

99 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

국내 가동중 원전의 내환경검증(EQ) 수행방안 고찰
A Study on the Implementation of Environmental Qualification (EQ) in
Domestic Operating Nuclear Power Plants

이채목, 진태은
한국전력기술(주)
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

김종석, 정일석
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자력발전소의 안전기능을 수행하는 전기 및 기계 기기들은 정상운전 뿐만 아니라 설계 기준사고 발생시에도 안전하도록 설계되어야 한다. 미국의 TMI 사고를 전후해서 대두되기 시작한 안전관련 기기의 내환경검증은 사고후 가혹한 환경하에서도 안전관련계통을 구성하는 기기들의 신뢰성을 보장함으로써 원전의 안전성을 확보한다는 차원에서 필수적이라 할 수 있다. 이를 근거로, 국내 가동중 원전의 내환경검증 수행을 고려하여 적용실태 및 현황을 파악하였으며, 실제 내환경검증 수행시 수립해야할 사항들을 검토하였다. 국내 가동중 원전에 내환경검증 수행을 위한 수행절차, 수행업무 및 관리조직구성 방안 등을 제시하였다.

Abstract

The operating Nuclear Power Plants (NPPs) have primary responsibility for the maintaining an acceptable level of nuclear safety. Qualification of equipment important to safety in nuclear power plants ensures its capability to perform designated safety functions under postulated service conditions including harsh accident environments. Especially, environmental qualification (EQ) of electrical and mechanical equipment on NPPs has been continuously stressed since the accident at TMI in the US. This paper focuses on reviewing and assessing the current status of EQ in domestic operating NPPs where EQ has not previously been formally implemented and provides basic concept of EQ. Considering the implementation of EQ in domestic operating NPP, this paper provides the applicable EQ process, consisting of 3 steps - Scope, Establishment and Maintenance.

1. 서론

내환경검증(Environmental Qualification)이란 원전내에서 원전의 안전관련 기기가 설치 수명 기간중, 사고를 포함한 모든 환경조건하에서도 고유의 안전기능을 충분히 수행할 수 있도록 설계 및 제작되었는지 입증/보증하는 과정으로서 온도, 압력, 방사선, 진동, 습도, 화학분사, 먼지, 침수 등의 환경조건에 대한 기기의 검증을 수행하는 것이며, 지진부하에 대한 구조적 건전성, 내압력 건전성 및 운전성에 대한 기기의 검증을 의미하는 내진검증(Seismic Qualification)과 함께 원전의 안전성 확보의 한 방법으로 제시되고 있다.

기기의 내환경검증에 대한 최초의 시도는 1971년 1E급 전기기기의 내환경검증을 위해 IEEE가 제정한 IEEE-323-71에 의해 시작되었고, 이후 IEEE-323-74와 IEEE-344-75의 발행으로 기술적인 개념과 방법이 제시되어 적용되어 왔으나, 1979년 TMI 사고를 계기로 미국 원자력규제 위원회는 모든 원전의 내환경검증에 대한 일련의 조치를 취하고, 1983년 10CFR 50.49¹⁾의 제정과 더불어 Class 1E급 전기기기의 내환경검증 요건이 법규화 되었다. 국내 원전의 경우 건설중이거나 최근에 운전을 시작한 신규발전소는 이러한 규제요건 및 기준에 따라 내환경검증을 수행하기 때문에 문제시되지 않으나, 영광 1,2호기 이전에 건설된 가동중 원전의 경우 내환경검증을 통해 기기의 설계수명 기간동안 안정성이 입증되거나 검증되었는지를 파악하고 내환경검증을 위한 적절한 대책수립 방안을 제시하고자 한다.

2. 가동중 원전의 내환경검증 수행 범규 및 기술기준

우리나라 원전에 대한 인허가 기준이 원산지 기준을 준용하는 방향으로 시행되고 있으므로 프랑스의 기준에 따라 내환경검증 수행된 올진 1,2호기를 제외한 가압경수로 원전의 내환경검증 수행을 위해서는 미국의 기준을 적용할 수 있으나, 이행 시점 및 기준을 그대로 받아들일 수는 없는 실정이다. 미국의 원자력규제 위원회(NRC)는 1974년 IEEE Standard 323, 1981년 NUREG-0588(Rev.1), 1982년 Regulatory Guide 1.89(Rev.1) 및 1983년 10CFR 50.49 법규의 발표를 통해 내환경검증 기준을 법제화하였으나, 1980년 5월 23일 Memorandum & Order CLI-80-21을 통하여 1980년 5월 23일 이전에 운영허가를 받은 발전소는 내환경검증의 기준으로 DOR 지침서(Documents of Record Guideline)를 적용하고, 운영허가 신청중인 발전소는 NUREG-0588을 따를 것을 지정하였다.

가동중 원전에 적용한 DOR 지침서와 건설중인 신규 원전에 적용되는 기준의 가장 큰 차이는, 신규 원전에서 운전될 기기의 내환경검증은 반드시 유형시험 혹은 유형시험과 보충해석으로 수행하여야 하나, 가동중 원전에서 운전되는 기기는 부분적인 시험자료와 보충해석으로도 검증이 허용된다는 점과, 검증환경을 설정함에 있어서 신규 원전의 경우에는 내환경검증을 위한 별도의 사고해석을 요구하지만 가동중 원전의 경우에는 최종 안정성분석 보고서에 수록된 결과를 사용할 수 있다는 점이다.

이미 인허가를 득하고 발전중에 있는 원전에 대하여 개정된 기준을 적용하여 인허가를 다시 받도록 할 수는 없다. 이러한 가동원전에 대한 고려로 미국에서 발표된 DOR 지침서는 인허가 중에 있거나 추후 건설될 발전소에 적용하기 위하여 개발되고 있던 기준을 적용하

지 않고 좀더 완화된 기준을 제공하기 위한 것이라 할 수 있으며, 이러한 관점에서 볼 때 국내 원전에 대하여는, 현 시점에서 가동중인 발전소들은 DOR 지침서에 준하는 기준을 적용하고, 현재 건설중인 발전소에 대하여는 Reg. Guide 1.89를 적용하는 방안은 합리적이라 판단된다.

다시 말하자면, 국내에서 건설중인 신규 원전은 최근의 기술을 적용하기 때문에 별 문제가 없으나, 가동원전의 경우 내환경검증 수행범위, 적용기준, 시행방법 등에 대한 전면적인 검토가 필요하다고 하겠다.

3. 국내 가동중 원전의 내환경검증 적용현황

일반적으로 내환경검증의 수행은 그림 1.과 같이 4개 분야의 상호연계를 통해 이루어지며, 이러한 기본틀을 기본개념으로 이해 함으로써 각 호기 내환경검증 수행현황의 파악이 가능하다. 가동중 원전에 있어서 실제 내환경검증 수행을 가정할때 현황 파악을 위해서는,

- 인허가 및 규제요건
- 기기의 구성 및 위치
- 기기의 구성 및 설치와 관련한 기술기준(Standards)
- 향후 내환경검증 수행을 위해 적용할 관련 기술기준의 검토 등의 내용이 필요하다.

아래의 표 1.은 조사시점인 1992년을 기준으로 당시의 국내 가동중 원전의 전반적인 내환경검증 수행내역을 비교분석한 것으로서, 각 호기 최종 안전성분석 보고서의 내환경검증 관련 부분인 3장 11절에서 서술된 내용을 기초로 규제요건에 따라 적용했는지의 서술여부, 검증관련 규제요건에서 규정하고 있는 발전소내에 보관하여야할 각 안전관련 전기기기의 시험보고서, 점검표, 각종 목록 등을 비치 및 보유하고 있는가 등의 조사²⁾를 통해 작성된 것이다.

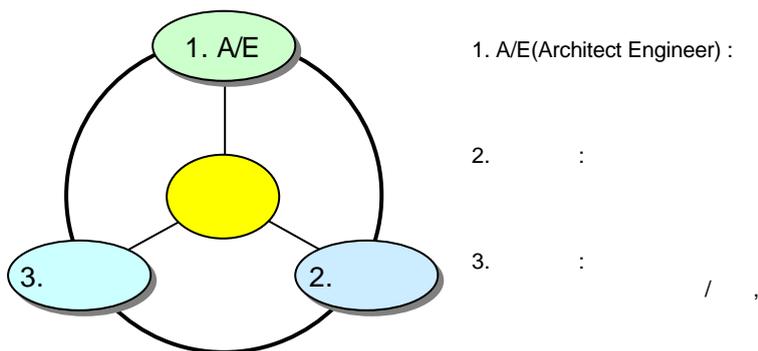


그림 1. 내환경검증 수행을 위한 조직간의 상관관계

표 1. 국내 가동중 원전의 내환경검증 수행현황

발전소 \ 항목	EQ목록	사고환경 분석	시 험 보고서	각 종 점검표	확인기록	검증업무 수행조직	비 고
고리 1	●	●	●	●	●	●	
고리 2	●	○	●	●	●	●	
고리 3, 4	●	◎	◎	●	●	●	
영광 1, 2	●	◎	◎	●	●	●	
울진 1, 2	●	○	●	●	●	●	

주) ◎ : 만족, ○ : 일부 만족, ● : 불만족

4 가동중 원전의 내환경검증 수행방안

내환경검증의 1차적인 역할은 기기가 고유의 안전기능을 수행할 수 있도록 설계되었는지를 입증하는 것이며, 2차적으로는 원전의 수명기간동안 안전하게 운전될 수 있도록 제작, 설치, 운전 및 유지 관리되고, 주기적으로 시험 및 측정되는지를 확인시켜 주는 것이라고 할 수 있다. 내환경검증은 사고시 및/또는 정상운전시 가혹한(Harsh) 환경조건에 위치하게 되는 전기, 전자 및 기계기기를 대상으로 하게되나, 배관, 구조물 및 다른 수동형(Passive) 원전기기 들은 내환경검증 수행대상에서 제외된다. 이들 배관, 구조물 및 수동형 기기들은 설계, 시공, 검사 및 시험이 관련 설계기준 및 규정(Code)에 따라 실시되므로 내환경검증을 별도로 수행하지 않는다.

앞의 표 1.에서 보여진 바와 같이 고리 1, 2호기를 제외한 국내의 가동중 원전들은 비교적 양호한 내환경검증 수준에 접근해 있으며, 고리 2호기의 경우에 있어서도 현재의 내환경검증 수행수준은 미약하나 향후 확대적용을 고려할 때 어느 정도의 기반은 갖추어진 상태라고 볼 수 있다. 그러나, 고리 1호기는 내환경검증 수행실적이 빈약한 상태로써 전반적인 전략 및 방안의 수립이 절대적으로 필요한 실정이다. 따라서, 가동중 원전의 내환경검증 수행을 고려시 기본적으로 검토해야할 요건들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 내환경검증 수행절차

내환경검증의 수행은 수행범위 확정, 내환경검증의 수행 및 내환경검증 관리의 3단계로 구분하여 수행할 수 있다. 수행범위 확정 단계에서는 검증이 요구되는 기기를 선정, 검증될 기기의 현상파악 및 대상기기의 환경조건(정상 및 사고)을 결정하게 되며, 내환경검증 수행 단계에서는 기기의 설계, 요구되는 안전기능 및 운전조건 등에 대해 적절한 내환경검증 방안을 결정하고 이를 수행하는 모든 활동을 포함하게 된다. 또한, 내환경검증의 관리 단계는 기기의 설치 및 보수, 기기의 교체 및 예비품 구매, 발전소 및 기기의 변경, 기기성능의 감시, 기기의 노화 및 손상의 경향분석, 각종 관련 연구자료의 평가, 품질보증, 문서관리, 교육 및 훈련 등의 업무를 포함하게 된다.

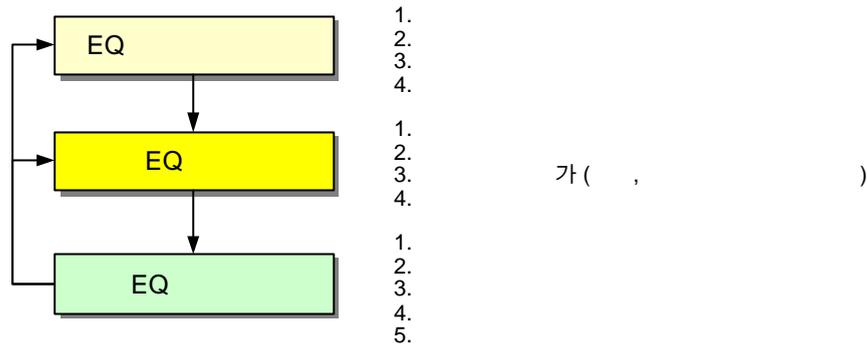


그림 2. 내환경검증 수행 절차

2) 내환경검증 수행범위 확정

고리 1호기를 대상으로 내환경검증을 수행한다고 가정할 경우, 본 단계에서 고려되어야 할 주요 사항들은 다음과 같다.

- 주증기관 파단 및 고에너지관 파단사고에 대한 사고해석
- 안전관련 계통의 분류 및 해석
- 안전관련 기기의 분류 및 목록 작성
- 구역별 환경인자 설정

아래의 그림 3은 앞에서 언급한 주요 사항들 중 내환경검증 수행범위를 확정하는 과정의 일부로서 대상기기를 선정하는 절차를 나타낸 것이다.

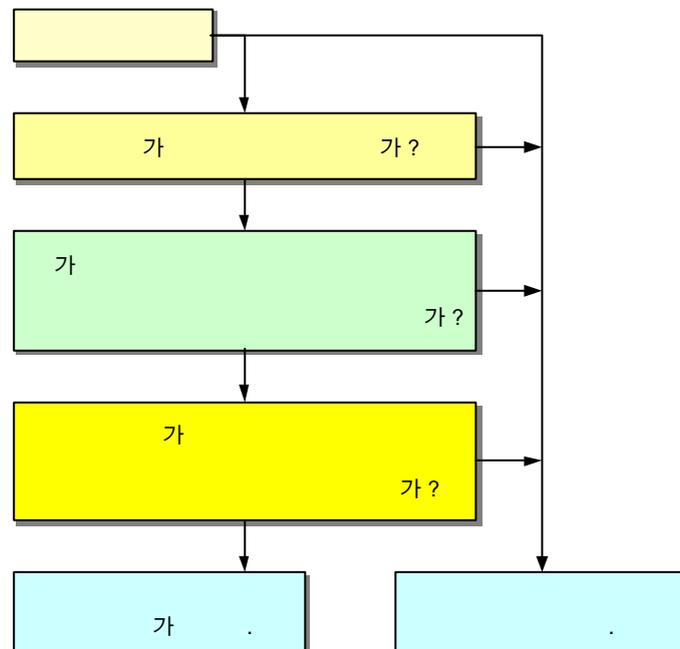


그림 3. 대상기기 선정절차

기기에 영향을 미치는 환경적인 인자들과 이들의 설정기준은 다음의 표 2와 같다.

표 2. 내환경검증과 관련된 환경인자

환경인자	설정기준
온도 및 압력	안전기능을 수행하게 되는 대상기기가 가장 열악한 설계기준 사고 발생 이후 받게되는 시간흐름에 따른 온도 및 압력을 설정
습도	설계기준사고 동안의 대상지역별 습도를 고려
방사선	방사선종류, 기기 설치수명 동안 정상운전으로 받는 방사선량 및 기기가 작동하는 위치에서의 가장 열악한 설계기준사고시의 방사선환경을 기준으로 설정
노화	수명기간동안 기기의 성능에 영향을 주는 모든 노화의 유형을 고려하여 기기의 교체 및 보수 주기를 설정
침수	설계기준 사고시 침수 가능성이 있는 지역에 위치한 기기가 받는 영향을 설정
화학물질 영향	화학물질 성분이 기기 오동작으로 영향을 받을 수 있는 기준설정
동시복합 효과	기기성능에 중대한 영향을 줄 때를 고려하여 설정
여유도	제작편차, 시험장비의 오차 등의 불확실성을 고려한 기준설정

아래의 그림 4.는 설계기준사고를 해석하여 발전소 위치별 최악의 환경조건을 설정하는 절차를 나타낸 것이다.

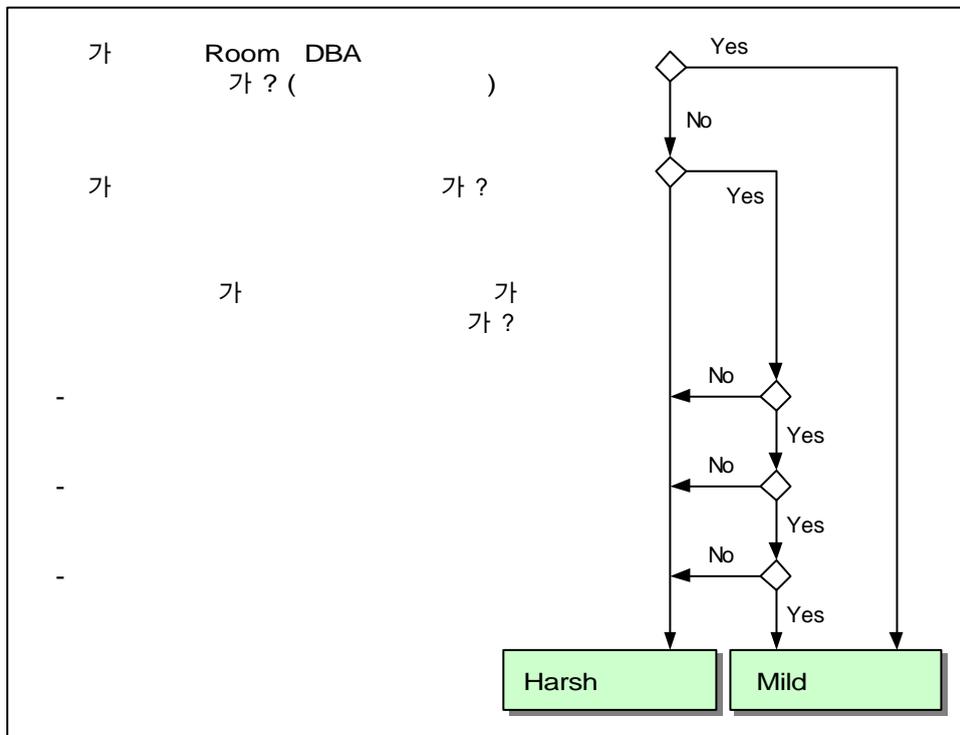


그림 4. 환경인자 설정 절차

3) 내환경검증 수행

내환경검증 수행범위확정 단계에서 선정된 가혹(Harsh)환경에 위치한 대상기기들은 다음의 표 3.에서 제시하는 방안들을 통해 내환경검증을 수행하게된다³⁾.

표 3. 기기별 내환경검증 방안

방 안	내 용
시험 (Test)	가상사고시의 가혹조건을 가정하여 대상기기가 작동됨을 시험 ▶가동중 원전의 내환경검증 수행을 위해서는 유형시험을 실시
분석 (Analyse)	유사기기와 비교 또는 자체 평가를 통해 대상기기가 검증됨을 입증 ▶시험데이터를 필요로 하므로 적절한 방안 선정에 문제가 있음
보호 (Protect)	대상기기가 위치한 환경조건을 변경 함으로써 기기를 보호
재배치(Relocate)	대상기기를 보다 완화된 환경조건으로 이전
변경 (Modify)	검증 요구조건에 따라 기기의 손상을 유발시킬 수 있는 부품을 교체
교체 (Replace)	대상기기 전체를 검증된 새로운 기기로 교체 ▶기기의 건전성 입증에 불가능할 경우 검증된 새로운 기기로 교체

그러나, 위에서 제시한 여러 방안들 중에서 대상기기에 적절한 방안을 선정하기 위해서는 현재 인허가 요건에 합당한지, 향후의 설계변경 등의 요소를 감안할 시 발전소 운전 및 출력향상에 기여할 수 있는지 등에 대한 상세한 검토가 요구된다. 또한, 기존 기기의 내환경검증을 수행할 시, 대상기기가 수명기간동안 받을 수 있는 여러 노화기구들에 대한 평가 및 분석의 수행이 병행되어야 한다.

4) 내환경검증의 관리

발전소 운전중에 기기의 유지 및 보수, 기기의 구매 및 저장, 가상사고해석 내용의 개정, 설계변경 등의 많은 요인들로 인해, 내환경검증이 수행되었다 하더라도 운전중인 기기를 검증요건에 따라 지속적으로 관리하는 작업은 무엇보다도 중요한 일이라고 할 수 있다. 따라서, 내환경검증의 수행 및 수행후 관리를 위해서는 적절한 조직의 구성이 무엇보다 선행되어야 한다. 아래 그림 5.에서와 같이 내환경검증을 중심으로 여러분야의 인력을 필요로 하게 되는데, 독립적으로 구성된 조직 또는, 부서간의 협조체제를 통한 품질보증(QA)과 유지/보수 분야의 인원이 관리하는 형태이든 발전소 형편에 맞는 조직을 구성을 할 수 있다.

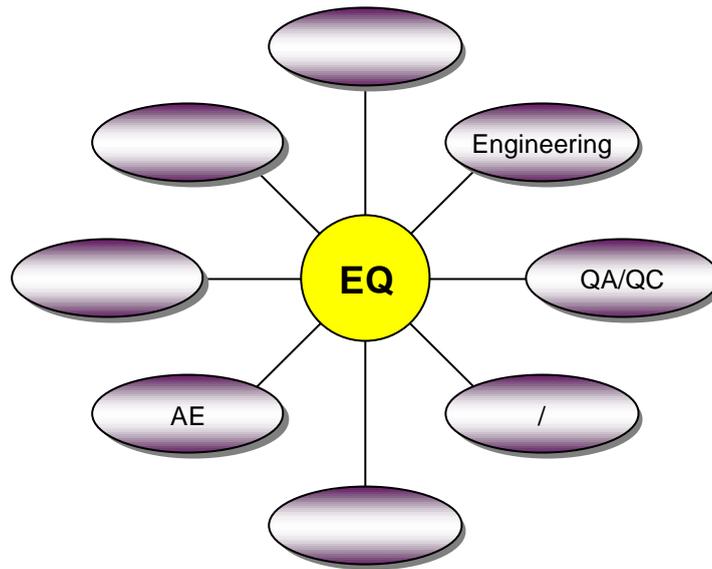


그림 5. 내환경검증 수행 및 관리 조직

5. 결론 및 향후과제

국내 가동중 원전의 경우 고리 1,2호기 이후의 원전은 비교적 만족스러운 수준의 EQ 수행이 이루어 졌다고 볼 수 있으나, 고리 1,2호기는 앞에서 제시한 내용들을 포함하는 전반적인 분야에 걸친 EQ의 수행이 필요한 것으로 판단된다. 내환경검증 시행계획은 각 호기별 시행범위 결정을 통한 적절한 수준으로 수립토록 하며, 고리 1호기와 같이 가동기간이 오래된 원전의 안전관련 기기들에 대한 내환경검증의 수행은 안정된 사용수명의 확정을 통한 안전성 향상 및 발전소의 가동을 향상에도 기여할 수 있다.

고리 1호기를 포함한 국내 가동중 원전들의 안전성 보장을 위해서는 발전소 수명기간동안 내환경검증이 지속적으로 관리되어야 한다. 따라서, 내환경검증을 수행해야 하는 국내의 가동중 원전은 발전소의 특성이 고려된 수행방안 및 수행범위 등을 수립하여야 하며, 그외의 원전들도 만족할 만한 내환경검증 수준 유지를 위해 지속적인 노력을 기울여야 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. "Environmental Qualification of Electric Equipment Important to Safety for NPP", 10CFR 50.49
2. "국내 가동원전 내 환경 현황조사" 최종보고서 (1992), 한국전력공사
3. "Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plant", IAEA, Safety Reports Series No.3 (1998)
4. "내환경검증 지침서", 기술개발최종보고서, 한국전력기술(주) (1995)
5. "Baseline Data Program for Environmental Qualification Condition Monitoring", EPRI TR-107356 (1997)
6. "Nuclear Power Plant License Renewal Environmental Compliance Program Plan Manual", EPRI TR-104291 (1994)