

전력케이블용 절연재료의 캐리어 극성 및 공간전하 측정기술에  
 관한 연구  
 — PE-EVA에서의 하전입자의 거동 —

A Study on the Space Charge Measurement Technique and Carrier Polarity  
 of Insulating Materials on Power Cable  
 — Behavior of Charged Particles in EVA Blended Polyethylene —

鞠 相 勳\* · 朴 重 淳\*\* · 姜 龍 哲\*\* · 權 寧 守\*\*\*  
 (Sang-Hoon Kook · Joong-Soon Park · Yong-Chul Kang · Young-Soo Kwon)

*Abstract* - In this paper, it is attempted to distinguish the charged particles and to judge the polarity by the use of Thermally Stimulated Current(TSC) and Temperature Gradient Thermally Stimulated Surface Potential Measurement(TG-TSSP) with experimental insulation material XLPE-EVA for power cables which is made by blending cross-linked polyethylene(XLPE) and ethylene-vinyl acetate copolymer(EVA). In addition, it is performed to investigate the effect of EVA blending. From the experimental results, it is known that for the case of XLPE-EVA blended experimental material, the generation of space charged electric field is not obtained in the high temperature region due to the obstruction of the injection of trapping carrier by the electron and the positive hole.

Key Words : · Carrier Polarity(캐리어 극성) · Charged Particles(하전입자)  
 · Space Charge(공간전하) · Thermally Stimulated Current(열자극전류)  
 · Power Cable(전력 케이블)

1. 서 론

최근, 대용량 송전을 위한 전력 케이블에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 그중 특히 절연 재료에 대한 중요성이 크게 주목되고 있다. 전력

\*正 會 員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
 \*\*正 會 員 : 朝鮮大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 \*\*\*正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博  
 接受日字 : 1991年 7月 16日  
 1次修正 : 1991年 12月 3日

케이블용 절연 재료로서는 고분자 절연체가 주로 사용되고 있지만, 고분자 전력 케이블의 경우에는 장시간 고전압하에서 사용되기 때문에 절연체내에서 트리 발생에 의한 절연파괴 사고가 자주 발생되고 있다. 이것은 고전압을 인가함으로써 전력 케이블내에 주입 trap된 공간전하로 인하여 내부 전계가 변화하기 때문으로 생각된다. 이와 같이 절연체내에 주입된 trap에 의한 공간전하 전계의 형성은 전력 케이블내에서 문제점으로 많이 보고되고 있다. 따라서 전력 케이블용 절연 재료의 절연 설계에 있어서 공간전하 주입의 효과를 어떻게 고려할 것인가 하는 것이 매우 중요하다. [1, 2]

한편, 전기기기의 초고전압화 및 소형화는 에너지의 합리적 이용이라는 면에서 볼때 대단히 중요하며, 특히 기기에 사용되는 절연 재료는 신뢰성을 좌우하는 것으로 이들 평가에 관한 연구가 주목되고 있다. 절연 재료의 평가에는 각종 절연파괴, 절연저항 등 여러 방법이 있으나 정확한 현상을 파악하기 위해서는 재료내의 캐리어 및 공간전하의 측정 방법이 사용되어지고 있다.

필자[3, 4] 들은 공간전하 및 캐리어의 측정 기술로서 시료내에 온도구배가 설정된 새로운 방법인 온도구배 열자격법을 도입하여 캐리어의 구별 및 극성판정을 하였으며, 쌍극자의 탈분극을 이용하여 시료내의 온도 효과 및 캐리어에 의한 공간적인 정보를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 전력 케이블용 절연 재료로서 가교된 폴리에틸렌(XLPE)과 에틸렌비닐아세테이트(EVA)가 blend된 XLPE-EVA를 시료로 하여 열자격전류법(TSC)과 온도구배 열자격표면전위법(TG-TSSP)의 측정 기술을 이용하여 하전입자의 구별 및 극성을 판정하였으며, XLPE-EVA를 blend함으로써 전자 및 정공이 서로 반대의 trap 캐리어의 주입을 억제하기 때문에 하전입자가 감소하여 공간전하 전계의 형성이 되지 않는다는 사실이 밝혀졌으므로 이에 대하여 보고한다.

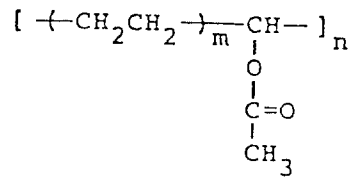
**2. 시료 및 실험 방법**

본 연구에서 사용한 시료는 두께 0.3mm의 가교된 폴리에틸렌(XLPE)과 에틸렌비닐아세테이트(EVA)를 blend한 XLPE-EVA 필름이며, 10<sup>-6</sup> Torr 정도의 진공중에서 면적 약 8cm<sup>2</sup>이 되도록 Al을 증착하여 전극으로 사용하였다. 이것은 필자들의 실험 결과 XLPE의 경우 주입 trap은 전자성으로 추정되었으며[3], 반대로 정공의 성질을 가진 전하가 주입되기 쉬운 EVA를 blend함으로써 전

**표 1** 측정시료  
**Table 1** Samples

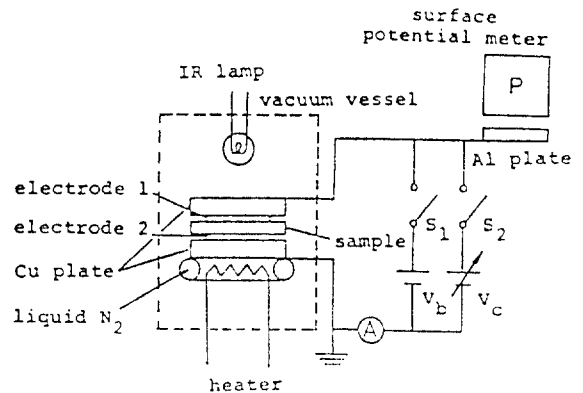
시 료	EVA의 함유량(%)	
1	0	MI 2.6
2	0.3	밀도 0.922(g/cm <sup>3</sup> )
3	3	두께 0.3mm
4	30	

**Ethylene-vinyl Acetate Copolymer**



**그림 1** EVA의 분자구조

**Fig. 1** Molecular structure of EVA



**그림 2** 온도구배열자격 측정장치

**Fig. 2** A schematic diagram of the TG-TSC

자 및 정공이 서로 반대의 trap 캐리어의 주입을 억제하기 때문에 공간전하가 축적되지 않는 시료를 얻을 수 있을 것으로 예상되기 때문에 상기 시료를 선택하였다[3]. 표1에 폴리에틸렌을 Base Resin으로 하여 EVA를 함유한 측정 시료를 그림 1에는 참고로서 EVA의 분자구조를 각각 표시하였다.

실험 방법은 먼저 시료에 포함되어 있는 하전입자를 식별하여 그의 공간전하 특성을 조사하기 위해 TSC를 측정하였다. 그 다음 온도구배가 있는 경우와 없는 경우의 TSSP를 측정하여 하전입자의 극성을 판정하였다. 또한 EVA blend 효과에 대한

검토를하여 시료내에 공간전하 전계 형성에 대하여 논의하였다. 그림2에 측정 장치의 개략을 나타내었다. 시료에 온도구배를 제공하기 위하여 하부전극에는 히터 및 액체 질소로서, 상부전극에는 적외선 집광 lamp를 사용하여 시료의 온도를 제어하였다. [3, 4]

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 하전입자의 구별

그림3은  $-150^{\circ}\text{C}$ 에서  $100^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도범위에서 관측된 TSC의 spectra이다. 그림에표시한 것처럼 A( $-115^{\circ}\text{C}$  부근), B( $-35^{\circ}\text{C}$  부근), C( $60^{\circ}\text{C}$  부근), D( $70^{\circ}\text{C}$  부근)의 4개의 peak가 측정되었다. 본 연구에서 중점적으로 검토한 온도 범위는 전력 캐이플이 연속으로 사용되어지는 온도를 고려하여 C 및 D peak를 중심으로 실험하였다.

그림4는 EVA가 포함되지 않은 XLPE 시료(a)와 EVA가 30% 포함된 XLPE 시료(b)에 대한 TSC의 collecting 특성 결과이다. 그림4에서 전하량  $Q_{TSC}$ 는  $V_c/V_b$ 와 bias 온도  $T_b$ 에 의하여 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, bias 온도  $80^{\circ}\text{C}$ 의 경우에는 collection전압  $V_c$ 에 의하여  $Q_{TSC}$ 가 반전하지 않지만, bias 온도  $20^{\circ}\text{C}$  때는  $Q_{TSC}$ 가 반전하고 있다. 이것은 저온 bias일 수록 trap 전하의 성질이 강하게 나타나는 것으로 C peak는 trap 캐리어에 기인한 것이며, D peak는 trap 캐리어 이외의 원인에 의한다는 것을 나타내는 결과이다. [3, 4]

그림5는 EVA가 30% 포함된 시료에 대한 열자격표면전위(TSSP)의 collecting 특성이다. 즉, bias 온도  $T_b$ 가  $60^{\circ}\text{C}$  이상에서는 TSSP가 직선적

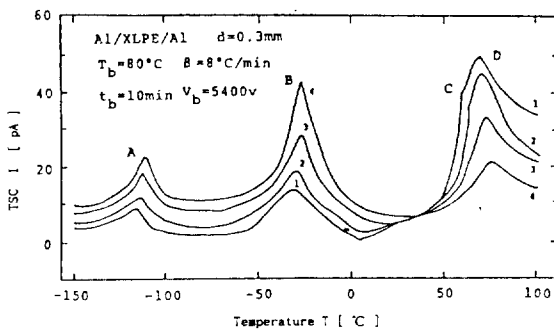
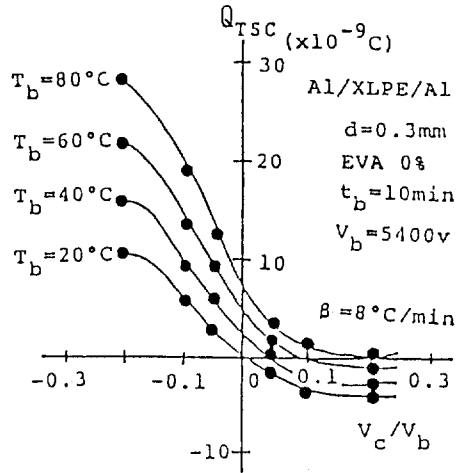
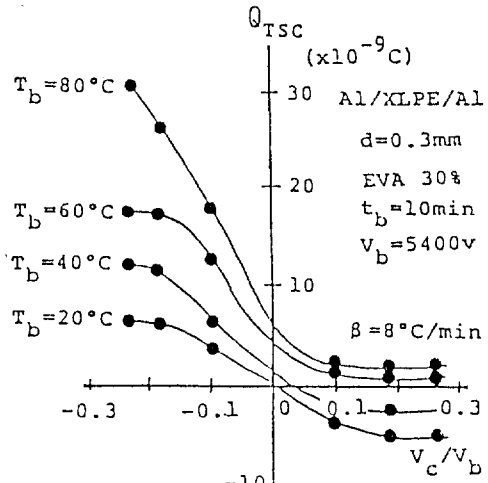


그림 3 XLPE-EVA의 열자격 전류  
Fig. 3 TSC of XLPE-EVA



(a)



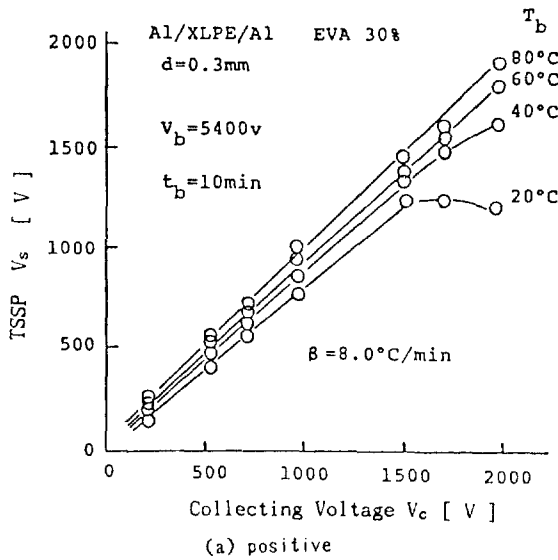
(b)

그림 4 TSC의 collecting 특성

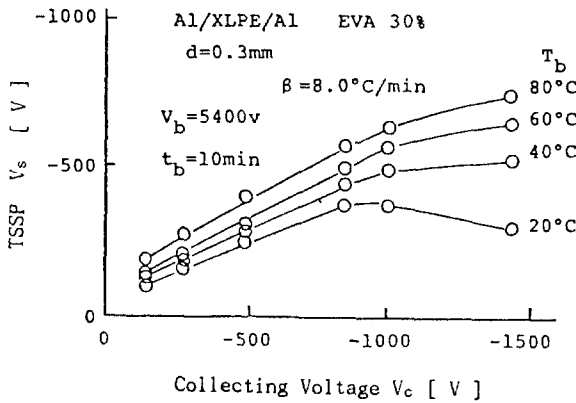
Fig. 4 Characteristics of collecting in TSC

이며, bias 온도가 증가할 수록 큰 TSSP를 발생하므로 이온의 성질을 나타내는 것으로 추정된다. 그러나  $T_b$ 가  $40^{\circ}\text{C}$  이하에서는 collecting 전압 ( $V_c$ )이 큰 경우에 TSSP가 구부러져서 trap의 성질을 나타내고 있다[6]. 이것은 TSC의 collecting 특성으로 부터 trap성의 C peak와 고온영역에 C peak와 중복되어 이온성의 D peak가 나타난다는 사실과 동일한 결과이다.

#### 3.2 하전입자의 극성 판정



(a) positive



(b) negative

그림 5 TSSP의 collecting 특성

Fig. 5 Characteristics of collecting in TSSP

그림6은 EVA가 0.3% 포함된 시료의 C peak에 대한 온도구배 열자격표면전위법(TG-TSSP)의 측정 결과이다. 온도 10°C에서 단락하여 그 후의 표면전위를 측정하는 것으로 bias 전압의 극성에 관계없이 전위변화는 온도구배 TSSP가 보통의 TSSP에 대하여 10°C 단락 직후에서는 부(-)의 전위 방향으로 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 다음 검토항에서의 식(2)를 만족시키는 것으로서 trap 캐리어의 극성이 부(-) 즉, 전자성이라는 것을 나타내는 것이다.[7]

그림7은 70°C 부근에 나타나는 이온성 공간전하 분극에 기인한 D peak에 대한 온도 구배 열자격 표면전위법(TG-TSSP)의 측정 결과이다. 이 경우에는 C peak의 영향을 받지 않게 하기 위하여 시

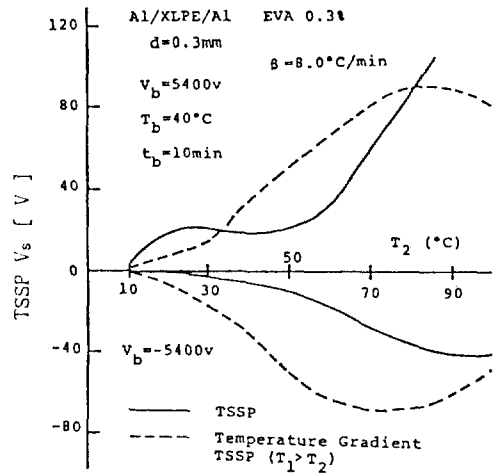


그림 6 C peak의 온도구배 TSSP

Fig. 6 TG-TSSP of C peak

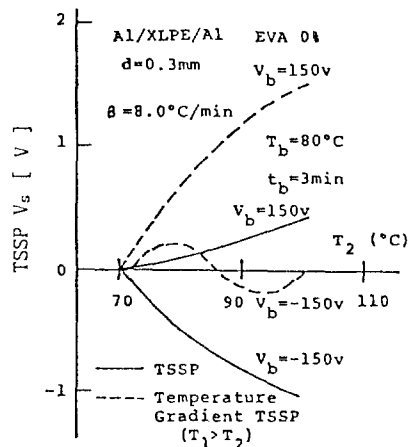


그림 7 D peak의 온도구배 TSSP

Fig. 7 TG-TSSP of D peak

료내에 캐리어가 주입되지 않도록 저전계를 인가하였다. 또한 bias 시간 t\_b를 짧게 하였으며, t\_b종료 후에는 단락한 상태로 급냉하는 thermalsampling[3~5]의 방법을 이용하였다. 그림7에서 알 수 있듯이 bias 전압의 극성에 관계없이 전위변화는 온도구배 TSSP가 보통의 TSSP에 대하여 70°C 단락 직후에 정(+)의 전위 방향으로 변화하고 있다. 이것은 식(4)의 결과와 일치하는 것으로서 D peak의 원인인 공간전하 분극을 형성하고 있는 이온 캐리어의 극성이 부(-)인 것을 나타내는 것이다[3, 6].

### 4. 검토

#### 4.1 하전입자의 극성판정

절연체 내부에 존재하는 하전입자가 열에 의하여 여기된 경우에는 시료에 온도변화가 있으면 열여기된 캐리어가 빨리 전극에 도달하게 된다. 또한 열여기에 의한 캐리어가 이동할 때의 열자격 표면전위의 초기 분포만을 생각하면 온도변화에 따른 열자격 표면전위의 변화는 다음과 같이 된다 [3, 7].

(1) Trap캐리어가 (+)극성 측, 정공인 경우

$$dV_s'/dt - dV_s/dt > 0 \quad (1)$$

(2) Trap캐리어가 (-) 극성 측, 전자인 경우

$$dV_s'/dt - dV_s/dt < 0 \quad (2)$$

(3) 이온 캐리어가 (+)극성인 경우

$$dV_s'/dt - dV_s/dt < 0 \quad (3)$$

(4) 이온 캐리어가 (-)극성인 경우

$$dV_s'/dt - dV_s/dt > 0 \quad (4)$$

여기서  $V_s'$ 는 온도구배가 있는 경우의 TSSP이며,  $V_s$ 는 온도구배가 없는 경우의 TSSP이다. 따라서, 그림6 및 그림7에서 관측된 열자격표면전위의 변화는 정공의 trap캐리어와 부(-)극성인 이온 캐리어에 의한 하전입자의 거동으로 생각할 수 있다.

#### 4.2 EVA의 blend 효과

XLPE 시료에 EVA를 blend한 효과에 대해서 검토하기 위하여 먼저 EVA의 특성을 조사하였다. 그림8은 EVA의 TSC spectra이다.  $P_1$ (-120°C 부근),  $P_2$ (-35°C 부근),  $P_3$ (60°C 부근)의 peak가 관측되었다. 본 실험에서는 XLPE 시료의 C, D peak가 발생하는 온도에 가까운  $P_3$  peak에 대한 TG

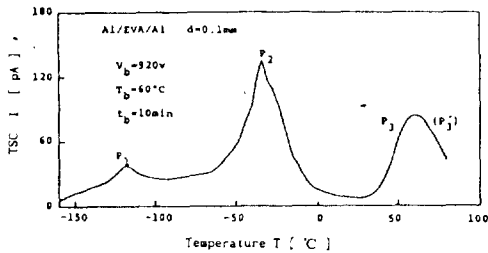


그림 8 EVA의 열자격 전류  
Fig. 8 TSC of EVA

TSSP를 측정하여 trap캐리어의 극성에 대하여 상세하게 검토하였다.

그림9는 EVA의  $P_3$  peak에 대한 TG-TSSP의 측정결과로서 온도구배가 있는 경우의 TSSP의 전위가 높게 변화하고 있다. 이것은 식(1)과 같은

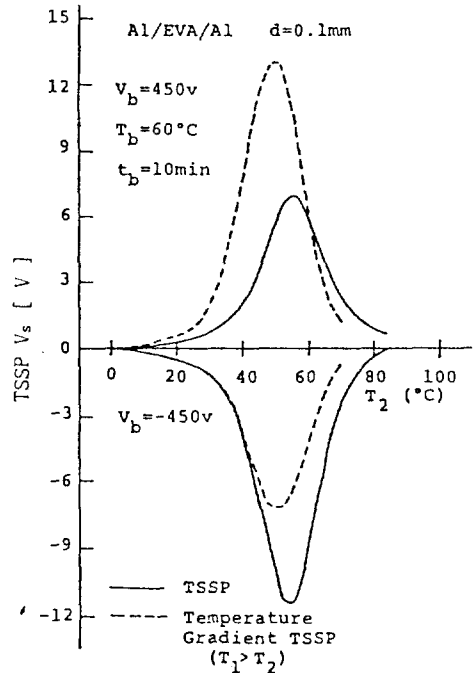


그림 9 EVA의 온도구배 TSSP  
Fig. 9 TG-TSSP of EVA

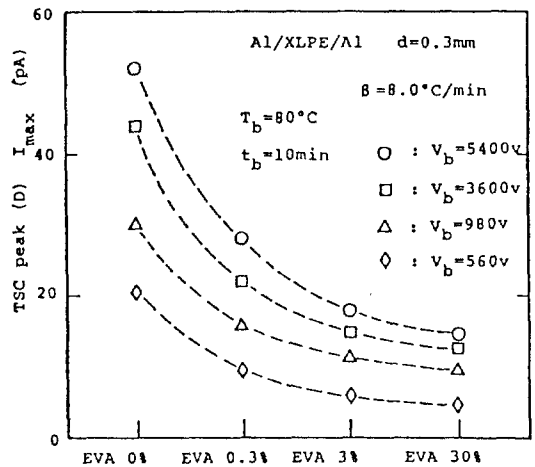


그림 10 EVA의 전압 의존성  
Fig. 10 Biasing voltage dependence of EVA

결과로서 trap 캐리어의 극성을 정(+), 즉, 정공성인 것을 나타내는 것이다. [3, 7]

이상과 같이 EVA의 P<sub>3</sub> peak는 정공이 trap된 것이며, XLPE의 C peak는 전자가 trap된 것이므로, XLPE와 EVA를 blend함으로써 전자 및 정공이 서로 상쇄되어 trap 캐리어에 의한 peak를 발생하지 않게 하여 공간전하가 축적되지 않는 시료를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 반대로 blend로 인하여 전자 및 정공이 중복되어 double injection 상태가 될 가능성도 있으며, blend에 의해 결정화도가 저하되어 비정질 부분이 증가하기 때문에 이온성 공간전하가 증가할 가능성도 있다. 따라서 각 시료에 대한 TSC 특성을 비교하여 EVA blend 효과에 대해 검토하였다.

그림10은 XLPE-EVA 시료에 대한 D peak의 최대값 I<sub>max</sub>가 EVA의 함유량에 대하여 어떻게 변화하는가를 bias 전압에 대해서 비교한 것이다. EVA의 함유량이 많을수록 I<sub>max</sub>가 작아지며, 특히 고전계의 경우에 감소의 폭이 큰 것은 trap 캐리어에 의한 C peak가 작아졌기 때문으로 생각된다.

그림11은 EVA 함유량에 대한 TSC peak I<sub>max</sub>의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 어느 온도에서나 EVA 함유량이 많은 경우가 I<sub>max</sub>가 작은 값이었다. 특히 80°C 온도에서는 감소의 폭이 큰 것은 D peak가 감소하는 것을 의미하는 것이다.

이상, XLPE-EVA blend의 필름은 고온 영역에서 XLPE의 C, D peak가 감소하여 공간전하가

축적되지 않는 것이 확인되었으며, C peak의 극성 판정 결과 blend 필름내에서도 C peak는 전자성 trap 캐리어로서 double injection은 발생하지 않는 것으로 추정된다. 또한 이온성의 공간전하역시 감소한다는 사실이 밝혀졌다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 가교된 폴리에틸렌(XLPE)과 에틸렌비닐아세테이트(EVA)가 blend된 XLPE-EVA를 시료로 하여 TSC 및 TSSP를 이용하여 하전입자의 구별 및 극성을 판정하였으며, blend 효과를 검토하였다. 실험 결과, XLPE-EVA를 blend한 시료의 경우에는 고온 영역에서 trap된 전자-정공이 상쇄되어 공간전하 전체의 형성이 되지 않는다는 사실이 밝혀졌다. 이것은 전자 및 정공이 서로 반대의 trap 캐리어가 주입되는 것을 억제하기 때문으로 생각된다. 즉, XLPE가 EVA의 정공 주입을 억제하며, EVA가 XLPE에 전자가 주입되는 것을 억제하기 때문에 XLPE의 C peak가 효과적으로 감소된다는 것이다.

상기의 결과는 전력 케이블에 공간전하가 형성되지 않는 시료의 개발 가능성을 시사하는 것으로 앞으로의 응용 개발이 기대된다.

이 논문은 1990년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 지방대육성 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

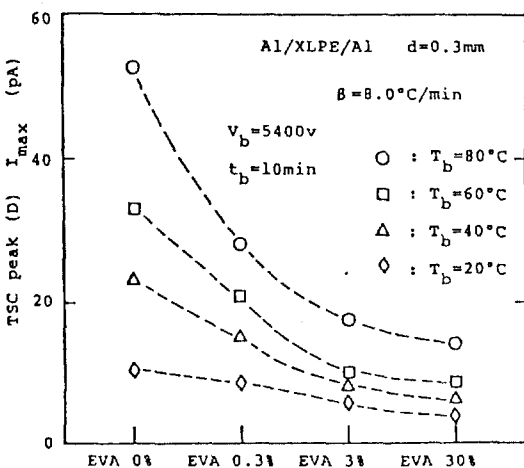


그림 11 EVA의 온도 의존성  
Fig. 11 Biasing temperature dependence of EVA

### 참 고 문 헌

- [1] G. Bahder, et al.; "Physical Model of Electric Aging and Breakdown of Extruded Polymeric Insulated Power Cables," IEEE Trans., Power Apparatus Syst., PAS-101, p. 1379, 1982.
- [2] C. Laurent & C. Mayoux; "Analysis of Propagation of Electric Treeing Using Optical and Electrical Methods," IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-15, p. 33, 1980.
- [3] 권영수, 강도열, 국상훈; "온도구배 열자극 측정에 의한 하전입자의 구별 및 극성 판정," 전기학회 논문지 38(8), p. 600, 1989.
- [4] 권영수, 강도열, 국상훈; "쌍극자 분극에 대한 열자극 특성," 전기학회 논문지 39(4), p. 357, 1990.
- [5] 日野外; "電気絶縁材料の熱刺激電流", 日本

電氣學會 技術報告(Ⅱ部) 第194號, 1985.

- [6] T. Hino & F. Kaneko ; "Thermally Stimulated Surface Potential due to the Charge Injected in Insulators", Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn., 96-A, p. 309, 1976.
- [7] T. Hino et al ; "Determination of Charged Particles and their Polarity in XLPE by

Temperature Gradient Thermally Stimulated Surface Potential Measurement", *ibid*, 105-A, p. 255, 1985.

- [8] 河村, 繩田, 家田 ; "エチレン-酢酸ビニル共重合體におけるトリ-イオン破壊の空間電荷効果", *ibid*, 104-A, p. 81, 1984.

### 저 자 소 개



국상훈(鞠相勳)

1928년 3월 16일생. 1956년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1984년 일본 동경공업대학 객원 연구원. 현재 조선대 공대 전기공학과 교수.



박중순(朴重淳)

1951년 4월 5일생. 1974년 한국 해양대 졸업. 1988년 동 대학원 석사수료. 현재 목포해양전문대 조교수 및 조선대 대학원 전기공학과 박사과정.



강용철(姜龍哲)

1963년 1월 16일생. 1988년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 조선대 대학원 전기공학과 박사과정.



권영수(權寧守)

1950년 1월 17일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1983~88년 일본 동경공업대학 대학원 전기·전자 공학과 졸업(공박). 1990년 동경공업 대학 객원연구원. 현재 동아대 공대 전기공학과 조교수.