'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 매설설비 노화관리 및 수명평가 기술

Aging Management and Life Assessment of Buried Commodities in Nuclear Power Plants

박준현*, 정일석
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

조홍석, 김민걸, 김승태
한전기공(주) 기술개발원
경기도 성남시 분당구 금곡동 196

이신선
한국전력공사 고리원자력 1발전소
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216

요 약

효과적인 매설설비 노화관리 방안 수립을 위해 장기 가동중인 원전을 대상으로 노화진단 및 수명평가를 수행하였다. 매설설비의 사양, 노화손상 사례, 정비 이력, 노화관리 실태 등과 같은 기본적 자료를 검토하고 매설설비의 노화손상이 발전소에 미치는 영향을 고려하여 노화관리 우선순위를 결정하였다. 매설설비의 재료특성에 따라 다양한 방법을 동원하여 현장 노화진단을 수행하였으며 이 결과를 바탕으로 설비의 건전성을 평가하였다. 매설설비의 장기 사용에 따른 국부적 노화손상 등이 일부 매설설비에서 발견되었으나 전반적인 구조적 건전성은 양호한 것으로 나타났다.

Abstract

General field survey, inspection and life assessment were performed to establish effective aging management program of buried commodities in nuclear power plant. Basic informations on material characteristics, aging degradation experiences and maintenance history were gathered. Considering their degradation effects on power operation or safety, buried commodities were screened for the aging management priority. Various inspection techniques were applied in field survey and inspection, and their results were incorporated in the life assessment of buried commodities. In the aspect of aging degradation, general status of buried commodities were considered still sound while some revealed local degradation.

1. 서 론

매설설비는 지하에 위치하여 수질, 토양, 온도 등 지하환경에 영향을 받는 설비를 의미한다. 매설설비는 지상 또는 건물 내에 위치한 설비보다 외부 운전환경이 열악한 경우가 대부분이므로 이러한 환경요인에 견딜 수 있는 재질로 설계되거나 환경을 차단할 수 있는 보호설비와 함께 시공

되어야 한다. 적절한 설계 및 시공이 되었다 하더라고 운전 중에 예측하지 못한 외부환경에 의한 노화현상이 발생하기도 하며 계통에서 취급하는 유체와 같은 내부 환경요인에 의해 노화가 진행되기도 한다. 일반적으로 매설설비는 지하에 위치하여 접근이 용이하지 않기 때문에 진단에 어려움이 있으며, 전력생산 측면에서도 우선순위가 낮은 설비로 취급되고 있기 때문에 노화관리 활동이 소홀해질 수 있다. 이러한 특성 때문에 매설설비에 노화손상이 진행되어도 이를 적기에 발견하여 조치를 취하기가 쉽지 않으며, 적절한 조치시기를 놓쳤을 경우에는 설비 개보수에 추가적으로 많은 비용을 지불해야 하는 경우도 발생된다. 또한 전력생산에 직접 관련된 설비운전에 영향을 주어 전력생산이 곤란하게 되는 경우도 발생하게 된다. 따라서 매설설비도 여타 중요설비와 마찬가지로 설비 특성에 적합한 일정수준의 노화관리가 이루어져야 하며 이러한 노화관리는 발전소가 장기 운전되는 발전소일수록 필요성이 높아진다.

본 연구는 국내 가동중원전을 대상으로 매설설비의 노화관리 현황을 분석하고 현재 노화상태를 평가하여 향후 장기 계속운전을 대비한 노화관리 방안을 수립하는 것에 중점을 두어 수행하였다. 원자력발전소의 매설설비는 콘크리트, 콘크리트관, 강관, 전선 등 다양한 종류로 구성되어 있으며 구성 재료, 설비 운전 특성 및 매설환경에 따라 노화기구 및 노화영향이 다르게 나타난다. 매설설비 노화관리는 이러한 다양한 재질 및 특성에 바탕을 두어 이행되어야 하기 때문에 해당 발전소의 매설설비 특성 조사 및 현장 노화진단이 필요하다. 모든 매설설비에 대해 노화관리를 수행하는 것은 비경제적일 수 있으므로 설비 중요도, 접근 가능성, 노화손상 사례 등을 고려하여 우선순위를 부여하여야 한다. 우선순위에 따라 적절한 기법을 이용하여 선정된 매설설비에 대해 노화진단을 수행하고 기초자료 조사결과와 노화진단 결과를 이용하여 설비의 건전성을 평가하게 된다. 본 연구에서는 이러한 매설설비의 노화진단 및 수명평가 방법을 고찰하고 현장 노화진단 결과를 이용한 건전성 평가를 수행하며, 향후 발전소의 장기 연장운전에 대비한 매설설비 노화관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 매설설비 노화진단 및 수명평가 방법

노화진단 및 수명평가 기술은 설비의 현재 노화 상태를 진단하고 그 결과를 종합적으로 분석하여 대상 설비의 잔여수명을 예측하고 적절한 노화관리 프로그램을 수립·적용함으로써 발전소의 수명기간동안 발전설비의 성능 및 안전성을 유지 또는 향상시키는 수명관리(PLiM, plant lifetime management) 기술의 한 부분이다.

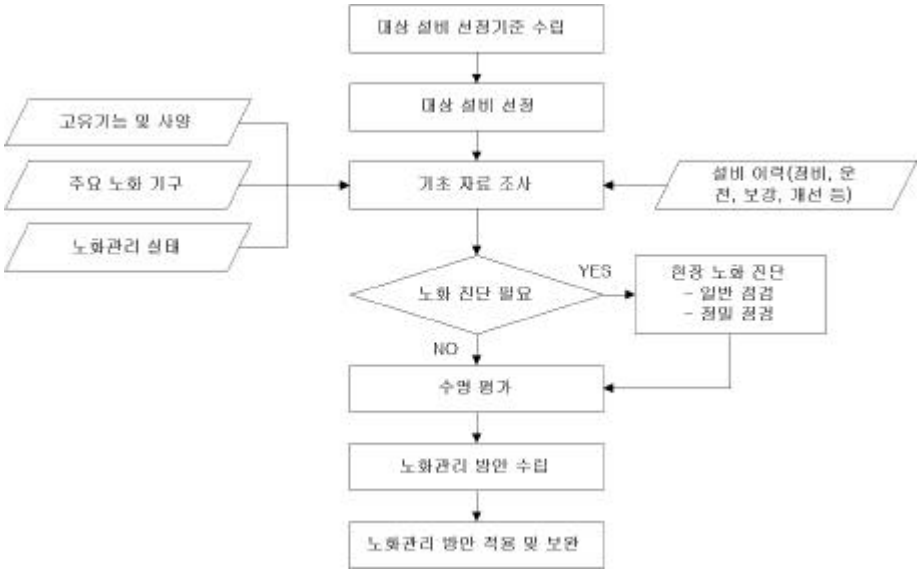


그림 1 매설설비 노화진단 및 수명평가 절차

매설설비 노화진단 및 수명평가 절차는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 노화관리 대상 선정기준에 따라 매설설비에 우선순위를 부여하여 노화관리 대상을 선정하고 각종 관련 자료를 검토하여 노화진단 필요성을 판단한다. 주기적 현장 노화진단이 이루어지고 있는 설비에 대해서는 별도의 노화진단을 수행하지 않고 관련 노화/손상 및 정비/교체이력 자료를 검토하여 수명평가를 수행하고, 노화진단 자료가 부족한 설비에 대해서는 별도의 현장 노화진단을 수행한다. 설비 특성에 따라 노화진단 방법 및 범위를 결정하고 일반점검을 수행하거나 필요시에는 추가적인 정밀진단을 수행한다. 이러한 노화진단 자료를 반영하여 매설설비의 건전성 및 잔존수명을 평가하고 그 결과에 따라 적절한 노화관리방안을 수립하고 현장에 적용하게 된다.

가. 노화관리 대상 설비 선정 기준

매설설비의 노화진단 및 수명평가를 위해서는 우선 대상계통, 구조물, 기기(SSCs, systems, structures and components)를 선정해야 한다. 이는 발전소에 수많은 매설설비가 존재하므로 모든 설비에 대해서 노화관리를 수행하는 것은 비경제적일 뿐 아니라 지하에 매설되어 있어 현실적으로 진단이 용이하지 않기 때문이다. 따라서 매설설비의 안전성 관련 여부, 발전소 신뢰성 관련 여부, 노화의 정도, 운전환경의 심각도 등을 고려하여 우선적으로 노화진단을 수행해야할 설비를 결정한다[1],[2],[3].

본 연구에서는 다음과 같이 미국 정비규정(maintenance rule)에 적용을 받는 설비와 여타 공학적 판단기준에 의해 노화관리 대상 매설설비를 선정하였다.

- 안전성 관련 설비이거나 안전성 관련 설비의 작동에 영향을 미치는 비 안전성 관련 설비
- 고장 또는 결함 발생시 전력설비의 운영에 영향을 주거나 대규모의 복구작업이 필요한 설비
- 토양에 직접 매설되어 환경이 열악한 설비
- 주기적 점검, 보수 등의 노화관리가 전무하거나 다른 발전소에서 손상 사례가 있는 설비

나. 노화관리 기초자료 조사

대상 매설설비의 위치, 환경, 고유기능 및 사양, 정비/검사 기록을 수집하고 이를 분석하여 수명평가 및 노화관리 방안 수립을 위한 기초자료로 활용한다.

표 1 노화관리 실태 점검항목

구 분	수집 자료	목 적
재료/사양	- 호칭, 길이, 재료 - 방식재료, 도막재료	- 매설설비의 사양 및 재료 사용의 적절성 검토 - 재료의 손상기구 및 손상 형태 검토
매설환경	- 매설방법 - 지하수 성분	- 매설방법 및 매설재료를 조사하여 매설환경에 의한 직접적인 피해 또는 간접적인 영향 예측
노화/손상	- 재료 및 시공시 결함 - 정비 결함	- 시공시 손상, 노화에 의한 손상 등 연대적 손상원인 분석을 위한 자료 수집
유지관리	- 운전, 정비 이력 - 정기 점검 기록	- 적절한 유지, 관리 유무 파악 - 주기적인 손상 종류 및 위치 등을 파악

다. 노화 진단

현장 노화진단은 노화관리 기초자료가 부족하거나 또는 이를 보완할 필요가 있는 매설설비에 한하여 설비특성, 진단기법, 진단 범위, 진단 가능시기 등을 고려하여 진단일정을 수립한다. 진단요원은 최소한 육안검사 자격을 보유하여야 하며 특정한 진단에 대해서는 전문자격을 보유한 진단요원이 투입되어야 한다.

일반점검은 매설설비의 노화/손상을 확인하기 위하여 접근이 가능한 부위에 대하여 직접 육안검사 또는 간단한 시력보조기구를 사용하여 실시하는 외관검사로 ASME Sec. XI의 기준에 따라 균열, 변형, 변질, 부식 등의 결함에 대한 VT-1(VT-1C) 또는 VT-3(VT-3C)검사가 이에 해당된다. 접근이 불가능한 부위에 대해서는 매설물 주변 토양의 비저항 측정 또는 토양의 샘플링에 의

한 분석시험 등의 주변 환경분석에 의하여 노화/손상의 발생 가능성을 간접적으로 추정하는 방법 등도 이에 해당한다.

정밀점검은 일반점검 결과 심각한 노화 또는 손상의 징후가 발견되어 정밀성과 전문성이 요구되는 보충검사가 필요하다고 판단될 경우에 실시하는 파괴 및 비파괴검사 등이 이에 해당한다. 접근이 가능한 콘크리트 구조물인 경우 반발경도 시험, 초음파 시험, 철근상태 검사, 중성화 시험, 압축강도 시험, 염분량 시험, 철근의 인장강도 시험 등이 사용되며, 강 구조물인 경우 강재의 두께 측정, 방식상태 검사, 용접결함검사, 경도시험, 인장강도시험, 금속 조직검사 등이 활용된다. 현장 여건상 굴착이 어렵거나 접근이 곤란한 매설 강관에 대해서는 코팅상태를 평가할 수 있는 C-scan 이나 DCVG(DC voltage gradient) 기술, 관 내부의 부식상태를 검사하는 intelligent pigging 기술 등이 사용된다.

라. 수명 평가 기법

수명평가란 운전/정비이력과 현장진단을 통하여 취득한 노화/손상 데이터를 허용기준과 비교하여 해당 기기의 현재의 노화상태 및 건전성을 평가하고 잔여수명을 예측하는 기술이다. 수명평가에는 정량적인 방법과 정성적인 방법이 있으며, 정량적인 방법은 시간제한 노화분석(TLAA, time limited aging analysis) 등을 통하여 현재 구조물의 노화정도를 수치로 산출하는 방법이며 정성적인 방법은 구조물의 중요도, 노화상태의 변화, 노화/손상의 심각성 등을 분석하여 현재의 구조물 상태를 정성적으로 나타내는 방법이다. 매설설비의 수명평가에는 설비종류 및 특성에 따라 두 가지 방법이 적절히 혼합되어 사용된다.

3. 매설설비의 종류 및 노화기구

가. 매설설비 종류

원자력발전소의 지하에 매설된 설비로는 구조물, 콘크리트관, 탱크, vault, 전선관, 강관 등이 있으며 이중 콘크리트관과 강관이 많은 비율을 점유하고 있다. 이들 매설설비 중에서 노화진단 우선순위 선정 기준을 적용하여 7개 계통 20개 항목을 선정하였으며 이는 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2 노화진단 대상설비 선정

계 통	대상 기기	기 능	선정사유	매설 환경 / 재료
Circulating Water Sys.	CW0CV0 외	순환수펌프에서 복수기로 냉각해수 공급	신뢰성 품목 매설환경 열악	토양/ 콘크리트 PCCP Cable
	CW5PC6	순환수펌프 전원 공급 Power Cable		
Component Cooling Seawater Sys.	CC0CP0 외	1차 기기냉각해수펌프에서 1차 기기냉각수 열교환기로 냉각해수 공급	Seismic Class 1 타호기 손상발생	
	CC4PC5	1차 기기냉각수펌프 전원공급용 케이블		
Service Cooling Seawater Sys.	SC0CP0 외	2차 기기냉각해수펌프에서 2차 기기냉각수 열교환기로 냉각해수 공급	신뢰성 품목 매설환경 열악	
Fresh Water Sys.	FW1SP3	보조급수 공급	Seismic Class 1	Trench/ Carbon Steel
Condensate Water Sys.	CD1SO3	보조급수 공급		
Diesel Gen Fuel Sys.	DG0SP0 외	Diesel Fuel Tank에서 Day Tank로의 Fuel Oil공급		
Fire Protection Sys.	FP0SP0 외	디젤구동 소방펌프에서 FW 소방펌프로 해수 공급, FW Tank에서 FW 소방펌프로 순수공급	신뢰성 품목 매설환경 열악	토양/ Cast Iron, Carbon Steel

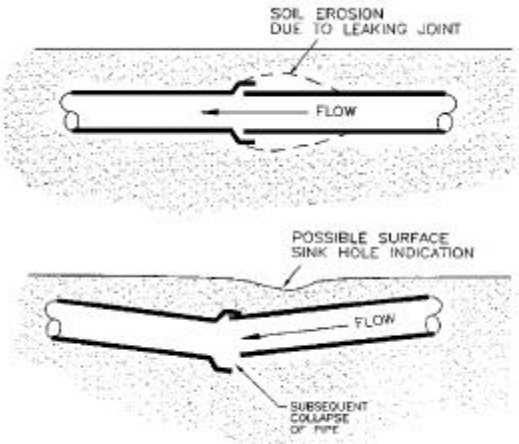
나. 노화기구(aging mechanism)

매설설비는 콘크리트, 강재, 중합체(polymer) 등 다양한 재질로 구성되어 있으므로 발생되는 노화기구 및 이에 따른 노화영향도 다양하게 나타난다. 표 3은 매설 콘크리트와 강재에서 발생하는 주요 노화기구와 이의 특성을 나타내고 있다.

표 3 노화기구 및 특성

구분	노화기구	특 성
콘크리트	동결융해	ASTM C260의 공기량과 물-시멘트비 요건을 만족하였다면 중요하지 않으나 돔, 지붕, 토양접촉 부위는 잠재적으로 영향을 받을 수 있음
	철근부식	ACI 318-68에서 콘크리트의 염화물 제한이 있었다면 중요하지 않으나 콘크리트 중에 염소이온 Cl^- 이 일정량 이상 존재하면 부동태 피막이 부분적으로 파괴되어 화학반응에 의한 부식발생 가능
	화학적 침해	염분함유 지하수 존재지역의 지하 콘크리트 구조물 또는 산성비에 노출된 외부표면 부위에 대하여 잠재적인 영향을 미칠 수 있음
	온 도	300。F이상의 환경에 노출될 경우 영향을 받음
	알카리-골재반응 크릮, 건조수축	발전소 수명 초기에 나타나는 현상으로 수명연장과 관련하여 중요하지 않음
강재	일반부식	비코팅부위 또는 코팅손상부위에서 염분 또는 습분의 영향으로 발생할 수 있으며 대기중에서의 부식속도가 1.0mil/yr 이하일 경우 허용가능
	갈바닉부식	전위차가 큰 이종금속 접촉부위에서 잠재적 발생 가능성이 높음
	피 팅	염화물이 존재하는 표면에서 국부적으로 발생하나 한번 발생하면 계속하여 손상범위가 확대됨
	미생물 부식	유기체가 생존하기 쉬운 유체가 정체되어 있는 배관, Sump 등에서 발생가능성이 있음
	응력부식균열	염화물에 노출된 스테인레스강이 고응력을 받는 부위에서 발생가능성이 있음
	피 로	열적, 기계적 반복하중 및 진동의 영향을 받는 고온관통부, 벨로우즈 등에 잠재적 영향을 미칠 수 있음

철근 콘크리트 구조물의 주요 노화기구로는 염해에 의한 철근의 부식, 반복적인 동결 융해작용(freeze-thaw), 콘크리트의 중성화, 화학적 침해, 알카리 골재반응, 건조수축 현상 등이 있는데 이는 산성비, 화학약품, 해수 등의 외적요인과 시멘트 경화제 및 골재의 열특성 차이, 콘크리트의 투수성 등 내적 요인들의 상호작용에 의해서 발생되고 심화된다.[4, 5]



Progressive Pipe Failure Due to Erosion

그림 2 Water erosion에 의한 매설관의 손상

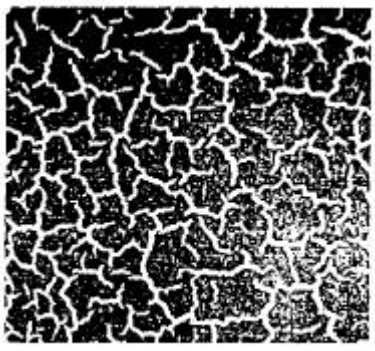

Alligatoring

그림 3 도장의 노화 현상

매설 강관 및 강 구조물의 주요 노화기구는 통기차 부식(differential aeration corrosion), 갈바닉부식(galvanic corrosion), 점식(pitting), 미생물부식(MIC, microbiologically induced corrosion), 피로(fatigue), 응력부식균열(stress corrosion cracking), 마모, 온도상승에 의한 강재의 물성치 저하 등이 있다. 그림 2와 3은 매설설비의 대표적인 노화현상을 보여주고 있다.

4. 노화진단 및 수명평가

매설설비의 노화진단은 일반점검과 정밀점검으로 나누어 수행하였다. 접근 가능한 설비에 대하여 노화/손상의 상태를 직접 확인하기 위하여 균열발생 유무, 코팅손상, 침전물, 누설상태 등의 육안검사를 수행하고 이를 점검표에 기록하거나 사진 촬영을 하였다. 정밀점검 단계에서는 일반점검 데이터의 보충을 위하여 금속배관의 두께측정, 콘크리트 중성화 검사 등의 비파괴 검사를 수행하였으며 일부 매설 콘크리트 구조물에 대해서는 코아를 채취하여 분석하였다.

대형펌프에 전원을 공급하는 매설 케이블에 대해서는 절연저항시험, 직류누설전류시험, 유정전접시험 등의 절연진단을 수행하였다. 접근이 불가능한 매설강관에 대해서는 방식설비를 점검하였으며 주변 토양의 비저항(resistivity) 측정 및 토양 샘플링에 의한 성분분석 등의 간접적인 평가를 수행하였다.

가. 콘크리트 구조물

콘크리트는 pH 13 정도의 강알칼리성이기 때문에 수명기간 동안 콘크리트가 강알카리성을 유지하고 있다면 철근 부식은 발생하지 않는다. 알칼리 상태에서 철근은 부동태 산화막(γ-$Fe_2O_3 . H_2O$)을 형성하여 표면을 보호하기 때문에 부식을 방지하게 된다. 그러나 콘크리트에 염분, 이산화탄소 또는 기타 산 성분이 유입될 경우 콘크리트는 중성화되고 부동태 산화막이 용해성 염으로 변하면서 보호막의 기능을 상실하게 된다. 이렇게 될 경우 철근은 부동태막이 상실된 부위부터 국부적인 부식이 일어나게 된다.

o 중성화 시험

지하에 매설된 콘크리트 도관(culvert)의 중성화 정도를 평가하기 위해 중성화 시험을 수행하였다. 코아를 채취한 수개의 수개의 콘크리트 도관에 대해 1% 페놀프탈레인 용액을 이용하여 중성화 시험을 수행한 결과 중성화 깊이가 낮아 이로 인한 철근 부식 가능성은 없는 것으로 나타났다.

o 염화물 함유량 측정

염화물 함유량 측정은 AASHTO T260-84 (sampling and testing chloride ion in concrete and concrete raw materials) 중 염소이온 선택성 전극을 이용한 전위차 측정법을 이용하여 채취한 코아를 깊이별로 분석하였다. 철근부식을 일으키는 염분의 한계농도인 0.1 0.4 wt %와 비교해 볼 때 해당 구조물의 염화물 함량은 한계치 이내인 것으로 나타났다.

표 4 코아샘플의 염소이온 농도

코 아 샘 플	부위 (깊이, cm)	Cl^- (%)	$kg/m^3 \times 10^{-1}$
CV2CW2	0 1	0.1889	4.3443
	2 3	0.2269	5.2179
	3 4	0.1961	4.5094

o 전위 측정

철근의 부식상태를 간접적으로 평가하기 위하여 콘크리트와 철근사이의 자연전위를 측정하였다. 콘크리트는 통상적으로 pH 13 정도의 강알칼리성이기 때문에 -100mV 보다 전위가 크면 수산화

철 부동태막에 의하여 부식이 방지되지만 그 이하로 내려갈수록 부동태막이 $HFeO_2$ 음이온으로 변하면서 부식이 발생된다. 전위차 측정에 의한 철근부식 판정기준은 표 5와 같다.

표 5 철근 부식 판정 기준 (ASTM C-876, $Cu/CuSO_4$ 기준전극)

자연전위 E (mV)	부 식 등 급	부 식 확 률 (%)
E > -100	I	0
-100 > E > -200	II	10 % 이하
-200 > E > -350	III	50 % 이하
-350 > E > -500	IV	90 % 이상
-500 > E	V	100 %

전위 측정값은 측정표면의 습분 또는 해당구조물에 연결된 강관의 전기방식설비로부터 방출되는 미주전류(stray current) 등의 영향을 받을 수 있으므로 절대적인 판단기준으로 사용하기는 곤란하며 육안검사, 중성화시험, 염화물량 측정 등의 진단결과와 종합적으로 비교하여 철근의 부식 진행 여부를 판단하여야 한다. 전위분포도는 대표적인 예는 그림 4와 같다.

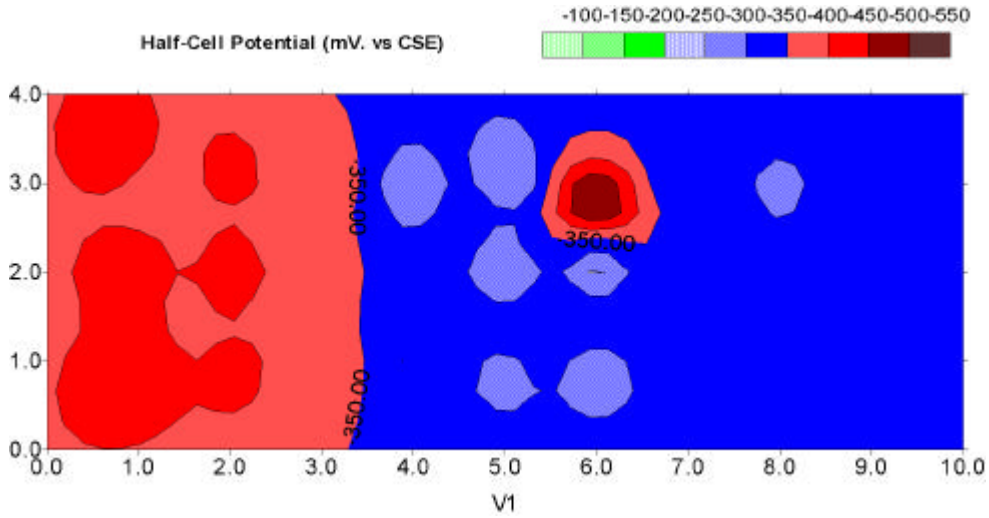


그림 4 전위분포도

나. 케이블[6]

케이블에 대한 노화진단 및 평가는 절연저항시험, 직류누설전류시험 및 유전정접시험 등의 절연진단시험이 수행되었다. 진단 대상 케이블은 1976년도에 설치된 순환수 펌프 및 2차해수 냉각수 펌프에 4.16KV 전원을 공급하는 케이블로 1900년대 초기 고점도유의 유침지를 사용한 벨트지 케이블로서 현재 사용되고 있는 케이블로서는 가장 오래된 형태의 케이블로 그림 5와 같이 3심 케이블에는 각 상을 전기적으로 분리하는 정전차폐층이 없는 구조이다.

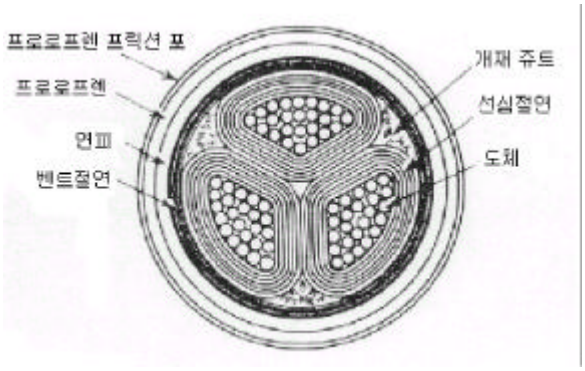


그림 5 케이블 구조

표 6 케이블 규격

기기명	길이 (M)	종 류	규 격	도체저항	절연저항
CWP "A"	324	벨트지케이블	6.6kV	0.0754Ω	208 MΩ
SCSP "B"	310		240㎟	(1km, 20℃)	(20℃)

o 절연진단 시험

절연진단 결과 직류누설전류시험에서 누설전류량이 낮고 방전전류 현상이 나타나지 않았으며, 유전정접시험에서 tan δ값이 0.33 0.47 % 정도로 기준치인 0.5 미만으로 나타났다. 케이블의 절연진단 시험결과를 근거로 판단해 볼 때 현재 매설케이블의 상태는 양호한 것으로 나타났다.

표 7 매설 케이블 절연진단 시험 결과

케이블명		절연저항 (MΩ)	직류 누설전류 시험결과							RC(Ω.F)			정전용량 (μF/km)	tanδ (%) (E/√3)	판 정	비 고
			1분 (μA)	7분 (μA)	P.I	Kick현상/ 방전전류	케이블 길이 (M)	km당 누설 전류 (μA)	불평형률 (%)	R (GΩ)	C(nF)	RC (Ω.F)				
CWPD	R-E	2353	1.7	0.95	1.79	무	270	3.52	15%	4.211	145.2	611.4	0.538	0.40	양 호	24.4℃
	S-E	2222	1.8	1	1.80	무	270	3.70		4	146.5	586	0.543	0.38	양 호	
	T-E	2105	1.9	1.1	1.73	무	270	4.07		3.636	148.1	538.5	0.549	0.37	양 호	
SCSPB	R-E	400	10	8	1.25	무	310	25.81	47%	0.5	162.1	81.05	0.523	0.41	양 호	24.4℃
	S-E	615.4	6.5	4.75	1.37	무	310	15.32		0.842	160	134.7	0.516	0.38	양 호	
	T-E	275.9	14.5	8	1.81	무	310	25.81		0.5	158.1	79.05	0.51	0.33	양 호	

[※ 판정기준(CV 케이블기준) – ① P.I : 1이상 , ② 불평형률 : 200%이하 , ③ RC(Ω.F) : 0.01이상 , ④ tanδ(%) : 1%이하]

다. 토양의 부식성 평가

접근이 불가능한 매설강관에 대해서는 주변 토양의 부식성을 평가하고 그에 따른 대상 기기의 부식가능성을 간접적으로 판단하기 위하여 매설배관 인접 토양의 비저항을 측정하고 토양을 샘플링하여 성분분석을 수행하였다.

매설 강구조물에 대한 부식의 가장 직접적인 지표는 토양의 비저항(resistivity) 값이라고 할 수 있는데 해당발전소의 토양의 비저항 값은 50,000 ohm-cm 이상으로 매설강관 주변은 쇄석층으로 이루어져 있음을 알 수 있으며 이러한 환경은 매설배관에 미치는 직접적인 부식영향력은 적다고 볼 수 있다. 표 8은 토양의 비저항값과 부식성환경의 판단기준을 나타내며 표 9는 토양의 비저항값 측정결과를 보여주고 있다.

표 8 토양의 비저항값과 부식성 환경

Corrosivity	Resistivity (ohm-cm)
부식성이 극히 큼 (extreme)	500 이하
부식성이 매우 큼 (very)	500 2,000
부식성이 큼	2,000 5,000
부식성이 어느정도 있음 (moderate)	5,000 10,000
부식성이 약간 있음 (mild)	10,000 25,000
부식이 비교적 작음 (relatively less)	25,000 50,000
부식성이 거의 없음	50,000 이상

표 9 토양의 비저항 측정 결과(Nilsson-400 4-pin method) 단위: 10K

깊이(cm)	# 1	# 2	# 3	# 4	비 고
50	1.9	8.8	10.0	6.3	일반토양
200	22.0	7.5	13.2	6.3	쇄석
300	18.2	10.0	8.8	6.3	
500	52.8	7.5	7.5	6.3	

주) # 1 : Intake 건물과 바다 사이 토양 # 2 : Intake 건물과 CC Pump Room 사이 토양
3 : 제 1발전소 본관 건물 정면 화단 토양 # 4 : Turbine 건물 측면 소화수 배관 상부 토양

토양의 화학적 부식 영향력을 평가하기 위해서 매설배관을 따라 깊이 1.0 2.4m 위치의 토양을 채취하고 pH, 염소이온 농도, 황산염 농도를 측정하였다. 토양분석 결과 pH는 중성 또는 약알카리성이며, 염소이온 및 황산염 농도는 부식임계농도 미만인 것으로 나타났다. 토양시험결과를 종합하여 볼 때 매설 배관 주변 토양의 부식성이 낮기 때문에 매설배관의 코팅상태가 건전할 경우 배관 부식 위험성은 낮은 것으로 판단된다.

표 10 토양 성분 분석 시험 결과

위 치	채취 깊이	pH	염소이온 농도 (증류수, mg/kg)	황산이온 농도 (증류수, mg/kg)
# 1	1.0 m	7.9	25.4	
	2.2 m	8.4	60.8	60.2 (0.6 m mol/kg)
# 2	1.0 m	8.1	7.30	
	2.5 m	8.4	22.7	62.0 (0.6 m mol/kg)
# 3	1.2 m	7.7	7.99	
	2.4 m	7.5	5.32	28.3 (0.3 m mol/kg)

5. 노화관리 방안

원자력발전소 매설설비의 대부분이 비안전성관련 계통이므로 발전소 운전기간 동안에 법령, 규제요건 등에 의한 의무 검사 사항은 극히 적은 것으로 판단된다. 또한 의무검사 요건에 적용을 받는 매설설비이더라도 접근이 불가능하거나 검사 방법이 없는 경우에는 검사 대상에서 면제되거나 간접적인 검사로 대처하기도 한다. 현재 원자력발전소에서 매설설비에 대해서 수행하는 주기적 검사, 진단, 정비 등은 대부분 사업주 자발적인 노화관리 활동이다. 따라서 규제요건에 적용을 받는

설비를 제외한 여타 매설설비는 손상사례, 노화상태, 매설설비 환경, 정비경험 등을 고려하여 경제성 측면에 우위를 둔 노화관리 프로그램을 수립하여야 한다.

모든 매설설비에 대해서 노화관리 계획을 수립하고 이를 이행하는 것은 노화관리에 투입되는 비용이 많아 비경제적일뿐 아니라, 설비의 접근 가능성, 검사 방법 등을 고려할 때 실제적인 노화관리가 불가능한 경우가 발생하게 된다. 따라서 설비의 중요도, 노화손상사례 등을 고려하여 우선순위가 높은 매설설비에 대해 노화관리를 수행하고 설비중요도가 낮은 설비는 노화관리 대상에서 제외하게 된다. 노화진단 주기는 설비의 노화진행 상태, 접근 가능성 등을 고려하여 5 10 년 주기로 부분적인 샘플링 검사를 수행하고 노화진단 결과에 따라 진단 주기는 신축적으로 조정하는 것이 바람직하다. 원전 가동중검사 규정인 ASME Sec.XI에서는 대부분의 안전성관련설비에 대해서 10년마다 100% 육안검사를 수행할 것을 요구하고 있다. 매설설비는 대부분이 비안전성관련설비인 것을 감안할 때 매설설비의 검사 주기, 범위 등은 ASME Sec.XI 요건보다 훨씬 완화하여 적용하면 될 것으로 판단된다. 매설설비 노화진단 기술 및 방법에 대해서는 규제요건화 되어있지 않으므로 일반적으로 산업계에서 활용되고 있는 기술을 적용하면 된다. 또한 노화진단 기술은 현재에도 C-Scan, intelligent pigging, 초소형 로봇을 이용한 검사기술 등 계속 새로운 기술이 개발되고 있으므로 전통적인 검사 기술과 최신 검사기술을 적절히 적용하면 될 것이다. 직접진단이 곤란한 경우에는 유사조건의 타 매설설비 대체 검사 또는 토양·수질 등의 매설환경 분석과 같은 간접검사 방법을 이용한다.

각종 매설설비의 노화진단 결과는 점검표로 상세히 기록되어야 하며 관련 규정에 따라 노화상태 및 설비 건전성을 평가한다. 평가 시에는 매설설비의 중요도, 사용 빈도, 보수·보강 여부 가능여부, 노화진행 속도, 환경의 영향 등을 종합적으로 고려하여 판단한다. 평가 시에 좀더 정밀한 자료가 요구되는 경우는 추가로 정밀진단을 수행하여 자료를 취득하여 반영한다. 평가는 설비의 설치 상태와 현재 상태, 향후 예측 상태 등을 시간 상관관계로 비교하는 정성적인 평가를 주로 활용하며 특수한 경우에는 공학적 방법을 활용하여 정량적인 평가를 수행할 수도 있다. 평가자는 관련 규정에 의해 자격 부여된 요원이어야 하며 해당설비에 대한 전문지식과 경험이 충분하여야 하며, 필요시에는 외부 전문가의 자문을 받는다.

매설설비 노화진단 결과는 설비의 재료 및 특성과 노화정도에 따라 다음과 같은 3단계로 분류하여 판정할 수 있다.

- Class Ⅰ: 현 상태가 양호하며 별다른 조치 불필요. 현 상태로 유지관리
- Class Ⅱ: 노화/손상이 계속 진행중인 것으로 노화원인 분석 및 적절한 유지관리가 필요하거나 진단주기 조정이 필요
- Class Ⅲ: 노화/손상이 심각하여 근본적인 조치가 필요한 상태

평가자는 평가분류에 따라 매설설비 노화상태를 적절히 분류하고 후속 조치를 권고하여야 한다. 노화상태가 양호한 경우에는 별도의 조치 없이 현상태 대로 유지관리하고 요주의가 필요한 경우에는 차기 점검 주기를 조정하든지 또는 주기적인 노화진단을 권고하여야 한다. 노화 진행 상태가 심각한 경우에는 노화를 지연시키기 위한 적절한 예방대책과 정비 방법 등을 권고하여야 한다.

매설설비의 노화상태 판단과 정비, 노화 관리, 후속노화 진단 등과 같은 후속조치는 발전소 운영자의 최종적인 판단 하에 이루어지는 사항이다. 매설설비 노화진단, 평가 및 권고사항 도출 등은 발전소 운영자가 매설설비에 대한 적절한 판단을 내릴 수 있도록 적절한 정보를 제공하는 활동이므로 일련의 과정들이 체계적으로 정리되어야 하며 최선의 공학적 판단이 수반되어야 한다. 또한 노화진단에서 생성된 도면, 사진 등의 자료에는 설비명, 점검 일자, 점검자, 점검 범위, 노화상태 등이 명확히 기록되어 보존되어야 한다.

본 과제를 통하여 장기 가동중원전의 매설설비 노화관리 실태를 조사한 결과 발전소 나름대로 주기적인 진단, 정비 등의 노화관리 프로그램을 운영하고 있음을 발견하였으며 이러한 노화관리 실태는 미국 원전에서 수행하는 매설설비 노화관리 사례[7]와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 매설설비 노화관리 방안은 현재까지 일관된 지침이나 규정이 수립되어있지 않기 때문에 향후에도 지속적인 개발이 필요한 분야이며 본 연구에서도 노화관리 실태조사, 노화진단 등을 통해 수집한 자료를 바탕으로 해당 발전소에 대한 전반적인 매설설비 노화관리 방안을 수립할 예정이다.

6. 결론

국내 장기 가동중원전의 매설설비에 대해 미국 인허가갱신 규정 및 공학적 판단 기준에 의해 노화관리 우선 대상으로 선정하였으며 고유기능, 사양, 매설환경, 노화/손상 및 정비/교체이력 등의 기초자료를 조사하고 현장 노화진단 및 건전성평가를 수행하였다. 콘크리트 구조물인 경우에는 외관 육안검사, 중성화시험, 염화물 함유량 측정 및 전위차 측정 등을 통하여 노화/손상데이터를 취득하였다. 매설 전선은 직류누설전류시험 및 유정전접시험 등의 절연시험을 수행하였다. 접근 및 굴착이 불가능한 매설강관에 대해서는 부식성 환경조사를 위하여 매설배관에 인접한 토양의 비저항측정 및 화학성분 분석을 수행하였다.

노화진단 결과, 해당 발전소의 매설설비는 장기 사용에 의한 부분적 노화현상이 존재하나 심각한 구조적 기능상의 손상은 발견되지 않았으며 전반적인 구조적 건전성은 양호한 것으로 평가되었다. 또한, 국내원전에서 수행중인 매설설비 노화관리 실태는 미국 원전에서 수행하는 매설설비 노화관리 사례와 큰 차이가 없음을 발견하였다. 현재까지 매설설비 노화관리 방안은 일관된 지침이 수립되어있지 않기 때문에 향후에도 지속적인 개발이 필요한 분야이며 본 연구에서도 노화관리 실태조사, 노화진단 등을 통해 수집한 자료를 바탕으로 해당 발전소에 대한 전반적인 매설설비 노화관리 방안을 개발할 예정이다.

참고문헌

1. 정일석 외, 1996, “원전 수명관리 연구(I)", '96-전력연-단76, TR92NJ10.1996.01, 한국전력공사 전력연구원.
2. 정일석 외, 1999, “원전 수명관리 연구(II)(중간보고서)", '99-전력연-단367, TM97NJ26.1996.360, 한국전력공사 전력연구원.
3. Westinghouse, 1996, “Licensing Renewal Evaluation; Aging Management for Seismic Category 1 Structures”.
4. USNRC, 1996, “Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures”, NUREG-6424.
5. EPRI, 1994, “Class 1 Structure License Renewal Industry Report, Rev. 1", EPRI/DOE/NEI, EPRI TR-103842.
6. 사단법인 전기협동연구회(일본), 1980, “전기협동연구 제36권 제4호(특별고압 CV 케이블 절연측정)”.
7. EPRI, 1999, "Generic License Renewal Technical Issues Summary", EPRI-TR-107521