale 상에서 plot했을 때 전류밀도가 시료 두께에 대하여 대략 -3의 기울기를 가지면 SCLC성 전도기구라 볼 수 있다⁵. 그림 4에 XLPE/VLDPE 블렌드의 전류밀도의 두께 의존성을 나타내었다. 결과에 나타난 바와 같이 측정된 두 전압 영역에서 약 -3의 기울기를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 ohmic 전도 구간 이후의 영역에서 공간전하제한전도라는 것을 의미한다.

또 하나의 공통된 특징으로 세 시료 모두 일정 전기장 이상에서 전류밀도 증가속도가 감소하는 영역이 관찰되었다는 것이다. 이는 반도체성 전극과 시료 내에 존재하는, 가교반응시 발생하는 저분자량의 부산물의 농도와 관련이 있다. 전기장이 증가하

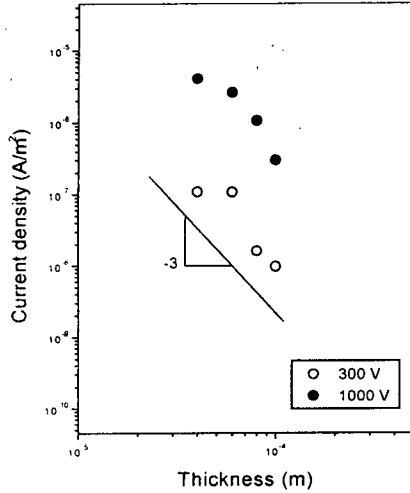


그림 4. XLPE/VLDPE의 전류밀도의 두께의존성:

면서 이온의 이동이 더 활발하게 일어나서 전극 부근에 이종전하를 형성하게 되고 이에 의한 증화효과의 증가로 인해 외부회로에 감지되는 전류의 크기는 감소되므로 전류밀도의 증가속도의 감소현상이 관찰되는 것으로 생각된다⁸⁾.

그림 5에 85°C에서의 세 시료의 전류밀도를 나타냈다. 여기서 XLPE와 XLPE/VLDPE 블렌드의 전류밀도는 거의 비슷한 데에 반해 가교조제가 첨가된 블렌드의 전류밀도는 상대적으로 낮게 측정되었다. 그 이유는 가교조제에 존재하는 카보닐 그룹이 주입된 전자의 트랩으로서 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 XLPE/VLDPE 블렌드의 공간전하 분포 특성 및 전기전도 특성을 살펴본 결과 공간전하 분포의 경우 VLDPE를 혼합하여도 혼합하기 전과 동일하게 이종전하의 경향을 보였으나 시료 내부에 축적되는 전하량이 증가하는 것으로 밝혀졌다. 그리고 전기전도 특성의 경우는 VLDPE 혼합으로 인한 전기전도기구의 변화는 없는 것으로 보이며, 공간전하제한전도가 주된 전도기구인 것으로 밝혀졌다. 또한 가교조제가 첨가된 블렌드가 상대적으로 낮은 전하밀도를 보이는 것으로 나타났다.

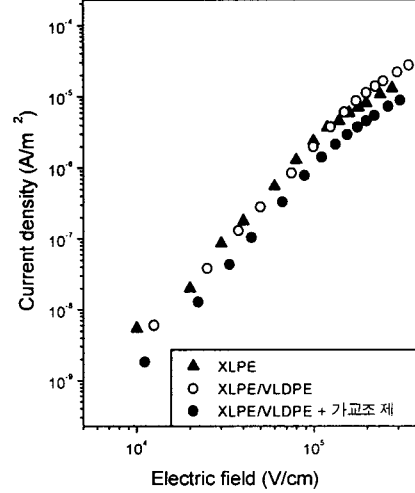


그림 5. 세 시료의 85°C에서의 전류밀도

참고문헌

1. S. Nagasaki, H. Matsubara, S. Yamanouchi, M. Yamada, T. Matsuike and S. Fukunaga, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. 103, pp. 536-544, 1984.
2. M. Ikeda and Y. Ohki, *Proc. 2nd ICSD*, Erlangen, Germany, pp. 71-75, 1986.
3. K. S. Suh, J. Y. Kim, C. R. Lee and T. Takada, *IEEE Tras. Dielectrics EI*, Vol. 3, pp. 201-206, 1996.
4. K. S. Suh, D. S. Lee and C. G. Kang, *Polymer (Korea)*, Vol. 19, No. 2, pp 254-258, 1995.
5. M. A. Lampert and P. Mark, Academic Press, New York and London, 1970.
6. K. S. Suh, J. W. Ko, J. E. Kim, H. S. Kang and D. J. Kim, *한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집*, pp 215-218, 1998.
7. Y. Li et al., *IEEE Trans. Dielectrics EI*, Vol. 1, 188, 1994.
8. C. R. Lee, Master Thesis, Korea University, 1991