

내환경 검증을 통한 가동원전 케이블의 노화관리 Aging management of Operating NPP cable through Environmental Qualification

김종석, 정일석, 김태룡

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

케이블 사용수명 검증시험은 XLPE 케이블을 제외한 대부분 케이블의 경우 과단-연신율 시험에 의해 수행가능하며 보조적인 수단으로 인덴터 방법을 사용할 수 있다. XLPE 케이블은 열화에 따른 기계적 물성치 변화가 불규칙하므로 산화 방지제 분석 등 화학적 분석방법을 활용하는 것이 바람직하다. EQ 시험에 사용된 고온 단시간 가속열화 방법은 발전소의 실제 운전조건을 시뮬레이션 하기에 불확실성이 많으므로 케이블 설치후 저온 장시간 가속열화 실험을 수행하고 수명을 재평가하는 것이 바람직하다. 저온 장시간 실험에 필요한 가속열화율은 "250"이하가 바람직하다. 케이블의 사용수명을 검증하는 방법에는 "사용시간 기준" 방법과 "상태 기준" 방법이 있다. 전자는 케이블 수명만료 시점에서 지정된 수명 때문에 케이블의 상태가 양호하여도 교체를 하여야 하는 문제가 있고 후자는 주기적으로 케이블의 상태를 모니터링해야 하는 불편함이 있지만 지정된 상태 이하로 나빠지지 않는 한 사용수명에 제한을 두지 않는 장점이 있다.

Abstract

Elongation-at-break test is useful to evaluate the life of most NPP cables except XLPE. Indenter can be used for auxiliary device. It is reasonable to evaluate the life of XLPE cable by OIT/OITP method which analysis the amount of anti-oxidant. High temperature-short time accelerated aging has considerable uncertainty to simulate the actual operating environment. It is reasonable to employ the low temperature-long time accelerated aging to re-evaluate the install life of cable after cable installation. Accelerating rate of "250" was recommended by the Sweden researcher¹⁾. Time based and condition based life qualification are used to determine the cable life. When time based qualification is chosen, install life will be destined by initial qualification. Condition based life qualification have merit of not destined to the time but destined only the condition of cable. If there is no sign of cable aging under the designated condition, it is not necessary to replace the cable even during the extended life of nuclear power plant.

1. 서론

국내에서도 가동 및 건설중인 원전이 20여기에 도달하였고 국내 최초의 원전인 고리 1호기가 가동년수 23년에 이르고 있어 그간의 운전 및 정비경험을 피드백하고 경년열화에 대한 체계적인 연구를 수행하는 것이 필요하다. 해외 운전경험을 보면 발전소 주요기기의 노화감쇄를 적절히 관리하지 못함으로 인해 발전소의 수명을 단축시켜 수명연장을 하지 못하는 경우가 있었다. 발전소의 경년열화 관리는 운전기간 동안 설계기능을 보장하도록 적절히 관리되어야만 하는 필수 불가결한 것이다. 안전성 측면에서 보면 경년열화 관리는 노화감쇄를 허용치 이내에 유지하고 안전에 중요한 기기의 마모가 적절한 한계를 넘지 않도록 하여 비 정상 운전조건이 발생하여도 충분한 운전능력을 보유하도록 하기 위한 것이다. 발전소의 주요 구성품 중 케이블은 발전소의 운전에 필수 불가결한 것이지만 온화한 환경에서의 케이블 평균수명이 40년에 달하는 관계로 경년열화 감시 및 수명평가는 관심의 대상에서 벗어날 수 밖에 없었다. 그러나 국내에서도 PSR 수행과 아울러 내환경 검증의 개념이 도입되고 있어 열악한 환경에 위치한 안전성 관련 케이블의 경우 운전초기 단계부터 경년열화의 지속적인 모니터링을 통해 사용수명을 평가하고 적절한 노화관리방안을 수립하는 것이 필요하다.

본고에서는 저전압 I&C 케이블(< 1 KV) 중 XLPE (cross-linked polyethylene, EPR/EPDM (ethylene propylene based materials, EVA(ethylene vinyl acetate), CSPE(chlorosulphonated polyethylene), PVC(poly vinyl chloride) 절연체 케이블을 대상으로 경년열화 평가 및 노화관리방안을 기술하고자 한다.

2. 케이블 노화관리의 필요성

케이블은 발전소를 모니터링하고 조작하는 계측설비와 계통의 주요기기를 연결시키는 것으로서 원자력발전소 I&C 계통에서 필수적인 구성품이다. 따라서 I&C 케이블을 포함하여 모든 안전성 관련기기는 설치된 기간동안 정상운전을 포함하여 설계기준사고(DBE) 및 설계기준사고 후 상황에서 고유기능을 수행할 수 있도록 검증되어야 한다. 해외 원전에서는 안전성관련 I&C 케이블의 내환경 검증을 IEC-780 혹은 IEEE-323, IEEE-383과 같은 국제기준에 따라 수행하고 있다. 이러한 가속열화방법을 이용한 시험 절차들은 케이블이 설치수명 동안 정상운전 조건에서 사용한 후 DBE 사고가 발생하여도 정상작동이 가능함을 증명하는데 그 목적을 두고 있다. 현재 원자력발전소의 수명을 설계수명이상 연장하는 것이 세계적인 추세이며 가동중인 발전소의 케이블을 설계수명 이상 연장하여 운전하기 위해서는 수명평가의 불확실성을 줄이는 모니터링 및 수명평가방법을 도입하는 등 연장운전을 고려한 노화관리를 수행해야 한다.

3. 원자력발전소 케이블의 종류

3.1 케이블 용도별 종류

원자력발전소에는 수백 종류의 종류 및 규격이 있으며 이들은 대략 중전압 전력케이블, 저전압 전력케이블, 제어케이블, 신호케이블, 패널 연결선, 특수 케이블, 보안선로, 전화선, 전등선, 접

지케이블로 구별할 수 있다. 본 연구에서는 신호 및 제어 케이블에 대해서만 언급하고자 한다. 신호케이블(열전대 신호선 포함)은 보통 1Kv 이하의 저전압 저용량으로서 여러 가지 변환기로부터 디지털 혹은 아날로그 신호를 전송하는데 사용된다. 저항온도 검출기, 압력 변환기 및 열전대 온도 신호선은 꼬임 형상을 가지고 있으며 방사선 검출 및 중성자 모니터링 회로는 동축 혹은 3 동축 형태를 가지고 있다. 제어케이블은 저전압 저용량으로서 조작스위치, 밸브 구동기, 릴레이 등에 많이 사용되며 고전압의 경우는 차폐체가 있는 다중 코어 구조로 구성되어 있다. 저전압 케이블(< 1Kv)은 모타, 모타 조절센터, 히터 및 소형 변압기 등의 저전압 보조장비에 전기를 공급하기 위해 사용되며 차폐체가 없는 단일 코어 혹은 다중 코어로 구성된다. 특수 케이블은 특정용도 혹은 신호, 제어 및 전력회로를 단일 케이블에 내장한 복합케이블을 의미한다. Sandia National Labs의 보고서에 의하면 발전소 케이블의 구성비는 개략 신호케이블 20%, 제어케이블 61%, AC 전력 13%, DC전력 1%, 통신선5%로 구성되어 있는 것으로 조사되었다.

3.2 케이블 구성

케이블은 용도에 따라 다양한 구성품으로 구성될 수 있으나 I&C 및 저전압 케이블의 경우 주로 전도체, 절연체, 차폐체, 자켓으로 구성되어 있다. 단일 코어 케이블의 경우는 각 전도체 별로 절연체가 설치되고 그 위에 자켓이 씌워지는 형태로 구성되며 다중 코어 전도체의 경우 케이블의 기계적 강도를 높이기 위해 절연체 간극을 채우는 충전물을 설치하기도 한다. 랩용 테이프를 설치하여 전기적, 기계적 기능향상 또는 화재방호, 전도체간 그룹핑을 하기도 한다.

3.3 케이블 재료

전기 케이블에 사용되는 절연체 및 자켓 재료는 기계적, 전기적 특성 및 화재지연을 위해 여러 가지의 첨가물들을 폴리머 재질과 복합하여 제작한다. 원자력발전소에서 사용중인 폴리머 형태의 케이블들은 Table 1에 표기하였다. 폴리머 재질들 중 절연체로 가장 많이 사용되는 것은 XLPE, EPR/EPDM 및 PVC 이다. 미국원전의 경우 XLPE와 EPR/EPDM이 가장 많이 사용되고 있으며 PVC는 오래된 원전에 많이 사용되고 있는 것으로 확인되었다. 현재 PVC 재질은 격납용기 내부의 케이블 절연체로는 잘 사용되지 않고 있다. 기타 다른 절연체 재질은 상대적으로 적은 양이 사용되고 있으며 특정상황에 적합한 케이블 재료를 선별하여 사용하고 있다. 예를 들어 PEEK 절연체는 고방사선, 고온 지역에 사용되고 있다. CSPE는 주로 자켓 재질로 사용되고 있으며 EVA 또한 자켓재료로 많이 사용되고 있다. 최근에는 화재시 할로겐 방출문제로 할로겐이 없는 케이블 재질을 사용하는 경향이 있으며 향후에도 할로겐 재료의 사용을 제한하는 규제가 확대될 것으로 예상된다.

표 1 . 폴리머 재료 케이블의 재료별 사용처

	재 질	절연체	자켓	사용정도
1	Cross-linked polyethylene/polyolefin(XLPE/XLPO)	○		다량 사용
2	Low and high molecular weight polyethylene (LMWPE, HMWPE)	○		소량 사용
3	Ethylene propylene based elastomers(EPR, EPDM)	○		다량 사용
4	Chlorosulphonated polyethylene(CSPE), also known as Hypalon		○	다량 사용
5	Ethylene vinyl acetate(EVA)	○	○	소량 사용
6	Polyvinyl chloride(PVC)	○	○	다량 사용
7	Silicone rubber(SiR)	○	○	소량 사용
8	Polyether ether ketone(PEEK)	○		제한적 사용
9	Ethylene tetrafluoroethylene(ETFE), known as Tefzel	○		제한적 사용
10	Polyphenylene oxide(PPO), known as Noryl	○		제한적 사용
11	Butyl rubber(BR)	○	○	제한적 사용
12	Polyimide, known as Kapton	○	○	제한적 사용
13	Polychloroprene, known as Neoprene		○	제한적 사용
14	Polyethylene terephthalate(PETP) know as Mylar, used as tape wrap			제한적 사용

4. 폴리머 재질 케이블의 노화

4.1 노화조건

폴리머 재질의 노화는 폴리머 자체의 노화, 운전환경, 장시간 사용 등에 의해 발생한다. 자켓 및 절연체는 기본적인 폴리머에 첨가물이 추가된 화합물 조직체로 구성되어 있어 산화방지, 열적 안정성, 화재시 난연효과 등을 가지게 된다. 노화에 가장 영향을 많이 미치는 요소는 온도 및 방사선이지만 가동중인 기계에 연결된 케이블의 경우 진동을 고려해야 하며 설치시 지나치게 구부러져 설치된 케이블의 경우 응력으로 인한 노화가 진행될 소지가 있다. I&C 케이블의 경우 1Kv 정도의 부하밖에는 걸리지 않으므로 전력에 의한 영향은 미소하다

4.2 노화가 미치는 영향

케이블에 부하가 생기면 케이블은 분자수준의 화학적 물리적 변형이 발생하게 되며 이러한 과정을 노화 메카니즘이라고 한다. 노화로 인해 케이블 재료에 발생하는 물리적 변화를 살펴보면 인장강도의 감소가 수반되는 연신율의 감소, 경도 및 압축율의 증가(XLPE의 경우는 적용되지 않음), 비중의 증가, 유전손실의 증가 등과 같은 전기적 특성의 변화 등이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 대부분 케이블의 경우 노화로 인해 전기적 특성이 변화하는 경우는 잘 없으며 케이블 성능의 저하는 기계적 성질의 변화로 판단된다. 케이블 절연체의 균열 같은 것은 절연체의 절연저항

상실 이전에 발생하게 된다. PVC 케이블의 경우는 DBE 시험 중 균열이 발생하기 이전에 전기적 기능을 상실하게 되는 경우가 있다.

4.3 노화 시뮬레이션

케이블 수명을 결정하는 가장 정확한 방법은 40-60년 동안 가동원전에서 사용된 케이블을 절취하여 상태를 시험하는 것이다. 그러나 이 방법은 발전소 초기부터 예비 케이블을 설치해 둔 경우가 아니면 현실적으로 어렵다. 또 다른 방법으로는 짧은 시간동안 가속열화를 수행하여 실제 발전소에서 수십 년간 일어나는 노화상황을 시뮬레이션 하는 것이다. 이러한 시뮬레이션이 실제 상황을 대표할 수 있음을 증명하기 위해서는 발전소의 실제 상황을 수년간 모니터링 하여 그 결과를 바탕으로 가속열화 조건을 선정하여야 한다. 아레니우스 방정식은 열적 가속열화를 통해 수명을 예측하는 모델로서 가장 많이 사용되고 있다. 아레니우스 방정식은 아래 식 (1)과 같이 열적 노화 특성이 온도에 반비례하는 특성을 나타내고 있다.

$$(\ln k = \ln A - E_a/RT) \text{ ----- (1)}$$

A는 재질의 고유상수, E_a 는 활성화에너지. R은 가스상수 이며 T는 절대온도이다.

가속열화를 넓은 범위의 온도를 대상으로 수행하면 때때로 선도에서 일직선을 이루지 못하는 꺾임점이 발생하게 된다. 이것은 활성화에너지가 저온에서 고온사이의 전 구간에서 일정하지 못하고 변화하기 때문에 발생하는 현상이다. 대부분의 경우 저온에서는 고온에서 보다 낮은 활성화에너지 (E_a)를 나타내었다. 따라서 고온에서 측정된 활성화에너지를 사용하면 실제 가동중 온도에서의 노화보다 평가 절하된 노화치를 계산하게 된다. 그림1에서는 CSPE 재질을 열적노화시켰을 경우 아레니우스 선도를 나타낸 것으로 120°C 이상과 이하에서 활성화에너지가 서로 달라서 아레니우스 선도에 꺾임점이 생기는 것을 볼수 있다. 일반적으로 가속열화시의 최소 온도와 실 사용온도의 차이는 가능하면 25°C 이상을 초과하지 않도록 권고하고 있다. 폴리머 재질의 노화평가를 위한 아레니우스 방정식의 적용방법은 IEC 216에 기술되어 있다.

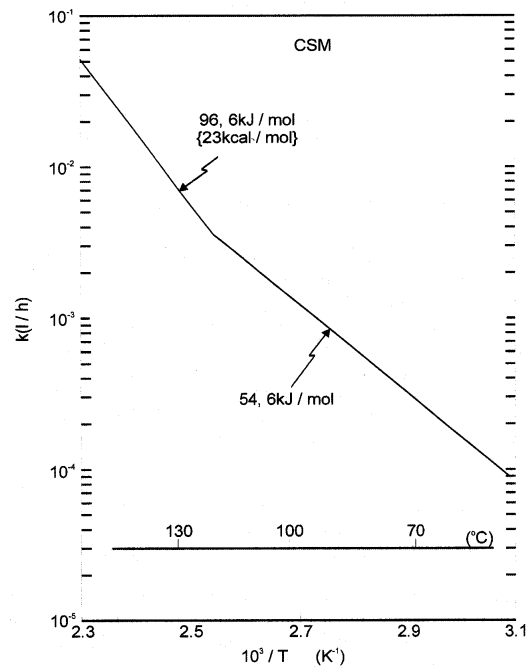


그림 1 . CSPE 재질의 아레니우스 선도

4.4 노화 메카니즘

방사선이 없는 조건에서 70-80°C이하의 온도에서의 열적노화에서 PVC의 노화 메카니즘은 케이블 표면에서의 可塑劑의 증발이다. 80°C보다 높은 온도에서 방사선이 조사되면 이러한 노화

메카니즘은 PVC의 미소분자 체인으로부터 분자 내부에서 염화수소산이 제거되는 현상이 발생하게 된다. 가속열화 온도가 높으면 노화 시뮬레이션이 부정확해진다. 방사선 가속열화에서 반수정체 폴리머(XLPE) 재질은 온도와 역비례하는 특성을 가지며 고온에서보다 저온에서 빠른 노화특성을 가지게 된다. 이러한 노화특성은 재결정이 수행될 때 고분자의 복잡한 자체보수 메카니즘으로 인해 발생한다. 어떤 케이블의 경우 외부자켓이 절연체와 직접 접촉하도록 구성되어있다. PVC 케이블의 경우 이러한 형상은 재질의 可塑性을 확산시키는 역할을 한다. 이러한 물리적 노화메카니즘은 절연체와 자켓사이에 견고한 차폐물이 있을 때는 발생하지 않지만 망 형태의 차폐체인 경우는 발생할 수 있다. 케이블을 통으로 가속열화한 경우와 담뱃형 시편으로 가속 열화한 경우는 확산효과 때문에 가속열화 후 노화정도가 확연하게 달라짐을 알 수 있다.

케이블의 주 노화메카니즘을 보면 분자의 구조에 영향을 미치는 화학적 노화와 복합물의 구성에 영향을 미치는 물리적 노화메카니즘이 있음을 알 수 있다. 화학적 노화 메카니즘은 고분자 체인의 절단, 이웃한 분자의 상호연결 작용에 의해 발생하는 cross-linking, 산소확산, 시너지효과 및 염화수소산의 이탈 등이 있으며 물리적 노화 메카니즘에는 可塑性 물질의 증발 또는 이동 등이 있다.

노화 메카니즘을 확인하는 기계적 인자로는 파단-연신율, 인장강도, 압축 모듈계수가 있으며 전기적 인자에는 절연저항, 유전강도, 유전 상실율, 물리적/화학적 인자에는 FT-IR, 분광기, 산화유도시간 및 온도, 팽창율, 껍질, 중량 소실, 점도, NMR, 비중 등이 있다.

4.5 가속열화 수행 흐름도

가속열화 수행중 발생하기 쉬운 실수를 방지하게 위해 그림2에서는 가속열화 흐름도를 제시하였다. 이 흐름도는 모든 폴리머 재질의 케이블에 사용될 수 있으며 본 흐름도에 따라 가속열화 실험을 수행하면 흔히 빠지기 쉬운 함정들을 피할 수 있고 자연노화에 근접한 결과를 얻을 수 있다.

5. 내환경 검증을 통한 케이블 노화관리²⁾

5.1 목적

내환경 검증의 목적은 케이블이 정해진 환경조건에서 고유기능을 수행할 수 있음을 보증하기 위한 것이다. 이러한 환경조건에는 정상운전 및 DBE 사고환경을 포함하게 된다. 내환경검증은 산업기준에서 요구하는 일반적인 조건 혹은 최악의 사고상황을 고려한 발전소의 특정조건에 따라 수행된다. 설치되기 이전의 신제품 케이블을 위한 검증시험에는 일반적으로 “유형시험(type test)”방법이 적용된다. 또 다른 방법으로는 “현 상태 검증”을 수행하는 것이다. 현 상태 검증이라 함은 케이블의 상태를 지시 가능한 방법으로 계량화하고 이러한 상태 지시치를 통해 케이블이 고유기능을 수행할 수 있음을 증명하는 것이다.

5.2 내환경 검증

내환경 검증은 설치되는 케이블의 샘플에 대한 유형시험(type test)수행, 유사한 재질 및 환경 조건에서의 경험 반영, 엔지니어링 데이터에 근거한 분석을 종합하여 수행함으로써 완성되며.

EQ 시험은 일반적으로 다음과 같은 절차를 거치게 된다.

- (a) 정상, 비정상 및 DBE 상황에서의 검증절차 수립(수행 기능 포함)
 - 절차서에는 절연체 재질에 대한 확인, 동일한 재질에 대한 과거 운전경험, 노화형태 및 다양한 환경조건에서의 민감도, 관련 측정기 등에 대한 내용이 포함되어야 한다.
- (b) 환경조건에 노출되기 전 기능시험
- (c) 장기적 반응상태를 고려한 가속열화
- (d) 기능시험을 포함한 DBE 및 post-DBE 시험

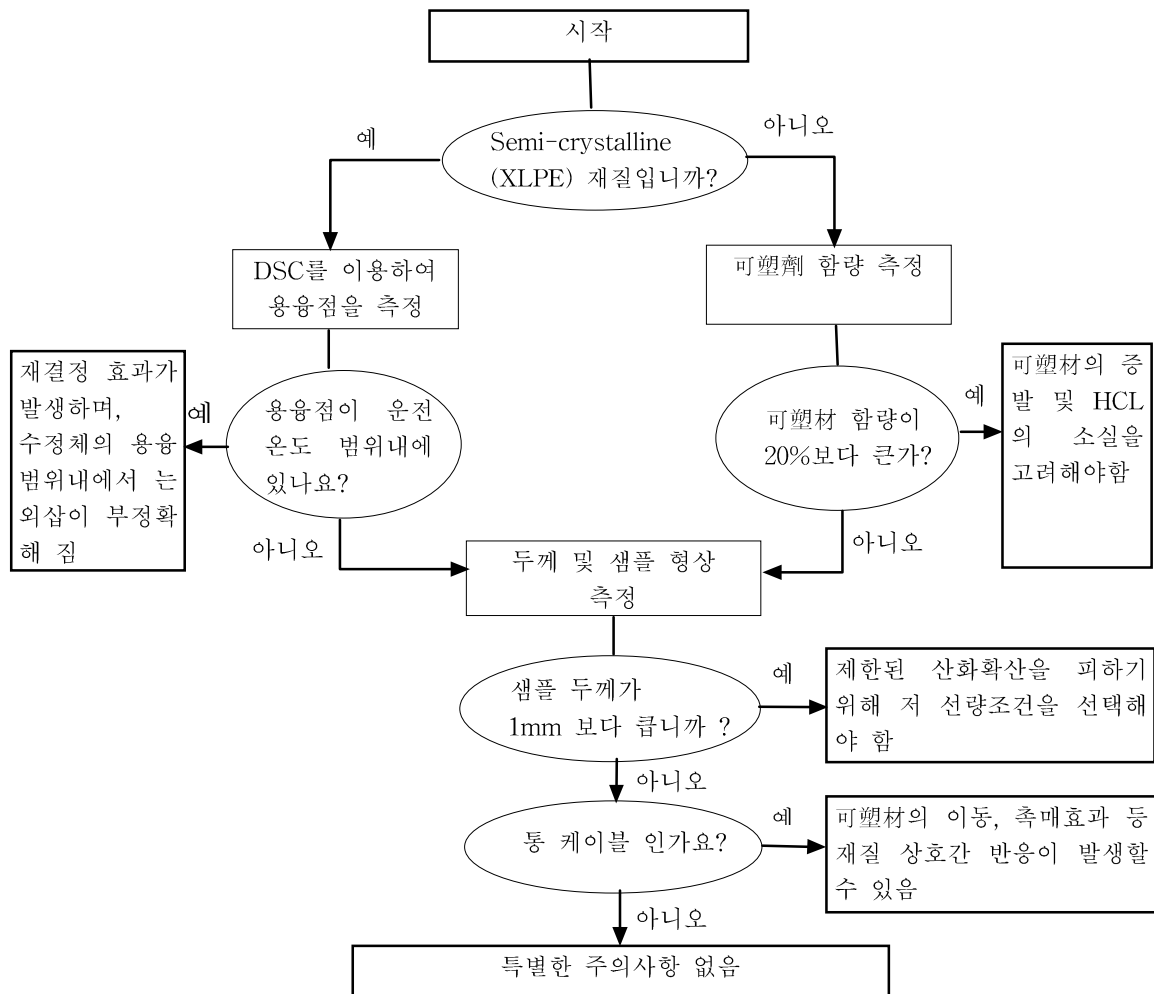


그림 2. 가속열화 흐름도

유형시험은 일반적으로 검증수명을 평가하기 위해 수행되며 “사용시간 기준 수명평가” 방법 대신 “상태 기준 수명평가” 방법을 사용하기도 한다. 상태평가에 의한 수명검증을 위해서는 케이블을 설정된 조건에서 연신율 50% 감소점까지 인공적으로 노화시키고 사고조건과 유사한 조건에서 기능시험을 수행한다. 이러한 방법을 통해 수명이 검증되면 검증된 상태까지 케이블이 노화 감쇄되지 않으면 시간에 관계없이 계속 사용할 수 있게 된다. 수명인증 시점을 연신율 50%로 정한 것은 과단-연신율 값이 50%에 도달하게 되면 나머지 50% 물성치로서 DBE 시험을 통과할 수 있다는 경험적 가정 때문이다. 케이블의 경우 기능이 중요하므로 상태기준의 수명인증이 합리적일 수 있다. 상태기준 수명검증은 온화한 환경에 설치된 케이블의 사용수명을 극대화 시킬 수 있다는 유리한 점이 있지만 케이블 상태를 주기적으로 확인해야 하는 문제가 있다. 만약 연신율 측정시험과 같은 비파괴시험을 수명평가에 적용하고 있다면 본 방법은 실제 수행에 어려움이 있다. 그럼에도 이러한 상태기준 수명인증은 중대한 노화감쇄가 없다면 일정기간 후 수명을 재평가하거나 교체할 필요가 없고 분석적 방법에서 발생하는 불확실성을 감소시킬 수 있다.

5.3 EQ 시험의 불확실성

만약 초기 검증시험의 목표가 설치수명(30년 - 40년)과 동일한 검증수명을 증명하기 위한 것이라면 가속열화는 단 기간 내에 완료하기 위해 높은 가속계수로서 수행하게 된다. 이것은 가속열화를 고온 또는 고방사선 조건에서 수행해야 함을 의미하며 인증수명을 예측함에 있어서 불확실성을 높이는 결과를 가져온다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 케이블 수명을 예상 수명보다 적게 인증한 뒤 설치 후 상태 모니터링 방법 등을 통해 수명을 연장하는 방법과 높은 가속열화계수로 케이블의 수명을 인증한 뒤 설치 후 낮은 가속열화계수로서 장기간 가속열화하는 방법을 통해 수명을 재 평가해 보는 방법이 있다. 만약 가속열화가 지나치게 높은 온도에서 수행된다면 노화 메카니즘이 실제와 다르게 발생할 수도 있다. 비슷한 경우가 방사선 가속열화에서도 발생할 수 있는데 DBE 시험의 경우 고 방사선량에서는 비균질 산화가 발생할 수도 있다. 이 경우에 시험을 통해 인증된 수명은 실제 사용수명과 다를 수 있다.

5.4 열 및 방사선 가속열화

열적 가속열화는 실제 사용온도 보다 상당히 높은 온도에서 열화시키는 작업이다. 케이블 연구결과들을 보면 활성화에너지와 노화 감쇄율은 절연체의 복합성과 온도에 따라 변화하므로 활성화에너지는 시험 준비의 한 부분으로 사전 측정되어야 한다. 유사한 물질의 데이터를 사용하는 것은 정확도가 떨어지므로 상당히 보수적인 계산을 수행해야 한다. 고온시험시의 온도 편차에 대한 것은 IEC60068-2-2에 기술되어 있다. 실험실에서의 시험결과를 통해 설정된 수명의 정확성은 위에서 언급한 가속열화 계수에 따라 달라진다. 부 정확성은 가속열화 계수가 클 경우 더욱 크지게 된다. 스웨덴에서는 가속열화계수를 “250” 정도로 제한할 것을 권고하고 있다. 비록 가속열화계수를 250으로 제한하더라도 가속열화에 사용되는 온도는 아직 상당히 높은 상태이다. 가속열화 온도는 반드시 실제 온도에서 발생하는 노화메카니즘과 동일하게 발생하는지 여부를 확인한 후 결정되어야 한다.

방사선 가속열화에서는 짧은 시간동안 수명기간동안의 총 조사 예상량을 조사하여야 한다. 방사선 가속열화 계수는 가속열화 방사선율 과 운전 중 방사선량과의 비율로 결정된다. 여러 절연체에서 특정 조사율의 조사량으로 인해 노화감쇄가 일어나는 경우가 있다. 장기간 노화의 경우를

보면 산화는 가장 두드러진 노화감쇄 메카니즘이라고 볼수 있다. 가속열화 중의 노화감쇄는 산소가 케이블 재료에 확산되는 지에 달렸으며 산화확산제한 효과가 발생할 수 있다. 조사선량율이 무시할만 하다는 것이 증명되지 않으면 조사선량율은 가속열화에서 제한을 받게 된다. 20-30Gy/h 정도의 매우 낮은 선량율에서도 어떤 재질은 조사선량율에 매우 민감한 것으로 나타났다. 가속 열화시 산화확산제한이 발생할때 일어나는 비균질 산화를 피하기 위해 주의해야 한다.

5.5 기타 환경검증 인자

대부분의 경우 습도는 중요한 인자가 아니다. 고습도의 경우 가수분해를 통해 열적 노화를 촉진시킬 수도 있다. 진동은 환경검증에 중요한 인자가 아니지만 고 진동 기기에 부착되어 있는 경우 고려할 필요가 있다. 설치 및 정비과정에서 과도하게 구부러진 케이블의 경우 등 기계적 응력이 발생할 수 있는 부분은 케이블의 기계적 건전성에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

6. 가동원전 케이블에 대한 내환경 검증²⁾

6.1 개요

가동한지 오래된 발전소의 경우 안전성 관련 케이블임에도 불구하고 검증문서가 없거나 검증수명, 검증조건 등이 평가되지 않은 경우가 있다. 이러한 경우는 내환경 검증을 통하여 검증수명을 평가하는 것이 시급하다.

6.2 검증문서가 없는 케이블

내환경검증 문서가 없는 안전성 관련 케이블의 경우 3단계의 절차를 거쳐 검증을 받아야 한다. 첫째 발전소의 수집 가능한 문서를 조사하여 케이블 구성품을 확인하거나 케이블 절연체에 관한 데이터를 얻기 위해 제작사를 접촉하고 타 발전소나 연구결과 보고서 등을 통해 정보를 입수하는 것이 필요하다. 실험을 통해 얻어진 활성화에너지나 재질별 방사선 조사 효과 등이 결정되어야 한다. 둘째, 가동중 환경 조건을 모니터링하고 데이터를 입수하여야 한다. 셋째, 내환경 검증을 위한 시편을 구해야 한다. 시편은 발전소에서 가장 열악한 환경에 위치한 케이블을 선정하여 이 케이블과 동일한 케이블을 자재창고에서 불출하여 사용하거나, 기존 케이블을 신제품으로 교체하고 교체된 케이블을 시편으로 활용하거나, 제작사를 찾아서 동일한 케이블을 구하는 방법 등이 있다.

신품을 시편으로 사용할 경우 모두 시편용 케이블은 온화한 온도 및 방사선에 조사되지 않은 케이블이어야 한다. 만약 케이블 샘플이 발전소로부터 추출되었다면 EQ시험에 의해 결정된 수명은 설치된 케이블의 잔존수명으로 사용된다. 자재창고 혹은 신제품 케이블에서 시편을 채취하였다면 설치된 케이블의 잔존수명은 시험시 인증된 수명에 운전기간을 뺀 수명이 된다. 검증조건이 결정되면 추가적인 상태감시를 수행하여 설치된 케이블의 상태를 확인해야 한다. 케이블의 절연체가 아주 잘 알려진 것이거나 DBE 상황에서 동일한 케이블의 운전성에 대한 상태 지식값을 얻을 수 있다면 상태감시 프로그램으로 EQ 시험을 대체할 수 있다.

6.3 인증수명 및 환경조건이 결정되지 않은 케이블

EQ 시험보고서는 있으나 인증수명이 지정되지 않은 케이블의 경우 다음과 같은 4단계의 절

차를 거쳐 인증수명을 결정해야 한다. 첫째, 열 및 방사선 가속열화 계수의 계산을 위해 필요한 인자들(절연체의 활성화에너지 등)을 결정해야 한다. 케이블 자켓이나 도체 절연물 등에 다른 재질이 사용되었다면 진도체용 절연체의 활성화에너지를 적용하여야 한다. 둘째, 케이블이 설치된 지역의 대표할 만한 온도 및 방사선 준위를 결정해야 하고 EQ 시험시 적용된 검증 여유치를 확인하여야 한다. 셋째, EQ 시험에서 사용될 가속열화계수를 산출하여야 한다. 넷째, 검증수명을 계산하고 검증조건을 수립해야 한다.

검증수명을 연장하려면 추가적인 EQ 실험(가속열화 및 DBE 시험)이 있어야 한다. 케이블의 실제 노화가 적절히 감시되고 관리되는지를 보장하기 위해 상태감시프로그램을 수행해야 한다. 다른 방법으로는 EQ 보고서에 명시된 가속열화 조건을 반복함으로써 검증조건을 확정하고 케이블의 상태를 측정하는 것이다. 이 방법은 실험에 사용될 노화되지 않은 케이블이 있을 경우에만 가능하다.

6.4 내환경 검증 유지관리

EQ는 안전성 관련 케이블 중 환경 취약지역의 노화를 관리하기 위한 수단이다. 따라서 발전소에 설치된 나머지 케이블의 경우 상당량의 검증 여유가 있으며 이러한 여유는 현재의 EQ 방법의 불확실성을 보상하기에 충분하다. 또한 케이블에 대한 EQ 시험시 지정된 적용인자의 정확도를 향상하기 위한 여러 가지 활동(환경 모니터링, 케이블 상태감시, 추가적인 가속열화 시험)이 수행되어 검증수명 및 검증조건에 대한 신뢰를 높이고 있다. 케이블 상태 감시는 설치된 케이블이 검증조건 이상 노화 감쇄되지 않았음을 보장하는 중요한 수단일 뿐 아니라 인증수명을 연장하기 위해서도 사용된다.

6.4.1 발전소 실제 운전상태 감시

내환경 검증시 수립된 검증수명은 케이블이 설치후 노출될 환경조건을 예상하여 평가된다. 검증 여유치란 이러한 예상치에 대한 불확실성을 보완하기 위해 사용된다. 만약 발전소의 노화관리프로그램이 케이블이 설치된 대표적인 지역을 대상으로 연속 혹은 주기적인 온도 및 방사선 환경 감시를 수행한다면 이러한 여유치는 줄어들게 될 것이고 인증수명도 조정이 가능할 것이다. 이러한 조정은 실제 환경조건에 근거하여 설치후 주기적으로 조정을 할 수 있다.

6.4.2 상태감시 방법

대부분의 검증결과 검증된 케이블의 경우 정상환경에서 오랜 기간동안 건전한 것으로 나타났다. 현장에서의 케이블 상태감시는 노화가 예상한 것보다 더 빨리 진행되지 않으며 케이블 재질의 기계적 물성치에 변화가 없음을 확인하는데 사용될 수 있다. 만약 정상 운전환경 및 케이블 가동조건이 열악하면 케이블의 노화를 관리하는데 보다 세심한 관심을 가져야 한다.

검증수명 말기(DBE 부하를 제외한)에 측정된 상태 지시(CI, condition indicator) 값은 케이블의 계속운전 가능여부를 증명해 준다. 상태감시 프로그램의 목적은 실 운전상황이 검증조건을 초과하지 않았음을 증명하는 것이다. 이러한 CI값은 시간이 지나감에 따라 변화하며 수명말기의 CI값을 아는 것이 필요하다. 케이블 노화관리 프로그램으로 사용되는 상태감시 프로그램은 열악한 지역에 위치한 소수의 케이블에 대해서만 국한적으로 수행된다. 케이블의 상태감시는 주로 기계적 물성치의 변화를 육안 또는 장비를 이용하여 정성적/정량적으로 평가하는 방법을 사용한다. 표2

에서는 현재 원자력발전소에서 가장 많이 사용하고 있는 케이블의 종류별 상태평가 방법을 기술하였다.

6.4.3 가동중 가속열화 시험

내환경검증을 위한 가속열화 시험시 저온조건에서 장기간의 가속열화를 수행하기는 어렵다. 따라서 예상 인증수명은 제한적이며 높은 가속율을 적용하여야 한다. 이것은 수명평가에 있어서 불확실성을 높이게 되며 수명평가가 높은 보수성을 적용하게 된다. 케이블의 현장설치 사용중 신폼케이블로 교체되어 추가적인 시험편이 확보되고 향상된 수명평가 기술이 개발될 수도 있다. 이러한 경우 장기간 가속열화 시킬 수 있는 충분한 시간적 여유가 있어 낮은 가속열화율로 케이블을 가속 열화할 수 있다. 이러한 시간적 여유는 실제 환경조건 모니터링 결과를 바탕으로 정확한 활성화에너지를 구할수 있게 한다. 설치후 장기간에 걸친 추가 가속열화 실험은 예상 검증수명의 불확실성을 감소시키기 위해 사용된다. EQ 시험때에 비해 낮은 비율로 가속열화율을 적용할 경우 검증조건이 실제 상황과 유사하다는 확신을 가질수 있다.

일부 발전소의 경우 신폼 케이블을 설치할 때 수명평가용 케이블 샘플을 별도로 설치하기도 한다. 케이블 샘플은 가동중인 케이블의 상태를 주기적으로 평가하고 필요시 인증수명을 변경하는데 사용된다. 케이블은 주기적으로 인출되어 가속열화 시험 및 DBE 시험을 수행하게 된다. 만약 이러한 시험결과 케이블이 유전특성 및 다른 물성치의 건전성을 유지하고 있다면 설치된 케이블의 기존수명을 연장하게된다. 이러한 작업을 가동중 검증(on-going qualification) 이라고 한다. 케이블 샘플 설치 대신에 케이블 교체시 이러한 검증작업을 수행하기 도 한다.

표 2. 원전 케이블 종류별 적용 가능한 노화진단 방법

노화진단법	XLPE	CSPE	EPR/EPDM	PVC	EVA
육안검사	○	○	○	○	○
파단-연신율 측정 시험	×	○	○	○	○
Indenter	×	○	○	○	○
산화방지재 분석법	○	×	○	△	○
TGA	×	×	×	○	×

○ : 열화지시와 상관 관계가 좋다.

△ : 열화지시와 비교적 상관 관계를 보이지만 시험방법이 우수하다고 보기는 어려움

× : 열화지시와 좋은 상관 관계를 보이지 않는다.

7. 결론

내환경 검증을 통해 가동중 원전 케이블의 사용수명을 평가하고 상태감시를 통해 검증을 유지관리하는 방법에 대하여 국내외 문헌을 조사하고 국내원전에 적용 가능한 방법을 연구하였다. 사용수명 평가를 위한 검증시험은 XLPE 케이블을 제외한 대부분이 파단-연신을 시험에 의한 수명평가가 적합하며 보조적인 수단으로 인덴터³⁾⁴⁾ 방법이 적용가능한 것으로 확인되었다. XLPE 케이블은 열화에 따른 기계적 물성치 변화가 불규칙하여 가속열화를 통해 장기적 수명을 평가하기는 어려우므로 케이블의 산화방지제를 분석하는 등 화학적 변화를 관찰하는 것이 적합하다.

일부 케이블의 경우 고온 및 저온에서의 노화 메카니즘이 다소 차이가 있어 검증단계에서 수행된 고온 단시간 가속열화를 통한 수명평가는 발전소의 실제 운전조건을 시뮬레이션 하기에는 불확실성이 많고 이로인해 지나치게 수명을 평가절하 하는 경우가 많다. 케이블 설치 후 설치 여유분을 이용한 저온 장시간 가속열화 실험을 실시하고 수명을 재평가하는 것이 바람직하다. 경험에 의하면 실 사용시간과 가속열화 시간의 비율은 250배를 넘지 않도록 하는 것이 가속열화의 정확도 향상을 위해 필요하다.

케이블의 사용수명을 검증하는 방법에는 사용시간 기준 수명결정과 상태기준 수명결정 방법이 있다. 전자는 검증초기 1회 실험만으로 수명을 결정하므로 수명만료 시점에서 케이블의 상태가 양호하여 계속운전을 할수 있음에도 검증문서에 명시된 지정수명 때문에 교체를 하여야 하는 문제가 있다. 후자는 케이블의 상태를 기준으로 수명을 결정하므로 주기적으로 케이블의 상태를 모니터링해야하는 불편함이 있지만 케이블의 상태가 지정된 상태 이하로 나빠지지 않는 한 사용수명에 제한을 두지 않는다. 사용수명 검증방법의 선택은 발전소의 여건과 경제성을 고려하여 운영자가 선택해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] IAEA, Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety, IAEA-TECDOC-1188, 2000
- [2] NUREG, Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cables, NUREG/CR-6384, 1996
- [3] EPRI, Cable Indenter Aging Monitor(NP-7348), 1991
- [4] 전력연구원 김종석, 원전케이블 노화진단기 개발, "99원자력학회 춘계 학술발표대회,