

Condition Monitoring에 의한 원전 케이블 수명평가 Evaluation of cable life based on the condition monitoring

김중석, 정일석, 홍승열

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 케이블의 수명을 평가하기 위해 현재까지 가장 많이 사용되는 방법은 아레니우스 방정식을 이용한 가속열화 이다. 본 방법은 발전소 케이블의 가동 중 환경온도를 측정하여 실제 운전조건 보다 높은 고온에서 짧은 시간동안 가속열화를 하여 년도별 등가 열화상태를 만들어 내는 것이다. 본 연구에서는 원자력발전소의 실제 가동 중 환경온도를 1년간 모니터링 한 데이터를 바탕으로 130℃에서 등온 가속 열화한 후 인덴터 지수 및 연신율 변화를 측정하였다. 실험결과 네오프렌 자켓을 평균온도 30℃에서 약 30년간 사용하면 연신율 값이 초기값의 50% 이하로 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 통 케이블 자켓 외부를 가속열화 하였을 경우 절연체의 인덴터 지수는 거의 변하지 않고 연신율도 변화가 미미한 것으로 확인되었다. 케이블 indenter의 경우 30℃ 이상의 온도환경에서 20년 이상 노화되었을 경우 indent 지수가 연신율과 역비례 특성을 보이므로 연신율과 indent지수의 비교 데이터를 확보하면 30℃이상의 고온조건에 설치되었거나 20년이상 노화된 케이블의 경우 indenter와 같은 비파괴 시험장비에 의해 수명 측정이 가능하다.

Abstract

Accelerated aging using arrhenius equation is a popular methodology for the evaluation of cable life. General concept of this methodology is producing equivalent aging condition as naturally aged cable by heating the cable in high temperature during short time. Based on the 1 year's monitoring result of actual environment temperature, elongation & indenter test was performed after accelerated aging in this study. It was verified that elongation rate went below 50% of initial value if used at the temperature of 30℃ during 30 years. But, It didn't make any change with material property of internal insulation when heated from the surface of jacket. Aging of cable insulation is negligible if the cable will exposed on the below 30℃ during normal & accident condition. Cable indenter can be a useful application for the cable life evaluation of longer than 20 years old or installed at the temperature of higher than 30℃

1. 서론

원자력 발전소에 설치된 케이블은 정상적인 온화한 환경(온도 49°C 이하, 방사선량 1×10^5 Rad 이하 등)에서 발전소의 설계수명(40년) 기간동안 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 증기헤더, 열교환기 등 고온기기 주변에 설치되었거나 격납용기와 같이 밀폐된 지역에 설치된 케이블의 경우는 정상적인 노화속도를 초과하여 설계수명 이전에 케이블 자켓 및 절연체의 기계적 물성치가 변하고 이로 인해 표면 균열을 가져올 수 있다. 일반적으로 케이블의 전기적 성능 저하는 기계적 강도가 충분히 저하된 이후에 발생하며 기계적 강도의 저하도를 평가하면 보수적인 관점에서 케이블의 전기적 성능이 저하하기 이전에 케이블을 교체해야 할 시점을 알아낼 수 있다. 원자력발전소에서 케이블의 표면균열 등 기계적 물성치를 중요시하는 이유는 케이블은 정상운전 뿐만 아니라 설계기준 사고후의 고온증기 조건에서도 케이블의 밀봉 및 절연기능을 충분히 수행해야 하기 때문이다.

케이블의 노화를 일으키는 주요 요소로는 온도, 방사선 등을 들 수 있는데 본고에서는 그중 가장 케이블 수명에 영향을 많이 미치는 온도에 의한 노화영향만을 분석하고자 한다. 일반적으로 발전소의 케이블은 일정온도에서 사용수명 동안 연속적으로 사용된다고 생각하기 쉽다. 그러나 원자력발전소 케이블의 경우 사용수명 동안 쉬지 않고 가동되는 것이 아니라 트레인의 교체운전, 운전조건에 따른 케이블 부하변화, 1~ 1.5년 주기의 계획예방정비 수행을 위한 1-2개월 정도의 휴지기간을 가진다. 따라서 가속열화를 통한 케이블 수명평가를 위해서는 발전소의 운전온도 데이터를 장시간 수집하고 이러한 데이터를 바탕으로 가속열화 실험을 해야 한다. 본 연구에서는 고리 1호기 가압기 하부지역의 온도상태를 395일간(365일+ 계획예방정비 기간 1개월) 모니터링한 후 본 온도조건이 수명기간동안 매년 사이클링 한다는 가정하에 가속열화 조건을 설정하였다. 시험편은 고리원자력 1호기에 설치된 비안전성 등급 전력케이블 예비품의 Neoprene 자켓 및 EPR 절연체를 사용하였다.

2. 케이블 노화이론

기기 및 재료의 노화란 시간에 따른 재료 물성치의 변화를 의미한다. 이따금씩 기기를 사용함에 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 몇가지 물성치일 뿐이다. 예를들어 절연체의 노화는 시간에 따른 유전체 변화로 측정될수 있다. 이것은 고전압 절연체에 가장 중요한 특성이다. 하지만 DC gain 이나 누설전류 같은 것도 트랜지스트의 노화를 연구할 때 고려되어야 할 사항들이다.

내 외적 물리적 응력은 노화를 일으키는 주 원인이다. 전류, 전압 및 오염열과 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 경

우라면 관계식이 유효하다고 볼수 있다.

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

2.1. 케이블 수명평가를 위한 아레니우스 방정식

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 반응율로 불림

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

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

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.

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

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

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

c/c_0 량을 보면 시간 t 이후에 반응물질에 남아있는 잔존농도는 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 감쇄정도는 (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 수명종료 시점이나 고장점이 된다고 보기는 어렵다. 식(5)에서는 식(4)의 좌우 변에 로그 함수를 취해서 정리한 결과이다.

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

혹은

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

B는 잔존 농도

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

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

우변의 첫 번째와 두 번째는 상수이며 종료점에서 정해진 수치 이므로

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

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.

$$\ln L_s = F + \Phi/kT_s \quad (9)$$

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

$$\ln(L/L_s) = \frac{\Phi}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (10)$$

3. 발전소 환경온도 모니터링

발전소의 온도를 모니터링 하는 방법에는 색온도 테이프, 온라인 열전대 온도측정장치, IC 메모리를 이용한 전자식 온도 기록계 등이 많이 사용된다. 색온도 테이프는 현재의 가동온도를 알아내기 위해 가장 간편한 방법이지만 장기간에 걸친 환경온도 이력을 알아낼 수 없는 단점이 있다. 온라인 열전대 온도 측정장치는 발전소 지역별로 열전대 온도 측정장치를 설치하여 환경온도를 중앙 전산기에 전송하는 방식으로 발전소 전체의 환경온도를 집중관리할 수 있는 편리성은 있으나 설치비용이 많이 소요되고 신호 전송 케이블을 추가로 설치해야 하는 문제가 있다. 전자식 온도기록계는 발전소의 환경온도를 지역별로 개별 설치된 온도측정장치의 IC 메모리에 저장하는 방식으로 배터리를 이용하여 1~2년 간의 환경온도를 측정할 수 있다. 본 장에서는 현재 전력 연구원에서 개발한 전자식 온도기록계에 대해서 소개하고자 한다.

3.1 전자식 온도기록계 개요

본 장치는 장기간(1년 이상) 출입이 불가능한 지역의 온도상태를 소형 배터리만으로 IC메모리에 기록할 수 있는 초 절전형 전자식 온도 기록계(실용신안 등록번호174243, 99. 12) 이다. 본 장비는 반도체형 Digital thermometer센서를 이용한 온도측정 및 절전형 회로를 채용하여 소비전력을 최소화 하였고, 주기적으로 온도를 측정하여 측정온도가 이전 온도 데이터와 차이가 없으면 온도 데이터를 기록하지 않는 데이터 압축기법을 활용하여 저용량 메모리로 장기간의 온도 데이터 기록이 가능 하도록 설계되었다. 본 장비는 기기 및 케이블 표면의 국부온도를 측정하기 위해 온도기록 장치와 반도체 온도센서 사이에 약 3 m의 케이블을 연결하여 국부온도를 측정 및 기록할 수 있다. 저장된 데이터는 RS232C 포트를 통해 PC로 전송되어 온도 변화 상태를 그래프로 관찰할 수도 있다. 전자식 온도기록계의 실물사진은 그림1와 같다.

3.2 전자식 온도기록계 작동방법

본 전자식 온도기록계는 온도측정 주기, 온도편차 허용범위를 설정하여 배터리 수명기간(약 1- 2년) 동안 주기적으로 온도를 측정하도록 구성되었다. 설정된 측정주기마다 이전 측정온도와 현재 온도를 비교하여 변화가 없는 경우 메모리에 저장하지 않는 방식을 택하여 메모리 용량을 수백 분의 1로 줄일 수 있다. 데이터 수집 및 PC 데이터 전송을 위한 흐름도는 그림 2와 같다.



그림 1. 전자식 온도기록계 실물

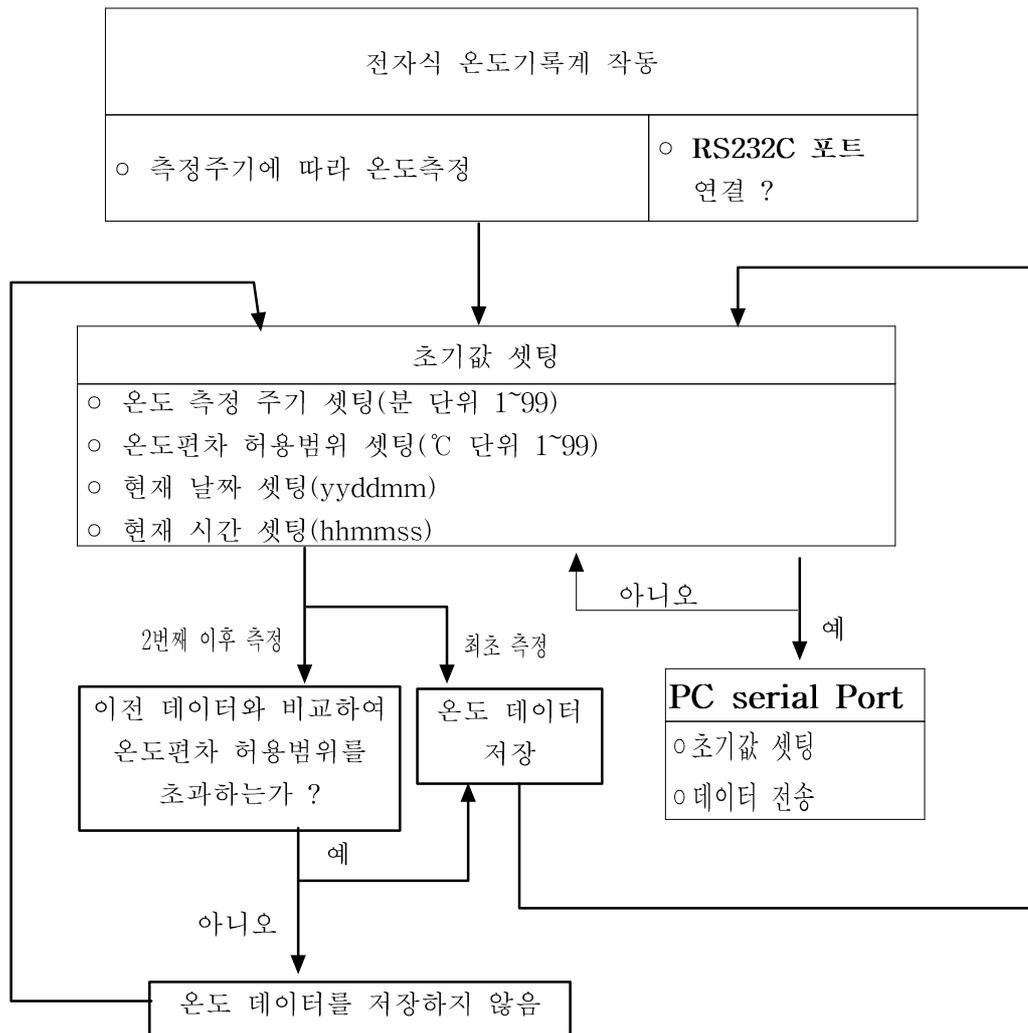


그림2. 전자식 온도기록계 작동 흐름도

3.3 발전소 환경온도 측정 결과

그림3은 고리 1호기의 가압기 하부에 설치된 케이블 자켓부위의 환경온도를 1년간 측정한 결과이다. 그림에서와 같이 환경온도는 가압기의 운전조건에 따라 25 ~ 38℃ 의 온도변화를 가지며 2000. 3. 25 ~ 5. 5(40일간)은 발전소가 가동중임에도 발전소 계획예방정비를 위한 휴지기간과 동일한 25℃ 온도를 유지한다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 보아 발전소에 설치된 케이블은 항상 일정온도로 유지되는 것이 아니라 주기적으로 변하는 온도환경에 놓여있다는 것을 알 수 있다. 따라서 케이블 수명평가는 반드시 발전소 환경온도 모니터링을 통하여 수행되어야 한다고 말할 수 있다.

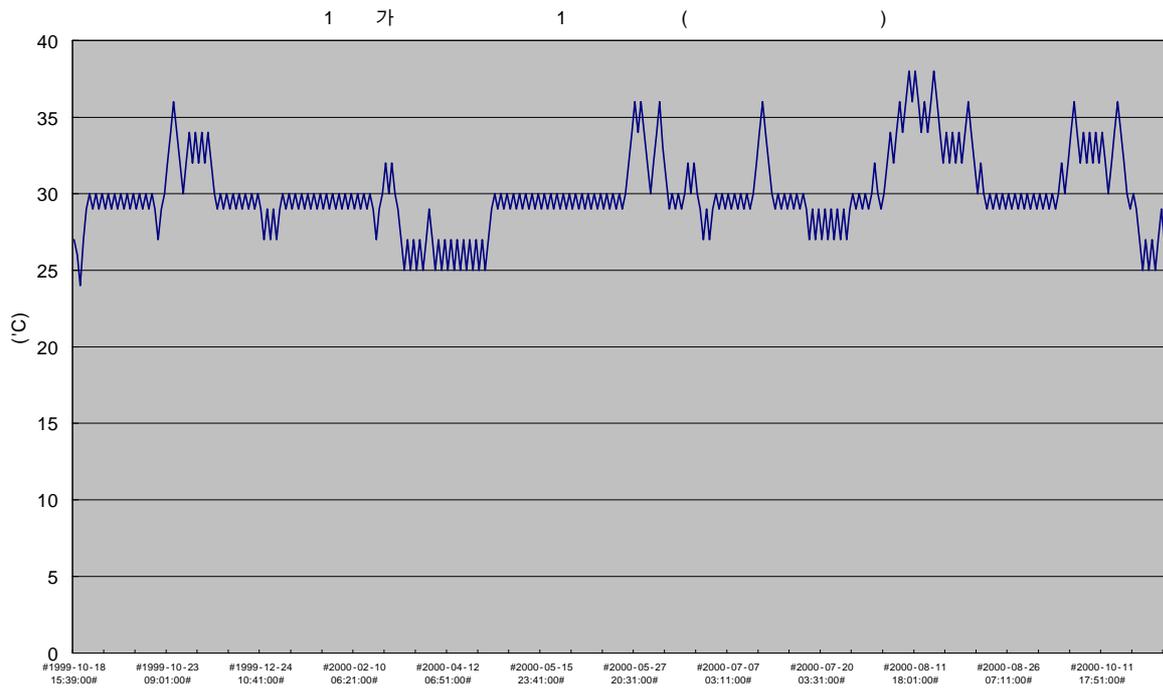


그림 3. 고리 1호기 가압기 하부지역 환경온도 1년간 측정된 결과

4. 케이블 가속열화

케이블 가속열화는 TGA(thermo gravimetric Analysis)방법을 이용하여 케이블 재료의 활성화 에너지 값을 구하고 아레니우스 방정식을 이용하여 발전소 운전 환경온도 및 사용수명별 해당 가속열화시간을 구한 다음 전기로에서 단기간 열화시키는 것이다. 본 실험에서는 현재 발전소에서 사용중인 케이블 예비품(비안전성 전력케이블 Neoprene 자켓 EPR 절연체)을 대상으로 20, 40, 60, 80, 100년간 사용수명을 기준으로 130℃ 등온에서 가속열화 하였다. 본 실험은 사용수명 평가차원에서 수행된 것이므로 정상운전 중 온도조건만을 고려하였으며 내환경 검증에 위한 설계기준 사고 조건은 고려되지 않았다.

4.1 활성화에너지 계산

TGA(Thermal gravity Analysis)를 통한 Neoprene 자켓의 활성화 에너지값은 그림 4에 나타난 바와 같이 94.39 KJ/mole 값이 산출되었다. 본 작업은 검정된 장비에 의해 산출된 것이므로 본 고에서는 산출 원리는 생략하고 산출결과만을 그래프로 나타내었다.

Sample: New Jacket (15)

TGA

Operator: C. Lee
Run Date: 17-Nov-00

Comment: 20°C/min to 50°C. N2 purge gas

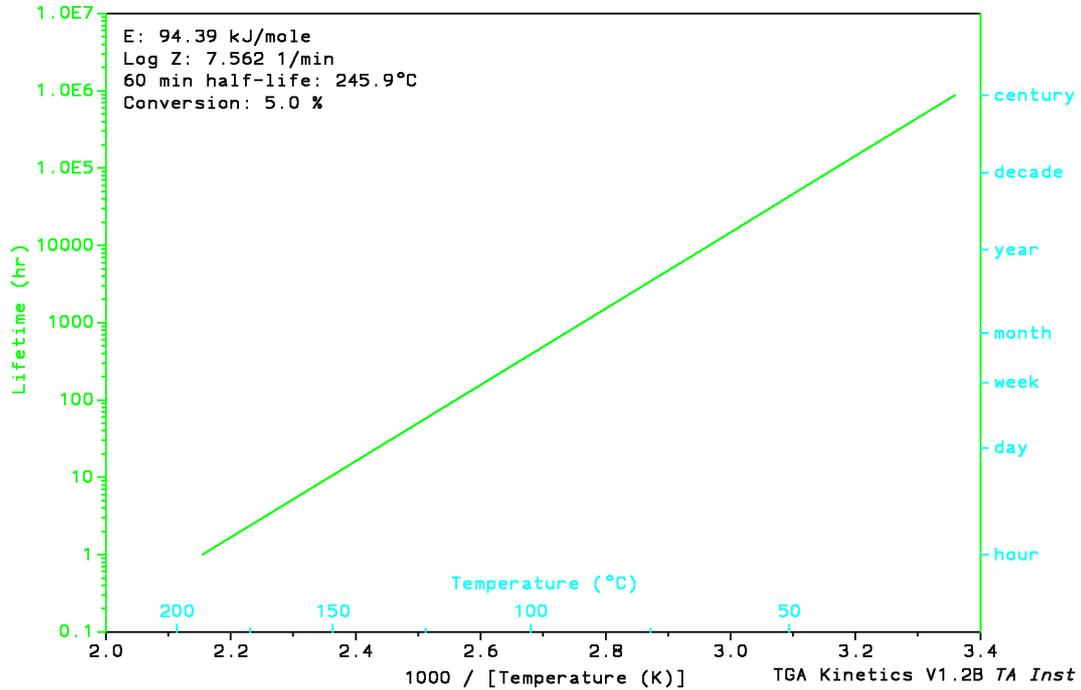


그림 4. TGA에 의한 케이블 자켓의 활성화에너지

4.2 가속열화 조건 계산

Neoprene 케이블 자켓을 단시간에 가속열화를 하기 위하여 Arrhenius 외삽법(IEEE 1-09, IEEE 98-72, IEEE 99-70, IEEE 101-72)을 다음과 같이 적용하였으며 표 1에는 등온가속 조건을, 표 2에는 가변 온도 가속조건을 나타내었다.

$$k = Ae^{-E_a/RT} \text{ (Arrhenius equation)}$$

$$\ln(k_2/k_1) = (-E_a/R) \cdot [(1/T_2) - (1/T_1)]$$

k_2 = 실제 사용시간, k_1 = 가속열화 시간, T_2 = 실제 운전온도, T_1 = 가속열화 온도

$R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$: gas constant, $E_a = 94.39 \text{ KJ/mole}$

표 1에서와 같이 발전소 환경온도 condition monitoring을 통해 가속열화 시간을 계산한 결과 평균온도를 이용한 것 보다 가속열화 시간이 약 10% 증가함을 알 수 있다. 따라서 평균온도를 바탕으로 산출된 케이블 수명값은 부적절할 수 있으므로 condition monitoring을 통해 실제 환경온도 데이터를 수집하고 이를 바탕으로 수명평가를 하는 것이 바람직하다.

Step	CM 온도 (°C)	CM 기간 (day)	가속열화 시간				
			20년 life	40년 life	60년 life	80년 life	100년 life
1	30	148	6.5	13.0	19.5	26	32.6
2	25	46	1.1	2.2	3.2	4.3	5.4
3	30	84	3.7	7.4	11.1	14.8	18.5
4	38	22	2.5	5.1	7.6	10.1	12.7
5	30	7	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
6	35	58	4.7	9.4	14.1	18.8	23.4
7	25	30(O/H)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5
합계		395	19.5hours	39hours	58.6hours	78.1hours	97.6hours
평균온도	30.21		17.9hours	35.7hours	53.6hours	71.4hours	89.3hours

표 1. 등온 가속열화 조건

4.3 가속열화 후 케이블 자켓 물성치 변화 측정

4.3.1 Cable Indenter 지수 측정

케이블 자켓 시편을 절취한 후 가속 열화한 것과 통 케이블을 가속열화 후 시편을 절취하는 두 가지 방식의 가속열화 실험을 수행한 후 Cable indenter 값을 측정하여 그림5에 나타내었다. 케이블 자켓 시편을 절취한 후 가속 열화한 경우 통 케이블을 가속열화 한 것에 비해 40년까지는 유사한 값을 나타내지만 40~ 100년 사이에는 약 20~30%의 Indenter 값 증가가 발생하였다. 이것은 통 케이블의 경우 케이블 자켓이 받는 열을 발산시켜주는 절연체가 있어 열적 부하를 덜 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 케이블 가속열화는 반드시 현장과 열화조건이 동일한 통 케이블 가열 후 시편 절취 방법을 택하는 것이 합당하다. 통 케이블 자켓 외부를 가열하였을 경우 케이블 절연체에 미치는 영향도 검토하였다. 이 경우 그림 5 에서와 같이 재료의 경화가 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 케이블 외부온도 부하의 대부분은 자켓이 흡수하고 절연체에는 별다른 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 케이블 indent 지수는 케이블이 20년 이상 노화되어야만 측정 가능한 값을 지시함을 알 수 있다.

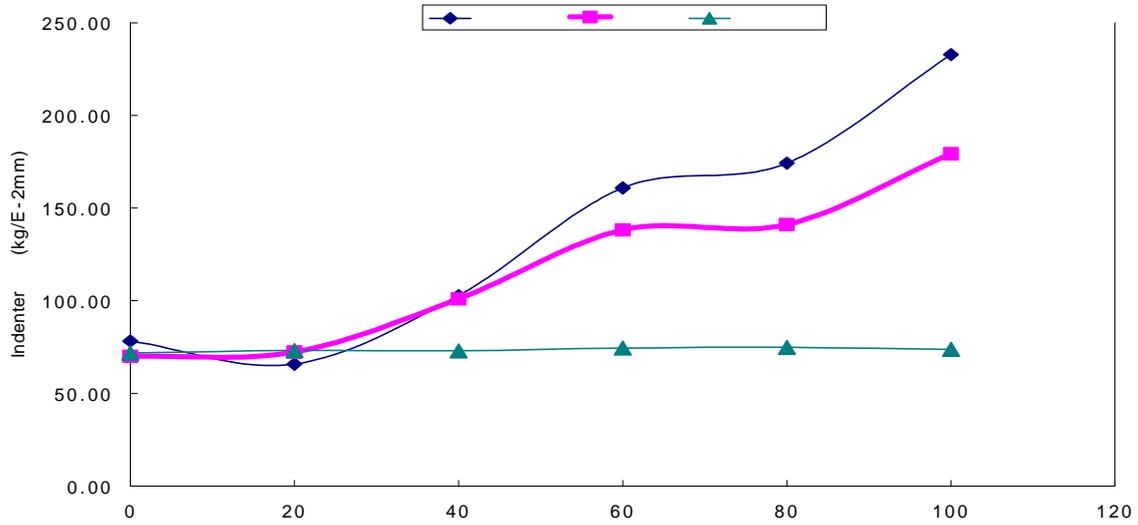


그림 5 . 가속 열화후 indenter 지수 측정값

4.3.2 케이블 연신율 측정

케이블 가속열화후 자켓의 연신율 값을 측정하여 그림6에 나타내었다. 연신율의 경우 통 케이블을 가속열화 한 것이 시편을 가속열화 한 것에 비해 약 10-20%의 연신율 여유가 있음을 알 수 있다. 통 케이블 자켓 외부를 가열하였을 경우 내부 절연체에 미치는 영향도 검토하였다. 이 경우 케이블 자켓의 연신율이 50% 감소되는 시점에서 절연체의 연신율은 10% 만 감소하므로 재료의 물리적 성질이 변화하였다고 보기는 어렵다.

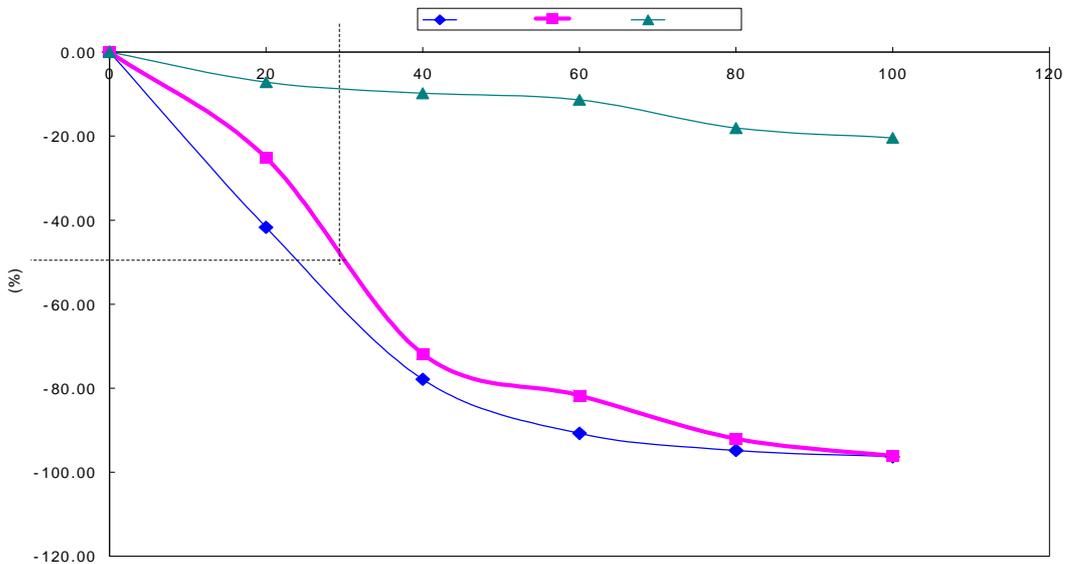


그림 6 . 가속열화후 케이블 연신율 측정결과

4.3.3 케이블 연신율 과 인덴터 지수 비교

케이블 연신율과 인덴터 지수와의 상관관계를 비교한 결과를 그림7에 나타내었다. 30℃의 온도에서 케이블 사용기간이 20년 이내인 경우 연신율은 약 25% 감소하였음에도 indent 지수는 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 indent 방법은 20년 이상 사용된 경우에만 경화도 측정이 가능함을 알 수 있다. 20년 이상 사용한 케이블의 경우 연신율과 indent값은 유사한 비율로 역비례함을 알 수 있다. 20년 이상 사용된 케이블의 경우 가속열화를 통한 케이블 종류별 재료 물성치 변화 데이터를 확보할 경우 indenter를 연신율 측정장비 대신 활용할 수 있음을 알 수 있다.

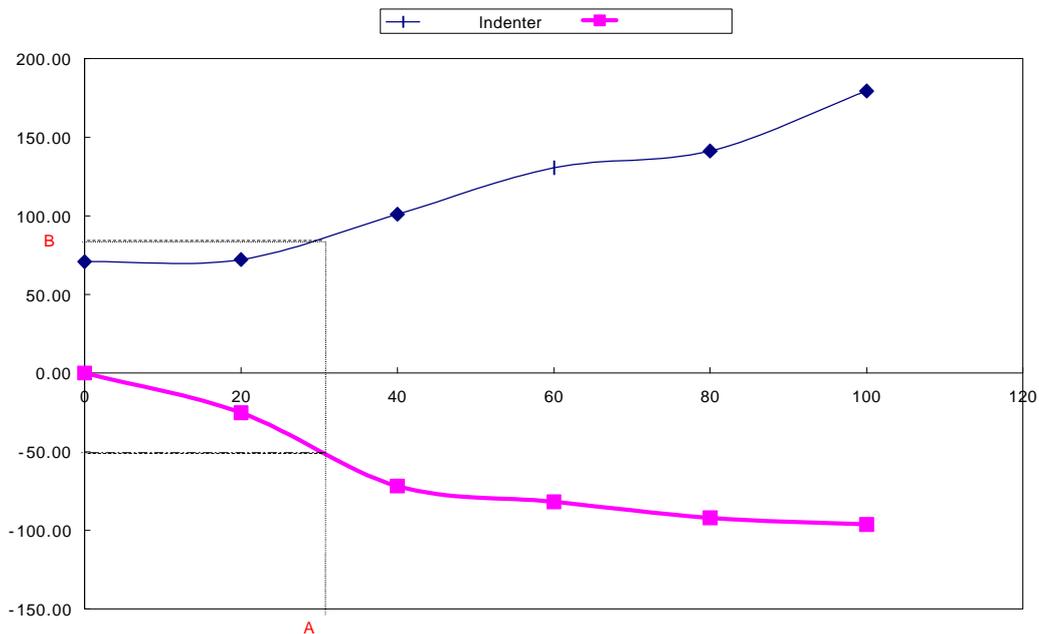


그림 7 . 연신율 및 indent 지수 비교 결과

5. 결론

원자력발전소의 실제 가동 중 환경온도를 1년간 모니터링 한 데이터를 바탕으로 130℃에서 등은 가속 열화한 후 인덴터 지수 및 연신율 변화를 측정하였다. 실험결과 네오프렌 자켓을 평균 온도 30℃에서 약 30년간 사용하면 연신율 값이 초기값의 50% 이하로 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 통 케이블 자켓 외부를 가속열화 하였을 경우 내부의 절연체는 물성치 변화가 미미한 것으로 확인되었다. 발전소의 설계기준 사고환경에 노출되지 않는 케이블의 경우 30℃ 정도의 자켓 외부온도에 의한 케이블 절연체의 노화는 무시할 수 있으나 사고환경에 노출되는 케이블의 경우 자켓의 균열로 인해 케이블의 밀봉기능이 상실될 수 있으므로 실제 사용수명과 사고시의 열적 부하를 고려한 케이블 자켓 및 절연체의 내환경 기기검증이 필요하다. 케이블 indenter의 경우 20년 이상 노화된 케이블은 indent 지수가 연신율과 역비례 특성을 보이므로 장기간 노화되었거나 30℃이상의 고온환경에 위치한 케이블의 경우 indent 방법에 의한 수명 측정이 가능하다.