

## 폴리에틸렌/아이오노머 블렌드의 전기전도현상

서 광 석·노 진 서·이 창 용

고려대학교 재료공학과

(1992년 4월 25일 접수)

### Electrical Conduction of Polyethylene/Ionomer Blends

Kwang S. Suh, Jin S. Noh, and Chang R. Lee

Department of Materials Science, Korea University, Seoul, Korea

(Received April 25, 1992)

**요 약 :** 두 종류의 PE/ionomer 블렌드, 즉 PE/Surlyn 1601 블렌드 및 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전기전도 특성에 대하여 조사하였다. 조사결과, 두 블렌드의 전기전도기구는 동일하여 SCLC성 전도기구를 따른다는 사실을 알았다. 낮은 전기장에는 PE/Surlyn 1601 블렌드의 전류밀도가 상대적으로 큰 반면에 높은 전기장에서는 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전류밀도가 상대적으로 큰 것으로 밝혀졌으며, PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 ionomer 함량이 증가함에 따라 높은 전기장에서 전류밀도가 낮아지는 현상이 발견되었는데, 이러한 현상을 유효전하이동도의 차이로서 설명하였다. 이 결과들은 PE/Surlyn 1601 블렌드에서는 전하가 트랩되는 경향이 강한 반면에 PE/Surlyn 1652 블렌드에서는 전하가 호핑에 의하여 전도되는 경향이 강하다는 것을 의미하는데, 이는 ionomer에 있는 ionic cluster의 본질이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

**Abstract :** Electrical conduction characteristics of the PE/ionomer blends, i.e., PE/Surlyn 1652 blends and PE/Surlyn 1601 blends, have been investigated. It has been found that the SCLC mechanism works over the range of electric field of 10 to 400 kV/cm at several temperatures up to 100°C for both blends. Higher conduction currents at low fields and lower conduction currents at high fields have been observed in PE/Surlyn 1601 blends than in PE/Surlyn 1652 blends. In the case of PE/Surlyn 1601 blends, conduction currents decrease as the Surlyn 1601 contents increase at high fields. The two features were explained in terms of the effective charge mobility. These observations indicate that the charges tend to be trapped in PE/Surlyn 1601 blends and conducted by a hopping mechanism in PE/Surlyn 1652 blends, which can be attributed to the differences in the nature of ionic clusters in both ionomers.

### 서 론

절연체내에 축적되는 전하량이 많을 경우 전하가

국부적인 전기장의 왜곡을 유발하여 절연열화의 주요 원인이 되므로,<sup>1</sup> 절연체 내에 축적되는 전하량을 줄인다는 것은 절연체의 절연수명을 연장시킬 수 있

으므로 매우 중요한 의미를 갖는다.

최근 전력케이블의 주요 절연체인 폴리에틸렌과 다른 고분자와의 블렌드를 통하여 폴리에틸렌에 축적되는 전하량을 감소시킬 수 있다는 결과가 발표된 바 있다. 예를 들어, 폴리에틸렌에 ionomer를 혼합하면 경우에 따라 전기장의 증가에도 불구하고 전하량의 감소현상이 나타난다는 연구결과가 보고된 바 있다.<sup>2</sup> 즉, 열자격전류(TSC : Thermally Stimulated Currents)를 측정할 결과에 따르면 PE/Surlyn 1652 블렌드는 분극전기장이 증가함에 따라 TSC로서 측정된 전하량이 증가하는 반면 PE/Surlyn 1601 블렌드는 높은 전기장에서 분극전기장이 증가함에 따라 전하량이 오히려 감소하는 경향을 보인다. 또한 폴리에틸렌에 ethylene vinyl acetate(EVA)를 블렌드할 경우 EVA의 함량이 증가하면 TSC로 측정된 전하량이 감소한다는 결과가 발표된 바 있다.<sup>3</sup> 이러한 결과는 폴리에틸렌에 축적되는 전하량을 감소시키는 방법을 제공한다는 의미에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

이러한 현상에 대한 원인을 규명하기 위하여 PE/ionomer 블렌드의 전하트랩 특성 및 전하분포 특성에 대한 연구결과를 발표한 바 있다. 먼저 경우에 따라 다른 TSC 현상을 보이는 두 종류의 PE/ionomer 블렌드에 대한 전하트랩 특성에 대한 연구결과 두 종류 블렌드에서의 전하트랩 기구는 동일한 것으로 판명되었다.<sup>4</sup> 그러나 두 블렌드의 전하축적 현상은 서로 다른 것으로 나타났는데, PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 전압이 가해질때 전하가 시료의 표면 부위에 집중되어 형성되었다가 전압을 제거하면 시료의 깊은 부위로 이동하는 현상이 발견된 바 있다.<sup>5,6</sup> 이러한 결과들을 종합하면 TSC가 감소하는 이유는 주입된 전자가 시료 내에서 중화되는 것이 아니라 주입된 전자가 방전될 때 시료 내부로 이동하여 결국 TSC를 감소시키는 효과를 보인다고 할 수 있다. 이러한 현상은 결국 두 블렌드에서의 전하의 거동이 다를 수 있다는 것을 의미하므로, 위에서 언급한 현상들에 대한 원인을 전기전도특성의 측면에서 고찰할 필요가 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 두 종류의 PE/ionomer, 즉 PE/Surlyn 1601 블렌드와 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전기전도특성을 조사하였다.

## 시편제조 및 전도전류

### 시료 및 시편제조

본 연구에서는 국내 석유화학회사가 제조한 전력케이블 절연용의 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)을 사용하였다. 또한, ionomer는 미국 Du Pont사의 에틸렌계 ionomer인 Surlyn 1601과 Surlyn 1652를 사용하였는데 이들은 ethylene methacrylic acid 공중합체(EMA copolymer)를 근간으로 하고 있다. 두 ionomer에 대한 자세한 사항은 Table 1에 나와 있는 바와 같다.<sup>7</sup>

PE/ionomer 블렌드는 Wayne Machine & Die Co.사의 single screw extruder를 사용하여 180°C에서 압출하였으며, 이 블렌드를 Carver Laboratory사의 hot press를 사용하여 180°C에서 20분간 압축성형하여 두께가 약 45 $\mu$ m인 필름시편을 제조하였다. 또한 동선화학에서 제조한 전력케이블의 내부 반도전층 재료로 쓰이고 있는 반도전성 고분자를 압축성형하여 전극으로 사용하였는데, 이것은 올레핀계 고분자와 카본블랙의 혼합물로서 이 재료의 전기전도도는 0.1~0.02 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 이다.<sup>8</sup> 이때 압축성형 조건은 블렌드의 압축성형 조건과 동일한 조건을 사용하였으며 두께는 약 40 $\mu$ m이다.

### 전도전류 측정

전도전류 측정장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 전극시스템은 측정전극(measuring electrode),

Table 1. Specification of Surlyn 1601 and Surlyn 1652<sup>7</sup>

Ionomer	Ion Type <sup>1</sup>	% MAA <sup>2</sup>	% Neutralization <sup>3</sup>
Surlyn 1601	Na <sup>+</sup>	10.0	53
Surlyn 1652	Zn <sup>2+</sup>	8.7	18

<sup>1</sup>: type of cation, <sup>2</sup>: nominal % methacrylic acid,

<sup>3</sup>: approximate % neutralization

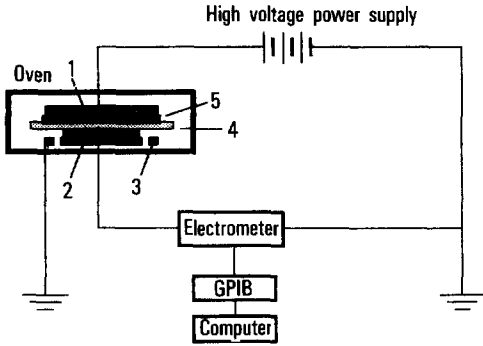


Fig. 1. Schematic diagram of the instrument to measure the charging current ; 1 : counter electrode, 2 : measuring electrode, 3 : guard ring, 4 : specimen, 5 : semiconductive film.

상대전극(counter electrode) 및 guard ring으로 구성되어 있으며 이들은 stainless steel로 제작하였다. 여기에서, guard ring은 edge effect를 방지하기 위하여 사용하였으며, guard ring과 측정전극 사이에 teflon 수지를 사용하여 전기적으로 절연하였다. 이때 측정전극의 면적은 6.20 cm<sup>2</sup>이다. Electrometer에서 측정되는 전류값은 GPIB를 통해 computer로 전송되어 매 10초마다 화면에 나타내도록 하였으며 30분이 경과한 후의 전류치를 정상상태의 전도전류(steady state conduction current)로 하였다.<sup>9</sup>

### 실험결과 및 고찰

#### LDPE

반도전성 전극을 사용한 LDPE의 전류밀도-전기장(J-E) 특성곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 전류밀도는 전기장과 측정온도의 증가에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 전기장에 따른 전류밀도의 변화가 전체적으로는 비직선적으로 나타나나 대략 직선적인 관계를 보이는 두 개의 영역으로 구분할 수 있다. 이때 낮은 전기장 영역에서의 기울기는 약 1이고 높은 전기장 영역에서의 기울기는 약 2이다. 온도가 증가함에 따라 두 영역의 분리현상은 보다 뚜렷히 나타난다.

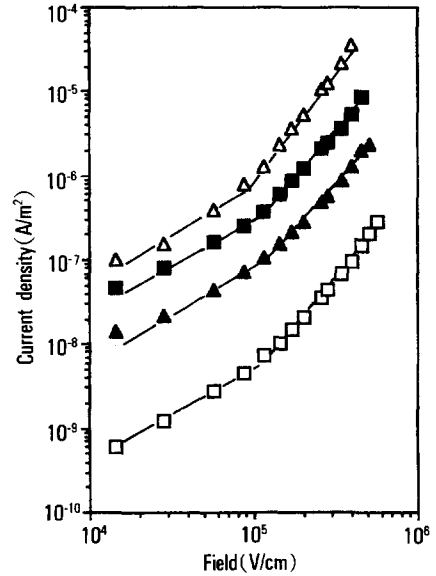


Fig. 2. J-E curves of LDPE : Test temperature : 20°C (□), 50°C(▲), 70°C(■), 90°C(△).

전기전도특성의 분석은 전도전류(또는 전류밀도)와 전압(또는 전기장)과의 관계로부터 시작한다.<sup>10</sup> 즉,  $J \propto E^n$ 의 관계에서  $n=1$ 이면 ohmic성 전도를 의미하고  $n=2$  이면 SCLC성 전도(공간전하제한전도)를 의미한다. 따라서 Fig. 2에 나와 있는 J-E 특성곡선으로부터 LDPE는 낮은 전기장에서는 ohmic성 전도가 그리고 높은 전기장에서는 SCLC성 전도가 주된 전도기구인 것으로 보인다. 이는 이미 발표된 결과와 일치한다.<sup>11,12</sup>

#### PE/Ionomer 블렌드

Fig. 3에 두 종류의 PE/ionomer 블렌드, 즉 PE/Surlyn 1601 블렌드와 PE/Surlyn 1652 블렌드의 대표적인 J-E 특성곡선이 나와 있다. Fig. 3에서 전기장과 온도가 증가함에 따라 전류밀도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 J-E 특성곡선은 대략 세 구간으로 나눌 수가 있으며 이런 현상은 PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 온도가 올라갈수록 점차 뚜렷해짐을 알 수 있다. J-E 곡선에서의 기울기의 감소현상은 PE/Surlyn 1652 블렌드의 경우에는 그다지 심하지 않은 것으로 관찰되었다. 90°C의 결과에 대하여

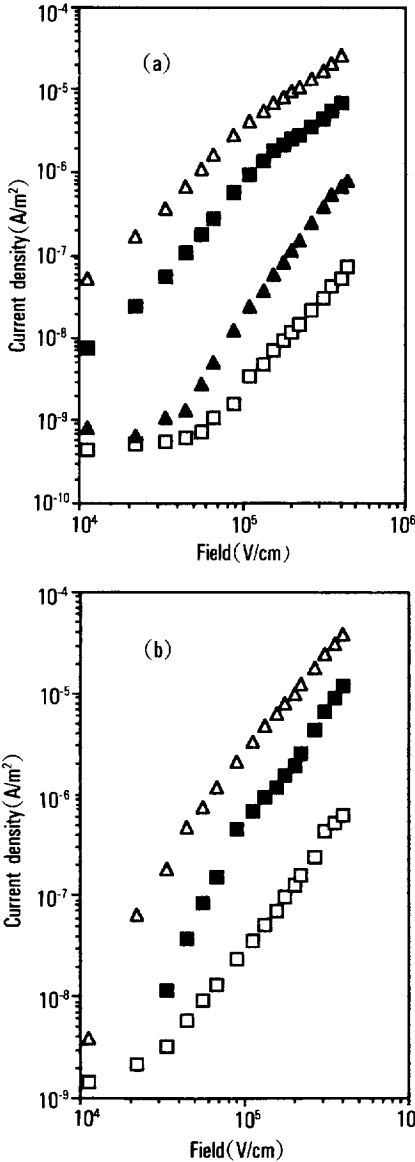


Fig. 3. J-E curves of PE/ionomer blends : (a) PE/Surlyn 1601(97/3) : 25°C(□), 50°C(▲), 75°C(■), 90°C(△), (b) PE/Surlyn 1652(93/7) : 50°C(□), 75°C(■), 90°C(△).

얻은 각 구역에서의 기울기를 Table 2에 정리하였다.

먼저 PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우, I구역은 1.5에서 2 사이의 값을 가지며, II구역에서는 전류밀도

Table 2. Slopes in Each Region for PE/Ionomer Blends(90°C)

PE/Ionomer (wt %)	PE/Surlyn 1601			PE/Surlyn 1652		
	I	II	III	I	II	III
97/3	1.96	1.24	1.54	2.16	1.72	2.54
93/7	1.63	1.23	1.54	3.45	1.95	—
90/10	1.62	0.97	1.22	3.19	2.78	—
85/15	1.55	1.09	1.47	3.65	2.21	—

증가율이 둔화현상이 나타나고, 그리고 III구역에서 다시 증가율이 회복되나 I구역에서의 값에는 미치지 못한다. PE/Surlyn 1652 블렌드의 경우 PE/Surlyn 1601 블렌드에서의 기울기보다는 큰 1.7~3.7 정도의 값을 갖는다.

PE/ionomer의 경우, Fig. 3에 나와 있는 바와 같이, 몇 개의 구역으로 나뉘어지기는 하지만 각 구역에서의 전류밀도는 전기장에 대하여 직선적인 관계를 갖는다고 할 수 있으므로 SCLC성 전도가 주된 전도기구인 것으로 보인다. 또한 SCLC성 전도기구는 전류밀도의 시료두께 의존성으로서 확인할 수 있는데<sup>13</sup> 두 블렌드에 대한 전류밀도의 시료두께 의존성이 Fig. 4에 나와 있다. Fig. 4에 나와 있는 바와 같이 두 종류의 블렌드 모두 전류밀도가 시료두께에 대하여 대략 -3승 관계가 성립되는 것을 알 수 있다. 따라서 두 종류의 블렌드의 전기전도기구는 비록 J-E 곡선상의 기울기의 감소현상이 일어나기는 하지만 본 연구에서 선택한 전기장 범위와 ionomer 함량 범위 내에서는 전체적으로 SCLC성 전도를 따르는 것으로 생각된다.

두 블렌드의 J-E 곡선상의 기울기가 서로 달라 두 블렌드의 전류밀도의 크기는 전기장 영역에 따라 서로 다른데 이를 Fig. 5에 비교하였다. Fig. 5에 있는 바와 같이, 이 블렌드의 경우 낮은 전기장(약 100 kV/cm 이하)에서는 PE/Surlyn 1601 블렌드의 전류밀도가 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전류밀도보다 높은 반면 약 100 kV/cm 보다 높은 전기장에서는 이와는 반대로 PE/Surlyn 1601 블렌드의 전류밀도가 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전류밀도보다 낮은 값을

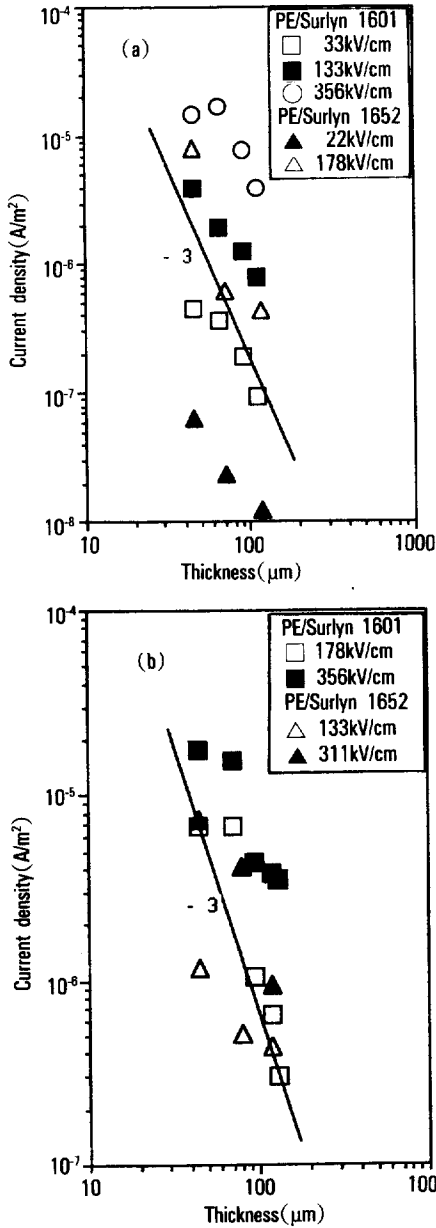


Fig. 4. Thickness dependence of current density of PE/ionomer blends : (a) Ionomer contents : 7%, (b) Ionomer contents : 15%.

갖는다. 이 교차점은 Table 3에 나와 있는 바와 같이 측정온도가 높을수록 그리고 ionomer의 함량이 클수록 높은 전기장에서 나타나는 것으로 관찰되었다.

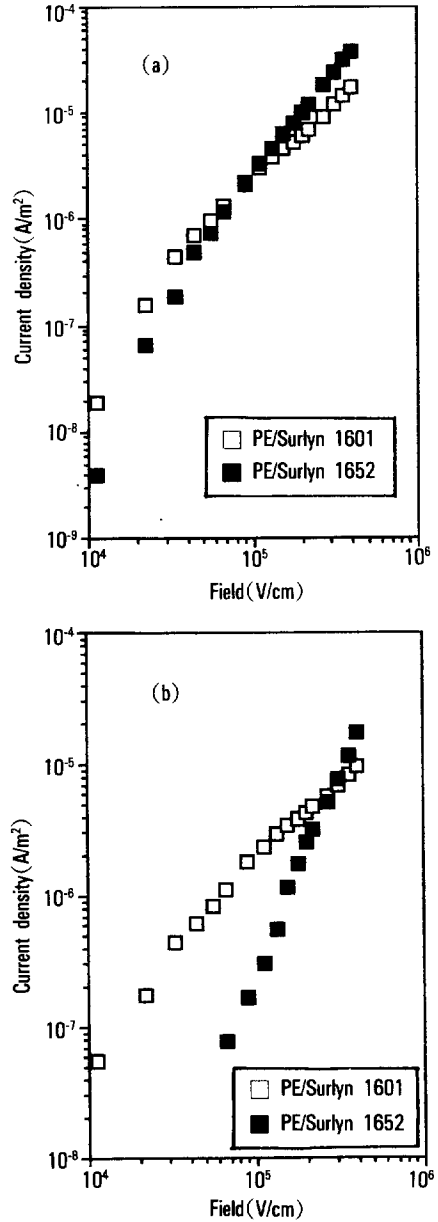


Fig. 5. Comparison of J-E characteristic curves of PE/ionomer blends at 90°C : (a) Ionomer contents : 7%, (b) Ionomer contents : 10%.

이러한 현상을 설명하기 위하여 두 블렌드에 대하여 유효전하이동도(effective charge mobility)를 SCLC성 전도의 대표적인 관계식인 Child law를 이

**Table 3.** Intersection Field

	(kV/cm)		
	Ionomer contents(wt%)		
	7	10	15
75°C	200	400	550
90°C	100	300	500

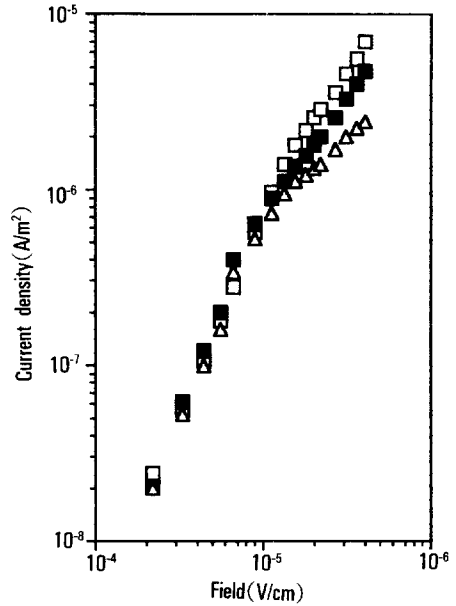
**Table 4.** Effective Charge Mobility at 90°C of PE/Ionomer Blends

Ionomer (%)	(Unit : m <sup>2</sup> /Vs)			
	PE/Surlyn 1601		PE/Surlyn 1652	
	Low field	High field	Low field	High field
3	7.69 × 10 <sup>-14</sup>	2.83 × 10 <sup>-14</sup>	2.60 × 10 <sup>-14</sup>	3.09 × 10 <sup>-14</sup>
7	5.78 × 10 <sup>-14</sup>	1.98 × 10 <sup>-14</sup>	5.32 × 10 <sup>-14</sup>	5.00 × 10 <sup>-14</sup>
10	4.98 × 10 <sup>-14</sup>	9.16 × 10 <sup>-15</sup>	1.75 × 10 <sup>-14</sup>	1.86 × 10 <sup>-14</sup>

용하여 계산하였으며<sup>13</sup> 이를 Table 4에 정리하였다.

Table 4를 보면 먼저 두 블렌드는 약 10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>/Vs 정도의 유효전하이동도를 가지며 PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 낮은 전기장 영역에서 오히려 높은 유효전하이동도를 가지는 반면, PE/Surlyn 1652 블렌드의 경우에는 전 전기장 범위에서 서로 비슷한 유효전하이동도를 갖는 것으로 보인다. 또한 ionomer의 함량이 증가할수록 유효전하이동도의 변화는 블렌드의 종류에 따라 다른 것으로 보인다. 즉, PE/Surlyn 1601 블렌드에서는 ionomer의 함량이 증가할수록 유효전하이동도가 낮아지는 경향이 뚜렷하나, PE/Surlyn 1652 블렌드에서는 ionomer 함량에 따른 변화를 일률적으로 언급하기 어려울 정도로 결과의 산란이 심하였다. 그러나 3%와 10%를 비교하면 PE/Surlyn 1601 블렌드에서의 변화가 PE/Surlyn 1652 블렌드에 비하여 약간 더 심하다고 할 수 있다.

유효전하이동도가 낮다는 것은 전하가 시료내에서 움직이기 어렵다는 것을 의미하므로 유효전하이동도가 낮을 경우에는 동일한 조건에서 전류밀도가 상대적으로 작을 것이라고 생각할 수 있다. 따라서 Fig. 5에 나와 있는 바와 같이 낮은 전기장에서는 PE/Surlyn 1601 블렌드의 유효전하이동도가 크므로 이 블



**Fig. 6.** J-E curves of PE/Surlyn 1601 blends at 75°C : Surlyn 1601 contents : 3% (□), 7% (■), 10% (△).

렌드의 전류밀도가 PE/Surlyn 1652 블렌드에 비하여 상대적으로 높으며, 반대로 높은 전기장에서는 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전하이동도가 높으므로 PE/Surlyn 1601 블렌드의 전류밀도는 상대적으로 낮을 것이다.

Fig. 6에 PE/Surlyn 1601 블렌드에서 Surlyn 1601의 함량에 따른 J-E 특성곡선을 서로 비교하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 낮은 전기장 영역에서는 Surlyn 1601의 함량에 관계없이 서로 비슷한 변화를 보이다가 높은 전기장에서는 Surlyn 1601의 함량이 증가하면 전류밀도는 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 이러한 결과도 Fig. 5의 경우와 마찬가지로 설명될 수 있을 것으로 생각된다. 즉, PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 Table 4에 나와 있는 바와 같이 ionomer의 함량이 증가할수록 높은 전기장 영역에서의 유효전하이동도가 감소하기 때문에 ionomer의 함량이 증가할수록 전류밀도가 감소하는 것으로 생각된다.

## 고 찰

본 연구를 통하여 PE/ionomer 블렌드의 전기전도 특성에 있어서 전기전도기구는 두 블렌드 모두 SCLC성 전도를 따르는 것으로 밝혀졌고 유효전하이동도는 경우에 따라 다른 것으로 밝혀졌다. 특히 낮은 전기장 영역에서는 PE/Surlyn 1601 블렌드의 유효전하이동도가 높고 높은 전기장 영역에서는 PE/Surlyn 1652 블렌드의 유효전하이동도가 높다. 이러한 유효전하이동도의 차이 때문에 낮은 전기장 영역에서는 PE/Surlyn 1601의 전류밀도가 높고 높은 전기장 영역에서는 PE/Surlyn 1652의 전류밀도가 높은 것으로 생각된다.

본 연구에서는 동일한 반도체성 재료를 전극으로 사용하였으며 두 블렌드의 일함수 (work function)의 크기도 서로 비슷할 것으로 생각되므로 동일한 전기장에서 전극으로부터 주입되는 전하량은 서로 비슷할 것이다. 그러나 앞서서도 언급한 바와 같이 전기장 영역에 따라 서로 다른 전기전도특성, 특히 유효전하이동도의 변화양상이 전기장 영역에 따라 다른 것은 두 블렌드에 섞여 있는 ionomer가 전하에 대하여 반응하는 양상이 다르기 때문인 것으로 보인다. 그러나, 본 연구에서 얻은 전기전도에 관한 결과를 종합하면 Surlyn 1601은 전하를 트랩하는 작용이 강하고 Surlyn 1652는 전하의 이동을 도우는 호핑자리로서의 역할이 강하다고 할 수 있다. 이러한 설명은 본 연구자들이 이미 발표한 바 있는 전하분포특성에서도 관찰된 바 있다.<sup>5,6</sup>

본 연구에 사용된 Surlyn계 ionomer는 EMA 공중합체로 되어 있으며 이 공중합체의 산성분이 부분적으로 금속양이온으로 치환된 고분자로서 이에 대한 기계적, 유변학적, 열적성질에 대한 연구는 많이 이루어져 있다.<sup>14</sup> 이 ionomer는 Table 1에 나와 있는 바와 같이 EMA 공중합체로서 MAA%, 중성화도 및 이온의 종류 등에 있어서 차이가 나는데 이들 중에서 금속양이온은 ionic cluster를 형성시키는데 모두 사용되므로 자유이온 (free ion)의 형태로 존재하지 못하기 때문에 이들이 전기전도 특성에 직접적인 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

Ionomer의 화학적 특성을 보면 두 ionomer가 동일한 종류의 comonomer인 MAA를 거의 비슷한 함량을(10% vs. 8.7%) 가지고 있기 때문에 카보닐기의 경우 Surlyn 1652나 Surlyn 1601 모두 동일한 종류의 카보닐이 존재하며 농도는 Surlyn 1601의 경우 약간 높을 것이다. 카보닐기가 전하와 어떤 작용을 한다면 이는 두 ionomer에 있어서 동일할 것이므로 카보닐 농도의 차이는 두 블렌드의 전기전도특성의 차이를 설명하지 못하는 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용한 ionomer의 경우 서로 다른 종류의 금속양이온을 사용했고 또한 중화도가 다르기 때문에 두 ionomer 내에 있는 ionic cluster의 본질은 다를 수 있으며 이러한 차이로 인하여 본 연구에서 사용된 두 PE/ionomer 블렌드의 전기전도특성이 다른 것으로 보인다. 그러나 두 ionomer를 이루는 ionic cluster의 본질과 이들이 전기적 특성에 미치는 영향 등에 대한 정보가 없으므로 더 이상의 설명은 어려운 것으로 생각된다.

이상의 연구결과와 고찰된 내용을 종합하면 두 종류의 PE/ionomer 블렌드의 TSC 특성이 서로 다르게 나온 이유는 이 블렌드를 이루는 ionomer에 존재하는 ionic cluster의 본질이 달라 Surlyn 1601은 전하를 트랩하는 역할을 하고 Surlyn 1652는 전하를 호핑시키는 역할을 하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 작용 때문에 두 블렌드의 전기전도 특성이 다르며 또한 전하축적특성도 다른 것으로 생각된다. 그러나 전기전도특성 자체로는 높은 분극전기장에서 TSC의 피크최대값이 감소하는 이유를 설명할 수 없는 것으로 보인다.

## 결 론

두 종류의 PE/ionomer 블렌드, 즉 PE/Surlyn 1601 블렌드 및 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전기전도 특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 사실을 알았다.

1. 두 블렌드의 전기전도기구는 동일하여 SCLC성 전도기구를 따른다.

2. 낮은 전기장에는 PE/Surlyn 1601 블렌드의 전류밀도가 상대적으로 큰 반면에 높은 전기장에서는 PE/Surlyn 1652 블렌드의 전류밀도가 상대적으로 큰 것으로 밝혀졌다.

3. PE/Surlyn 1601 블렌드의 경우 ionomer 함량이 증가함에 따라 높은 전기장에서 전류밀도가 낮아지는 현상이 발견되었다.

4. 이 두 현상을 유효전하이동도의 변화로서 설명하였으며 유효전하이동도의 차이는 ionomer내에 있는 ionic cluster의 본질의 차이 때문인 것으로 보인다.

5. 이들로부터 PE/Surlyn 1601 블렌드에서는 전하가 트랩되는 경향이 강한 반면에 PE/Surlyn 1652 블렌드에서는 전하가 호핑에 의하여 전도되는 경향이 강한 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구의 일부는 한국과학재단(신진연구 : 903-0307-005-2)의 후원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. R. Bartnikas and K. D. Srivastava, *Power Cable Engineering*, Stanford Educational Press, Waterloo, 1987.
2. K. S. Suh, J. Tanaka, and D. H. Damon, *Trans. KIEE*, **40**, 808 (1991).
3. S. H. Kook, J. S. Park, Y. C. Kang, and Y. S. Kwon, *Trans. KIEE*, **41**, 185 (1992).
4. K. S. Suh, E. J. Kim, J. Tanaka, and D. H. Damon, *Polymer(Korea)*, **16**, 145 (1992).
5. S. J. Hwang and K. S. Suh, *Polymer(Korea)*, **16**, 580 (1992).
6. K. S. Suh, S. J. Hwang, and T. Takada, *CEIDP '92*, 136 (1992).
7. EPRI Report, EPRI EL-6977, 1990.
8. Dong Seon Material Co., Ltd., Product Catalog.
9. C. R. Lee, *Effects of Conditions of Semiconductive Electrode on Electrical Conduction Characteristics of XLPE*, M. S. Thesis, Korea University, 1991.
10. J. J. O'Dwyer, *The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Oxford University Press, Oxford, 1973.
11. H. St-Onge, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-11**, **20** (1976)
12. H. St-Onge, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-15**, **350** (1980).
13. M. A. Lampert and P. Mark, *Current Injection in Solids*, Academic Press, New York and London, 1970.
14. R. Longworth, *Ionic Polymers*, Edt. by L. Holliday, John Wiley & Sons, New York Toronto, 1975, Chapter 2.