

재활용을 고려한 HDPE/EVA 필름의 전기분포 및 체적저항특성 해석

Analysis of Electric Field Distribution and Characteristics of Volume Resistivity in HDPE/EVA Film for Recycling

이흥규^{1,a}, 임기조¹, 김용주²
(Hung-Kyu Lee^{1,a}, Kee-Joe Lim¹, and Yong-Joo Kim²)

Abstract

Recently, CV, CN-CV and CNCV-W cable are used for HVDC transmission and distribution cable. However, XLPE which is used as insulation layer of power cable has thermosetting properties. It is very difficult to recycling. In this paper, we prepared HDPE/EVA film, which the blending ratio are 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 respectively for the purpose of recycling. Main factor such as electric field distribution and its resistivity in insulation system affected on insulation performance and reliability for HVDC applications. Therefore, electric field distribution formed by space charge and characteristics of volume resistivity was currently investigated. We suggest the possibility of utilization for HVDC insulation layer from the results.

Key Words : HVDC, High density polyethylene(HDPE), Ethylene vinyl acetate(EVA), Electric field distribution, Space charge, Volume resistivity, Recycling

1. 서론

절연층으로 가교폴리에틸렌(XLPE)을 사용하고 있는 22.9 kV급 CNCV 지중 배전 케이블의 경우 장시간 사용에 따른 노후화 및 사고로 철거된 후 도체부분을 제외한 반도체층, 절연층, 피복층은 일부 열재생(thermal recycling) 되거나 매립되는 등 환경문제를 유발하고 있으며, XLPE가 갖고 있는 열경화적 특성으로 인해 재활용이 곤란하여 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다. 최근 열가소성 고분자간의 혼합과 같은 비가교 방식에 의한 기존의 XLPE를 대체하는 재생 가능한 새로운 고분자 절연재료개발에 많은 관심이 집중되고 있다[1,2].

일반적으로 직류송전용 절연재료로서의 활용을 고려할 때 절연체내의 전기전도나 체적저항특성, 공간전하축적여부 등이 주요한 인자라 할 수 있다.

따라서, 직류송전용 고분자절연재료 설계시 절연체의 체적저항 측정, 공간전하 축적 여부, 공간전하에 의한 전기 및 전위분포를 정성적으로 분석하는 것은 절연성능 및 신뢰성향상에 필수적이다[3-5].

고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene; 이하 HDPE)은 중전압용 전력케이블뿐만 아니라 직류 고전압 송전용 케이블의 절연재료로서 이용이 검토되고 있으며, D. Muto 등은 높은 결정화도와 구멍크기가 커서 트리개시에 높은 저항성을 갖고 있다고 보고하고 있다[6].

또한, Yijian Lin 등은 HDPE와 혼합된 LDPE의 결정구조와 공간전하분포연구에서 작은 구멍의 경계영역을 통해 전하의 소실로 인한 혼합 시료의 공간전하저감효과를 발표하였다[7].

따라서, 본 논문에서는 반도체층과 절연층의 접착력을 개선하기 위해 비가교방식으로 재활용이 가능한 유극성(polar) 고분자로서 전력케이블의 반도체층의 기본수지로 사용되고 있는 VA 함량이 12 %인 에틸렌 비닐 아세테이트(ethylene vinyl acetate ; 이하 EVA)와 HDPE를 중량비별로 혼합하여 시편을 제작하고 인가전압 및 전압인가시간 변화에 따른 공간전하밀도를 측정하고, 이때의 전

1. 충북대학교 전기공학과
(충북 청주시 흥덕구 성봉로 410)
2. 충주대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : hglee@cjnu.ac.kr
접수일자 : 2008. 7. 9
1차 심사 : 2008. 7. 24
심사완료 : 2008. 8. 19

계 및 전위분포를 해석하였으며, 각 시편에 있어서 체적저항율의 인가전압 의존성 및 온도의존성을 검토하므로써 HVDC용 절연층 재료로의 적용 가능성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서 사용된 시료는 HDPE와 EVA(VA 함량 12%)를 Weissenberg effect에 의한 미량 혼련 압출기를 사용하여 중량비별[wt%]로 혼합한 후 Hot press를 사용하여 순수 EVA는 120℃으로 5분간 가압 성형하였고, 순수 HDPE 및 혼합비율이 각각 HE82, HE73, HE64, HE55인 시편 4종류는 180℃으로 5분간 2600 psi의 압력으로 가압 성형하여 시트 상으로 제작하였다. 이 시트상 시료를 두께 420~500 μm, 4.9 cm × 4.9 cm의 크기로 절단하여 공간전하분포측정용 시편을 제작하였고, 체적저항을 측정용 시편은 연면효과(edge effect)에 의한 측정결과의 왜곡을 방지하기 위해 가드링 전극법을 채용하여 두께 214 μm, 12 cm × 12 cm크기로 제작하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 시료의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 1. 고분자재료의 물리적 물성.

Table 1. Physical properties of polymer.

항 목	물성치	
	HDPE	EVA
Melting index[g/10 min]	0.04	1
Density[g/cm ³]	0.956	0.936
Tensile strength[kg/cm ²]	300	200
Elongation at break [%]	500	750
ESCR[Hrs]	>600	>500
Softening point[℃]	124	71

전계 및 전위 분포의 전압의존성을 검토하기 위하여 각 시편에 직류전압 1, 3, 5 kV를 인가하여 실험하였고, 전압 인가 시간은 각각 10분으로 하여 공간전하밀도를 측정하였다.

전계 및 전위 분포의 전압 인가시간 의존성을 검토하기 위하여 각 시편에 DC 3 kV 전압을 각각 10분, 30분, 50분간 인가하였을 때의 공간전하밀도를 측정하고, 식 (1)에 의해 전계 및 전위 분포를 산출하였다.

$$E(x) = \int \rho(x)dx / \epsilon_0 \epsilon_r = \sum (\rho(x) \times V_{Specimen} \times \tau) \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$V(x) = - \int E(x) dx = - \sum (E(x) \times V_{Specimen} \times \tau) \quad (1)$$

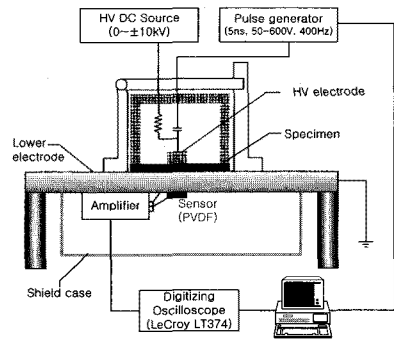
여기서, $V_{specimen}$ 은 측정 시편의 초음파 전달 속도, ϵ_r 은 측정시편의 비유전율, τ 는 샘플링 주기 (sampling interval)이다.

또한, 고저항계(Keithley 6517A)를 이용하여 계단 전압 인가법에 의해 각 시편에 대해 직류 200 V, 400 V, 600 V, 800 V를 인가한 상태에서 각 전압에서 2분 후의 저항 값을 측정하고, 또한 온도편차가 ±2℃인 온도제어장치가 내장된 전기오븐을 사용하여 각각 200 V, 800 V 인가시 20~90℃으로 온도를 변화시켰을 때 식 (2)에 의해 체적저항을 산출하고 변화경향을 검토하였다.

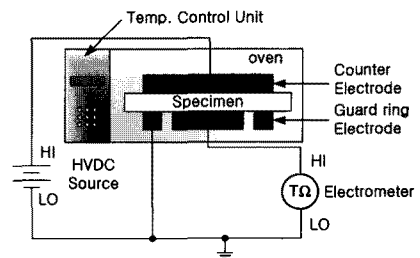
$$\rho_v = \frac{K_v}{d} R_v \quad (2)$$

여기서, $K_v : \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$, D : 측정전극의 직경, d : 시편의 두께, R_v : 체적 저항이다.

그림 1에 펄스 정전 용액법(pulsed electro acoustic method)[9]에 의한 공간전하측정 및 분석 시스템 (日本 Five Lab製, PEANUTS) 및 체적저항측정회로도를 나타내었다.



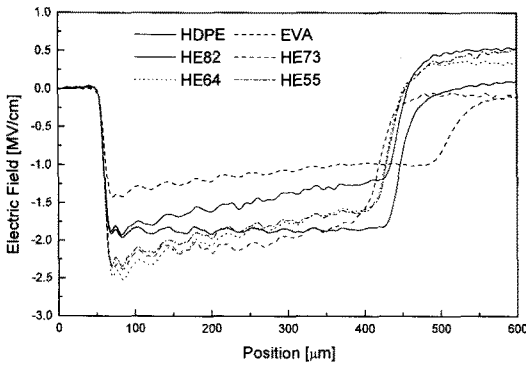
(a) 공간전하 측정 및 분석시스템



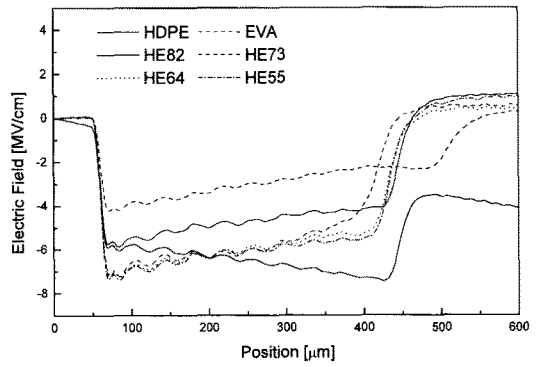
(b) 체적저항 측정회로도

그림 1. 공간전하 및 체적저항 측정회로도.

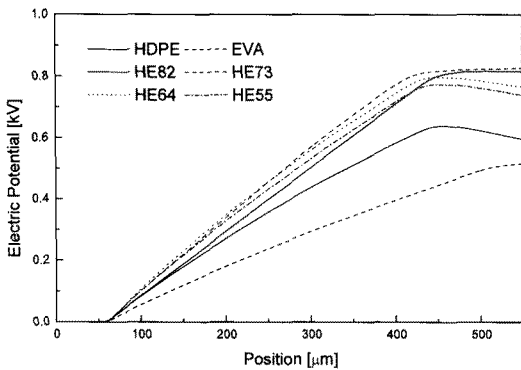
Fig. 1. The measuring setup for space charge and volume resistivity.



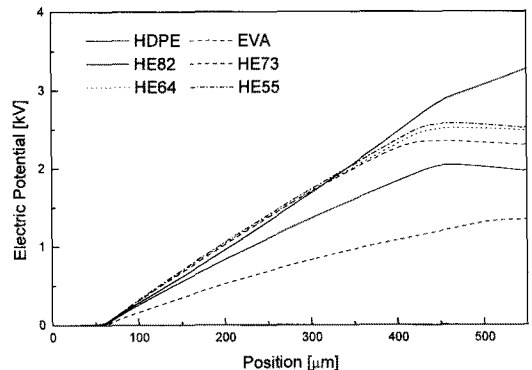
(a) 전계분포



(a) 전계분포



(b) 전위분포



(b) 전위분포

그림 2. 각시편의 전계 및 전위분포(DC 1 kV인가).
Fig. 2. Electric field and potential distribution in specimens at DC 1 kV.

그림 3. 각시편의 전계 및 전위분포(DC 3 kV인가).
Fig. 3. Electric field and potential distribution in specimens at DC 3 kV.

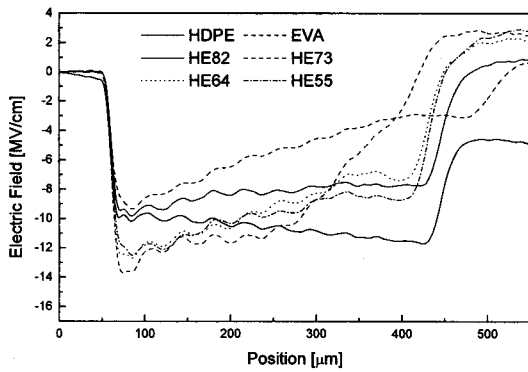
3. 실험결과 및 고찰

3.1 인가전압상승에 따른 전계 및 전위분포

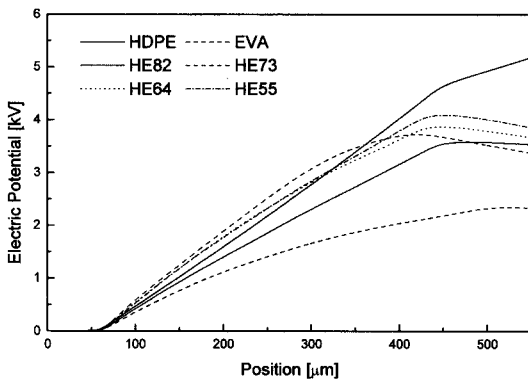
그림 2~4는 각각 두께 420~500 μm인 각 시편(HDPE, EVA, HE82, HE73, HE64, HE55)에 대해 각각 DC 1, 3, 5 kV로 상승시켜 10분간 인가하였을 때 측정된 공간전하 밀도 분포로부터 식 (1)에 의해 산출된 전계($E(x)$)분포 및 전위($V(x)$)분포를 나타낸 것이다.

그림 2(a), (b)에서 보는 바와 같이 DC 1 kV에서는 순수 HDPE의 경우 시편내부에 고르게 전계가 분포하고 있으며, 인가전압상승에 따른 전계 상승은 보이나, 인가전압과 그때의 전위는 일치하지 않는 경향을 보이는데 이것은 각 시편에 있어서 비유전율, 음속 및 두께의 미소한 차에 기인하는 것으로 생각된다.

그림 2(a)~4(a)에서 알 수 있듯이 HE82, HDPE, HE55, HE64인 시편의 순으로 비교적 균일한 전계 분포를 보이고 있다. 그러나 인가전압의 상승에 따라 순수 EVA와 혼합비가 HE73인 시편에서 내부 전계의 왜곡이 가장 심하게 나타났는데, DC 1 kV 인가시 순수 EVA시편의 경우 양극 측에서 주입된 정극성의 전하는 局在된 카보닐기(C=O group)가 깊은 트랩사이트로서 작용하므로써 음극 측으로 원활한 이동을 억제하고 있으나, 인가전압이 상승함에 따라 포획된 정극성 캐리어를 탈트랩시켜 음극 측으로 전하밀도 및 이동도를 향상시키므로써 음극부근의 전계가 강조되는 것으로 생각되며, HE73시편에서는 양극 측으로부터 주입된 다량의 정극성의 전하가 인가전압상승에 따라 일부는 부극성의 전하와 상쇄되고, 일부는 시편내의 저분자량의 PE 사슬의 절단 또는 불완전한 구정에 의해



(a) 전계분포



(b) 전위분포

그림 4. 각시편의 전계 및 전위분포(DC 5 kV인가).
Fig. 4. Electric field and potential distribution in specimens at DC 5 kV.

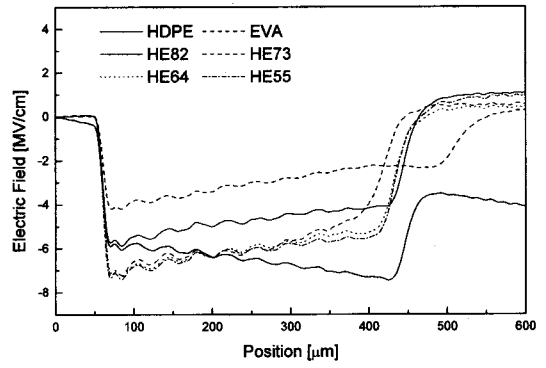
생성된 결정부분과 비정질사이의 계면 등의 영향으로 음극 측으로 이동이 촉진되어 음극 측의 전계를 왜곡시키고 있는 것으로 사료된다[5,7].

또한, 각 시편내부에서의 전위분포로부터 알 수 있듯이 인가전압이 상승함에 따라 HE55>HE64>HE73>HE82시편 순으로 HDPE내의 EVA혼합량이 높을수록 전위는 높게 나타났다.

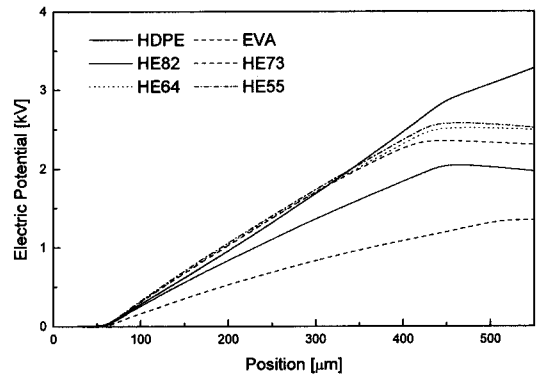
전위가 낮을수록 양극 측으로부터 정극성의 전하주입이 용이하며, 특히, 순수 EVA의 경우 상대적으로 낮은 결정화도와 HE73시편의 경우 구조적 결함 등의 영향에 의해 실효 퍼텐셜을 저하시키는 것으로 사료된다.

3.2 경시변화에 따른 전계 및 전위분포

그림 5~7은 각 시편에 대해 DC 3 kV인가 상태에서 10분경과 후, 30분경과 후, 50분경과 후 각각의 전계 및 전위분포를 나타낸 것이다.



(a) 전계분포

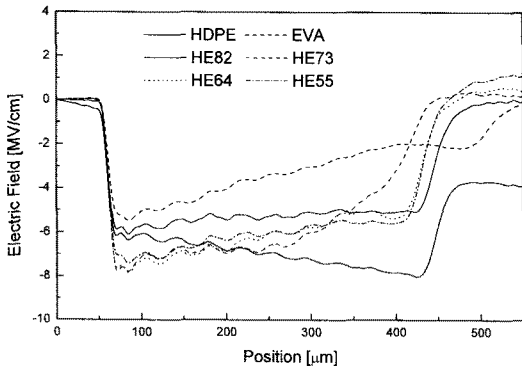


(b) 전위분포

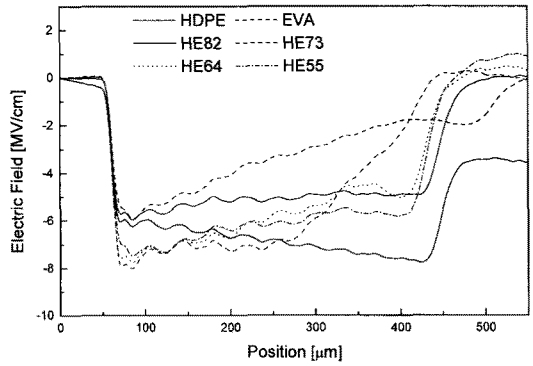
그림 5. 10분후의 전계 및 전위분포(DC 3 kV인가).
Fig. 5. Electric field and potential distribution in specimens after 10 minutes at DC 3 kV.

그림 7(a)에서 보는 바와 같이 순수 EVA와 HE73시편을 제외한 다른 시편의 경우 시간경과에 따른 전계분포에 큰 변화는 관측되지 않았다.

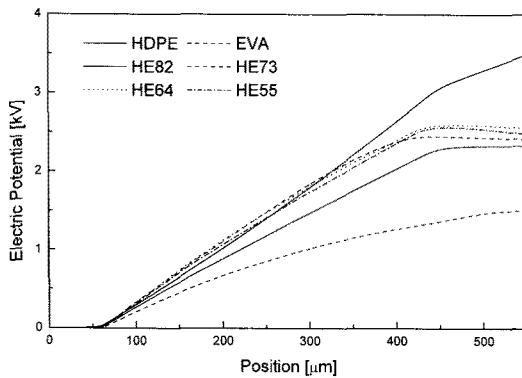
EVA시편의 경우 전압인가 초기에는 양극 측에서 주입된 정극성의 전하가 카보닐기(C=O group)의 기여로 트랩되어 음극 측으로의 이동이 억제되고 있으나, 시간이 경과함에 따라 트랩이 층만하게 되어 음극 측으로 캐리어 밀도 및 이동도가 촉진되어 음극부근의 전계를 강화하는 것으로 생각된다. HE73 시편에서는 양극 측으로부터 주입된 정극성의 전하가 시간경과에 따라 일부는 부극성의 전하와 상쇄되고, 일부는 시편내의 저분자량의 PE 사슬의 절단 또는 불안정한 결정부분과 비정질사이의 계면 등의 영향으로 음극 측으로 이동하는 캐리어가 증대되어 공간전하를 형성하므로써 음극부근의 전계를 왜곡시킨다[4,5].



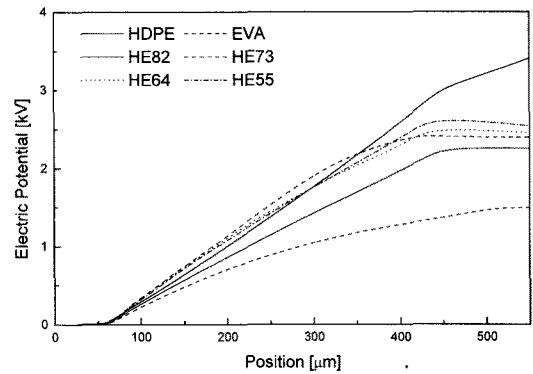
(a) 전계분포



(a) 전계분포



(b) 전위분포



(b) 전위분포

그림 6. 30분후의 전계 및 전위분포(DC 3 kV인가).
Fig. 6. Electric field and potential distribution in specimens after 30 minutes at DC 3 kV.

그림 7. 50분후의 전계 및 전위분포(DC 3 kV인가).
Fig. 7. Electric field and potential distribution in specimens after 50 minutes at DC 3 kV.

그러나 전위 분포는 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 HDPE를 제외한 나머지 시편에 있어서 인가 전압에 비해 대체로 낮게 나타났으나, 전압인가시간에 따른 경시적 변화는 관측되지 않음을 알 수 있다.

3.3 체적저항률의 인가전압 및 온도의존성

그림 8은 순수 HDPE, 순수 EVA 및 혼합시편에 있어서 체적저항률의 인가전압 의존성을 나타낸 것이다.

그림 8에서 보는 바와 같이 인가전압의 상승에 따라 시편내부의 전계강화로 전자주입이 활발해짐에 따라 캐리어의 이동도가 증대되어 체적저항률이 서서히 감소하고 있으며, 특히 순수 EVA시편의 경우 혼합시편에 비해 상대적으로 체적저항률의

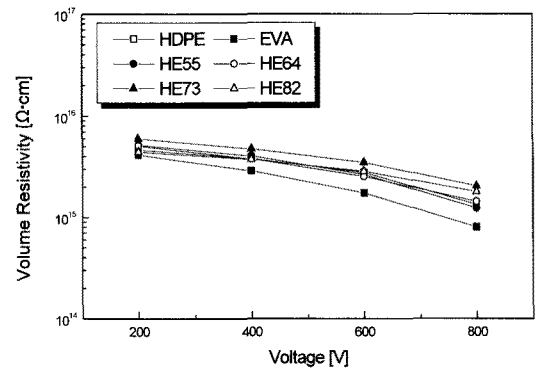


그림 8. 각 시편에서 체적저항률의 전압의존성.
Fig. 8. Voltage dependency of volume resistivity in each specimen.

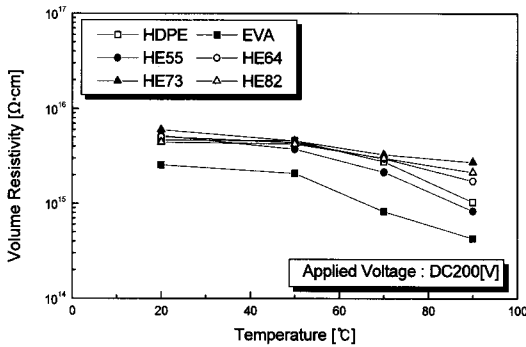


그림 9. 체적저항율의 온도의존성(DC 200 V일 때).
 Fig. 9. Temperature dependency of volume resistivity(Applied Voltage : DC 200 V).

감소가 현저하였는데, 이것은 EVA가 유극성 고분자로서 내부의 극성기나 공중합과정에서의 촉매반응 잔류물과 같은 불순물의 영향으로 캐리어밀도가 높기 때문인 것으로 생각된다.

그림 9는 순수 HDPE, 순수 EVA 및 혼합시편에 200 V의 직류전압을 인가한 상태에서 20~90 °C의 온도범위에서 측정된 체적저항율의 변화 경향을 나타낸 것이다.

그림 9에서 순수 EVA의 체적저항율의 감소 폭이 큰 것은 EVA의 유리전이온도가 순수 HDPE나 혼합시편에 비해 상대적으로 낮아 온도가 유리전이온도에 근접함에 따라 내부이온의 해리 및 탈트랩이 촉진되어 체적 저항율이 저하되는 것으로 생각되며, 특히 순수시편에 비해 혼합시편의 체적저항율의 감소 폭이 완만한 것은 시편 내에 존재하는 카보닐기(C=O group)가 깊은 트랩중심으로서 작용하여 다수의 캐리어들이 트랩준위에 안정되게 존재함에 따라 탈트랩이 억제되어 이동도를 저하시키기 때문인 것으로 사료된다[8].

그림 10은 순수 HDPE, 순수 EVA 및 혼합시편에 800 V의 직류전압을 인가한 상태에서 20~90 °C의 온도범위에서 측정된 체적저항율의 변화 경향을 나타낸 것이다.

그림 8~10에서 보는바와 같이 인가전압 및 온도 상승으로 시료내의 불순물 해리에 의한 이온성 전도뿐만 아니라 전계 증가로 인한 전자성 전도의 복합적인 기여로 인가전압 200 V일 때와 비교해볼 때 체적 고유 저항이 감소 폭이 커지고 있음을 확인할 수 있다.

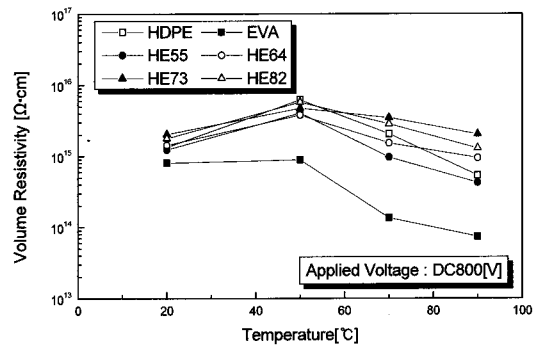


그림 10. 체적저항율의 온도의존성(DC 800 V일 때).
 Fig. 10. Temperature dependency of volume resistivity(Applied Voltage : DC 800 V).

4. 결론

본 논문에서는 재활용성을 고려하고 HVDC용 절연층 재료로의 적용 가능성을 검토하기 위해 EVA(VA 함량 12%)와 HDPE를 중량비별로 혼합한 시편에 대해 인가전압 및 전압인가시간변화에 따른 공간전하밀도로부터 산출한 전계 및 전위 분포를 분석하였으며, 체적저항율의 인가전압 및 온도의존성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 인가전압 변화에 따른 시편내부의 전계분포는 비교적 균일하였으나, HE73에서의 전계는 왜곡되었다.
- 2) 인가전압상승에 따른 각 시편의 전위 분포는 순수시편을 제외한 혼합시편의 경우 EVA의 혼합비율이 높을수록 전위는 높게 나타났다.
- 3) HE73을 제외한 다른 시편의 경우 시간경과에 따른 전계분포의 큰 변화는 관측되지 않았다.
- 4) 인가전압의 상승에 따라 체적 저항율이 서서히 감소하고 있으며, 특히 혼합시편보다는 순수시편의 체적저항율의 감소가 현저하였으며, 온도변화에 따른 체적 저항율은 순수시편에 비해 혼합시편에서 카보닐기(C=O group)의 기여에 의해 체적저항율의 감소 폭이 완만하였다.

본 논문에서 제시한 결과는 HVDC용 전력케이블 절연층의 재생 및 재활용이 가능한 대체절연재료로서의 적용을 위한 기초 자료로서 활용이 가능하나, 향후 신뢰성 검증을 위한 다양한 후속연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] H. Tamura, H. Ono, M. Ikeda, Y. Yamamoto, and Y. Ohki, "Properties of polyethylene blend as a non-crosslinked insulating material for power cable", IEEJ Trans. FM, Vol. 124, No. 9, p. 817, 2004.
- [2] K. Yoshino, T. Demura, M. Kawahigashi, Y. Miyashita, K. Kurahashi, and Y. Matsuda, "The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable", T. IEE Japan, Vol. 122-A, No. 9, p. 872, 2002.
- [3] Montanari G. C., Mazzanti G., Palmieri F., Motori A., Perego G., and Serra S., "Space charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE", Journal of Physics D-Applied Physics, Vol. 34, No. 18, p. 2902, 2001.
- [4] T. Mizutani, "Electrical properties of polymers : space charge behaviour in insulating polymers under high voltage direct current", Society of Chemical Industry, Polymer International, Vol. 51, p. 1164, 2002.
- [5] K. S. Suh, "Measurements and characteristics of space charge in polyethylene", Polymer Science and Technology, Vol. 9, No. 5, p. 394, 1998.
- [6] D. Muto, S. Kondo, K. Kaneko, Y. Suzuki, T. Mizutani, and T. Itaya, "Space Charge Characteristics of Modified High-density Polyethylene for DC Cables", Proceedings of the International Symposium on Electrical insulating Materials, p. 545, 1998.
- [7] Y. J. Lin, W. C. Du, D. M. Tu, W. Zhong, Q. G. Du, "Space charge distribution and crystalline structure in low density polyethylene(LDPE) blended with high density polyethylene(HDPE)", Polymer International, Vol. 54, p. 465, 2005.
- [8] M. Ikeda, Y. Yamamoto, and H. Kawabata, "Development of new type polyethylene with high resistivity for power cable insulator", T. IEE Japan, Vol. 122-A, No. 11, p. 987, 2002.
- [9] G. Chen, "Space charge measurement as a diagnostic tool to monitor ageing in polymeric materials", Trans. EEM, Vol. 7, No. 5, p. 235, 2006.