

원자력발전소 케이블의 상태감시 기법 연구동향

김복렬*, 구철수*, 강윤식**, 안상필**, 김철환**
 (*한국원자력안전기술원, **성균관대학교)

1. 서론

원자력발전소에서 사용되는 케이블은 전원 및 제어신호를 안정하게 전달하는 역할을 하며, 비정상상태 발생 시에는 원자로를 안전하게 shut-down 시키는 통로 역할을 하므로 매우 중요하다. 그런데, 방사선에 노출이 되는 케이블의 경우 열화현상의 진행이 빠르고 방사선 열화로 수명이 단축되므로, 환경 및 기타 요인으로 인해 발생하는 열화에 의한 케이블의 상태변화를 관찰하여 사고를 미연에 방지하여야 한다. 또한, 안전관련 케이블의 상태감시 기법 적용시 절연 및 피복재는 종류 및 배합내용이 다양하기 때문에 종래의 재료로부터 케이블의 열화 또는 수명을 예측하기가 극히 어렵다.

따라서 국내 실정을 감안한 독자적인 상태감시 방법 도출 및 규제기술 기반 구축 필요 및 규제의 합리화와 효율화 필요성이 대두되고 있다. 기존에 사용했던 케이블 진단 방법에는 절연 파괴 강도 측정을 통한 열화진단, 산화 방지능력 측정을 통한 열화진단, 외피(jacket) 및 절연체의 판단, 연신율에 의한 열화진단, 케이블 Indenter에 의한 열화진단, 온도 및 방사선 등의 특정상태에 대한 평가, 유사한 환경조건에 대한 주기적 검토 등이 있다[1-7]. 본 논문에서는 기존의 국내·외 케이블 상태감시 방법을 조사함으로써 케이블 열화에 대비한 상태감시(Condition Monitoring: CM) 방법의 연구동향을 분석하고자 한다.

2. 원자력발전소 안전관련 케이블

2.1 원전케이블의 구조 및 고분자 재료

그림 1과 같이 원전에서 사용되는 케이블은 도체(Conductor),

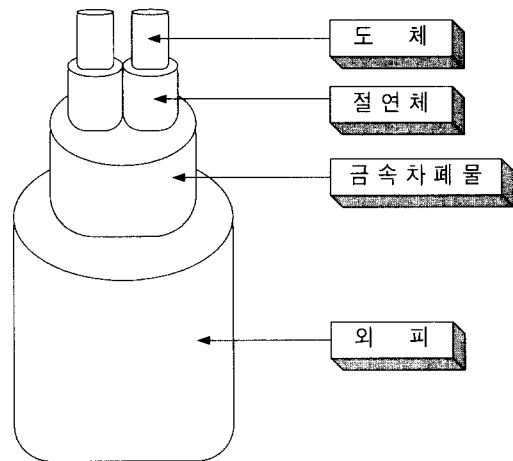


그림 2. 케이블의 구조

절연체(Insulation), 금속 차폐물(Metallic Shields), 외피(Jacket)로 구성되어 있다. 케이블 구성요소에서 도체는 300° F(150°C)의 온도에서 연속 사용 가능해야 하며, 절연체는 주요한 고분자(polymeric) 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 원자력발전소 내에서 사용되어지고 있는 케이블 절연체 재료를 나타낸 것이다[3].

금속 차폐물의 주요 기능은 계측용 케이블을 차폐하고 계측 회로의 정전 잡음(electrostatic noise)을 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. 외피

표 1. 케이블 절연체 재료

구 분		위 치	전 압	절연체	외 피
고압전력 케이블	안전관련	격납용기내부 (RCP진동기)	5kV	EPR	
	비안전관련			PVC	
저압전력 케이블	안전관련	격납용기내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련			PVC	
제어 케이블	안전관련	격납용기내부	600V	EPR	Hypalon
	비안전관련			PVC	
계측 케이블			600V	SR	SR

표 2. 중대사고시 환경 조건

중대사고 환경인자	LOCA	MSLB
온도(°C)	163	163
사고시 받는 방사선(Mrad)	35	1
압력(KPa gauge)	48.3	4
최고온도 지속시간(분)	20	20
100°C이상 온도 지속시간(분)	170.1	170.1
사고후 온도(°C)	50	50
사고후 온도 지속시간(일)	90	90

는 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 원자력발전소 격납용기내 케이블 절연 및 외피 재료로 사용되는 고분자 재료의 구성비는 다음 그림 2와 같다(8).

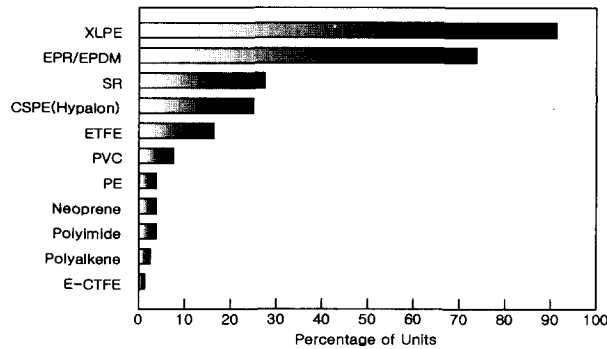


그림 2. 미국 원자력발전소 격납용기 내부 케이블 절연 및 외피의 고분자 재료 구성비

2.2 원전케이블의 설계기준 및 중대사고시 환경 조건

원전에서 사용되는 케이블은 격납용기 내부 온도는 10°C ~ 48°C로 유지하도록 설계되며, 40년 사용시 받는 방사선 조사량은 격납용기내 케이블의 경우 약 45Mrad, 격납용기밖 케이블의 경우 약 0.01Mrad 정도 밖에 되지 않는다. 그러나, 중대사고 발생시 환경 조건은 표 2와 같이 변화하는데(5), 온도와 방사선, 압력이 크게 증가함을 볼 수 있다. 특히 냉각제 상실사고(LOCA)의 경우 방사선과 압력이 MSLB(Main Steam Line Break)보다 수십 배로 증가하기 때문에 원전용 케이블은 설계기준이 엄격하게 적용이 된다. 특히 대부분의 고분자 재료는 사고발생시 뿐만 아니라 산소가 존재하는 정상가동시에도 열과 방사선에 의해 화학적 변화를 일으키므로 이에 대한 대책이 마련되어야 한다.

3. 원전케이블의 열화

3.1 열화의 개념 및 영향

열화(劣化-degradation) 현상이란 기계류 및 기타 케이블에 나타나는 현상으로서 여러 가지 열악한 조건에 의해 그 잔존 수명이 단축되는 것을 말한다. 케이블의 경우 기존의 상태에서 절연 역할을 하는 절연체의 절연내력을 떨어뜨리거나 본래의 기능을 상실 또는 현저히 저하되는 현상을 말한다. 예로 케이블에 지속적이고 국부적인 열이 가해졌을 경우 그 부분이 경화되고 경화되어진 부분이 케이블의 표피부터 갈라지는 현상이 일어난다. 그러므로 케이블 절연체는 본래의 기능을 할 수 없게 되며 기타 주변의 기계기구에 막대한 영향을 미칠 수도 있다.

특히 원전케이블에 이용되고 있는 각종 고분자 절연재료는 열, 방사선, 자외선, 빛 등의 환경적 요인 및 기계적 요인 또는 전기적 원인에 의해 여러 가지 스트레스를 장기간 받으면 초기의 불성치를 유지하지 못하고 변질되기도 하고 극단적인 경우 파괴되기도 하는데 이것을 열화라고 하며 열화가 계속 증가되면 탄성을 증가, 신장률 감소, 압축강도 감소 및 인장강도의 감소로 원전케이블의 수명이 저하된다.

3.2 고분자에서의 방사선 효과

고분자를 구성하는 원자들은 핵 방사선에 의해 쉽게 분열되어지는 전자의 공유결합으로 약하게 서로 묶여져 있다. 결합이 파괴되어지면, 고분자의 구조는 변하게 된다. 선형 지방성 고분자 분자의 간단한 개략도가 그림 3에 나타나 있다(9).

만약 이것을 폴리에틸렌으로 간주한다면, 카본 원소들의 체인을 중심으로 몇몇의 측면 가지들로 구성된다. 그림 4에 설명된 것과 같이 분자의 여기(excitation)는 방사선에 의해 직접적 또는 메커니즘에 의해 발생될 수 있다. 이 때, 방사선은 분자를 이온화시켜, 이온쌍을 주게 된다. 고분자 이온에서 전기적 재결합이 발생될 때, 여기된 고분자를 발생한다. 여기된 상태의 고분자는 전자 공유결합의 분열이 더욱 빠르게 일어나게 된다. 그림 5에서 보여지는 것과 같이 주 체인에서의 분열과 그림 6에서 보여지는 것과 같이 측면 체인에서의 분열이 각각 발생할 수 있다. 이것은 교차결합(crosslinking:

그림 7), 체인분리(chain scission: 그림 8), 가스발생(gas production: 그림 9), 산화작용(oxidation: 그림 10)과 같은 다양한 방법으로 반응하기 쉬운 Energetic free radical을 남겨둔다. 이러한 반응은 원자력발전소 내의 고분자 절연 케이블에서 발생하는 주된 진행과정이며, 이것은 방사선 조사동안 뿐만 아니라, 이후에도, 예를 들면 방사선 조사 이후에 발생하는 산화(post-irradiation oxidation)에 의해서도 발생된다. 비록, 하나의 과정이 우세하게 발생하지만, 여러 가지의

방사선 유기 과정이 동시에 발생할 수 있다. 일반적으로 교차결합은 물질을 굳어지게 하여, 파손시 신장력의 감소와 함께 장력과 경도를 증가시킨다. 장기간의 교차결합은 부서지기 쉽게 만든다. 또한, 체인분리는 기계적으로 물질을 약하게 만든다. 가스발생을 수반하면 팽창이 나타나게 되며, 만약, 방사선 물질이 산소가 존재하는 환경에 있으면, 산화작용이 일어나고, 기계적 강도의 감소와 유전체 손실의 증가를 가져온다.

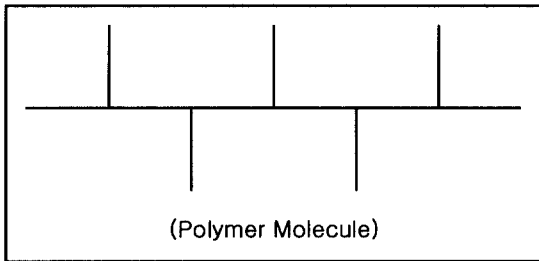


그림 3. 고분자 분자

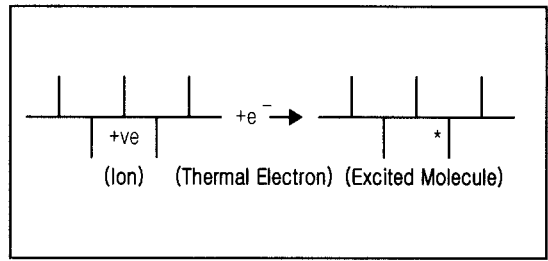


그림 4. 고분자 분자의 여기

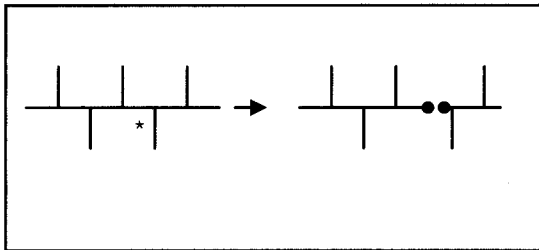


그림 5. 주체인의 분열

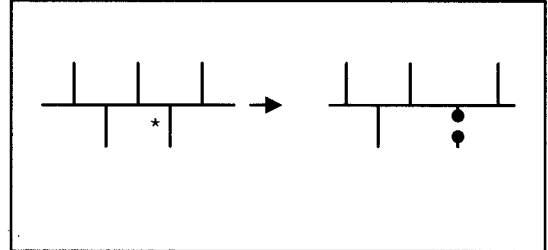


그림 6. 측면체인의 분열

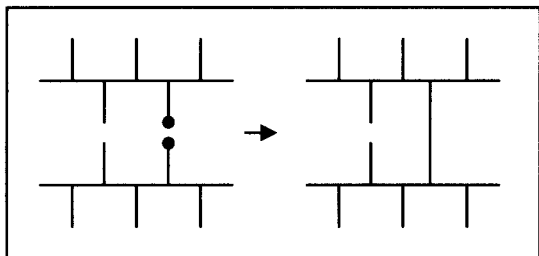


그림 7. 분자들간의 교차결합

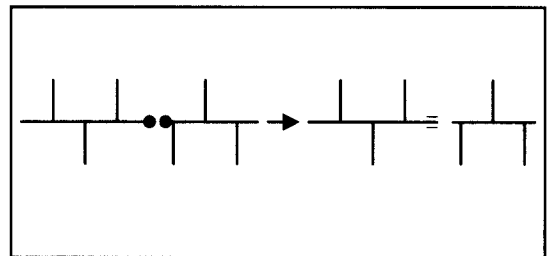


그림 8. 체인분리

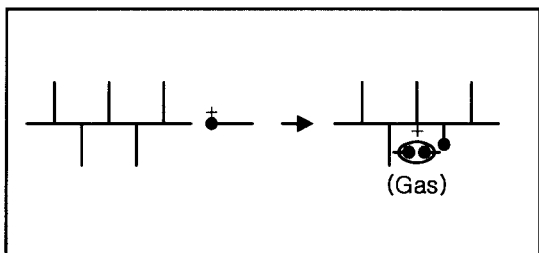


그림 9. 가스발생

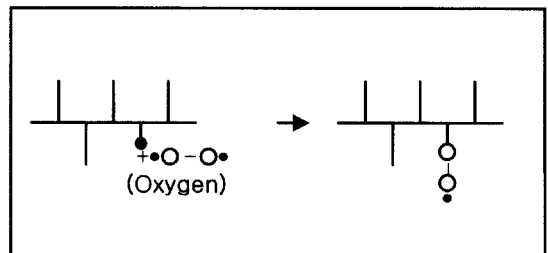


그림 10. 산화작용

대부분의 원자력발전소가 30~40년 전에 건설되었다. 그럼에도 불구하고, 원자력발전소는 일반적으로 가능한 오랜 시간 동안 연속적인 동작이 요구된다. 그러나, 오랜 시간 동안 연속적인 동작을 하기 위해서는 전력회사 스스로 뿐만 아니라, 관련 단속 기관에 연속적인 동작에 대한 안전성을 납득 시켜야만 한다. 이러한 사실은 10년 이내의 발전소 수명 유지 (PLIM : plant life maintenance) 및 발전소 수명 연장 (PLEX : plant life extension)이 원자력발전소의 운영에 있어 중요한 관점이 되어서 오는 배경을 제공하였다. 이 분야에 있어 전 세계적인 관심과 상당한 국제적 노력들이 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 후원 아래 통합되어 왔다. 이 조직은 계측 및 제어 케이블의 전기적 절연성을 포함한 다양한 원자로 재료의 열화 및 감시에 대한 경험과 자료를 공유하기 위해 토의 및 working group들을 포함하고 있다. 원자력 안전의 관점에서 살펴볼 때, 케이블의 중요성은 교환기와 원자력발전소 감시·제어를 담당하는 제어·계측 시스템 사이의 링크를 제공하는 극히 중요한 요소가 케이블이라는 사실로부터 인식할 수 있다. 이것은 간단한 상황에 있어 발전소의 shut down 시에 필요한 시스템을 포함한다.

특히, 원자력발전소와 관련된 전기 절연체는 고분자 물질, 특히 PVC, EPR, EVA, XLPE 등에 기초를 둔다. 오늘날 전기적 절연체의 열화에 대한 관심으로 미국 Sandia 연구소의 PVC와, Savannah River 원자력발전소에서의 원자력 리액터 격납용기(containment) 내부의 저밀도 PE 케이블에 대한 연구가 시작되었다. 이 연구에서 단지 12년의 동작 후에도 절연체는 예상했던 것 보다 매우 신속하게 열화가 진행되어지는 것이 발견되었다. 이러한 현상은 짧은 기간에 있어 높은 방사선 조사량(high dose irradiations)과 장기간 수명을 모의하기 위한 높은 비율의 조사량 시험을 포함한 사전 설치(pre-installation) 조건 과정이 사용됨으로써 발생하였다. IEC(International Electrotechnical Commission)는 Savannah River 연구 이후 절연체에 낮은 비율의 방사선 조사량에 대한 영향에 관심을 가지게 되었다[9].

4. 원전케이블 상태감시 기법

4.1 원전케이블 상태감시 기법의 필요성

그림 11에서 보는 바와 같이 최근에 전력설비의 보수유지의 흐름은 종래의 시간기준정비(Time Base maintenance)에서 상태기준정비(Condition Base Maintenance) 개념으로 바뀌고 있다. 현재의 전력설비의 보수유지는 외관 구조 점검을 주체로 한 시간기준정비의 개념으로 일정기간이 경과 후에 보수를 하고 부품을 교체하는 고장 후 정비가 많은 비중을 차지하고 있다. 이러한 개념은 설비들의 환경조건을 배제한 비효율적인 방법으로 사고예방의 효율성이 저조하다. 최근에는 선진 외국의 보수기법(Reliability Centered Maintenance)를 도입함으로써 사용조건에 따른 설비들의

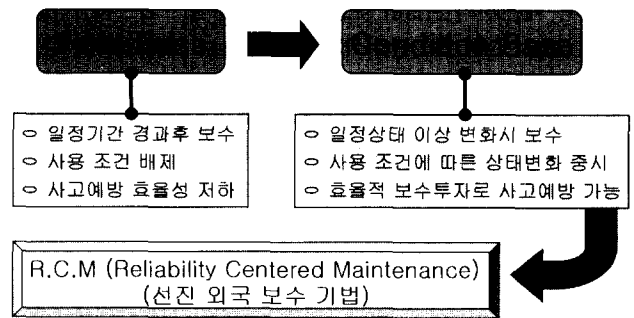


그림 11. 전력설비 보수유지 개념의 변화

상태변화를 중시하는 상태기준정비의 중요성이 대두되었으며, 설비의 상태가 일정 이상 변화시 보수를 하여 사고의 예방 및 조기 복구가 가능하며 정확한 수명에측으로 효율적인 보수투자를 할 수 있게 되었다.

따라서 이러한 진단기술의 흐름 속에서 상태감시(Condition Monitoring; CM) 개념이 등장하게 되었고, 케이블 상태감시의 정의는 "케이블이 사용되는 환경 및 기타 요인으로 인해 발생하는 열화에 의한 케이블의 상태변화를 관찰하는 것"으로 표현할 수 있다. 이러한 케이블 상태감시 방법의 목적은 케이블에 발생하는 열화의 상태변화를 감시 및 관찰하여 열화에 의한 사고를 미연에 방지하는 것이다. 나아가서는 원전케이블의 잔존 수명을 예측하여 적절한 교체 시기를 판별하며, 사용여건을 고려하여 주변 기기에 미치는 영향을 극소화하기 위함이다. 그림 12에는 케이블 상태감시의 효과를 단계별로 정리하였다.

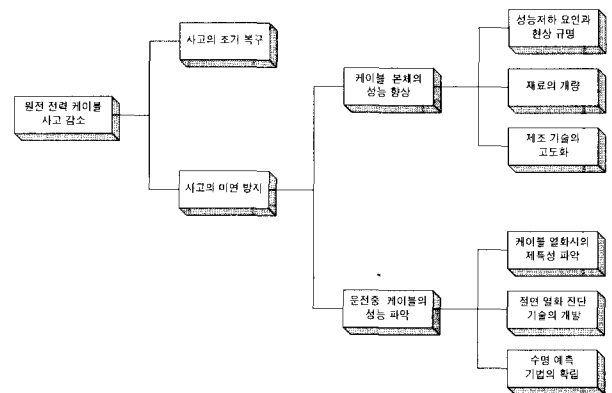


그림 12. 원전케이블 상태감시의 효과

4.2 원전케이블 상태감시 기법의 판정기준

먼저 연구대상으로써 열화를 검출하는데 유용한 상태감시 기법을 확인하기 위해서는 먼저 광범위한 문헌을 조사하여 여러 가지의 상태감시 기법들을 분석하여, 각각의 방법들이 어떤 특성을 지니고 있으며, 어느 고분자 절연체에 더욱 좋은 결과를 도출해낼 수 있는지를 기초자료로 수집한다. 또한 실제 원자력발전소에서 활동중인 현장 전문가와의 토의를 고

표 3. 상태감시 기법의 판정기준

구분	내용
판정기준 1	케이블 시스템이 CM 테스트에 의해 영향을 받지 않도록 비파괴 및 비침입성 기법
판정기준 2	특정한 양의 케이블 열화와 일관되게 상관될 수 있는 성질 변화(property change)를 측정 가능
판정기준 3	측정된 성질은 EAB(Elongation at break)와 같이 기존의 잘 정의된 측정치와 상관될 수 있는 능력 보유
판정기준 4	기존 발전소에 보통 사용되는 케이블 형태 및 재료에 응용 가능
판정기준 5	시험 환경(즉, 방사선, 온도, 습도)에 의해 영향을 받지 않거나, 정정될 수 있는 제한 가능한 결과(Reproducibility)를 제시
판정기준 6	시험되는 케이블로부터 기기의 분리를 요구하지 않을 것
판정기준 7	야외 조건 하에서 수행할 수 있도록 단순
판정기준 8	수행하는데 비용이 저렴
판정기준 9	시험되어지는 케이블내의 "hot-spots" 또는 "weak links"를 검출 가능
판정기준 10	결함(defect)을 발견 가능
판정기준 11	산업에 즉시 이용 가능

표 4. 절연체 성질 이용 방법에 따른 상태감시 방법 분류

절연체 성질 이용 방법	상태감시 방법	판정 기준 및 특징
화학적 성질	① OIT/OITP(산화유도시간/온도)	OIT값이 열화나 방사선량이 증가함에 따라 감소함을 이용
	② TGA(열중량 해석법)/ TMA(열팽창계수 해석법)	TGA-절연체를 가열하여 절연체 중량의 손실을 모니터 하는 방법 TMA-열팽창 계수를 측정하여 TMA 침입거리를 측정하는 방법
	③ FTIR(적외선분광기)	NIR 방법과 유사
	④ DSC(시차주사 열량기)	OIT, 용해점, 결정도, glass 전이온도를 측정하여 열적으로 열화된 고분자 재료를 감시
	⑤ NIR(근 적외선 반사율)	IR spectra를 이용하여 빛 흡수의 결과를 이용
	⑥ CT(컴퓨터 단층 사진술)	절연 및 외피 재료의 밀도변화를 X-ray로 측정
	⑦ Sonic Velocity(음향 속도)	고체매질을 통과한 음향속도는 밀도와 탄성율에 비례함을 이용
	⑧ Plasticizer Content(가스제 함유량)	가스제의 함유율로 열 열화 측정
	⑨ Solubility Measurement(용해도측정)	용해도와 swelling 측정치로 고분자의 화학적 반응 여부를 검출
물리적 성질	① EAB(Elongation at break)	상력 시험계에 재료표본을 위치시켜 신장시험을 수행
	② Indenter	압축율의 변화도를 측정하여 열화를 판정하는 indicator로 사용
	③ Infrared Thermography(적외선 온도 기록계)	전형적인 부하에 전원이 공급될 때 케이블의 온도 측정
	④ Visual Inspection(육안검사)	케이블 표면을 육안으로 검사
	⑤ Hardness Test & Density Measurements	경도를 결정하기 위해 주어진 인가력에 대한 케이블의 편향도 측정
	⑥ Torque Tester	케이블의 표면을 비틀어서 토크값을 결정하고 열화의 정도 판단
	⑦ Profiling & Polishing Method	케이블 샘플 단면의 윤기를 관찰하거나 표면의 킴투와 광학적 미를 관찰하여 케이블의 견고성을 파악하여 열화를 판단
	⑧ Flexure Test	손으로 구부러 보면서 케이블의 유연성을 시각적으로 확인
	⑨ DMA(동적 기계 해석법)	비틀, 쏘임, 신장 등으로 변형된 샘플에 온도를 변화시키면서 스트레스와 팽창의 관계를 상태감시 하는 방법
전기적 성질	① DC Test	DC 전압 인가후 1분 및 10분의 절연 저항을 측정하여 누설전류 측정
	② AC Impedance Test	커패시턴스 값은 모든 주파수 영역에서 열화에 따라 증가하고, 손실인자(dissipation factor)는 저주파 영역에서 감소하는 특성 이용
	③ Voltage Withstand Test(내전압 시험)	High Potential Test와 유사, 표본은 교류 80V/mil, 직류 240V/mil에서 5분동안 전압시험에 견디어야 함
	④ Partial Discharge Test	케이블 절연 계층의 void, crack 등이 발생시키는 부분방전을 검출
	⑤ TDR(시간영역 반사광 측정)	케이블 접속부 및 결함 발생점과 같은 불균일점에서 전기 임펄스는 반사하므로 불연속점의 초기 파와 반사파 사이의 시간차를 측정
	⑥ Dielectric Loss Measurements(유전손 측정)	전계에서 열화에 의해 자유전하의 이동이 발생하며 이로 인한 유전체의 손실을 측정하여 열화의 정도를 판단
	⑦ Stepped Voltage & High Potential Test	DC/AC test와 유사, 단계적으로 전압을 증가시키거나 한번에 최대전압까지 인가하여 시험하는 방법
	⑧ Functional Test(기능시험)	기능을 모의하기 위해 전기적인 부하를 동작시키는 시험
	⑨ 전류특성	케이블의 동작전류를 기록하여 변화를 감시하는 방법
	⑩ EMF 측정	케이블의 EMF를 측정하여 변화를 감시하는 방법

려해야 한다. 더 나아가서는 최근에 많이 사용되는 이용 가능한 정보들을 도입함으로써 좀 더 유용한 상태감시 기법들을 결정할 수 있다.

이와 같은 방법으로 선정된 상태감시 기법들을 평가하기 위하여 실제 케이블 표본 시험을 수행할 경우에는 두 가지 종류의 표본을 사용할 수가 있는데, 전혀 사용하지 않고 바로 생산된 케이블의 표본을 취득하여 인공적으로 가속열화 시키는 방법과, 자연노화 케이블을 취득하여 서로 시험 비교해석을 수행할 수 있다. 상태감시 기법의 판정기준을 표 3에 정리하였다.

4.3 원전케이블 상태감시 기법

표 4에 절연체의 성질에 따른 상태감시 방법을 정리하였는데, 열거된 방법 중에서 현장의 케이블 상태감시를 위해 현재 비교적 가장 빈번하게 이용되는 방법을 진하게 표시하였다. 본 논문에서는 지면 관계상 가장 널리 쓰이는 산화유도시간/온도(OIT/OITP), EAB, Indenter의 장·단점을 언급하도록 하겠다[11-12].

4.3.1 산화유도시간/온도(OIT/OITP)

A. 장점

- a) 현장에서 극미샘플링(micro-sampling)이 가능하다.
- b) 대부분 비파괴적인 샘플링이다.

B. 단점(제한사항)

- a) 산화 방지제(anti-oxidants) 물질에만 적용이 가능하다.
- b) PVC에는 적용이 쉽지 않지만, 특별히 주의를 하면 사용 가능하다.
- c) 극미샘플은 보통 케이블 외피의 표피에서 추출하는데, 벌크 절연물은 샘플이라고 할 수 없다.
- d) 오염은 샘플링에 제한을 준다. 화학적 정화는 표피의 변화를 막기 위해 피해야 한다.
- e) 외피와 절연 조사량의 상관관계는 불가능하다.
- f) EAB법 또는 케이블 기능을 나타내는 다른 특성과의 상관관계가 필요하다.

4.3.2 EAB(Elongation-At-Break)

A. 장점

- a) 인장시험에 근거를 둔 EAB법은 국제적으로 표준화가 되어 있다.
- b) EAB법은 일반적으로 유용한 상태감시 방법이다.

B. 단점(제한사항)

- a) 인장시험은 매우 큰 샘플이 필요한데, 이것은 케이블 측면에서는 파괴적이다.
- b) 가교 폴리에틸렌(XLPE)에 대해 EAB법은 좋은 상태감시 방법이 아니다.
- c) 만약 시험물이 2개 이상의 다른 층으로 구성되어 있는 혼합물이면, EAB법은 대표적인 시험법이 될 수 없다.

4.3.3 Indenter

A. 장점

- a) 현장에서 적용하기가 쉽다.
- b) 시각검사를 포함한 빠른 시험이다.
- c) 현장에서 즉시 결과를 얻을 수 있다.

B. 단점(제한사항)

- a) 방사선에 노출된 PVC의 열화에는 좋은 상관관계를 나타내지 않는다.
- b) XLPE에는 적절한 상태감시 방법이 아니다.
- c) 외피나 절연물 두께의 변화가 시험결과에 영향을 미칠 수 있다.
- d) Indenter는 단지 외피의 측정만 가능하므로, 절연 특성에 대한 상관관계가 필요하다.
- e) 시험중의 온도는 온도상관인자를 필요로 하는 몇몇 절연물의 결과에 영향을 미친다.
- f) EAB와의 상관관계가 필요하다.

5. 최근 상태감시 기법의 연구동향 분석

5.1 원전케이블 상태감시 기법의 국내·외 연구 동향

케이블은 1975년대 후반의 CV 케이블의 도입 개시이후, 물에 의한 자연 발화 사고가 문제화되고 이것을 방지하기 위하여 구조상의 개량·개선과 활선 진단 기술의 개발이 중요하게 되었다. 1981년경 개발된 3층 동시 압출제법은 이러한 연구의 결과이다. 현재 미국 상업용 원자력발전소의 여러 가지 안전에 관련된 시스템 및 구성요소에 사용되는 1000(V) 이하의 저압 계측 및 제어(I&C) 케이블에 대한 상태감시 방법을 조사 계획중인데 이 계획에 포함된 고분자 절연물은 절연체에 사용되는 XPPE, EPR과 외피에 사용되는 Neoprene, Hypalon, Bonded CSPE 등이 있다.

특히, 국외의 경우에는 원자력발전소용으로 사용되어지는 XLPE 케이블의 열화진단을 위해 절연층, 반도전층 등 케이블의 열화나 사고원인이 되는 모든 부분에 대하여 물리적, 화학적 및 미세한 구조적 특성분석까지 수행하고 있다. 원전 케이블에 대한 열화 진단과 상태감시에 대한 동향을 종합적으로 정리해 보면

- a) PVC Cable은 설계기준사고시의 고온과 높은 방사선량 조건에서 열화 되는 것으로 연구결과 증명
- b) 세계적으로 PVC 절연 케이블 보다 XLPE 혹은 EPR 케이블을 사용하는 추세
- c) 케이블은 금속부분과 organic polymer 부분으로 구분되는데 케이블 경년 열화에 대해서는 금속부분보다 organic polymer 경년 열화에 대해 많은 연구가 진행중(금속부분: 전도체, armours, shield, organic polymer

부분: 절연체, 외피 부분)

- d) 캐나다의 원전 케이블의 수명관리 연구는 고온 고선량에서의 절연성, 기계적 성질의 열화, 수명예측에 대해 초점을 두고 연구중

한편 국내의 케이블 열화 진단 방법은 1978년부터 지중에 사용되어온 XLPE, CN/CV 전력케이블이 수명이 10년을 넘어서면서 자연열화에 의한 케이블 사고가 급증함에 따라 1980년 중반이후 미국의 직류전압시험을 도입하였고, 1990년대 중반부터 배전선 전력케이블에 대한 연구가 진행되었다 [6-7].

그러나 아직까지 원자력 발전소 케이블 상태감시 기법에 대한 연구는 한국 원자력 안전기술원, 한국 전력연구원, 대학교 및 케이블 제조회사 등에서 연구를 진행하고 있는 연구 단계이며, 실용화는 일부 되어있으나 신뢰성 및 적응성 등의 측면에서 보완이 필요하다. 현재 국내 원자력발전소내의 케이블 상태감시 방법에는 국한된 방법만 사용하고 있다.

5.2 Round-Robin Test Program^[11-12]

격납용기내의 계측 및 제어 케이블의 열화를 연구하는 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 공동연구프로젝트(Co-ordinated Research Project-CRP)가 1993년에 시작되었다. CRP는 1995년에 원전케이블 열화 감시에 적당한 방법에 대해 광범위한 조사를 하였고, 1996년에는 원자력 발전소내 케이블의 상태감시에 실제로 사용되는 방법에 대해 토론을 하였다. 이러한 연구는 대부분 단일 실험실에서 테스트되었는데, 1998년에는 서로 다른 실험실에서 취득한 데이터를 비교하고, 동일 고분자 재료에 대한 공통 기준을 설정할 필요성으로 'Round-Robin Test'를 수행하였다.

즉 'Round-Robin Test'는 고분자 케이블 재료의 열화를 상태감시하는 여러 가지 방법의 재현성(Reproducibility)을 평가하고, 이러한 상태감시 방법의 표준화를 향상시키기 위한 목적이었다. 'Round-Robin Test'는 IAEA CRP 소속국가들로부터 PVC, PE, XLPE, CSPE, EPR, EPDM, SiR, EVA로 구성된 15개의 절연물과 15개의 외피를 대상으로 상태감시 기법을 적용하여 평가하였다. 'Round-Robin Test'에 포함된 상태감시 기법은 다음과 같으며, 일부 참여 실험실에 서는 토크법이나 절연저항법을 추가적으로 사용하였다.

- a) EAB(Tensile 특성)
- b) Indenter
- c) OIT/OITP
- d) 열중량해석법(TGA)

표 5는 상태감시 방법의 특성에 대해 요약 정리를 하였고, 표 6은 'Round-Robin Test'의 결과로 도출된 원전케이블의 고분자 재료와 상태감시 방법의 상관관계를 표시하였다. 'Round-Robin Test' 결과에서 도출된 결론은 국제적으로 상태감시 데이터들의 교환 및 관찰을 위해 상태감시 방법의 표준화가 절실히 필요하다는 것과, 현재 단계에서 indenter 방법이 가장 강인하고 비파괴적인 상태감시 방법으로 추천되었다. 그러나 표 6에서 나타낸 것과 같이 Indenter 방법은 XLPE에 좋지 않은 결과를 보이므로 아직까지 단일방법으로 상태감시를 수행하기는 어렵고, 적어도 두 개 이상의 상태감시 방법이 혼합이 되어 구현되어야 할 것으로 판단된다.

5.3 상태감시 기법의 연구동향 분석

케이블 상태 감시 및 열화에 관한 국외의 연구동향을 조사

표 5. 상태감시 기법의 특성

? = 알려진 정보가 없음

	시각검사	촉각검사	Indenter	인 장	토크	OIT	TGA
상태 지표	색, 크래킹, 표면 침하, 팽창	고르지않음, 단단함	인덴터용	EAB	토크 계수	시간/온도 값	온도값
연관된 물리-화학적 특성	침가제의 손실, 습기 흡수	무르게 함	압축용, 경도	변형, 유연성	강도, Young의 계수	안정기 산출량	열적 안정도
적용가능한 재료	모두	모두	PVC, CSPE, EPR/EPDM	모두	모두	XLPE, PO, EPR/EPDM	PVC
적용불가능한 재료			XLPE, XLPO		?	PVC	?
샘플링	필요없음	필요없음	필요없음	매설되거나 설치된 케이블	필요없음	타소샘플추출	타소샘플추출
현장에서 샘플링을 위해 필요한 장비	없음	없음	필요없음	팬치	토크 시험기	샘플링 장비	샘플링 장비
시험을 위해 필요한 장비	없음	없음	인덴터, 현상	인장 기계	토크 시험기, 현상	DSC	DSC
외장 시험	예	예	예	예	예	예	예
절연 시험	아니오	아니오	아니오	예	(예)	샘플이 있을 경우	
허용기준	?	?	EAB와의 상관관계	50% 절대적 (또는 상대적)	EAB와의 상관관계	허용 온도에서 1분 초과	?
DBE와의 상관관계	크래크가 없다면, OK (XLPE와 EPR에 대하여)		불확실함	불확실함	아니오	예	아니오
증명된 기법			예	예		예	

표 6. 원전케이블 고분자 재료와 상태감시 기법과의 상관관계

상태감시 기법	고분자 재료	XLPE	CSPE	EPR/EPDM	PVC	EVA
시각 / 측각 검사		O	O	O	O	O
인장 시험		X	O	O	O	O
인텐터		X	O	O	O	O
OIT		O	X	O	(O)	O
TGA		X	X	X	O	X

O - 상태감시 기법은 열화와 합당한 상관관계를 보인다.
 (O) 상태감시 기법은 열화와 합당한 상관관계를 보이지만 일반적으로 실제적이지는 않다.
 X - 상태감시 기법은 열화와 좋은 상관관계를 보이지 않는다.

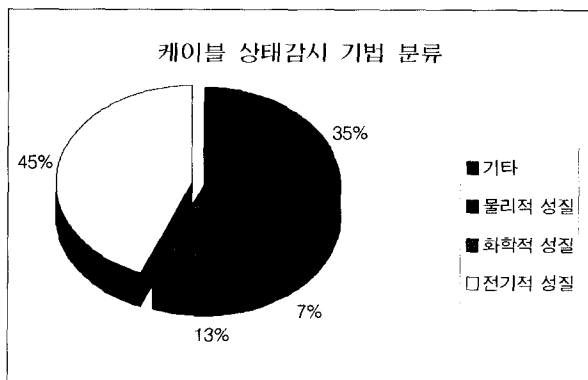


그림 13. 케이블 상태감시 기법 분류

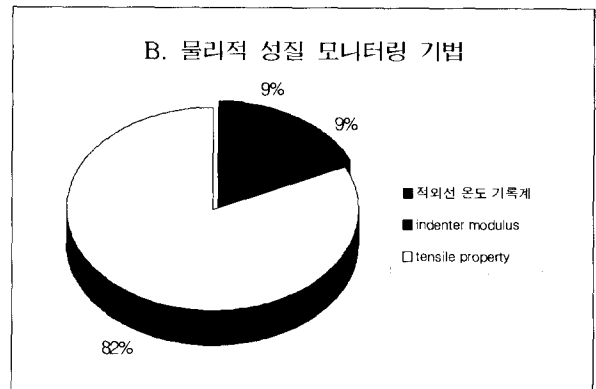


그림 15. 물리적 성질을 이용한 상태감시 기법

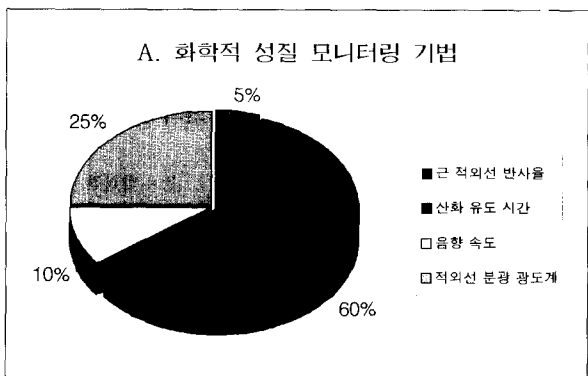


그림 14. 화학적 성질을 이용한 상태감시 기법

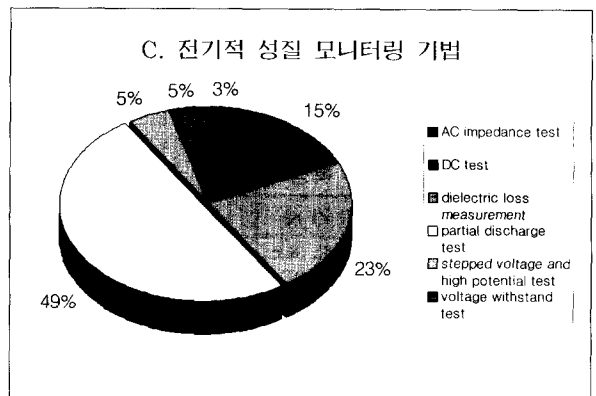


그림 16. 전기적 성질을 이용한 상태감시 기법

하기 위하여 1979년부터 2000년 현재까지 세계 각국에서 발표된 논문 및 학술대회 연구 결과를 정리한 결과는 그림 13~16과 같다. 통계에서 알 수 있듯이 케이블의 전기적 성질을 이용한 방법이 가장 많이 연구되었으며, 화학적 성질을 이용한 방법에서는 산화유도시간(OIT) 방법, 물리적 성질을 이용한 방법에는 신장력 특성을 이용한 방법이 압도적으로 많았으며, 전기적 성질을 이용한 방법에는 부분방전(PD) 방법이 주로 연구되었다. 기타 성질을 이용한 방법으로는 DGA(Dissolved Gas Analysis), 공간전하(Space Charge) 분포 측정 등이 연구되었으며 특히 DGA 방법이 많이 연구되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

지금까지 케이블 열화의 개념, 원자력발전소 내에서의 열화 특성 및 상태감시의 정의와 중요성을 알아보고, 국내·외의 원전케이블의 상태감시 기법을 정리하고 연구동향을 외국 문헌을 중심으로 살펴보았다.

현재까지 케이블 상태감시 기법에 대한 동향은 연구단계이며, 국내의 경우 고장난 케이블의 고장원인 규명 또는 열화 관정을 위한 분석기술이 기존의 직류누설전류법이나 반도체

층 분석, 수트리 및 불순물 분석에 머물고 있다. 특히 원자력 발전소내의 안전관련 케이블의 열화 및 상태감시 기법에 대한 연구는 아직까지 초기진행 단계이며, 방사선에 의한 열화 메커니즘이나 특성도 연구가 필요한 부분이다. 이러한 방법은 국외에서는 이미 진행중에 있으며 따라서 국내에서도 안전관련 케이블의 상태감시 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어, 원자력발전소의 사고를 사전에 예방하고, 또한 원전케이블의 수명예측을 위한 연구가 병행하여 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 강윤식, 김철환 외 2명, "원자력발전소 케이블 상태감시 방법의 국내·외 동향", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 555-557, 2000. 7.
- [2] 김종석, 정일석, "원전케이블 노후화 진단 기술", 2000년 전력케이블 심포지움, pp. 87-94, 2000. 4.
- [3] 이우선, "방사선 차폐 절연재료", 전기전자재료, 제 13권, 제 2호, pp. 37-42, 2000. 2.
- [4] 유명호, "전력 케이블의 절연열화 진단기술", 대한전기학회논문지, vol. 37, pp. 39-52, 1988. 12.
- [5] 고리원전 수명관리연구, "격납용기내 전선 케이블 노후와 평가기술 개발(최종보고서)", 1998.
- [6] 전력 연구원, "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화 진단 시스템 구축(최종보고서)", 1997. 10.
- [7] 김일권, "전력케이블 열화진단의 신기술", 제2회 전력케이블 연구회 배전용케이블의 유지보수 측정기술, pp. 57-79, 1999. 2.
- [8] S.K. Aggarwal, "Literature review of environmental qualification of safety-related electric cables", U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1996. 4.
- [9] H.M. Banford, R.A. Fouracre, "Nuclear technology and ageing", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 15, no. 5, 1999. 10.
- [10] V. K. Agarwal, H. M. Banford, B. S. Berastein, "The mysteries of multifactor ageing", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, no. 3, 1995. 6.
- [11] IAEA, "Assessment and management of ageing of major NPP components important to safety", In-containment instrumentation and control cables, vol I, 2000. 12.
- [12] IAEA, "Assessment and management of ageing of major NPP components important to safety", In-containment instrumentation and control cables, vol II, 2000. 12.

저 자 소개



김복렬 (金福烈)

1955년 9월 6일 생. 1981년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1981~1992년 한국원자력연구소 근무. 현재 한국원자력안전기술원 성능연구실 책임연구원.



구철수 (具喆洙)

1956년 1월 10일 생. 1980년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국원자력안전기술원 성능연구실 책임연구원.



강윤식 (姜允植)

1973년 5월 14일 생. 1998년 충주대학교 전기공학과 졸업. 현재 성균관대학교 대학원 전기 전자 및 컴퓨터공학과 석사과정.



안상필 (安相泌)

1972년 10월 19일 생. 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기 전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사). 현재 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터공학과 박사과정.



김철환 (金喆煥)

1961년 1월 10일 생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990~1992년 제주대학교 전기공학과 전임강사. 1996,1999년 영국 University of Bath Visiting Scholar. 현재 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터공학부 부교수.