

방사선조사에 따른 원전 저압케이블용 절연재료의 특성분석

Characterization of Insulation Materials for Low Voltage Cables in a Nuclear Power Plant with γ -Ray Irradiation

박정기*, 이우선**, 한재홍***

(Jeong-Ki Park*, Woo-Sun Lee**, Jae Hong Han***)

Abstract

This study describes the effect of γ -ray irradiation on the properties of insulation materials for low voltage cables in a nuclear power plant. The radiation effects were characterized by measuring OIT, FTIR, electrical properties of the irradiated specimens. As a result, they showed the decrease of OIT and the increase of chemical structural defects with the increase of γ -ray amount. Also, the electrical properties such as dielectric constant, $\tan \delta$ and current were changed by aging. These changes may come from the increase of chemical structural defects by γ -ray irradiation.

Key Words : Low Voltage Cable, Gamma Ray Irradiation, Aging, Insulation Material, Characterization

1. 서론

원자력 발전소에는 다양한 종류의 케이블이 사용되고 있으며, 운전전압 및 용도에 따라 저압전력케이블(이하 저압케이블), 제어케이블 및 계측케이블로 크게 분류된다. 이 중에서 저압케이블은 주로 600 V 미만의 저압에서 사용하는 것으로 스위치기어, 전동기, 축전기와 같은 저압 전기기기에 전압을

공급해주는 역할을 한다. 원전 격납용기 내부에 사용되는 저압케이블은 발전소 사고시 방사능, steam 및 냉각수가 유출되더라도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있어야 하며, 고장발생 시 많은 인력과 막대한 비용이 소요되기 때문에 엄격한 요구조건을 만족시켜야 한다[1].

이러한 저압케이블은 도체, 절연체, 외피로 구성되어 있으며, 이 중 절연체 재료로는 주로 XLPE (crosslinked polyethylene)와 EPR (ethylene propylene rubber)이 사용되고 있다. 원전 격납용기의 내부온도는 10~48°C로 유지되며, 이러한 환경에서 40년 사용시 저압케이블이 받는 방사선 조사량은 45 Mrad 정도인 것으로 알려져 있다[2]. 방사선에 노출되는 저압케이블은 고분자재료의 특성상 열과 방사선에 의해 열화가 일어나게 되며, 열화에 의한 고장을 방지하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요하다. 현재 국내에서는 송배전 전력케이블에 대해서

* : 한국수력원자력주식회사 영광원자력본부

(전남 영광군 홍농읍 계마리

Fax : 061-357-3812

E-mail : 79113832@khnp.co.kr)

** : 조선대학교 전기공학과

*** : 한국전력공사 전력연구원

2001년 3월 19일 접수, 2001년 4월 4일 1차심사완료

2001년 4월 16일 2차심사완료, 2001년 4월 19일 3차

심사완료

는 연구가 활발하지만[3-5], 방사선 환경에서 사용되는 원전용 케이블에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다[6].

따라서 본 연구에서는 원전 저압케이블의 방사선에 의한 열화현상을 파악하기 위해 절연체로 사용되고 있는 XLPE와 EPDM (ethylene propylene diene terpolymer) 수지를 선정하여 방사선 조사에 따른 열적, 화학적, 전기적 특성변화를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시료 제작 및 방사선 조사

본 실험에서 사용한 XLPE와 EPDM은 가교제거 첨가된 LDPE (low density polyethylene, MI=2.0 g/min, 밀도=0.920 g/cm³)와 EPDM (무니 점도는 ML₁₊₄(100°C) = 31.75 M, 밀도=1.360 g/cm³)을 프레스에서 180°C, 20분 동안 압축성형하여 200 μm 두께의 판상으로 제작하였다.

XLPE와 EPDM의 방사선 조사에 따른 특성분석을 위하여 한국원자력연구소에서 방사선 조사 처리를 실시하였으며, Co⁶⁰ γ 선을 선원으로 사용하였다. XLPE와 EPDM 시료에 조사된 방사선의 선량은 1.2 Mrad/h이었으며, 원전수명을 약 40년이라고 볼 때 저압케이블이 받는 조사량을 고려하여 실온, 대기 중에서 각각 50, 100 Mrad의 선량을 조사하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 산화유도시간 및 화학구조 분석

방사선 조사에 따른 산화 정도를 파악하기 위하여 시차주사열량기 (differential scanning calorimeter; DSC)를 이용하여 산화유도시간 (oxidation induction time; OIT)을 측정하였으며, ASTM에 나와 있는 조건을 사용하였다[7]. 먼저 시료의 온도를 질소분위기에서 10°C/min의 속도로 200°C까지 승온한 다음 이 온도에서 5분간 유지한 후 산소분위로 바꾼 상태에서 발열반응인 산화반응이 나타나는 시간을 측정하였다. 이때 질소와 산소의 유량은 50 ml/min이며, 시료량은 약 10 mg이었다. 산화유도시간은 그림 1과 같이 산화반응시의 경도 피크 및 기준선으로부터의 접선이 교차하는 지점으로 정의된다.

화학구조 분석은 적외선분광기 (fourier transform infrared spectroscopy; FTIR)를 사용하여 측정하였으며, 측정에 사용된 기기는 Perkin-Elmer사의 Paragon 1000이다. XLPE는 시료가 반투명하기 때문에 측정이 가능하였지만, EPDM의 경우에는 시료

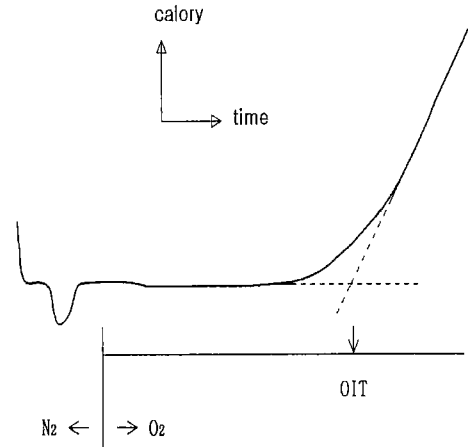


그림 1. 산화유도시간 측정 예.

Fig. 1. Example of OIT measurement.

가 완전히 불투명하여 전반사 (attenuated total reflection; ATR)의 방법으로도 측정이 불가능하였다. 열화에 의해 생성되는 화학구조결합의 정량분석에서는 흡광도 (absorbance)로 측정된 피크를 다음의 관계식 (1)을 이용하여 1,000개 탄소원자당 농도를 구하였다[8].

$$n = \frac{\epsilon A}{\rho t} \quad (1)$$

여기에서 n은 1,000개 탄소당 화학구조결합의 농도이며, ε은 흡광계수 (extinction coefficient), A는 흡광도, ρ는 시료의 밀도, t는 시료의 두께이다. 화학구조결합과 관련된 흡광계수가 표 1에 나와 있다.

표 1. 화학구조결합의 파수 및 흡광계수.

Table 1. Wavenumber and extinction coefficient of chemical structural defects.

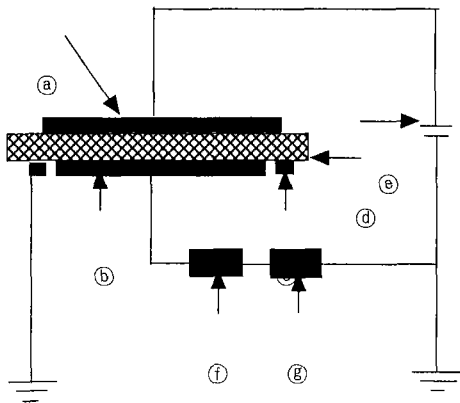
화학구조결합	파수 (cm ⁻¹)	흡광계수
말단 비닐	909	0.099
산	1720	0.055
에스테르	1742	0.162

2.2.2 유전특성 및 미소전류 측정

방사선에 조사된 시료의 유전특성 변화를 측정하기 위해 유전열분석기 (dielectric thermal analyzer; DETA)를 사용하였다. 실험은 액체질소를 사용하여

0~60°C의 온도범위에서 주파수를 변화시키면서 유전율 및 $\tan \delta$ 변화를 측정하였다. 여기서 측정온도는 실제 저압케이블이 사용되는 온도만을 고려한 것이며, 시료의 양면은 증착기 (evaporator)를 이용하여 금 증착을 하였다.

한편, 전압인가에 따른 미소전류 특성은 그림 2에 나와 있는 측정장치를 사용하였다. 시료의 양면에 1 mm 두께의 동 전극을 사용하였으며, 연면 누설전류를 방지하기 위하여 보호 링 (guard ring)을 설치하였다. Keithley-617 Electrometer를 사용하여 방사선이 조사된 시료에 전압을 초당 0.5 kV씩 증가시키면서 10 kV까지 인가하여 미소전류의 변화를 측정하였다.



- ⒶⒷ Copper Electrode
- Ⓒ Guard Ring
- Ⓓ Specimen
- Ⓔ Power Supply
- Ⓕ Keithley 617 Electrometer
- Ⓖ Computer

그림 2. 미소전류 측정장치 개략도.
Fig. 2. Schematic diagram of current measuring system.

3. 결과 및 고찰

3.1 산화유도시간 및 화학구조

방사선 조사에 의한 XLPE 및 EPDM 시료의 산화유도시간 변화가 그림 3, 그림 4 및 표 2에 나타나 있다. DSC thermogram으로부터 알 수 있는 것처럼 XLPE와 EPDM 시료 모두에서 산화유도시간

은 방사선 선량의 증가에 반비례하는 결과를 보였다. 즉, 방사선 선량이 증가함에 따라 산화유도시간이 감소하였다. 이러한 산화유도시간의 감소는 방사선에 의해 시료가 열화되면서 재료 내부에 존재하는 산화방지제가 고갈되었기 때문인 것으로 판단된다. 산화방지제의 감소 기구 (mechanism)는 열화로 고분자의 사슬절단 (chain scission)이 일어나면서 반응성이 강한 라디칼 (radical)이 생성되므로 이를 억제하기 위해 산화방지제가 소모되기 때문이다[9]. 산화방지제가 감소하게 되면 고분자 시료의 산화에 대한 저항성이 감소하게 된다.

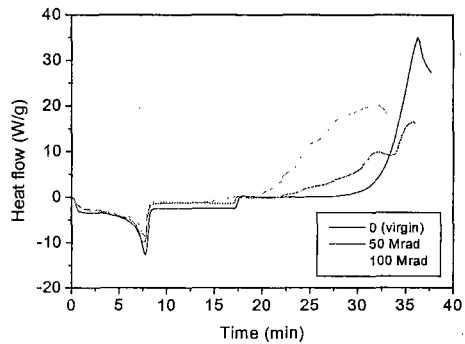


그림 3. 조사된 XLPE 시료의 DSC thermogram.
Fig. 3. DSC thermogram of γ -ray irradiated XLPE.

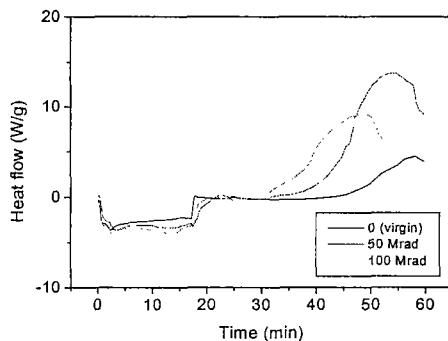


그림 4. 방사선 조사된 EPDM 시료의 DSC thermogram.
Fig. 4. DSC thermogram of γ -ray irradiated EPDM.

표 2. 방사선 조사된 XLPE와 EPDM 시료의 산화유도시간.

Table 2. OIT of γ -ray irradiated XLPE and EPDM.

(단위: 분)

시료 조사량	XLPE	EPDM
0 Mrad	12.24	21.70
50 Mrad	2.50	3.30
100 Mrad	1.98	2.49

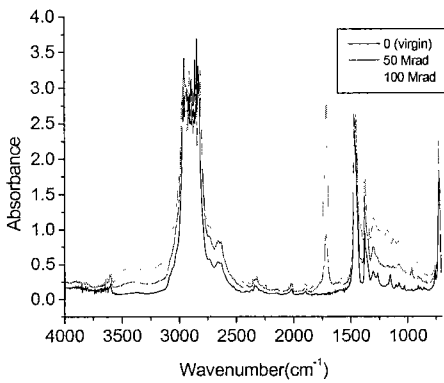


그림 5. 방사선 조사된 XLPE 시료의 IR 스펙트럼.

Fig. 5. IR spectrum of γ -ray irradiated XLPE.

표 3. 방사선 조사된 XLPE 시료의 화학구조 결함.

Table 3. Chemical structural defects of γ -ray irradiated XLPE.

(단위: 개/1000 탄소원자)

성분 조사량	말단 비닐	산	에스테르
0 Mrad	1.0371	0.20569	0.17586
50 Mrad	0.46979	0.18357	1.23369
100 Mrad	0.53573	6.51123	8.22147

또한 EPDM 시료가 XLPE의 경우보다는 산화유도 시간이 약간 길게 나타났는데, 이러한 원인으로는

EPDM의 내열성에 기인하는 것으로 보인다. 즉, EPDM은 XLPE와 달리 온도증가에 덜 민감한 무기 충전제를 함유하고 있기 때문에 내열성이 우수한 것으로 알려져 있으며, 따라서 고온에서 운전되는 환경에서는 EPDM 케이블이 주로 사용되고 있다[10].

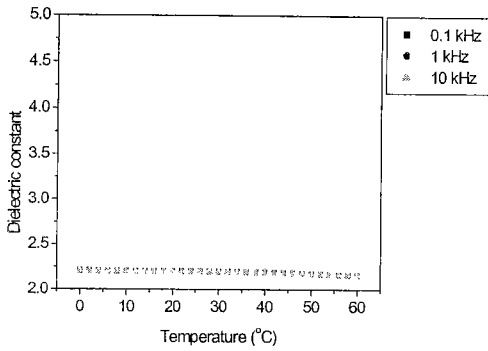
한편, 방사선 조사에 의한 XLPE 시료의 화학구조 결함 분석결과가 그림 5와 표 3에 나와 있다. IR 스펙트럼으로부터 알 수 있는 것처럼 방사선 조사에 의해 화학구조결함이 증가하는 경향이 나타났으며, 특히 1742 cm⁻¹ 부근의 에스테르 (ester) 성분이 큰 변화를 나타내었다. 이러한 에스테르 성분은 고분자 열화시 발생하는 카르보닐 기 (carbonyl group) 성분과 밀접한 관련이 있는 것으로, 방사선에 의해 열화가 크게 일어났음을 의미한다. 표 3에 나와 있는 것처럼 방사선 조사량 증가에 따라 말단 비닐 (terminal vinyl)과 산 (acid)은 감소 후 증가하는 경향을 보이며, 에스테르 성분은 계속 증가하는 경향을 보인다. 우선 말단 비닐과 산의 경우에는 50 Mrad에서 분자내 존재하는 이중결합이 절단되었다가 100 Mrad에서 다시 가교되는 현상이 일어나는 것으로 보이며, 에스테르의 경우에는 주사슬 (main chain) 절단이 계속적으로 증가하여 나타난 현상인 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 방사선 열화에 의해 XLPE 시료내에서 산소와 관련된 결함이 크게 증가함을 알 수 있다.

3.2 유전율 및 tan δ

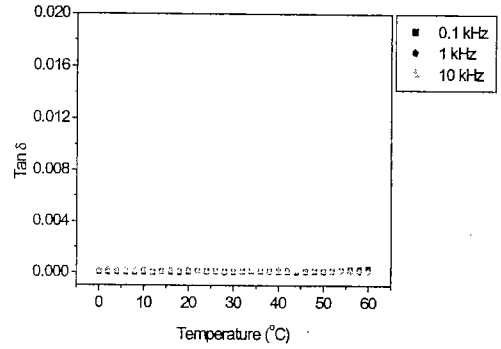
그림 6은 방사선 조사된 XLPE 시료의 유전율 측정 결과이다. 그림으로부터 방사선 조사에 의해 유전율이 증가하는 경향을 알 수 있으며, 이와 같은 유전율 증가는 카보닐기와 같은 극성기가 크게 증가하면서 나타난 것으로 판단된다[11].

그림 7에는 방사선 조사에 따른 XLPE 시료의 tan δ 변화가 나와 있다. 전체적으로는 유전율의 경우와 마찬가지로 방사선 선량의 증가에 따라 tan δ가 증가하는 경향이 나타났다.

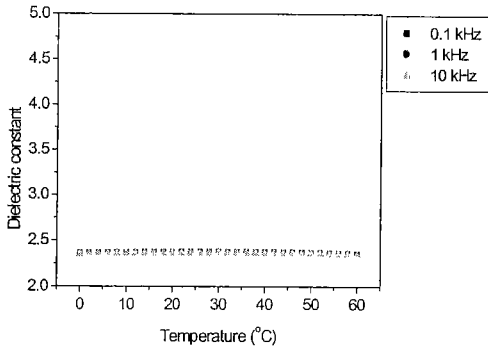
한편 그림 8과 그림 9에는 방사선 조사된 EPDM 시료의 유전율과 tan δ가 각각 나와 있다. XLPE 시료의 경우와 유사하게 방사선 조사에 의해 유전율이 약간 증가하는 경향이 나타났으나, XLPE의 경우보다는 방사선에 의해 유전율 증가가 적게 나타났다. 이러한 원인으로는 EPDM 재료가 XLPE보다는 내열성이 좋기 때문에 방사선에 의한 발열반응시 영향을 덜 받는 것으로 생각된다. 이와 같은 추론은 산화유도시간의 측정결과에서도 나타나 있다.



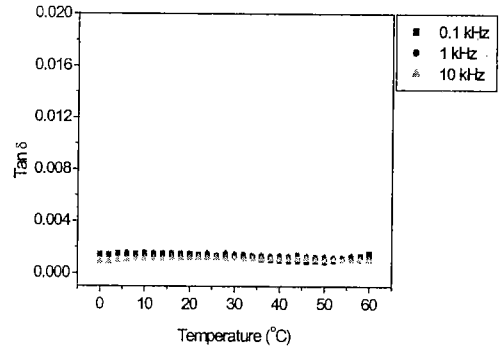
(a) 0 Mrad



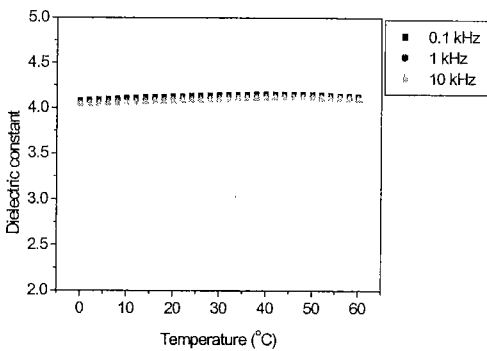
(a) 0 Mrad



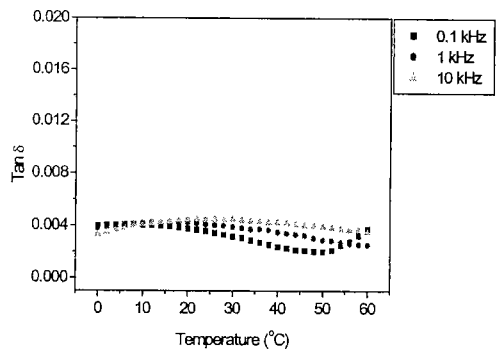
(b) 50 Mrad



(b) 50 Mrad



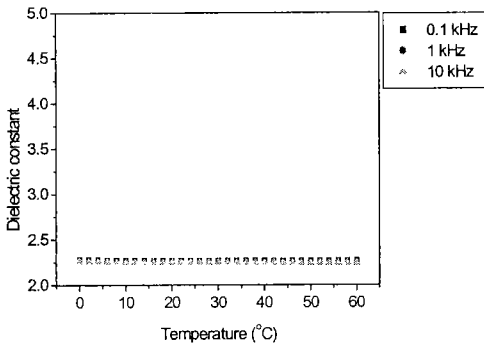
(c) 100 Mrad



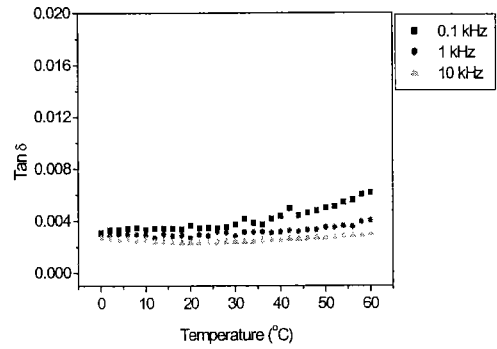
(c) 100 Mrad

그림 6. 방사선 조사된 XLPE 시료의 유전율 변화.
Fig. 6. Dielectric constant of γ -ray irradiated XLPE.

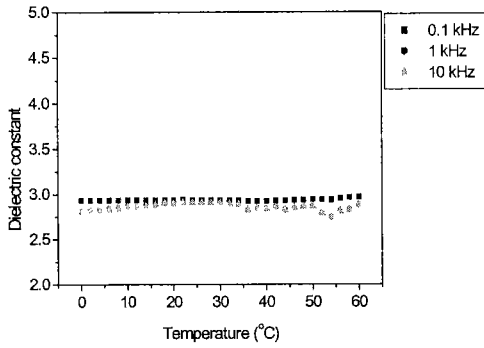
그림 7. 방사선 조사된 XLPE 시료의 $\tan \delta$ 변화.
Fig. 7. $\tan \delta$ of γ -ray irradiated XLPE.



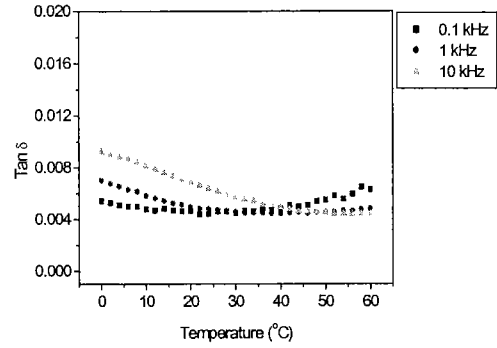
(a) 0 Mrad



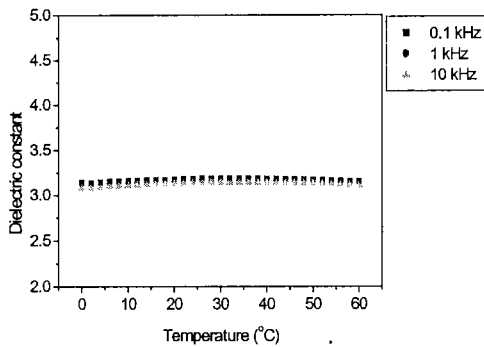
(a) 0 Mrad



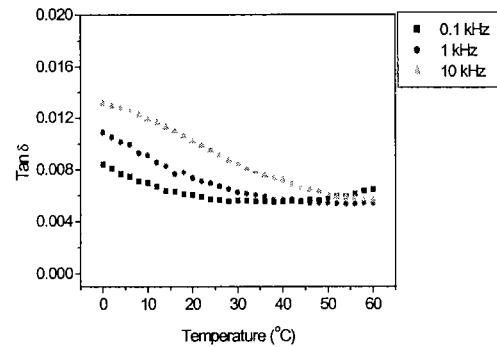
(b) 50 Mrad



(b) 50 Mrad



(c) 100 Mrad



(c) 100 Mrad

그림 8. 방사선 조사된 EPDM 시료의 유전율 변화.
Fig. 8. Dielectric constant of γ -ray irradiated EPDM.

그림 9. 방사선 조사된 EPDM 시료의 $\tan \delta$ 변화.
Fig. 9. $\tan \delta$ of γ -ray irradiated EPDM.

그림 9의 $\tan \delta$ 변화에서는 방사선 선량 증가에 따라 약간 증가하는 경향이 보였으며, XLPE와 비교하여 손실값이 크게 나타났다. 이는 EPDM 시료 자체가 XLPE보다는 $\tan \delta$ 증가에 기여할 수 있는 극성기들을 많이 갖고 있기 때문이라고 생각된다. 즉, EPDM에는 약 120 phr (parts per hundred resin) 정도의 많은 충전제가 함유되어 있기 때문에 극성기나 이온성 불순물이 많이 존재할 것으로 판단된다.

3.3 미소전류 특성

그림 10은 방사선 조사된 XLPE 시료에 10 kV까지 전압을 인가하면서 측정한 미소전류 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 미소전류는 전압 증가와 방사선 선량에 비례하여 증가하는 결과가 나타났다. 이와 같은 원인으로서는 방사선에 의해 열화된 시료 내부에서 전기전도에 기여할 수 있는 극성기 또는 저분자량 성분 등이 크게 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 한편 EPDM 시료의 경우에도 그림 11과 같이 XLPE와 유사한 경향이 나타났으나, 미소전류의 크기 측면에서는 XLPE 시료보다 작은 전류값을 나타내었다. 이와 같은 차이는 EPDM 시료가 우수한 내열성을 갖고 있고, 열전도도가 작기 때문인 것으로 생각된다[12].

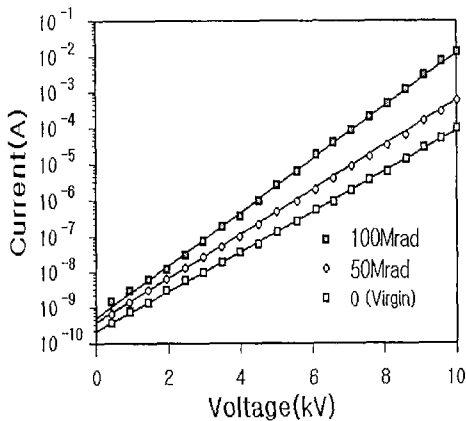


그림 10. 방사선 조사된 XLPE 시료의 미소전류 변화.

Fig. 10. Current change of γ -ray irradiated XLPE with the applied voltage.

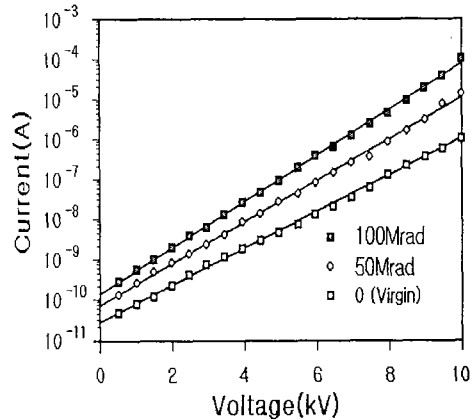


그림 11. 방사선 조사된 EPDM 시료의 미소전류 변화.

Fig. 11. Current change of γ -ray irradiated EPDM with the applied voltage.

4. 결론

원전 저압전력케이블용 절연재료에 대한 방사선 조사의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방사선 선량의 증가에 따라 XLPE 및 EPDM 시료 모두에서 산화유도시간이 감소하는 결과가 나왔으며, 재료 자체의 내열성과 관련이 있는 것으로 나타났다.
- (2) 방사선 조사로 인해 화학구조결합이 크게 증가하였으며, 특히 카르보닐 기와 관련된 에스테르 성분이 매우 높은 농도를 나타내었다.
- (3) 전체적으로 방사선 선량의 증가에 따라 유전율과 $\tan \delta$ 가 증가하는 경향을 보였으며, 전압인가에 따른 미소전류도 비례적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 전기적 특성의 변화는 화학적 구조결합의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] TR.92NJ10.96.01, "원전수명관리(I)", 전력연구원 연구보고서, Vol. 5, pp. 9-15, 1996.
- [2] 김복렬 외, "원자력발전소 케이블의 상태감시

- 기법 연구동향”, 전기학회지, Vol. 50, No.1, pp. 31-38, 2001.
- [3] 정창수, 이우선, 한재홍, “지중 배전케이블의 고장원인 특성분석”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 12, No. 5, pp. 423-429, 1999.
- [4] 김상준, 한재홍, 김주용, “특성분석 방법에 의한 지중 배전케이블의 사고원인 분석”, 전기학회 논문지, Vol. 47, No. 1, pp. 32-37, 1998.
- [5] 한재홍, 김주용, 김동명, 이병성, 정년호, “배전케이블 진단결과와 교류절연파괴의 상관성”, 한국전기전자재료학회 추계학술대회, pp. 484-487, 2000.
- [6] 김기엽, 김경, 류부형, “난연제 첨가된 chlorosulfonated polyethylene의 방사선열화 연구”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 12, No. 10, pp.854-861, 1999.
- [7] Oxidative Induction Time of Polyolefins by Thermal Analysis, ASTM std. D3895-80.
- [8] E. Cernia, C. Mancini and G. Montaudo, “Contribution to the Investigation of Polyethylene by Infrared Techniques”, *Polym. Lett.*, Vol. 1, pp. 371-377, 1963.
- [9] 김종은 외, “절연층의 산화방지능력을 이용한 지중배전케이블의 잔여수명 예측 기법”, 대한전기학회논문지, Vol. 47, No. 12, 1998.
- [10] R. M. Eichhorn, “A Critical Comparison of XLPE and EPR for Use as Electrical Insulation on Underground Power Cables”, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-16, No. 6, pp. 469-482, 1981.
- [11] N. Shimizu, N. Hirano and K. Horii, “Diagnosis of Oxidation in XLPE Cable by $\tan \delta$ Characteristics”, Proc. of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solis Dielectrics, pp. 267-271, 1989.
- [12] H. C. Raine et al., “The Heat Capacity, Heat of Solution and Crystallinity of Polyethylene”, *Trans, Faraday Soc.*, Vol. 41, pp. 56, 1945.