

2000 춘계원자력학회 학술발표대회 논문집
한국원자력학회

원전 케이블 자켓의 열화진단 Aging Diagnosis of Nuclear Cable Jacket

김종석, 강호식, 정일석

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소의 케이블은 비교적 저전압 케이블 이므로 전도체의 저항열에 의한 열화보다 외부 환경에 의한 열화를 중시한다. 케이블 자켓은 절연체에 비해 외부의 고온환경에 더 많이 노출되어 있어 열화에 취약하므로 보수적 관점에서 볼때 자켓의 열화평가를 통한 케이블의 수명평가는 타당하다고 볼수 있다. 가속열화를 통한 수명평가지 절연체로 사용되는 EPR의 경우 온도변화에 따른 활성화에너지의 변화로 아레니우스 방정식의 적용에 문제가 있으나 케이블 자켓으로 쓰이는 Neoprene은 온도 변화에도 활성화 에너지가 일정하게 유지되어 아레니우스 방정식 적용에 문제가 없는 것으로 알려졌다. 가속 열화 실험결과 Neoprene 자켓의 연신율은 온화한 환경 및 열악한 환경 모두에서 가속열화 시간에 비례하며 감소함이 입증되었으며, Cable Indent 모듈 값은 온화한 환경에서는 미소한 변화가 발생하나 50°C 이상의 열악한 환경에서 10년 이상 장기간 열화된 경우에는 열화의 판별이 가능한 지시값을 나타내었다.

Abstract

For the comparatively low voltage cables in nuclear plant cables, aging from harsh environment is more important than resistance heat of conductor. It is feasible to evaluate the lifetime of cable by the aging of cable jacket due to more possibility of contact with harsh environment compared with cable insulation. EPR material has a problem to apply the arrhenius equation due to change of activation energy according to the change of temperature. But, Neoprene has constant value of activation energy for all temperature range. According to the experiment of tension strain, It was verified that strain value of jacket was decreased in proportion to aging times in both harsh and mild environment. It was recognized that modulus of cable indent could be apparently indicated not in the mild condition but in the harsh condition of over than 50°C during more than 10 years.

1. 서론

가동중 원전의 케이블 환경은 크게 열악한 환경과 온화한 환경으로 구분할 수 있다. 일반적으로 온화한 환경에 설치된 기기 및 케이블의 경우 수년간 방치되어도 열화를 일으키지 않는 것으로 알려져 왔으나 국부적으로 열악한 환경에서 수년간 노출되어 온 케이블은 그 영향으로 케이블 자켓 표면에서부터 노화감쇄가 발생하게 되며 이러한 노화감쇄는 케이블의 신뢰성을 저하시킨다. 원자력발전소용 케이블은 안전성을 고려하여 보수적으로 설계되어 도체의 저항열 이나 외부 환경에 의한 노화에 잘 견디어 내지만 열적 Hot Spot가 있는 곳에서는 케이블 자켓이 외부환경에 대해 민감하게 반응한다. 원자력발전소 저전압 케이블의 경우 자켓은 절연체에 비해 비교적 열악한 외부조건에 접하게 되며 절연체의 노화 이전에 자켓의 노화가 먼저 발생하는 것으로 본다. 따라서 보수적인 관점에서 볼 때 자켓의 수명은 곧 케이블의 수명으로 볼 수 있다. 미국 등 원전 선진국에서는 원전 케이블의 노화진단을 위해 자켓이나 절연체의 노화에 따른 연신율 특성 변화를 분석하는 방법을 많이 활용하고 있다. 본고에서는 원자력 발전소 케이블 자켓의 가속열화 실험을 위한 아레니우스 방정식 적용의 적정성, 노화년도에 따른 케이블 자켓의 연신율 변화와 케이블 Indent 특성에 대해 검토하였다.

2. 케이블 노화 메카니즘

케이블의 노화감쇄는 고온, 방사선, 화학품 및 오염물질 등에 의해 발생하는데 고온조건은 케이블의 노화에 가장 영향을 많이 미친다. 일반적으로 10°C Rule에 의하면 기기는 온도가 10°C 증가할 때 마다 자재의 수명이 반감하며 고온 유체 계통 배관이 있는 지역의 전기/계측류 기기는 적절한 환기가 되지 않을 경우 지속적인 고온상태로 남게되어 노화를 촉진하게 된다. 방사선은 고온에 비해 노화영향이 적으나 고 방사선 지역은 방사선에 의한 케이블 노화를 고려할 필요가 있다. 화학품 및 오염물질에 의한 노화는 중대한 위험요소는 아니나 EHC 유압유와의 접촉을 통해 케이블 경화가 발생할 수 있다. 기타 증기누설, 밸브 패킹 누설, 부적절하게 설치된 절연체, 고전압 백열등 주변 케이블, 안전밸브 주변에 설치되어 고온의 증기에 노출되는 케이블은 고온과 저온의 반복 사이클링 으로 노화가 촉진될 수 있다.

3. 케이블 노화진단 방법

원자력발전소에서 케이블 노화상태를 진단하기 위해 가장 많이 사용하는 방법에는 절연파괴

강도 측정, 산화방지 능력 측정, 자켓 및 절연체의 파단-연신율 측정, 케이블 Indenter 측정법 등이 있다.

절연파괴 강도 측정을 통한 노화진단은 케이블 절연체의 절연 파괴강도를 이용한 수명예측 기법으로 사용시간에 따른 절연 파괴 강도 값 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. 절연파괴 강도 측정 법은 파괴강도의 국부성에 의해 오차가 큰 반면 이 방법은 화학적 변화가 균일하게 일어나므로 오차가 적은 장점이 있다.

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 ISO/R 527 및 ISO 37에 따르면 노화에 의해 파단 연신율 50% 감소를 허용한도로 두고 있다. 본 방법은 원자력발전소 케이블의 열화진단에 가장 많이 사용되고 있다

케이블 Indenter에 의한 노화진단은 손톱으로 케이블을 눌러 그 경도를 알아보는 것과 유사한 방법으로 가는 원기둥 앤빌로 케이블 자켓 표면을 눌러보는 시험방법이다. 이 방법은 케이블의 외부환경에 의한 열적 노화만을 고려한 것이며 케이블 절연체의 손상 이전에 케이블 자켓이 먼저 손상된다는 보수적인 관점에서 시작된 것이다. 본 방법은 비파괴적인 방법으로 가동중 원전에서 케이블을 절취하지 않고 노화진단을 할수있어 파단-연신율 측정방법과 더불어 활용 가능성이 높다.

4. 케이블 노화진단 관련 국내외 연구경험

4.1 지중배전 케이블의 수명예측¹⁾

본 연구는 전력연구원과 고려대 재료공학부가 공동으로 지중배전 케이블의 고장분석을 위해 XLPE 절연체의 열화후 잔존 산화방지 능력에 대해 연구한 것이다. 현재까지 케이블의 열화정도를 판단하기 위해 사용되어온 절연파괴 강도를 이용한 수명예측 기법은 케이블에 국부적인 미소결함이 있을 경우 결함부위에서 먼저 파괴가 발생하므로 평가의 정확성을 위해서는 다수의 시편에 대한 시험이 필요하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 도입된 것이 산화방지능력을 이용한 수명예측 기법²⁾이다. 본 방법은 산화 방지제 잔류량과 산화 유도시간을 측정한 후 상관관계로부터 얻어지는 식을 이용하여 수명을 예측하는 것이다. 열화에 의한 화학적 변화는 케이블 전 구간에서 균일하게 일어나므로 본 방법은 절연파괴 강도 측정법에 비해 오차가 적은 장점이 있다.

4.2 격납용기 내 케이블 노후화 평가 기술 개발³⁾

격납용기 내 케이블 노후화 평가 기술에 대한 연구는 원전 수명관리연구(I)[1993 - 1996] 요소기술 개발의 일환으로 원자력연구소에서 케이블 내 환경 및 내 방사선 시험을 실시하였다. 본 실험을 위해 케이블의 열화를 단시간에 시험할 수 있는 방사선 조사시험용 챔버 및 화학 선량계를 설계·제작 하였다. 시험대상 재료는 케이블 자켓용 PVC 및 Hypalon을 사용하였으며 시험은 공기중 실온에서 1Mrad/hr 이하의 선량율로 일정선량(0 ~ 200Mrad)의 감마선을 조사하였다. 본 실험은 IEEE 규격의 방사선 및 열화시험 기준을 따랐는데 이 기준에 의하면 단시간 시험을 위해 방사선 열화시험에 대해서는 1Mrad/h 이하에서 적어도 50Mrad 조사하고 열노화 시험에 대해서는 노형에 관계없이 121°C에서 7일간 대기중에서 열화해야 한다.

시험결과 PVC의 경우 비중은 조사선량에 관계없이 거의 일정하였다. 인장강도는 선량 50Mrad에서 급격한 저하를 일으켜 100Mrad 까지 저하되나 150Mrad 이상에서는 증가하는 현상이 나타났으며 이는 가교현상에 의한 것으로 판단된다. 연신율은 50Mrad 까지 급격한 저하를 나타내나 50Mrad에서 200Mrad 까지는 완만한 감소를 나타내었다. 절연저항은 50Mrad 까지 급격한 감소를 나타내어 절연저항이 “0”까지 감소하였다.

Hypalon의 경우 비중은 선량이 증가됨에 따라 높아지면 100Mrad 이상에서 일정하게 유지되었다. 인장강도는 150Mrad 까지 점차적인 감소를 나타내었다. 연신율은 200Mrad에서 완만한 감소를 보여주었다. 절연저항은 50Mrad 까지 급격한 저하를 보여 절연저항 “0” 까지 감소하였다.

상기 실험결과 PVC 및 Hypalon은 50Mrad 미만에서 사용되어야 하는 것으로 판단되었다.

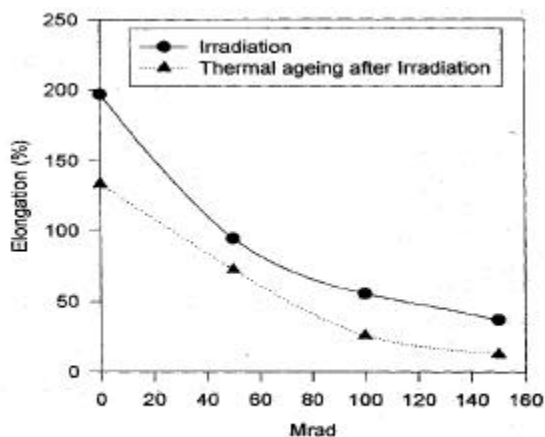


Fig. 6-71 Radiation effects on Elongation of Insulation of 16 years used CRDM cable (BIW Cable Systems Inc.) of Kori#1*

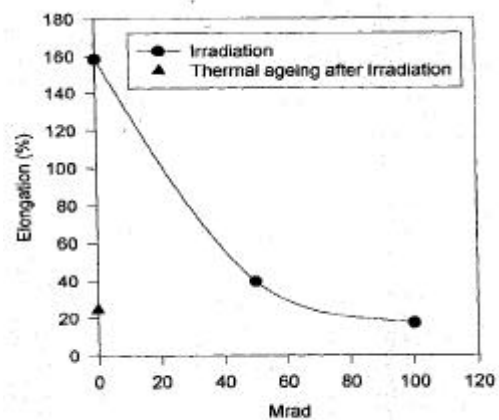


Fig. 6-72 Radiation effects on Elongation (%) of Sheath of 16 years used CRDM cable (BIW cable systems Inc.) of Kori#1*

그림 1. 고리 1호기 RCP 전원공급 케이블의 가속열화 후 연신율 변화

4.3 Cable Indenter Aging Monitor⁴⁾

EPRI와 OGDEN사에서 공동 개발한 Cable Indenter 는 케이블 자켓이나 절연체에 탐촉자를 눌러 자재의 경화정도를 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. 본 장비의 형상과 주요부품에 단면도는 그림 2에 나타내었다.

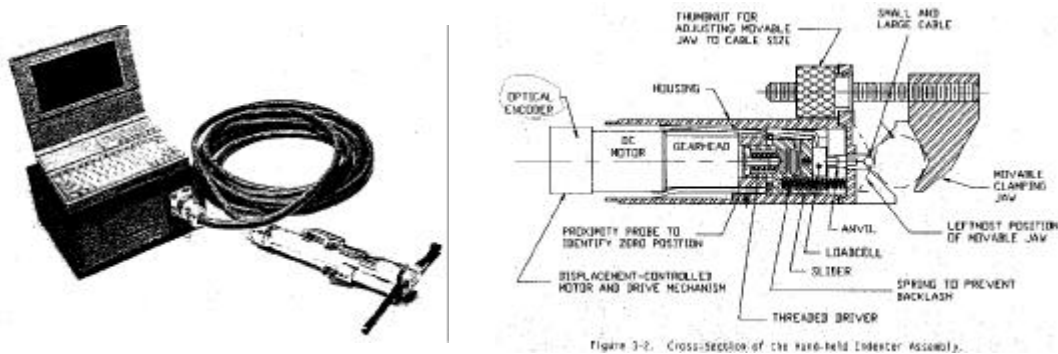


그림2. Cable Aging Monitor 실물 및 단면도

4.4 케이블 노화 시험기(CAT, cable aging tester)⁵⁾

1997. 4월 EPRI 와 전력연구원은 고리 1호기 케이블 노화상태 진단을 위해 EPRI가 개발한 Cable Aging Monitor를 사용하여 고리 1호기 현장 케이블 일부를 진단한바 있다. 전력연구원에서는 본 장비가 비파괴적인 케이블 노화진단에 유용하게 활용될 것으로 판단하고 EPRI 기술보고서를 참조하여 Indent 방식에 의한 장비의 국산화에 착수하였다. EPRI의 Cable Indenter는 수동 크램프 조작식으로 조작이 불편하고 케이블 Indent 측정장치와 조작 및 기록장치가 이원화되어 있어 2인 1조만이 진단작업이 가능하지만 본 장비는 전동식 크램프에 의한 케이블 자동 고정, 로드셀 증폭기 내장, 플래시 롬 메모리 IC 채용에 의한 데이터 보관의 신뢰성, 데이터 전송 직렬포트 채용을 통해 제품의 소형화 및 진단작업의 편리성을 도모하였으며 1인 단독 진단작업이 가능하도록 설계하였다.

본 장비의 주요부품별 기능을 보면 케이블 고정 및 크램프 이동을 위해 크램프 1조 및 스크류 모타가 있고, Anvil의 전후진 작동을 위해 직경 2 mm의 원기둥 형 Anvil 및 DC 써보 모타가 있다. 이동거리 측정을 위해서 DC 써보모타의 Encoder를 사용하며, 가압력 측정을 위해 Load cell 및 Amplifier가 내장되어 0.1kg 단위로 최대 2.5kg 까지의 하중을 측정하며, 조작 및 표시 패널에는 기능 조작 버튼이 설치되어 있고 LCD 화면으로 측정 상황 및 측정후 모듈계수가 표시된다. 데이터 저장은 플래시 롬에 저장되어 전원상실시 안전하게 데이터를 보관하며 데이터

전송을 위해 PC Serial 포트 장치를 설치하여 측정된 데이터를 PC에 Back-up 할수 있도록 설계하였다. 케이블의 노화정도는 케이블 표면에 가해진 하중을 이동거리로 나눈 모듈계수로 판단한다. 모듈계수가 증가하면 케이블 표면이 경화되어 노화가 많이 진행된 것으로 판단하며 잔존수명은 실험실에서의 가속열화 실험 데이터와 비교하여 평가한다.

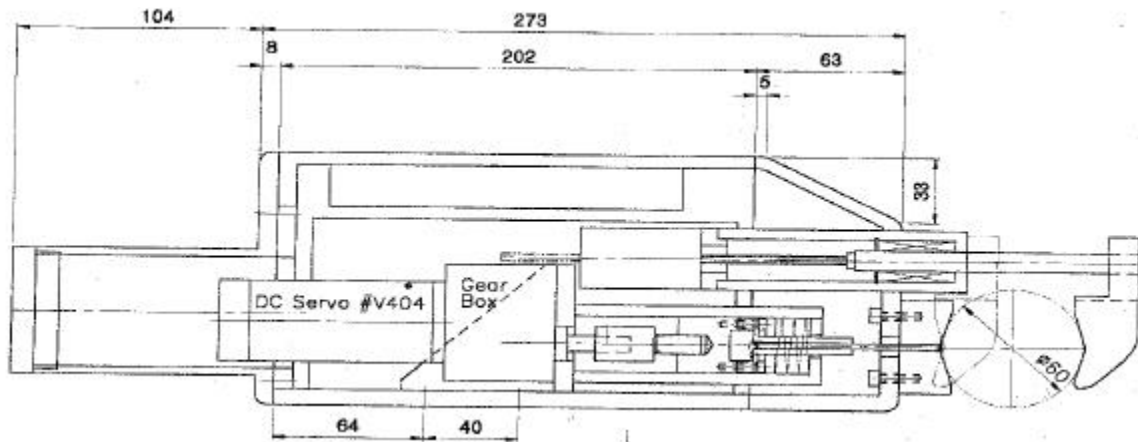


그림 3. 케이블 노화진단기(CAT) 단면도

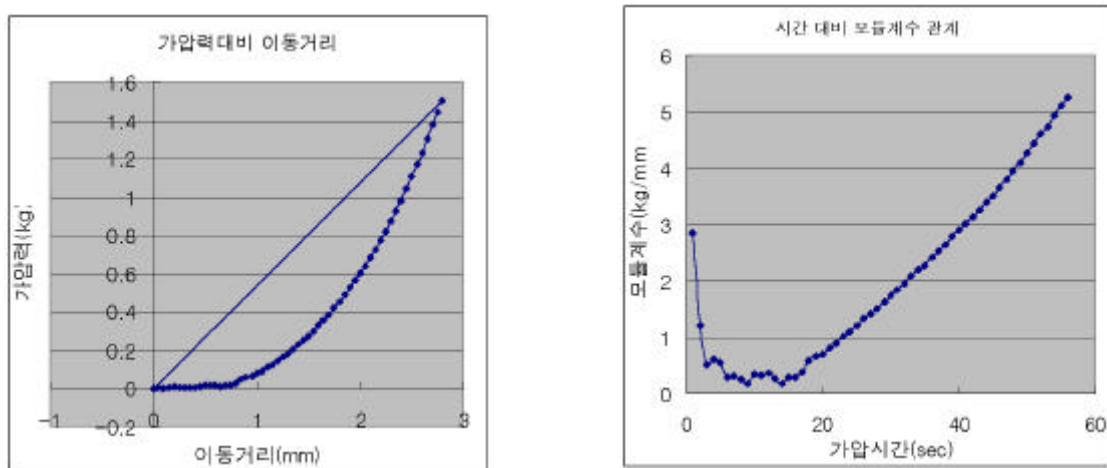


그림4. 케이블 노화진단기(CAT) 일반 특성 곡선

5. 케이블 수명평가를 위한 아레니우스 방정식 적용

5.1 EPDM 절연체의 가속 열화시 아레니우스 방정식 적용의 문제점⁶⁾

아레니우스(Arrhenius) 방정식은 실험실에서 가속열화 온도에 따른 열적 노화 데이터를 분석하고 실제 사용온도에 대한 데이터를 외삽하기 위하여 주로 사용되었다. 그러나 이 방법은 일

부 재질의 경우 비 아레니우스 거동 및 산소 확산 조건의 불일치로 실험실의 예측값이 실제와 다르게 나타날 수 있다. 아레니우스 방정식의 적용을 저해하는 첫 번째 인자는 제한적 산소 확산(DLO, Diffusion Limited Oxidation)로 인한 비 아레니우스 거동이다. 일반적으로 가속실험은 연구실에서 고온의 조건으로 수행되며 이 경우 열화에 의한 화합물 내의 산소 소비는 대기 환경에 접하여 산소가 재 공급될 수 있는 현장의 케이블에 비해 산소 소비정도가 더 빠르게 일어날 수 있다. 이러한 이유로 케이블 절연체를 표준시편으로 만들어 실험실에서 가속열화 시키면 실제 열화정도와 차이가 나게된다.

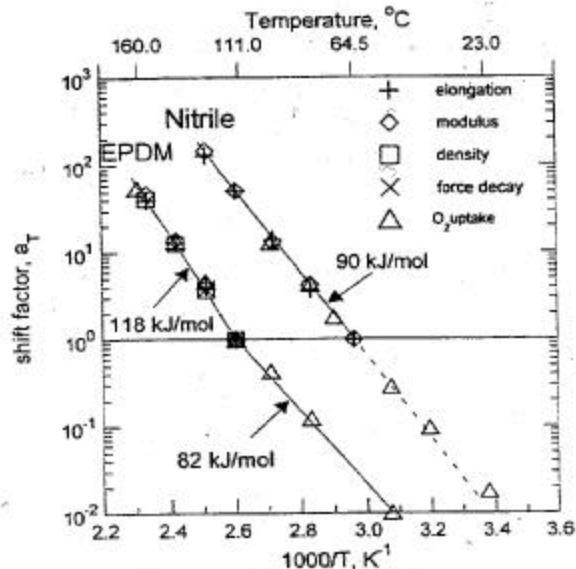


그림 5. EPDM 및 Nitrile 의 산소 소비량 측정에 의한 아레니우스 선도

두 번째 인자는 가속열화 시험온도의 변화에 따른 활성화 에너지의 변화이다. 일반적으로 사용되는 노화율과 산소 소비율은 식(1) 과 같이 활성화에너지 E_a 를 항상 일정하다고 가정한 것이다.

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{dD}{dt} = A \exp \left[\frac{-E_a}{RT} \right] \dots \dots \dots (1)$$

그러나, 실험결과 그림 5 에서 나타낸 바와 같이 Nitrile 재질의 경우 온도의 변화와 관계없이 활성화에너지가 90kJ/mol로 일정하게 유지되지만 절연체로 많이 사용되는 EPDM 재질의 경우 111 $^{\circ}C$ 를 기점으로 활성화에너지가 118kJ/mol에서 82kJ/mol 로 변화하는 것을 확인할 수 있다. EPDM 재질의 경우 111 $^{\circ}C$ 보다 높은 온도에서는 118kJ/mol 활성화 에너지로 아레니우스 방정식의 적용이 가능하나 111 $^{\circ}C$ 이하에서는 활성화 에너지가 82kJ/mol로 변화되므로 직선 외삽을 적용할 수가 없는 문제가 생기게 된다. 활성화에너지가 감소하면 식(1)에 따라 예상수명이 줄어들게 되므로 실제상황을 예측하기 어렵게 된다.

5.2 케이블 자켓 수명예측을 위한 아레니우스 방정식 적용 가능성

EPDM 재질과는 달리 원자력발전소 케이블 자켓으로 많이 사용되는 Neoprene의 경우 그림 2 와 같이 높은 온도에서 결정된 활성화 에너지가 실내온도까지 내려가도 변함이 없어 신뢰성

을 가지고 아레니우스 거동을 외삽할 수 있다는 것을 알 수 있다. DLO(Diffusion Limited Oxidation)의 영향을 고려한다 해도 케이블 자켓의 경우 외부 공기와 항상 접하는 상황이라서 전기오븐에서 가속 열화되는 상황과 실제상황이 많이 다르지 않으며, 경화가 케이블 표면에서 최대가 되는 것을 고려하면 네오프렌 케이블 자켓에 대한 연신율 측정의 경우 아레니우스 거동에 의한 수명예측이 가능하다.

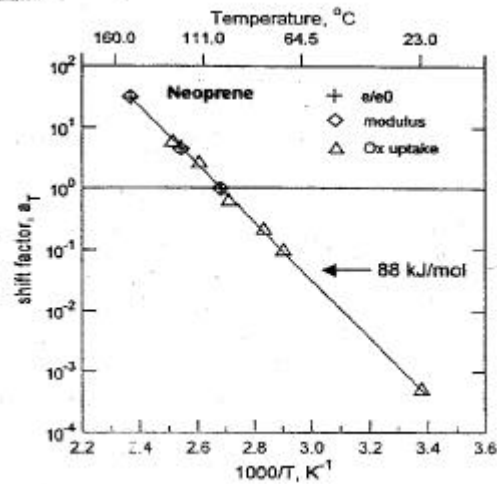


그림 6. Neoprene의 산소 소비량 측정에 의한 아레니우스 선도

6. 아령형 시험편과 관형 케이블의 연신율 특성 비교

일반적인 파단-연신율 시험의 경우 그림 7과 같은 아령형 표준시험편을 제작하여 시험을 하게 된다. 가동중인 발전소 케이블의 수명을 파단-연신율 시험을 통해 평가하기 위해서는 수많은 케이블을 절취하여 시험편을 만들어야 하는 불편함이 있다. 본 실험에서는 케이블을 손상시키지 않는 범위까지 인장하여 연신율을 측정함으로써 케이블의 노화정도를 진단할 수 있는지를 알아보기 위해 도체와 절연체가 분리되지 않은 원형 케이블 자켓과 동일재질의 자켓 시험편을 대상으로 연신율을 측정하여 비교하였다.

시험결과 그림 4의 "A" 지점까지 기울기 평균오차가 4%로 아령형 시험편 대신 관형 시험편을 사용하여도 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다. "A" 지점에서의 인장하중은 $350kg_f$ 이며 이때 늘어난 길이는 17.4mm 였다.

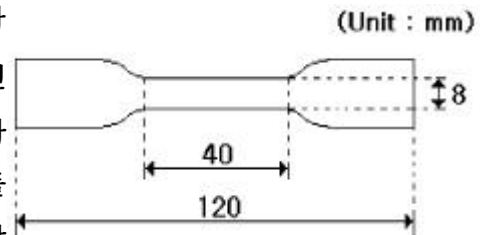


그림 7. Specimen type

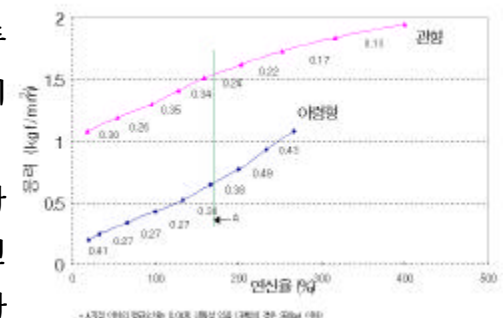


그림 8. 관형과 아령형 시험편의 연신율 비교

7. 가속 열화 후 연신율 및 Indent 특성 비교

케이블 재료의 노화를 평가하는 방법에는 전기적 방법, 잔존 산화방지제 측정 방법 등이 있으나 지금까지 학계 및 산업계에서 연구한 결과에 따르면 모든 노화의 최종 지시는 연신율의 감소로 나타났다. 연신율은 초기에서 말기에 이르기까지 케이블의 열화를 지시하는 가장 대표적인 물성치이며 가속열화에 의한 아레니우스 방정식의 적용이 가능한 케이블 자켓의 열화정도를 평가하기 위해서는 연신율을 측정하는 것이 가장 바람직하다고 판단된다. 이와 아울러 케이블 자켓 표면의 경화정도를 계량화할수 있는 Indent 모듈계수 측정법도 유용하게 활용될것으로 생각된다.

본 실험에서는 케이블 자켓을 가속열화 시킨후 연신율의 변화와 Indent 모듈러스 값의 변화를 관찰하였다. 실험은 EPR 절연체/Neoprene 자켓의 케이블(2CX14AWG LG cable, 1998)에 대해 실시하였으며 응력이 더 이상 변화하지 않는 항복점까지 인장시험을 한후 연신율을 측정하는 방법으로 수행되었다. 그림 9는 실험 케이블의 응력-연신율 선도를 나타내었고, 그림 10는 가속열화 시험시간 대비 연신율의 변화를 그래프로 나타내었으며, 그림 11은 예상 수명 대비 연신율의 변화를 나타냈다. 그림 12는 가속열화 시간별 indent 지수변화에 대해 나타내었고, 그림 13은 사용년한별 indent 지수에 대해 나타내었다. 실험은 2시간에서 12일에 이르기 까지 총 9종류의 가속열화 시간에 대해 수행되었으며 가속열화 시간 대비 예상 수명은 20.92°C에서 40년 ~ 2,178년에 해당된다. 실험결과 사용온도 20.92°C에서 80년 사용할 경우 연신율 50% 이상이 감소되는 것이 확인되었다.

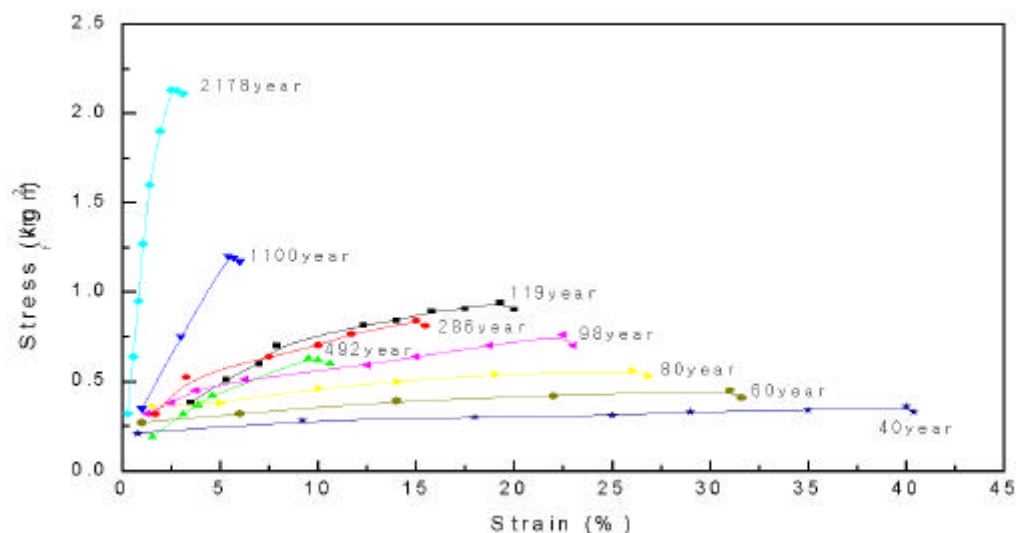


그림 9. 케이블 가속 열화후 응력-연신율 변화

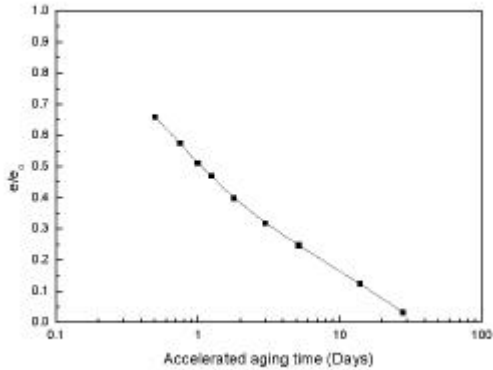


그림 10. 가속열화 시간대비 연신율 변화

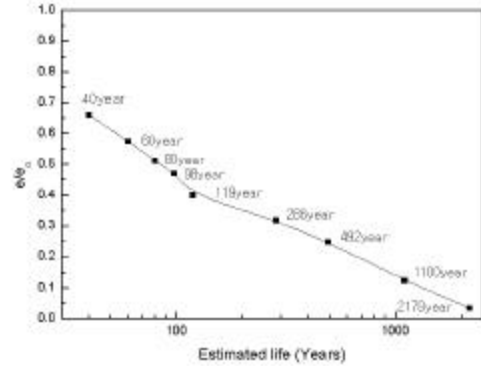


그림 11. 예상 수명대비 연신율 변화

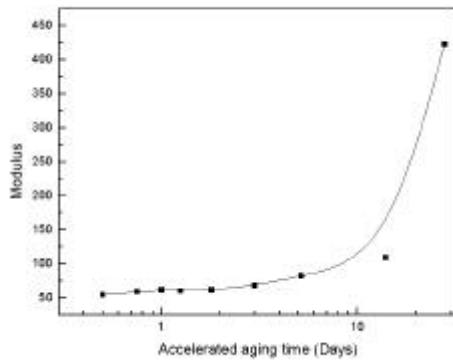


그림 12. 가속열화 시간별 indent 지수

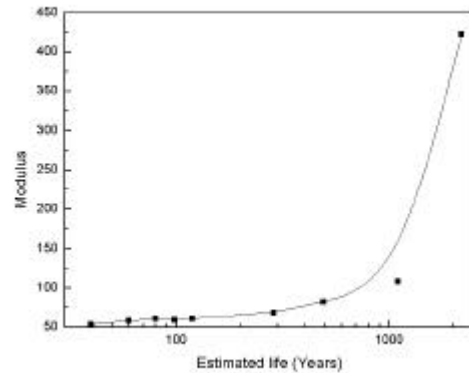


그림 13. 사용 년한별 indent 지수

동일한 시편에 대해 Indent 값을 측정된 후 연신율과의 비교 결과를 표1에 나타내었다. 본 실험 결과 20.92°C에서 사용기간 286년 이전까지는 Indent값이 완만하게 변화하였으나 예상수명 286년 이후 부터는 자켓의 표면경도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 예상수명 286년의 연신율은 33%로 나타났으므로 교체가 필요한 시점이다. 실험결과 20.92°C의 온화한 환경에서는 80년 까지 사용하여도 케이블 절연체의 연신율이 제한치를 초과하지 않는 것으로 확인되었으나 40°C의 환경에서는 26.6년, 60°C에서는 1년 정도의 수명을 지시하고 있다. 이러한 결과를 통해 케이블의 수명은 환경 온도와 매우 밀접한 관계를 가지고 있음이 입증되었다.

전력연구원에서 개발한 CAT(cable aging tester)를 사용하여 가속열화된 케이블 자켓의 경화정도를 측정한 결과 20.92°C의 환경에서 유지되는 케이블의 경우 Indent 값의 변화가 미미하여 열화정도를 측정하기 어려웠으나 50°C에서 10년이상 사용한 케이블의 경우는 Indent 값이 급격히 증가하는 시점에 해당되므로 CAT 장비를 활용하여 케이블 자켓의 열화정도를 계량화 할수 있을

것으로 판단된다.

표 1. 사용 기간별 연신율 및 Indent 모듈계수 변화

	연신율 (e/e_0)	Indent (M/M_0)	20.92°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	비고
1	50%	103%	80년	26.6년	8.55년	2.94년	1.07년	0.17년	연신율 제한시점
2	33%	114%	286년	95년	30년	10년	3.8년	0.6년	Indent계수 급변시점
3	24%	138%	492년	163년	52년	18년	6.6년	1.05년	
4	13%	182%	1100년	366년	117년	40년	14년	2.36년	
5	3%	710%	2178년	724년	232년	79년	29.3년	4.67년	

8. 결 론

가속열화를 통한 예상수명 평가시 절연체로 사용되는 EPR의 경우 온도변화에 따른 활성화에너지의 변화로 아레니우스 방정식의 적용에 문제가 있으나 케이블 자켓으로 쓰이는 Neoprene은 온도 변화에도 활성화 에너지가 일정하게 유지되어 아레니우스 방정식 적용이 가능하다. 가속 열화 실험결과 Neoprene 자켓의 연신율은 온화한 환경 및 열악한 환경 모두에서 가속열화 시간에 비례하며 감소함이 확인되었으며, Cable Indent 모듈 값은 온화한 환경에서는 미소한 변화가 발생하나 50°C 이상의 열악한 환경에서 10년 이상 장기간 열화된 경우 열화의 판별이 가능한 지시값을 나타내었다. 가동중 원전의 케이블을 손상시키지 않고 연신율을 측정하기 위해 Neoprene 케이블 자켓과 동질의 시험편에 대한 연신율을 측정한 결과 350kgf의 인장력까지는 오차범위 4%로 신뢰성있는 데이터를 얻을 수 있었다. 비 파괴형 연신율 측정방식은 CAT와 아울러 가동중 원전 케이블의 교체 시점 확인 및 수명연장을 위한 케이블 열화 진단에 매우 유용하게 활용될 수 있으므로 향후 다양한 케이블에 대한 실험이 필요하겠다.

참고문헌

- 1) 지중배전 케이블의 수명예측 기법, 한전 기술개발지 '98 여름호, 전력연구원, 김상준/한재홍
- 2) Effect of Antioxidants on Aging of Nuclear Plant Cable Insulation, EPRI NP-7140, 1991
- 3) 원전수명관리연구(I) 최종보고서 요소기술 개발편 “격납용기 내 케이블 노후화 평가기술개발”, 전력연구원/원자력연구소, 1996
- 4) Cable Indenter Aging Monitor, EPRI NP-7348, 1991
- 5) 원전케이블 노화진단기 개발, “99원자력학회 춘계 학술발표대회, 전력연구원 김종석
- 6) Limitations of the Arrhenius Methodology, Kenneth T. Gillen, Sandia National Lab, Proceedings of the Twenty-sixth water Reactor Safety Information Meeting, Oct 1998