2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

국내 표준 원전 PSA용 기기 신뢰도 자료 분석 결과 정리

Summary of Component Reliability Data for Probabilistic Safety Analysis of Korean Standard Nuclear Power Plant

최선영, 한상훈

한국원자력연구소, 종합안전평가부
대전시 유성구 덕진동 150, sychoi@kaeri.re.kr

요약

한국원자력연구소에서는 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 표준원전 계열인 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기를 대상으로 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하였다. 기기 신뢰도 자료 수집 및 분석 절차서와 기기 신뢰도 분석 소프트웨어를 개발하였으며, 이에 근거하여 기존에 영광 3,4호기에 대해 상업운전부터 1998년까지의 자료 및 울진 3,4호기에 대해 상업운전부터 2000년까지의 기기 고장/보수 자료를 수집/분석하여 기기 신뢰도 자료를 분석한 바 있다. 본 논문에서는 기존의 분석 결과를 갱신하기 위하여 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기에 대해 모두 상업운전부터 2002년까지의 기기 고장/보수 자료를 추가 수집/분석한 후, 베이지안 분석을 거쳐 국내 표준 원전 PSA에서 사용가능한 결과를 제시하였다. 또한 국내 표준 원전의 기기 신뢰도 결과를 일반자료와 비교한 후 국내 고유 특성을 파악하였다.

Abstract

The reliability data of Korean NPP that reflects the plant specific characteristics is necessary for PSA of Korean nuclear power plants. We have performed a study to develop the component reliability DB and S/W for component reliability analysis. Based on the system, we had have collected the component operation data and failure/repair data during plant operation data to 1998/2000 for YGN 3,4/UCN 3,4 respectively. Recently, we have upgraded the database by collecting additional data by 2002 for Korean standard nuclear power plants and performed component reliability analysis and Bayesian analysis again. In this paper, we supply the summary of component reliability data for probabilistic safety analysis of Korean standard nuclear power plant and describe the plant specific characteristics compared to the generic data.

1. 서론

한국원자력연구소(KAERI)에서는 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 표준원전 계열인 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기를 대상으로 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하고 PSA용 기기 신뢰도 자료를 분석하고 있다. 기기 신뢰도 데이터베이스의 목적은 국내 원전의 확률론적 안전성 평가 (PSA, Probabilistic Safety Analysis), RIR&A (Risk Informed Regulation & Application), MR (Maintenance Rule) 및 PSR (Periodic Safety Review) 등에 국내 원전의 고유 특성을 반영한 기기 신뢰도 자료를 활용하기 위해서이다.

기기 신뢰도 자료 수집 분석 업무의 표준화를 위한 방안으로 기기 신뢰도 자료 수집 및 분석 절차서[1] 및 기기 신뢰도 분석 소프트웨어[2]를 개발하였으며, 이에 근거하여 영광 3,4호기에 대해 상업운전부터 1998년까지의 자료와 울진 3,4호기에 대해 상업운전부터 2000년까지의 기기 고장/보수 자료를 수집/분석하여 기기 신뢰도 자료를 분석한 바 있다[3][4].

최근 KAERI는 울진 3,4호기에 대해 2001년부터 2002년까지의 기기 고장/보수 자료를 추가로 수집/분석하였다. 영광 3,4 호기에 대해서는 전체 기기에 대한 작업의뢰서의 내용이 전산으로 입력되어 있는 고장/보수 자료를 입수하였으며, 그 중 밸브에 대한 고장/보수 자료를 추가로 분석하였다. 한국전력기술주식회사(KOPEC)은 1999년부터 2002년까지의 영광 3,4호기의 PSA 대상 기기에 대해 수집/분석하였으며 한국원자력연구소는 한국수력원자력주식회사(KHNP)의 협조를 받아 이를 입수하여 분석에 사용하였다[5].

본 논문의 목적은 ①국내 표준 원전의 2002년까지의 기기 고장/보수 자료를 포함하여 기기 신뢰도 자료를 분석한 내용을 기술하고 ②표준 원전의 PSA용 신뢰도 자료를 도출한 결과를 소개하고 ③국내 기기 신뢰도 결과와 일반자료(generic data)의 비교를 통해서 국내 고유 특성을 파악하기 위함이다.

2. 표준 원전의 신뢰도 자료 수집 및 분석

2.1. 기기 고장 및 보수 자료 수집/분석 현황 및 수집 기간

다음 표 1은 기기 신뢰도 데이터베이스에 입력되어 있는 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 기기 고장/보수 자료의 수집 및 분석 현황을 보여주고 있다.

표 1. 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기에 대한 기기 고장/보수 자료 수집

호기	자료수집 기간	분석 기관	수집/분석 대상	고장분석범위
울진 3,4호기	상업운전 - 2002.12.31	KAERI	전체 분석대상기기 고장자료	기능상실, 기능저하, 고장징후 발생의 모든 고장에 대해 분석
영광 3,4호기	상업운전 - 1998.12.31	KAERI	전체 분석대상기기 고장자료	기능상실, 기능저하, 고장징후 발생의 모든 고장에 대해 분석
	1999.1.1 - 2002.12.31	KOPEC	PSA 대상기기 고장자료	일부 기능상실 및 기능저하 고장에 대해서 분석
	1999.1.1 - 2002.12.31	KAERI	밸브에 대해 KOPEC에서 분석한 자료를 제외한 고장자료 수집 및 추가 분석	기능상실, 기능저하, 고장징후 발생의 모든 고장에 대해 분석

자료 수집 대상 기간은 전체적으로 상업운전부터 2002년까지이며, 이 중 계획예방정비 동안의 자료는 분석에서 제외하였다. 이를 반영한 자료 수집 대상 기간 및 이 기간 동안의 발전소 정상운전 기간은 다음 표 2와 같다.

표 2. 자료 수집 대상 기간

호기	조사시작	조사완료	조사기간 (년)
YGN-3	1995-4-1	2002-12-31	7.75
YGN-4	1996-1-1	2002-12-31	7
UCN-3	1998-8-11	2002-12-31	4.39
UCN-4	2000-1-1	2002-12-31	3

기기 고장 및 보수와 관련된 자료를 수집하기 위하여 다음과 같은 현장의 문서를 참조하였다.

- ✓ 작업의뢰서 목록 : KHNP의 협조 및 지원을 받아 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 작업의뢰서(TR : Trouble Report)를 DB 형태로 입수하였다. TR DB는 초기에는 Excel 형태로, 이후에는 PUMAS/N-II, PUMAS/N-III로부터 DB를 입수하였다.
- ✓ TR 원본 : 분석 대상계통에 대해 TR 원본을 조사하여 상세한 고장 내용, 보수 내용, 보수시간 등의 정보를 찾아 기기 보수/고장 내용에 추가하였다. 특히 TR 원본에는 많은 경우 '정비점검검사표'가 첨부되어 있다. 정비점검검사표는 기기 보수 및 고장에 대해 상세한 내용이 포함되어 있어 이로부터 많은 정보를 입수하여 정리하였다.
- ✓ 발전과장일지 : TR 내용을 보고 주요한 기기의 고장 및 보수에 대해서는 발전과장일지에 기록된 내용을 조사하여 기기 보수/고장 내용에 추가하였다. 주요 기기에 대해서는 발전과장일지에 기기의 운전 가능성에 대한 정보가 기술되어 있다.

조사한 내용을 토대로 다음과 같이 분석을 수행하였다.

- ✓ 분석 대상 계통을 선정하여 이 계통에 포함되는 보수 및 고장 내용을 점검하였다. 계통번호 및 기기번호 등이 적절히 주어졌는지 확인하였다.
- ✓ 기기경계를 영광 5,6호기 PSA에 기초하여 정의하였고 이에 따라 필요하다면 TR에 주어진 기기번호를 수정하였다.
- ✓ 하나의 보수/고장이 여러 개의 TR로 분리되어 발행되는 경우가 있다. 이러한 경우는 이 TR 들을 하나의 보수/고장으로 처리하여 통합하였다.
- ✓ 하나의 TR 이 여러 기기의 보수/고장 내용을 포함하고 있는 경우가 있다. 이 중 OOS 에 해당되거나, 기기의 고장(기능저하 이상)에 해당되는 경우는 모두 기기별로 분리하였다.

이와 같이 각 고장 및 보수 이력에 대한 정리 및 추가내용 보완을 수행 한 후, 고장분석을 수행하였다. 고장분석은 각각의 고장이력으로부터 고장모드 및 고장심각도 등을 결정하는 작업으로 주요 기기의 고장은 현장 전문가의 검토를 거쳐 의견을 반영하여 수행되었다.

2.2. 분석 대상 계통 및 기기

KAERI에서 분석한 신뢰도 자료의 분석 대상 계통 및 기기는 PSA 대상 계통 및 다른 계통 중 일부를 시범적으로 포함하고 있다. 울진3,4 호기는 상업운전 이후 2002년까지, 영광 3,4 호기는 상업운전 이후 1998년까지의 자료가 수집, 분석되었다. 분석 대상 계통은 다음 표 3과 같이 24개 계통을 선정하였다. 한편, KOPEC으로부터 입수한 영광 3,4 호기 1999년 이후 2002년까지의 자료는 PSA대상 기기만 분석이 수행되었다.

표 3. 분석 대상 계통

계통 코드	계통명	계통 코드	계통명
SI	Safety Injection/Shutdown Cooling	WT*	Turbine BLDG Closed Cooling Water
CS	Containment Spray	DG	Class 1E Diesel Generator
CV	Chemical & Volume Control System	IA	Instrument Air
SD	Steam Generator Blowdown	VD	D/G Room HVAC
CC	Component Cooling Water	VH	Intake Structure/Pump House HVAC
SX	Essential Service Water	VY	ECCS Equip. Room HVAC
MS	Main Steam	WO	Essential Chilled Water
FW	Feed Water	FP	Fire Protection
AF	Aux. Feed Water	MP	Main Power System
CW*	Circulating Water	AP	Auxiliary Power System
SW*	Travelling Screen & Screen Wash	DC	DC Distribution
WH*	Turbine BLDG Open Cooling Water	IP	I&C Power System

* PSA 대상 계통이 아님

표 4. 분석 대상 기기종류

대분류	기기종류	대분류	기기종류
기계	ACU	기계	Air Dryer
기계	Chiller	기계	Compressor
기계	Diesel Generator	기계	Fan
기계	Filter (Debris Filter, Dryer Assembly)	기계	Strainer
기계*	Traveling Screen		
밸브	Check Valve	밸브	Manual Valve
밸브	Motor Operated Valve	밸브	Pneumatic Operated Valve
밸브	Solenoid Operated Valve		
펌프	Pump (AFW Diesel Pump, AFW Motor Pump, AFW Turbine Pump, CCW Pump, Charging Pump, CS Pump, ECW Pump, ESW Pump, HPSI Pump, LPSI Pump,	펌프*	Pump (Circulating Water Pump, MFW Turbine Pump, TBCCW Pump, TBOCW Pump)
전기	Battery	전기	Battery Charger
전기	Bus	전기	Circuit Breaker
전기	Inverter	전기	Transformer
계측	Element (Flow, Temperature, Etc)	계측	Switch (Differential Pressure, Flow, Level, Pressure, Temperature)
계측	Transmitter (Differential Pressure, Flow, Level, Pressure, Temperature)		

* PSA 대상 기기 아님

표 3에서 기술한 계통에 포함된 기기들 중 기기 신뢰도 분석이 수행된 분석 대상 기기종류는 표 4와 같다. 다만 I&C 기기들은 영광 3,4호기 상업운전부터 1998년까지에 대해서만 분석하였다. 표 4에서 traveling screen과 TBOCW/TBCCW 펌프와 같이 일부 기기는 PSA 대상 기기는 아니다. 그 밖의 기기 중 충전펌프 등과 같이 일부 기기는 모두 PSA 대상 기기인 반면, 밸브 등과 같은 기기는 일부만 PSA 대상기기이다.

2.3. 주요 기기의 운전시간 및 작동 횟수 산출

기기 운전시간은 펌프 등 회전기기의 Fails to Run 고장모드의 고장률 계산에 필요하며, 기기 작동횟수는 펌프의 Fails to Start, 밸브의 Fails to Operate 고장모드의 고장확률 계산에 필요하다. 본 연구에서는 PSA 대상 기기 중 주요 기기에 대해서만 기기 운전시간 및 작동횟수가 정리되었다. 기기의 운전시간은 2002년 발간된 국내 표준원전 기기 신뢰도 분석[3]에서 정리된 자료를 이용하였다. 2002년도의 보고서에서는 PSA 대상 펌프에 대해서만 기기의 작동횟수가 정리되었으나[3], 본 연구에서는 PSA 대상 중 주요 밸브까지 확장하여 기기의 작동횟수를 정리하였다. 표 5는 울진 3,4 호기 PSA 대상 기기에 대한 운전시간 및 작동횟수 산출 예를 보여주고 있다.

표 5. 울진 3,4 호기 기기 작동횟수 산출 예제

기기번호	설명	작동 주기	주기당 작동수	연평균 정기 작동수	비정기 작동수	월평균 작동수	시험내용 설명 및 참고 문헌
3451CV-V0305	RWT Disch. Line Cehck Valve CH-305	3개월	3	12		1	3개월마다 HPSI, LPSI, CS pp 시험시 작동됨 정발-1 (Hpsi), 정발-2 (Lpsi), 정발-21 (Cs)
3441M-PP02A	HPSI PUMP-1	3개월	1	4		0.333	정기-발-01에 의해miniflow line으로 시험시 작동
3441SI-V0675	Contt' Sump Iso. MOV SI-675	3개월	1	4		0.333	정기-발-34 붙임 14.1에 의해 전행정 시험
3633M-PP01A	Essential Chilled Water Pump	2개월	1	6	4.9	0.908	펌프 운전가능성 시험 (정발-49, 3개월, 펌프 정지/기동chiller 정지/기동, CV 작동, CCW Iso MV 열림/닫힘 확인) 주기교체운전 (주기-39, 1개월 운전/1개월 정지) 현장에서는 주기-39로 정발-49 대치

3. 기기 신뢰도 분석

본 장에서는 수집 및 고장분석이 완료된 기기의 보수 및 고장 이력으로부터 기기종류별 신뢰도 분석 수행에 대하여 기술하고 있다. 먼저 기기종류별로 고장횟수 및 운전시간/작동횟수를 정리한다. 이 자료만으로도 단순하게 최우추정법에 의해 고장횟수를 운전시간 또는 작동횟수로 나누어 기기의 고유 신뢰도 자료를 산출할 수 있으나, 본 연구에서는 영광 5,6호기 PSA에서 사용된 자료를 사전(prior)분포로 사용하여 베이지안(Bayesian) 분석을 수행하였다.

다음 그림 1은 이와 같은 신뢰도 분석 절차를 나타낸 것이다. 베이지안 분석 결과로 계산된 사후(posterior) 분포가 최종 신뢰도 자료로 사용된다.

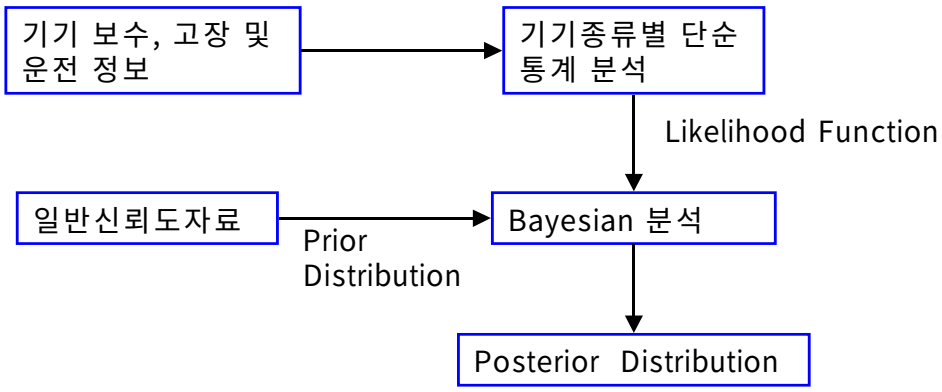

그림 1. 기기 신뢰도 분석 방법

3.1. 고장률 및 고장확률 계산 방법

기기종류별로 고장횟수 및 운전시간 또는 작동횟수 등의 정보를 이용하여 신뢰도 값을 계산한다. 신뢰도 값은 고장유형에 따라 고장률1, 고장률2, 고장확률의 3가지 유형으로 계산되며, 고장횟수를 각기 원전운전시간, 기기의 실제 운전시간, 작동횟수로 나누는 것으로 계산된다.

고장횟수는 고장모드별로 다르게 계산된다. 기기의 기능상실에 해당하는 고장모드에 대해서는 기본적으로 기능상실은 모두 고장으로 처리하였으며, 기능저하에 대해서는 20%를 고장으로 가정하였다. 기능저하 자체는 기기의 기능상실은 아니나 기기의 기능상실 직전의 고장으로서 기능저하 사건 중에는 시간이 지나면 곧 기기의 기능상실까지 진행할 수 있는 것이 있으며, 기능상실된 사건을 자료의 불충분으로 기능저하로 분류하는 경우도 있을 수 있다. 이러한 불확실성을 감안하여 기능저하의 20% 는 기능상실에 해당한다는 가정을 하여 고장횟수를 계산하였다. 기기의 주요 기능상실이 아닌 고장모드(Pump의 External Leakage, Valve의 External, Internal Leakage 등의 고장모드)에 대해서는 기능상실, 기능저하, 고장징후발생 모두를 고장횟수로 계산하였다. 이러한 고장모드에 대해서는 고장률이 기기의 기능상실을 나타내는 것은 아니며, 단지 이러한 고장모드가 발생하는 비율만을 나타내는 것이다.

- ✓ 기능상실 고장모드 : 고장횟수 = 기능상실횟수 + 기능저하횟수 * 0.2
- ✓ 기능상실이 아닌 고장모드 : 고장횟수 = 기능상실횟수 + 기능저하횟수 + 고장징후발생횟수

기기 신뢰도 분석에서는 다음과 같은 3가지 종류의 고장률을 분석한다.

- ✓ 고장률1 /h = 고장횟수 / Plant 운전시간
- ✓ 고장률2 /h = 고장횟수 / 기기의 실제 작동시간
- ✓ 고장확률 = 고장횟수 / 기기의 작동횟수

3.2. 기기 신뢰도 분석

수집된 자료를 이용하여 기기 신뢰도 분석을 수행하였다. 수집된 자료의 분석기관이 KAERI와 KOPEC이고 분석 대상 기기의 범위 또한 서로 달라서 다음과 같이 자료를 분류하여 다음 표 6의

분류 방식에 의해 신뢰도 분석을 수행하였다.

표 6. 자료에 의해 분류한 기기 신뢰도 분석 사례

Case	비고	Case	비고
Case 1	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료 분석된 것 (전체 분석 대상 기기)	Case 1G	일반신뢰도 자료 사용. 작동횟수를 산출하지 않음
Case 2	울진 3,4호기는 2002년까지, 영광 3,4호기는 1998년까지만 자료 분석된 것 (전체 분석 대상 기기)	Case 2G	일반신뢰도 자료 사용. 작동횟수를 산출하지 않음
Case 3	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료 분석된 것 (PSA 대상 기기)	Case 3D	PSA 대상 기기 중 작동횟수 산출이 가능한 기기에 대해서만 작동시 고장확률 평가
		Case 3G	일반신뢰도 자료 사용. 작동횟수를 산출하지 않음
Case 4	영광에 대해 1998년까지만 자료 분석된 것 (I&C 기기)	Case 4G	일반신뢰도 자료 사용. 작동횟수를 산출하지 않음
Case 5	Data를 구하지 못하는 경우		
Case 6	실제 기기 운전 시간이 필요한 경우, 운전시간을 산출하여 사용. Pump만 해당		

울진 3,4 호기의 경우엔 2002년까지의 모든 수집 자료 중 분석대상기기 관련 고장자료의 분석이 완료된 상태이며, 영광 3,4 호기는 1998년까지는 모든 분석기기에 대한 고장분석이 완료된 반면 (Case 2), 1999년 이후부터 2002년 자료는 일부는 PSA대상기기만(Case 3), 일부는 전체분석기기의 고장자료분석이 수행되었으므로(Case 1) 이를 반영하기 위함이다.

I&C 기기의 경우에는 1998년까지의 영광 자료만 고장분석이 수행되었기 때문에 Case 4로 분류하였으며, Case 1G, 2G, 3G 및 4G는 일부기기의 작동실패 고장모드의 경우, 기기 작동횟수 산출이 어려워 고장확률 계산이 불가능한 경우를 표시한 것이다.

한편, Case 5는 안전주입펌프, 보조급수펌프 등과 같이 대기상태를 유지하는 펌프의 경우, 정기시험에 의한 운전시간이 10분이 안되어 기기 작동횟수 산출은 가능하지만 운전시간 산출이 어렵고 시험 중 발생한 고장은 기동실패 고장으로 간주하기 때문에 운전실패 고장 자료는 얻을 수 없는 상태이다. Case 6은 대기계통이 아닌 실제 기기 운전시간 산출이 가능한 상시운전 계통의 펌프에 해당되는 분류이다.

3.3. 베이지안 분석

기기 신뢰도 분석에서 동일 기기종류가 많은 경우, 10년간의 자료는 충분할 수 있으나 기기종류가 적은 경우에는 아직까지 충분한 신뢰도 자료가 없는 경우가 발생한다. 이와 같이 자료가 적은 경우에는 두 가지 극단적인 결과를 낳을 수 있다. 하나는 고장횟수가 없어 고장률이 0인 경우이며, 다른 하나는 한 두번의 고장이 발생하였으나 운전시간이 짧아 고장률이 비정상적으로 크게 분석되는 경우이다.

Bayesian 분석은 이와 같이 특정 발전소에서 구해진 자료가 불충분할 경우에, 외국 또는 다른 발전소의 신뢰도 자료와 특정 발전소의 신뢰도 자료의 정보를 결합하여 사용하는 방법 중 하나이다. Bayesian 분석 식은 다음과 같이 주어진다.

$$f(\lambda \mid E) = \frac{f(\lambda)L(E \mid \lambda)}{\int_0^\infty f(\lambda)L(E \mid \lambda)d\lambda}$$

여기서 E는 현재 주어진 관찰치(observation)으로 고장분석이 완료된 자료로부터 계산된 고장률 및 고장확률을 의미하며, λ는 모수(parameter)로 최종적으로 예측하고자 하는 고장률 맞 고장확률이다. $f(\lambda|E)$는 현재 알고있는 관찰치 E로부터 베이지안 방법 적용 후 얻어진 모수의 확률분포인 사후분포이며, $L(E|\lambda)$는 주어진 λ 에 대해 특정한 사건 E가 발생될 확률분포로서 Likehood 함수로도 불리우며 실제 발생한 이력이 입력된다. $f(\lambda)$ 는 일반자료(generic data) 또는 전문가 판단에 의해 예측된 모수에 대한 확률분포로서 사전분포라고도 부른다.

본 연구에서 베이지안 분석은 본 연구소에서 개발된 BURD 전산 소프트웨어로[6] 수행되었다. 베이지안 분석에서는 영광 5,6호기 PSA에 사용된 신뢰도 자료를 사전분포로 사용하고 단순 통계분석 자료를 Likehood로 이용하여 분석을 수행하고, 계산된 결과인 사후분포를 결과물로 활용한다.

4. 기기 신뢰도 분석 결과

본 장에서는 3장에서 기술 한 절차에 의해 분석한 결과 중, 국내 표준 원전 기기 고장 자료로부터 계산한 최우추정법에 의한 신뢰도 값과 일반자료와의 비교 결과와 국내 고유 신뢰도 결과값을 다시 베이지안 분석을 수행한 후 도출한 표준 원전 PSA용 신뢰도 자료를 기술하고 있다.

4.1. 최우추정법에 의한 신뢰도 결과와 일반자료의 비교

다음 표 7은 기기종류별로 각 고장모드에 대해 최우추정법에 의한 신뢰도 결과 정리와 일반자료와의 비교 결과의 일부 예이다. 표 7에 기술되어 있는 항목에 대한 설명은 다음과 같다.

항목	설명
기기종류	분석된 기기종류
고장모드	고장모드
고장율 1 /h	고장횟수 / Plant 운전시간
고장율 2/h	고장횟수 / 기기의 실제 작동시간
고장확률	고장횟수 / 기기의 작동횟수
비율	국내 표준 원전 고장 자료로부터 구한 신뢰도 값과 일반자료와의 비율
일반자료	영광 5,6 호기 PSA에 사용된 신뢰도 값으로 사전분포의 평균에 해당
단위	사후분포의 평균의 단위를 나타냄. /h는 시간당 고장률이며, (/d)는 고장확률을 나타냄

표 7. 최우추정법에 의한 신뢰도 결과 정리 및 일반자료와의 비교 결과 예

기기종류	고장모드	고장율 1 /h	고장율 2 /h	고장 확률	비율	일반 자료	단위
Battery Charger	No Output	4.58e-6			0.654	7.00e-6	/h (고장율 1)
Bus	Fails while Operating	9.52e-8			0.476	2.00e-7	/h (고장율 1)
Chiller	Fails to Run		3.11e-4		31.1	1.00e-5	/h (고장율 2)
Chiller	Fails to Start	3.27e-5		2.60e-2	4.333	6.00e-3	(고장확률)
Compressor	Fails to Run		6.42e-5		0.642	1.00e-4	/h (고장율 2)
Compressor	Fails to Start	2.04e-5		2.00e-2	1	2.00e-2	(고장확률)
element-Flow	Failure	3.38e-7			0.125	2.70e-6	/h (고장율 1)
Inverter	Failure	7.33e-6			0.366	2.00e-5	/h (고장율 1)
Power Operated Valve-Motor	Spurious Operation	4.04e-7			2.885	1.40e-7	/h (고장율 1)
Power Operated Valve-Motor	Fails to Operate	6.89e-7		1.35e-3	0.337	4.00e-3	(고장확률)
Pump-AFW Motor Pump	Fails to Run					1.50e-4	/h (고장율 2)
Pump-AFW Motor Pump	Fails to Start	1.34e-5		8.82e-3	2.94	3.00e-3	(고장확률)
Pump-Motor	Fails to Run		2.03e-5		0.812	2.50e-5	/h (고장율 2)
Pump-Motor	Fails to Start	5.03e-6		5.40e-3	2.347	2.30e-3	(고장확률)
Switch-Flow	Fails to Operate	2.91e-7			0.223	1.30e-6	/h (고장율 1)
Switch-Flow	Spurious Operation	7.27e-7			0.519	1.40e-6	/h (고장율 1)
Transmitter-Flow	Failure	4.76e-6			1.106	4.30e-6	/h (고장율 1)

그림 2는 PSA 대상기기에 대한 최우추정법에 의한 국내 신뢰도 결과값과 일반자료의 비율 현황을 보여주고 있다. 그래프의 오른쪽에 설명되어 있는 값이 비율이다.

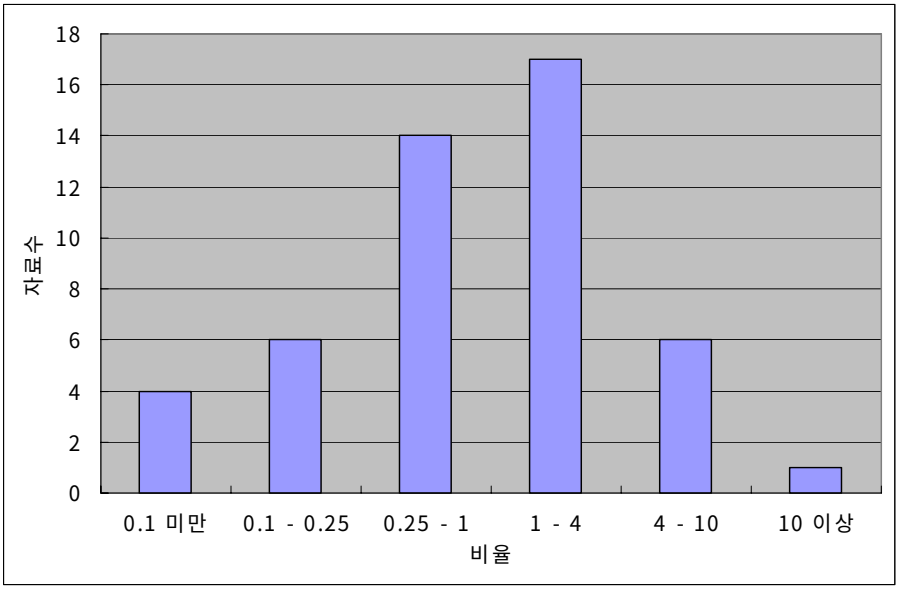

그림 2. 최우추정법에 의한 신뢰도 값과 일반자료와의 비율

국내 신뢰도 결과 중 PSA 대상 기기의 신뢰도 값과 일반자료의 비율을 보면, 총 48건의 자료 중 4건은 안전주입 펌프의 기동실패 고장모드와 같이 아직 국내에서 발생한 사례가 없었고, 이를 제외한 발생 사례가 있는 자료 중에서 국내 고유 기기 신뢰도 값과 일반자료와의 비율이 4배 이내로 산출된 결과는 총 33건으로 75%에 해당한다. 일반자료와의 비율이 0.25 미만으로 값이 적게 나온 것은 5건으로 유량계측기의 'failure', ACU의 'fails to run', 필수 냉방 펌프의 'fails to run' 고장모드 순으로 낮았으며, 반면 비율이 4.0보다 높게 나온 국내 고유 신뢰도 값은 6건으로 필수 냉방기의 'fails to run' 고장이 가장 높고, 다음으로 해수펌프의 'fails to start', 수위전송기의 'failure', 압력스위치의 'spurious operation' 등의 순이다.

4.2. 표준 원전 PSA용 기기 신뢰도 자료

최우추정법에 의한 국내 신뢰도 자료를 주어진 정보로 놓고 영광 5,6호기 PSA에 사용된 신뢰도 자료를 사전분포로 정의한 후, 베이지안 분석을 수행하여 기기 신뢰도 자료를 도출하였다. 대기계통의 운전실패 고장과 같이 분석이 불가능한 고장모드에 대해서는 일반자료를 인용하였다. 다음 표 8은 국내 표준 원전의 PSA용 신뢰도 자료의 일부분이다. 표 8에 기술되어 있는 내용은 표 7에 제시된 예와 동일한 것으로 작성하였다.

표 8에 기술되어 있는 항목 중 앞에서 설명되어 있지 않은 항목에 대한 설명은 다음과 같다.

항목	설명
평균	사후분포의 평균값으로 최종 기기 신뢰도 결과
오차인자	신뢰도 자료(사후분포)의 Error Factor (Lognormal 분포)
단위	사후분포의 평균의 단위를 나타냄. /h는 시간당 고장률이며, (/d)는 고장확률을 나타냄
비고	분석된 자료의 근거로서 아래에 설명되어 있음

비고 항목에은 다음의 값이 나올 수 있으며 각각에 대한 설명 및 표 6과의 관계는 다음과 같다.

비고	설명	표 6의 Case
1	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료 수집/분석 (PSA 대상 기기 아닌 것까지 포함)	Case 1
2	울진 3,4호기는 2002년까지 영광 3,4호기는 1998년까지 자료 수집/분석 (PSA 대상 기기 아닌 것까지 포함)	Case 2
3	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료 수집/분석 (PSA 대상 기기 만 해당)	Case 3
3D	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료 수집/분석 (작동수가 구해진 PSA 기기만 대상)	Case 3D
4	영광 3,4호기 1998년까지 (I&C 기기만 해당)	Case 4
5	영광 5,6호기 PSA에 사용된 신뢰도 자료	Case 5
6	울진 3,4호기 및 영광 3,4호기 모두 2002년까지 자료에 대해 펌프 실제 운전시간이 주어진 것만 대상	Case 6

표 8. 국내 표준 원전 PSA용 신뢰도 자료 예

대분류	기기종류	고장모드	평균	오차 인자	단위	비고
기계	Chiller	Fails to Run	2.90e-4	1.17	/h	3
기계	Chiller	Fails to Start	1.90e-2	1.40	(/d)	3
기계	Diesel Generator	Fails to Run	2.40e-3	3.20	/h	5
기계	Diesel Generator	Fails to Start	4.49e-2	1.33	(/d)	3
기계	Compressor	Fails to Run	7.01e-5	1.48	/h	3
기계	Compressor	Fails to Start	1.87e-2	1.76	(/d)	3
펌프	Pump-AFW Motor Pump	Fails to Run	1.50e-4	16	/h	5
펌프	Pump-AFW Motor Pump	Fails to Start	7.07e-3	2.08	(/d)	3
펌프	Pump-Motor Pump	Fails to Run	2.02e-5	1.23	/h	6
펌프	Pump-Motor Pump	Fails to Start	5.17e-3	1.40	(/d)	3D
밸브	Pneumatic Operated Valve	Spurious Operation (Fails to Remain Open/Close)	3.80e-7	1.41	/h	1
밸브	Pneumatic Operated Valve	Fails to Operate	8.55e-3	1.53	(/d)	3D
전기	Battery Charger	No Output	5.64e-6	1.62	/h	2
계기	Element-Flow	Failure	1.90e-6	1.24	/h	4
계기	Element-Temperature	Failure	8.49e-7	1.27	/h	4
계기	Transmitter-Flow	Failure	4.52e-6	1.26	/h	4

4. 결론

본 논문의 목적은 ①국내 표준 원전의 2002년까지의 기기 고장/보수 자료를 포함하여 기기 신뢰도 자료를 분석한 내용을 기술하고 ②표준 원전의 PSA용 신뢰도 자료를 도출한 결과를 소개하고 ③국내 기기 신뢰도 결과와 일반자료(generic data)의 비교를 통해서 국내 고유 특성을 파악하기 위함이다.

한국원자력연구소(KAERI)에서는 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 표준원전 계열인 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기를 대상으로 기기 신뢰도 데이터베이스를 구축하고, PSA용 기기 신뢰도 자료를 분석하고 있으며 최근에 울진 3,4호기에 대해 2001년부터 2002년까지의 기기 고장/보수 자료를 추가로 수집/분석을 완료하였다. 한편, 1999년부터 2002년까지의 영광 3,4호기의 PSA 대상 기기에 대해서는 KHNP의 협조를 받아 KOPEC이 수집/분석한 자료를 입수하여 사용하였다.

이상 수집/분석한 기기 고장/보수 이력으로부터 최우추정법에 의한 신뢰도 결과값을 산출 한 후 이를 일반자료 값과 비교하였다. 최우추정법에 의한 신뢰도 값과 일반자료의 비율 평가 결과, 비교가 가능한 총 48건의 자료 중 4건은 아직 국내에서 발생한 사례가 없었고, 이를 제외한 발생 사례가 있는 자료 중에서 국내 고유 기기 신뢰도 값과 일반자료와의 비율이 4배 이내로 산출된 결과는 총 33건으로 75%에 해당한다. 일반자료와의 비율이 0.25 미만으로 값이 적게 나온 것은 5건이며, 반면 비율이 4.0보다 높게 나온 값은 6건이다.

PSA 대상기기의 국내 고유 기기고장이력으로부터 계산한 신뢰도 자료를 바탕으로 영광 5,6 호기의 PSA에 사용된 일반자료 값을 사전분포로 하여 베이지안 분석 후 최종 기기 신뢰도 결과인 사

후분포 값을 산출하여 정리하였다 (표 8). 이 값은 국내 표준 원전 PSA용 기기 신뢰도 자료로 사용가능하다.

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. 또한 영광 3,4 호기 1999년 이후의 기기 신뢰도 자료 및 분석결과를 제공하여주신 KOPEC 담당자 분께도 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, “국내 표준 원전 기기 신뢰도 분석”, KAERI/TR-2129/2002, 2002
4. 최선영 등, “국내 표준 원전 기기 신뢰도 DB 구축을 위한 기기 신뢰도 분석”, 2002 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2002
5. 최선영 등, “국내 표준 원전 기기 신뢰도 분석 (상업운전-2002년 자료)”, KAERI/TR-2749/2004, 2004 (to be published)
6. 박진균 등, “Bayesian 분석용 BURD 소프트웨어 개발”, KAERI-ISA-MeMO-PSA-2001-024, 한국원자력연구소, 2002