

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 원전 케이블 노화 진단기 개발 Development of Nuclear Power Plant Cable Aging Tester

김종석, 정일석

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

가동중 원전의 케이블은 고온 환경에서 장기간 사용함에 따라 절연체 및 자켓이 경화되는 노화 현상을 보이게 된다. 자켓 및 절연체 노화로 인한 절연성능 저하는 곧 케이블의 신뢰성에 영향을 미치게 되므로 적절한 교체 시기를 비 파괴적으로 진단할 수 있는 노화 측정기가 필요하다. 전력 연구원에서는 원전 케이블의 노화진단을 위한 휴대용 케이블 노화 측정기(CAT, Cable Aging Tester) 시제품 제작을 완료하였다. 케이블의 열화와 indent값과의 상관관계를 알아보기 위해 간단한 열화실험을 하였다. 네오플렌 자켓의 케이블 과 비닐 자켓 케이블을 각각 150℃의 항온에서 41시간을 가속 열화 시킨 후 케이블 노화 측정기( CAT)를 사용하여 가속 열화 전후의 Indnet 값을 측정한 결과 네오플렌 자켓은 약 20%의 모듈값 증가를 나타내고 비닐 자켓은 약 40%의 모듈값 증가를 나타내었다. 본 실험의 형태는 비교적 단순하였으나 케이블 자켓의 열화가 indent값 증가와 상관관계가 있음을 입증하는데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

### Abstract

Cables in operation NPPs show the aging phenomena of stiffening the jaket and insulation by long time operation under harsh environment. Because the degradation of insulation capacity cause by aging of jacket/insulation may give influence to cable reliability, Non destructive aging tester for the determination of the proper replacing time is required. KEPRI develop a portable cable aging tester to diagnose the Nuclear power plant cables. As result of accelerated aging experiment(41 hours at 150℃), neoprene jacket indicate the 20% increase of indent modulus and 40% increase for vinyl jacket. Even this experiment was simple, I believe It was enough to prove the relationship between indent value and thermal aging of cable.

## 1. 서론

가동중 원전의 케이블은 고온 환경에서 장기간 사용함에 따라 절연체 및 자켓이 경화되는 노화 현상을 보이게 된다. 자켓 및 절연체 노화로 인한 절연성능 저하는 곧 케이블의 신뢰성에 영향을 미치게 되므로 적절한 교체 시기를 비 파괴적으로 진단할 수 있는 노화 측정기가 필요하다. 비파괴적인 케이블 노화진단 방법에는 현재 EPRI<sup>1)</sup>에서 개발되어 원전 케이블 노화진단에 활용되고 있는 cable indenter 방법이 있다. 본고에서는 케이블 열화에 의한 노화 특성과 전력연구원 에서 개발한 휴대용 케이블 노화진단기(CAT, Cable Aging Tester) indent 값의 상관관계에 대해 논하고자 한다.

## 2. 케이블 수명평가의 필요성

원자력 발전소의 케이블은 기계적 또는 전기적 고장을 유발할 수 있는 케이블 절연체의 성능 감쇄가 발생하면 노화된 것으로 볼 수 있다. 그럼에도 케이블 수명인증 시험을 수행한 결과 원자력발전소의 케이블은 예상되는 운전환경에서 40년 동안은 견딜 수 있는 것으로 증명되었고 사고 중이나 사고 후에도 그 안전기능 수행에는 변함이 없다. 그러나 설계수명 이상 원전을 연장운전할 경우 40년의 운전수명을 경과한 케이블을 모두 교체하여야 하며 이를 위해서는 많은 비용이 들어가므로 케이블의 수명을 사용 가능한 최대한 기간까지 연장하기 위해 수명평가 및 교체예정 시기 판단이 필요하다.

## 3. 케이블 노화진단 방법

### 3.1 Indent에 의한 노화진단

케이블 indent 노화진단은 전기 케이블 자켓 및 절연체의 노화 및 잔존수명을 평가하는 비파괴적 방법으로서 절연체 및 자켓의 기계적 성질인 압축율을 측정하는 것이다. 저전압 케이블의 경우 열 및 방사선에 의해 케이블의 전기적 성질이 변하기 이전에 열 및 방사선 등에 의해 기계적 성질이 상당히 변화한다. 특히 절연체의 기계적 성질은 중대한 전기적 변화가 관찰되기 이전에 경화후 균열에 상태까지 변화하게 된다. 지금까지 자켓 및 절연체의 기계적 성질은 전통적인 파단-연신을 시험으로 평가되어 왔다. 그러나 이 연신을 시험은 파괴시험이며 상대적으로 많은양의 시편을 필요로 하며 이미 설치되어 있는 케이블에 대해서는 바람직하지 못한 방법이다. 따라서 이러한 파단-연신을 시험을 대신할수 있는 Compressive modulus를 측정하는 비파괴 시험으로 압축, 풀림, 크리이프 및 복구성질에 대한 평가가 필요하다. EPRI의 연구결과<sup>2)</sup>에 의하면 자켓이나 절연체에 일정한 속도로 Probe를 가압하는 상태에서 가해진 힘을 변화거리로 나눈값은 자재의 노화상태를 일정하게 지시한다는 것을 보여주었다. 바로 이 값이 Compressive modulus이다.

케이블 절연체 및 자켓은 노화가 진행됨에 따라 이 Modulus값이 증가하게 된다. 절연체 위에 자켓이 설치되어있는 이러한 케이블 시스템에서는 자켓의 Compressive modulus 값은 바로 아래

절연체의 노화지시에 사용될 수 있다. 자켓 및 절연체에 다른 자재가 사용되었다면 자켓은 절연체의 노화지시에 사용될 수 있다. 특히 오염 저항열 보다 더 심각한 방사선 및 열에 노출된 경우 더욱 그러하다. 일반적으로 자켓의 재질은 설치시의 Pulling강도를 고려하여 선정된다. 고 에너지 전력공급 회로의 경우 절연체는 열에 대한 충분한 견고성을 가지고 전도체에서 발생하는 오염 저항 열을 견딜수 있어야 한다. 이러한 경우 자켓은 절연체에 비해 비교적 낮은 온도에서 유지되고 자켓은 절연체에 비해 그다지 높은 열적 성능을 필요로 하지 않는다. 그래서 전력 및 제어용으로 사용되는 대부분 케이블의 경우 고도의 용량 및 좋은 Pulling능력을 가지기 때문에 자켓은 대부분의 경우 절연체보다 더 빨리 노화하게 된다. 특히 원자력 안전시스템 회로의 저전류 제어회로나 정상운전시 전기가 통하지 않는 안전계통의 경우 더욱 그러하다. 만약 케이블이 고용량에 사용되고 연속적으로 가압되면 절연체는 보다 빨리 노화될 것이다. 절연체 및 자켓에 동일한 자재를 사용한 경우가 아니면 자켓은 거의 동일한 비율 혹은 더 빨리 노화 될 것이다. 따라서 자켓의 압축율을 측정함으로써 케이블의 노화상태를 가장 보수적으로 판단할 수 있다

### 3.2 가속노화 3)

안전성에 중대한 영향을 주는 기기는 설치시점부터 관련기능의 수행이 종료되는 시점에 걸쳐 다양한 손상을 받게 된다. 노화란 기기가 받은 손상으로 인하여 원래의 기능을 발휘하지 못하고 성능이 저하되는 현상을 말한다. 이러한 노화손상에 의한 수명을 파악하기 위해서 통상적으로 모의노화시험(Simulated Aging Test)이 수행된다. 이는 짧은 시간 내에 실제 환경에서 받는 손상과 동일한 효과를 주도록 하는 것으로서 가속노화(Accelerated Aging)라고도 한다. 즉 가속노화의 목적은 온도, 압력, 방사선, 습도 등의 환경인자에 의해 재료의 수명을 단시간 내에 최종수명까지 도달시키는 것이다. 따라서 사전 노화시험(Pre-Aging Tests)의 목적은 열 노화 및 방사선 노출에 의한 모의 노화시험을 통해 케이블의 성능을 확인하는 데 있다. 열 노화 실험에는 아레니우스 모델(Arrhenius Model)이 가장 보편적으로 사용되고 있다. NUREG-0588의 Section 4.4에서는 다음과 같은 아레니우스 모델이 가속 열노화를 다루는데 적합한 방법임을 기술하고 있다.

$$\frac{dR}{dT} = A' \exp\left[\frac{-E_a}{K_B T}\right]$$

여기서  $dR/dT$  : 반응속도

$A'$  : 상수

$E_a$  : 활성화 에너지(eV)

$K_B$  : Boltzman 상수( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K)

T : 절대온도 (K)

### 3.3 Arrhenius의 식에 의한 수명 산정 방법④

일반적으로 화학반응속도는 반응물질의 농도가 시간에 따라 변화하는 것을 식(1)로 나타내고 있다.

$$-dc/dt=kc^n \text{ --- (1) ,}$$

여기서 c:반응물질의 농도, t:시간, k:반응속도 상수, n:반응차수.

k의 온도 의존성은 Arrhenius의 식(2)로 표시

$$k=Ae^{-E/RT} \text{ --- (2)}$$

여기서 A:빈도인자, E: 활성화 에너지, R: 기체상수, T: 절대온도

고분자재료의 인장강도, 연신율(elongation) 등의 특성치의 저하는 화학반응의 결과이기 때문에, 고분자재료가 가지는 특성치 P는 농도 c 와 같은 것으로 가정하여, c= P로 하면, 식(1)으로부터 식(3)이 구해진다.

$$f(p) = -kt + f(p_0) \text{ --- (3)}$$

여기서 f(p): p의 함수, p<sub>0</sub>: 반응전의 p값.

1차 반응의 경우는, 식(4)로 된다.

$$\ln p = kt + \ln p_0 \text{ --- (4)}$$

식(2)을 식(4)에 대입하여, ln t를 계산하는 식(5)가 구해진다.

$$\ln t = \ln [1/A \cdot \ln p_0/p] + E/RT \text{ --- (5)}$$

p가 어떤 일정값 p<sub>e</sub>로 저하될 때의 시간(t<sub>e</sub>)을 수명으로 하면 식(6)과 같이된다.

$$\ln t_e = A' + E/RT \text{ --- (6)} \quad \text{여기서 } A' \text{는 상수}$$

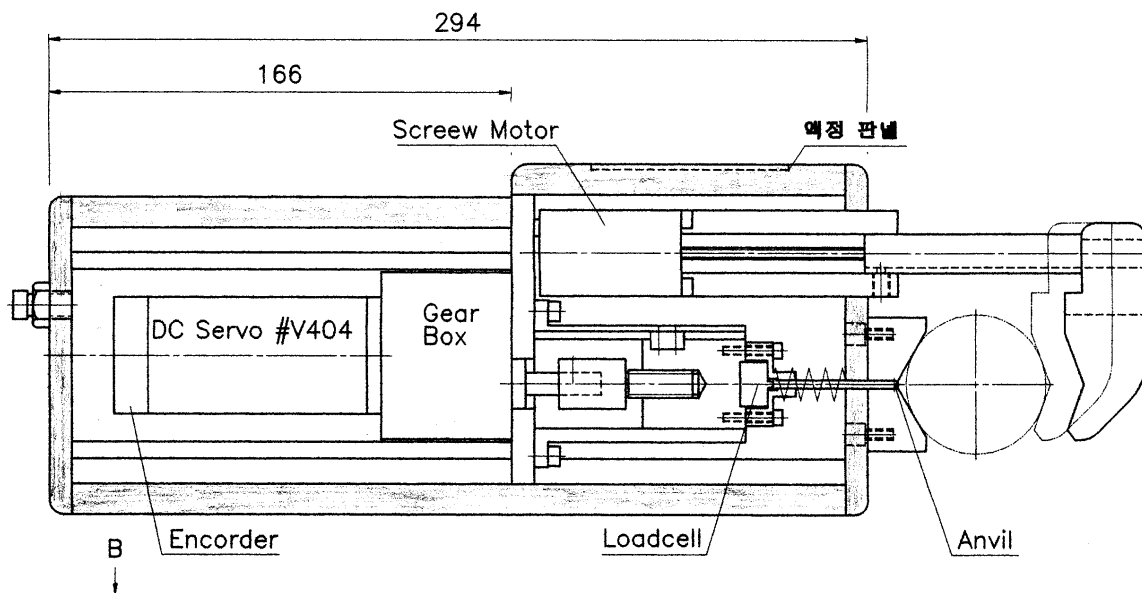
ln t<sub>e</sub>와 1/T의 직선 관계를 이용하면, 즉 고온에서 측정한 시험결과를 외삽하여, 실제 사용온도에 의한 수명을 추정한다. 수명을 추정하기 위해서는 3~4단계의 온도(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>)에 의한 특성치 p와 시간 t를 실측하여, 설정한 특성치(p<sub>e</sub>)에 도달하는 시간(t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub>)를 각 온도에서 구한다. 이어서 t를 1/T에 대하여 plot한 다음 그 직선을 T<sub>0</sub>까지 외삽하여, T<sub>0</sub>에서의 수명을 추정하게 된다.

## 4 케이블 노화진단기(CAT, Cable Aging Tester) 개발

### 4.1 배경

지금까지 가동중 원전의 케이블은 일반 배전용 케이블과는 달리 케이블 일부를 절취하여 노화상태를 확인할 수 없는 문제로 인해 케이블 노화진단은 케이블 표면을 육안으로 확인하고 교체하는 정성적 방법만을 사용하였다. 이로 인해 육안으로 드러나지 않는 자켓이나 절연체의 물성변화를 판단하기가 어려웠고 또한 교체 예정시기를 결정하는 것이 매우 어려웠다. 이러한 육안판별에 의한 교체 예정시기 결정은 자연히 보수적 성향을 띄게 되며 이로 인해 미처 수명이 다하지 않은 케이블을 교체하는 등의 경제적 손실이 많았다. EPRI에서 최초로 개발된 케이블 Indent에 의한 노화측정 방법은 여러 가지 실험을 거쳐 케이블 표면의 압축율은 케이블 노화와 비례관계가 있음이 증명되었고 국내에서도 가동중 원전의 주기적 안전성 검토(PSR) 및 발전소 수명연장과 관련하여 케이블 수명평가는 반드시 필요한바 전력연구원에서는 본 Indent 방법에 의한 케이블 노화진단기(CAT)를 국내 원전의 케이블 노화진단에 활용하기로 결정하고 휴대가 간편하고 데이터 처리 및 저장기능을 개선한 CAT 장비를 개발하였다.

### 4.2 케이블 노화진단기(CAT) 하드웨어 구성



케이블 노화진단기의 하드웨어는 크게 나누어 크램프, 엔빌, 가압력 측정부, 이동거리 측정부, 제어 및 표시판넬 부로 구성되어 있으며 각 부위별 기능 및 주요 사양은 다음과 같다.

#### 4.2.1 크램프 작동부

크램프는 엔빌에 의한 indent가 가능하도록 케이블을 고정하는 역할을 한다. 재질은 SUS304을 사용하여 견고성 및 내 부식성을 가지도록 하였으며 소형 케이블(최소 5 mm) 및 대

형 케이블(직경 600 mm)의 압축율을 모두 측정할 수 있도록 크램프 헤드를 설계하였다. 본 크램프는 screw 모타의 회전운동을 크램프의 직선운동으로 전환하도록 설계되었으며 측정후 다음 측정을 위해 자동으로 크램프가 벌어지는 기능을 보유하고 있다.

#### 4.2.2 엔빌 작동부

엔빌은 케이블 표면을 일정한 힘으로 indent하여 가압력 대비 이동거리를 측정하기 위한 장치이다. 가압력은 셋팅치에 도달할 때까지 증가하며 셋팅치에 도달하면 엔빌의 가압 작동이 멈추게 되어있다. 엔빌의 형상은 직경 2.0 mm의 원기둥으로 케이블 접촉단면 직경은 1.58mm, 1.12mm, 0.79mm, 0.56mm의 4가지로 제작되었으며 사용결과 0.56mm의 접촉단면이 소형 및 대형 케이블 모두에 변함없이 좋은 지지값을 나타내었다. 엔빌은 엔코더가 부착된 DC servo motor 및 감속기(Ratio 25:1)에 의해 저속으로 전 후진되며 케이블 표면에 접촉되면 0.01mm 단위로 최대 3 mm를 이동할 수 있다.

#### 4.2.3 압축력 측정부

케이블 표면에 엔빌이 접촉되면 Load cell & Amplifier는 엔빌에 가해지는 압축력을 0.1kg 단위로 측정하며 최대 가압력은 0~2.5 kg사이로 케이블 종류에 따라 조작판넬에서 설정하여 사용한다. 일반적으로 폴리에틸렌/비닐 계열의 자켓은 복원력이 떨어지므로 1.5kg이하로 셋팅하여 사용하여야 한다. 현재 외국산 제품은 Load Amplifier 가 별도의 박스에 케이블로 연결하여 사용하는 등 측정기가 2개의 장치로 구성되어 있지만 본 장비에서는 Load Amplifier를 장비 내부에 내장시켜 장비의 단순화를 도모하였다.

#### 4.2.4 이동거리 측정부

케이블의 노화정도를 판단하는 module 계수는 가압력을 이동거리로 나눈값으로 결정된다. 가압력은 Load cell에 의해 측정되고 이동거리는 DC 모타에 부착된 Encoder에 의해 측정되어 제어판넬로 전송된다.

#### 4.2.5 제어 및 표시 패널

EPRF에서 개발된 제품은 가압력 측정부와 노트북 PC와 연결된 조작부를 일원화 시켜 반드시 2인 1조가 있어야만 노화진단이 가능하였다. 그러나 본 제품은 측정부와 조작판넬을 한 몸체에 일원화 시켜 혼자서도 노화진단이 가능하도록 설계하였다. 또한 측정상황 및 측정후 모듈계수를 표시판에 나타내어 노화진단을 편리하게 하였고 모든 측정 데이터는 플레시 롬에 안전하게 저장되고 측정작업이 종료된 후 PC의 시리얼 포트에 연결하여 데이터를 Back-up 받을 수 있도록 설계되었다.

### 4.3 케이블 노화진단기(CAT) indent 특성

#### 4.3.1 케이블 indent 일반 특성곡선

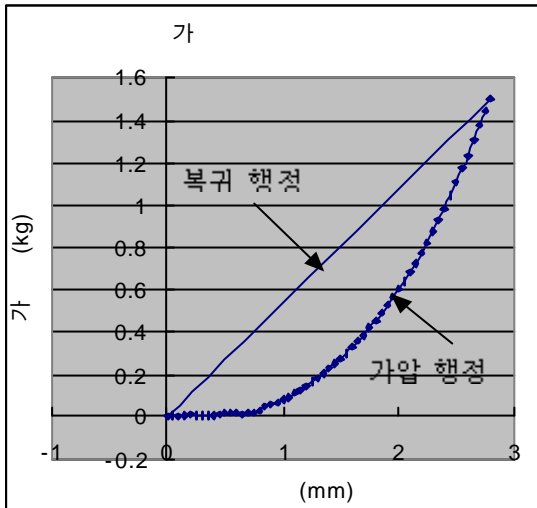


그림 2: 가압력 대비 이동거리 특성곡선

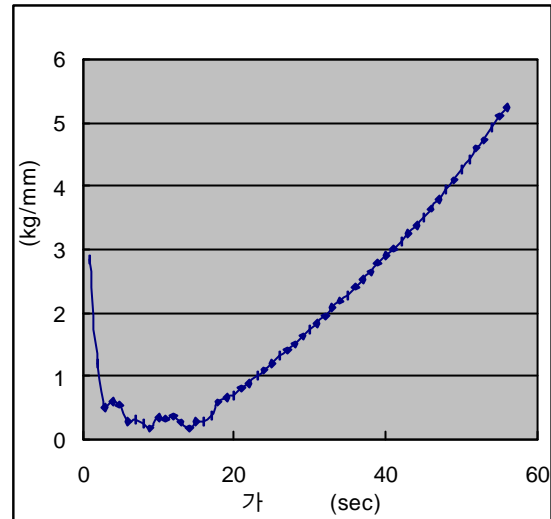


그림 3: 시간 대비 모듈계수

#### 4.3.2 가속노화 전후 Indent 특성

##### 4.3.2.1 가속노화 실험 대상

- 600v EPR 절연체/Neoprene 자켓, 3cx 8awg, LG cable 1998
- ksc3611 600v cv 2cx22 sqmm, Vinyl 자켓

##### 4.3.2.2 가속노화 실험 방법

항온 전기로를 이용하여 150°C에서 41시간 가속 열화

##### 4.3.2.3 케이블 가속 노화실험 전후 모듈계수

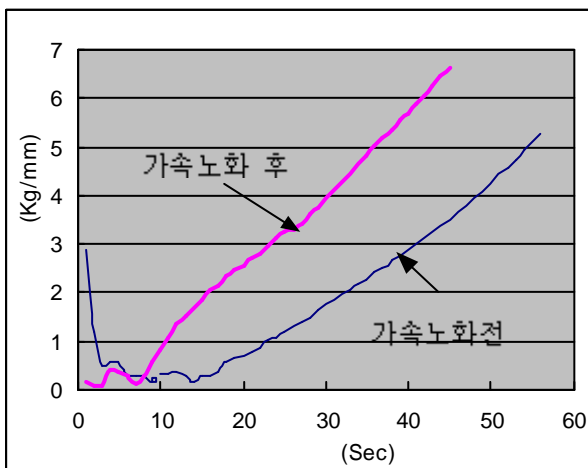


그림 4: 600v EPR/Neoprene 3 core 케이블 가속노화 실험 전후 모듈계수 변화

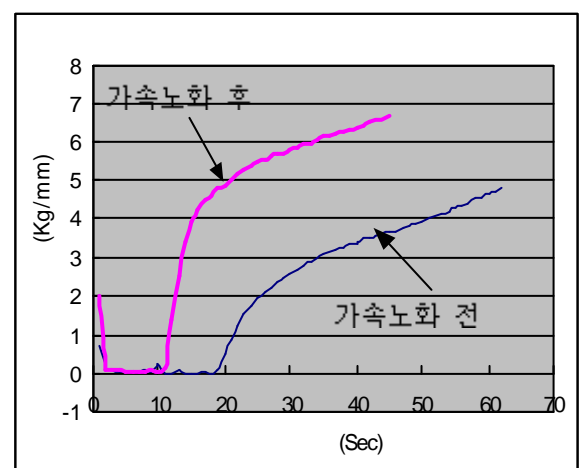


그림 5: ksc3611 600v cv 2core 비닐자켓 케이블 가속노화 전후 모듈계수 변화

## 5.0 결론

전력연구원에서는 Indent원리를 이용한 휴대용 케이블 노화 측정기(CAT, Cable Aging Tester)를 개발하였다. 케이블의 열화와 indent값과의 상관관계를 알아보기 위해 열화실험을 하였다. 네오플렌 자켓의 케이블 과 비닐 자켓 케이블을 각각 150℃의 항온에서 41시간을 가속 열화 시킨후 본 케이블 노화 측정기(CAT)를 사용하여 가속열화 전후의 Indnet 값을 측정한 결과 네오플렌 자켓은 약 20%의 모듈값 증가를 나타내고 비닐 자켓은 약 40%의 모듈값 증가를 나타내었다. 본 실험을 통해 케이블 절연체 및 자켓의 열화와 Indnet값의 상관관계가 있음을 입증하였다. 향후 국내 원전 케이블들에 대한 인공노화 실험을 거쳐 케이블 노화 년도에 따른 indnet 기준 데이터를 축척 함으로써 가동중 원전의 케이블 교체시기 판단 및 케이블 인증 수명 연장에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- 1) EPRI NP-7348 (Cable Indenter Aging Monitor), EPRI, 1993
- 2) EPRI TR-104075(Evaluation of Cable Polymer Aging Through Indenter Testing of In-Plant and Laboratory-Aged Specimens), EPRI, 1996
- 3) 원전수명관리연구(Ⅰ) 최종보고서4 제 5.10권 케이블 수명평가, 전력연구원 원자력연구실, 1996
- 4) 고분자의 열화와 안정화, 데덱손차량(일본), 1992