

원자력 발전소 케이블 상태 감시방법의 국내외 동향

강윤식, 김철환
성균관대학교

구철수, 김복렬
한국원자력안전기술원

A Review of Cable Condition Monitoring for Nuclear plants

Yun-Sik Kang, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan Univ.

Chul-Soo Goo, Bok-Ryul Kim
Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - 원자력 발전소에서 사용되어지는 케이블은 전원 및 제어신호를 안정하게 전달하는 역할을 하며, 비상상태 발생시에는 원자로를 안전하게 shut-down시키는 통로 역할을 하므로 매우 중요하다. 케이블 상태 감시시 절연 및 피복재료는 종류 및 배합내용이 다양하기 때문에 종래의 자료로부터 전선과 케이블의 열화 또는 수명을 추정하기가 극히 어려우며 방사선에 노출이 되는 케이블의 경우 노화현상의 진행이 빠르고 방사선 열화방수명이 단축되므로 국내 실정을 감안한 독자적인 검증방법 도출, 규제기술 기반 구축 필요 및 규제의 합리화와 효율화 필요성이 대두되고 있다. 기존에 사용해온 케이블 진단 방법에는 절연 파괴 강도 측정을 통한 노화진단, 산화 방지능력 측정을 통한 노화진단, 자켓 및 절연체의 판단, 연신율에 의한 노화진단, 케이블 Indenter에 의한 노화진단, 온도 및 방사선 등의 특정상태에 대한 평가, 유사한 환경조건에 대한 주기적 검토 등이 있다.

기존의 국내외 케이블 상태 감시방법을 조사 연구하므로써 케이블 열화에 대비한 수명관리 규제 기술 및 상태감시(Condition Monitoring : CM) 기술의 평가 기준을 결정 하고자 한다.

1. 서 론

원자력 발전소의 격납 용기내의 안전계통에 사용되는 전기 기기 및 케이블류는 냉각제 손실 사고를 포함한 설계 기준사고 발생이후에도 반드시 작동 되어야 하는 케이블이다. 원전 사용 케이블은 교체시 과다한 인력과 비용이 소요되므로 케이블의 잔여 수명 예측과 교체 시기의 예측은 원자력 발전소의 운전 및 안전관리면에서 유용하다. 원자력 발전소 전기케이블은 다음과 같은 이유로 인하여 상태감시에 관한 연구가 필요하다.

- ① 발전소 내 국부적으로 열악한 환경에서 수년간 노출되어 온 기기는 그 영향으로 노화 감쇠가 발생.
 - ② 기기 노화 감쇠 발생시 Common mode failure(유사한 기기의 유사한 형태 고장) 발생 가능성이 높음.
 - ③ 원전 케이블은 제작시 약간 보수적으로 설계되어 대체적으로 노화에 잘 견뎌내지만 열적 Hot spot에는 민감함.
 - ④ 케이블이 국부적으로 열악한 환경에 의해 노화감쇠되어도 육안에 의한 노화상태 진단이 어려움.
 - ⑤ 가동중 원전의 경우 케이블의 손상 없이 비파괴적으로 노화상태를 진단할 수 있는 장비개발이 필요함.
- 따라서 방사선 상태하에 케이블 잔여 수명 예측에 대한 안전 관련 케이블 상태감시 연구가 꼭 필요하다. 본 논문에서 기술하고자 하는 것은 케이블의 수명 예측 방법으로 국내와 국외에서 주로 이용되고 있는 케이블 수명 예측방법을 비교 분석함으로써 국내 원자력 발전소에 적합한 방법을 개발하고자 한다.

2. 케이블의 구성 및 수명예측 기본원리

2.1 방사선 차폐 케이블의 구성

그림 1과 같이 원전에서 사용되는 케이블은 도체(Conductor), 절연체(Insulation), 금속 차폐물(Metallic Shields), 외피(Jacket)로 구성되어 있다. 케이블 구성요소에서 copper conductor는 300° F(150° C)의 온도에서 연속 사용 가능해야 하며, 절연체는 주요한 polymeric(중합체) 케이블 절연 재료로서 XLPE(Cross-linked polyethylene), EPR(Ethylene propylene rubber), SR(Silicone rubber), CSPE(Chlorosulfonated polyethylene)가 있으며 XPLE는 원전 사용 케이블로 대표되는 고체절연 케이블이며 전기적 특성이 우수하고 내충격성, 내마모성, 열에 의한 노화 특성, 저온특성 등의 물리적, 기계적 특성이 뛰어나며 특히, 고저차가 큰 장소에 포설이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 표 1은 원자력 발전소내에서 사용되어지고 있는 케이블 절연체 재료를 나타낸 것이다.

금속 차폐물의 주요 기능은 계측용 케이블을 차폐하고 계측 회로의 정전 잡음(electrostatic noise)를 감소시키며, 고주파 또는 펄스신호의 적절한 전송을 가능하게 하는 것이다. 또한, 차폐는 인접 회로 사이의 information crosstalk를 감소시키며, 방사선 차폐 재료로는 폴리에틸렌 고무(EPR), 실리콘 고무(SR), 하이파론(CSPE) 등이 주로 사용된다.

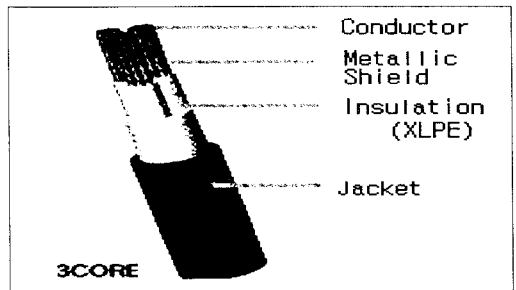


그림 1. 3심 가교폴리에틸렌(XLPE)절연 케이블

외피는 기계적 손상, 화학적 손상 및 화재로부터 케이블의 절연을 보호하며 주요한 외피 재료는 Neoprene, CSPE(Hypalon), PVC 등이다. Hypalon은 Neoprene보다 전체적인 특성이 좋으며 양호한 안정도와 습기에 대한 우수한 저항성이 있다. 미국의 원자력 발전소 격납 용기내 케이블 절연 및 외피 재료로 사용되는 고분자 재료의 구성비는 다음 그림 2와 같다.

표 1. 케이블 절연체 재료

구분	위 치	전 압	절연체	외 피	
고압전력 케이블	안전관련	격납용기 내부 (RCP전 동기)	5KV	EPR	-
	비안전관련		PVC	-	
저압전력 케이블	안전관련	격납용기 내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련		PVC		
제어 케이블	안전관련	격납용기 내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련		PVC		
계측 케이블	-	-	600V	SR	SR

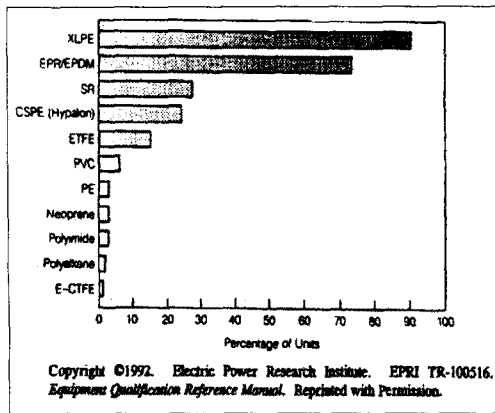


그림 2. 미국 원자력발전소 격납 용기내에 케이블 절연 및 외피의 고분자 재료 구성비

2.2 케이블 수명에측 방법

케이블의 수명 예측 방법에는 케이블 열화에 대비한 수명 예측 방법들이 있다. 운전시간에 따른 케이블 성질의 변화 측정에는 다음과 같은 방법들이 있다. 먼저 전기적 성질을 이용한 방법에는 부분 발전량 측정, 절연파괴강도 측정, 유전손실 및 수드리 길이측정 등이 있으며 화학적 성질을 이용한 카보닐 또는 불포화 탄화수소결합의 농도 측정과 산화방지제 함량 측정, 산화 유도시간 측정 등이 있으며 기계적 성질을 이용한 방법에는 인장강도 측정, 케이블 연신율 측정, 케이블 강성을 측정 등이 있다. 이러한 케이블의 운전시간에 따른 성질 변화 측정법에는 축적된 자료에 의한 보정 곡선이 필요하지만 국내의 경우에는 축적된 자료가 거의 없는 실정이라서 외국의 자료를 이용하고 있는 상태이다.

표 2. 방사선 차폐 내부 케이블 설계기준

매개변수	주변조건	사고후상태 (0~2시간)	사고후상태 (2~26시간)
온도	49°C	131°C	97°C
압력	Atmospheric	43psig	15psig
습도	0~50%	100%	100%
방사선 선량	100Mrad/Hr	10 ⁶ rad (0~30일)	

원전에서 사용되는 케이블은 격납용기 내부 온도는 10°C~48°C로 유지하도록 설계되며 사고조건에서는 132°C까지 상승하고 격납 용기 내부에서 표 2와 같은 조건에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 대부분의 고분자 재료는 산소가 존재하는 환경에서 열 및 방사선에 의해 화학적 변화를 일으킨다.

그림 3은 케이블 수명을 시간과 로그 형태로 나타낸 것으로 P_i는 잔여 수명이 30년이고 최대허용치 P_r은 잔여 수명이 0년이다. 이때 측정되어진 수명이 P_p라 했을 경우 이때의 보정 곡선에 의해 케이블의 잔여 수명을 추정할 수 있다. 보통 케이블 수명의 측정을 이와 같은 방법으로 할 수 있으나 원자력 발전소 격납용기 내부에 사용되어지는 케이블 경우에는 일반적인 전기적, 물리적 특성을 고려해야 할뿐만 아니라 가동중인 원자로 내에서 발생하는 열 및 방사선에 의한 케이블 열화 또한 감안해야 한다.

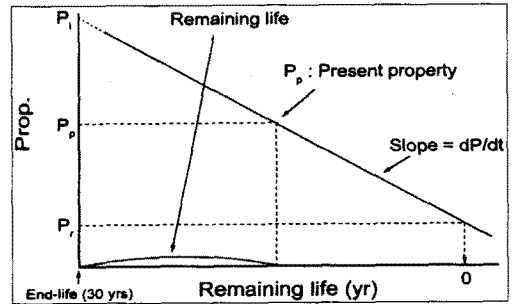


그림 3. 케이블 절연파괴 경년변화(시간 - 로그)

3. 국내의 원전 케이블 상태 감시방법

3.1 국내에서의 케이블 상태 감시방법(1)

국내의 원전 케이블 상태 감시방법에는 여러가지가 있다. 그중 첫번째 방법으로 절연파괴 강도 측정법이 있다. 이 방법은 케이블의 사용 년한에 의한 절연파괴 값의 감소정도를 통한 케이블 노화 상태 판단법이다. 기존 케이블에 관한 데이터를 이용하는 방법으로써 비교적 간단하지만 노화진단을 위해서 케이블의 시편의 절취가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 두번째 방법으로는 산화 방지 능력 측정법이 있다. 이 방법은 케이블 절연체의 열화 억제제인 산화방지제의 잔류량을 측정하여 잔여 수명을 예측하는 방법으로 절연파괴 강도 측정법에 비해 균일하게 화학적 변화를 일으키므로써 국내의 22.9kv 이상의 케이블 노화 진단에 주로 사용되고 있다. 세번째 케이블 노화 진단 방법으로 EPRI와 OGDEN사에서 공동 개발한 Cable Indenter(Cable Indenter Aging Montior)는 케이블 자켓이나 절연체에 탐촉자를 눌러 자재의 물리적 반응을 측정하는 것으로 탐촉자의 끝은 원뿔의 끝을 평평하게 깎아 놓은 것 같은 형태이며 탐촉자와 데이터 수집장치가 이원화되어 있으며 노트북 컴퓨터를 이용하여 측정 결과를 표시한다. EPRI와 OGDEN사가 공동 개발한 Cable Indenter는 수동 클램프 조작식으로 조작이 불편하고 케이블 Indent 측정 장치와 조작 및 기록 장치가 이원화되어 2인 1조로서만이 진단작업이 가능하다는 단점이 있다. 현재 국내에서는 이러한 단점을 보완한 한전 전력연구원 에 의해 개발되어진 케이블 Indenter 측정법이 있다. 이것은 케이블 노화시험기(Cable Aging Tester, CAT)로서 전동식 클램프에 의한 케이블 자동고정, Load Cell 증폭기 내장, 플래시 롬 메모리 IC 채용, 데이터 전송 직렬 포트(RC232C) 채용을 통해 제품의 소형화 및 진단작업의 편리성을 도모하고 있으며 가동중인 원전의 경우 케이블 절연체를 절취하여 시험하기 어려운 상황을 잘 고려하여

개발되어진 것이며 indent 지수는 비교적 고온의 조건에서 운전되는 케이블 외피의 노화 상태를 잘 지시하고 있다.

3.2 국외에서의 케이블 상태 감시방법

외국의 경우에는 원자력 발전소용으로 사용되어지는 XLPE(Cross-linked polyethylene) 케이블의 열화진단을 위해 절연층, 반도체층등 케이블의 열화나 사고원인이 되는 모든 부분에 대하여 물리적, 화학적 및 미세한 구조적 특성분석까지 수행하고 있다. 케이블 상태감시 방법은 화학적 방법, 물리적 방법 및 전기적 방법으로 구분되며 표 3은 국외에서 이용되어지는 케이블 상태 감시 방법을 나타낸다.

표 3. 케이블 상태 감시방법

상태 감시방법	시료의 손상 여부
1. 화학적 성질을 이용한 방법	
① 산화유도 시간/온도	No
② 적외선 분광기 (FTIR)	No
2. 물리적 성질을 이용한 방법	
① EAB	Yes
② Indenter	No
③ 경도	No
④ 적외선 온도 기록계	No
⑤ 육안 검사	No
3. 전기적 성질을 이용한 방법	
① 절연저항	No
② TDR	No
③ 유전손	No
④ 내전압 시험	Yes
⑤ 기능 시험	No
⑥ 전류의 특징	No
⑦ EMF 측정	No

이밖에 일반 전력케이블용 절연재료의 대표적인 수명진단으로 1984년 T·W·Dakin은 절연재료의 열적 열화현상을 화학 반응률 법칙으로 가정하여 Arrhenus 모델을 제안하였으며 이후 이 모델은 많은 연구자들에 의해 실험적으로 입증되었고 1970년대 이후 L·Simoni와 G·C·Montanari는 일반적인 형태의 열화 이론을 정립하고 실험적으로 증명함으로써 현재 사용되고 있는 열화이론의 기초를 확립하였다. Arrhenus 법칙을 이용한 케이블 수명 추정방법은 다음과 같이 이루어진다. 온도가 8~10℃ 상승하면 수명이 반감된다는 10℃ 반감 법칙을 이용하여 초기의 수명을 예측하고 그후 반응 속도식에 의한 Arrhenus 법칙을 적용한다.

Arrhenus plot 이론

$$L = A \exp [-E/RT]$$

L = 절연수명 (hours)

A = 상수

E = 활성화에너지

R = 기체상수

T = 절대온도 (Kelvin)

위 식에서 양변에 ln을 취하면

$$\ln L = -E/R * 1/T + \ln A$$

즉, 그림 4와 같이 1/T를 x 축으로 lnL을 y축으로 하여 3가지 이상의 온도에서 end-point를 구하여 semi-log 그래프상에서 직선식을 구한 후 외삽하여 절연 수명을 구한다.

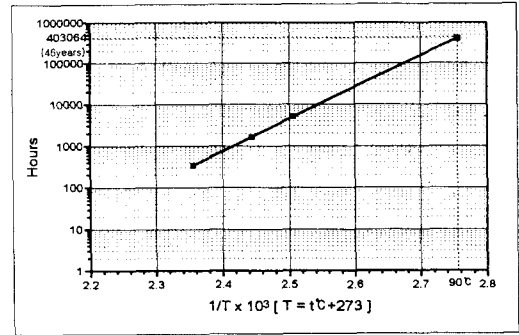


그림 4. Arrhenus plot

4. 결 론

원자력 발전소 격납 용기내에서 사용되는 케이블의 상태는 사용하는 위치와 사용전압, 절연체 등에 따라 많은 변화가 있으며 방사선 조사량의 증가, 감소에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 현재 국내외의 케이블 상태 감시 방법은 대부분이 국외의 방법을 개선하여 사용하고 있다. 국내와 국외의 원자력 발전소에 사용되는 케이블의 사용 환경 및 조건 등에 대하여 모든 방법들이 국내의 현실에 맞는 것은 아니다. 따라서 국내의 실정에 적합한 원전 사용 케이블의 노후화 진단기술 및 열화진단 시스템 기술을 개발하여야 한다. 앞으로 각종 사례연구 및 국내의 현황과 연구동향을 파악하여 국제의 관점에서 가장 적절한 방법을 도출 하고자 한다. 또한 해외의 안전규제 요건과 비교 분석을 통해 케이블 상태 감시 조사 연구를 지속하여 국내의 실정에 가장 적합한 케이블 상태 감시 방법을 개발할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김종석, 정일석, "원전 케이블 노후화 진단 기술", 2000년 전력케이블 심포지움, p.87-94, 2000.4.28
- [2] 김종석, "원전 케이블 노후화 진단 기술", 원자력안전기술 정보회의, 제5회, p.275-293, 1999.12.16
- [3] 이우선, "방사선 차폐 절연재료", 전기전자 재료, 제13권 제2호, p.37-42, 2000.2
- [4] 김상준, 한재홍 "지중배전 케이블의 수명예측 기법", 한전 기술개발지, '98 여름호, 1998
- [5] 유명호, "전력 케이블의 절연열화 진단기술", 전기 학회지, v37, p.39-52 p.1013-0772, 1988, 12
- [6] 정동원, "지중배전 케이블의 활성 열화진단기술", 전기 학회지, v42, p.36-44 p.1013-0772, 1993.4
- [7] 고리원전, "격납용기내 전선 케이블 노후화 평가기술 개발", 원전수명관리연구 최종보고서, 5.10권 케이블 수명 평가, 1998.
- [8] A·B·Reyholds, "Effect of an antioxidants on aging of nuclear plant cable insulation", EPRI NP-7140 Project 2614-26, 1991 January
- [9] R·F·Gazdzinski, "Aging management fuidline for electrical cable and termination", EPRI SAND-344, U::C-523, 1996 September
- [10] T·W·Dakin, "Electrical Insulation Deterioration", Electrotechnology, pp124-130, 1960 December
- [11] EPRI, "Natural versus artificial aging of Nuclear Power Plant Components", EPRI TR-100245, project1701-13, 1992 january