

## XLPE/SXLPE 블렌드의 수트리 성장 및 절연파괴 특성

### Water tree growing and Electrical breakdown Characteristics of XLPE/SXLPE blends

고정우 고려대학교 재료공학과

서광석 고려대학교 재료공학과

Jung Woo Ko Department of Materials Science, Korea University

Kwang S. Suh Department of Materials Science, Korea University

#### Abstract

Crosslinked polyethylene/silane crosslinked polyethylene (XLPE/SXLPE) blends were prepared by a twin screw extruder and their water tree growing and electrical breakdown characteristics were investigated. The water tree characteristics of XLPE were improved by the addition of SXLPE, when samples were crosslinked only by the thermolysis of DCP (dicumyl peroxide). However, steam curing process was not good for water tree characteristics. It was also found that the rate of water tree growing of XLPE/SXLPE blend increased when the content of SXLPE was 50 %. AC breakdown strength slightly increased by the addition of SXLPE to XLPE when samples were crosslinked only by the thermolysis of DCP.

**Key Words** : SXLPE, Water tree, Breakdown strength,

#### 1. 서론

Dicumyl peroxide (DCP)를 사용해 가교된 가교 폴리에틸렌 (XLPE)은 높은 절연파괴 강도, 우수한 가공성 등으로 인해 전력 케이블의 절연체로 널리 사용되고 있다. 하지만 DCP를 이용한 가교는 그 과정 중에 여러 가교 부산물들이 생성되고, 이것이 재료의 전기적 성질에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 이러한 문제의 해결을 위해 유기 반응기를 지닌 실란 (silane)을 이용해 폴리에틸렌을 가교하는 기술이 1960년대 후반에 Dow Corning사에 의해 개발되었고, 1970년대 초반부터 가교폴리에틸렌 파이프와 전력 케이블 제작에 적용되어왔으며 현재는 유럽 등지에서 전력 케이블의 절연층으로 사용되고 있다. SXLPE를 사용한 케이블은 실리콘의 도입으로 인해 단단한 성질을 지니며 DCP를 이용한 가교에 필요한 공정에 비해 훨씬 간단한 가교 공정으로 인해 제조 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다.

XLPE와 SXLPE의 전기적 성질을 비교 평가한 결과, SXLPE가 XLPE에 비하여 수트리에 대한 저항성, 절연파괴강도 등에서 우수한 특성을 나타낸

것으로 발표된 바 있다.<sup>2)</sup> 그러나 SXLPE는 그 자체로는 우리나라의 전력 케이블에 바로 적용하기 어렵고 또한 XLPE에 비하여 가교도가 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 SXLPE와의 혼합을 통해 XLPE의 절연성능의 향상이 가능한지 여부를 알아보기 위해서 XLPE와 SXLPE를 블렌딩 방법을 통해 시료를 제조하고 수트리 성장 특성 및 교류절연파괴 특성에 대한 실험을 수행하였다.

#### 2. 실험

##### 2.1 시료 제작

본 연구에서 사용한 폴리에틸렌은 국내 화학회사의 LDPE로 밀도는  $0.922 \text{ g/cm}^3$ , 용융지수는  $1.8 \text{ g/min}$ 이다. SXLPE 역시 동일회사로부터 공급받은 것이다. 이 SXLPE는 Dow Corning사의 SIOPLAS 공정으로 제조된 것으로 VT MOS (vinyl trimethoxy silane)을 폴리에틸렌에 그래프트시켜 만들었다. 그림 1에 SIOPLAS 공정과 그래프트머의 구조를 나타내었다. 블렌드의 제조는 이축압출기 (twin screw extruder)를 사용하였는데, 배럴의 온

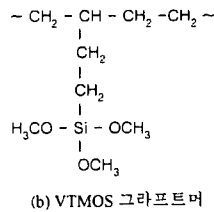
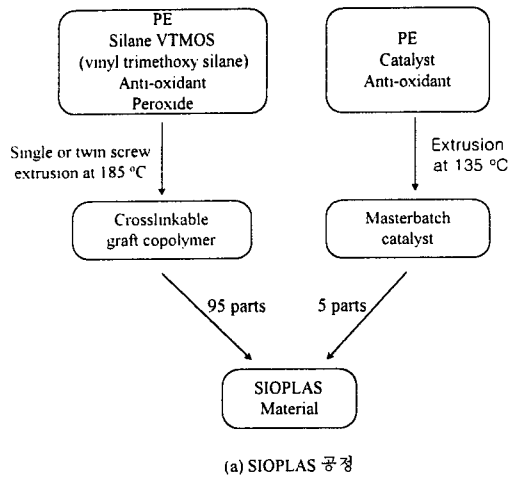


그림 1. SIOPLAS 공정 및 VTMOX 그래프트머.

도는 160-170-190-180°C로 하였고 압출속도는 5 rpm으로 하였다. 가교제인 DCP와 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. SXLPE의 함량은 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50 %로 변화시켜 7종의 시료를 만들었고, 각 시료에 대하여 DCP의 함량에 따라 XLPE부분에 대해서만 2 phr 첨가한 것, 전체 블렌드 수지에 대해 2 phr 첨가한 것 그리고 전체 수지에 대해 1.8 phr 첨가한 것의 세 종의 시료를 제조하였다.

## 2.2 수트리 시험

각 시료의 수트리 길이는 본 연구실에서 제작된 수트리 측정장치를 사용하였는데, 이 실험을 위한 시료형태가 그림 1에 나와 있다. 그림에서 보듯이, 시편은 곡률반경이 5 μm인 바늘 (일본 Okura사 제품)을 사용하여 hot press에서 제작하였는데, 압축성형하며 180°C에서 10분간 열가교시켰다. 수가교는 열가교시킨 시편을 90 °C의 증류수 속에서 4

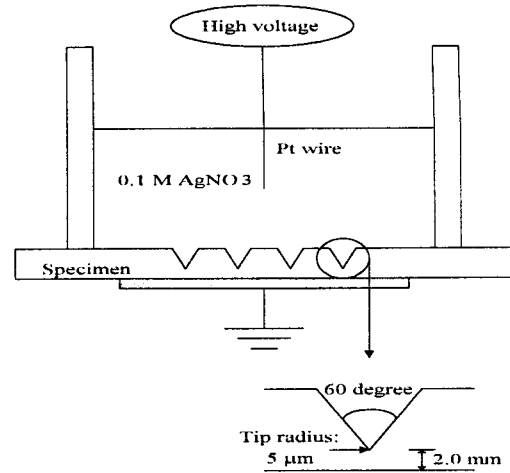


그림 2. 수트리 시험 시편

시간 동안 행하였다.

제작된 시편들을 수트리 발생장치에 넣고 백금 선을 통해 10 kV, 60 Hz 의 교류 전압을 96 시간 동안 가하였다. 또한 수트리 성장 특성을 알아보기 위해 10 - 400 시간까지 전압인가 시간을 달리하였다. 수전극으로 AgNO<sub>3</sub> 수용액을 사용하였고,<sup>31</sup> 수트리 길이는 100배율의 광학 현미경을 이용해 측정하였으며 8개 바늘에서 생성된 수트리 길이의 평균값을 택하였다.

## 2.3 절연 파괴 시험

절연파괴 시험은 hot press를 이용하여 70~100 μm 두께의 필름시편을 제작한 후 지름 6.4 mm인 구전극을 사용하여 절연유 속에서 실시하였다. 절연 파괴 특성은 10개의 시편을 이용하여 얻은 결과를 Weibull 통계법으로 처리하여 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수트리 특성

그림 3에 SXLPE함량에 따른 XLPE/SXLPE 블렌드의 수트리 길이가 나와 있다. DCP는 XLPE부분에 대해서만 2 phr첨가하였고 열가교 후 수가교 과정을 거친 시편에 대한 결과이다. 이 경우 SXLPE를 블렌딩하면 오히려 수트리 길이가 증가하였다가 함량이 증가함에 따라 점차 수트리 길이가 감소하는 경향을 나타내었다.

이번에는 수트리 성장에 대한 수가교의 영향을 배제하기 위해 동일한 시료에 대하여 열가교만을

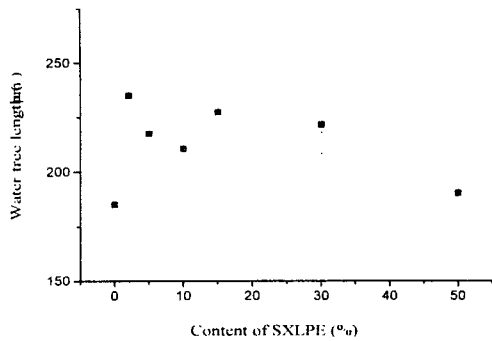


그림 3. SXLPE 함량에 따른 XLPE/SXLPE 블렌드의 수트리 길이. (열가교 후 수가교, XLPE 부분에 대해서만 DCP 2 phr)

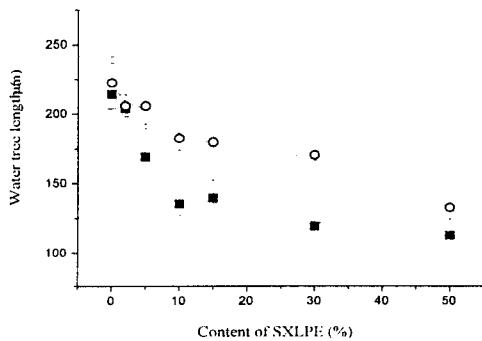


그림 4. SXLPE 함량에 따른 XLPE/SXLPE 블렌드의 수트리 길이. (열가교만 수행, (■) XLPE 부분에 대해서만 DCP 2 phr, (○) 전체 수지에 대해 DCP 2 phr)

시킨 후 수트리 시험을 실시하였다. 그리고 XLPE 부분에 대해서만 DCP를 2 phr 첨가한 시료의 경우 그로 인해 SXLPE의 함량이 증가함에 따라 전체에 대한 DCP 함량이 감소함에 따라 가교도가 낮아질 것이므로 이것의 영향을 알아보기 위해 동일한 SXLPE 함량을 가진 블렌드 시료에 DCP를 전체 수지에 대해서 2 phr 첨가한 시료에 대하여 열가교만을 시키고 수트리 실험을 수행하였다. 이 두 실험에 대한 결과를 그림 4에 같이 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 열가교만을 하였을 경우에는 SXLPE 함량이 증가함에 따라 수트리 길이가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 수가교 과정이 수트리 특성에 좋지 못한 영향을 끼치는 것으로 생각된다. 그러므로 수트리 특성만을 고려할 때 가교도에 커다란 차이가 없다면 XLPE/SXLPE 블렌드 시료를 열가교 시킨 후 별도

의 수가교 과정을 거칠 필요가 없음을 알 수 있다.

XLPE에 대해서만 DCP 함량이 2 phr인 경우, SXLPE 함량이 0 ~ 50 %로 변화함에 따라 전체 수지에 대한 DCP의 함량은 각각 2, 1.96, 1.9, 1.8, 1.7, 1.4, 1 phr로 감소한다. 이와 관련해 그림 4에서 SXLPE 함량이 5 % 이상이 되면, XLPE에 대해서만 DCP 2 phr인 경우와 전체 수지에 대해 DCP 2 phr인 경우의 수트리 길이의 차이가 커지는 것을 알 수 있다, 이는 본 블렌드물의 경우에 있어서 전체 수지에 대해 2.0 phr의 DCP는 과량이라는 것을 말해준다. 즉, 재료 내에서 불순물로 작용하여 수트리 특성을 저하시키는 것으로 생각된다. 그리고 SXLPE의 함량이 50 %에 이르면 두 경우의 수트리 차이가 다시 줄어들음을 알 수 있는데, 이는 위에서 언급한 과량 첨가된 DCP의 영향이 SXLPE 자체의 우수한 내수트리성에 의해 줄어들었기 때문이라 여겨진다. 이러한 SXLPE 자체의 내수트리 특성의 주된 원인은 silane에 의해 도입된 Si의 수트리 전파 방해인 것으로 발표된 바 있다.<sup>2)</sup> 또한 SXLPE의 수가교 반응시 메탄올이 발생하는데, 알코올을 포함한 첨가제를 사용한 경우 수트리 억제 효과가 있다고 알려져 있다.<sup>4, 5)</sup> 본 연구의 경우 열가교 진행시 발생한 수분에 의해 별도의 과정 없이도 수가교가 진행되어 위에서 언급한 두 효과에 의해 수트리가 억제된 것으로 생각된다.

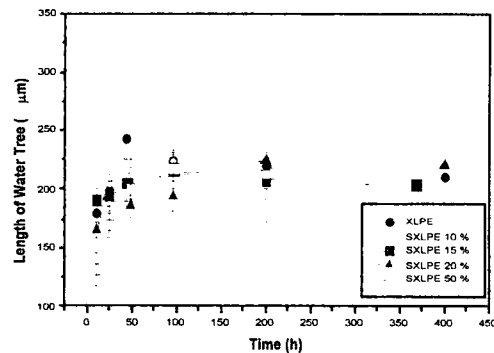


그림 5. XLPE/SXLPE 블렌드의 전압인가 시간에 따른 수트리 길이 변화.

다음으로 전압인가 시간에 따른 수트리 성장 특성을 알아보기 위하여 XLPE와 4종의 SXLPE 함량이 다른 XLPE/SXLPE 블렌드 시료에 대해서 수트리 시험을 실시하였는데, 여기에 사용된 XLPE, SXLPE 블렌드 시료에는 DCP를 전체 수지에 대해

서 1.8 phr 첨가하였다. 전압인가 시간을 10 시간에서 400 시간까지 달리하여 수트리 길이를 측정 한 결과를 그림 5에 나타내었다. XLPE를 비롯하여 SXLPE 함량이 20 % 이하인 블렌드물의 경우 약간의 차이는 있지만 초기에 급격히 성장하다가 시간이 지날수록 그 성장 속도가 점차 줄어드는 비슷한 경향을 나타내었는데, SXLPE 함량이 50 %인 경우에는 전압인가 시간이 200 시간이 지난 후 수트리 성장 속도가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 시간이 지나면서 메탄올에 의한 수트리 억제효과가 감소하였기 때문인 것으로 추측된다.

### 3.2 XLPE/SXLPE 블렌드의 절연파괴 특성

XLPE/SXLPE 블렌드의 교류 절연파괴 특성에 대한 결과를 표 1에 나타내었다. 열가교만을 실시하였을 경우 SXLPE 15 %인 경우를 제외하면 모두 기준 XLLPE에 비하여 절연파괴 특성이 다소 향상되었음을 알 수 있다. SXLPE 20 %인 경우가 가장 좋은 절연파괴특성을 나타내었다. 그리고 수트리 결과에서와 마찬가지로 XLPE/SXLPE 블렌드의 경우 열가교 후 수가교를 추가로 실시했을 때 절연파괴 특성이 저하되는 것으로 나타났다.

표 1 . XLPE/SXLPE 블렌드의 절연파괴 특성  
(unit: kV/mm)

Sample	열가교				열가교 + 수가교			
	$\beta$	$E_0$	$E_{avg}$	$\theta$	$\beta$	$E_0$	$E_{avg}$	$\theta$
SXLPE 10 %	2.14	116.0	165.5	172.9	1.86	77	146.9	157.5
SXLPE 15 %	2.47	106.5	148.4	154.2	2.66	106.4	147.5	153
SXLPE 20 %	2.32	118.8	175.6	183.8	2.27	102.9	165.1	173.9
SXLPE 50 %	2.88	115.5	152.1	156.7	2.32	94.2	144.6	151.7
XLPE	2.56	109.1	148.8	156.1	2.20	114.4	160.5	166.2

### 4.결론

본 연구를 통하여 XLPE/SXLPE 블렌드의 수트리 성장 및 절연파괴 특성을 살펴본 결과, 열가교 후

수가교를 추가로 행할 경우 수트리 특성이 저하된 반면 열가교만을 하였을 경우에는 SXLPE 함량 증가에 따라 수트리 특성이 향상되는 것을 확인하였다. 그리고 전압인가 시간에 따른 수트리 성장 특성 시험 결과, SXLPE의 함량이 50 %인 경우 그 외의 경우에 비해 장기적으로는 수트리 특성이 저하될 가능성이 있음이 확인되었다. 교류 절연파괴 특성의 경우 역시 열가교만 수행하였을 때는 SXLPE의 혼합이 그 특성을 향상시키는 것으로 나타났다. 결국 XLPE/SXLPE 블렌드는 별도의 수가교 과정 없이 열가교만으로 전기적 성질의 향상을 얻을 수 있고, 그 정도는 SXLPE의 함량에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 다른 전기적 성질, 즉 공간전하분포, 전기전도 특성 등에 대한 평가도 수행되어야 할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] K. S. Suh, S. J. Hwang, J. S. Noh and T. Takada, "Effects of Constituents of XLPE on the Formation of Space Charge", IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol. 1, pp. 1077-1083, 1994.
- [2] K. S. Suh, Y. Zhu, H. G. Yoon, "Electrical Properties of Silane Crosslinked Polyethylene in Comparison with DCP Crosslinked Polyethylene", IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol. 6, pp. 164-168, 1999.
- [3] Z. H. Fan and N. Yoshimura, "Silver Tree", IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol. 3, pp. 131-135, 1996.
- [4] E. J. McMahon, USP-4,206,260, 1980
- [5] E. J. McMahon "A Tree Growth Inhibiting Insulation for Power Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 16, pp. 304-318, 1981.