XLPE/VLDPE 블렌드의 전기적 성질

Electrical Properties of XLPE/VLDPE Blends

고정우 고려대학교 재료공학과
서광석 고려대학교 재료공학과
김종은 고려대학교 재료공학과
강형식 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
Hyung Sik Kang PE team Tech. Center, LG chemical
Duck Joo Kim PE team Tech. Center, LG chemical

Abstract

XLPE/VLDPE (Crosslinked polyethylene/very low density polyethylene) blends were prepared by a twin screw extruder and their electrical properties such as water tree and breakdown characteristics were measured. It was found that both water tree and breakdown characteristics of XLPE were improved by the addition of VLDPE to polyethylene. It was also found that the extent of improvement of electrical properties by the addition of VLDPE to polyethylene depends on the type and concentration of VLDPE.

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

1. 서론

지중배전케이블은 고분자 절연체인 가교 폴리에틸렌 (crosslinked polyethylene; XLPE)로 절연되어 있는데, 이는 사용 도중에 수트리 현상에 의해 극심히 열화되어 결국에는 절연파괴되는 경우가 많으므로 이에 대한 연구가 매우 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 있다. 또한 공중합체를 만드는 방법은 반응기를 수정해야 한다는 큰 단점 때문에 그다지 활발하게 이용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 최근에는 폴리에틸렌에 적당한 고분자를 혼합하여 TR-XLPE를 개발하는 방법이 많이 이용되고 있다.

그 동안의 연구는 주로 폴리에틸렌에 에틸렌 비닐아세테이트 (ethylene vinylacetate; EVA) 또는 에틸렌에틸아크릴레이트 (ethylene ethyl acrylate; EEA) 등의 에틸렌계 공중합체를 혼합하는 방법을 이용하였다. [3-6]. 그러나 이들 에틸렌계 공중합체는 극성기를 가지고 있어 극성이 낮은 폴리에틸렌과의 상용성 문제가 발생하여 적용이 어렵다 [8]. 또한 절연차폐층과의 접착성이 증가하여 절연차폐층과 절연층간의 박리강도가 증가한다. 따라서 케이블 시공시 절연차폐층을 박리해야 하는 우리 나라의 실정에는 그다지 효과적이지 못하다.

따라서 본 연구에서는 국내 실정에 적용될 가능성이 높은 것으로 생각되는 극저밀도 폴리에틸렌 (very low density polyethylene; VLDPE)을 이용하여 XLPE/VLDPE 블렌드를 제조한 후 이 블렌드에 대한 수트리 및 절연파괴 특성 등의 전기적 성질을 평가하였다. 이를 통하여 지중배전케이블의 절연체로서 XLPE/VLDPE용 블렌드를 적용할 수 있는 가에 대하여 알아 보았다.

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. 또한 본 연구에서는 5종의 VLDPE를 평가하였는데, 이들이 표 1에 VLD1-5로 명명되어 있다. 이들 VLDPE의 용융지수, 밀도 및 결정화도 등의 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1. 본 연구에 사용된 VLDPE의 사양

VLDPE	MI (g/10 min)	Density (g/cm^3)	Crystallinity (%)
VLD1	9.0	0.895	41
VLD2	0.8	0.880	31
VLD3	2.2	0.900	44
VLD4	2.2	0.888	36
VLD5	1.2	0.900	44

블렌드의 제조는 이축압출기 (twin screw extruder)를 사용하였는데, 배럴의 온도는 160-170-190-180°C로 하였고 압출속도는 5 rpm으로 하였다. 가교제인 dicumyl peroxide (DCP)와 다른 첨가제는 압출된 블렌드물을 Henschel mixer에 넣고 70°C에서 10분간 혼합하여 함침시켰다. 기준시료인 XLPE는 원재료인 LDPE에 DCP 및 첨가제를 동일 조건에서 함침시켜 기준 시료로 사용하였다.

2.2 수트리 시험

각 시료의 수트리 길이는 본 연구실에서 제작된 수트리 측정장치를 사용하였는데, 이 실험을 위한 시료형태가 그림 1에 나와 있다.

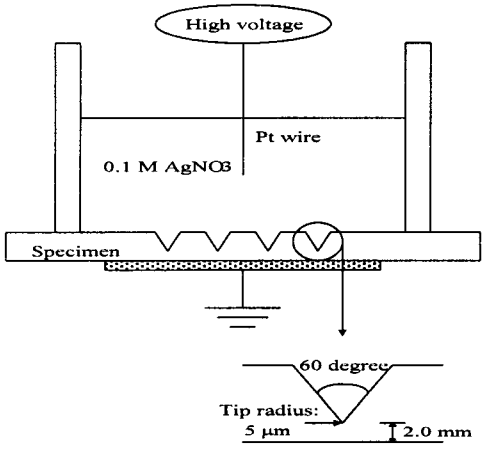

그림 1. 수트리 시험 시편

그림에서 보듯이, 시편은 곡률반경이 5 μm인 바늘 (일본 Okura사 제품)을 사용하여 hot press에서 제작하였는데, 미가교 시료는 130°C에서 20분간 압축성형하였고, 가교 시료는 180°C에서 10분간 가교시켰다. 제작된 시편들을 수트리 발생장치에 넣고 백금선을 통해 10 kV, 60 Hz 의 교류 전압을 96 시간 동안 가하였다. 블렌딩하지 않은 순수 VLDPE의 경우에는 최장 100 시간까지 전압을 가해 각 시간별 수트리 길이를 측정하였다. 수트리 길이는 8개 바늘에서 생성된 수트리 길이의 평균값을 택하였다.

2.3 절연 파괴 시험

절연파괴 시험은 hot press를 이용하여 70~80 μm 두께의 필름시편을 제작한 후 지름 6.4 mm인 구전극을 사용하여 절연유 속에서 실시하였다. 절연파괴 특성은 10개의 시편을 이용하여 얻은 결과를 Weibull 통계법으로 처리하여 나타내었다.

2.4 기타 성질 측정

전기적 성질 외에 기계적 성질, 가교 특성 등을 측정하였는데, 기계적 성질의 측정은 Instron사의 인장시험기를 사용하였고 시편은 덤벨 형태로 하였으며, 시편의 크기와 시험 방법 등은 ASTM D-638에 따랐다. Hot set 시험은 200°C에서 15분 동안 0.2 MPa의 힘을 주었을 때에 늘어난 길이를 측정하였고, 시편의 형태는 인장 시험의 시편과 동일하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 VLDPE의 수트리 및 절연 파괴 결과

그림 2에 본 연구에 사용된 각 종 VLDPE의 수트리 길이가 나와 있다. 이 그림을 보면 알 수 있듯이, 모체수지인 LDPE는 10 kV를 100 시간 인가시 약 690 μm의 수트리 길이를 보인 반면 VLDPE는 종류마다 차이는 있지만 동일 조건에서 최소 850 μm 이상의 수트리 길이를 보인다. 특히 일부 VLDPE, 즉 VLD4와 VLD5는 각각 80 시간과 65 시간만에 절연파괴되는 결과를 얻었다. 이로서 VLDPE 자체의 수트리 성장은 동일 조건에서 LDPE에 비하여 월등히 빠름을 알 수 있다.

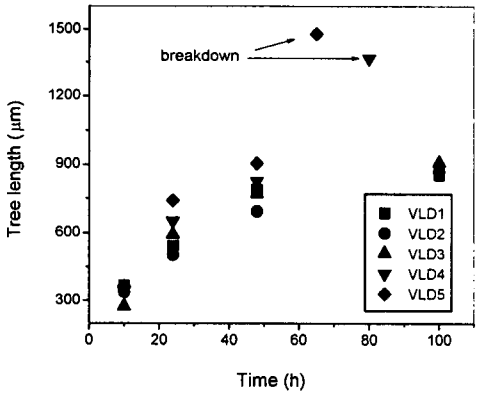

그림 2 VLDPE의 수트리 길이 (10 kV)

표 2에 이들 VLDPE의 절연파괴 특성이 정리되어 있다. 이 결과를 보면 평균절연파괴강도, 최소절연파괴강도 및 특성절연파괴강도 등 모든 절연파괴 특성치에 있어서 VLDPE가 LDPE에 비하여 월등히 좋음을 알 수 있다. 특히 VLD4와 VLD2의 경우 다른 VLDPE보다 월등히 좋은 절연파괴 특성을 보임을 알 수 있다. 수트리 특성과 절연파괴 특성을 비교하면 VLD2의 전기적 특성이 다른 VLDPE에 비하여 좋은 것으로 밝혀 졌다. 수트리 특성은 VLD1

도 좋은 편이나 이 재료는 절연파괴 특성이 다른 VLDPE에 비하여 열악하다는 단점이 있다.

표 2. VLDPE의 절연파괴 특성

(unit: kV/mm)

Samples	E_{avg} (Average strength)	E_0 (Minimum strength, P = 0%)	θ (Characteristic strength, P = 63.2 %)
Control	129	105	131
VLD1	134	117	136
VLD2	170	129	174
VLD3	150	129	152
VLD4	179	135	185
VLD5	148	128	150

기존의 연구결과에 따르면 절연파괴강도는 결정화도가 증가할수록 높은 값을 보이고 수트리 성장은 결정화도가 증가할수록 억제된다고 하였다 [9]. 그러나 본 연구에서 사용된 VLDPE의 경우에는 VLDPE의 밀도, 용융지수 및 결정화도 등의 고분자 특성과 절연파괴강도 및 수트리 특성과는 직선적인 관계를 갖지 못하는 것으로 관찰되었다. 이에 대한 원인은 아직 밝혀지지 않고 있다.

3.2 XLPE/VLDPE 블렌드의 수트리 및 절연 파괴 결과

이들 중 수트리 특성 및 절연파괴 특성이 비교적 좋은 VLD1과 VLD2를 선택하여 XLPE/VLDPE 블렌드를 제조하였으며 이 블렌드물의 수트리 특성이 그림 3에 나와 있다.

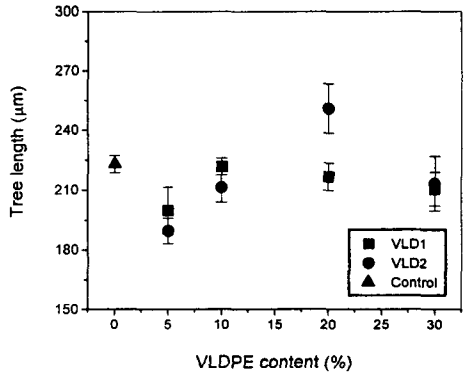

그림 3 VLDPE 함량에 따른 XLPE/VLDPE 블렌드의 수트리 길이 (10 kV)

XLPE/VLD1 블렌드의 경우 VLD1이 5% 정도로 낮은 경우의 수트리 길이가 200 μm로 가장 짧고 VLD1 의 함량이 증가할수록 수트리 길이가 증가하였다가 다시 감소하여 30%일 때의 수트리 길이는 211 μm 이다. 반면, VLD2를 첨가한 경우에는 VLD2가 5%일 때 최소 길이인 190 μm로서 기준 시료의 수트리 길이에 비하여 월등히 작다. VLD2의 함량이 증가할수록 수트리 길이가 증가하여 VLD2가 20%일 때 최대인 251 μm이다. 이후 VLD2를 30% 혼합하면 수트리 길이는 다시 감소하여 213 μm가 된다. 이들 결과를 종합하면 XLPE/VLDPE 블렌드의 수트리 특성은 VLDPE 함량이 낮은 경우 좋은 수트리 특성을 보이다가 VLDPE 함량이 증가할수록 수트리 특성은 열악해지다가 VLDPE 함량이 매우 높으면 수트리 특성이 다시 좋아지는 경향을 보임을 알 수 있다. 두 블렌드 모두 VLDPE가 5% 정도로 낮을 때 가장 좋은 수트리 특성을 보이는 반면 가장 열악한 수트리 특성을 보이는 VLDPE 함량은 종류마다 다르게 나타났는데, VLD1의 경우 10%일 때 그리고 VLD2의 경우에는 20%일 때 가장 열악한 수트리 특성을 보였다.

XLPE/VLDPE 블렌드의 절연파괴 특성이 표 3에 나와 있다. 이 표를 보면 XLPE/ VLDPE 블렌드의 특성파괴강도와 최소파괴강도는 기준 시료의 절연파괴 특성치에 비하여 낮은 편이다. 기준 시료의 특성파괴강도와 최소파괴강도와 비슷한 특성을 갖는 블렌드는 VLD1의 경우에는 함량이 30%인 경우이고 VLD2의 경우에는 함량이 5%인 경우이다.

표 3. XLPE/VLDPE 블렌드의 절연파괴 특성

(unit: kV/mm)

Parameters / VLDPE (%)		E_{avg} (Average strength)	E_0 (Minimum strength, P = 0 %)	θ (Characteristic strength, P = 63.2 %)
VLD1	5	200	158	205
	10	231	154	242
	20	202	151	209
	30	226	176	232
VLD2	5	226	176	232
	10	190	123	200
	20	206	135	216
	30	209	156	238
Control		231	176	239

3.3 XLPE/VLDPE 블렌드의 기타 성질

이들 블렌드의 기계적 성질을 측정한 결과가 표 4에 나와 있다. 이 표를 보면 폴리에틸렌에 VLDPE를 혼합하면 가교도와 hot set 특성이 향상되고 인

장강도 및 연신율 등의 기계적 성질도 향상되는 것으로 나타 났다. 이들 중에서 기준 시료와 가장 비슷한 성질을 보이는 블렌드는 VLD2가 5% 혼합된 XLPE/VLDPE 블렌드인 것으로 판명되었다.

표 4. XLPE/VLDPE 블렌드의 기타 성질

VLDPE (%)		Degree of crosslinking (%)	Tensile strength (kg/cm^2)	Elongation (%)	Hot-set (%)
VLD1	5	84	220-240	520-540	66
	10	80	230-250	530-550	70
	20	83	260-270	560-580	60
	30	84	-	560-580	44
VLD2	5	85	220-240	500-520	54
	10	84	220-240	520-540	46
	20	86	240-260	540-560	44
	30	84	280-300	540-560	38
Control		80	210-220	500-510	82

4.결론

본 연구를 통하여 XLPE/VLDPE 블렌드의 전기적 및 기계적 특성을 평가한 결과 폴리에틸렌에 VLDPE를 혼합하면 수트리, 절연파괴 특성 및 기계적 특성 등이 향상됨을 확인하였다. 특히 VLDPE를 사용할 경우 적은 양의 VLDPE만으로도 좋은 전기적 성질을 얻을 수 있기 때문에 지중배전용 전력케이블에서 발생하는 수트리 발생에 의한 열화를 억제할 수 있는 절연체로 사용될 가능성이 크다. 이때 수트리 특성을 비롯한 각종 전기적 성질의 향상 정도는 혼합되는 VLDPE의 종류 및 함량에 따라 큰 차이를 보임을 알았다. 그러나 이러한 재료가 실제로 전력케이블의 절연체로 사용되기 위해서는 도체 및 절연차폐층과의 상용성, 노화특성 등 다른 특성에 대한 연구, 특히 장기신뢰성 및 장기압출성 등에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] E. J. McMahon, "A Tree Growth Inhibiting Insulation for Power Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 16, pp. 304-318, 1981.

[2] J. H, Han, S. H. Lee, C. G. Kang and K. S. Suh, "Effects of Nitrobenzene Derivatives on the Electrical Properties in Polyethylene", Trans. KIEE, Vol. 44, pp. 473-478, 1995.

[3] H. Fukukawa and Y. Yasuo, "Development of a New Insulating Material for DC Cables", Comm. BIII-2, Jicable 84, pp. 283-287, 1984.

[4] S. Nagasaki, H. Matsubara, S. Yamanouchi, M. Yamada, T. Matsuike and S. Fukunaga, "Development of Water-Tree-Retardant XLPE Cable", IEEE Trans. Power Appar. Syst., Vol. 103, pp. 536-544, 1984.

[5] K. S. Suh, *Thermally Stimulated Currents of PE/Ionomer Blends*, PhD Thesis, University of Connecticut, USA, 1987.

[6] T. Kawashima, T. Takahashi and K. Maeda, "Study on Water Treeing Retardant XLPE Insulation", Proc. 3rd ICPADM, Tokyo, Japan, pp. 222-225, 1991.

[7] M. Ikeda and Y. Ohki, "Copolymers of Ethylene and Aromatic Monomers. Their Electrical Properties and a Possibility of Developing a New Insulating Material", Proc. 2nd ICSD, Erlangen, Germany, pp. 71-75, 1986.

[8] K. S. Suh, J. Y. Kim, C. R. Lee and T. Takada, "Charge Distribution in Polyethylene/Ethylene Vinylacetate Laminates and Blends", IEEE Tras. Dielectrics EI, Vol. 3, pp. 201-206, 1996.

[9] C. C. Ku and R. Liepins, *Electrical Properties of Polymers*, Hanser, Munich, 1987, Chpater 4.