원자력발전소 안전관련 케이블의 상태감시

구철수 안상필
한국원자력 안전기술원, 성균관대학교

Condition Monitoring of the Safety Related Cable in Nuclear Power Plant

Goo, Cheol-Soo Ahn, Sang-Pil
Korea Institute of Nuclear Safety Sung-kyun-kwan Univ.

Abstract - 원자력 발전소의 격납 건물에 설치된 안전관련 케이블은 고온, 고 방사선의 열악한 환경으로 인해 열화 될 수 있다. 원자력발전소에 설치된 케이블 중 특히 발전소의 안전에 중요한 케이블은 안전관련기기의 동작에 필요한 전원을 공급하는 중요한 역할을 하고 있다. 원자력발전소의 수명 40년 혹은 수명연장을 고려하면 격납 건물에 설치된 안전관련 케이블의 상태를 확인할 필요가 있다. 지금까지 사용되고 있는 케이블의 상태 감시 방법에는 케이블의 물리적 성질, 전기적 성질 및 화학적 성질을 이용한 여러 가지방법이 제시되어 있다. 그러나 원자력 발전소에서 케이블의 상태 감시를 하기 위해서는 원자력 발전소의 열악한 환경과 운전 특수성을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 원자력 발전소의 이러한 환경과 운전특성, 그리고 현재까지 제시된 케이블의 각 상태감시 방법의 장, 단점을 분석하여 원자력 발전소 현장과 안전성에 가장 적합한 상태감시 방법을 제시하였다.

1. 서 론

원자력 발전소에 설치되는 설비나 부품들 중 발전소의 수명을 40년으로 보면 건설 시에 설치된 설비나 부품이 발전소의 수명과 마찬가지로 40년 동안 사용하여야 하는 설비나 부품이 있다. 그 대표적인 것이 원자력 발전소의 격납 건물에 설치된 케이블이다. 이러한 케이블은 한번 설치를 하면 교체하기가 어려우며 원자력 발전소의 특수한 환경 즉 방사성 물질에 오염이 되어있어 제염을 하기가 쉽지 않다. 그러므로 처음 건설 때 설치된 케이블이 원자력 발전소 수명 40년 동안 혹은 연장된 수명기간 동안 열악한 환경을 유발하는 사고 환경에서도 케이블들이 온전하게 동작할 수 있음을 확인할 필요가 있다.

케이블의 건전성을 확인하는 상태감시 방법에는 이미 여러 가지가 제시되어 있다. 그러나 원자력 발전소에 적용하기 위해서는 아래와 같은 사항들을 고려해야 한다

1) 가능한 비 파괴적이어야 한다
2) 발전소의 안전 및 운전에 영향을 주지 않아야 한다.
3) 방사성 물질에 오염되지 않아야 한다.
4) 부분적인 고압, 고열, 고방사선 지역을 고려하여야 한다.
5) 작업의 단순성 및 접근성을 고려해야 한다.

원자력 발전소에 설치된 케이블의 잔여 수명과 열화 정도를 확인하기 위한 상태감시 방법들 중 한가지 방법으로만 정확한 판단을 할 수 있는 상태감시 방법은 아직 제시되지 않고 있으며 여러 방법들은 각자의 장점과 단점을 가지고 있다. 이러한 장점과 단점을 잘 파악하여 원자력 발전소의 열악한 환경에 설치된 케이블의 열화를 판단하는데 가장 적합한 방법을 찾아야 한다. 또한 케이블을 구성하는 외피, 절연체의 재질에 따라 상태감시 방법을 달리해야 하므로 상태감시 방법의 선정시에는 케이블을 구성하는 재질도 고려하여야 한다.

2. 본 론

2.1 원자력 발전소의 환경

상태감시가 가장 필요한 케이블은 원자력 발전소 격납 건물 내에 있는 안전관련 케이블들이다. 이 케이블들은 발전소의 안전 관련 부하에 비상시 필요한 전원을 공급하는 중요한 역할을 하고 있다. 여기에 설치된 케이블의 상태감시를 하기 위해 필요한 것 중 하나는 케이블이 설치된 지역의 환경조건을 조사하는 것이다.

격납 건물 내에는 고 방사선뿐만 아니라 온도도 다른 지역보다 상당히 높은 곳이 있으며 사고 시에는 압력 및 고압증기에 영향을 받는 지역이 있다. 그러므로 발전소의 환경은 발전소 정상운전, 비상시 및 사고 시 등 운전 상태에 따라 그 환경(온도, 압력, 방사선, 습도, 진동 등)은 크게 달라진다.

여기서는 국내에 설치된 가압 경수로형 발전소의 일반적인 환경조건을 정상 운전 및 사고 환경에 따라 각 환경 변수들을 조사하였다.

2.1.1 온도

원자력 발전소 격납 건물 및 보조건물 내의 온도는 발전소의 위치, 종류, 계절에 따라 약간의 차이는 있다. 여기서는 국내 원자력 발전소로는 영광 5, 6호기의 설계시 고려한 온도와 최근에 한전 전력연구원에서 측정한 결과를 발표한 고리 1호기의 온도, 그리고 외국 발전소에서 조사한 온도를 확인하였다. 고리 1호기의 격납 건물 가압기 하부에 설치된 케이블 자켓 부위의 온도를 1년간 측정한 결과 온도는 가압기의 운전조건에 따라 25 ~ 38℃ 의 온도변화를 가지며, 발전소가 가동중임에도 발전소 계획예방정비를 위한 휴지기간과 동일한 25℃ 온도를 유지한다는 것을 전력연구원에서 측정한 결과 알 수 있었다.

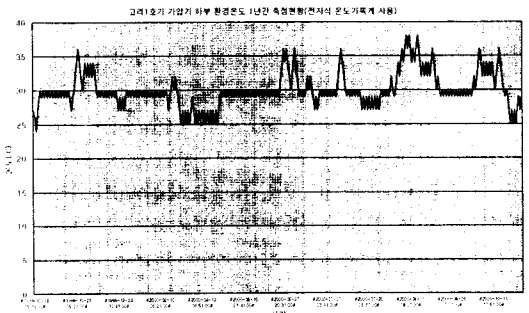

그림 1. 고리 1호기 가압기 하부지역 환경온도 1년간 측정한 결과 [2]

이 측정값은 격납건물 내의 일부 온도이며 대표적인 값은 아니지만 국내에서 격납건물 내부의 온도를 실제로 처음 측정한 결과이다.

국내 영광 원자력 5, 6호기의 경우, 최종안전성 분석 보고서에 따르면 격납 건물 내부의 설계시 고려하는 정상 운전시 온도는 15.5 ℃ ~ 48.8 ℃이며 사고시 최고 온도는 182 ℃에 이르고 있다.[6]

외국의 경우 미국 EPRI가 조사한 Perry 발전소의 정상운전 중 5군데에서 측정한 격납 건물내부의 평균온도는 29 ℃ ~ 60 ℃ 정도임이 보고 되고있다.

2.1.2 방사선

영광 5, 6호기 격납 건물 내부의 경우 정상운전 시 총 누적 방사선 흡수선량이 건물의 위치에 따라 최저 4.0×10^2 Gy에서 최대 5.5×10^7 Gy가 되며 사고시에는 최저 2.0×10^6 Gy이며 최고 6.0×10^7 Gy이 된다. 격납 건물 내부에서도 방사선량이 가장 많은 지역은 원자로심 근처이다. 여기서 정상운전 시 방사선량은 원자력발전소 수명 40년 동안 정상 운전 시 받는 총 누적 방사선량을 나타내며 사고 시는 한번의 설계기준사고로 인한 방사선량과 40년 동안 정상 운전 시 받는 방사선량을 합한 양이 된다.

2.1.3 습도

습도는 상대 습도로 나타내며 격납 건물 내부에서는 정상운전 시 5 ~ 90%이며 사고 시는 100%가 되는 것으로 본다. 고 압력의 증기 배관이 근처에 있을 경우 고 압력 증기 배관의 파단 시는 고온, 고 압력의 증기가 발생하는 환경이 될 것이다.

2.2 상태감시 방법

케이블의 상태감시 목적은 케이블 현재의 상태가 건전한가를 확인하고 추후 비상시 즉 케이블 주변환경이 사고로 인하여 열악한 상황이 되었을 때도 그 건전성이 유지 될 만큼 충분한 여유가 있음을 확인하는 것이다. 원자력 발전소에 설치된 케이블 중 격납 건물 내에 설치된 케이블은 열악한 환경으로 인해 케이블의 상태를 수시로 감시하기가 용이하지 않다. 그러므로 이러한 주변 환경과 발전소의 운전특성을 잘 고려하여 가장 적절한 상태감시 방법을 선정하는 것이 중요하다.

일반적으로 케이블의 상태 감시 방법을 크게 구분하면 케이블 절연체 및 외피의 전기적 성질, 물리적 성질 및 화학적 성질을 이용한 방법으로 나누고 있다. 또한 사용되는 케이블 절연체, 외피의 재질에 따라 상태감시 방법을 적절하게 선정하여야 가장 효과적인 감시가 된다.

본 논문에서는 상태감시 각 재질에 대한 상태감시 방법의 장단점과 원자력 발전소 적용성을 검토하여 원자력 발전소에 가장 효과적인 상태감시 방법이 무엇인가를 확인하고자 하였다.

2.2.1 화학적인 성질을 이용한 상태감시 방법

1) 뿌리에 변환 적외선 분광 광도계 (FTIR)

어떤 분자의 적외선 스펙트럼을 측정하여 비교함으로써 그 분자에는 어느 특정 결합이 존재한다고 판단을 할 수 있다. 즉 특정 물질의 적외선 흡수 스펙트럼은 그 물질의 화학적, 물리적 특성들에 관한 매우 중요한 정보를 제공하는 화학적 성질을 이용하여 케이블의 상태를 확인하고자 하는 방법이다.

(1) 장점
- 케이블 노화의 화학적 성질에서의 변화를 감시하는 매우 강력한 방법
- 샘플이 극미 샘플링(micro-sampling)이기 때문에 비 파괴적 방법

(2) 단점
- 절연체 또는 외피에서 100 μgram의 시료를 채취
- 샘플로부터 이루어지는 적외선 스펙트럼은 케이블 외피의 표면 층에만 제한
- 샘플링을 하여 접근할 수 있는 케이블에만 제한
- 열화의 후기단계에는 매우 민감하지 못함
- FTIR 스펙트럼을 해석하고 평가에 숙련 요구함
- 산화에 의한 열화시 카르보닐 피크 검출이 어려움
- PVC 샘플에는 유효하지 못함]

2) 근 적외선 반사율(NIR)

분자구조로 C-H, O-H, N-H, C=O, C=C 구조를 가진 물질에 근 적외선 영역의 빛을 조사하면 그 구조에 따라 기준진동 배음과 결합음으로 진동을 일으켜 에너지가 흡수된다. 분자구조의 차이에 따라 파장 별로 흡수정도가 달라 파장에 대한 흡수 스펙트럼이 가능한 방법을 이용하는 것이다.

(1) 장점
- PVC에 대한 예비평가는 좋은 가능성(잠재력) 있음
- 현장에서 사용할 수 있는 방법으로 개발이 가능함
- 샘플의 준비가 간편함

(2) 단점
- 고분자 물질 전체에 적용하기에는 제한이 있음
- 외피에만 해당되고 전체 열화상태를 대표하지는 않음

3)용해도 측정

고분자에 화학적으로 열화가 진행되었는지 여부를 표시할 수 있는데 특히 Gel 함량의 변화는 OH기 생성시기와 더불어 열적 열화시기로 평가되고 있으며, 용해도(Gel 함량)와 팽윤 측정치는 고분자가 화학적 반응, 즉 체인분리 또는 교차결합을 경험했는지 여부를 나타낸다.

(1) 장점
- 노화의 화학적 성질변화를 감시하는 강력한 방법임
- PVC에 적합하고, EPR, XLPE, SBR에 대해 전망있는 결과를 제시함
- 체인분리 또는 교차결합 같이 어떤 종류의 열화가 발생했는지 표시 가능

(2) 단점
- XLPE와 EPR에는 부적절함
- 미세 시료(극미샘플링)에는 사용이 불가능
- 실험과정이 간단하지 않고 시간이 오래 걸림
- 도출 결과는 열화의 양(진행정도)에 대한 정보를 제공하지 않음
- Gel 함량이 열적 노화에 대해 민감하지 않음

4) 산화유도 시간/온도(OIT/OITP)

산화유도시간은 고분자의 산화성 안정도를 나타내며 고분자의 산화방지제가 결핍됨에 따라 감소한다

(1) 장점
- 케이블 열화를 초기에 인지할 수 있음
- 잔존 수명예측에 유용하게 사용될 수 있음
- 현장에서 극미 샘플링이 가능하므로 비파괴적인 방법
- XLPE나 PE 같은 절연물에 특히 유용한 방법임

(2) 단점
- 산화방지제가 첨가된 물질에만 적용이 가능함
- PVC에는 적용이 쉽지 않음
- 극미샘플(10 mg)이 채취되어야 함
- 샘플을 외피에서만 추출함.
- 오염은 샘플링에 제한을 주며 화학적 정화는 표피의 변화를 막기 위해 피해야 함
- EAB법 또는 케이블 기능을 나타내는 다른 특성과의 상관관계가 필요함

기타 열중량 분석법(TGA), 시차 주사 열량기(DSC), 가소제 함유량, 음향 속도, 컴퓨터 단층 사진술(CT)과 같은 방법이 있다.

2.2.2 물리적인 성질을 이용한 상태감시 방법

1) 적외선 온도 기록계

물질은 주어진 온도에 대해 서로 다른 강도의 적외선 에너지를 방출하게되는데 이때 재료나 가스의 방사율은 분자 구조와 표면 특성의 함수이다

(1) 장점
- 매우 간편하고 수행하는데 비교적 경제적임
- 비 파괴적인 방법임
- 별도의 샘플 채취가 필요 없음

(2) 단점
- 노화로 발생하는 케이블 열화에는 민감하지 않음
- 가압되어 있는 케이블에 접근하므로 위험함

2) 신장율 측정(EAB)

(1) 장점
- 인장시험에 근거를 두며 국제적으로 표준화가 되었음
- 결과는 대부분의 고분자물에 유기된 열화(온도, 방사선 등)의 양만큼 점차적으로 감소함

(2) 단점
- 매우 큰 샘플이 필요하며 파괴적임
- XLPE에 대해 좋은 시험법이 아님

3) 압축률(Indenter)

압축율에 의해 측정되는 케이블 절연체와 피복 물질의 품질을 평가하는 장치이다

(1) 장점
- 현장에서 적용하기 쉬우며 빠른 시험을 할 수 있음
- 현장에서 즉시 결과를 얻을 수 있음
- 압축률 계수는 비교적 고온의 조건에서 운전되는 케이블 외피의 노화 상태를 잘 지시해 줌
- 결과는 대부분의 고분자물질에 유기된 열화(온도, 방사선 등)의 양만큼 점차적으로 감소함

(2) 단점
- 매우 큰 샘플이 필요하며 파괴적임
- XLPE 및 PVC에 대해 좋은 시험법이 아님
- 어떤 재질은 온도에 영향이 있으므로 온도 보정 필요

기타 이외에도 노화가 진행될수록 토크(Torque)가 증가하는 성질을 이용한 토오크 시험법, 일상 보수 활동 중에 포함되는 검사로서 심각한 열화의 유무를 확인하며 재질의 절단, 마모 혹은 오염과 같은 손상, 경화, 갈라짐과 같은 심한 열화를 확인할 수 있는 육안검사, 촉각검사, 유연성 검사 등이 있다

2.2.3 전기적인 성질을 이용한 상태감시 방법

1) 직류 절연저항 시험

직류 전압 인가 후1분 및 10분의 절연 저항을 측정한다. 1분에 대한 10분에서의 판독치의 비가 1보다 적으면 절연을 통과한 체적 누설전류가 높음을 의미한다.

2) 교류 임피던스 시험

정전 용량 값이 열화에 따라 증가하며 손실인자는 저주파 영역에서 감소하는 특성을 이용한다.

3) 부분 방전시험

절연층에 공기층이나 균열과 같은 결함을 검출하기 위해 사용하는 시험법이다.

4) 시간영역 반사광 측정(TDR)

짧은 천이 시간을 갖는 저전압 파형을 보내어 케이블 임피던스 불균일점에서의 파형의 굴절을 관측하는 방법으로, 입사펄스와 반사펄스 사이의 시간차는 케이블의 종단으로부터 불균일점까지의 거리를 나타내는 것을 이용한 시험이다.

5) 전자기력 측정

케이블에서 발생하는 자기장의 변화를 측정하여 감시하는 시험임. 케이블로부터 2 feet 정도 거리에서 측정하며 비 파괴적인 방법이다.

이외에도 유전손 측정 등이 있으나 전기적 성질을 이용한 상태감시 방법들은 케이블의 열화 정도와 수명을 예측하는데는 대부분이 적절하지 못하고 현재의 성능을 확인하는 방법으로 만 활용되고 있다.

3. 결 론

원자력 발전소에 설치된 케이블의 상태 감시가 중요한 것은 발전소 사고 상태의 열악한 환경에서도 부하가 필요로 하는 전원을 공급해야 하기 때문이다. 지금까지 한 가지 방법으로 케이블 재질에 대한 열화정도와 잔존 수명을 평가할 수 있는 상태 감시 방법은 없다. 각 상태 감시 방법마다 장점과 단점이 있으며 케이블 재질에 적합한 방법이 있다.

육안검사와 촉각 검사를 제외한 시편의 신장력과 토오크 측정은 모든 재질에 적용할 수 있으나 현장의 케이블을 파손하는 방법이므로 현장에 시험용으로 시편이 설치된 것이 있거나 충분한 여유가 있는 경우는 이 방법을 적용하는 것이 좋다. 현장의 케이블 시편 취득이 어려운 경우는 극 미량의 샘플로도 열화의 정도가 확인 가능한 화학적인 성질을 이용하는 방법을 우선적으로 수행하고 화학적인 방법의 정밀 분석에 대한 오차를 보완하기 위해 물리적 성질 혹은 전기적 성질을 이용한 방법을 추가 적용하여야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] 김복렬, 구철수, 강윤식, 안상필, 김철환, "원자력발전소 케이블의 상태 감시 기법 연구동향", 전기학회지, Vol 50 No 1, 31~39, 2001

[2] 김종석, 정일석, 홍승열, "Condition Monitoring에 의한 원전 케이블 수명평가", 2001년도 제 8회 기기 건전성 Workshop, Vol 4, 685~693쪽, 2001

[3] IAEA, "Assessment and Management of Aging of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: In-containment Instrumentation and Control Cables ", IAEA-TECDOC-1188, Vol 1 & 2, Dec. 2000

[4] R. Lofaro, B. Bowerman, J. Carbonaro.., "Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Cables", NUREG /CR-6384 BNL-NUREG-52480, Vol. 1 & 2, 1996

[5] B. Lee, "Environmental Qualification of Electric Equipment Used in Commercial Nuclear Power Plants", TR-6168/69-03-95, Feb. 1996

[6] 한국전력주식회사, 영광 5, 6호기 최종안전성 분석보고서,3.11-1~73,2000.