

반도전 전극에 들어 있는 계면활성제가 XLPE의 전기전도 특성에 미치는 영향

Effects of Surfactant in Semicon Electrode on Electrical Conduction of XLPE

조준상*, 서광석*, 이건주***

Jun Sang Cho, Kwang S. Suh, Kun Joo Lee

Abstract

Electrical conduction characteristics of crosslinked polyethylene (XLPE) were investigated using an electrode made of semicon material containing a surfactant. When the semicon material is used as an electrode, the conduction of XLPE obeys a space charge limited conduction (SCLC) mechanism, which holds true for both control and surfactant-containing semicon electrodes. Conduction currents get higher with the addition of surfactant in the semicon electrodes while the charge mobility increases with the increase of surfactant content in the semicon electrode. The diffusion of surfactant molecules into the XLPE was confirmed via a μ -FTIR analysis. It was found through a measurement of spatial charge distributions that the surfactant in the semicon electrodes enhances the injection of negative charge into the XLPE from the electrode. Experimental results and their origins are discussed in detail.

Key Words(중요용어) : XLPE, Semicon electrode, Surfactant, Electrical conduction, Charge distributions

1. 서 론

고분자 절연체의 전기적 성질 측정 또는 전압을 가해야 하는 구조물에서는 일반적으로 전극을 사용한다. 예를 들어, 전력케이블의 경우 도체와 절연층 사이, 그리고 절연체와 중성선 사이에 반도체 재료로 만들어진 반도체층이 반드시 있어야 한다. 이 반도체층의 본래 역할은 도체로부터 전계완화와 도체와 절연체가 직접 접촉됨으로써 발생하는 문제점을 완화시키기 위하여 사용된다.

이러한 본래 목적과는 달리 전극물질의 종류에 따라 측정되는 전기적 성질이 큰 영향을 받는다. 예를 들어, Chapeau

등은 진공증착된 금속전극을 사용하면 폴리에틸렌에 동종전하(homocharge)가 축적되는 반면 도전성 실리콘 그리스를 전극물질로 사용하면 이종전하(heterocharge)가 형성된다고 하였다.⁽¹⁾ Ditchi 등은 반도체 전극물질의 성분이 다르면 XLPE 내에 형성되는 전하의 종류가 달라진다는 연구결과를 보고한 바 있다.⁽²⁾ 또한 Shiono 등은 반도체 재료에 polyvinylcarbazole (PVK)을 혼합하면 케이블의 절연과피 특성을 향상시킬 수 있다고 하였는데, 이는 반도체 층에 있는 PVK가 절연층내에 공간전하 축적을 억제하기 때문이라고 하였다.⁽³⁾ 또한 Okamoto 등은 반도체 재료에 소량의 유기화합물을 혼합하면 케이블의 절연과피 특성을 약 30% 정도 향상시킬 수 있다고 발표한 바 있으며, Gao 등은 유기화합물과 계면결합제를 동시에 사용하면 케이블의 절연과피 특성을 약 40% 정도 향상시킬 수 있다고 발표한 바 있다.^(4, 5) 특히 Okamoto 등은 모델케이블 시험을 통하여 실험실 결과를 입증한 바 있으며 이를 이용하면 고전압 케이블의 절연두

* : 고려대학교 재료금속공학부
(서울시 성북구 안암동 5-1. Fax: 02-929-4408
E-mail: subkwang@kucenx.korea.ac.kr)
** : LG전선 연구소 고분자 연구실
1999년 3월 10일 접수, 2000년 2월 2일 심사완료

계를 현저히 줄일 수 있다고 발표하 바 있다. 이와 같이 전극 물질의 종류 또는 반도체 전극의 성분에 따라 XLPE의 전기적 성질이 달라질 수 있는데, 이들 결과는 전력케이블에 사용되는 반도체층 재료의 성분변화를 통하여 전력케이블의 성능향상을 도모할 수 있음을 의미한다.

전술한 바와 같이 일부 연구자에 의하여 반도체 재료의 성분변화를 통하여 전력케이블의 성능향상에 대한 연구가 이루어지기는 했으나 이들 연구 결과들은 주로 절연파괴 특성에 집중되어 있다. 물론 절연파괴 특성이 중요한 전기적 성질 중의 하나이기는 하지만 반도체 재료내에 들어 있는 계면활성제가 다른 전기적 성질에는 어떤 영향을 미치는지, 그리고 이들이 전력케이블에 실제 적용될 때 경년변화 등에 대한 자세한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 반도체 재료 제조시 계면활성제를 혼합한 후 이를 전극재료로 사용하여 XLPE의 전기전도 특성에 어떤 영향을 미치는 가에 대하여 알아보았다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 XLPE는 국내 석유화학회사에서 생산되어 전력케이블의 주절연 재료로 사용되는 수지로서 밀도는 0.920 g/cm³이고 용융지수는 2.0 g/10 min이다. 여기에 가교제로서 2.0 phr의 dicumyl peroxide (DCP)가 들어 있다. 반도체 재료는 실험실에서 Kneader와 roll-mill을 이용하여 제조하였다. 먼저, Kneader에서 모든 원료를 넣고 1차 혼합한 후 이를 다시 roll-mill에서 2차 혼련하였다. 가교제는 2차 혼련시 첨가하였다. 반도체 재료 제조에 사용된 주요 원료는 에틸렌비닐아세테이트 (ethylene vinylacetate: EVA), 전도성 카본 블랙, 가공조제, 산화방지제 및 본 연구의 주요 연구대상인 계면활성제이다. 본 연구에서 사용한 계면활성제는 decaglyne으로서 함량은 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 phr이다.

전기전도 특성의 측정은 기존에 발표된 바 있는 장치를 사용하였다. 이 장치는 dc 전원공급장치 (±5 kV), 전류계 (Keithley 617) 및 시험셀로 이루어져 있는데, 시험셀은 측정전극 (measuring electrode)과 상대전극 (counter electrode) 및 시료로 이루어져 있다. 측정전극에 연결되어 있는 전류계에서 측정된 전류값은 GPIB를 통하여 컴퓨터로 전송한 후 이를 저장하였다. 시료 및 반도체 전극의 두께는 각각 평균 50 μm이었다. 원형의 측정전극은 stainless steel로 만들었고 측정전극의 면적은 6.02 cm²이다. XLPE는 hot press를 이용하여 180℃에서 20분간 가교시켜 만들었다. 반도체 전극은 먼저 180℃에서 20분간 압착하여 가교

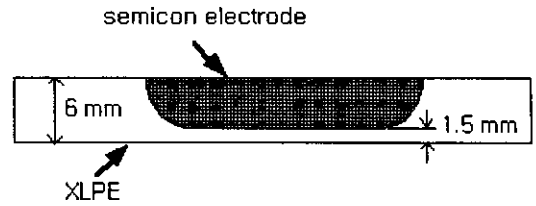


그림 1. 계면활성제 확산시험을 위한 시료 형태
Fig. 1. Specimen for diffusion test of surfactant

시킨 후 다시 열을 가하여 XLPE 표면에 부착하였다. 본 연구에서는 필요한 경우 반도체 전극물질 및 XLPE를 100℃에서 100 시간 진공오븐을 이용하여 탈기처리했다. 정상전류의 결정은 매우 어려운 일이나 기존 연구결과를 바탕으로 전압인가 후 30분 시점의 전류값을 정상전류값으로 하였다.^[6,7] 각 온도에서 측정 전에 약 12 시간 정도 측정온도에 놓아 열적 평형을 유지하도록 하였다.

반도체 전극에 들어 있는 계면활성제가 XLPE 내로 확산되는 현상을 확인하기 위하여 그림 1에 있는 형상의 시료를 만든 후 이를 80℃ 오븐에 넣고 일정 시간 경과 후 꺼내어 μ-FTIR을 이용하여 XLPE 내에 있는 계면활성제의 농도를 측정하였다. 이 실험은 계면활성제의 확산을 확인하기 위한 실험이기 때문에 계면활성제의 확산을 극대화하기 위하여 계면활성제가 2.0 phr 들어 있는 반도체 재료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에 계면활성제가 들어 있지 않은 기준 반도체 전극을 사용했을 때의 전류밀도-전계 (J-E) 곡선이 나와 있다. 이 실험에 사용된 시료는 가교 직후 탈기처리되지 않은 as-cured 시료이다. 그림에 있듯이, 1×10⁵ - 4×10⁴ kV/m의 전계와 30 - 90℃까지의 온도범위에서 대략 10⁻¹⁰ - 10⁻⁵ A/m² 정도의 전류밀도를 보이는데, 인가전압이 증가하고 측정온도가 올라갈수록 높은 전류밀도를 보인다. 대표적으로 70℃ 측정결과를 보면, 낮은 전계에서는 log J - log E 곡선에서 직선적인 관계를 보이다가 10⁴ kV/m 이상의 높은 전계에서는 전류밀도 증가율 (dJ/dE)이 둔화되는 양상을 보인다. 이러한 양상은 전체 시료에서 공통으로 보이는 현상이다. 이는 기존에 연구된 시료에서도 발견된 현상으로서, 이러한 현상을 보이는 시료는 폴리에틸렌 단결정^[8], 용융점 이상의 온도에서 측정된 폴리에틸렌^[9], polyvinylidene fluoride (PVDF)^[10], 그리고 연신된 폴리프로필렌 (oriented polypropylene: OPP)^[11] 등이다. 지금까지 제안된 이유로

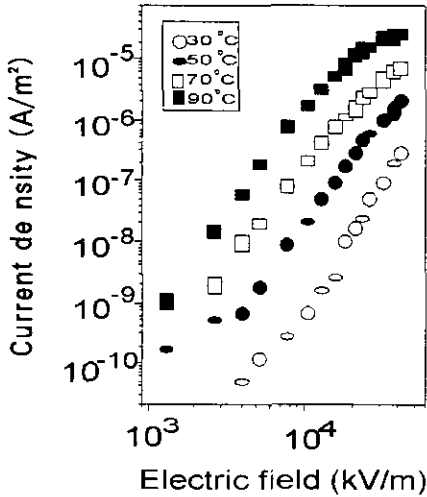


그림 2. 기준 반도체 전극시료의 J-E 곡선
Fig. 2. J-E curves of XLPE with control semicon electrodes

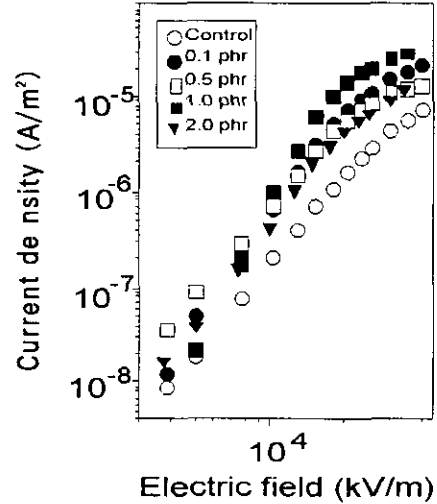


그림 3. 계면활성제 함량에 따른 미탈기 XLPE의 J-E 곡선 (70°C)
Fig. 3. J-E curves of as-cured XLPE according to surfactant content in semicon electrodes (70°C)

는 (1) bipolar injection, (2) 이중전하 형성, (3) 고전계에 의한 morphology 변화, (4) 고온/고전압에 의한 호핑거리 증가 현상 등이다. 특히 XLPE의 성분에 따른 전기전도 특성에 관한 연구결과를 보면 XLPE 내에 들어 있는 가교부산물, 첨가제 등의 성분 유무에 따라 dJ/dE 의 둔화현상이 영향을 받으며 저밀도 폴리에틸렌의 경우 전극과 시료 사이에 실리콘유를 바를 경우 이러한 dJ/dE 의 둔화현상이 심화된다는 연구결과가 발표된 바 있다.^[12] 따라서 시료 또는 본 연구의 경우 반도체 전극내에 들어 있는 저분자량 성분도 dJ/dE 의 둔화현상에 기여하는 것으로 생각된다.

그림 3에 반도체 전극내에 들어 있는 계면활성제 함량이 다른 각 시료에 대한 70°C 결과를 비교하였다. 본 실험에 사용된 시료는 XLPE와 반도체 전극 모두 가교후 탈기처리되지 않은 시료이다. 그림에서 보듯이, 반도체 전극에 계면활성제가 첨가되면 계면활성제가 첨가되지 않은 반도체 전극을 사용한 기준 시료의 전류밀도에 비하여 1차수 정도 높은 전류밀도를 보인다. 그러나 계면활성제 함량이 0.1과 0.5 phr의 경우에는 서로 비슷한 전류밀도를 보인다.

반도체 전극에 들어 있는 계면활성제의 영향을 좀 더 심도있게 분석하기 위하여 각 시료에 대한 전기전도 특성 분석을 실시하였다.

그림 4에 계면활성제가 들어 있지 않은 기준 반도체 전극과 계면활성제가 0.5 phr 들어 있는 반도체 전극을 사용했

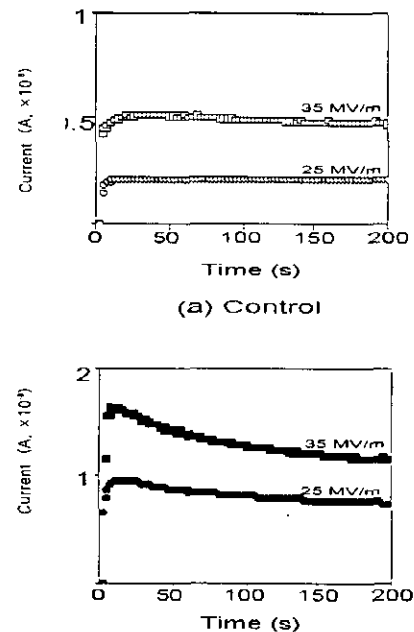


그림 4. 기준 전극시료와 계면활성제가 0.5 phr인 반도체 전극시료의 전류의 시간의존성
Fig. 4. Time dependence of XLPE with control and 0.5 phr surfactant containing semicon electrodes

을 때의 전압인가 후 시간에 따른 전류의 변화가 나와 있다. 이 실험에 사용된 XLPE와 반도전 전극은 가교후 탈기처리 하지 않은 as-cured 시료이며 이 결과는 70℃의 결과를 대 표적으로 보인 것이다. 일반적으로 전압인가 후 전류가 단조 감소하는 것이 보통이나 이 그림을 보면 시료에 전압을 가한 후 시간에 따라 전류값이 증가했다가 다시 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이 현상은 공간전하제한전도 (space charge limited conduction: SCLC) 기구를 보이는 시료에서 나타 나는 현상이다. 이때 피크전류가 보이는 시간은 전하이동도 와 관련하여 다음 식으로 표현할 수 있다.^[13]

$$\mu = 0.786 d^2 / t_0 V$$

여기에서 μ 는 전하이동도, d 는 시료두께, t_0 는 피크전류가 나타나는 시간, 그리고 V 는 인가전압을 말한다. 따라서 피크 전류를 보이는 시간을 측정하면 해당 시료의 전하이동도 (charge mobility)를 계산할 수 있다. 이 식에 따라 계산된 전하이동도가 표 1에 정리되어 있는데, 이 표를 보면 반도전 전극을 사용한 XLPE 시료의 전하이동도가 25 MV/m의 전 기장에서 대략 $10^{-14} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 값을 보이고 온도가 올라갈 수록 전하이동도가 증가함을 알 수 있다.

전기전도 기구를 밝히는 가장 간단한 방법은 전류 또는 전 류밀도와 전압 또는 전계와의 관계를 고려하는 방법이다. 일 반적으로 $\log J$ 와 $\log E$ 곡선에서 직선적인 관계를 보이면 전류밀도 J 는 전계의 n 승에 비해, 즉 $J \propto E^n$ 관계를 따른다 고 한다. 이때 $\log J$ 가 $\log E$ 에 대하여 직선적인 관계를 따 르면 이는 공간전하제한전도 (space charge limited con- duction: SCLC) 기구를 따른다고 할 수 있다. 여기에서 $n = 2$ 는 트랩이 없는 이상적인 유전체의 전기전도 (trap-free SCLC) 기구를 말하며, 유전체 내에 트랩이 존재하고 특히 고분자처럼 깊이가 다른 트랩이 분포되어 있는 경우에는 n

표 1. 25 MV/m에서 계면활성제 함량에 따른 전하 이동도
Table 1. Charge Mobility according to surfactant content

Surfactant content (phr)	Charge mobility ($\times 10^{-14} \text{ m}^2 / \text{Vs}$)
0	2.9
0.1	8.3
0.5	17.1
1.0	33.5
2.0	-

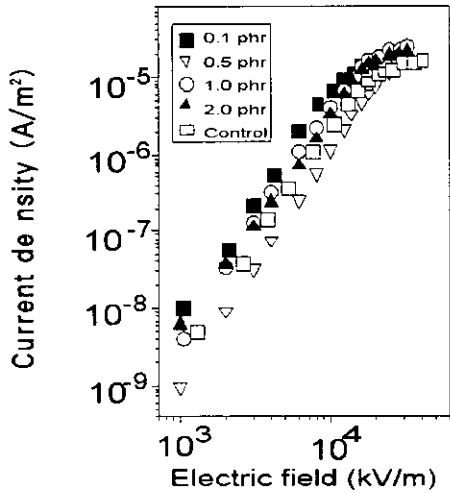
표 2. J-E곡선의 저전계 영역의 기울기
Table 2. Slopes of J-E Curves at Low Fields

Surfactant (phr)	30℃	50℃	70℃	90℃
control	3.3	3.3	3.0	3.3
0.1	4.1	4.4	4.0	2.9
0.5	4.0	3.2	3.1	3.1
1.0	3.9	3.2	3.5	3.6
2.0	3.9	3.0	3.4	3.4

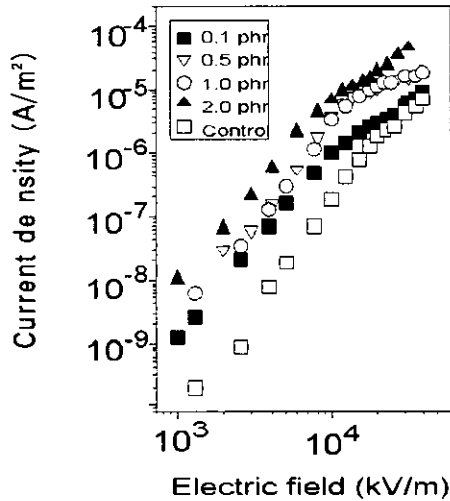
= 2-6의 값을 가져 이때를 trap-modulated SCLC 기구라 고 한다.^[14] 이때 트랩깊이의 분포가 심할수록 기울기 n 이 6 에 가까운 값을 갖는다. 따라서 그림 4에서 언급된 바 있는 피크전류의 발견과 함께 $\log J$ - $\log E$ 곡선에서의 직선관계 등의 이유로 인하여 본 시료들은 SCLC 전도기구를 따른다 고 해석할 수 있다. 본 연구에 사용된 시료의 J-E 곡선에서 직선적인 부분에 대한 기울기를 구한 후 이를 표 2에 정리하 였다.

표에 있듯이, 모든 시료는 3-6 정도의 기울기를 갖는다. 각 시료의 경우 일부 시료를 제외하면 측정온도가 올라가면 기울기가 약간씩 감소하는 경향을 보인다. 전술한 바와 같 이, 기울기가 2-6 사이의 값을 보이므로 이 시료들은 깊이가 다른 트랩이 분포되어 있는 트랩에 의해서 전도가 이루어지 는 것으로 생각할 수 있다. 반도전 전극내에 들어 있는 계면 활성제의 함량이 증가할수록 기울기가 약간 커진다.

반도전 전극의 탈기처리가 전도특성에 미치는 영향에 대한 70℃에서의 결과가 그림 5에 나와 있다. 이 실험에는 XLPE 에 들어 있는 가교부산물의 영향을 배제하기 위하여 탈기처 리된 XLPE를 사용하였다. 가교 직후 또는 탈기처리된 반도 전 전극 모두 계면활성제가 들어 있는 경우 계면활성제가 없 는 반도전 전극에 비하여 전류밀도가 높다. 특이한 현상은 탈기처리하지 않은 시료의 경우 계면활성제가 0.5 phr인 반 도전 전극을 사용할 때의 전류밀도가 가장 낮다. 탈기처리할 경우 기준시료의 전류밀도가 가장 큰 폭의 감소를 보이고 계 면활성제의 함량이 증가할수록 그 감소폭은 감소하는 것으로 관찰되었다. 표 3에 $1 \times 10^4 \text{ kV/m}$ 전계에서의 전류밀도 값 을 비교하였다. 이 표에서 보듯이 기준시료는 탈기처리에 의 하여 전류밀도값이 약 1/10 정도로 감소한 반면 이 차이는 계면활성제 함량이 증가함에 따라 감소하여 최대 전류밀도를 보이는 시료의 경우 서로 비슷한 전류밀도 값을 갖는다. 이 러한 결과로부터 반도전 전극내에 들어 있는 계면활성제 때



(a) as-cured



(b) degassed

그림 5. 반도체 전극의 탈기처리가 탈기처리된 XLPE의 J-E 곡선에 미치는 영향
Fig. 5. Effect of degassing of semicon electrodes on J-E curves of vacuum degassed XLPE

문에 XLPE의 전류밀도를 증가한 것으로 해석할 수 있다. 반도체 전극에 계면활성제가 첨가되면 전류밀도가 증가하고 전하이동도가 증가하는 현상은 반도체 전극내에 들어 있는 계면활성제에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 계면활성

표 3. 1×10^4 kV/m에서의 전류밀도
Table 3. Current Density at 1×10^4 kV/m

Surfactant content (phr)	Current density ($\times 10^{-6}$ A/m ²)	
	As-cured	Degassed
0	2.5	0.2
0.1	1.9	1.0
0.5	1.1	3.6
1.0	4.2	3.3
2.0	3.2	4.9

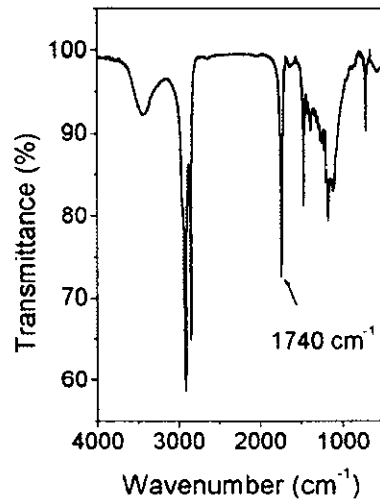


그림 6. 계면활성제의 FTIR 스펙트럼
Fig. 6. FTIR spectra of surfactant

제가 XLPE의 전기전도 특성에 미치는 영향은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 계면활성제가 XLPE로 확산이동하여 전류밀도를 증가시키는 역할을 하기 때문이고, 다른 하나는 반도체 전극에 있는 계면활성제가 전극으로부터의 전하 주입을 증가시키기 때문으로 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

반도체 전극내에 들어 있는 저분자량 성분이 XLPE 내로 확산되는 현상을 실험적으로 확인하기 위하여 계면활성제가 2.0 phr 들어 있는 반도체 재료로 전극을 만들어 이를 XLPE와 접착시킨 후 이 시료를 100℃의 열순환오븐에 넣고 일정 시간 열처리하였다. 열처리 후 시료 단면을 자른 후 XLPE에 들어 있는 계면활성제의 존재유무 및 농도를 μ -FTIR로 확인하였다. 그림 6은 본 연구에 사용된 계면활성제

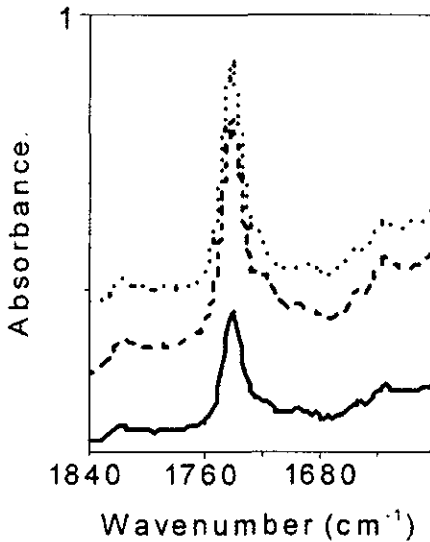


그림 7. 확산시험한 XLPE의 위치별 FTIR 스펙트럼: 반도체 전극으로부터의 거리 0.3 mm(.....), 0.6(----), 1.2 mm(—)
 Fig. 7. FTIR spectra of diffusion tested XLPE : Distanc from semicon electrode 0.3mm (.....), 0.6 mm(----), 1.2 mm(—)

의 μ -FTIR 스펙트럼을 보여 준다. 그림에서 보듯이 본 연구에서 사용한 계면활성제는 1735 cm^{-1} 영역에서 특성피크를 갖는다. 그림 7에 XLPE 내의 각 위치에서 측정된 μ -FTIR 스펙트럼을 비교하였는데, 이는 시료 두께의 영향을 고려하지 않은 결과이므로 시료 두께를 고려한 결과가 전극으로부터의 거리의 함수로 그림 8에 도시하였다. 그림 7과 8을 보면 XLPE에서 계면활성제의 특성피크가 나타남을 알 수 있고 반도체 전극으로부터 멀어질수록 계면활성제 함량이 작아짐을 알 수 있다. 중요한 것은 100°C에서 3개월 정도 열처리한 경우 계면활성제가 1 mm 두께의 XLPE를 통과할 수 있을 정도로 확산이 잘 이루어진다는 사실이다. 이들 결과는 반도체 전극내에 들어 있는 계면활성제가 XLPE 내로 충분히 확산되어 침투될 수 있음을 보여 준다.

본 연구에서는 반도체 전극내에 있던 계면활성제가 XLPE로 확산되어 XLPE의 전류밀도를 증가시킨다고 하였다. 일반적으로 XLPE 내에 저분자량 화합물이 유리상태로 존재하면 이는 전계인가시 이종전하를 형성시키는 요인으로 작용될 수 있다.

대표적인 예가 XLPE 내에 들어 있는 가교부산물의 영향이다. 가교부산물은 저분자량 화합물로서 전압인가시 분극

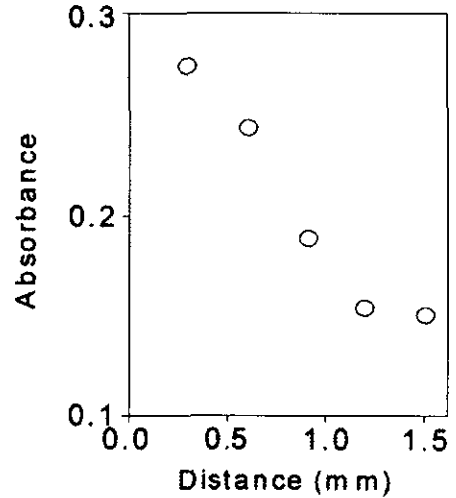


그림 8. 계면활성제의 위치별 농도
 Fig. 8. Depth profile of surfactant in XLPE

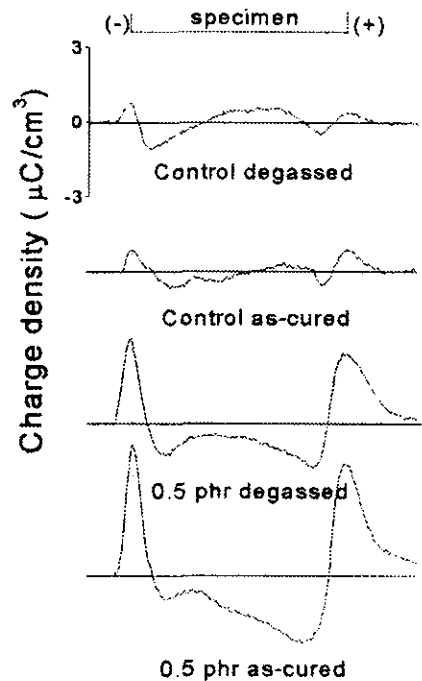


그림 9. 기준전극 및 반도체 전극 사용할 때 XLPE의 공간전하 분포
 Fig. 9. Charge distributions of XLPE with semicon electrodes

또는 상대전극쪽으로 이동하여 이종전하를 형성한다.¹⁵⁾ 이를 확인하기 위하여 계면활성제가 0.5 phr 들어 있는 반도체 전극을 이용하여 XLPE내에 축적되는 전하분포를 측정하였으며 그 결과가 그림 9에 나와 있다. 이 결과를 보면 기준전극의 경우 탈기처리시 음전극쪽의 음전하가 증가함을 알 수 있는데, 이는 기존에 발표된 바와 동일한 현상이다. 즉, 반도체 전극을 탈기처리하면 XLPE의 탈기처리와 마찬가지로 이종전하가 감소하고 동종전하가 증가하는 현상은 이미 발표된 바 있다.¹⁵⁾ 계면활성제가 0.5 phr 들어 있는 반도체 전극의 경우 시료 전반에 걸쳐 음전하가 크게 증가함을 알 수 있다. 특히 양전극쪽에 형성되는 음전하량이 크게 증가한다. 그러나 이 반도체 전극을 탈기처리하면 양전극쪽에 형성되는 음전하량이 다시 크게 감소하는 현상이 발견되었다. XLPE에 형성되는 음전하는 음전극으로부터 주입된 전자가 시료 전반에 걸쳐 트랩되기 때문이다. 이 결과로 미루어 계면활성제가 들어 있는 반도체 전극을 사용할 때 XLPE의 전류밀도가 증가하는 이유는 반도체 전극에 있는 계면활성제가 전극으로부터 전자주입을 용이하게 하여 XLPE에 많은 음전하를 형성 시키기 때문으로 설명할 수 있다. 그러나 이러한 설명은 계면활성제가 들어 있는 반도체 전극의 탈기처리의 변화를 설명하지 못한다. 이에 대하여는 깊은 연구가 필요하다.

4. 결 론

- (1) 전압인가후 시간에 따른 전도전류의 감쇄시 피크전류가 관찰되었고 J-E 곡선에서 직선적인 관계로부터 본 연구에 사용된 기준시료의 전기전도는 SCLC 기구인 것으로 해석하였다. 이때 반도체 전극에 계면활성제가 혼합되어도 전기전도기구는 변하지 않는다.
- (2) 탈기처리하지 않은 시료의 경우, 반도체 전극에 계면활성제를 첨가하면 기준 시료보다 전류밀도가 증가한다. 그러나 계면활성제 함량이 증가해도 전류밀도는 큰 차이를 보이지 않는다.
- (3) 반도체 전극을 탈기처리할 경우, 기준시료의 전류밀도는 크게 감소하는 반면 계면활성제 함량이 증가할수록 그 차이가 감소한다.
- (4) 반도체 전극에 들어 있는 계면활성제가 XLPE로 확산되어 전류밀도를 증가시킬 것으로 예상되어 μ -FTIR로 계면활성제의 확산을 확인했다. 그러나 공간전하분포 측정결과, 반도체 전극에 들어 있는 계면활성제가 음전하 주입을 용이하게하여 전류밀도를 증가시키는 것으로 해석하였다.

참 고 문 헌

- [1] F. Chapeau, C. Alquie, J. Lewiner, A. Auclair, Y. Pelet and R. Jocteur, "The Pressure Wave Propagation Method for the Analysis of Insulating Material: Application to LDPE Used in HV Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 21, pp. 405-410, 1986.
- [2] T. Ditchi, C. Alquie, J. Lewiner, E. Favrie and R. Jocteur, "Electrical Properties of Electrode/Polyethylene/Electrode Structure", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, pp. 403-408, 1989.
- [3] T. Shiono, T. Shahrzad, F. Aida and E. Hosokawa, "Improvement of Voltage Endurance by Additives in Semiconductive Shield of XLPE Cable", Technical Bulletin, Showa Wire and Cable Co., Vol. 34, pp. 59-63, 1984.
- [4] T. Okamoto, N. Hozumi, M. Ishida and T. Imazo, Development of EHV XLPE Power Cables with half Insulation Thickness, CRIEPI Report W90042, CRIEPI, Japan, 1990.
- [5] L. Gao, W. Guo, X. Qiu and H. Wang, "Study of Improvement of Withstand Strength of Polyethylene in Cables using Special Additives", Proc. Int. Symp. Electr. Insul. Matls, Nagoya, Japan, 369-372, 1993.
- [6] H. St-Onge, "Electrical Conduction In 3-Percent Carbon-Filled Polyethylene - Part II: High-field Results", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 350-358, 1980.
- [7] K. S. Suh, J. H. Nam and K. J. Lim, "Electrical Conduction in Polyetherimide", J. Appl. Phys., Vol. 80, pp. 6333-6335, 1996.
- [8] A. van Roggen, "Electronic Conduction of Polyethylene Single Crystals", Phys. Rev. Lett., Vol. 9, pp. 368-370, 1962.
- [9] S. Pelissou, H. St-Onge and M. R. Wertheimer, "Electrical Conduction of Polyethylene Below and Above Its Melting Point", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 23, pp. 325-333, 1988.

- [10] J. W. Seo, K. S. Ryoo and H. S. Lee, "Characteristics of Charge Traps and Poling Behavior of Poly(Vinylidene Fluoride)", *Bull. Korean Chem. Soc.*, Vol. 6, pp. 218-221, 1985.
- [11] G. Y. Kim and J. U. Lee, "Negative Resistance Characteristics and Oscillation Phenomena of Oriented Polypropylene Film", *Trans. KIEE*, Vol. 41, pp. 385-391, 1992.
- [12] K. S. Suh, C. R. Lee, J. S. Noh, J. Tanaka and D. H. Damon, "Electrical Conduction in Polyethylene with Semiconductive Electrodes", *IEEE Trans. Dielectrics EI*, pp. 224-230, 1994.
- [13] C. C. Ku and R. Liepins, *Electrical Properties of Polymers: Chemical Principles*, Hanser, Munich, 1987.
- [14] J. J. O'dwyer, "A Model for High Field Conduction in a Dielectric", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 21, pp. 121-127, 1986.
- [15] 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.