

부분적으로 ^{60}Co - γ 선 조사된 EPR 케이블의 절연열화 특성에 관한 연구

이 성 일

충주대학교 안전공학과

(1998년 8월 14일 접수)

Electrical Degradation Properties of EPR Cable Partially Irradiated by ^{60}Co - γ Rays

Lee, Sung Ill

Dept. of Safety Engineering, Chung Ju National University, Chung Ju 123, Korea

(Received August 14, 1998)

요약: 이 논문은 원자력발전소에서 사용되고 있는 부분적으로 방사선 조사된 EPR 전력 케이블의 방사선 절연열화 진단을 행하기 위해서 전기특성을 조사한 것이다.

본 연구에서는 방사선 조사량을 100Mrad부터 200Mrad까지 증가 시킨 케이블 시료를 열화비율에 따른 방사선 조사량에 의한 충전전류 및 방전전류를 측정하여 결과 $4.3 \times 10^{-9}(\text{A})$ 로부터 $1.03 \times 10^{-7}(\text{A})$ 로 증가함을 알 수 있었다.

또한 100% 일때의 충전전류 및 방전전류를 50%, 16.7% 일때를 비교하면 후자의 케이블은 열화된 부분의 길이가 1/2, 1/6로 되므로 충전전류 및 방전전류로 1/2, 1/6로 흐름을 알 수 있었다. 열화하지 않은 22m와 66m의 케이블을 조사한 결과 66m의 케이블 시료쪽이 충전전류 및 방전전류 값이 22m 케이블보다 3배나 크다는 것을 확인했다.

이들 결과로부터 방사선을 조사한 EPR 케이블의 절연열화 진단법으로 충전전류 및 방전전류를 측정하는 것이 가능하다는 것을 확인했다.

ABSTRACT : In this paper, the electric property was investigated for insulation diagnosis of radiation of EPR electric power cables by partially irradiation with ^{60}Co - γ rays.

As the rate of radiation increased from 100Mrad to 200Mrad, charging current and discharging current were increased from $1.03 \times 10^{-7}(\text{A})$ to $4.3 \times 10^{-9}(\text{A})$.

In addition, we found charging current and discharging current of cables subjected to 50% and 16.7% irradiation changed the length of the part 1/2 to 1/6 as in comparison with cables degraded by 100% irradiation.

For 22m and 66m of cables which had not been degraded yet, we realized the value of charging current and discharging current of 66m cables is three times higher than 22m cables.

From these results, it is demonstrated that the possibility of utilizing charging current and

† e-mail : silee@kukwon chungju.ac.kr

discharging current as the diagnosis method of insulation degradation with irradiating EPR cables by ⁶⁰Co-γ rays.

Keywords : degradation, charging current, discharging current, electric power cable.

I. 서 론

최근 원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 안전방호계로 설치되어 사용되고 있는 전선. 케이블류는 끊임없이 방사선에 쬐여지고 있으며, 서서히 열화해 간다. 이들 케이블류는 냉각재 상실사고와 같은 중대한 사고가 일어나도 안전하게 기능을 수행할 수 있는 높은 신뢰성이 요구된다.

지금까지 일반전력 계통에 설치되어있는 전력케이블을 비파괴적으로 행하는 절연열화 진단법의 연구는 많이 진행되고 있으나 방사선에 의한 절연열화 진단에 관해서는 그다지 연구되어 있지 않다. 그러므로 신뢰성 및 안전성을 한층 더 향상시키기 위해서 설계 단계부터 검토하고 또한 보수 관리를 위해 비파괴적으로 케이블 및 전선류의 열화의 정도를 진단하는 것이 중요하다.^{1,2} 본 연구에서는 내산화성, 내열성, 내노화성, 내수성, 내충격성, 내오존성, 내후성, 내마모성, 전기적 성질 등이 우수한 충전제가 배합된 EPR(Ethylene Propylene Rubber) 케이블을 시료로 선정하여 방사선 조사된 EPR 전력케이블과 방사선 조사하지 않은 EPR 전력 케이블을 접속하여 방사선 조사량과 방사선 조사비율 및 길이의 변화시킨 후 임의의 직류전압을 인가후 충전전류 및 방전전류를 측정했다.³⁻⁵ 또한 충전전류 및 방전전류로서 케이블의 절연열화의 정도를 진단하고, 또한 이 방법이 전선 및 EPR 전력 케이블의 비파괴적 절연열화진단 방법으로서의 가능성을 검토했다.^{6,7}

II. 시료 및 측정회로 및 방법

본 실험에 사용한 시료는 Fig. 1과 같은 2심 EPR

전력케이블이며, 그 배합비는 EPT : 100Phr, 타르크 : 100Phr, TAIC : 1.5Phr, 논프렉스RD : 1.5Phr, 스테아린산 1.5Phr, DCP : 3.0Phr이다. 또 절연체는

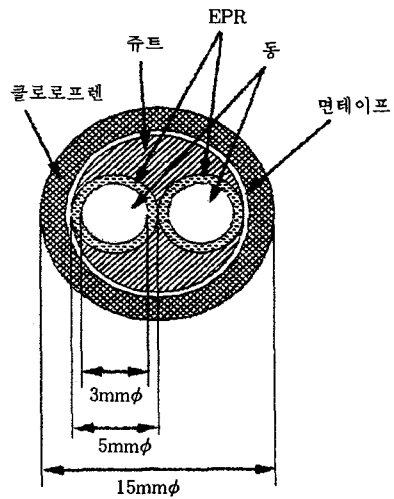


Fig. 1. Cross-section of cable.

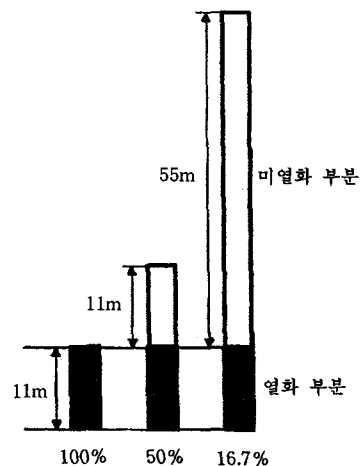


Fig. 2. A schematic illustration for partially irradiated cable.

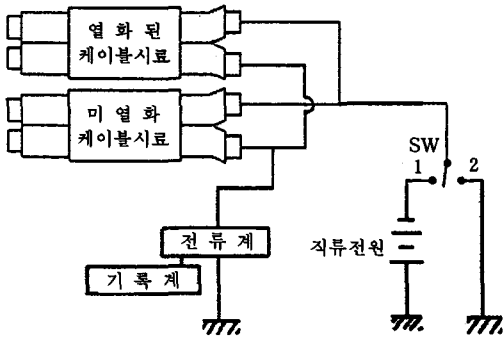


Fig. 3. Measuring circuit.

에틸렌프로필렌(EPR)이며, 시-스재는 클로로프렌고 무이다. 이들의 케이블에 공기중, 실온에서 ^{60}Co - γ 선을 조사(照射)했다. 그 선량을(線量率)은 870kGY/hr이다. 또한, 케이블 시료는 100% (균일하게 방사선 열화시킨 11m 케이블), 50% (균일하게 방사선 열화시킨 11m 케이블과 미열화시킨 11m 케이블을 접속한 것), 17% (균일하게 방사선 열화시킨 11m 케이블과 미열화시킨 55m 케이블을 접속시킨것) 등 3종류이며 Fig. 2와 같다. 충전전류 및 방전전류의 측정회로를 Fig. 3에 나타내었다. 처음에 임의의 전압 -500V를 120분간 인가하여 충전전류를 측정한 후 케이블을 단락한 상태에서 방전전류를 60분간 측정했다.

III. 연구 및 고찰

1. 조사량의 영향

Fig. 4~6은 방사선조사 비율이 100%, 50%, 16.7%인 케이블 시료에 있어서 방사선 조사량(100Mrad, 150Mrad, 200Mrad)에 따른 충전전류-시간특성을 측정된 결과이다.

방사선 조사 비율이 100%, 50%, 16.7%인 케이블 시료에 있어서 방사선 조사량(100Mrad, 150Mrad, 200Mrad)에 의한 충전전류-시간특성을 측정된 결과가 Fig. 4~6이며, 같은 조건에서 Fig. 7~9는 방전전류-시간특성을 측정된 결과이다. 시간의 증가와 더불어 방사선 조사량이 100Mrad에서 200Mrad로 증가

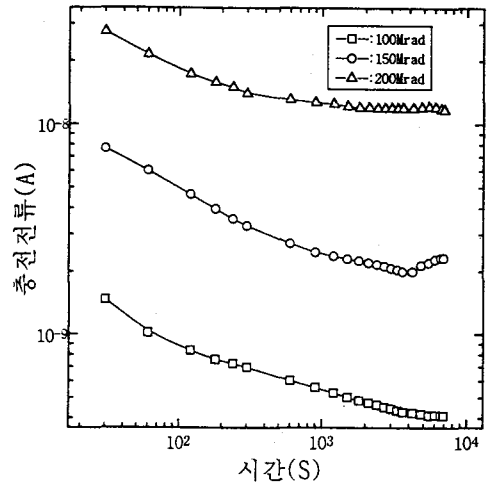


Fig. 4. Charge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 100% degradation.

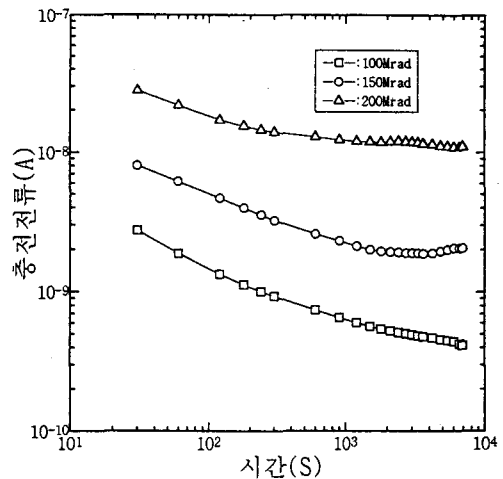


Fig. 5. Charge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 50% degradation.

함에 따라 충전전류 및 방전전류도 $4.3 \times 10^{-9}(\text{A})$ 에서 $1.03 \times 10^{-7}(\text{A})$ 로 증가했음을 분명하게 볼 수 있는데 이는 방사선 화학 반응으로서 잘 설명할 수 있다. 본 실험에 사용한 EPR은 에틸렌과 프로필렌의 비율이 50대 50인 공중합체이며, 우선 폴리에틸렌에 공기중에서 γ 선 조사를 행하면 산화가 일어난다. 이것

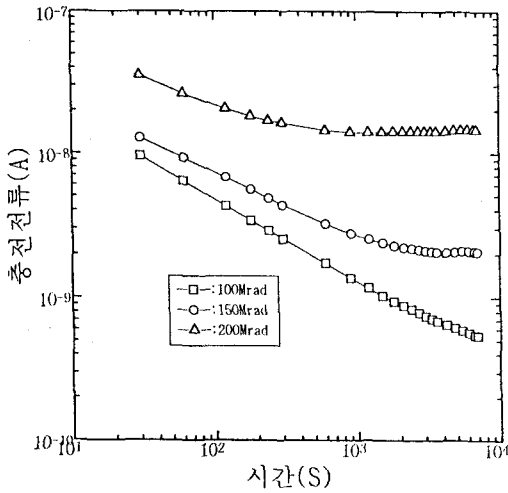


Fig. 6. Charge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 100% degradation.

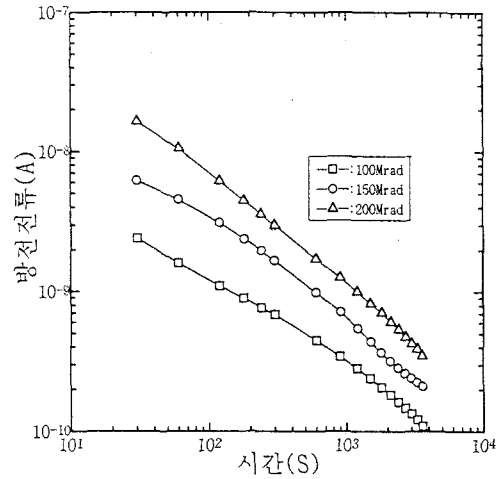


Fig. 8. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 50% degradation.

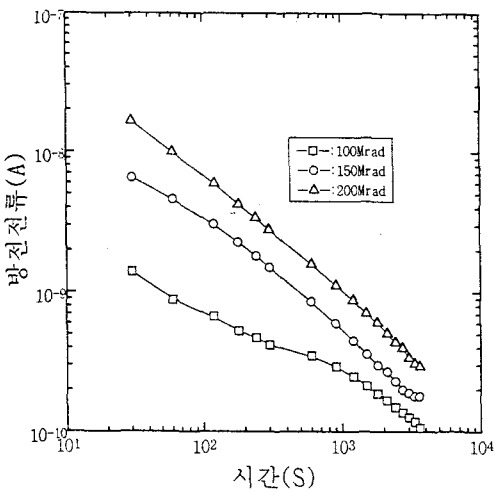


Fig. 7. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 100% degradation.

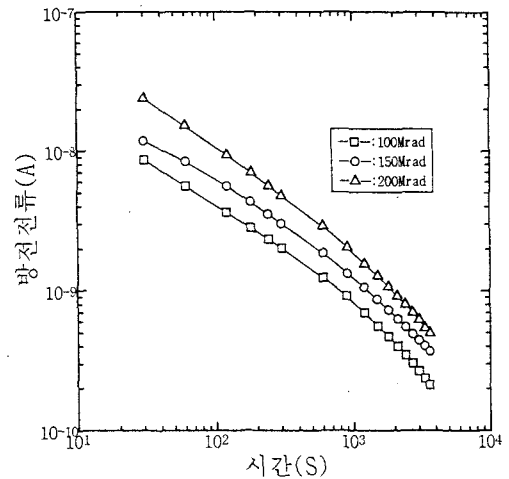
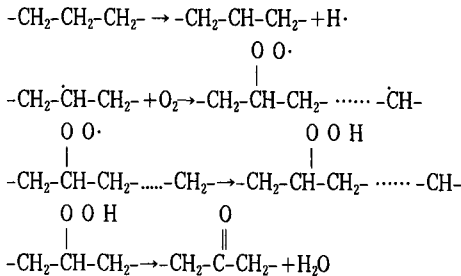


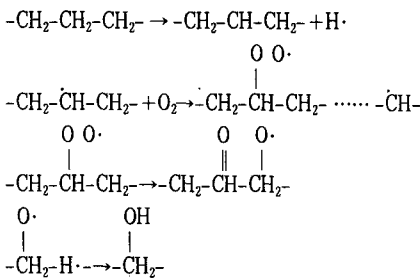
Fig. 9. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation dose for 16.7% degradation.

은 照射에 의해 발생한 자유라디칼이 산소와 반응하여 퍼옥시라디칼($\text{ROO}\cdot$)을 생성하며, 이것이 光이나 열에 의해 자동산화형식을 통해 카르보닐기로 된다. 퍼옥시라디칼보다 카르복실기가 발생하는 과정에는 Fig. 10과 같은 2가지 반응이 있다. 폴리에틸렌은 산소가 부족한 상황에서는 가교형 고분자이지만 산소가

충분히 공급된 상황에서는 주쇄의 절단이 일어나 붕괴형으로 된다. 이러한 산화반응, 화학 반응에 의해 발생한 수분(H_2O) 및 성형가공시 혼입 첨가되는 불순물이 EPR 케이블의 전기적 특성을 저하시키는 원인으로 사료된다. 또한 이 영향으로 방사선 조사량이 200Mrad일 때 $1.03 \times 10^{-7}(\text{A})$, 150Mrad일 때



(a) 가교형 산화반응



(b) 붕괴형 산화반응

Fig. 10. Radiation Chemistry Reaction of EPR

1.4×10^{-8} (A), 100Mrad일 때 4.3×10^{-9} (A)의 순서로 큰 전류가 흐르게 된다.

2. 조사비율의 영향

Fig. 11~13은 방사선 조사량이 100Mrad, 150Mrad, 200Mrad인 케이블 시료에 있어서 방사선 조사비율(100%, 50%, 16.7%)의 변화에 따른 충전전류-시간특성을 측정된 결과이며, 같은 조건에서 Fig. 14~16은 방전전류-시간특성을 측정된 결과이다. Fig. 8~9 및 11~14에서 나타난 것과 같이 동일한 조사량에서 충전전류 및 방전전류의 값은 조사비율이 큰 만큼 많이 흐르고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 유전체에 적류전압을 인가하면 충전전류 I_c (=전전류)는

$$I_c = I_d + I_a + I$$

여기서 I_d 는 순시충전전류, I_a 는 흡수충전전류, I 는

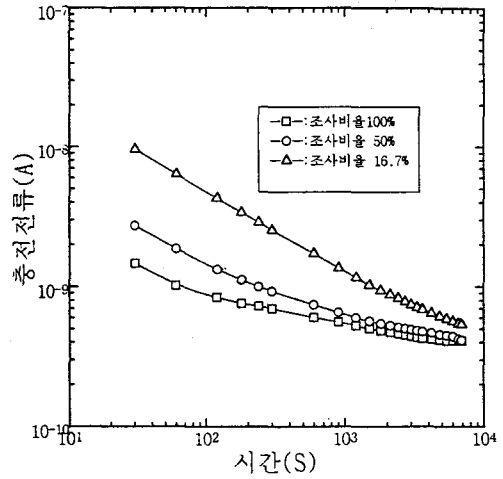


Fig. 11. Charge current-time properties of depending on the ratio of degradation for 100Mrad cable samples.

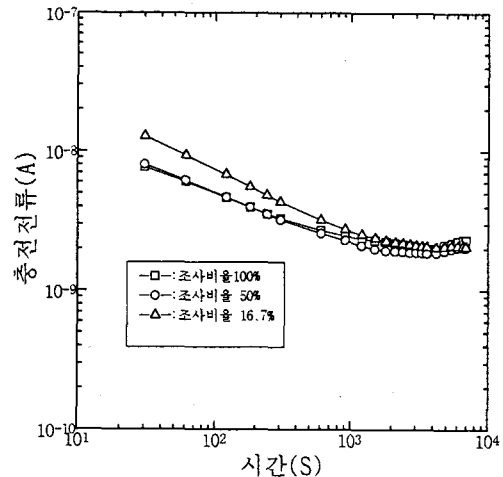


Fig. 12. Charge current-time properties of depending on γ -irradiation does for 150% degradation.

는 누설전류이다.

즉, 케이블의 기하용량과 전자분극 및 원자분극에 기인한 순시충전전류에 이어서 시간적으로 감소하여 일정한 정상누설 전류에 접근하는 전류가 흐른다. 장시간 충전하여 전류가 일정하게 된 후 전압을 0으로 하면 순시방전전류에 이어서 시간과 더불어 감소하며,

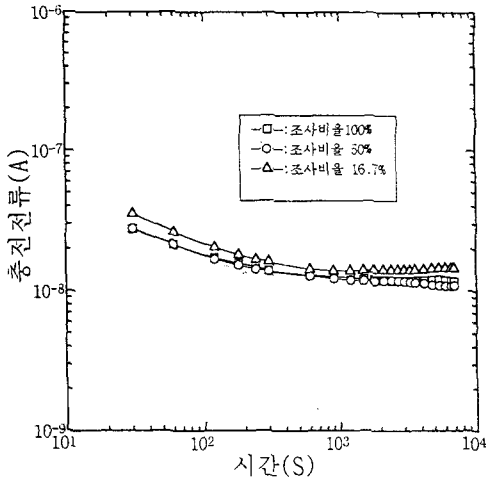


Fig. 13. Charge current-time properties of depending on γ -irradiation does for 200% degradation.

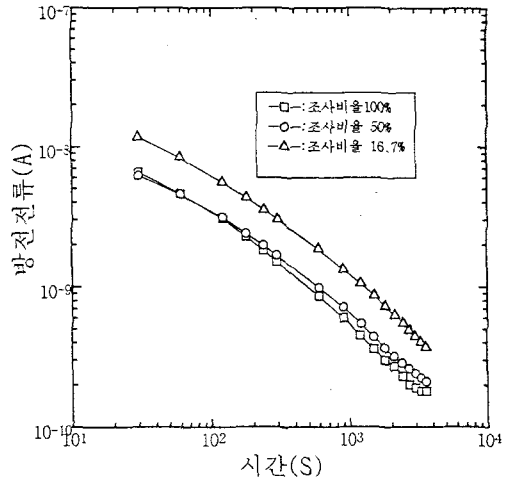


Fig. 15. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation does for 150% degradation.

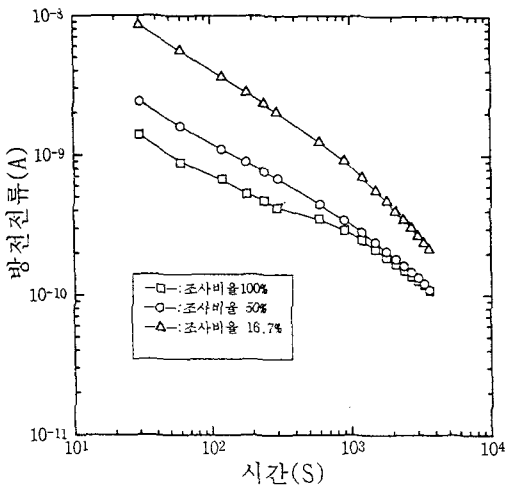


Fig. 14. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation does for 100% degradation.

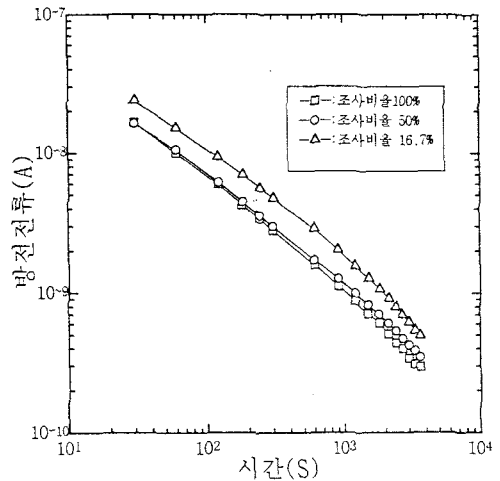


Fig. 16. Discharge current-time properties of depending on γ -irradiation does for 200% degradation.

0에 접근하는 전류가 흐른다. 순시방전전류는 단시간에 감쇠하므로 무시하면 방전전류 I_c' 는 다음 식으로 된다.

$$I_c' = -I_a - I$$

한편, 본 실험에서는 조사된 부분의 케이블의 길이

를 11m로 동일하게 하고, 조사비율의 차에 따라 전체 케이블 시료의 길이가 다르므로 즉, 조사비율이 50%와 16.7%인 케이블 시료를 100%인 케이블 시료(11m)의 충전전류 및 방전전류를 측정·비교·검토했다. 50%와 16.7%인 케이블은 열화된 부분의 길이가 1/2, 1/6로 되므로 충전 및 방전전류도 1/2, 1/6로

흐름을 알 수 있었다. 그러므로 조사비율이 높은 만큼 충전 및 방전전류는 많이 흐르게 된다. 또, 조사비율이 낮은 경우는 방사선 미조사 케이블의 충전 및 방전전류에 가까운 값의 전류로 된다. 또한 낮은 조사량 케이블에서는 어느 조사비율에 대해서도 조사량이 많아질수록 열화의 정도가 높으며, 저조사량 케이블에서는 미조사량 케이블에 가까운 값으로 될 것으로 사료된다.

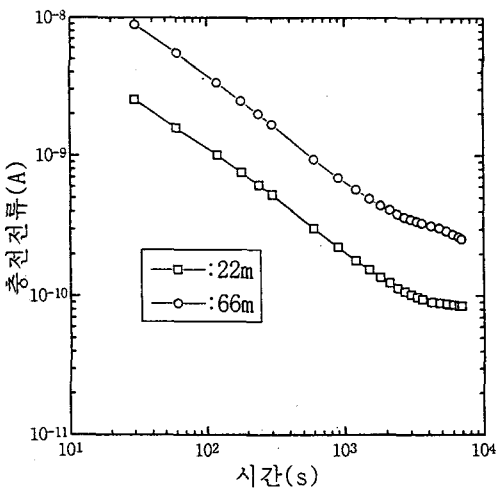


Fig. 17. Charge current-time effect of cable samples length.

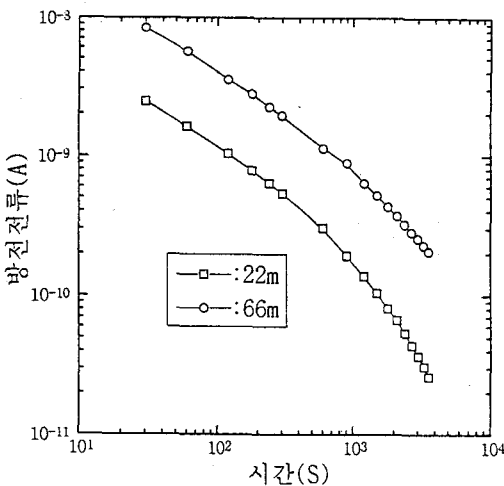


Fig. 18. Discharge current-time effect of cable samples length.

3. 케이블 길이의 영향

Fig. 17, 18은 방사선을 미조사한 22m와 66m 케이블 시료의 충전 및 방전전류-시간특성에 미치는 케이블 길이의 영향을 조사한 것이다. Fig. 17에서 충전전류는 충전전류의 장시간측에서 나타나는 누설전류성분은 도전율과 기하학적 용량의 곱으로 나타내어지며, 시간측의 값이 충분히 일정하지는 않지만 케이블 길이에 영향을 받고 있다고 생각된다. Fig. 18에서 방전전류의 값은 방전전류의 대수치(對數值)와 시간과의 관계는 직선으로 되어 있지 않다. 이것으로부터 완화(緩和) 시간이 분포된 분극(分極)을 시사하고 있다. 즉, 완화시간의 분포로서 방전전류 I_d 는

$$I_d = \frac{V}{R} \epsilon^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

이다. 방전전류는 식 (1)로부터 구해보면 그림에서 66m 쪽이 22m 쪽보다 약 3배 정도 크며, 케이블의 길이 및 사이즈에 비례함을 알 수 있다.

V. 결 과

본 논문은 원자력 발전소의 신뢰성을 향상시키고 사고를 미연에 방지하기 위해서 안전방호계로 사용되고 있는 부분적으로 열화된 EPR 케이블을 시료로 선정하여 방사선 조사량이 절연열화 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해서 충전전류 및 방전전류-시간 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 방사선 조사량이 100Mrad로부터 200Mrad로 증가시켜 충전전류 및 방전전류는 4.3×10^{-9} (A)에서 1.03×10^{-7} (A)로 증가했다.

이는 EPR에 방사선 조사 과정에서 산화가 일어나 H_2O 가 발생하여 절연저항이 감소하기 때문으로 사료된다.

2) 조사량 및 조사부분의 길이가 같을 경우 충전전류 및 방전전류는 조사비율이 낮은 만큼 적게 흐른다.

3) 미조사 케이블 시료의 경우 충전전류는 케이블 길이에 의존하며 방전전류는 케이블 길이에 비례함을 확인했다.

4) 이번 연구의 결과 충전전류 및 방전전류의 측정이 비파괴적 방사선 절연열화진단 지표로 이용 가능성을 확인했다.

참 고 문 헌

1. 山中·福田·伊藤·富田·頼口, *Trans. IEE of Japan*, 116-B, 5, 619 (1996).
2. 山中·壁谷·福田·澤·家田·伊藤·川上, *Trans. IEE of Japan*, 116-B, 5, 619 (1996).
3. S.Yamanaka, T. Fukuda, G. Sawa, M. Ieda, M. Ito, and W. Kawakami, *IEEE Trans. EI*, 27, 1073 (1992).
4. S. Yamanaka, T. Fukuda, G. Sawa, M. Ieda, M. Ito, and T. Seguchi, *IEEE Trans. DEI*, 2, 54 (1995).
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 Japan(II) No. 267, 1988.