

### 중수로원전 내환경검증 대상기기 경년열화평가 방안 연구

한성흠, 임우상, 하체웅  
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

#### A study on the TLA method of EQ Equipment for PHWR Plant

Sung-heum Han, Woo-Sang Lim, Che-Wung Ha  
Nuclear Engineering & Technology Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co.

**Abstract** - 내환경검증은 원자력발전소 안전성 관련 계통의 기기가 정상운전 및 설계기준 사고 환경에서 안전기능을 수행할 수 있는지를 검증하는 것이다. 기기검증 평가에 관한 사항은 원자력법시행규칙 '제19조의2(주기적안전성평가의 세부내용)에 따르며 세부평가 대상범위는 안전기능을 확보하기 위한 안전관련 전기기기, 기능이 상실되면 안전관련 기능 수행을 저해하는 비안전관련 기기, 규제지침 Reg Guide 1.97에서 요구하는 사고 후 감시기기 등이며 국내의 경우에는 경수로형 원전 안전심사지침 제3.11에 따른 내환경검증 기계류 기기의 비급속 부품 등이 추가로 해당된다.

#### 1. 서 론

내환경검증 대상기기의 시간제한경년열화평가(TLAA: Time Limited Aging Assessment)의 목적은 교육과학기술부 고시 제 2008-17호 제7조와 10CFR50.49 및 NUREG-1800 등에 따라 기기의 내환경검증 적합성과 수명유지를 위하여 평가하는 것이다. 월성 1호기의 향후 10년 동안 안전운전을 확인하기 위하여 현재 유효한 관련 법령상의 제반 기술기준을 적용하여 2008년부터 현재까지 내환경검증 대상기기의 검증 적정성 확인 및 시간제한 경년열화 평가 하였다. 아울러 현재는 내환경검증 유지관리 방안과 교체대상기기를 도출 중에 있다. 본 연구에서는 검증대상기기의 내환경검증 평가내용 그리고 경년열화 평가방법과 기술기준, 기기검증 재해석 및 검증평가용 데이터 수집방법 등을 제시하였다. 또한 현재 수행중인 미검증 케이블의 내환경 검증시험과 미검증 전동기류의 검증 및 계속사용을 위한 Refurbishment(유지정비를 통한 기기성능개선) 사례를 소개하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 내환경검증 평가

##### 2.1.2 내환경검증 대상기기

냉각재 상실사고, 고에너지배관 파단 또는 냉각재 상실사고 이후의 방사선 조건 등 가혹한(Harsh) 환경의 영향을 받을 수 있는 위치에 설치된 안전성 관련 전기기기는 고유기능 수행여부 입증을 위해 내환경검증이 필요하다. 단수명 전기기기의 경우 주기적으로 교체하기 때문에 경년열화현상이 고유기능에 미치는 영향이 작아 내환경검증을 수행할 필요가 없다. 따라서 기기 내환경검증 평가는 가혹한 환경에 설치된 장수명 전기기기를 대상으로 수행하며 전동밸브 액추에이터, 충전기, 발전기, 전동기, 전동기 제어반, 전기/계측용 케이블, 전기/계측용 터미널 블록, 전송기, 방사선/온도 측정용 엘리먼트, 솔레노이드밸브 및 커넥터 등이 해당된다.[1]

##### 2.1.3 평가내용

내환경검증 수행상태를 평가한 결과 검증 대상기기 목록 및 관리 절차, 기기검증 방법 및 품질보증, 고장이 검증에 미치는 영향분석, 검증기기의 환경조건 감시, 검증 기기의 설치 상태 및 기능, 검증기기의 유지관리 기록에 있어 10CFR50.49의 요건을 충족하고 있음을 확인하였다. 월성 1호기의 전기기기에 대해 시간제한 경년열화 평가방법에 따라 시험, 해석 및 운전경험 등을 이용하여 각 기기별 검증수명을 평가하였다. 수명이 40년을 초과하는 기기 및 케이블에 대해서는 기존 내환경검증 결과의 유효성 분석을 통해 검증수명을 확인하고 있다. 수명이 40년 미만인

기기 및 케이블은 내환경검증 재해석을 수행하여 검증수명을 결정하고 있다. 기존 내환경검증 결과의 유효성 분석 또는 내환경검증 재해석 결과 검증수명이 30년 초과 40년 미만으로 도출된 기기 및 케이블에 대해서는 고유기능 수행여부와 검증수명을 시험을 통해 확인하고 또한 검증수명 연장이 어려운 기기는 검증된 기기로 교체할 예정이다.[1]

##### 2.2 기기 시간제한 경년열화 평가

##### 2.2.1 평가분야

내환경검증기기 시간제한 경년열화평가가 적용되는 분야는 안전성 관련 장수명 전기기기이며, 월성 1호기의 경우 전동밸브 액추에이터, 충전기, 발전기, 전동기, 전동기제어반, 전기 및 계측패널, 정선박스, 전기/계측용 케이블, 전기/계측용 터미널 블록, 전송기, 방사선/온도 측정용 엘리먼트, 솔레노이드밸브 및 커넥터 등이다. 장수명 전기기기에 대해 시간제한 경년열화 평가방법에 따라 검증수명 평가를 수행하였으며, 내환경검증 재해석 방법 및 내환경검증을 위한 데이터 수집방법은 관련요건을 만족하였다.[2]

##### 2.2.2 평가방법

- 평가방법 1 : 기존 기기 내환경검증 결과가 계속운전기간 동안 유효한지의 여부를 판단하기 위해 시험, 해석 및 운전경험을 활용하여 기존 시험 데이터 및 해석결과 등을 평가한다.
- 평가방법 2 : 시험, 해석 및 운전경험 등을 이용하여 기기 내환경검증 재해석을 수행하고 검증수명을 확인한다. 기기 검증수명의 확인을 위한 재해석은 내환경검증 프로그램의 일부로서 수행할 수 있다.
- 평가방법 3 : 향후 10년 운전기간 동안 기기의 고유기능 수행여부 및 검증수명을 확인, 관리하기 위한 내환경검증 관리프로그램을 수립한다. 내환경검증 관리프로그램은 NUREG-1801에 제시된 관리프로그램의 요소들을 포함한다.[2]

##### 2.2.3 기기 내환경검증 재해석

경년열화 현상 재해석은 NUREG-1800 요건을 만족하기 위해 아레니우스 방법을 적용하였다. 아레니우스 방법은 반응률 및 열노화 평가 등에 적합한 모델로서, 방사선 노화평가를 위한 총 누적선량은 정상운전중 연간 방사선 조사선량과 검증 예상년도를 곱한 후 사고선량을 더한 값을 적용하였다.[2]

##### 2.2.4 기기 내환경검증 평가용 데이터 수집

NUREG-1800 요건을 만족하기 위하여 내환경검증 환경온도/방사선 모니터링 장비를 이용하여 기기별 환경조건 데이터를 생산하였고 이를 검증수명 평가에 활용하였다.[2]

##### 2.3 주요기기 내환경검증시험 및 Refurbishment 사례

##### 2.3.1 케이블

월성 1호기 미검증 케이블의 50년 검증수명 확인을 위하여 케이블의 활성화에너지를 먼저 계산하여 가속열화시간을 산정하였고 이를 근거로 설계기준사고(DBE: Design Basis Event) 조건에서의 내환경검증시험 가속열화 시험을 수행 하였다. 그 결과는 표 1과 같다.

<표 1> 시험 케이블 시편

케이블 ID	구경 (mm)	DBE 조건	활성화 에너지	운전 온도(℃)	가속열화 온도(℃)	가속열화 시간(h)	사용 수명(y)
WCG13 C4-A	12.0	LOCA2	1.01	50	126	351.11	40
WCG13 C4-B	12.0	LOCA2	1.01	50	126	438.89	50

내환경검증 시험결과 내환경검증시험 성능요구조건을 모두 만족하였고, 케이블은 정상운전 50℃에서 50년간 사용 후 DBE(LOCA + MSLB)가 발생하여도 건전성을 유지할 수 있음을 확인하였다. 사진 1은 케이블 시험시편의 모습이다.[3]

<사진 1> 케이블 시험 시편



2.3.2 전동기류

저압교류전동기를 제외한 모든 전동기가 대형 고압전동기로서 표 2와 같으며 이들 전동기류의 절연등급 F 권선에 대한 형식시험을 수행하였다. 반폐형 및 전폐형 전동기로 구분하여 내환경검증 시험을 수행하여 월성 1호기의 전폐형 전동기(PHT/Moderator)와 반폐형 전동기(Shutdown Cooling) 권선의 건전성을 입증하였다.

<표 2> 대형고압 전동기류

기 기 명	모터형	절연등급	마력	전압
MAIN MODERATOR PUMP MOTOR	전폐형	F	1000 HP	4160 V
MAIN MODERATOR PUMP PONY MOTOR	전폐형	F	20 HP	460 V
MAIN HEAT TRANSPORT SYSTEM CIRCUIT CIRCULATING PUMP MOTOR	전폐형	F	9000 HP	13800 V
SHUTDOWN COOLING PUMP MOTOR	반폐형	F	300 HP	4160 V
EMERGENCY CORE COOLING PUMP MOTOR	전폐형	F	700 HP	4160 V
LOCAL AIR COOLER MOTOR	전폐형	F	50 HP	460 V

- 시험시편 : 시험용 반폐형/전폐형 전동기 제작
- 시험방법 : 고압전동기형으로 재권선 후 내환경검증 시험

2.3.2.1 반폐형 전동기

반폐형 전동기의 전원 인입부 리드선을 바니쉬(Varnish) 처리로 보강하여 부분적인 내환경검증 형식시험을 사전에 수행하였고 만족스런 결과를 얻었다. 이를 반영하여 반폐형 전동기를 제작하여 내환경검증 시험을 수행하였고 시험에 성공하였다. 사진 2는 전원 인입부 리드선을 절연재로 바니쉬 한 시험시편의 모습이며 사진 3은 형식시험용 반폐형 전동기의 모습이다.[4]

<사진 2> 전원인입 리드선 절연재 바니쉬 시험 시편



<사진 3> 시험용 반폐형 전동기



2.3.2.2 전폐형 전동기

전폐형 고압전동기를 제작하여 축 및 전원 인입부 리드선의 기밀을 보강하고 DBE 시험을 비롯한 내환경 형식시험을 수행하여 만족할 만한 시험 결과를 얻었다. 시험용 전폐형 전동기는 사진 4와 같으며 DBE시험의 상황은 사진 5와 같다.[4]

<사진 4> 시험용 전폐형 전동기



<사진 5> 전폐형 전동기의 DBE 시험



3. 결 론

월성 1호기는 향후 10년 동안의 안전운전을 위하여 원자력법 시행규칙 '제19조의2(주기적안전성평가의 세부내용)' 및 NUREG-1800에서 제시한 방법론에 따라 기기 내환경검증분야의 유지관리체계를 평가 하였다. 아울러 검증대상기기의 시간제한 경년열화 평가 및 케이블, 고압전동기류 등에 대하여 형식시험을 수행하고 있으며 만족할 만한 결과를 얻고 있다. 2009. 12월까지 본 평가를 완료하여 향후 10년 간의 운전기간 동안 내환경검증 측면의 건전성을 확인할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 월성 1호기 PSR 내환경검증평가보고서(2009. 3 원자력발전기술원)
- [2] 월성 1호기 시간제한경년열화 평가보고서(2009. 3 원자력발전기술원)
- [3] 월성 1호기 케이블 형식시험보고서(2009. 3 전력연구원)
- [4] 월성 1호기 고압전동기류 형식시험보고서(2009. 3 기계연구원)