

## EPR의 열화에 의한 충·방전 전류 특성에 관한 연구

### A Study on Properties of Charge & Discharge Current by Degrade in EPR

이성일<sup>1,a</sup>  
(Sung-Il Lee<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

This paper describes the degraded properties of between the charge and discharge current for  $\gamma$ -ray irradiated in electric power cable rubbers using in nuclear power generating station. The charge and discharge current of degradation in EPR(Ethylene Propylene Rubber), which were irradiated with the radiant capacity of 0.033 Mrad/h, have been measured in order to investigate the influence of the atmosphere(in amount of reinforcing agent, moisture absorption and heat treatment) on electrical properties. When  $\gamma$ -ray were irradiated on the EPR with more reinforcing agent from 4 to 40 Phr, charge and discharge currents was increase due to the amount of reinforcing agent. It was verified that the discharging and charging currents irradiated by  $\gamma$ -ray were higher than those that was not irradiated. The amount of the degraded current was more after moisture absorption than before moisture absorption. The charge and discharge current after heat treatment was similar to that of before heat treatment and it was decreased with the time elapsed. As these properties related with  $\gamma$ -ray irradiation dose, it is suggested that these properties can be utilized as a index of irradiation degradation.

**Key Words** :  $\gamma$ -ray, EPR(Ethylene propylene rubber), Charge and discharge current

#### 1. 서론

원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 설치되어 있는 케이블 및 전선의 등은 끊임없이 방사선에 쬐여져 열화하게 되며, 수십 년의 발전소 수명이 다하였을 때 냉각제 상실사고와 같은 중대한 사고가 일어나도 안전에 이상이 없는 높은 신뢰성이 요구된다.

이에 케이블 및 전선 등의 절연과피에 의한 사고를 미연에 방지하기 위해 열화의 정도를 비 파괴적으로 검증할 절연열화 진단법의 정립이 대단히 중요시되고 있다. 최근 고분자 절연체의 각종

목적에 따라 배합제가 사용되고 있지만 배합제의 종류 및 배합량 그리고 그 환경에 대응한 열화의 정도는 현저하게 다르다[1-3].

원자력 발전소의 내 방사선성을 향상시키기 위해서 보호계로 사용되고 있는 에틸렌 프로필렌 케이블 고무에도 여러 가지 배합제가 함유되어 있지만 환경적 영향이 전기 열화 특성을 복잡하고 어렵게 만들었다. 따라서 절연 재료의 신뢰성을 높이기 위해서 충전제 및 환경이 전기 특성에 어떠한 영향을 미치는지 검토할 필요가 있다[4-6].

본 연구에서는 원자력 발전소 내의 전선·케이블의 절연 재료로서 사용되고 있는 에틸렌과 프로필렌 고무를 비율이 1 대 1인 에틸렌 프로필렌 고무를 시료로 선정하여 공기 중 실온에서 <sup>60</sup>Co로부터 방사선 선량을 0.033 Mrad/h로 조사시켜 충전제, 수분의 흡습 및 열처리 환경에 따른 열화의 정도를 충·방전전류를 측정하여 그 영향에 대해서 검토했다[7,8].

1. 충주대학교 안전공학과  
(충북 충주시 대학로 72)

a. Corresponding Author : silee@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2008. 6. 4

1차 심사 : 2008. 6. 12

심사완료 : 2008. 6. 18

## 2. 측정 회로 및 측정방법

### 2.1 시료

본 연구에서는 전력 케이블에 많이 사용되고 있는 에틸렌과 프로필렌 1대 1로 가교시킨 EP고무 100 phr에, Talc 100 phr, TAIC 1.5 phr, NonflexRD 1.5 phr, Stearic Acid 1.5 phr, DCP(Dicumyl Peroxide) 3.0 phr에 충전제인 하드클레이를 4~40 phr로 배합시켜 170 °C에서 10분 동안 두께 1 mm로 제작 성형시켰다.

### 2.2 측정방법

충전제, 흡습 및 열처리 환경 변화에 의해 열화된 시료의 양면의 대향 위치에 지름 60 mm의 크기로 금 증착한 후, 그 위에 Al Foil 전극을 붙여 충전 및 방전전류를 측정했다. 그림 1에 충·방전전류의 측정회로를 나타내었으며, 측정에는 직류전원장치(日本; Kawaguti Electric Works, Model V-710), 기록계(日本; Graph Teccorp, Serbo Corder Type SR 6341), 미소전류계(日本; Takede Riken Industry Co, TR 8651), 진공 펌프, 진공 플랜지를 사용하였다.

충전전류는 시료를 진공 플랜지 내에 설정하고, 진공 펌프로 진공시킨 후 SW<sub>1</sub>, SW<sub>2</sub>를 각각 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>에 연결하여 30분 동안 접지시킨 후 SW<sub>2</sub>를 B<sub>2</sub>측으로 하여 -500 V를 인가하여 120분 동안 충전전류를 측정하였다. 120분 30초에 30초 동안 접지 후 방전전류는 120분 정각에 SW<sub>1</sub>을 A<sub>1</sub>으로 연결하여 60분 동안 측정하였다. 흡습은 항온 항습기 내에 온도 80 °C, 습도 80 %의 환경 하에 100시간 동안 흡습시킨 후 off 상태에서 24시간 동안 방치시켰다. 열처리는 시료를 플랜지 내에 설치한 후 로터리 펌프로 플랜지 내를 진공으로 했으며, 열처리 중에도 로터리 펌프를 계속 작동시켰다. 플랜지

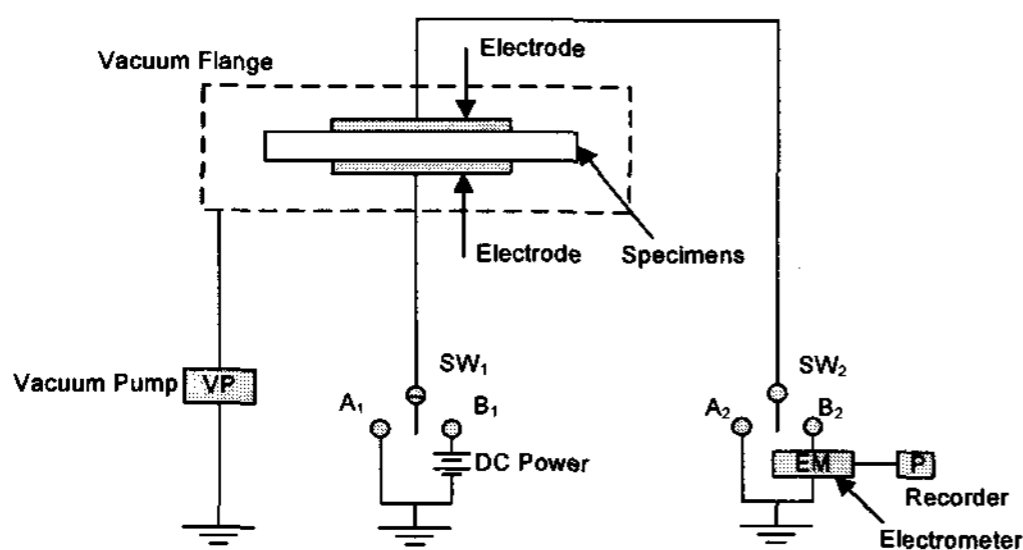


그림 1. 측정회로.

Fig. 1. Measuring circuit.

를 실리콘유 중에 넣고 실리콘유의 온도를 90 °C까지 상승시켰다. 그 후 플랜지 내의 온도를 80 °C로 내린 후 다시 실리콘유의 온도를 85 °C로 내렸다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 충·방전전류 열화에 미치는 충전제의 영향

그림 2는 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 첨가제와 충전제인 하드 클레이(Hard clay)를 4~40 phr로 증가 배합시킨 시료에 공기 중 실온에서 <sup>60</sup>Co로부터의 20 Mrad의 γ 선을 조사시킨 후 -500 V를 인가하여 시간에 대응한 충전전류를 측정한 결과이다.

30초 경과했을 때의 열화의 정도는 충전제가 4~40 phr 배합된 시료의 충전전류의 크기는  $2.5 \times 10^{-11} \sim 3.2 \times 10^{-10}$  A, 120분 경과했을 때의 열화는  $2.4 \times 10^{-13} \sim 2.0 \times 10^{-12}$  A 정도로 충전제의 양이 많을수록 충전전류는 증가하고 있다. 충전제를 4 phr 배합시킨 시료의 충전전류의 크기는 30초 경과했을 때  $4.1 \times 10^{-11}$  A, 120분 경과했을 때의 열화의 정도는  $2.95 \times 10^{-12}$  A 정도로 감소해 있다. 충전제를 20 phr 배합시킨 시료의 충전전류의 크기는 30초 경과했을 때  $5.5 \times 10^{-12}$  A, 120분 경과했을 때의 열화의 정도는  $2.7 \times 10^{-13}$  A 정도로 감소하였다.

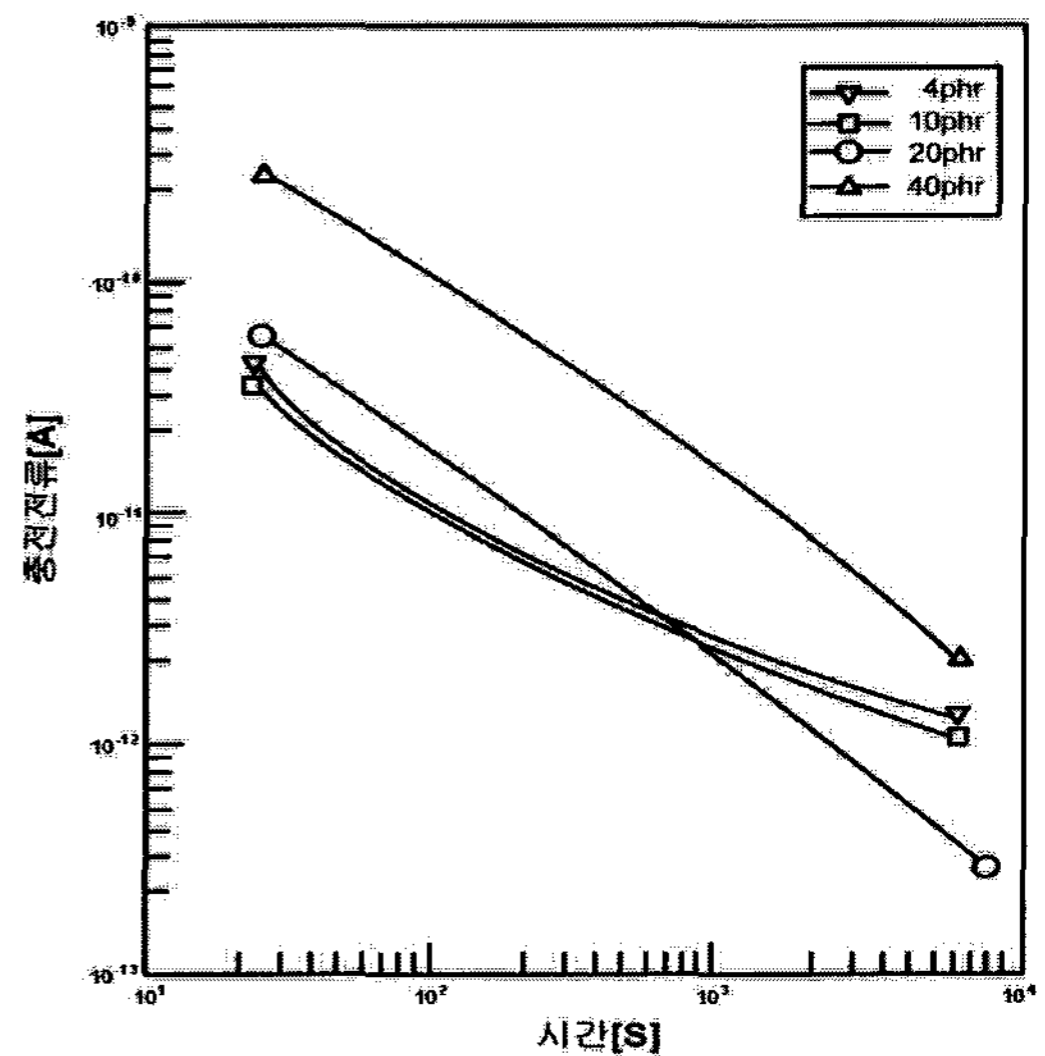


그림 2. 20 Mrad 조사된 충전제에 의한 EPR의 충전전류-시간 특성.

Fig. 2. Charge current-time properties of EPR due to reinforcing agent be irradiated with 20 Mrad.

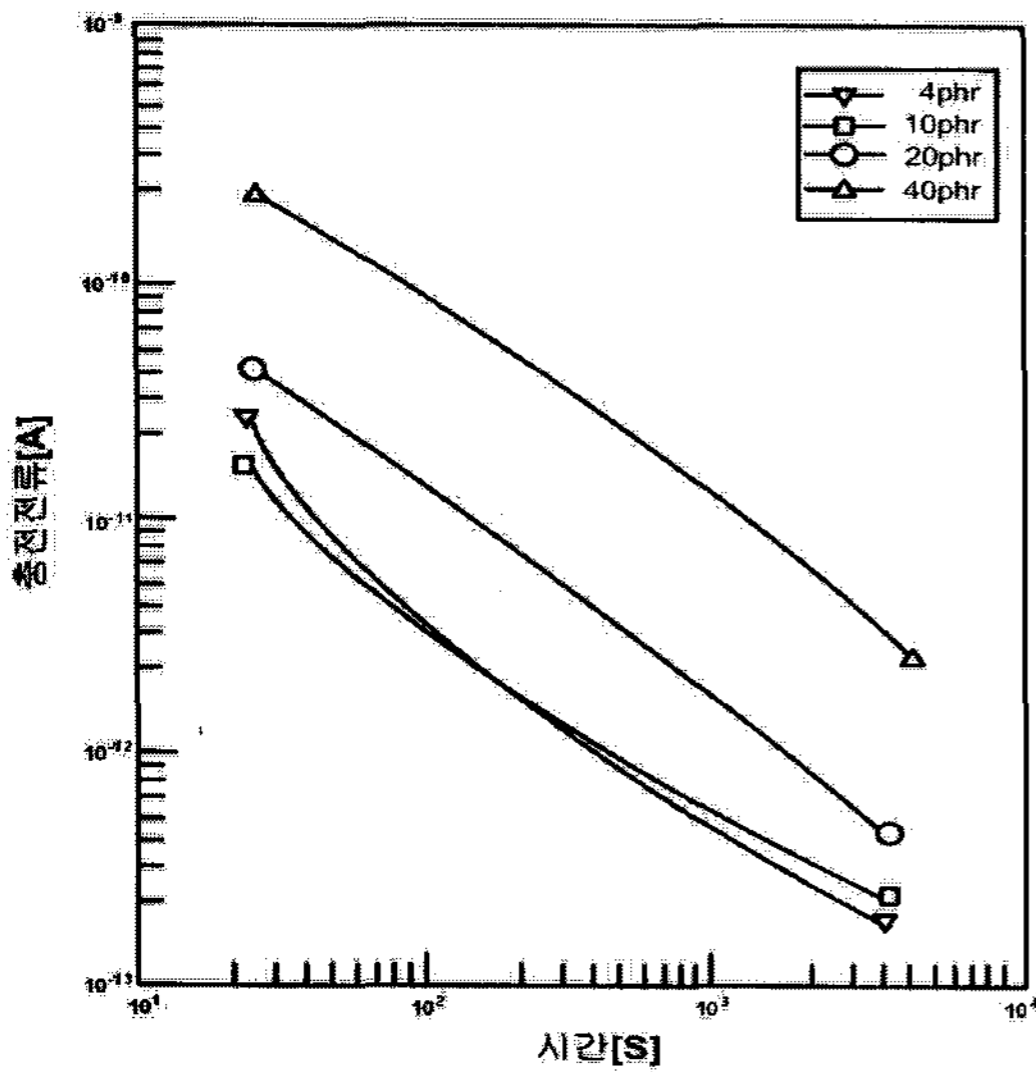
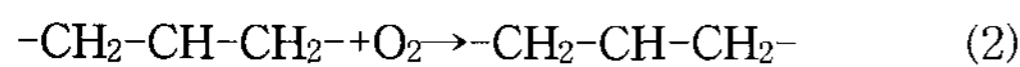
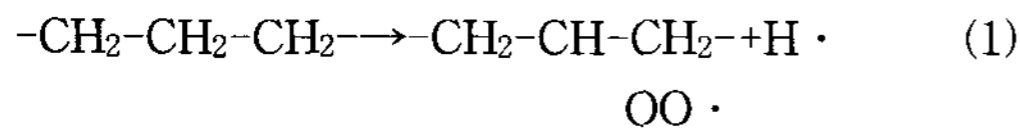


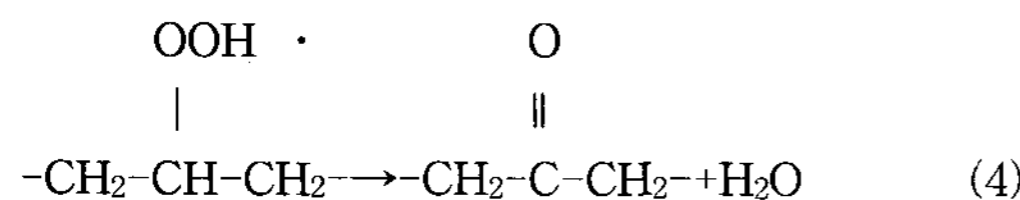
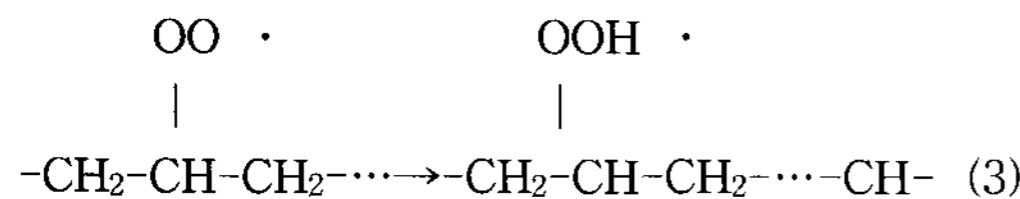
그림 3. 20 Mrad 조사된 충전제에 의한 EPR의 방전전류-시간 특성.

Fig. 3. Discharge current-time properties of EPR due to reinforcing agent be irradiated with 20 Mrad.

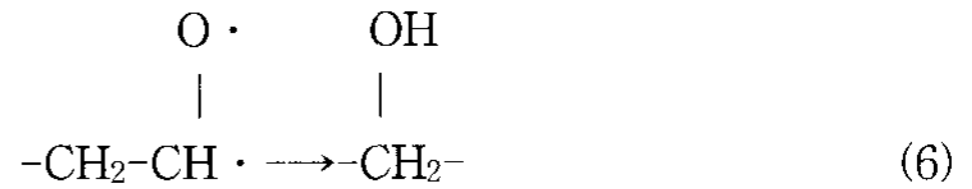
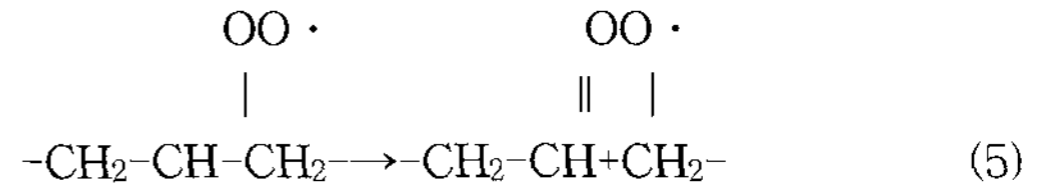
폴리에틸렌은 방사선 조사를 받으면 진공 중에서는 가교하는 분자이지만 산소가 존재하고 있는 중에서는 산화 반응이 일어난다. 이것은 조사에 의해 발생한 유리기가 산소와 반응하여 퍼옥시 라디칼( $ROO \cdot$ )을 발생하며, 그것이 더욱 더 광이나 열에 의한 자동 산화 형식을 통해서 카르보닐기가 된다. 즉, 우선



로 된다. (2)에서 생성한 라디칼은



로 된다. 또한 (1,2)의 반응 생성물로부터 분자쇄 절단이 일어나며,



로 된다. 퍼옥시 라디칼에서 카르보닐기가 발생하는 과정에는, 상술한 것과 같이 (2)로부터 (3), (4)로 진행되는 반응과 (2)에서 (5), (6)에 이르러 분자쇄 절단을 일으키며, 카르보닐기와 수산기를 생성하는 반응이 있다. 폴리에틸렌은 산소가 부족한 상태에서는 가교형의 고분자이지만 산소가 충분히 공급되는 상태에서는 주쇄의 절단이 일어나며 붕괴형으로 된다. 이러한 산화 반응 혹은 화학 반응이 전기적 성질을 저하시키는 원인이라고 생각된다.

### 3.2 충전 및 방전전류 열화에 미치는 흡습의 영향

그림 4는 첨가제 및 충전제인 하드 클레이(Hard clay)를 4~40 phr로 증가 배합시킨, 미조사한 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 -500 V를 인가하여 시간

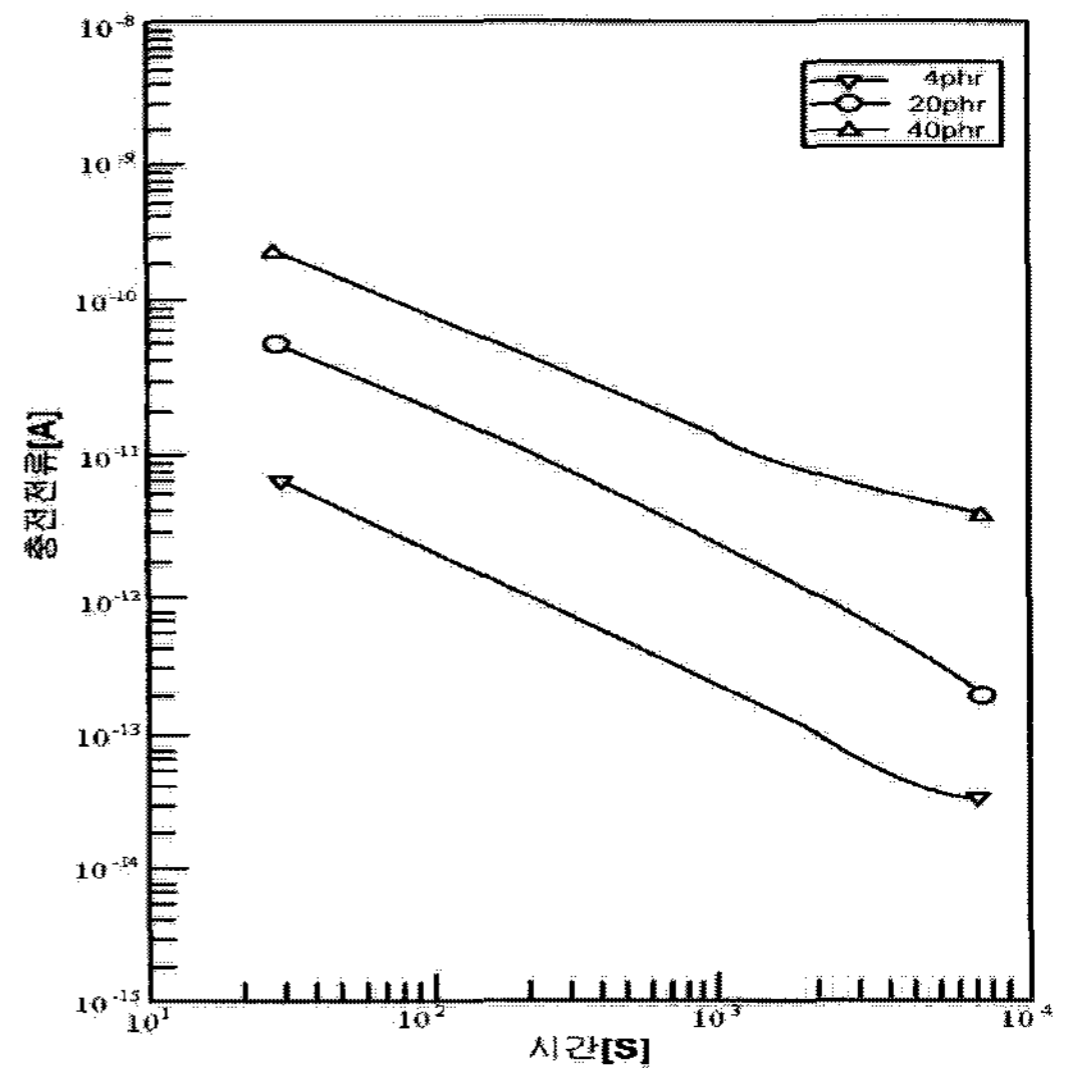


그림 4. 흡습, 미조사한 EPR의 충전전류-시간특성.

Fig. 4. Charge current-time properties of EPR be non-irradiated specimen with moisture absorption.

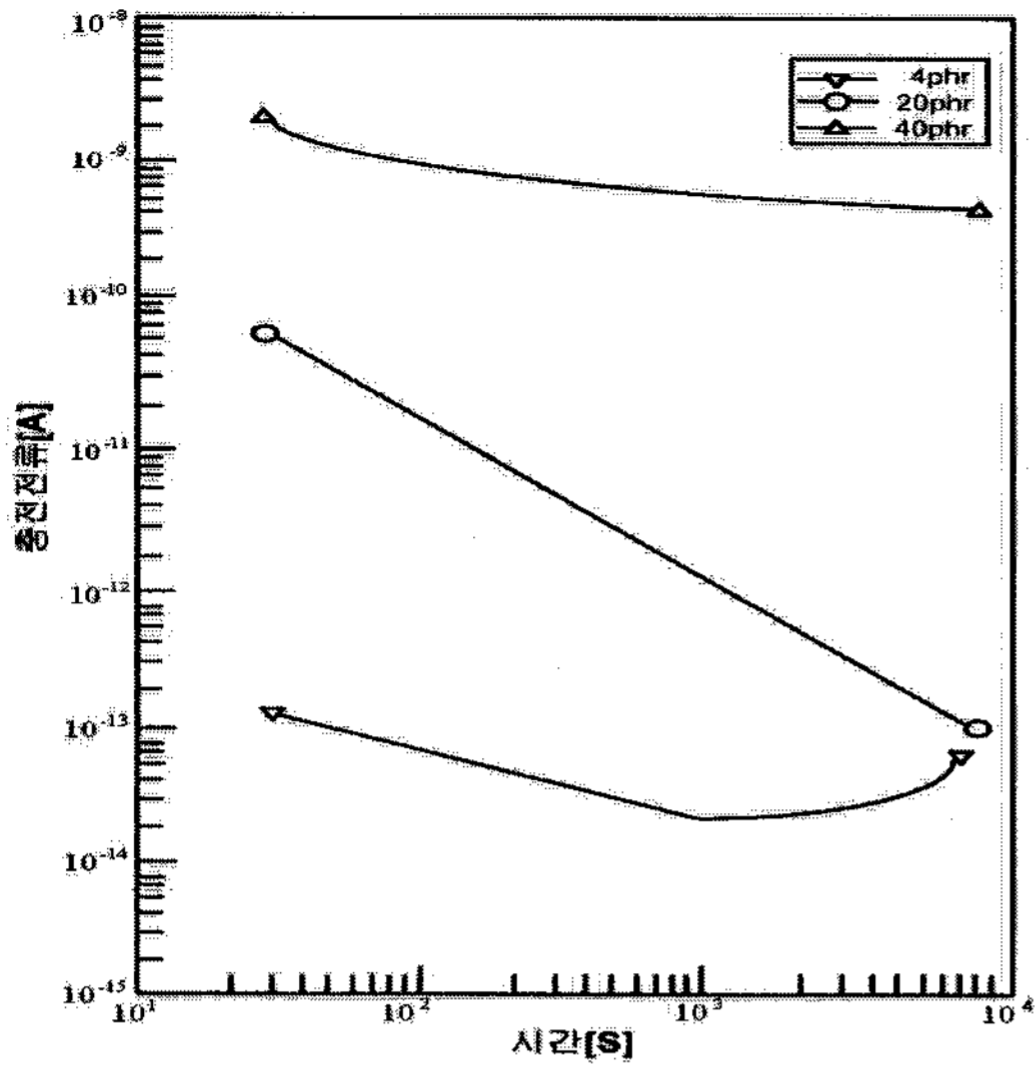


그림 5. 흡습 100시간 후, 미조사한 EPR의 충전 전류-시간 특성.

Fig. 5. Charge current-time properties of EPR be non-irradiated specimen with moisture absorption after 100 hr.

에 대응한 충전전류를 측정된 결과이며, 그림 5는 습도 80 %에서 100시간 흡습시킨 시료의 시간에 대응한 충전전류를 측정된 결과를 나타내었다.

그림 4에서 조사시키지 않은 시료에서는 충전제 량의 함량에 관계없이 시간의 흐름과 더불어 충전 전류는 감소하고 있다.

그림 5에서 충전제가 4 phr 배합된 시료의 경우 30초 경과했을 때의 충전전류의 크기는  $1.1 \times 10^{-13}$  A이며 시간과 더불어 60분 경과했을 때의 열화는  $2.8 \times 10^{-14}$  A 정도이며 120분경과 시에는  $5.4 \times 10^{-14}$  A 로 열화의 정도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 충전제가 20 phr 배합된 시료의 경우 30초 경과했을 때의 충전전류의 크기는  $5.1 \times 10^{-11}$  A이며 120분경과 시에는  $9.0 \times 10^{-14}$  A 정도로 시간과 더불어 감소해져 있다. 충전제가 40 phr 배합된 시료의 경우 30초 경과했을 때의 충전전류의 크기는  $1.9 \times 10^{-9}$  A이며 120분경과 시에는  $5.0 \times 10^{-10}$  A 정도로 시간과 더불어 완만하게 감소해져 있다.

그림 6은 그림 4, 그림 7은 그림 5와 같은 조건에서 방전전류를 측정된 결과이다.

그림 6에서 조사시키지 않은 시료에서는 충전제 량의 함량에 관계없이 시간의 흐름과 더불어 방전 전류는 감소하고 있다. 그림 7에서 충전제가

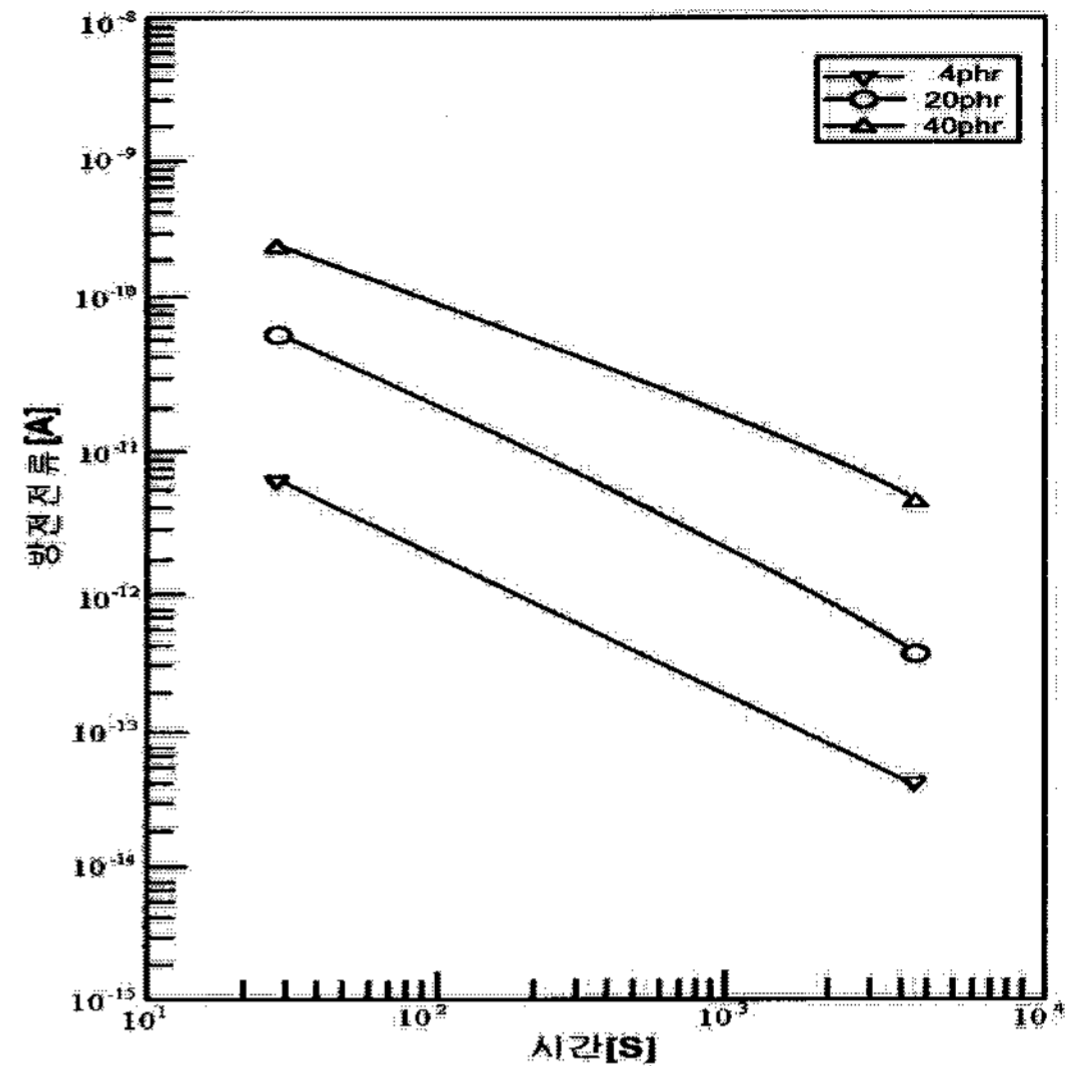


그림 6. 흡습, 미조사한 EPR의 방전전류-시간특성.

Fig. 6. Discharge current-time properties of EPR be non-irradiated specimen with moisture absorption.

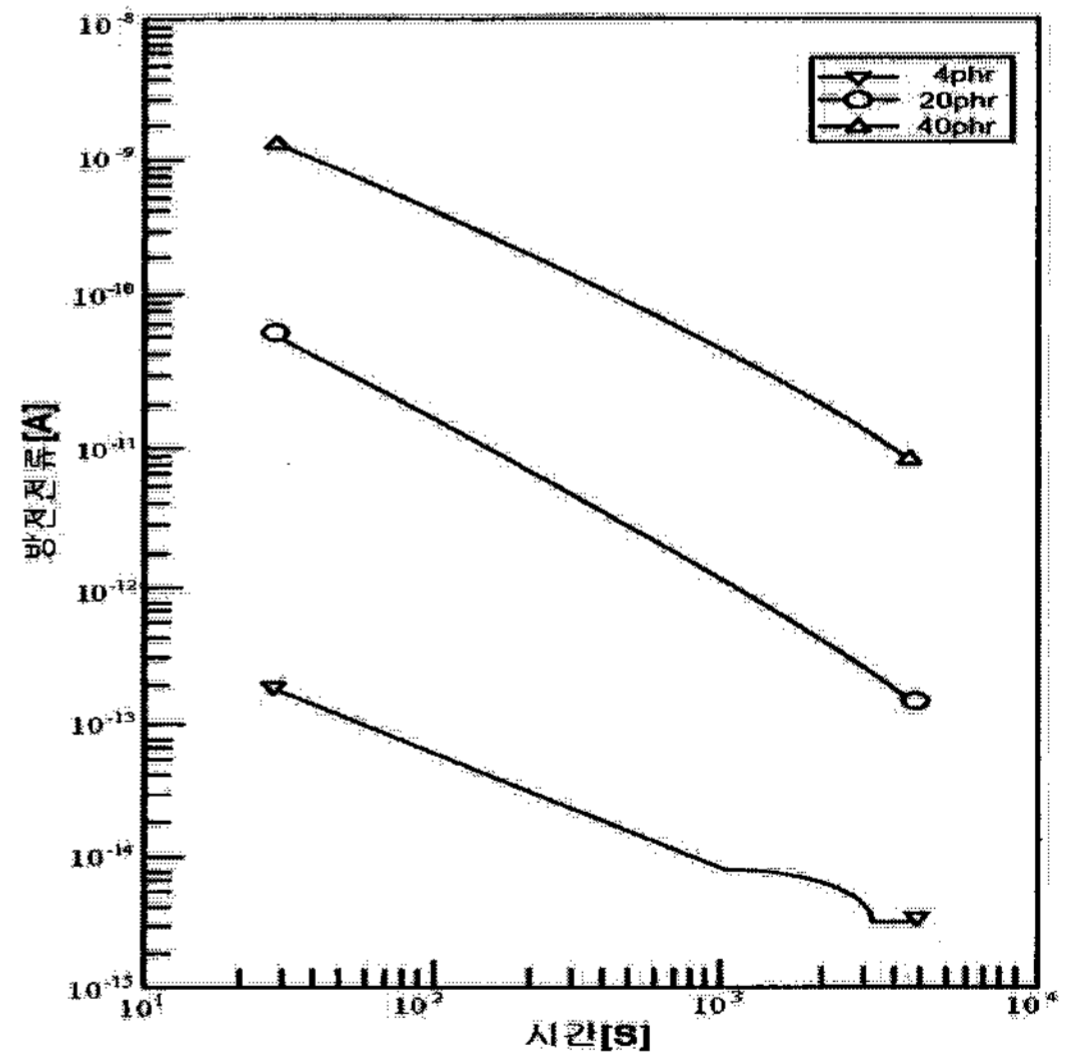


그림 7. 흡습 100시간 후, 미조사한 EPR의 방전 전류-시간특성.

Fig. 7. Discharge current-time properties of EPR be non-irradiated specimen with moisture absorption after 100 hr.

4 phr 배합된 시료의 경우 30초 경과했을 때의 방 전전류의 크기는  $1.15 \times 10^{-13}$  A이며 시간과 더불어

완만하게 감소하다 20분 경과 시에는  $2.85 \times 10^{-15}$  A 로 유지하다 60분 경과 시에는 열화의 정도가  $2.0 \times 10^{-15}$  A 정도로 감소해져 있다. 충전제가 20 phr, 40 phr 배합된 시료의 경우 30초 경과했을 때의 충전전류의 크기는  $5.0 \times 10^{-11}$  A,  $1.2 \times 10^{-9}$  A 정도이며 60분 경과 시에는  $1.4 \times 10^{-13}$  A,  $8.5 \times 10^{-12}$  A 정도로 시간과 더불어 감소하며 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

미 조사된 시료에 비해서 방사선 조사되어 있는 쪽의 충전전류 및 방전전류가 높는데, 이것은 가교된 고분자 전해질은 망목 구조를 가지며, 고분자 전해질과 물과의 친화력 및 가동 이온 농도가 겔의 내측의 쪽이 높기 때문에 발생하는 침투압에 의해서 흡수 작용이 일어났기 때문에 열화에 더 영향을 미쳤다고 생각된다.

EP케이블 고무시료에 -500 V의 직류전압을 인가하면 그 때의 전류는 시간과 더불어 감소하다 일정한 값으로 된다. 충전전류는 식 (7)과 같다.

$$I_c = i_c(t) + i_a(t) + i_l \quad (7)$$

여기서  $i_c(t)$ 는 순시충전전류,  $i_a(t)$ 는 흡수충전전류,  $i_l$ 은 누설전류이다.

즉, 전압을 인가할 때 순간적으로 흐르는 변위 전류  $i_c(t)$ 와 흡수전류  $i_a(t)$  및 누설전류  $i_l$ 이 중첩된 것이다. 또, 전압을 제거한 후의 방전전류  $I_d$ 는 누설전류를 제거한 충전 때와는 역 특성의 전류이며  $I_d = -i_c(t) - i_a(t)$ 로 된다.  $i_c(t)$ 는 짧은 시간의 단락으로 0이 되며, 그 후 전류는 역 흡수 전류  $-i_a(t)$ 만으로 된다. EP 케이블 고무시료의 흡수전류  $i_a(t)$ 는 유전체의 유전분극에 기인한 것이며 이 유전 분극은 쌍극자의 회전과 계면 분극에 의해서 일어난다. 균질한 시료를 전계 중에 놓으면 시료중의 쌍극자는 전계 방향으로 정렬되게 회전하지만 마찰저항을 받기 때문에 일정 방향으로 정렬하는데 시간을 필요로 하는데 이때 흐르는 전류가 쌍극자에 의한 흡수 전류이다. 한편, 본 실험에서는 충전제를 4~40 phr 배합한 시료를, 흡습시키지 않은 경우와 100시간 동안 흡습시킨 경우에 충전제 첨가량이 많을수록, 흡습된 경우일수록 열화의 정도가 높으며, 더 많은 충전전류 및 방전전류가 흐른다는 것을 확인했다. 충전제 첨가량이 적을수록 흡습되지 않은 케이블 고무시료의 충전전류 및 방전전류에 가까운 값으로 될 것으로 생각된다.

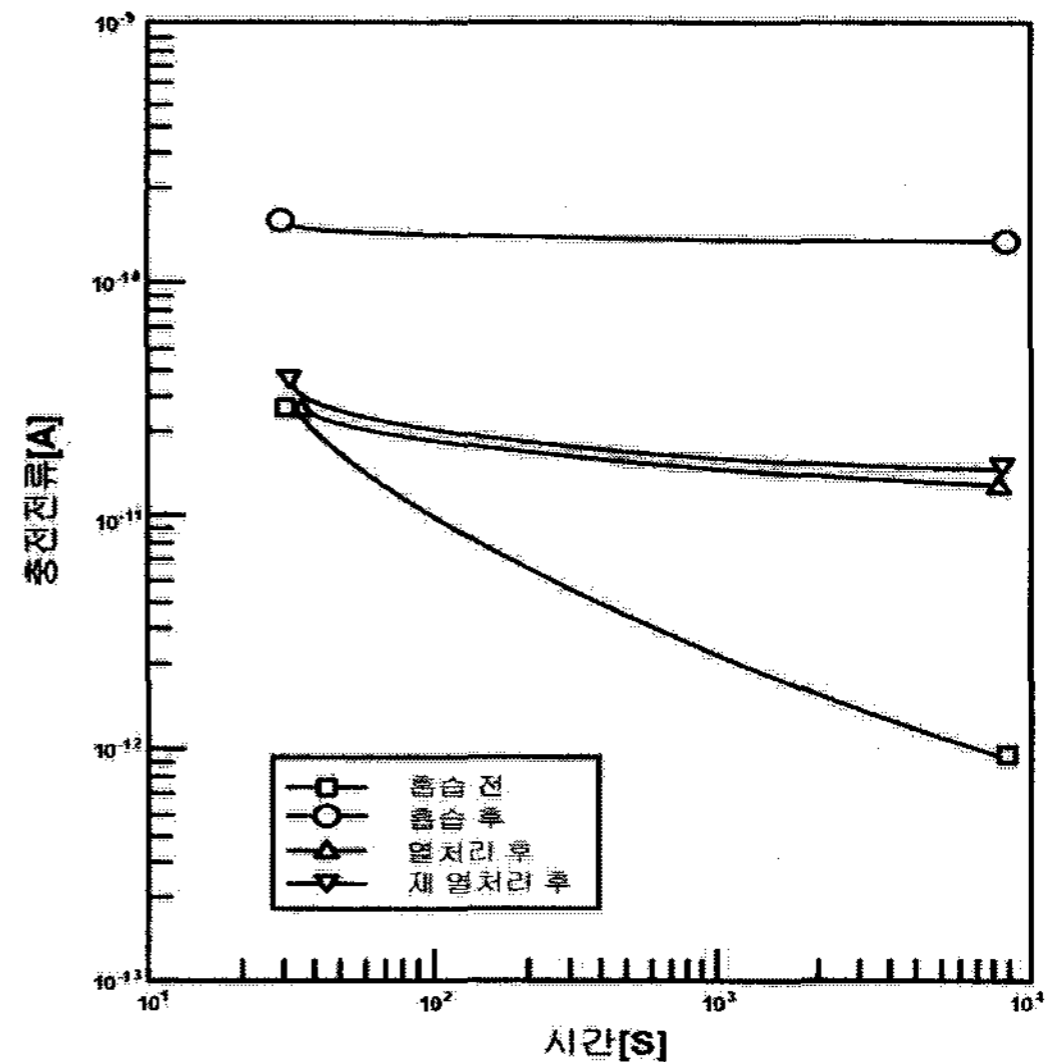


그림 8. 20 Mrad, 10 phr 충전시킨 EPR의 충전 전류-시간 특성.

Fig. 8. Charge current-time properties of EPR be reinforced with 10 phr in 20 Mrad irradiate dose.

### 3.3 충전 및 방전전류 열화에 미치는 열처리의 영향

첨가제 및 충전제인 하드 클레이(Hard Clay)를 10~40 phr로 증가 배합시킨 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 20 Mrad를 조사시킨 후 습도 80 %에서 100시간 흡습시키기 전, 흡습시킨 후, 실리콘유를 온도를 90 °C까지 상승시킨 후 플랜지 내의 온도를 80 °C로 되게 열처리 후, 실리콘유를 온도를 85 °C로 내린 후 플랜지 내의 온도를 80 °C에서 3시간동안 재 열처리한 시료의 충전전류-시간 특성을 그림 8, 그림 10에, 방전전류-시간 특성을 그림 9, 그림 11에 나타내었다.

그림 8~11에서 시간에 대응한 충전 및 방전전류의 열화 특성은 흡습전보다 흡습후가 더 큰 열화전류가 흐르고 있으므로 물의 영향을 받고 있다고 생각되며, 열처리 후나 재열처리 후의 열화 특성은 거의 같은 전류 값을 나타내고 있으므로 시간에 대응한 열처리의 영향은 거의 받지 않는다고 생각된다. 또한 시간이 경과함에 따라 충전 열화전류는 감소하고 있다.

그림 10에서 충전제가 20 phr 배합된, 40 Mrad 조사된 시료의 경우 충전 전류의 크기는 30초 경

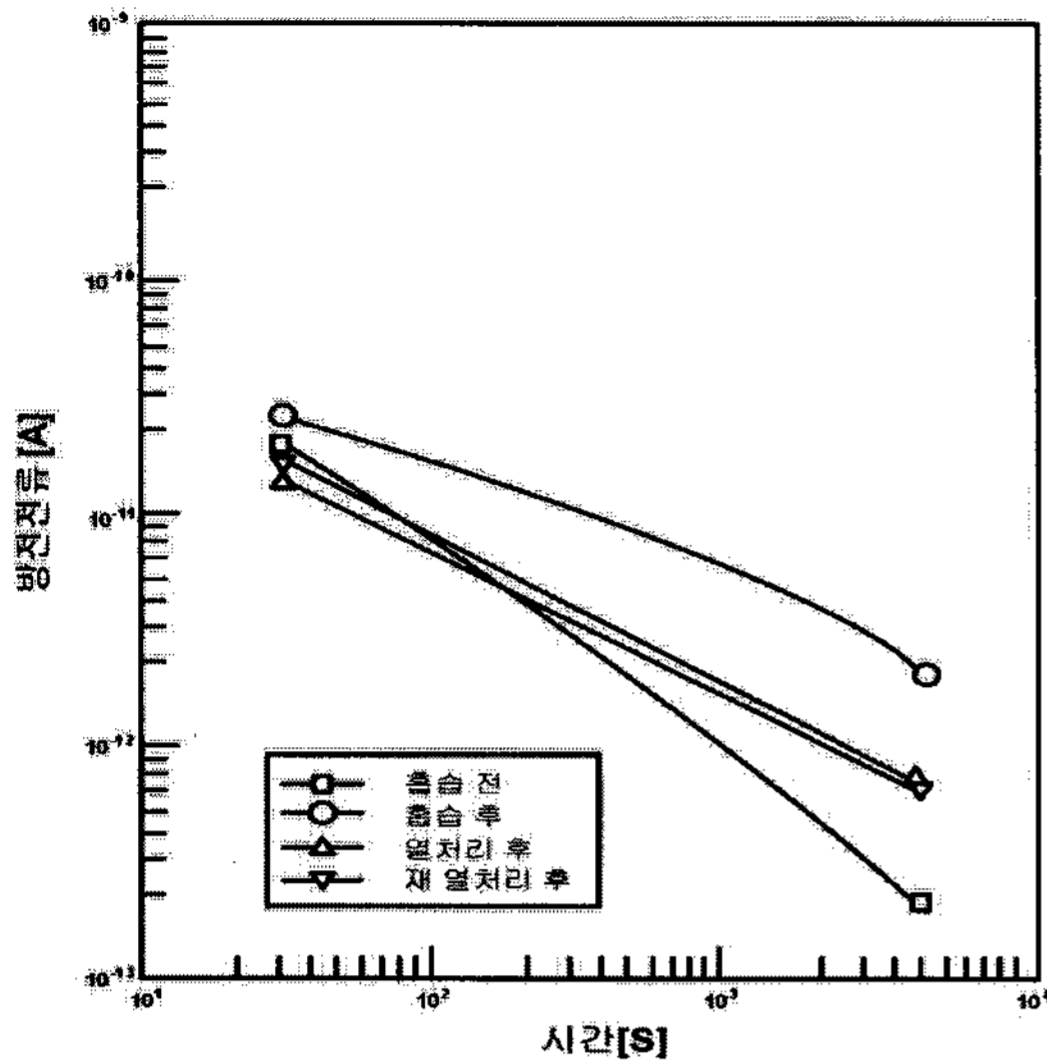


그림 9. 20 Mrad, 10 phr 충전시킨 EPR의 방전전류-시간 특성.

Fig. 9. Discharge current-time properties of EPR be reinforced with 10 phr in 20 Mrad irradiate dose.

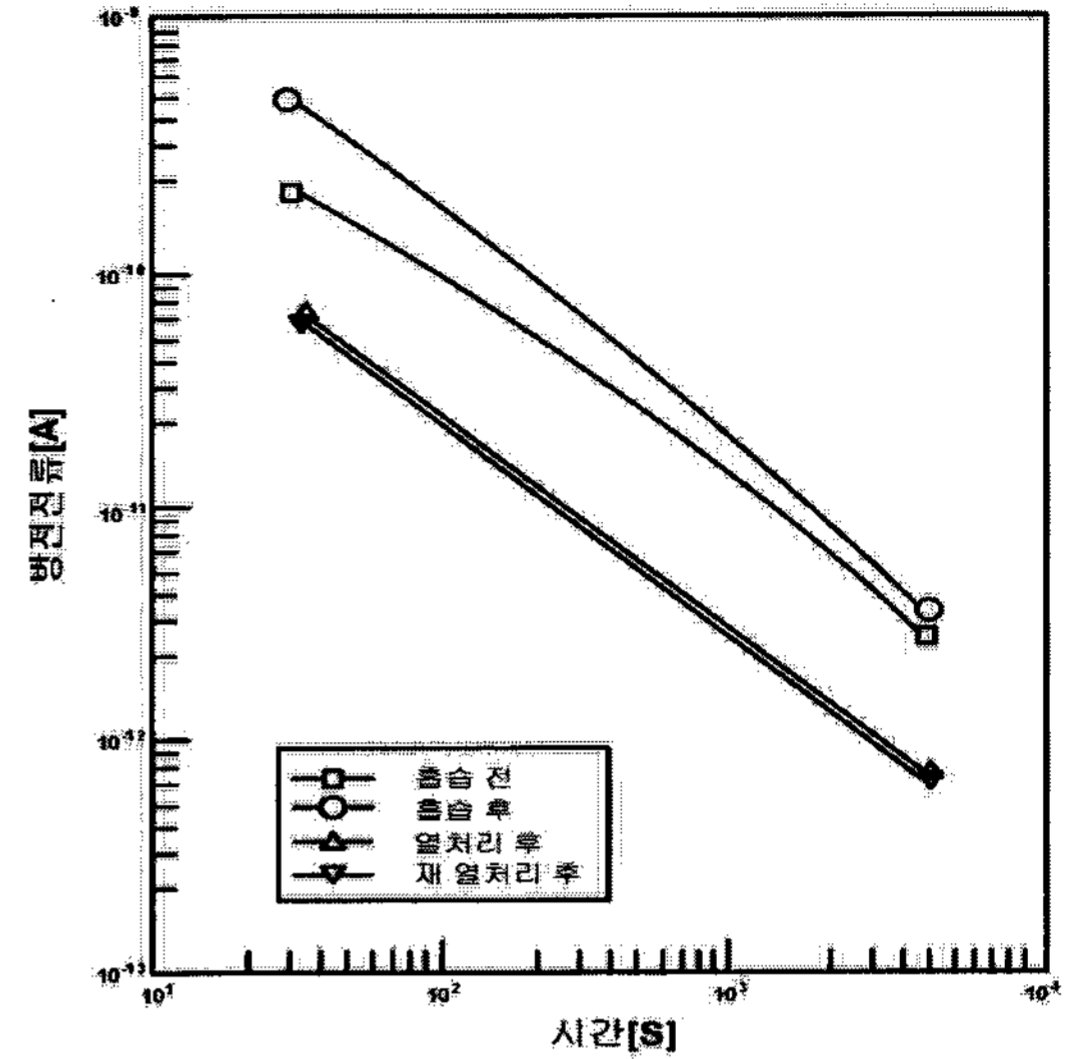


그림 11. 20 Mrad, 40 phr 충전시킨 EPR의 방전전류-시간 특성.

Fig. 11. Discharge current-time properties of EPR be reinforced with 40 phr in 20 Mrad irradiate dose.

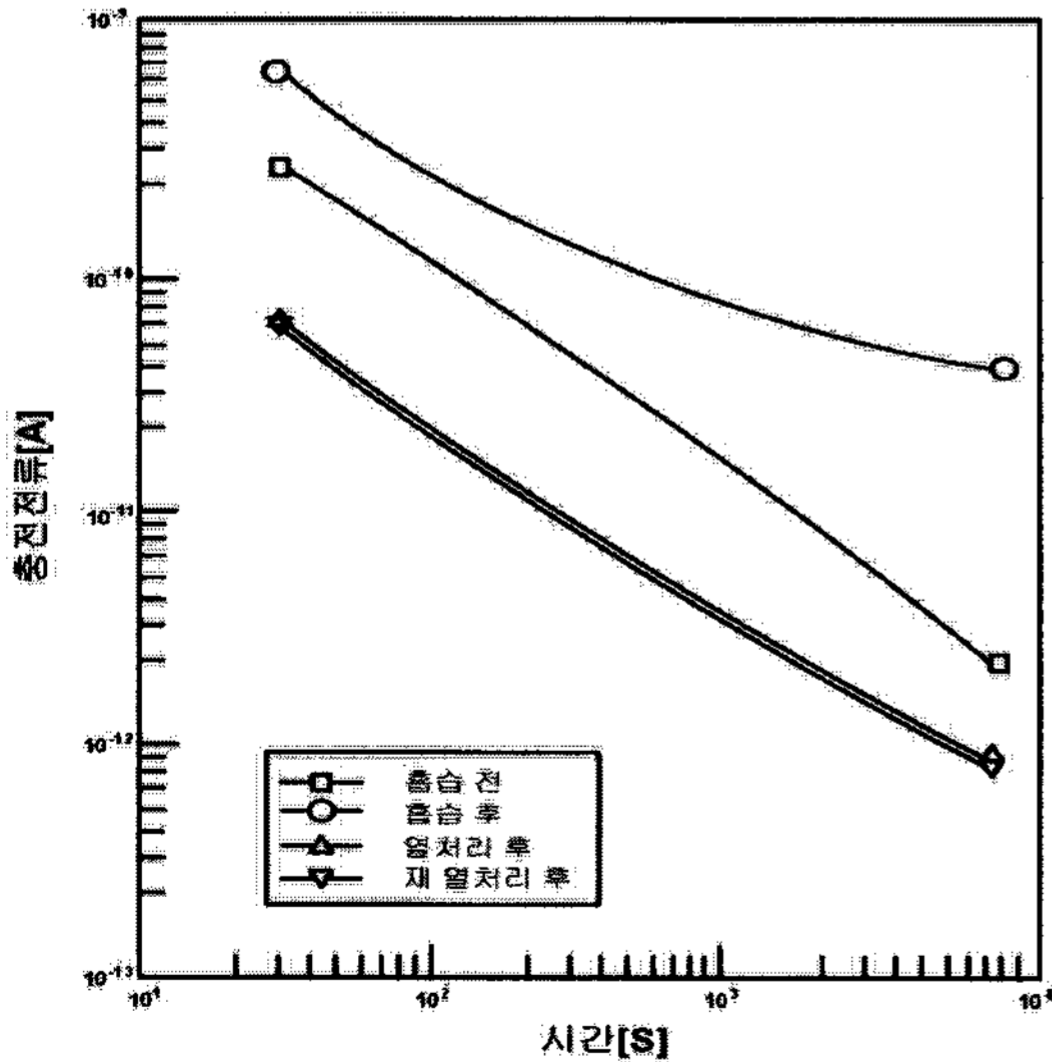


그림 10. 20 Mrad, 40 phr 충전시킨 EPR의 충전전류-시간 특성.

Fig. 10. Charge current-time properties of EPR be reinforced with 40 phr in 20 Mrad irradiate dose.

과했을 때 흡습 전이  $8.4 \times 10^{-10}$  A 정도, 흡습 후는  $5.8 \times 10^{-10}$  A, 120분경과 시에는 흡습 전이  $2.2 \times 10^{-12}$  A 정도, 흡습 후는  $3.7 \times 10^{-12}$  A 정도이다.

열처리 및 재열처리 한 경우는 30초 경과했을 때는  $5.8 \times 10^{-11}$  A 정도, 120분 경과 시에는  $9.9 \times 10^{-13}$  A 정도로 거의 같은 크기이며, 감소하고 있다.

그림 11에서 충전제가 20 phr 배합된, 40 Mrad 조사된 시료의 경우 충전 전류의 크기는 30초 경과했을 때 흡습 전이  $1.9 \times 10^{-10}$  A 정도, 흡습 후는  $4.3 \times 10^{-10}$  A, 120분 경과 시에는 흡습 전이  $2.8 \times 10^{-12}$  A 정도, 흡습 후는  $3.3 \times 10^{-12}$  A 정도이다. 열처리 및 재열처리 한 경우는 30초 경과했을 때는  $5.5 \times 10^{-11}$  A 정도, 120분 경과 시에는  $6.1 \times 10^{-13}$  A 정도로 거의 같은 크기이며, 감소하고 있다.

그림 8~11은 케이블 시료의 충전 및 방전전류의 장시간 측에서 나타나는 누설전류성분은 도전율과 기하학적 용량의 곱으로 나타내어지며, 시간측의 값이 충분히 일정하지는 않지만 열처리에 영향을 받고 있다고 생각된다. 또 방전전류의 값은 시간과의 관계는 직선으로 되어 있지 않다. 이것으로부터 완화 시간이 분포된 분극을 시사하고 있다. 즉, 완화시간의 분포로서 방전전류  $I_d$ 는

$$I_d = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{CR}} \quad (8)$$

이다. 방전전류는 식 (8)로부터 구해보면 그림 8~13에서 흡습한 쪽이 흡습하지 않은 쪽 보다 커져 있으며, 열처리한, 흡습하지 못한, 흡습한 시료의 순으로 비례함을 확인했다.

#### 4. 결 론

원자력 발전소의 신뢰성 향상과 사고를 미연에 방지하기 위해서 안전방호계로 사용되고 있는 에틸렌프로필렌 케이블 고무의 시트상 시료에 대해서 충전제, 습도 및 열처리 환경 변화 등에 의한 방사선 조사량이 절연 열화 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해서 충전전류 및 방전전류-시간 특성을 측정하여 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충전제를 증가 배합시킨 EP 고무에 일정한  $\gamma$  선을 조사시켰을 때, 충전제량이 많이 배합될수록 충전전류 및 방전전류는 증가함을 확인했다.
- 2) 미 조사된 시료보다  $\gamma$  선 조사되어 있는 쪽의 충전전류 및 방전전류가 높은 것을 확인했다.
- 3) 시간에 대응한 충전 및 방전전류의 열화 특성은 흡습 전보다 흡습 후가 더 큰 열화전류가 흐르고 있음을 확인했으며, 열처리 후나 재열처리 후의 열화 특성은 거의 동일한 전류 값을 나타내고 있으므로 열처리의 영향은 거의 받지 않는다고 생각된다. 또한 시간이 경과함에 따라 충전 열화전류는 감소하고 있음을 확인했다.
- 4) 충전전류 및 방전전류의 측정이 비파괴적 방사선 절연열화진단 지표로 이용 가능함을 확인했다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Yamanaka, T. Fukuda, G. Sowa, M. Leda, M. Ito, and W. Kawakami, "Ultralow-frequency dielectric properties of EPR with filler", IEEE Trans. DEI., Vol. 27, p. 1073, 1972.
- [2] S. Yamanaka, T. Fukuda, G. Sowa, M. Leda, M. Ito, and T. Seguchi, "Effect of filler concentration on electrical conductivity and ultralow-frequency dielectric properties", IEEE Trans. DEI., Vol. 2, p. 54, 1995.
- [3] R. F. Ohm, "The Vanderbilt Rubber Handbook Thirteenth Edition", R. T. Vanderbilt Company, p. 2, 1990.
- [4] P. R. Nannery, "Extending the service life of 15 kV polyethylene URD cableusing silicone liquid", IEEE Trans. or Power Delivery, Vol. 4, No. 4, p. 1991, 1989.
- [5] Y. Ebinuma and N. Masui, "The characteristic of residual charge for water-tree degraded XLPE and the measurement method", IEEJ Trans. FM., Vol. 127, No. 2, p. 108, 2007.
- [6] A. T. Bulinski, J. P. Crine, B. Noirhoome, R. J. Densley, and S. Bamji, "Polymer oxidation and water treeing", IEEE Trans. DEI, Vol. 5, No. 4, p. 558, 1998.
- [7] T. Kumazawa, H. Date, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru, "Characteristic of Bow-tie Water Tree in XLPE Including Contaminants (3)", 1999 National Convntion Record IEE Japan, No. 374(199-3), 1999.
- [8] T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru, "A syudy on behavior of impurities in water-tree", IEEJ Trans. FM, Vol. 124, No. 9, p. 827, 2004.