2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

국내 표준 원전 기기 신뢰도 DB 구축을 위한 기기 신뢰도 분석

Component Reliability Analysis for Development of Component Reliability DB of Korean Standard NPPs

최선영, 한상훈, 김승환
한국원자력연구소, 종합안전평가팀
대전시 유성구 덕진동 150, sychoi@kaeri.re.kr

요약

국내 원전의 특성을 반영한 원전 고유 신뢰도 자료는 PSA 및 Risk Informed Application에 필수적이다. 국내 원전 신뢰도 DB를 구축하기 위하여 원자력 중장기 연구개발 사업의 하나인 '원자력 안전성 향상 기술 개발' 중 '신뢰도 기반 안전성 향상 기술 개발'에서는 국내 원전 고유 신뢰도 DB 체제를 구축하는 과제를 수행하고 있다. 이 과제의 목표는 원전 정지 및 기기 신뢰도 DB 체제 구축과 표준원전에 대한 기기 신뢰도 DB 구축이다. 기기 신뢰도 DB를 구축하기 위하여 표준원전 계열인 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 기기 신뢰도 자료를 수집하고 분석하였다. 신뢰도 분석을 위해서 국내 고유 자료의 특성을 고려한 분석방법을 제안하였으며 이로부터 얻은 결과를 일반 신뢰도 자료와 비교분석하였다.

Abstract

The reliability data of Korean NPP that reflects the plant specific characteristics is necessary for PSA and Risk Informed Application. We have performed a project to develop the component reliability DB and calculate the component reliability such as failure rate and unavailability. We have collected the component operation data and failure/repair data of Korean standard NPPs. We have analyzed failure data by developing a data analysis method which incorporates the domestic data situation. And then we have compared the reliability results with the generic data for the foreign NPPs.

1. 서론

확률론적 안전성평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment)는 원자력발전소의 위험도를 정량적으로 계산하기 위하여 발생 가능한 모든 사고 경위 및 사고 현상을 분석하는 기법으로 모든 기기의 고장률(failure rate) 및 이용불능도(unavailability) 등의 신뢰도(reliability) 자료를 요구한다. 국내 원자력발전소 중 고리 3,4 호기 및 영광1,2 호기는 기기 신뢰도 자료를 DB화하여 PSA에

일부 활용하였으며 최근 고리 1호기의 PSA에서는 고리 1호기 신뢰도 자료를 수집/분석하여 PSA에 적용하였다. 그 외의 월성 2,3,4 호기 및 표준 원전 계열 원전에 대한 PSA에서는 일반 신뢰도 자료 (Generic DB)를 사용하였다

일반 신뢰도 자료는 외국 발전소의 데이터를 정리한 자료로 국내 원전의 고유 특성이 반영되어 있지 않아 원전 PSA에 적용하기 위한 각 발전소 고유 신뢰도 DB에 대한 필요성 인식이 증대되었다. 특히 RIR&A (Risk Informed Regulation & Application)이 활성화되면서 각 발전소 고유 신뢰도 데이터의 이용은 필수적인 업무 영역이 되었다.

한국원자력연구소는 1997년부터 원자력 중장기 연구개발 사업의 하나인 '원자력 안전성 향상 기술 개발' 중 '신뢰도 기반 안전성 향상 기술 개발'에서는 국내 원전 고유 신뢰도 DB 체제인 KIND (Korea Information System for Nuclear Reliability Data)를 구축하는 과제를 수행하고 있다. 다음 그림에 보여지듯이 신뢰도 자료 중 핵심이 되는 원전 정지 이력과 기기 신뢰도를 DB화할 수 있는 체제를 구축할 수 있는 기반을 마련하는 것을 일차적인 목표로 하고 있다. 기기 신뢰도 DB 체제는 기기 신뢰도 자료를 DB화할 수 있는 DB구조, 자료 수집/분석 절차서, 관리 및 분석 등의 관련 소프트웨어를 포함한다. 또한 모든 원전에 대한 정지이력을 수집하고 분석하여 DB화하고, 표준원전 계열인 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기에 대해 시범적으로 기기 신뢰도 DB를 구축하는 것을 목표로 하고 있다. [1][2][3].

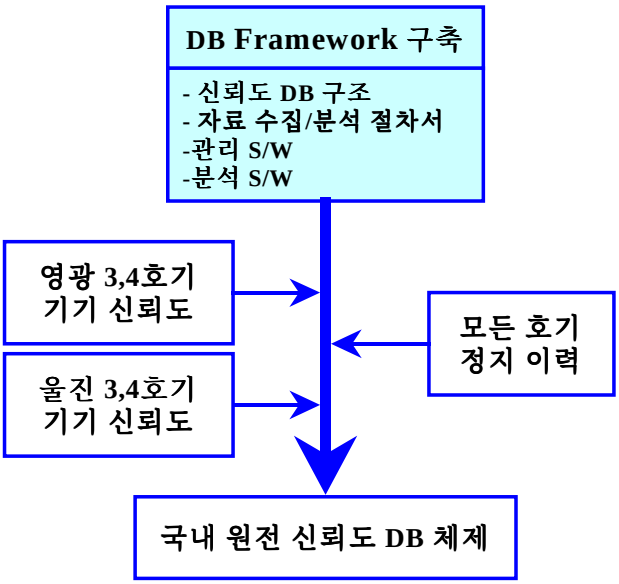

그림 1. KRDB 과제 업무 요약

본 논문의 목적은 한국원자력연구소에서 구축한 KIND 중에서 기기 신뢰도 DB 개요 설명과 국내 고유 자료의 특성을 고려한 기기 신뢰도 분석 과정 및 계산 결과를 정리하는데 있다. 2장에서는 기기 신뢰도 DB의 개요에 대하여 기술하였고 3장은 고장 분석 과정 중 국내 고유 자료 현실에 맞는 분석 방법을 이용한 신뢰도 분석 과정을 집중적으로 다루었으며 신뢰도 분석 결과 및 결론은 4장과 5장에 각각 기술하였다.

2. 기기 신뢰도 DB 개요

기기 신뢰도 자료란 발전소의 위험도를 계산하기 위하여 요구되는 기기의 신뢰도 평가 결과값으로 기기가 얼마나 자주 고장 나서 주어진 기능을 못하는 가를 평가할 수 있는 고장률 데이터와 어느 특정 시점에 기기의 고장이나 보수 등으로 인하여 기기를 이용할 수 없는 확률인 이용불능도 자료가 포함된다.

기기 신뢰도 DB의 기본 목적은 앞에서 설명한 기기의 신뢰도, 즉 고장률 및 이용도를 평가하는데 있다. 이를 이용하여 차후 국내 발전소의 PSA 수행시 기기고장률 값으로 국내 원전의 고유 특성을 반영한 데이터를 제공함으로써 보다 신뢰성 있는 PSA 결과를 얻을 수 있다. 또한 국내 고유 기기 신뢰도 데이터의 사용으로 RIR&A 및 PSR (Periodic Safety Review) 등의 활성화를 기대할 수 있다.

다음 그림 2와 표 1은 각각 신뢰도 DB의 최종 신뢰도 결과물 생성 과정과 이를 위한 필수 입력 자료를 설명하고 있다. 즉 기기의 작동횟수 및 운전시간, 발전소 운전시간에 의한 고장률과 이용불능도를 얻기 위해 필수적으로 입력이 요구되는 항목 선정과 각 항목에 적합한 자료를 수집하기 위한 사전 단계로 기초자료 수집과 데이터 분석 단계를 설명한 그림이다. 이에 대한 자세한 설명은 다음 장에 기술하였다.

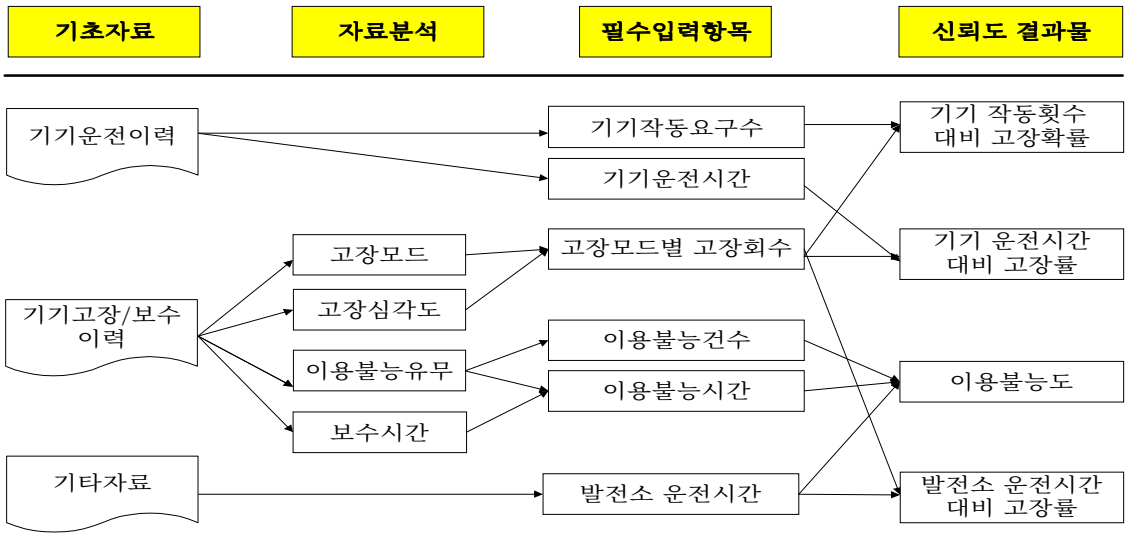

그림 2. 국내 원전 기기 신뢰도 결과물 생성 과정

표 1. 신뢰도 계산을 위한 필수 자료

항목	내용
고장모드별 고장횟수	기기종류별 고장모드별 고장횟수
기기운전시간	보수/고장 자료가 수집된 기간 및 그 기간동안의 기기운전시간. 기기종류 및 고장모드에 따라서 수집된 기간이 사용

항목	내용
	될 경우와 기기의 실제운전시간이 사용될 경우가 있다.
기기작동횟수	펌프, 밸브, 개폐기 등의 경우 실제 작동횟수
총 OOS 시간	기기가 고장 또는 보수로 인하여 out of service 된 시간
발전소운전시간	보수/고장 자료가 수집된 기간동안의 발전소 운전시간
OOS 횟수	OOS 가 발생한 횟수
기기종류 및 사양	각 기기별 기기종류 및 상세 사양 분류

앞에서 언급한 기기 신뢰도 DB로부터 얻는 결과물과 이를 위해 요구되는 필수 현장 자료를 고려하여 다음 그림 3과 같은 신뢰도 DB 구조를 설계하였다. 그림에서 단순 사각형으로 표현한 것은 한 건의 자료 입력을 의미하며 여러 개의 사각형이 중첩되어 있는 형태는 해당 항목에 대해서 여러 개의 자료가 입력될 수 있다는 내용을 의미한다.

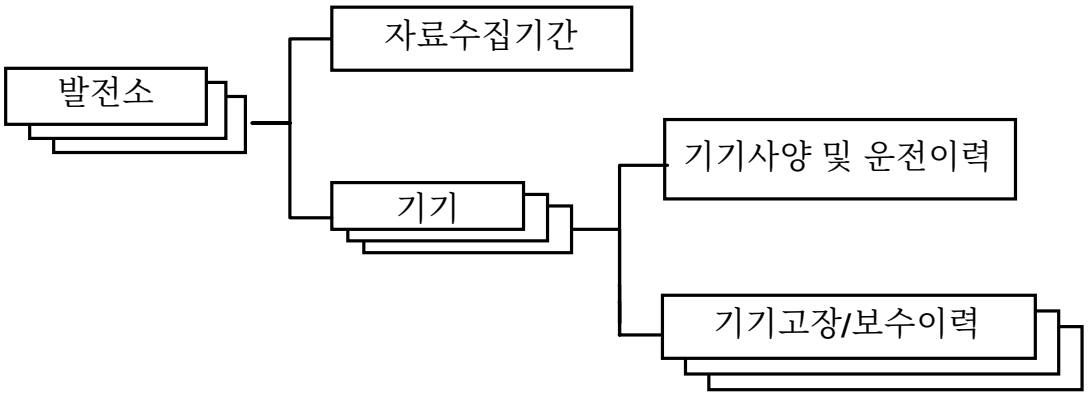

그림 3. 기기 신뢰도 DB 구조

위의 그림 3에서 DB 구조를 트리 형식으로 작성한 의미는 개념적으로 자료의 연결을 나타내기 위함이다. 실제적으로 기기신뢰도 DB는 관계형(relational) DB에 기초하고 있으므로 내부적으로는 모든 자료가 다음과 표 2와 같은 테이블의 형식으로 저장된다. 기기 신뢰도 DB 구조에 대한 자세한 내용은 참고문헌[2]에 기술되어 있다.

표 2. 기기 신뢰도 DB에서 사용되는 테이블

테이블	내용	주요입력항목
자료수집기간	해당 원전에 대한 자료수집기간으로서 어느 기간의 데이터를 수집하였는지에 대한 수집 범위 기간을 저장한다. 해당 원전에 속한 발전소 운전시간 계산 및 일부 기기 운전시간에 사용된다.	호기, 조사시작, 조사완료, 조사기간, 정상운전기간, 정상운전비율

기기사양 및 운전이력	각 기기에 대한 기기사양 및 기기운전정보를 저장하기 위한 테이블로 기기 수만큼 레코드가 있다.	호기, 계통번호, 기기번호, 기기명, 분삭대상기기, 상위기기, 기기종류, 사양1 -6, 관련도면, 운전비율, 월평균작동수
기기고장/보수이력	각 기기에 대해 보수 및 고장이력을 저장하기 위한 테이블로 보수횟수만큼 레코드가 존재한다.	호기, 계통번호, 기기번호, 발전소 운전상태, TR번호, 고장심각도, 고장모드, 고장원인 및 내용, 고장발생일시, 보수시작일시, 보수완료일시, 보수내용, 이용불능시간 등

3. 국내 고유 자료의 특성을 고려한 신뢰도 분석

1) 국내 고유 자료의 특성

고유 기기 고장 자료 및 운전 자료는 각 국가 및 원전에 따라 외국의 일반자료와는 달리 자료 기록 및 관리 면에서 차이를 보인다. 본 논문에서는 피요한 자료를 수집하는 관점에서 국내 자료의 특성을 기술하였다. 먼저 현장에는 기기의 고장/보수 자료를 기록한 여러 형태의 자료원이 있으나 전반적으로 기기의 고장/보수 내용이 실제보다 단순하게 기록되어 있어 이를 이용하여 고장 분석 수행시 어려움이 발생하였다. 예를 들어 기기고장의 정확한 고장모드는 무엇인지, 계통운전에 미치는 영향은 무엇인지 등의 구분이 모호하다. 또한 고장이 발생한 기기의 이용가능여부, 혹은 고장직후에는 이용이 가능하였으나 보수 중에는 이용이 불가능하고 보수가 완료된 후 다시 이용이 가능하였는지에 대한 판단 및 기기의 이용불능시간 계산이 어렵다.

기기의 고장/보수 자료 외에도 기기별 기동횟수 및 운전시간 산출을 위한 자료가 충분히 기록되어 있지 않다. 단지 일부 주요 회전기기의 운전 이력이 기록되어 있으나 주로 정기시험이나 교체운전 주기에 의한 정기 운전 이력만 기록되어 있고 기기의 고장으로 인하여 redundancy용 기기의 대체운전과 같은 비정기 운전 이력은 산발적으로 기록되어 있다.

이와 같은 국내 자료의 현실을 고려하여 신뢰도 계산을 위한 고장자료 분석 방법을 선정하였다. 기기의 운전시간 및 기동횟수 계산을 위해서는 실제 자료원을 참고하여 산출공식을 작성하여 추정하였다. 또한 기기의 고장률 계산시 기기별 사용가능한 자료를 고려하여 적절한 고장률 계산방법을 적용하였으며 이용불능시간 계산시 기기의 이용불능 유형을 분류하여 적용함으로써 이용가능한 자료를 효율적으로 활용하는 방안을 선정하였다.

2) 신뢰도 분석

신뢰도 평가에서 사용되는 기기 신뢰도 자료는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 기기가 얼마나 자주 고장 나서 주어진 기능을 못하는 가이며, 다른 하나는 기기의 작동이 요구되는 시점에서 기

기가 작동을 하지 못하는 가이다. 첫번째 사항은 기기의 고장률과 밀접한 관계를 가지며, 두 번째 사항은 기기의 고장률 및 기기의 이용불능 (OOS: Out Of Service) 시간과 관련이 있다. 즉 기기의 고장이 자주 발생할 수록 고장률은 커지고 기기가 고장이 발생하여 복구되기까지의 시간(OOS 시간)에 따라 고장에 의한 기기의 이용불능도가 좌우된다. 한편 기기가 기능을 상실하지 않더라도 기능저하가 발생하거나 고장징후가 발생할 경우, 또는 예방정비 차원에서 기기에 대한 보수가 수행될 수 있다. 이러한 보수가 많이 행해지거나 또는 보수시간이 매우 길면 그 기기는 작동이 요구되는 시점에서 OOS 상태에 있을 확률이 커진다.

- 고장률: 고장률은 기기의 고장 발생률로 계산 방법에 따라 기기 운전 시간에 의한 고장률, 기기 작동횟수에 의한 고장률 및 발전소 운전 시간에 의한 고장률로 구분하여 각 고장모드별로 적당한 계산방법을 사용하여 고장률을 구할 수 있게 하였다.
  - 발전소 운전시간 대비 고장률 (고장률1): 기기의 누수나 오작동 (spurious operation)과 같이 기기의 운전여부와 관계없이 항상 발생할 수 있는 고장모드의 고장률 계산 시 사용한다.

    = 고장모드별 고장횟수 / 총 발전소 운전시간
  - 기기 운전시간 대비 고장률 (고장률2) : 펌프의 가동중 정지빈도와 같이 기기의 운전 중 발생하는 단위시간당 고장률을 계산할 때 사용한다.

    = 고장모드별 고장횟수 / 총 기기 운전시간
  - 기기 작동횟수 대비 고장확률: 밸브를 10회 열고 닫음을 수행할 경우 몇 번 작동이 되지 않는가, 펌프를 12회 기동한 경우 몇 번 가동이 안 되는 가 등의 자료를 평가할 때 사용되는 특성치이다.

    = 고장모드별 고장횟수 / 총 기기 작동횟수
- 이용불능도: 이용불능도는 주어진 시간에 기기가 고장 및 보수 등의 이유로 인하여 이용할 수 없는 가능성을 뜻한다.

  = 기기별 총 이용불능 (OOS) 시간 / 기기필요시간 (총 발전소 운전시간)

표 3. 기기 고장모드별 적용가능한 고장률 예제

기기종류	고장모드	사용할 고장률	비고
펌프 등의 회전기기	Fails to Run 등과 같이 작동중 Trip 되는 고장모드	고장률2 를 사용	
펌프 등의 회전기기	Fails to Start와 같이 필요시 작동 실패에 대한 고장모드	고장률1 또는 고장확률을 사용	
밸브, circui breaker 등	Fails to Operate 와 같이 필요시 작동 실패에 대한 고장모드	고장률1 또는 고장확률을 사용	고장확률을 산출하지 않았음. 고장률 1을 이용

기타 모든 기기	Spurious Operation, Failure , Plugging, Leakage 등 항상 발생할 수 있는 고장모드	고장률1을 사용	

위의 표 3은 기기의 고장모드별 적용가능한 고장률에 대한 예제를 설명하고 있다. 고장모드 및 고장심각도 분류 예제를 포함한 분석 방법은 참고문헌[1]에 자세하게 기록되어 있으며 본 장에서는 국내 자료의 특성을 고려하여 제안한 기기이용불능 시간 계산과 기기의 운전시간 및 작동횟수 계산에 대해서 기술하였고 분석 결과는 4장에 정리하였다.

➢ **이용불능시간**

기기 신뢰도 분석에서는 기기의 보수시간 대신 OOS 시간이 중요한 자료이다. 그러나 현장 자료로부터 정확한 OOS 시간을 판단하기 위해서는 고장 발생시점과 발견시점, 보수 시작시점 및 완료시점 등의 관계를 파악하는 일이 중요하다. 예를 들어 기기에 고장이 발생하여 이용불능이 되었으나 고장이 바로 발견되지 않는 경우가 있고, 대기상태에 있던 펌프가 고장 나 있더라도 이 펌프를 기동 시키기 전까지는 이 펌프의 고장을 알 수 없다. 또 한가지 고려해야 할 사항은 기기가 고장이 발생한 당시는 기능을 상실하지 않았지만 보수기간 동안에 이용불능 되는 경우도 고려하여야 한다. 이와 같은 여러 상황을 고려하여 본 논문에서는 기기의 OOS 유형을 6종류로 분류하여 각 유형별로 OOS 시간을 계산하였다.

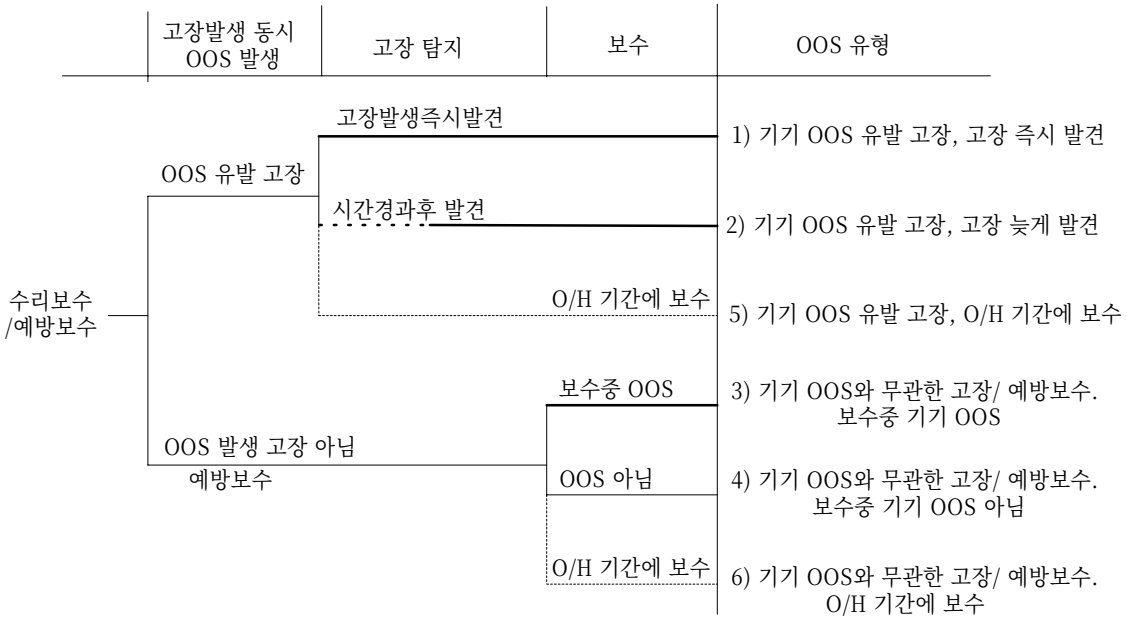

그림 4. 기기의 OOS 유형

그림 4에서 OOS 계산시 주의를 요하는 유형은 기능상실 고장으로 고장 즉시 기기가 이용불능하지만 고장이 즉시 발견되지 않고 시간이 지난 뒤 발견되는, OOS 유형 분류 번호가 2인 자료이다. 이와 같은 경우의 고장은 기기 운전 가능성을 점검하기 위한 시험을 수행하거나 실제 운전을 위

한 작동을 수행하기 전까지는 발견하지 못하여, 언제 고장이 발생하였는지 알 수가 없어서 정확한 OOS시간을 추정하기 쉽지 않다. 이에 대한 개념이 다음 그림 5에 주어져 있다.

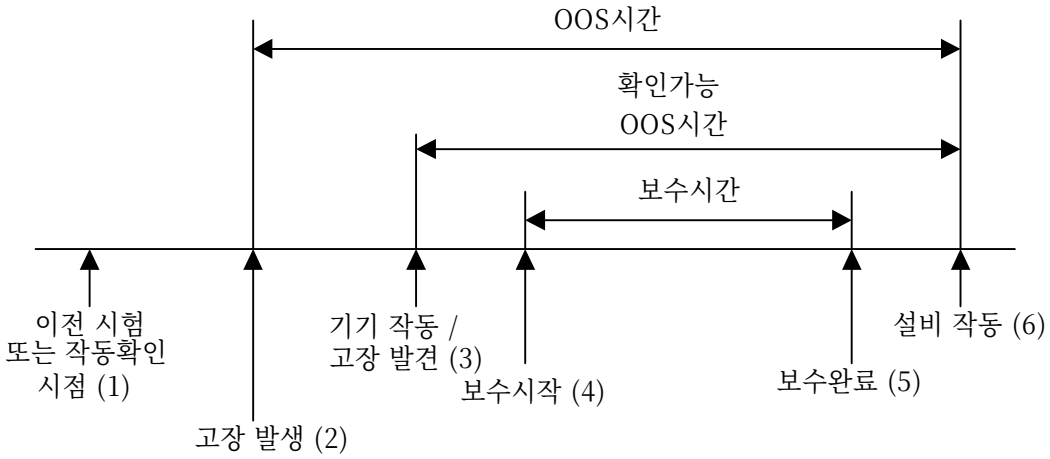

그림 5. 고장이 즉시 발견되지 않는 경우의 OOS시간

그림 5에서와 같이 고장이 즉시 발견되지 않는 기기에 대해서는 과거 작동을 최종적으로 확인한 시점(1)부터 생각하여야 한다. 이 시점 이후에 고장이 발생할 경우(2), 고장이 발견되는 시점은 어떠한 원인이든 기기의 작동이 요구되는 시점(3)일 것이다. 고장이 발견되면 보수팀에 보수를 요청하고 실제 보수가 수행되기 전까지는 시간 차이가 있을 수 있다. 보수가 완료되더라도 기기가 in-service 상태로 복귀하기까지는 시간 차이가 있을 수 있다.

여기서 실제로 기기를 이용할 수 없었던 기간은 고장발생(1)부터 기기가 in-service 된 때(6)까지이다. 그러나 실제적으로 이용가능한 현장 자료원으로부터는 고장발생 시점을 정확히 알 수 없다는 문제점이 있다. 만일 이 기기에 대해 이전 작동이 확인되었던 최후 시점을 알 수 있다면 고장이 발생한 시점은 최후 시점과 고장이 발견된 시점의 평균으로 가정할 수 있다. 그러나 많은 경우 과거의 작동이 확인되었던 최후 시점을 알기가 어렵다. 이러한 경우에는 실제적으로 이용불능시간 자료를 입력할 수 있던 기간은 고장발견 시점(3)부터 기기가 in-service 한 시점(6)까지이다. 이 기간은 확인가능 OOS시간으로 볼 수 있으며 자료 수집 및 입력에 큰 문제가 없는 자료이다. 따라서 기기의 이용불능도 분석에서는 확인가능 이용불능시간을 기초로 하고 기기의 운전 및 보수 정책을 고려하여 실제 이용불능시간을 추정하여야 한다.

➢ 기기 운전시간 및 기동횟수 산출

발전소의 기기 중에는 발전소 상업운전개시일부터 운전을 시작하여 항상 가동하는 기기가 있는 반면, 발전소 정상운전 시에는 대기상태를 유지하고 있다가 사고발생시에 발전소를 안전하게 정지시키기 위하여 가동되는 안전 관련 기기가 있다. 이와 같은 대기계통의 기기는 운전가능성을 확인하기 위하여 정기적으로 시험을 실시한다. 또한 발전소 정상운전시 상시운전이 요구되는 기기의 대부분은 redundancy의 설계원칙에 의해 같은 기능을 수행하는 동일 종류의 기기가 여러 대가

존재하여 정기적으로 번갈아가며 교대운전을 수행한다.

이와 같이 기기별로 계통의 설계 상황이나 운전 상황에 따라 서로 다른 운전시간과 작동횟수의 운전이력을 갖게 된다. 기기 신뢰도 자료를 얻기 위해서 기기의 운전이력은 필수적으로 요구되는 자료이다. 기기의 작동횟수와 운전시간은 다음에 기술하는 세가지 방법에 의해 얻을 수 있다.

- 현장자료로부터 직접 정리하는 방법

  이 방법은 실제 현장의 운전이력 자료를 조사하여 입력하는 방식으로 자료의 신뢰도는 증가하지만 비용 및 시간이 많이 소요되고 일부 주요 기기로 기록 대상이 제한되어 있다.

- 운전절차에 의해 산출공식을 추정하는 방법

  이 방법은 실제 운전이력 관련 자료원을 정리하지 않고 각 기기의 교체운전주기 및 시험주기 등을 이용하여 기동산출공식을 작성하는 방법이다. 즉 운전절차서나 시험절차서, 현장 운전원의 의견을 수렴하여 기기의 운전상태 (상시운전, 교체운전, 대기운전)와 각 시험 및 운전종류를 파악하여 기동횟수와 운전시간을 추정한다. 이 방법은 비용과 시간면에서 효율적이긴 하지만 발전소의 불시정지나 기기고장으로 인한 기기의 불시 운전 및 정지를 다루지 못하는 단점이 있다.

- 운전절차 및 일부 기간의 입력자료를 토대로 산출공식을 추정하는 방법

  이 방법은 위의 두가지 방법의 단점을 보완하기 위한 방법으로 기기별 운전절차에 의하여 산출공식을 작성하는 것 외에 일부 기간 (2주기 혹은 3주기) 동안의 현장자료를 정리하여 정기적인 기동 외에 기기의 고장이나 발전소의 사고 등에 의해 기동한 평균 불시 기동횟수 및 운전시간을 반영하여 산출공식을 작성하는 방법이다.

실제 발전소의 기기 중 교체운전을 하는 일부 회전기기는 교체운전주기나 정기시험주기에 의한 정기 기동횟수 보다도 운전중이던 펌프의 고장으로 대체운전을 수행한 횟수가 더 큰 경우가 발생하였다. 따라서 산출공식을 추정하여 적용하는 방법 중에는 실제 운전 경험자료를 반영한 방법이 보다 현실적임을 알 수 있다.

일부 밸브 등과 같은 기기는 위의 어느 방법도 적용할 수 없는 경우가 존재한다. 현장에는 밸브의 운전이력을 꾸준히 기록한 자료원이 존재하지 않아 총 작동횟수나 운전시간 추정이 불가능하고 운전절차나 시험절차에 대한 설명이 자세하지 않아 정기 기동횟수도 추정이 어렵다. 이와 같은 경우에는 운전시간 및 기동횟수를 구할 수 없어 발전소 운전시간에 의한 고장률만 계산할 수 있다.

다음 표 4는 기기운전이력에 대한 산출공식 추정시 요구되는 항목에 대한 설명이다. 표 4를 이용하여 얻은 주요 회전기기의 운전비율 및 작동횟수 결과는 4장에 기술하였고 산출과정은 참고문헌 [1]에 정리하였다.

표 4. 기기운전이력 산출공식을 위한 항목

항목	내용	산출 항목
호기/계통번호/기기번호	기기 식별번호	
정기 운전 내용	정.주기 시험 및 교체운전 내용 및 각각의 운전/시험 주기 기록	
운전환경	계통별 주요 회전기기 개수 및 발전소 정상운전시 운전되는 회전기기 개수 등 운전 환경 기술	
Plant 운전기간	발전소 호기별 O/H 기간 등의 정지기간을 제외한 실제 가동시간 (일)	
정기운전 특이사항	한 기기에 정기시험 및 교체운전 등 정기운전 종류가 2 이상이며 각 기동일자가 서로 겹치는 경우의 운전 처리 방법에 대한 기술	작동횟수
월 평균 정기기동 횟수	각 정기운전의 주기와 특이사항을 고려하여 월 평균 정기기동횟수 산출	작동횟수
불시정지 횟수	일정 기간 동안의 실제 운전이력을 토대로 기기별 불시정지 횟수 기록	작동횟수
월 평균 비정기 기동횟수	기기별 불시정지 횟수와 계통별 운전 현황을 고려하여 산출	작동횟수
총 월 평균 기동횟수	월 평균 정기기동횟수와 비정기 기동횟수를 합산	작동횟수
평균운전비율	기기별 교체운전 절차서와 운전 환경을 근거로 각 기기별 평균 운전 비율 산출	운전시간
총 정기운전시간	평균운전비율을 적용하여 발전소 전체 운전기간 동안의 기기별 운전시간 산출	운전시간

4. 기기 신뢰도 분석 결과

본 장에서는 3장에서 언급한 분석 방법론을 적용하여 계산한 기기 신뢰도 분석 결과에 대하여 정리하였다. 한국원자력연구소는 영광 3,4호기에 대해서는 상업운전 이후 1998년까지, 울진 3,4호기에 대해서는 상업운전 이후 2000년까지의 자료 중 계획 예방정비 기간을 제외한 정상운전중인 기간의 기기 신뢰도 자료를 수집하고 분석하였다.

분석 대상 계통은 울진 3,4호기 및 영광 5,6호기 PSA (Probabilistic Safety Assessment, 확률론적 안전성 평가) 분석에 포함되는 계통을 일차적으로 포함하였으며, 그 외에 BOP 측에서 몇 개의 계통을 포함하여, 총 24개 계통을 선정하였다. 이 중 33개 기기종류, 22000여 기기를 분석 대상으로 선정하였다. 선정된 계통과 기기종류에 대해 분석 대상 기기 목록을 작성하였으며, 총 6300여건의 기기 보수 및 고장 내역을 수집하였으며, 각 보수건수에 대해 고장모드 및 고장심각도를 분석하였다.

다음 표 5와 6은 각각 국내 표준 원전 호기별 자료수집 대상기간과 분석대상 기기종류별 기기수 및 보수 횟수이다.

표 5. 원전 자료 수집 대상 기간

호기	자료수집 대상기간		조사기간 (일)	원전 정상운전 기간 (일)	정상운전 비율
	조사시작	조사완료			
영광3	1995-04-01	1998-12-31	1371	1176	0.858
영광4	1996-01-01	1998-12-31	1096	980	0.895
울진3	1998-08-11	2000-12-31	874	765	0.875
울진4	2000-01-01	2000-12-31	366	302	0.825

표 6. 기기종류별 기기수 및 보수횟수

분류	기기수	보수횟수	분류	기기수	보수횟수
Pump	350	2253	Heat Exchanger	70	44
Pump -AFW Diesel Pump	4	52	Heater	58	30
Pump -AFW Motor Pump	8	57	Heater -Electric	34	20
Pump -AFW Turbine Pump	4	2	Heater -Steam	24	10
Pump -CCW Pump	20	85	Refrigerator	4	16
Pump -Charging Pump	14	356	Tank	179	90
Pump -Circulating Water Pump	24	361	Check Valve	1488	64
Pump -CS Pump	8	25	Deluge Valve	101	30
Pump -ECW Pump	16	46	Manual Valve	7605	308
Pump -ESW Pump	16	161	Power Operated Valve	2358	821
Pump -HPSI Pump	8	30	Power Operated Valve -Motor	706	251
Pump -LPSI Pump	8	40	Power Operated Valve -Pneumatic	1507	564
Pump -MFW Turbine Pump	8	165	Power Operated Valve -Solenoid	145	6
Pump -TBCCW Pump	8	55	Pressure Regulating Valve	42	30
Pump -TBOCW Pump	10	117	Relief Valve	417	49
ACU	190	106	Sprinkler	112	4
Air Dryer	6	35	Filter	138	352
Chiller	16	173	Filter -Debris Filter	66	168
Compressor	8	76	Filter -Dryer Assembly	72	184
Fan	103	127	Hydrant	90	6
Traveling Screen	32	332	Strainer	309	191
Battery	29	3	Circuit Breaker	5420	152
Battery Charger	34	35	Circuit Breaker -13.8KV SG	92	24
Bus	391	168	Circuit Breaker -C1E 4.16KV	145	17
Diesel Generator	10	220	Circuit Breaker -C1E 480V LC	221	2
Inverter	30	60	Circuit Breaker -C1E 480V MCC	1024	8
Transformer	156	179	Circuit Breaker -N1E 4.16KV	128	2
Controller	209	35	Circuit Breaker -N1E 480V LC	604	24
Controller -Differential Pressure	4	2	Circuit Breaker -N1E 480V MCC	2642	72

분류	기기수	보수횟수	분류	기기수	보수횟수
Controller -etc	6	3	Transmitter	781	207
Controller -Flow	82	10	Transmitter -Differential Pressure	75	48
Controller -Level	32	3	Transmitter -Flow	228	58
Controller -Pressure	41	5	Transmitter -Level	136	61
Controller -Temperature	44	12	Transmitter -Pressure	210	12
Switch	1585	213	Transmitter -Temperature	132	28
Switch -Differential Pressure	248	86	Element	714	29
Switch -Flow	265	9	Element -etc	12	2
Switch -Level	276	17	Element -Flow	343	9
Switch -Pressure	359	17	Element -Temperature	357	18
Switch -Temperature	437	84	Fire Detector	61	94

표 7은 앞에서 기술한 기기 운전이력 산출공식 작성 방법에 의하여 주요 기기의 기동횟수 및 운전시간 계산을 위한 운전비율을 정리하였다.

표 7. 주요 기기 운전비율 및 월평균 작동횟수

기기명	울진3		울진4		영광3		영광4		비고
	운전비율	월평균 작동횟수	운전비율	월평균 작동횟수	운전비율	월평균 작동횟수	운전비율	월평균 작동횟수	
LPSI Pump		0.833		0.833		0.833		0.833	2 대
HPSI Pump		0.833		0.833		0.833		0.833	2 대
CS Pump		0.833		0.833		0.833		0.833	2 대
Spray Additive Pump						0.833		0.833	2 대, 영광 3,4만 정리
Charging Pump	0.5	0.856	0.5	0.92	0.667	1.597	0.667	1.88	울진 3대, 영광 4대
CCW Pump	0.5	0.167	0.5	0.167	0.333	0.333	0.333	0.333	울진 4대, 영광 6대
ESW Pump	0.5	0.167	0.5	0.167	0.5	0.167	0.5	0.167	4 대
FW Pump (Turbine Driven)	1		1		1		1		Turbine Driven Pump 2 대만 정리
FW Booster Pump	1		1		1		1		TD Pump 연계된 2 대만 정리
AFW Pump		0.833		0.833		1.5		1.5	4 대
Circulating Water Pump	0.833	0.167	0.833	0.167	0.8	0.167	0.8	0.167	6 대
ESW Screen Wash Pump		1.08		1.08		1.333		1.333	4 대
TBOCW Pump	0.5	0.167	0.5	0.167	0.667	0.333	0.667	0.333	울진 2대,영광 3대
TBCCW Pump	0.5	0.167	0.5	0.167	0.5	0.167	0.5	0.167	2 대
Diesel Generator	0.00137	1	0.00137	1	0.00137	1	0.00137	1	호기별 2대 + site 별 AAC 1대
Air Compressor	0.5	1.03	0.5	0.68	0.5	0.695	0.5	0.69	2 대

기기명	울진3		울진4		영광3		영광4		비고
	운전 비율	월평균 작동 횟수	운전 비율	월평균 작동 횟수	운전 비율	월평균 작동 횟수	운전 비율	월평균 작동 횟수	
ECW Chiller	0.5	0.87	0.5	0.94	0.5	0.9	0.5	0.943	4 대
ECW Pump	0.5	0.87	0.5	0.94	0.5	0.9	0.5	0.943	4 대

이상 앞에서 기술한 신뢰도 분석 방법에 의하여 산출한 기기 운전이력 및 고장모드, 고장심각도 분석을 이용하여 기기 고장모드별 고장률을 계산하였다. 펌프 등의 회전기기류, 밸브류, 전기류 및 계기류 각각에 대한 고장률 결과를 참고문헌[3]에 자세히 기술하였다. 분석한 기기 신뢰도 결과는 총 218개이며 이 중 76개만이 일반 신뢰도 자료와 비교가 가능하며, 이 값을 일반 신뢰도 자료로 나눈 비율의 분포는 다음 표 8과 같다.

표 8. 기기 신뢰도 결과와 일반 신뢰도 결과 비교 (비율)

비율	분석결과의 수	백분율	누적치
0.0 -0.1	10	13.3	13.3
0.1 -0.2	4	5.3	18.7
0.2 -0.5	12	16.0	34.7
0.5 -1.0	13	17.3	52.0
1.0 -2.0	10	13.3	65.3
2.0 -5.0	16	21.3	86.7
5.0 -10.0	6	8.0	94.7
10.0 -50.0	4	5.3	100.0

위의 표로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- 비율이 0.5 – 2 사이인 것은 모두 23 개, 전체의 31% 정도가 일반신뢰도 자료와 매우 유사하게 나타났다.
- 비율이 0.2 – 5 사이인 것은 모두 51 개, 전체의 68% 정도가 일반신뢰도 자료와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.
- 비율의 0.2 이하인 것은 모두 14 개, 전체의 19%가 일반신뢰도 자료보다 상당히 적게 나타났다. 이중 10 개는 고장이 발견되지 않았다.
- 비율의 절대치가 5 이상인 것은 모두 10 개, 전체의 13%가 일반신뢰도 자료보다 상당히 크게 나타났다.

일반신뢰도 자료와 비교가 가능한 자료들 중 68% 정도는 일반신뢰도 자료와 상당히 유사한 결과를 얻었으며, 32%는 일반신뢰도와 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 표준원전 PSA와 관련된 값을 가지는 자료로는 chiller, diesel generator, ESW pump, charging pump 등이 일반 신뢰도 자료에 비해 고장률이 높은 것으로 나타나고 있다.

한편 기기의 이용불능 시간 계산을 위해서 기기별 OOS 유형을 분류하여 계산하였다. 표 9는 지난 3년간의 영광 3호기 24 계통의 기기별 고장이력으로부터 얻은 고장심각도별 OOS 유형 분류표이다.

표 9. 영광 3호기 기기 고장 이력의 OOS 유형 분류 (기계 및 전자 부품)

OOS 유형	1	2	3	4	5	6
기능상실 고장	296	99	14	10		3
기능저하 고장			139	7		
고장징후발생			594	724		47
예방정비 & 설계개선			91	205		
합계	296	99	838	946		50

앞장에서도 언급한 바와 같이 이용불능 계산시 주의를 요하는 부분은 기기의 OOS를 유발하는 고장이 발생하였지만 고장이 발생 직후 바로 발견되지 않는 경우의 OOS 유형 2인 99개의 자료이다. 이때는 이용가능한 자료원으로부터 확인가능한 OOS 시간을 구하여야 한다. 한편 기능상실을 유발하는 고장이라도 OOS 유형 분류 번호가 3번과 4번, 즉 기능상실 고장이 발생하여도 기기는 이용가능한 경우가 있음을 알 수 있다. 기기의 이용불능 분석시 고장심각도가 기능상실인 고장인 경우에는 분석자가 고장 즉시 OOS라고 분석하는 경우가 많기 때문에 이 또한 주의를 요한다. 예를 들어 어떤 밸브에 기능상실 고장 중 하나인 '닫힘 실패' 고장이 발생하였지만 계통의 기능에 지장을 주지 않으면 이용불능이 아니다. 이와 같은 경우에는 밸브의 보수 동안에 기기가 이용불능했는지만 분석한다.

5. 결론

한국원자력연구소는 원자력 중장기 연구개발 사업의 하나인 '원자력 안전성 향상 기술 개발' 중 '신뢰도 기반 안전성 향상 기술 개발'에서는 국내 원전 고유 신뢰도 DB 체제인 KIND를 구축하는 과제를 수행하고 있다. 신뢰도 자료 중 핵심이 되는 원전 정지 이력과 기기 신뢰도를 DB화할 수 있는 체제를 개발하여 원전 고유 신뢰도 DB를 구축할 수 있는 기반을 마련하는 것을 일차적인 목표로 하고 있다. 또한 모든 원전에 대한 정지이력을 수집하고 분석하여 DB화하고, 표준원전 계열에 대해 시범적으로 기기 신뢰도 DB를 구축하는 것을 목표로 하고 있다.

본 논문에서는 KIND 중에서 기기 신뢰도 DB의 개요 및 기기 신뢰도 계산 과정을 정리하여 기술하였다. 국내 원전의 PSA 수행시 일반 신뢰도 자료 대신 국내 원전의 고유 특성을 반영한 기기 신뢰도 데이터를 제공하고 RIR&A 및 PSR 등에 활용하기 위하여 한국원자력연구소는 기기 신뢰도 DB framework를 개발하고 데이터 수집 및 분석 업무의 표준화를 위한 절차서를 작성하여 타 기관에서 신뢰도 자료를 수집하여도 하나의 통일된 국내 원전 신뢰도 DB로 통합이 가능하도록 하였다.

이와 같은 framework와 절차서를 토대로 표준 원전 기기의 운전이력 및 고장/보수이력 자료를 수집/분석하여 신뢰도 결과를 산출하였다. 신뢰도를 계산하기 위해서 먼저 국내 현장 자료의 특성을 파악하여 국내 고유 자료 환경을 고려한 고장자료 분석법을 제안하였다. 즉 고장률 계산시 이용할 수 있는 자료의 한계를 고려하여 기기운전시간당 고장률, 발전소 운전 시간당 고장률 혹은 기기기동요구수당 고장률 중 기기별로 적용가능한 고장률을 계산하였으며 기기의 기동횟수 및 운전시간과 같은 운전이력 자료를 현장자료로부터 수집하지 않고 기기의 운전 특성에 맞는 산출 규칙을 적용하는 방법을 사용하여 데이터 수집에 소요되는 시간의 절감과 활용의 지속성 등의 효과를 얻을 수 있게 되었다. 한편 기기의 이용불능 시간 계산을 위해서는 주어진 자료를 효율적으로 활용하기 위한 방안으로 기기별 OOS 유형을 분류하여 계산하였다.

이와 같은 방법으로 지금까지 영광 3, 4 호기(상업운전일-1998년) 및 울진 3,4 호기(상업운전일-2000년)의 총 10여년간의 24계통 22000여 기기에 대한 운전이력 및 고장/보수 이력을 수집, 분석하여 250여건의 고장모드별 고장률 및 이용불능도를 계산하였다. 고장률 계산 결과 중 75건의 고장모드 자료를 일반신뢰도 자료와 비교한 결과, 약 68% 정도가 일반신뢰도 결과와 큰 차이를 보이지 않았음을 알 수 있었다.

분석된 표준 원전 기기 신뢰도 자료는 영광 5,6호기 PSA에 민감도 분석의 일환으로 활용되었으며 추후 울진 5,6 호기 PSA 및 Risk-Informed In-Service Test 평가에 활용될 계획이다. 이와 같이 PSA 및 RIR&A 등의 응용분야에 국내 원전 고유 신뢰도 데이터를 제공함으로써 실질적인 응용분야가 활성화 될 것으로 기대된다. 또한 울진 3,4 호기의 경우에는 2000년 이후의 자료를 계속 수집하여 보완할 계획을 갖고 있다.

감사의 글

본 연구 수행 중 현장 자료 수집 및 고장 이력 자료 분석 작업과 관련하여 많은 협조와 자문을 주신 KEPRI, 영광 2발전소 및 울진 2발전소 발전부, 기술공무부, 기계부, 계측제어부 직원 여러분께 감사를 표합니다.

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 중장기사업의 지원으로 수행되었습니다

참고 문헌

[1]최선영 등, “기기 신뢰도 자료 수집 및 분석 절차서 개발”, KAERI/TR-2132/2002, 2002

[2]김승환 등, “국내 원전 기기 신뢰도 DB 체제를 위한 소프트웨어 개발”, KAERI/TR-2130/2002, 2002

[3]한상훈 등, “국내표준원전 기기 신뢰도 분석”, KAERI/TR-2129/2002, 2002