

## 침전극 곡률반경에 따른 LLDPE/EVA의 교류트리 특성

이재필, 이충호  
충주대학교 전기공학과

### A Study on the AC Treeing Characteristics with Tip Radius of Needle Electrode in LLDPE/EVA

Lee, Jae-Pil, Lee, Chung-Ho  
Chungju National Univ.

#### Abstract

Polyethylene used as insulating material of power cable is nonpolar and low dielectric loss polymer. But it has defects of tree generation and accumulation of space charge by an applied voltage resulting in the decreased life and performance.

To solve these problems, mixed films with LLDPE and EVA that is similar to LLDPE at physical properties in case of low VA contents were made and tested due to the blend ratios of 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50[wt%] respectively. We investigated AC electrical treeing characteristics to acquire the best mixture ratio and effect of the tip radius of needle electrode to develop excellent treeproof materials.

The degree of crystallinity calculated with XRD pattern is higher for pure LLDPE, 50:50 and 70:30.

For DSC analysis, it is confirmed that the melting points of mixed specimens are lower than that of pure LLDPE and higher than pure EVA's.

The shape of tree propagation showed that pure EVA was electrical tree shape of the branch type, pure LLDPE and blended specimens was able to confirm tree shape of the bush type.

As the tip radius go up in the blend ratio 70:30 specimen, the tree inception voltage rise. Probably the reason is the relaxation of electric field in the specimen with bigger tip ratio.

As the 6 specimens were applied AC 5[KV],7.5[KV],10[KV] respectively, tree growth length is far shorter in the specimen with blend ratio 70:30, 50:50 than in pure EVA and pure LLDPE specimen.

Conclusively, it is confirmed that specimens of which blend ratio are 70: 30 and 50:50 are good in electrical tree retardant characteristics, especially, 70:30 has lower dielectric loss than 50:50 and its mixture ratio is the best.

**Key Words** : LLDPE(선형저밀도폴리에틸렌), EVA(에틸렌비닐아세테이트), Tip radius(곡률반경),  
Treeproof(내트리), XRD Pattern(X선회절 패턴), DSC(시차주사열량계)

#### 1. 서 론

고도화된 산업발전에 의한 전력수요증가로 전력 계통의 초고압화가 이루어지고, 이로 인해 배전작업의 증가와 송전전압도 고압화되고 설비 용량이 날로 증가하고 있다.

따라서 계통의 안정도 및 공급의 신뢰도를 향상

시키기위해 절연 내력이 높은 재료의 개발이 크게 요구되고 있다.

고분자재료는 우수한 물리적, 화학적 물성을 갖고 있을 뿐 만 아니라 절연특성과 유전특성이 뛰어나 전기 절연재료로서 널리 이용되어 왔다. 그러나 부분방전등의 열화 현상으로 인해 절연수명이

단축되는 단점을 갖고 있다.

따라서 최근 많은 연구자들에 의해 고분자 절연 재료의 개질을 통한 트리발생 및 진전 억제책에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 선형 저밀도 폴리에틸렌(LLDPE)과 극성기를 가지며 비닐아세테이트(VA) 함량이 낮을 경우 LLDPE와 비슷한 성질의 에틸렌비닐아세테이트(EVA)를 혼합하여 PE가 갖고 있는 트리잉 열화 현상과 공간 전하 축적의 단점을 보완할 수 있는 최적의 혼합조건을 도출코자 하였다.

따라서 LLDPE/EVA의 혼합비 50:50, 60:40, 70:30, 80:20의 중량비로 혼합한 시편과 순수 LLDPE와 EVA시편을 제작해 XRD, DSC를 이용한 기초물성 분석을 하였고, 화학처리기법을 이용하여 교류전압인가시 침전의 곡률반경 변화에 따른 트리개시전압측정과 트리진전양상 및 트리진전 기구 등을 종합 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시편제작

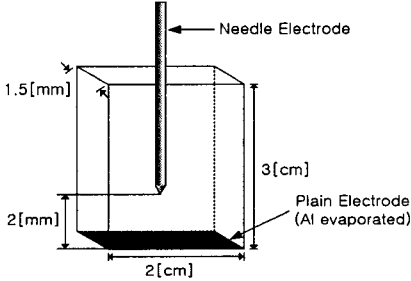


그림 2.1 시편의 형상.

Fig. 2.1 Shape of specimen.

본 실험에 사용된 고분자 혼합물은 H사의 LLDPE와 S사 EVA 시료를 정밀도가 높은 전자저울을 사용하여 LLDPE : EVA를 각각 이중압출기를 사용하여 50:50, 60:40, 70:30 및 80:20 [wt%]인 혼합비로 혼련한 원료를 사용하였으며, 원료를 온도 130[°C], 압력 300[kg/cm<sup>2</sup>]로 5분간 핫 프레스(hot press)로 가압 성형하였으며, 그림 2.1에 나타낸 바와 같이 20×30×1.5[mm]의 크기로 제작하였다. 침 전극은 곡률 반경이 5[μm], 10[μm], 15[μm]인 것을 사용하였으며, 평판전극은 Al전극으로 처리를 하였고. 전극간 거리는 2[mm]로 하였다.

### 2.2 실험방법

기초물성분석은 XRD에 의해 혼합비에 따른 시편의 결정화도를 분석하고, DSC를 사용하여 시편의 결정용점을 검토하였다.

트리잉 실험은 그림 2.2와 같이 연면방전의 최소화를 위해 시편을 실리콘 油槽(120×170×100[mm]) 중 에 넣어 실험을 하였으며, 순수EVA, 순수LLDPE와 LLDPE : EVA를 각각 50:50, 60:40, 70:30 및 80:20 [wt%]인 혼합비로 하여 침전극의 곡률반경에 따라 각 시편별로 10개씩을 제작하여 트리개시 전압 및 인가시간에 따른 트리진전상태를 관측하였다.

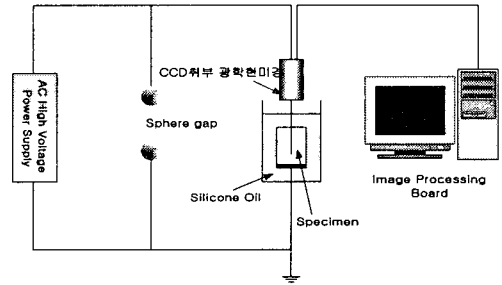


그림 2.2 트리실험회로.

Fig. 2.2 Experimental set-up.

전기트리발생과 트리성장과정의 실시간 관측 및 분석하기 위한 장비로 교류고전압전원공급기(日本 Musashi Intech製), 트리실험용 셀, 현미경, CCD카메라, 영상 데이터취득 및 분석용 Tool이 내장된 영상분석장치(인우하이텍製)를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기초물성분석

#### 1) X선 회절(XRD)

그림 3.1의 XRD회절패턴으로부터 Peak들의 적분강도를 이용하여 Natta의 방법인 식(1)을 이용하여 결정화도를 구할 수 있다.

$$C [\%] = k \frac{I_C}{I_A + I_C} \quad (1)$$

여기서,  $I_A$ 는 비정질 부분의 적분강도,  $I_C$ 는 결정영역(110)과 (200)의 피크면적이며,  $k$ 는 상수이다. 즉, 비정질 부분의 면적  $I_A = 0.75 S_a$ 이고, 결정 영역의 면적  $I_C = 1.0 S_{110} + 1.46 S_{200}$ 이며 기준은  $2\theta = 14.6^\circ$  와  $27^\circ$ 의 위치를 직선으로 연결한 것으로부터 얻는다.

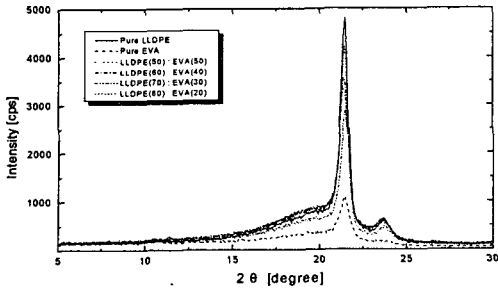


그림 3.1 시료의 X선 회절.  
Fig. 3.1 XRD of specimen.

표1은 윗 식을 이용하여 데이터 분석프로그램으로 계산된 각 시편의 결정화도이다.

여기에서 순수한 EVA의 결정화도가 가장 낮았으며 혼합비 50:50과 70:30 및 순수 LLDPE의 결정화도가 가장 높음을 알 수 있다.

표 1. 시료의 결정화도.  
Table 1 The crystallinity of specimens.

specimens	C [%]
Pure LLDPE	52.62
Pure EVA	45.68
LLDPE 80 : EVA 20	50.71
LLDPE 70 : EVA 30	51.56
LLDPE 60 : EVA 40	50.41
LLDPE 50 : EVA 50	52.76

## 2) DSC분석

시차주사열량계법(Differential Scanning Calorimetry ; 이하 DSC)을 이용하여 두께 100[ $\mu\text{m}$ ]인 원시료와 혼합한 각각 LLDPE:EVA의 50:50, 60:40, 70:30 및 80:20 시편인 결정립 크기와 분산을 조사한 결과를 그림 3.2에 나타내었다.

DSC의 흡수 피크는 라멜라(lamella)가 온도 상승에 따라 크기가 작은 것부터 용융되어 나타난다.

그러나 결정의 용융이 종료되는 시료의 결정 융점은 표 2에서 보는 바와 같이 원시료보다는 혼합한 시편이 대체로 낮아짐을 확인할 수 있다.

또한, DSC 분석에서 융점의 피크가 예리할수록 단일결정에 가깝고, 넓고 광범위(broad)할수록 비결정과 섞이거나 여러 결정이 혼합되어 있는 것을 나타낸다.

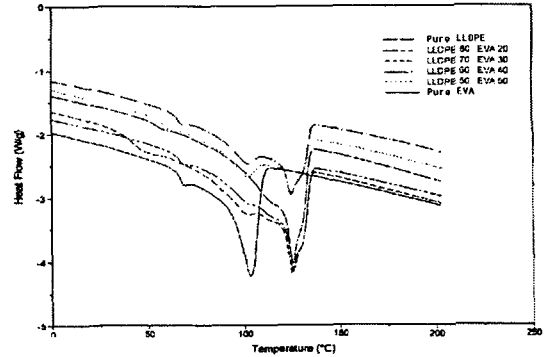


그림 3.2 시료의 DSC 분석.  
Fig. 3.2 DSC analysis of specimens.

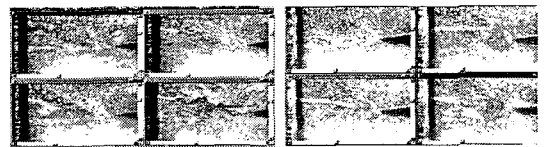
표 2. 혼합비에 따른 시료의 결정융점.  
Table 2 Crystalline melting points due to mixing ratio.

혼합비	$T_m$ [°C]	혼합비	$T_m$ [°C]
LLDPE	57.2/112.46/125.76	60:40	67.88/102.05/124.82
80:20	68.42/102.3/125.9	50:50	60.63/101.56/124.27
70:30	47.08/100.84/125.25	EVA	67.78/103.33

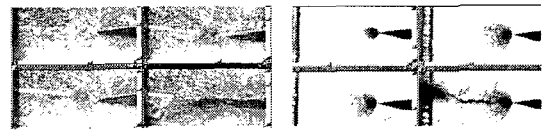
## 3.2 트리밍실험결과

### 1) 시편의 종류에 따른 트리진전

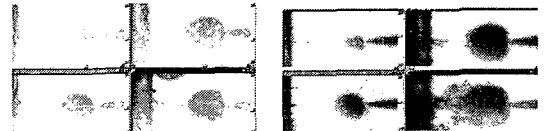
사진 1은 순수 EVA, 순수 LLDPE, 혼합비율 70:30인 시편에 곡률반경이 5[ $\mu\text{m}$ ], 10[ $\mu\text{m}$ ], 15[ $\mu\text{m}$ ]인 침전극을 사용하고 각각 AC 5, 7.5, 10[kV]의 전압을 100분간 인가하였을 때의 트리진전모양을 나타낸 것이다.



(a) 순수EVA(곡률반경: 5[ $\mu\text{m}$ ])(b) 순수EVA(곡률반경: 10[ $\mu\text{m}$ ])



(c) 순수EVA(곡률반경: 15[ $\mu\text{m}$ ])(d) 순수LLDPE(곡률반경: 5[ $\mu\text{m}$ ])



(e) 순수LLDPE(곡률반경: 10[ $\mu\text{m}$ ])(f) 순수LLDPE(곡률반경: 15[ $\mu\text{m}$ ])

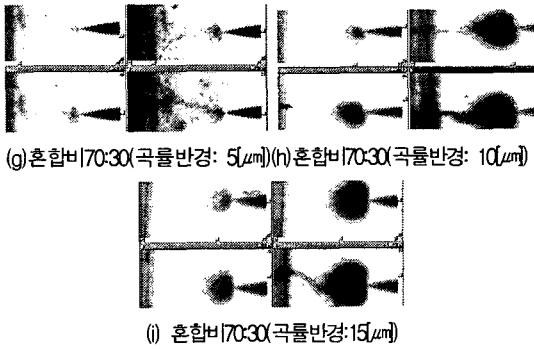


사진 1. 각 시편의 침전극곡률반경에 따른 트리진전 모양.  
Photo 1. The aspect of tree propagation according to tip radius in specimens.

사진 1과 같이 순수 EVA는 가지모양(Branch type)의 트리진전을, 순수 LLDPE 및 혼합시편에서는 부시형(Bush type)의 트리진전모양을 확인할 수 있었다.

### 2) 곡률반경에 따른 트리개시전압

그림 3.3은 곡률반경을 5, 10, 15[ $\mu\text{m}$ ]로 하였을 경우 순수 EVA, 순수 LLDPE 및 혼합비 70:30인 시편의 트리개시전압의 10회 평균값을 나타낸 것이다.

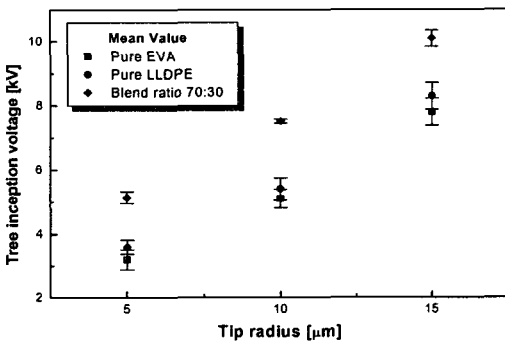


그림 3.3 각 시편의 곡률반경별 트리개시전압.  
Fig. 3.3 Tree inception voltage according to tip radius in specimens.

그림에서 곡률반경이 클수록 트리개시전압이 상승하였는데 이는 침단의 곡률반경이 클수록 침단의 전계가 완화됨에 따라 트리발생전압이 높아지는 것으로 사료된다.

특히, 순수 EVA나 순수 LLDPE에 비해 혼합시편의 트리개시전압이 높은 이유는 EVA함량이 높을수록 EVA의 극성기가 전기전도에 상당한 기여를 하거나 EVA의 용점이 LLDPE보다 낮아 내부

의 작은 결정의 용융으로 인해 분자운동이 자유로워지면서 캐리어밀도가 증가하여 체적저항이 낮아지는 것으로 생각된다. 적절량의 EVA를 혼합하면 시편내의 다수트랩이 존재하게 되어 도전성 캐리어의 이동이 억제되므로 전류밀도가 저하되어 절연성이 증대되는 것으로 사료된다.

### 3) 전압인가시간에 따른 트리진전길이

그림 3.4는 각각 AC 5[kV]의 전압을 곡률반경이 5[ $\mu\text{m}$ ]인 시편에 100분간 인가하였을 때 10분마다 측정된 트리진전길이를 나타낸 것이다.

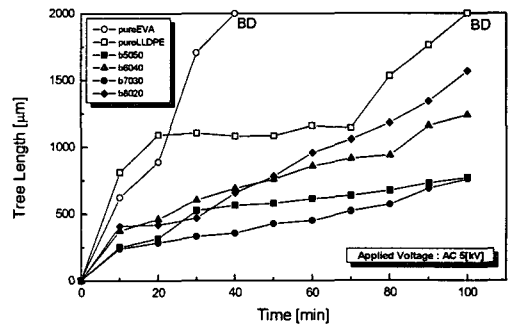


그림 3.4 인가시간에 따른 트리진전길이(곡률반경 : 5[ $\mu\text{m}$ ]).  
Fig. 3.4 Tree length according to applied time(tip radius : 5[ $\mu\text{m}$ ]).

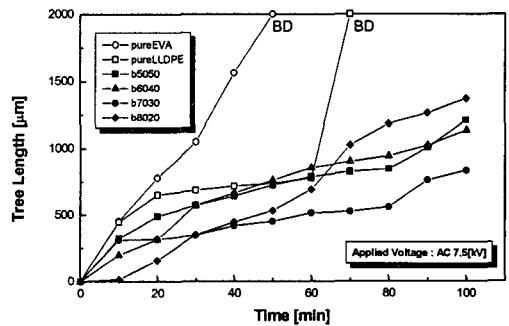


그림 3.5 인가시간에 따른 트리진전길이(곡률반경 : 10[ $\mu\text{m}$ ]).  
Fig. 3.5 Tree length according to applied time(tip radius : 10[ $\mu\text{m}$ ]).

그림 3.5는 각 시편에 AC 7.5[kV]의 전압을 곡률반경 10[ $\mu\text{m}$ ]인 시편에 100분간 인가하였을 때 10분마다 측정된 트리진전길이를 나타낸 것이다.

그림에서 트리진전길이는 인가시간에 따라 혼합비 70:30, 60:40, 50:50, 80:20순으로 작았으며, 순수 EVA와 LLDPE는 인가시간 50분, 70분에서 절연파

과가 일어났다.

그림 3.6은 곡률반경이 15[ $\mu\text{m}$ ]인 침전극을 사용한 각 시편에 AC 10[kV]를 계속 100분간 인가하면서 10분마다 측정된 트리진전길이를 나타낸 것이다.

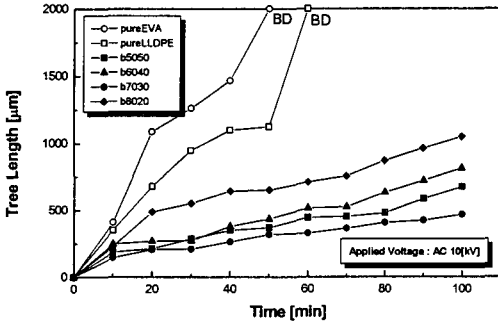


그림 3.6 인가시간에 따른 트리진전길이(곡률반경 : 15[ $\mu\text{m}$ ]).  
Fig. 3.6 Tree length according to applied time(tip radius : 15[ $\mu\text{m}$ ]).

그림에서 알수있듯이 트리진전길이는 인가시간에 따라 혼합비 70:30, 50:50, 60:40, 80:20순으로 작았으며, 순수 EVA와 LLDPE는 각각 인가시간 50분, 60분에서 절연파괴가 일어났다. 그 이유는 혼합시편이 순수시편에 비해 내부의 분자결합의 존재확률이 커지고, 혼합비에 따라 전하의 트랩중심이 형성되므로 도전성 캐리어가 트랩에 포획되어 전류밀도가 적어져서 트리진전이 늦어지는 것으로 사료된다. 따라서 혼합시편이 순수시편보다 내트리잉성이 양호한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 순수 LLDPE와 EVA 및 혼합비 80:20, 70:30, 60:40, 50:50인 시편을 제작하여 결정화도, 결정융점 등을 검토하기 위해 XRD, DSC분석을 하였고, 침전극의 곡률반경에 따른 각 시료의 트리진전모양과 트리개시전압 및 트리진전길이 등을 측정, 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) XRD분석결과  $2\theta = 21.4^\circ$  에서 결정(110)과  $2\theta = 23.6^\circ$  에서 결정(200)에 의한 피크를 확인하였고,  $2\theta = 19.5^\circ$  에서 비정질의 기여에 의한 피크의 중첩으로 혼합비율이 50:50인 시료가 결정화가 가장 높았고, DSC분석 결과 융점은 혼합시편이 순수 LLDPE보다 낮고 순수 EVA보다는 높음을 확인하였다.
- 2) 시편의 트리진전 모양은 순수 EVA는 가지형

의 트리진전을, 순수 LLDPE 및 혼합시편은 부시형의 트리진전모양을 확인하였다.

- 3) 순수 LLDPE와 EVA 및 혼합시편의 트리개시전압은 침전극의 곡률반경이 커질수록 높고, 특히 순수시편에 비해 혼합시편의 트리개시전압이 훨씬 높았으며, 그중 70:30인 시편의 트리개시전압이 가장 높음을 확인하였다.
- 4) 곡률반경이 각각 5[ $\mu\text{m}$ ], 10[ $\mu\text{m}$ ], 15[ $\mu\text{m}$ ]인 시편에 AC 5[kV], 7.5[kV], 10[kV]를 인가했을 때 시간에 따른 트리진전길이는 혼합비 70:30인 시편이 순수 LLDPE와 EVA에 비해 트리진전길이가 현저히 짧음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] 吉村昇 他 2名 “有機 絶縁材料の耐トラッキング性及ぼす酸性雨 影響”, T. IEE Japan, Vol.115-A, No.9, pp.890-895, 1995.
- [2] 강성화외4, “Fractal 이론을 이용한 전기 트리 사물레이션”, 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.1482-1483, 1997.
- [3] 김봉흠, 임기조, “첨가제에 의한 저밀도 폴리에틸렌의 내트리잉성 향상”, 대한전기학회지, 35권 1호, pp.17-25, 1986.
- [4] Y. Saito, M. Fukuzawa and H. Nakamura, “On the mechanism of tree initiation”, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EK-12, No.1, pp.31-34, 1977.
- [5] 박정구외5, “선형 저밀도 폴리에틸렌과 에틸렌 비닐아세테이트의 혼합비에 따른 체적고유저항 특성”, 한국전기전자재료학회 추계학술대회논문집, pp.552-555, 1999.
- [6] L.A. Dissado, J. C. Fothergill, Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, Peter peregrinus, pp.117-198, 1992.
- [7] 日本電氣學會, 放電現象論, 日本電氣學會, pp.487-500.