

# 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-III

## I. 서 론

최근 원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 안전보호 계통으로 사용되는 전선 및 케이블류는 끊임없이 방사선에 조사되어 열화하게 되며, 사십여년의 발전소 수명이 다하였을 때 냉각재 상실사고와 같은 중대한 사고가 일어나도 그 기능에 이상이 없는 높은 안전성과 신뢰성이 요구되고 있으며<sup>3,4,5)</sup>, 각종 전기설비 기기에 대한 절연열화의 정도를 진단하기 위해 새로운 열화진단법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한, 원자로 격납용기내에 설치되어 있는 대표적인 케이블류의 고분자 전기 절연 재료인 에틸렌 프로필렌 고무<sup>1,2)</sup>(EPR; Ethylene Propylene Rubber)는 절연과피를 방지하기 위해 기계적 강도에 대해서는 충분히 고려하여 만들고 있지만 전기적 특성에 대해서는 충분치 않다. 본 연구에서는 산소, 진공 및 공기의 조사 환경안에서 0~600[kGy]의 방사선으로 조사한 EPR 시료를, 비파괴적 진단 방법인 충전 및 방전전류를 측정하고, 그 결과로부터 EPR의 절연열화 특성이 조사환경 및 조사량에 의해 어떻게 영향을 받는지를 검토했다<sup>6,7)</sup>.

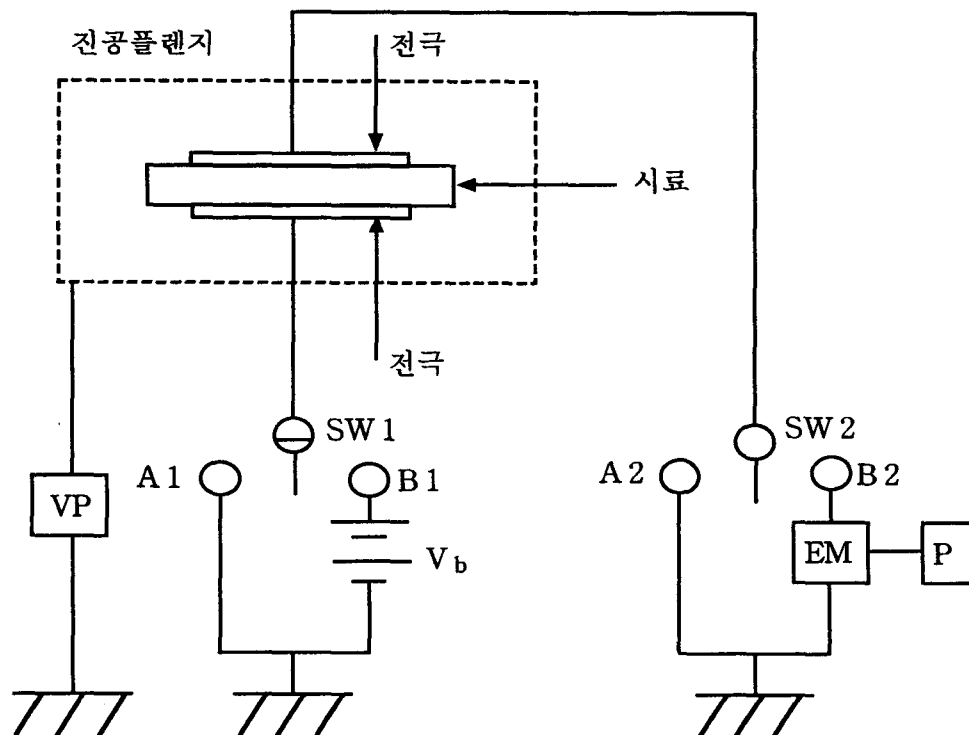
## II 시료 및 측정방법

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[°C]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 $\phi$ ]의 크기로 금증착한 후 그 위에 Al Foil 전극을 사용했다. Table.1에 방사선의 조사환경과 조사량관계를 나타내었다.

Table.1 Condition of Irrdiated Diagnosis on EPR

조사 환경 \ 조사 량	100[kgy]	200[kgy]	400[kgy]	600[kgy]
산 소 중 조 사	○	○	○	○
진 공 중 조 사	○	○	○	○
공기중 조사[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 충. 방전전류의 측정회로도를 나타내었으며. 충전전류는 우선 시료를 진공플랜지 내에 셋트한 후 진공펌프로 진공시킨 후 SW1, SW2를 각각 A1, A2에 연결하여 30분동안 접지한다. 그 후 SW2를 B2 측으로 하여 -500V를 120분간 충전전류를 측정하였다. 또한 방전전류는 120분 정각에 SW1을 A1으로 연결하여 60분동안 측정하였다.



- VP : 진공펌프
- EM : 일렉트로미터
- P : 기록계
- V<sub>b</sub> : 직류전원

Fig.1 measuring circuit

### III 결과 및 검토

산소중, 진공중, 공기중의 방사선 조사환경이 절연열화에 미치는지 충전전류와 방전전류 측정하고 그리고 방사선 조사량 및 충전제(4~40[phr])에 의한 영향을 검토하고자 한다.

#### III.1 산소중 조사에서의 조사량의 영향

Fig.2는 산소중에서 방사선을 0~600[kgy] 조사한 시료의 충전전류를 측정한 결과이며, Fig.3은 동일한 조건에서 방전전류를 측정한 결과이다.

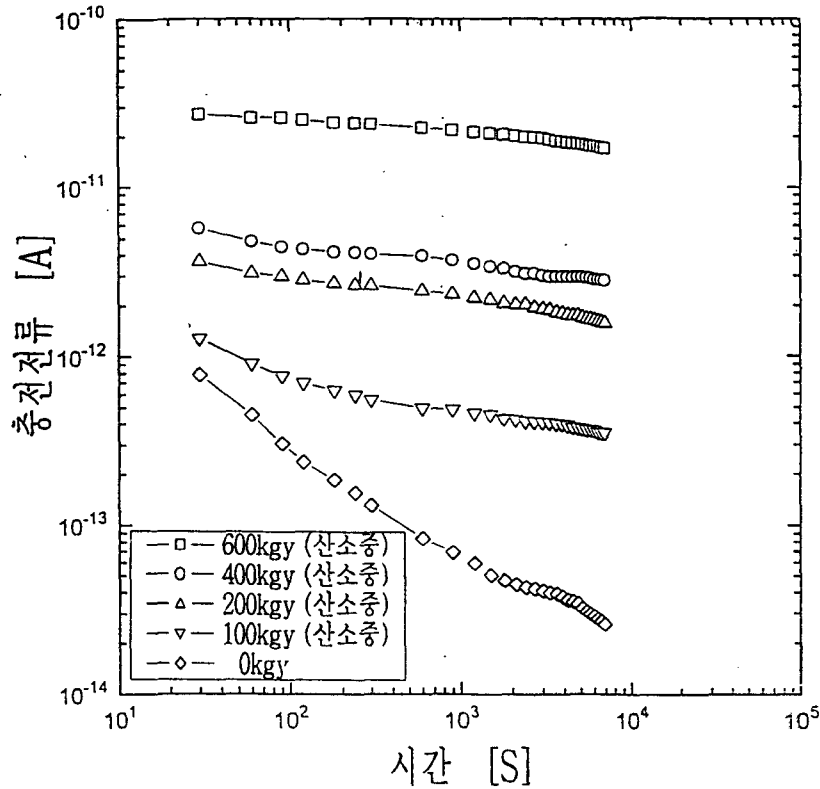


Fig.2 산소중 조사에서의 충전전류 - 시간특성

Fig.3 산소중 조사에서의 방전전류-시간특성

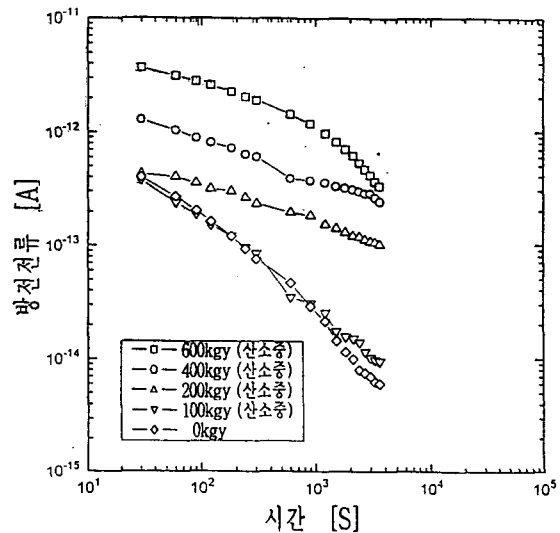


Fig.2에서 -500[V]의 직류전압을 인가 후 산소중 방사선을 조사한 시료의 30[sec] 경과시의 충전전류는  $1.2 \times 10^{-12} \sim 2.92 \times 10^{-12}$ [A] 정도이나 2시간이 경과했을 때는  $3.2 \times 10^{-13} \sim 2.1 \times 10^{-13}$ [A] 정도로 감소의 비율이 작으나 미조사(0[kgy])한 것은 30[sec] 경과시의 충전전류는  $2.79 \times 10^{-132}$ [A] 정도이나 2시간이 경과했을 때는  $2.8 \times 10^{-14}$ [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.

이는 방사선 화학 반응으로서 잘 설명할 수 있는데 산소가 충분히 공급된 상황에서는 폴리에틸렌에  $\gamma$ 선 조사를 하면 산화가 일어나게 된다. 이것은 Fig.16과 같이 조사에 의해서 발생한 자유 라디칼이 산소와 반응하여 퍼옥시라디칼(ROO·)을 생성하며, 이것이 광이나 열에 의해 자동산화 형식을 통해 카아보닐기로 된다. 또한 산소가 충분하므로 주쇄의 절단이 일어나 붕괴형으로 된다. 특히 EPR 시료에 100~600[kgy]의 방사선이 조사될 경우 분자쇄 절단 반응이 작용하여 열화하게 되며, 이때 발생한 "C=O"기 및 성형 가공시 혼입 첨가되는 불순물 등이 쌍극자로 작용하여 전기적 특성을 저하시키는 원인으로 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 이번의 측정시간으로는 짧으며, 보다 오랜 시간동안 측정하므로써 누설전류 성분을 측정할 수 있다고 생각된다. 또, 조사량이 클수록 충전전류 및 방전전류가 모두 증가함을 나타내고 있는데 즉, 누설전류가 증가한다고 하는 것은 절연저항이 저하한다고 하는 것이며, 방사선의 조사량이 클수록 더 많은 열화가 일어난다고 생각된다.

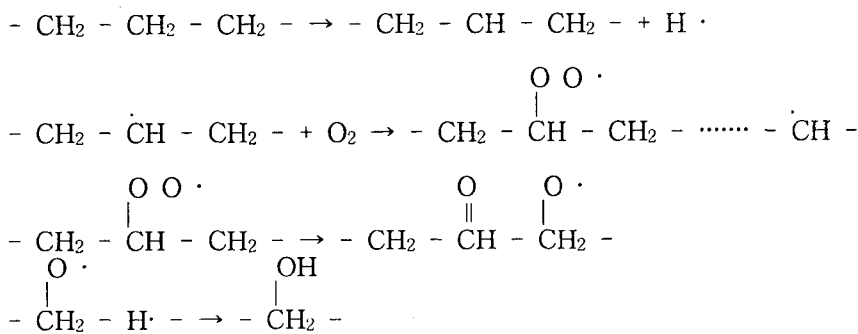


Fig.16 EPR의 산소중 산화반응

## III.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 직류전압을 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] 정도에서 전류값의 차가 거의 없이 감소하며 60분이 경과했을 때는  $6 \times 10^{-14} \sim 1.4 \times 10^{-13}$ [A] 정도로 전류값이 감소해 있다. 이는 Fig.17과 같은 방사선 화학 반응으로서 잘 설명할 수 있는데 진공중에서 폴리에틸렌에  $\gamma$  선 조사를 하면 평균분자량의 저하와 그것에 따라 점도의 저하 및 기계적 성질의 열화도 일어난다. 즉, 방사선 조사에 의하여 측쇄결합이 절단되어 그 후에 일어난 유리기를 통하여 인접분자간에 새로운 결합을 일으키는 반응이다. 가교가 진행됨에 따라 분자간의 가교가 증가하며, 연이어 3차원 망목구조의 고분자로 되어 용점이 상승하며, 또 용매에 불필요한 겔로 된다. 또, 진공중에서 선량율은 강도 신장 등 어느것에도 영향을 받지 아니하며 열화는 주로 방사선량의 크기에 의존한다고 생각된다.

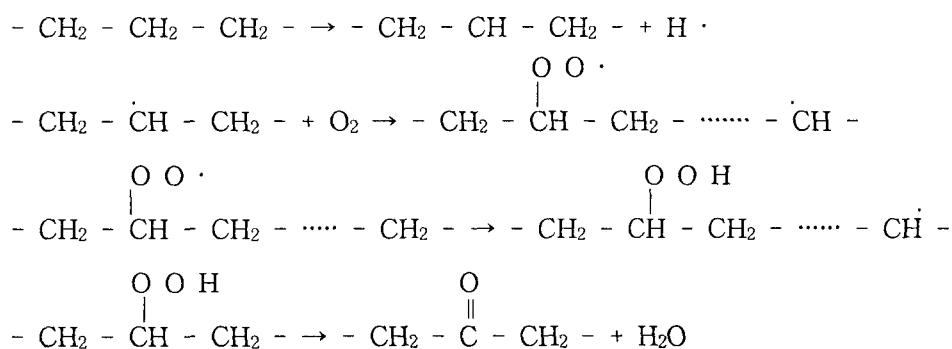


Fig.4 진공중 조사에서의 충전전류 - 시간특성

Fig.5 진공중 조사에서의 방전전류-시간특성

### III.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 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 생각된다.

Fig.6 공기중 조사(10kgy/h)에서 충전전류-시간특성

Fig.7 공기중 조사(10kgy/h)에서 방전전류-시간특성

Fig.8 공기중 조사(1kgy/h)에서 충전전류-시간특성

Fig.9 공기중 조사(1kgy/h)에 있어서 방전전류-시간특성

### III.4 동일 조사량에서 조사환경이 다른 경우의 비교

Fig.10~13은 조사환경이 각각 다른 400[kgy], 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 오랜장시간동안 조사받은 시료가 산소의 영향을 크게 받는 것으로 나타나 있는데 이것은 산소중 조사했을 때 결의 생성을 방해하는 산소에 의해 EPR의 주쇄가 절단되었기 때문에 산소중 조사쪽이 진공중 조사쪽보다 열화가 진행이 더 크다고 생각된다.

Fig.10 동일 조사량에서의 충전전류-시간특성

Fig.11 동일 조사량에서의 방전전류-시간특성

Fig.12 동일 조사량에서의 충전전류-시간특성

Fig.13 동일 조사량에서의 방전전류-시간특성

### III.5 충전제의 영향

Fig.14는 충전제인 클레이의 배합량(4~40[phr])에 따른 충전전류를 120분동안 측정된 결과이며, 30[sec] 경과시 충전전류는 4[phr] 충전.배합한 시료가  $5.4 \times 10^{-11}$ [A]로부터 40[phr] 충전.배합한 시료가  $9.9 \times 10^{-10}$ [A] 정도이나 2시간이 되었을 경우 4[phr] 충전.배합한 시료가  $1.2 \times 10^{-13}$ [A]로부터 40[phr] 충전.배합한 시료가  $6.8 \times 10^{-12}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 감소하고 있다. Fig.14는 동일 조건에서 충전전류를 60분동안 측정된 결과이며, 30[sec] 경과시 충전전류는 4[phr] 충전.배합한 시료가  $2.2 \times 10^{-11}$ [A]로부터 40[phr] 충전.배합한 시료가  $2.4 \times 10^{-9}$ [A] 정도이나 2시간이 되었을 경우 4[phr] 충전.배합한 시료가  $2.7 \times 10^{-13}$ [A]로부터 40[phr] 충전.배합한 시료가  $1.6 \times 10^{-11}$ [A] 정도로 시간의 흐름에 따라 감소하고 있다. 여기서 충전전류와 방전전류는 전압인가시 순간적으로 흐르는 과도전류 부분은 전자분극이나 이온분극에 기인한 것으로 사료되며, 적류전압을 인가후 상당 시간에 걸쳐 감쇄전류가 흐르는데 이것은 유전체의 쌍극자의 회전과 계면분극에 의한 것으로 사료된다. 또한 누설전류는 불순물 등에 기인한다. 또, 충전제의 배합량이 많은 만큼 충전전류도 방전전류도 증가해 있으므로 절연저항이 저하한다고 사료된다.

Fig.14 충전제를 배합한 시료의 충전전류-시간특성

Fig.15 충전제를 배합한 시료의 방전전류-시간특성

#### IV 결 론

본 연구에서는 에틸렌 프로필렌 고무의 시-트상의 시료의 방사선의 조사량, 조사 환경 및 충전제량의 변화에 의한 충전전류와 방전전류를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산소중, 진공중에서 방사선의 조사량이 클수록 충전전류, 방전전류도 증가했다. 즉, 이는 "C=O"기 및 성형 가공시 혼입 첨가되는 불순물 등이 쌍극자로 작용하여 전기적 특성을 저하시키는 원인으로 사료된다.
2. 공기중, 같은 조사량에서 10[kgy/h] 보다도 1[kgy/h] 의 쪽이 충전전류 및 방전전류는 커져 있다. 이는 장시간에 걸쳐 서서히 조사한 쪽이 전류는 많아진다고 생각된다.
3. 동일 조사량에 있어서는 산소중 조사의 쪽이 진공중 조사보다 충전전류도 방전전류도 모두 증가한다. 이는 산소중  $\gamma$ 선 조사시 산화반응에 의해 주쇄의 절단이 일어나기 때문에 커진다고 생각된다.
4. 충전제량이 증가할수록 기계적 강도는 증가하고 충전 및 방전전류는 커지게 되는데 절연저항이 저하하기 때문에 전기적 특성이 나빠진다고 생각된다.

#### ■ 참 고 문 헌

1. 建林賢司:"合成ゴム各論", pp.138~156, 日刊工業新聞社(1972)
2. 栢原久二外1人:"放射線と高分子, pp.127~132, 槇書店版(1972)
3. 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)
4. 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) (1992)
5. Study Committee on Measurement of Insulating Properties of Extra-high Voltage CV Cable, Electrical Cooperative Research, 36,(1980)
6. Study Committee on Solid Insulation Diagnoses, Technical report of I.E.E. of Japan(II), No 182, 1984.



7. 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)