

방사선 조사 환경에 의한 에틸렌 프로필렌 고무의  
전기 특성에 관한 연구

A Study of the Irradiation Environment Effects  
on the Electrical Properties of Ethylene  
Propylene Rubber

이 성 일

Lee, Sung - Ill

**Abstract**

The charge and discharge current in EPR(Ethylene Propylene Rubber), which were irradiated with the radiant capacity of 0~600 [kgy/h], have been measured in order to investigate the influence of the atmosphere (oxygen, air and vacuum) on electrical properties

It has been shown that the charge and discharge current increase as the amount of radiant capacity increases in air and vacuum atmosphere. This electrical property degradation can be speculated due to that the C=O radicals or impurities, which comes from during shaping process, may act as dipoles.

On the other hand, the charge and discharge current are shown to be higher in the amount of 1[kgy/h] than these in 10[kgy/h] in air atmosphere, because the charge and discharge current can be increased as the exposure time is extended with slower rate.

Under the same amount of irradiation, the charge and discharge current in oxygen atmosphere are shown to be higher than those in vacuum. This is possibly due to that the main chain can be broken by oxidation when it is exposed to the  $\gamma$ -rays.

1. 서론

최근 원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 안전보호 계통으로 사용되는 전선 및 케이블류는 끊임없이 방사선에 조사되어 열화하게 되며, 사십여년의 발전소 수명이 다 하였을 때 냉각제 상실사고와 같은 중대한 사고가 일어나도 그 기능에 이상이 없는 높은 안전성과 신뢰성이 요구되고 있다.<sup>1,2)</sup>

또한 전선·케이블류의 절연파괴에 의한 사고를 미연에 방지하고 이들의 신뢰성을 높일 필요가 있다. 또한, 원자로 격납용기내에 설치되어 있는 에틸렌 프로필렌 고무(EPR;Ethylene Propylene Rubber)<sup>3,4)</sup>케이블은 절연파괴를 방지하기 위해 기계적 강도에 대해서는 충분히 고려하여 만들고 있지만 전기적 특성에 대해서는 충분치 않다. 본 연구에서는 산소, 진공 및 공기 등의 방사선 조사 환경<sup>5)</sup>안에서 0~600[kgy/h]의 방사선으로 조사된 EPR 시료를, 비파괴적 진단 방법인 충전 및 방전전류를 측정하고, 그 결과로부터 EPR의 절연열화 특성이 조사환경 및 조사량에 의해 어떻게 영향을 받는지를 검토했다<sup>6~8)</sup>.

## 2. 시료 및 측정방법

본 연구에서는 전력케이블에 많이 사용되고 있는 배합비가 EPT 100[Phr], Talc 100[Phr], TAIC 1.5[Phr], NonflexRD 1.5[Phr], Stearic Acid 1.5[Phr]에 가교제인 DCP(Dicumyl Peroxide) 3.0[Phr]로 170[℃]에서 10[min] 동안 가교시킨 에틸렌 프로필렌 고무(Ethylene과 Propylene의 배합비가 1대 1)의 두께1[mm]인 시이트를 제작하였으며, 각종 환경 속에서 방사선을 조사시킨 시료 양면의 같은 위치에 지름 60[mm∅]의 크기로 금증착한 후 그 위에 Al Foil 전극을 사용했다. Table.1에 방사선의 조사환경과 조사량과의 관계를 나타내었다.

Table.1 Conditation of Irrdiated Diagnosis on EPR

조사량 \ 조사 환경	100[kgy]	200[kgy]	400[kgy]	600[kgy]
산소중 조사	○	○	○	○
진공중 조사	○	○	○	○
공기중조사[1kgy/hr]		○	○	
공기중조사[10kgy/hr]		○	○	

또한 측정에 사용한 기기는 직류전원(일;Kawaguti Electric Works, Model V-710), 펜-레코다(일; Graphteccorp, Servo Coder Type SR 6341), 일렉트로미터(일;Takede Riken Industry Co, TR 8651), 진공펌프, 진공플랜지를 사용하였으며, Fig.1에 충전전류의 측정회로도도 나타내었으며. 충전전류는 우선 시료를 진공플랜지 내에 셋트한 후 진공펌프로 진공시킨 후 SW1, SW2를 각각 A1, A2에 연결하여 30분 동안 접지했다. 그 후 SW2를 B2 측으로 하여 -500[V]를 인가하여 120분간 충전전류를 측정하

었다. 또한 방전전류는 120분 정각에 SW1을 A1으로 연결하여 60분 동안 측정하였다.

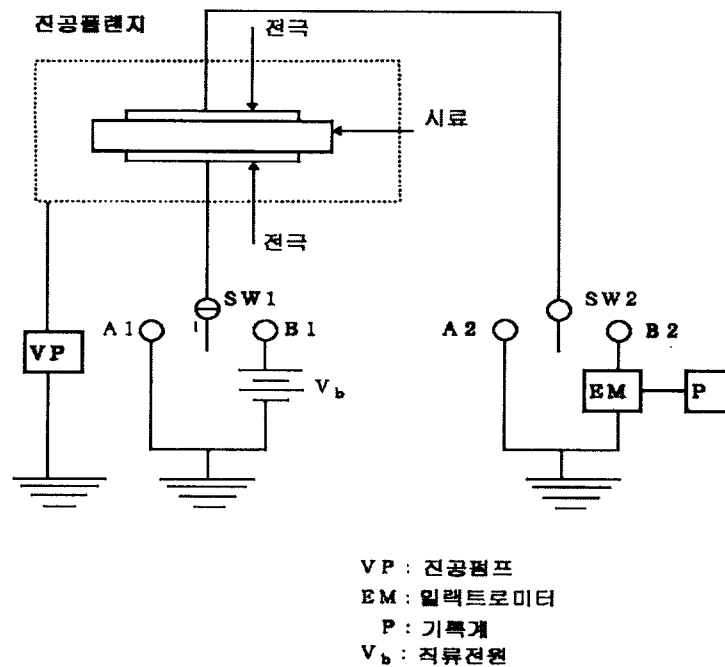


Fig.1 measuring apparatus

### 3. 결과 및 검토

방사선 조사량의 변화에 대한 EPR의 산소중, 진공중, 공기중 등의 방사선 조사환경<sup>5)</sup>이 전기특성에 어떠한 영향을 미치는지 충전전류와 방전전류 측정하여 검토하였다.

#### 3.1 산소중 조사에서의 조사량의 영향

Fig.2는 산소중에서 방사선을 0~600[kgy/h] 조사한 시료의 충전전류를 측정한 결과이며, Fig.3은 동일한 조건에서 방전전류를 측정한 결과이다. 또한 Fig.4 에 EPR의 분자구조<sup>3,4)</sup>를 나타내었다.

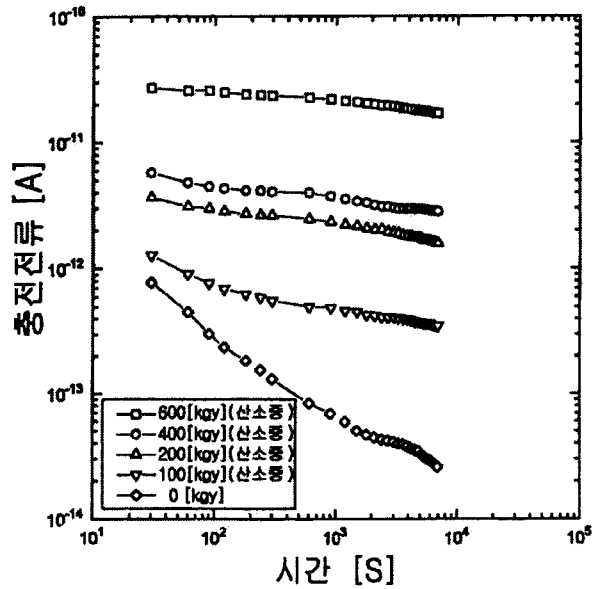


Fig.2 The properties of charge current on time according to irradiation of radial rays in oxygen environment of EPR

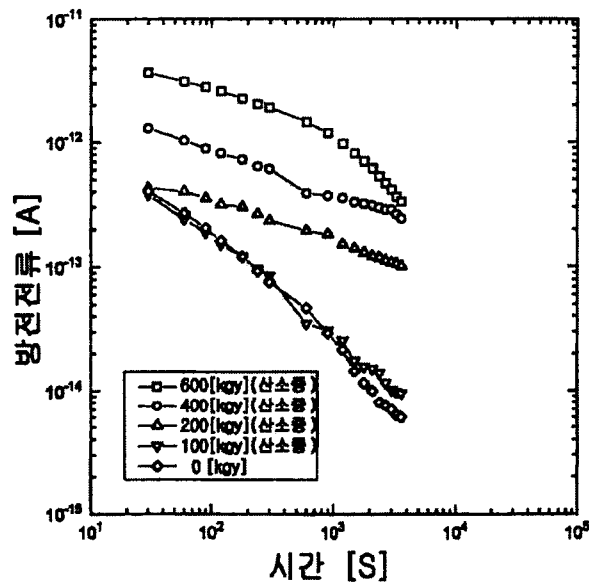


Fig.3 The properties of discharge current on time according to irradiation of radial rays in oxygen environment of EPR

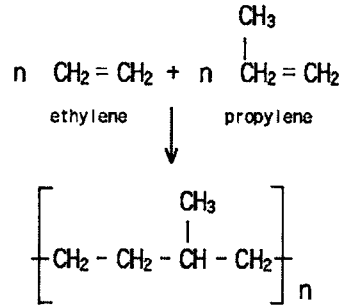


Fig.4 Chemical structure of EPR

Fig.2에서 -500[V]의 직류전압을 인가 후 산소중 방사선을 조사한 시료의 30[sec] 경과시의 충전전류는  $1.2 \sim 2.92 \times 10^{-12}$ [A] 정도이나 2시간이 경과했을 때는  $3.2 \sim 2.1 \times 10^{-13}$ [A] 정도로 감소의 비율이 작으나 미조사(0[kgy])한 것은 30[sec] 경과시의 충전전류는  $2.79 \times 10^{-13}$ [A] 정도이나 2시간이 경과했을 때는  $2.8 \times 10^{-14}$ [A] 정도로 감소가 크게 나타남을 알 수 있다. Fig.3에서 산소중 방사선을 조사한 시료의 30[sec] 경과시의 방전전류는  $3.7 \times 10^{-12} \sim 3.5 \times 10^{-11}$ [A] 정도이나 60분이 경과했을 때는  $2.9 \times 10^{-14} \sim 3.8 \times 10^{-12}$ [A] 정도로 감소의 비율이 작으나 미조사(0[kgy])한 것은 30[sec] 경과시의 충전전류는  $3.72 \times 10^{-12}$ [A] 정도이나 60분이 경과했을 때는  $5.4 \times 10^{-14}$ [A] 정도로 감소가 크게 일어난 것을 알 수 있다.

충전전류는 변위전류와 흡수전류 그리고 누설전류와의 합이다. -500[V]의 직류전압을 인가 후 30초에서 120분 정도에 걸쳐서 시간과 더불어 감소하는 흡수전류는 특히 EPR 시료에 100~600[kgy]의 방사선이  $\gamma$ 선 조사를 하면 조사될 경우 분자쇄 절단 반응이 작용하여 열화하게 되며, 이때 발생한 "C=O"기 및 성형 가공시 혼입 첨가되는 불순물 등이 쌍극자로 작용하여 전기적 특성을 저하시키기 때문으로 사료된다. 이 영향으로 방사선 조사량이 600[kgy], 400[kgy], 200[kgy], 100[kgy]의 순서로 큰 누설전류가 흐르게 되는데 2시간이 경과후 충전전류가 더욱 감소하고 있는 것으로 보아 이 측 정시간으로는 짧으며, 보다 오랜 시간동안 측정하므로써 누설전류 성분을 측정할 수 있다고 생각된다. 또, 조사량이 클수록 충전전류 및 방전전류가 모두 증가함을 나타내고 있는데 이는 방사선의 조사량이 클수록 더 많은 열화가 일어났기 때문으로 사료된다.

### 3.2 진공중에서의 방사선 조사량의 영향

Fig.4는 진공중에서 방사선을 0~600[kgy] 조사한 시료의 충전전류를 측정한 결과이며, Fig.5는 동일한 조건에서 방전전류를 측정한 결과이다. Fig.4에서 -500[V]의 직류

전압을 인가 후 진공중 방사선을 조사한 시료의 30[sec] 경과시의 0~400[kgy]의 충전전류는  $5.78 \times 10^{-12} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ [A] 정도이나 5분이 경과했을 때는  $1.12 \times 10^{-12} \sim 1.2 \times 10^{-12}$ [A] 정도로 거의 차가 없으나 2시간이 되었을 경우  $1.6 \times 10^{-13} \sim 6.4 \times 10^{-13}$ [A] 정도로 감소의 차가 작으면서 방사선 조사량이 큰 만큼 큰 충전전류가 흐르고 있다.

600[kgy]의 조사를 받은 시료의 30[sec] 경과시의 충전전류는  $1.1 \times 10^{-11} \sim 1.2 \times 10^{-12}$ [A] 정도로 전류값의 차가 없이 감소하고 있으며, Fig.5에서 진공중 방사선을 조사한 시료의 30[sec] 경과시의 방전전류는  $9.3 \times 10^{-13} \sim 4.8 \times 10^{-12}$ [A] 정도로 전류값의 차가 거의 없이 감소하며 60분이 경과했을 때는  $6 \times 10^{-14} \sim 1.4 \times 10^{-13}$ [A] 정도로 전류값이 감소해 있다. 진공중에서 EPR에  $\gamma$ 선 조사를 하면 방사선 조사에 의하여 측쇄결합이 절단되어 평균분자량의 저하와 그것에 따라 점도의 저하 및 기계적 성질의 열화도 일어난다고 생각된다. 가교가 진행됨에 따라 분자간의 가교가 증가하며, 연이어 3차원 망목구조의 고분자로 되어 용점이 상승하며, 또 용매에 불필요한 겔로 된다. 또, 진공중에서 선량율은 강도, 신장 등 어느 것에도 영향을 받지 아니하며 열화는 주로 방사선량의 크기에 의존한다고 사료된다.

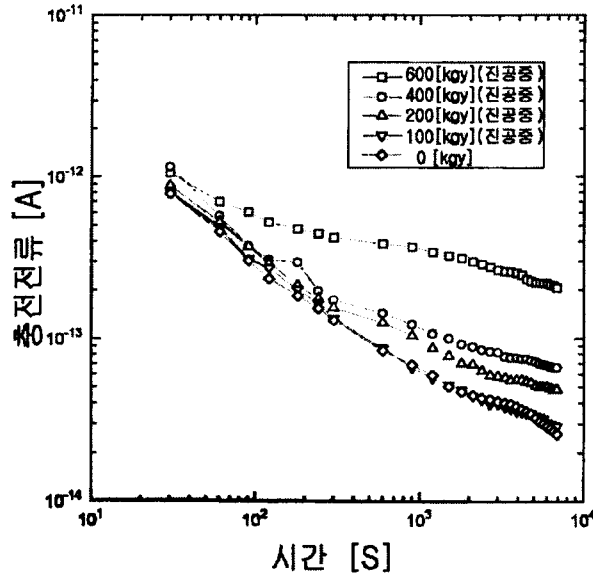


Fig.5 The properties of charge current on time according to irradiation of radial rays in vacuum environment of EPR

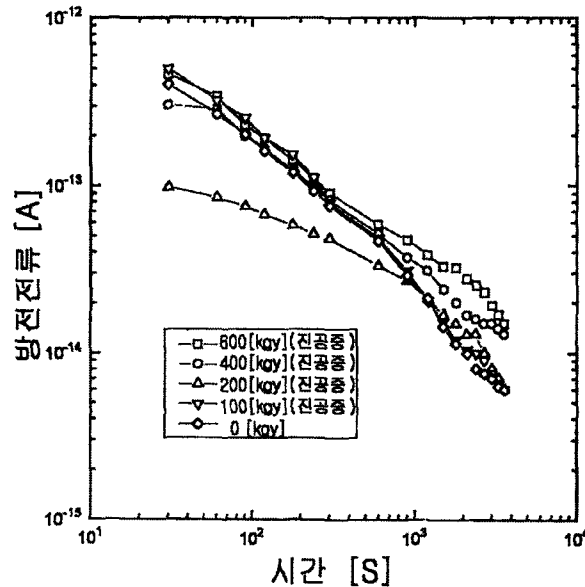


Fig.6 The properties of discharge current on time according to irradiation of radial rays in vacuum environment of EPR

### 3.3 공기중 조사에서의 조사량의 영향

Fig.6은 공기중, 10[kgy/h]에서 400[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류는 30[sec] 경과시  $7.2 \times 10^{11}$ [A] 정도이나 2시간이 되었을 경우  $2.3 \times 10^{11}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 서서히 감소하며, 200[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류는  $1.5 \times 10^{11}$ [A] 정도이나 시간과 더불어 감소하다 2시간이 경과한 경우  $2.4 \times 10^{12}$ [A] 정도 흐르고 있다. Fig.7은 동일한 조건에서 400[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 방전전류는 30[sec] 경과시  $8.8 \times 10^{12}$ [A] 정도이나 60분이 되었을 경우  $1.7 \times 10^{12}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 서서히 감소하며, 200[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 방전전류는 30[sec] 경과시  $4.2 \times 10^{12}$ [A] 정도이나 시간과 더불어 감소하다 60분이 경과한 경우  $1.1 \times 10^{13}$ [A] 정도 흐르고 있다. 또한, Fig.8은 공기중, 1[kgy/h]에서 400[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류는 30[sec] 경과시  $4.0 \times 10^{10}$ [A] 정도이나 2시간이 되었을 경우  $2.65 \times 10^{11}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 서서히 감소하며, 200[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류는  $9.3 \times 10^{11}$ [A] 정도이나 시간과 더불어 감소하다 2시간이 경과한 경우  $5.3 \times 10^{11}$ [A] 정도 흐르고 있다. Fig.9는 동일한 조건에서 400[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 방전전류는 30[sec] 경과시  $4.3 \times 10^{11}$ [A] 정도이나 60분이 되었을 경우  $2.8 \times 10^{12}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 서서히 감소하며, 200[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류는  $1.2 \times 10^{12}$ [A] 정도이나 시간과 더불어

어 감소하다 60분이 경과한 경우  $1.8 \times 10^{-12}$ [A] 정도 흐르고 있다. 충전전류도 방전전류도 시간과 더불어 감소한다. 10[kGy/h], 1[kGy/h]로 조사한 시료 모두 조사량이 큰 만큼 충전전류도 방전전류도 모두 증가하고 있다. 이는 공기중, EPR의 방사선에 의한 열화는 자동산화 과정으로부터 분자상 산소가 큰 전자친화력을 갖고 있기 때문에 방사선 조사를 받았을 때 발생한 전자를 받아들여  $O_2^-$ 로 된다.  $O_2^-$ 는  $HO_2$ 의 음이온이며, 수용액에서는 고분자의 주쇄절단을 일으키기 때문이라 사료된다.

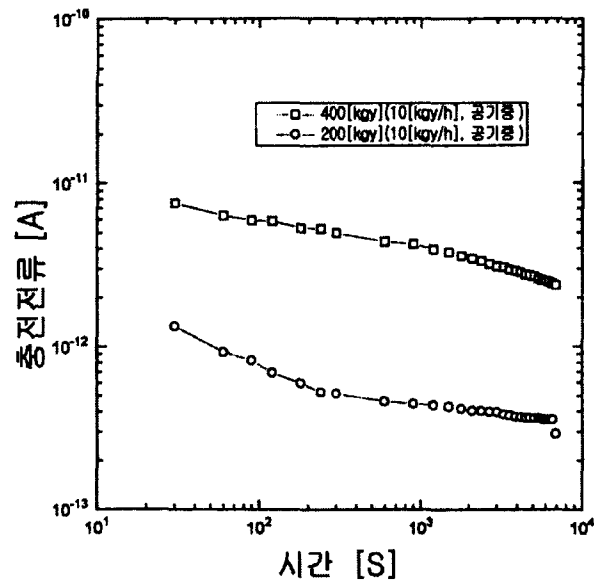


Fig.7 The properties of charge current on time according to irradiation of radial rays(10[kGy/h]) in air environment of EPR



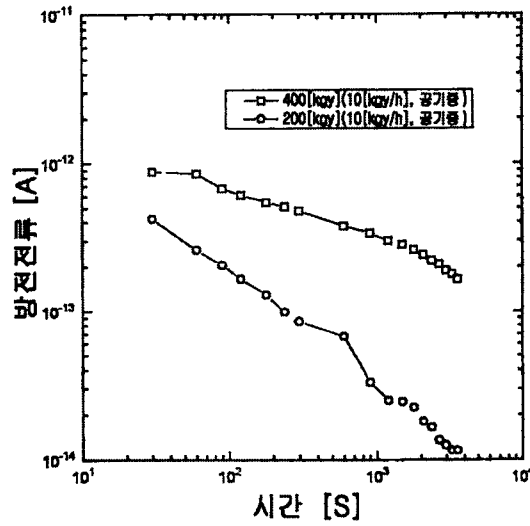


Fig.8 The properties of discharge current on time according to irradiation of radial rays(10[kGy/h]) in air environment of EPR

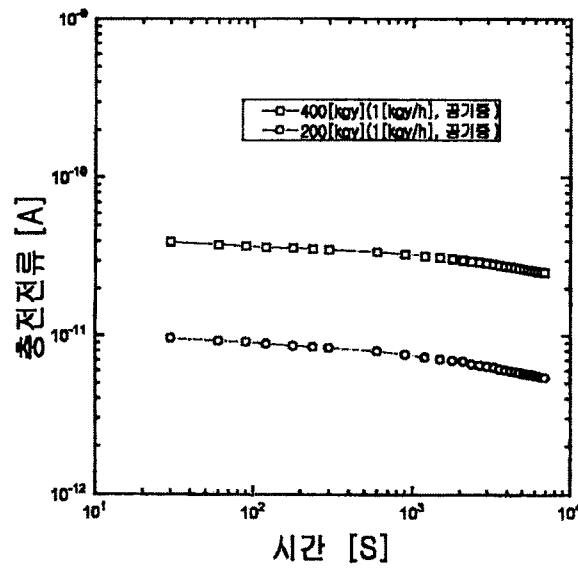


Fig.9 The properties of charge current on time according to irradiation of radial rays(1[kGy/h]) in air environment of EPR

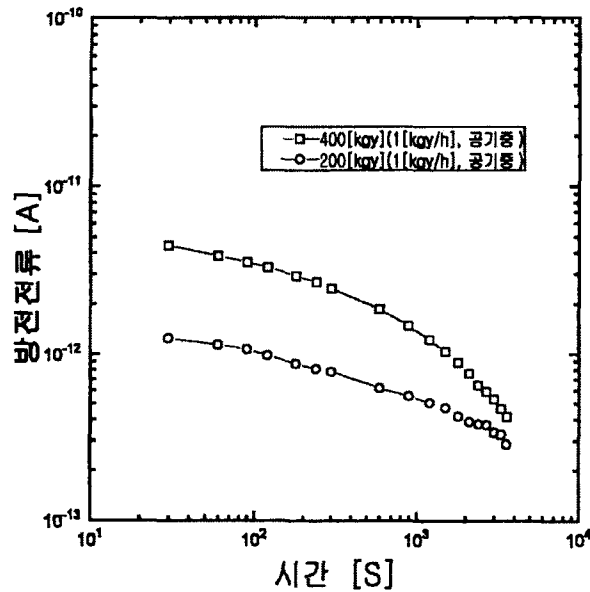


Fig.10 The properties of discharge current on time according to irradiation of radial rays(1[kgy/h]) in air environment of EPR

### 3.4 동일 조사량에서 조사환경이 다른 경우의 비교

Fig.10~13은 조사환경이 각각 다른, 400[kgy]와 200[kgy]의 방사선으로 조사한 시료의 충전전류와 방전전류를 측정된 결과이다. Fig.10~13에서 조사량의 크기에 따라 충전전류도 방전전류도 모두 커져 있음을 나타내고 있으며, 또, 공기중 조사에 있어서는 10[kgy/h] 보다도 1[kgy/h] 쪽이 충전전류도 방전전류도 증가해 있음을 확인할 수 있는데, 이것은 충전전류 및 방전전류는 같은 조사량에 있어서 선량율의 영향이 작고 조사를 오랜 시간동안 조사받은 시료가 산소의 영향을 크게 받는 것으로 나타나 있는데 이것은 산소중 조사했을 때 겔의 생성을 방해하는 산소에 의해 EPR의 주쇄가 절단되었기 때문에 산소중 조사쪽이 진공중 조사쪽보다 열화가 진행이 더 크다고 생각된다.

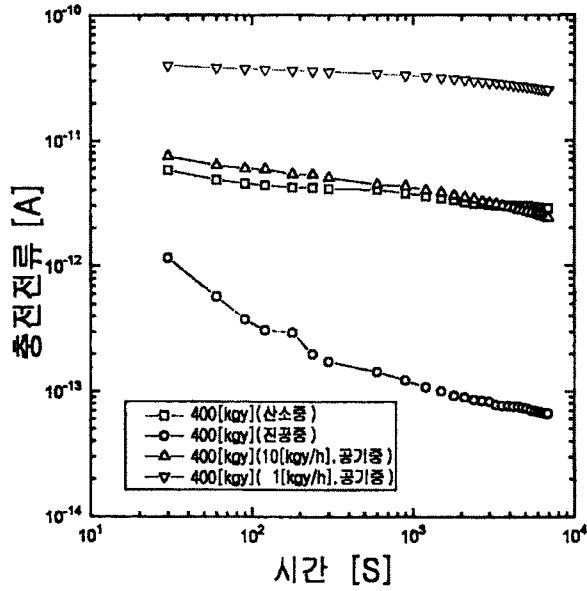


Fig.11 The properties of charge current on time in the same irradiation quantity of radial rays(400[kgy]) of EPR

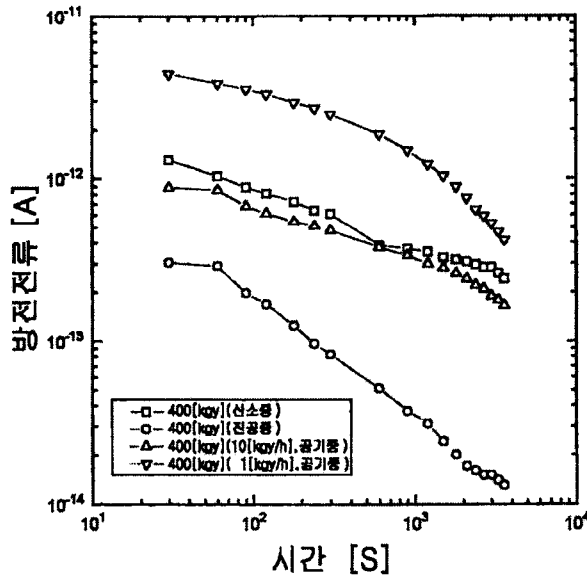


Fig.12 The properties of discharge current on time in the same irradiation quantity of radial rays(400[kgy]) of EPR

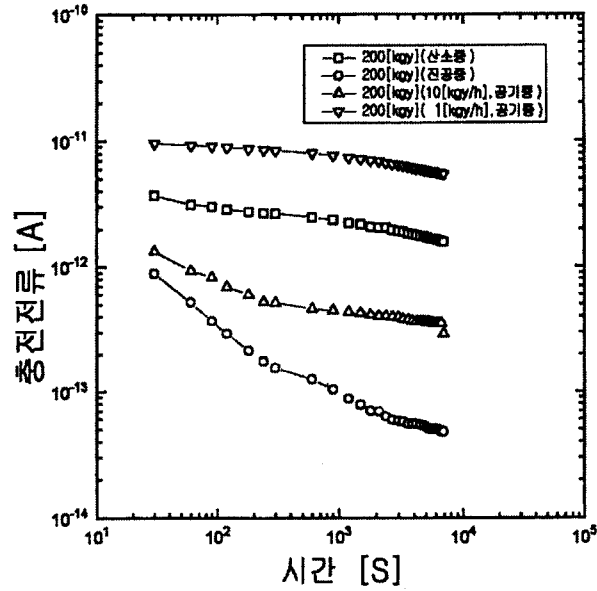


Fig.13 The properties of charge current on time in the same irradiation quantity of radial rays(200[kgy]) of EPR

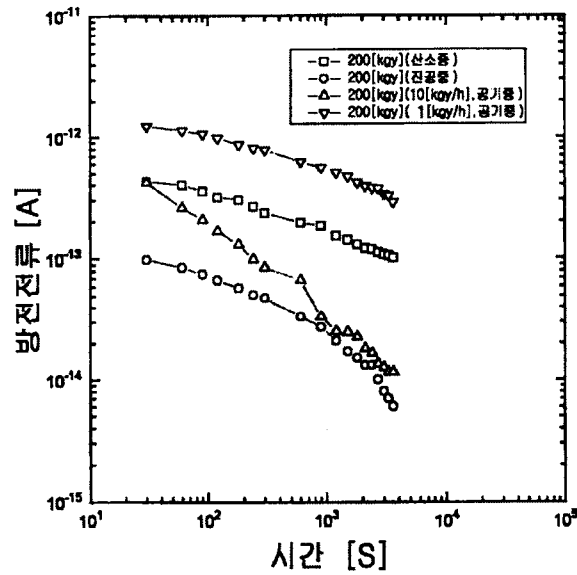


Fig.14 The properties of discharge current on time in the same irradiation quantity of radial rays(200[kgy]) of EPR

#### 4. 결론

본 연구에서는 산소, 공기, 진공 등의 방사선 조사환경에 따른 전기특성을 검토하기 위해서 각기 다른 조사 환경안에서 에틸렌 프로필렌 고무 시료의 방사선량을 변화시켜 충전전류와 방전전류를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산소중, 방사선의 조사량이 클수록 충전전류 및 방전전류가 증가했으며 이는 "C=O" 기 및 성형 가공시 혼입 첨가되는 불순물 등이 쌍극자로 작용하여 전기적 특성을 저하시키는 원인으로 사료된다.
2. 진공중에서 방사선의 조사량이 클수록 충전전류 및 방전전류가 증가했는데 이는 EPR이  $\gamma$ 선 조사량의 크기에 영향을 받아 축쇄결합이 절단되어 평균분자량의 저하와 그것에 따라 점도의 저하 및 기계적 성질의 열화가 일어나기 때문이라고 사료된다.
3. 공기중, 10[kgy/h] 및 1[kgy/h]의 선량율로 조사했을 때 200[kgy] 보다 400[kgy]의 조사량으로 조사한 시료가 충전전류도 방전전류도 모두 증가했는데 이는 공기중, EPR의 방사선에 의한 자동산화 과정으로부터 분자상 산소가 큰 전자친화력을 갖고 있기 때문에 방사선 조사를 받았을 때 발생한 전자를 받아들여  $O_2$  로 되어 주쇄절단을 일으키기 때문이라 생각된다.
4. 공기중에서 10[kgy/h] 보다도 1[kgy/h] 조사쪽이 충전전류도 방전전류도 증가해 있음을 확인했는데 이것은 같은 조사량에 있어서 선량율의 영향이 작고 조사를 오랜시간동안 조사받은 시료가 조사될 때 겔의 생성을 방해하는 산소에 의해 EPR의 주쇄가 절단되었기 때문에 산소중 조사쪽이 진공중 조사쪽보다 열화의 진행이 더 커진다고 생각된다.
5. 동일 조사량에 있어서는 산소중 조사의 쪽이  $\gamma$ 선 조사시 산화반응에 의해 주쇄의 절단이 일어나 충전전류, 방전전류 모두 증가함을 확인했다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S.Yamanaka, T. Fukuda, G. Sawa, M. Ieda, M. Ito, and W.Kawakami: "Ultralow-frequency Dielectric Properties of EPR with Filla", IEEE Trans. EI, Vol. 27, pp.1073~1082 (1992)
- [2] S.Yamanaka, T. Fukuda, G. Sawa, M. Ieda, M. Ito, and T. Seguchi: "Effect of Filler Concentration on Electrical Conductivity and Ultralow-frequency Dielectric Properties", IEEE Trans. DEI, Vol. 2, pp.54~61(1995)
- [3] 建林賢司: "合成ゴム各論", 日刊工業新聞社, pp.138~156, (1972)
- [4] Robert F. Ohm ; "The Vanderbilt Rubber Handbook, Thirteenth Edition", R.T.Vanderbilt Company, pp.2~10(1990)

- [5] 栢原久二外 1人: “放射線と高分子”, 積書店版, pp.127~132(1972)
- [6] Study Committee on Measurement of Insulating Properties of Extra-high Voltage CV Cable, Electrical Cooperative Research, 36,(1980)
- [7] Study Committee on Solid Insulation Diagnoses, Technical report of I.E.E. of Japan(II), No 182(1984).
- [8] Study Committee on Insulation degradation Diagnosis of high-voltage Rotating Machines and Cables, Technical report of I.E.E of I.E.E. of Japan(II) No.267(1988)

#### 저자소개

이성일

광운대학교 전기공학과 졸업  
광운대학원 전기공학과 공학석사  
광원대학원 전기공학과 공학박사  
일본名城(Meijo)대학 객원교수  
현 충주대학교 안전(전기)공학과 부교수  
케이블 및 전선의 절연진단  
정전기 및 소방 전기 관련분야