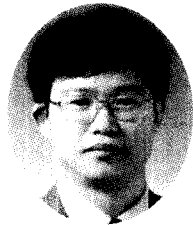


원자력발전소 계측장비의 개발 현황 및 활용



김 종 석
한전 전력연구원



이 동 주
충남대학교 기계공학과

I. 서론

원자력발전소에서 사용되는 케이블은 열악한 환경에서 견딜 수 있도록 매우 튼튼한 재질로 제작된다. 일반적으로 케이블은 발전소 수명기간 동안 도체의 저항 열, 외부 온도 및 방사선에 잘 견디어 내지만 고온 배관의 인근에 설치된 케이블은 장기간 사용함에 따라 케이블을 구성하고 있는 절연체 및 외피에 노화가 발생하게 된다. 노화의 주요원인은 열, 습기 및 방사선이며 노화를 가속시키는 정도에 따라 열악한 환경과 온화한 환경으로 구분하고 있다. 온화한 환경에 설치된 기기 및 케이블은 수십 년간 사용하여도 열적 노화를 일으키지 않는 것으로 알려져 왔으나 열악한 환경에 설치된 케이블은 외부 환경의 영향으로 절연체 및 외피가 노화되어 케이블의 전기적 성능을 감쇠시킨

다. 케이블의 열적 노화 정도를 육안으로 구분하기는 쉽지 않으며 가동중인 원전에서 케이블 시편을 채취하여 분석하는 것도 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 가동중인 원자력발전소 케이블에 손상을 입히지 않고 비파괴적으로 노화상태를 진단하는 기술 및 장비가 필요하다. 본 고에서는 원자력발전소 케이블의 노화를 유발시키는 온도 변화 및 방사선 누적 조사량을 장기간 모니터링 하는 장비와 케이블의 경화정도를 정량적으로 진단하는 장비에 대해 기술하고자 한다.

II. 케이블 노화이론

1. 케이블 노화 메카니즘

재료의 노화란 시간에 따른 재료 물성치의 변화를 의미한다. 기기를 사용해 감에 따라 기기 성능이 개선되는 일도 있지만 우리가 관심을 가지고 지켜보아야 할 부분은 사용시간의 증가와 더불어 재료의 물성치가 노화되고 이로 인해 기능이 저하하는 문제에 관한 것이다. 노화가 재료의 물성치에 여러 가지 변화를 일으키지만 우리가 관심을 가지는 부분은 기기의 안전 기능에 관계되는 몇 가지 물성치 일뿐이다. 예를 들어 절연체의 노화는 시간에 따른 유전체 변화로 측정될 수 있다. 이것은 고전압 절연체에 가장 중요한 특성이다. 하지만 DC gain 이나 누설전류 같은 것도 트랜지스터의 노화를 연구할 때 고려되어야 할 사항들이다.

내 외적 물리적 응력은 노화를 일으키는 주 원인이다. 전류, 전압 및 오옴 저항열과 같은 것은 운전에 의한 내부 응력이며 외부온도, 방사선(감마, 베타, 중성자, 자외선 등), 진동, 충격 및 기타 기계적/화학적 응력(습도, 산소 등)은 외부 응력으로 본다.

어떤 재질의 경우는 초과 응력과 기능 감쇄와의 이론적 관계가 물리적 혹은 화학적 원리에 의해 해석되고 있다. 대부분 복잡한 장치의 경우 응력과 노화감쇄의 관계는 경험에 의존하거나 시간 및 응력강도 대비 노화정도의 관찰로서 이루어진다. 이러한 경우 통계적으로 데이터가 수집된 경우라면 관계식이 유효하다고 볼 수 있다.

노화와 응력과의 관계를 적절하게 표현한 모델에는 Arrhenius, Eyring 및 Inverse Power formulation이 있다. 본고에서는 케이블 노화수명 평가에 적합한 아레니우스(Arrhenius) 방정식에 대해 기술하였다.

2. 아레니우스 방정식의 이용

다음은 아레니우스 모델의 하나로 화학적 동역학, 아레니우스 모델의 특정형태 및 가속열화에 적용한 예를 기술하였다.

자재의 1차 반응에서 일정온도에 따른 반응률은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$-\frac{dc}{dt} = Kc \quad (1)$$

c = 반응물질의 농도

K = 반응 비례상수, 특수 반응율

상수 K 는 온도함수로 알려져 왔으며 여러 가지 물질에 대해 다음과 같은 아레니우스 방정식이 성립되어진다.

$$K = -Ae^{-\phi/kT} \quad (2)$$

A = 물질의 고유상수

ϕ = 활성화에너지, 물질의 반응특성(eV)

T = 절대온도, °K

k = 볼츠만 상수 (0.8617×10^{-4} eV/°K)

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\frac{dc/c}{dt} = Ae^{-\phi/kT} \quad (3)$$

농도의 초기조건 c_0 를 c 에 대입하고 시간을 $0 \sim t$ 시간으로 하여 식(3)을 적분하면

$$\ln C = \ln(c/c_0) = Ate^{-\phi/kT} \quad (4)$$

c/c_0 량을 보면 시간 t 이후에 반응물질에 남아있는 잔존 농도는 시간 “ $t = 0$ ” 일 때 “1”에서 시간“ $t = \infty$ ” 일 때 “0”이 된다. 상기 식은 시간 및 온도의 함수관계를 가지므로 $C(t,T)$ 함수로 표현될 수 있다. 반응물질의 감쇠정도는 $(1-C)$ 로서 표현될 수 있으며 반응되어 사라진 농도량을 의미한다.

가속열화 시험 또는 가속 노화에서는 기기를 구성하는 재료의 농도 특성치에 관심을 가지게 된다. 농도의 변화가 종료한 시점에서 아래 관계로 표현될 수 있다.

$C > C_L$: 적절하게 사용된 경우

$C \leq C_L$: 재료 물성치 종료점 도달, 장치를 부 적절하게 사용한 경우

C_L 값은 사용장비의 운전조건이나 주변여건에 의해 결정되는 경험적 수치이기 때문에 종료점 C_L 이 항상 수명 종료 시점이나 고장점이 된다고 보기는 어렵다. 식(5)에서는 식(4)의 좌우 변에 로그함수를 취해서 정리한 결과이다.

$$\ln C = \ln t = \ln(\ln C) - \ln A + \emptyset/kT \quad (5)$$

혹은

$$\ln t = B + \emptyset/kT \quad (6)$$

B는 잔존 농도

농도의 종료점 C_L 은 수명 L 과 온도 T와 관련이 있으므로 식(5)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\ln L = \ln(\ln C_L) - \ln A + \emptyset/kT \quad (7)$$

우변의 첫 번째와 두 번째는 상수이며 종료점에서 정해진 수치 이므로

$$\ln L = F + \emptyset/kT \quad (8)$$

F값은 상수이며 식(8)은 아레니우스 모델을 이용한 수명평가용 1차 방정식이 된다. L_S 를 운전수명이라고 보고 T_S 를 운전온도라고 한다면 식(8)은 다음과 같이 사용될 수 있다.

$$\ln L_S = F + \emptyset/kT_S \quad (9)$$

F 값을 구해서 식(9)에 입력하여 정리하면 식(10)과 같은 수명 평가용 선형식이 얻어질 수 있다.

$$\ln (L/L_S) = \frac{\emptyset}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right) \quad (10)$$

III. 케이블 노화진단 기술

1. 노화진단 방법

원자력발전소에서 케이블 노화상태를 진단 하기 위해 가장 많이 사용하는 방법은 절연파괴 강도 측정, 산화방지 능력 측정, 자켓 및 절연체의 파단-연신율 측정, 케이블 인텐터 측정법 등이 있다.

절연파괴 강도 측정을 통한 노화진단은 케이블 절연체의 절연 파괴강도를 이용한 수명예측 기법으로 사용 년한에 따른 절연 파괴 강도값 감소정도로 노화상태를 판단하며 노화진단을 위해서는 케이블 시편 절취가 필요하다.

산화방지능력 측정을 통한 노화진단은 케이블 절연체의 열화 억제제인 산화방지제 잔류량 측정을 통해 케이블의 잔여수명을 예측하는 것이다. 이 방법은 절연파괴 강도 측정법이 파괴강도의 국부적인 요인에 의해 오차가 큰 반면에 비해 화학적 변화가 균일하게 일어난다는 장점이 있다. 국내에서는 22.9Kv 이상 케이블의 노화진단에 주로 활용하고 있으며[1], 해외의 경우 EPRI 등에서 산화방지제가 원전 케이블 절연체에 미치는 영향을 연구한 경험이 있다[2].

파단-연신율에 의한 노화진단방법은 저 전압 케이블의 경우 열 및 방사선에 의해 전기적 성질이 변하기 이전에 기계적 성질이 상당히 변하며 경화 후 균열이 발생한다는 점에 착안한 방법이며 노화에 의해 연신을 허용한도 50% 이상 감소 시 교체 시점으로 판단하며 원자력발전소 케이블의 노화상태 진단에 가장 보편적으로 사용되는 방법이다[3]. 현재 미국 내에서 NRC로 부터 최초로 20년 수명연장 승인을 받은 Calvert Cliffs 발전소의 경우도 수명연장을 위한 케이블 수명평가에 이 방법을 사용하고 있다.

케이블 인텐터에 의한 노화진단 방법은 손톱으로 케이블을 눌러 그 경도를 알아보는 방법과 유사한 방법으로 시험기의 앤빌로 케이블 자켓 표면을 눌러보는 시험 방법이다. 이것은 가동 중 원전의 경우 케이블 절연체를 절취하여 시험하기 어려운 상황을 고려하여 개발된 것이다. 본 방법은 케이블의 외부환경에 의한 열적 노화만을 고려한

것이며 케이블 절연체의 손상 이전에 케이블 자켓이 먼저 손상된다는 보수적인 관점에서 시작된 것이다. 실험결과에 의하면 인텐터 지수는 비교적 고온의 조건에서 운전되는 케이블 자켓의 노화상태를 잘 지시하고 있으며 측정된 모듈 값은 동일한 재료의 신품 케이블 또는 인공적으로 노화된 케이블과 비교 평가하여 노화정도를 판단하게 한다. 원전에서 사용중인 고무계열의 케이블 외피는 가속열화 및 아레니우스 방정식의 적용에 문제가 없는 것으로 알려져 있다. 본 방법은 비파괴적인 방법으로 가동중 원전에서 케이블을 절취하지 않고 노화진단을 할수있어 파단-연신율 측정방법과 더불어 활용 가능성이 높다

2. 노화진단 장비 개발 현황

2.1 국외 현황

2.1.1 EPRI의 Cable Indenter Aging Monitor

EPRI와 OGDEN사에서 공동 개발한 Cable Indenter는 케이블 자켓이나 절연체에 탐촉자를 눌러 자재의 물리적 반응을 측정하는 것이며 탐촉자의 끝은 원뿔의 끝을 평평하게 깎아 놓은 것 같은 형태이다. 본 장비는 탐촉자와 데이터 수집장치가 이원화 되어있으며 노트북 컴퓨터를 이용하여 측정결과를 표시하고 데이터를 저장하도록 설계되어 있다[4]. 본 장비의 형상과 주요부품의 단면도는 그림 1에 나타내었다.

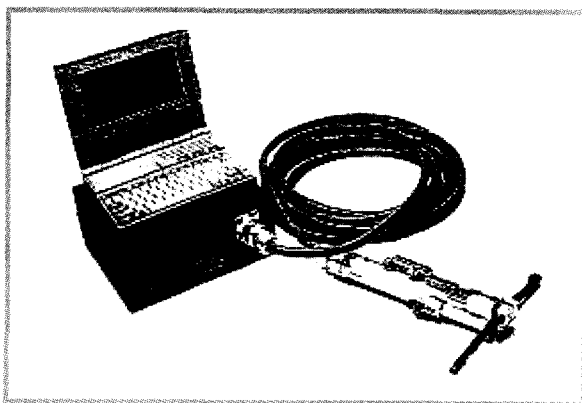


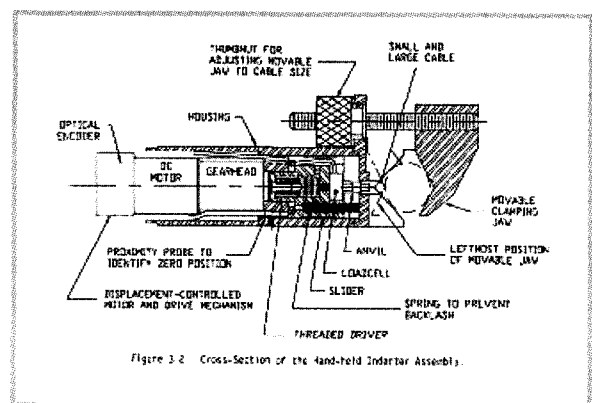
그림 1. Cable Indenter Aging Monitor

2.1.2 Centronic 의 Cable Condition과 Life Manager

영국의 원자력발전소는 케이블을 절취하지 않고 노화상태를 진단하는 장비를 개발하였다. 본 장비는 영국의 Centronic사에 의해 개발되었으며 주로 PVC 케이블의 노화진단에 활용된다. 본 장비는 PVC 케이블이 노화되면 유연성을 잃고 딱딱해지는 점과 이러한 경화 특성이 파단-연신율의 감소 특성과 비례하는 점을 이용한 것이다. 실험실에서 파단-연신율에 의한 노화 수명과 인텐터 지수 데이터를 확보하면 현장에서 측정한 인텐터 지수로 노화상태를 진단할 수 있게 된다. 본 장비는 측정된 데이터를 PC로 전송할 수 있게 제작되었다[5]. 본 장비의 형상을 그림 2에 나타내었다.

2.1.3 웨스팅하우스의 Equipment Life-time Monitor

미국의 웨스팅하우스는 발전소에 설치된 기기에 대해 주변온도, 방사선 환경 등을 지속적으로 모니터링하여 자료화하고 이를 통해 기기 건전성을 판단하기 위해 Equipment Life-time Monitor를 개발하였다. 본 장비는 표준크기가 64-58-34mm 정도밖에 되지 않아 광범위한 지역에 설치가 가능하며 최대온도, 시간대 별 온도변화를 측정할 수 있다. 최대온도 모니터는 몇 가지의 재료를 통해 수행되는데 각 재료는 특정온도를 초과하면 화학적 반응을 일으켜 원래의 은/백색을 검은색으로 변환시킨다. 최대온도 모니터는 주로 최대온도를 걸러내는데 사용한다. 배터리 작동의 소형 데이터 로그 진단모듈은 시간합수



로서의 온도 데이터를 기록한다. 진단모듈은 7,944개의 시간온도 데이터쌍을 -18°C 에서 $+75^{\circ}\text{C}$ 사이 범위로 기록한다. 사용자는 선택적으로 기록간격을 0.5초에서 길게는 4시간 정도로 조절할 수 있다. 정상 작동 조건에서 진단모듈은 약 10년간의 배터리 수명을 가진다. 필요시 회로판에 용접되어 있는 리치움 배터리를 교체할 수 있다[6]. 본 장

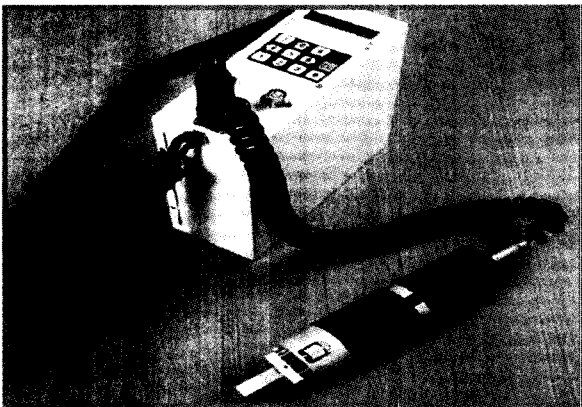


그림 2. Cable Condition과 Life Manager



그림 3. Equipment Life-time Monitor

비의 형상을 그림 3에 나타내었다.

2.1.4 SIEMENS의 Temperature Monitoring Unit

유럽지역의 발전소는 환경온도 모니터링을 위해 배터리로 작동되는 상업용 온도-시간 기록계를 사용하고 있다[7]. 장비의 형상과 온도 측정결과 그래프를 그림 4에 나타내었다.

2.2 국내 현황

2.2.1 휴대용 케이블 노화진단기

본 장비는 전력연구원이 EPRI가 개발한 Cable Indenter Aging Monitor를 국산화 하는 과정에서 사용의 편리성을 개선하여 제작한 제품이다. 본 제품은 압침의 전후진을 위해 초소형 모터를 내장하였으며 진단작업 중 케이블 외피의 고정을 위해 전동식 크래프를 사용하였다.

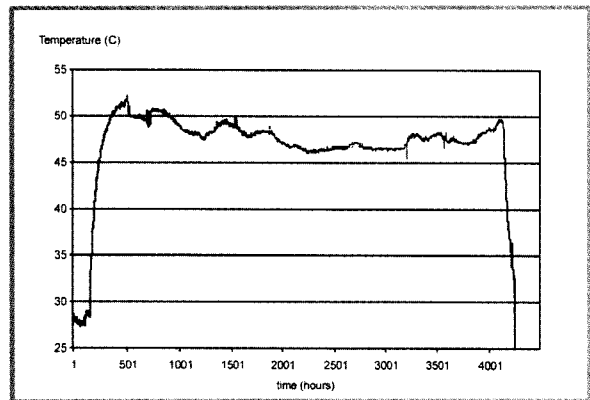
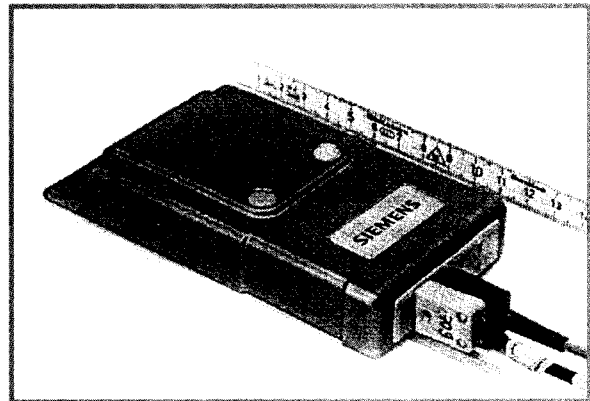


그림 4. Temperature Monitoring Unit

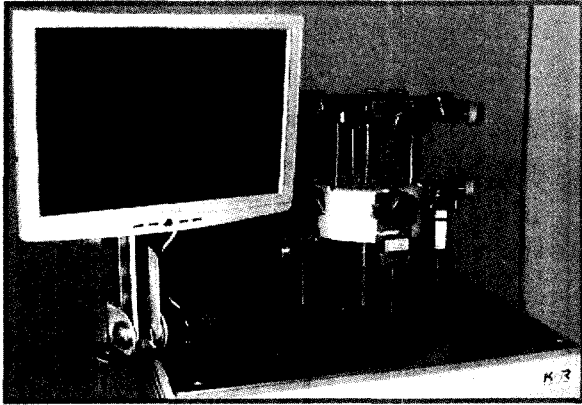


그림 8. 케이블 연신율 측정기

개발된 케이블 시험 전용 장비이다. 일반적으로 케이블 시편을 인장하면 그림 물림면의 두께가 축소됨에 따라 인장 시험 중 시편이 그림에서 빠져나오는 경우가 생긴다. 만능 시험기의 경우 시편의 탈출을 방지하기 위해 시편의 물림면을 매우 강한 힘으로 조여 주어야 한다. 본 장비는 그림을 썬기형태의 슬라이딩 구조로 제작하여 인장시험중 시편의 두께가 감소하면 그림이 썬기 작용을 하여 인장시험 중 동일한 힘으로 시편을 잡을 수 있게 해준다. 또한 본 장비는 시편 5개를 동시에 물려서 측정할 수 있도록 5개의 그림이 준비되어 있으며 파단이 발생한 점의 연신거리를 자동으로 측정하여 표시해 주는 기능을 가지고 있다. 장비의 조작 및 데이터 수집은 내장된 PC를 통해 수행된다. 그림 8은 케이블 연신율 측정기의 형상을 나타낸 것이며 그

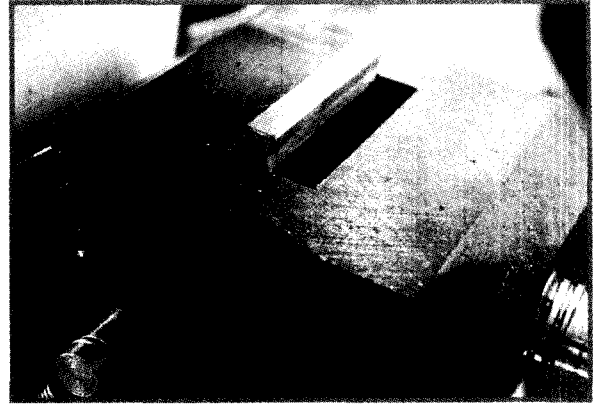


그림 9. 썬기형 시편 그림

림 9는 썬기형 시편 그림의 형상을 나타낸 것이다.

IV. 노화진단 장비 활용

1. 전자식 온도기록계

그림 10은 전자식온도기록계를 사용하여 발전소에 설치된 케이블 표면의 온도를 측정된 것을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서는 케이블 외피의 온도가 발전소의 운전 조건에 따라 25℃에서 37℃사이에서 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 10의 온도 측정결과를 바탕으로 그림 11과 같은 온도 조건에서 가속열화를 수행하게 된다.

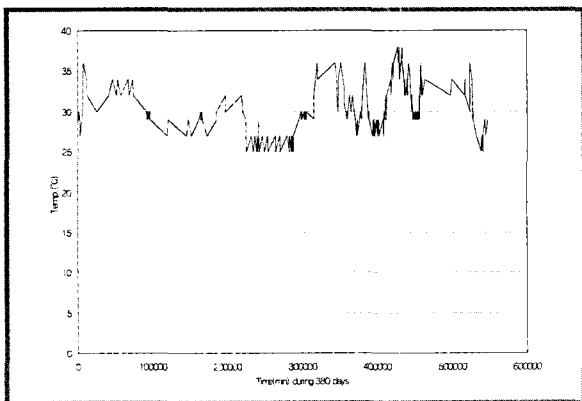


그림 10. 발전소 케이블 외피 온도 모니터링 결과

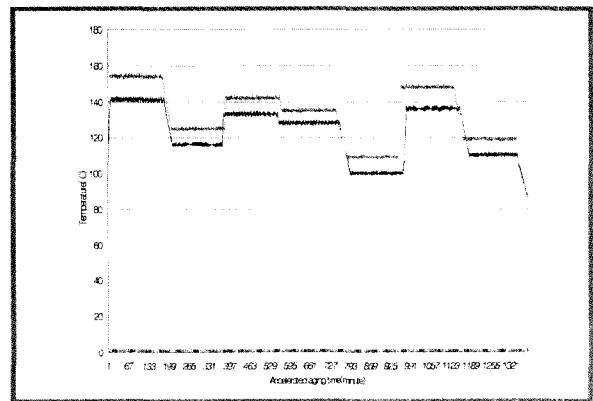


그림 11. 전기로의 가속열화 온도

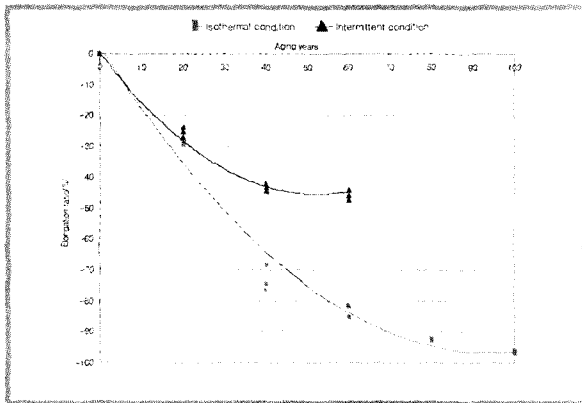


그림 12. 케이블 파단-연신율 측정 결과

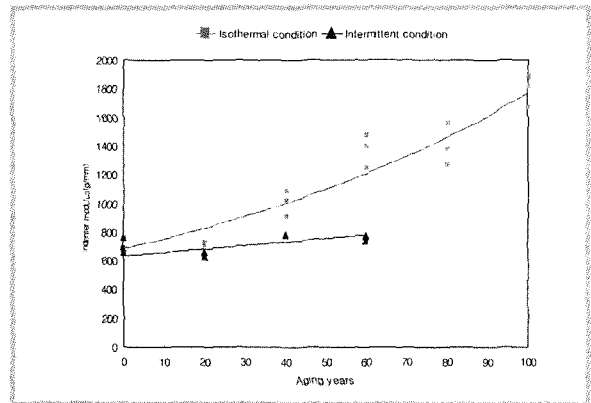


그림 13. 케이블 인덴터 값 측정 결과

2. 케이블 파단-연신율 및 인덴터 값 측정

그림 12는 네오프렌 케이블 외피를 가속열화한 뒤 노화년도별 파단-연신율의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 13은 인덴터를 사용하여 노화년도별 인덴터 지수변화를 그래프로 나타낸 것이다. 파단-연신율과 인덴터 지수값은 역비례함을 알 수 있다.

V. 결론

지금까지 원자력발전소 케이블 노화진단에 대한 기술 현황과 개발 동향에 대하여 살펴보았다. 케이블의 노화진단에는 파단-연신율 측정방법이 표준화되어 있으나 최근에는 인덴터를 이용하여 비파괴적으로 케이블의 노화상태를 진단하는 방법이 활용되고 있다. 노화년도별 파단-연신율은 인덴터 지수와 반비례를 가지므로 인덴터를 이용하여 케이블 노화진단이 가능하다. 발전소 케이블의 운전 환경을 모니터링 하고 이를 바탕으로 가속열화 실험을 하기 위해서는 환경온도 기록계가 필요하다. 최근에는 국내 IT 기술의 발전으로 해외제품과 동등 이상의 기능을 보유한 제품들이 개발되고 있다.

향후로는 케이블에 부과되는 다양한 환경조건을 모델로 노화실험을 수행하고 노화특성에 따른 물성치 변화 데이터를 얻는 작업이 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) 김상준/한재홍, 지중배전 케이블의 수명예측 기법, 한전 기술개발지 '98 여름호, 1998
- (2) EPRI, Effect of Antioxidants on Aging of Nuclear Plant Cable Insulation, EPRI NP-7140, 1991
- (3) ASTM, Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension, ASTM D412, 1983
- (4) EPRI, Cable Indenter Aging Monitor, NP-7348, 1991
- (5) John Dawson, An Introduction to Cable Conditioning and Life Management, 2004
- (6) 김종석/박준현, 원자력발전소 정밀진단 및 잔존수명 평가 기술, 전력연구원, 1997
- (7) IAEA, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety, TECDOC - 1188, 2000
- (8) 김종석, 전력연구원, 원전케이블 노화진단기 개발, '99 원자력학회 춘계 학술발표대회, 1999