

## 울진 3,4호기 가동중시험 대상

### 기기의 위험도 정보를 이용한 중요도분석

### Risk-Informed Importance Analysis of In-Service Testing Components for Ulchin Units 3&4

강대일, 김길유, 하재주

한국원자력연구소

#### 요 약

본 논문에서는 울진 3,4호기의 가동중시험 대상 기기에 대해 위험도 정보를 이용하여 중요도 분석을 수행하였다. PSA를 이용한 중요도분석에서는 1단계 내부사건뿐만 아니라, 외부사건, 정지/저출력 운전, 2단계 내부사건 PSA도 사용하였고, 민감도 분석도 수행하였다. PSA에 모델링이 안된 기기는 새로운 종합적인 분석 방법을 개발하여 기기 중요도 분석을 수행 하였다. 평가 결과 가동중시험 대상 밸브 629개중 HSSCs는 26.55%인 167개, LSSCs는 73.45%인 462개로 나타났다. 가동중시험 대상 펌프는 40개중 HSSCs는 70%인 28개, LSSCs는 30%인 12개로 나타났다.

#### Abstract

In this paper, we perform risk-informed importance analysis of in-service testing (IST) components for Ulchin Units 3&4. The importance analysis using PSA is performed through Level 1 internal and external, shutdown/low power operation, and Level 2 internal PSA. The sensitivity analysis is also performed. For the components not modeled in PSA logic, we develop and apply a new integrated importance analysis method. The importance analysis results for IST valves show that 167 (26.55%) of 629 IST valves are HSSCs and 462 (73.45%) are LSSCs. The importance analysis results for IST pumps show that 28 (70%) of 40 IST pumps are HSSCs and 12 (30%) are LSSCs.

#### 1. 서론

위험도 정보를 이용한(risk-informed) 가동중시험(In-Service Testing: 이하 IST)는 정량적 평가 수단인 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: 이하 PSA) 방법과 정성적 평가 수단인 결정론적 방법을 사용하여 기기들의 발전소 위험도 기여 정도에 따라 기기들의 시험 주기나 방법 등을 달리 적용하는 것으로 여기에는 현재의 IST 대상이 아닌 기기도 포함된다[1]. 일반적인 위험도 정보이용 IST 과정은 먼저 IST 대상 기기들이 발전소의 안전성에 기여하는 정도를 평가하는 중요도분석을 수행한다. 다음에는 기기 종류와 기기 중요도에 따른 IST

프로그램을 개발하고, 세 번째로는 개발된 IST 프로그램을 실행한다. 프로그램 실행 중에 얻어지는 결과와 교훈들을 전체 과정으로 다시 피드백한다. 기기들의 중요도 순위는 발전소의 안전성에 중요한 정도에 따라 일반적으로 높은 안전성(high safety significant components: 이하 HSSCs) 기기와 낮은 안전성(low safety significant components: 이하 LSSCs) 기기로 분류하는데 정량적인 PSA 결과와 정성적인 안전성 평가, 기기 이력 등을 종합해 전문가 패널(expert panel)에서 최종 결정한다.

위험도 정보를 이용한 IST에 대한 연구 동향을 보면, 미국은 1992년부터 PSA 결과의 IST 적용에 관심을 두기 시작해, 1998년 현재 이와 관련된 ASME 코드 케이스와 규제 지침서도 출간하였다[1,2]. 최근에 NRC로부터 위험도정보이용 IST에 대해 승인을 받은 Comanche Peak 발전소 경우, 핵연료 재장전기간 동안 수행되었던 1758회의 시험이 498회로 감소하고, 그 외 IST 보조하는 여러 업무 양이 감소하였다[3]. 지금까지 국내에서의 위험도 정보이용 IST 관련 연구는 아직 미미해 연구동향 파악이나 1단계 내부사건 PSA를 이용한 중요도 분석(importance analysis) 연구만이 수행되었다[4,5,6].

본 논문에서는 참조발전소인 울진 3,4호기의 IST 대상 기기[7]에 대해 IST 대상 기기이면서 PSA에 모델링 된 기기에 대해서는 PSA를 이용하여 중요도 분석을 수행하였고, PSA에 모델링이 안된 기기에 대해서는 별도의 방법을 개발하여 기기 중요도 분석을 수행하였다.

본 연구의 전체 수행 과정은 다음과 같다;

- 위험도 정보이용 IST 방법론과 기기 중요도 순위화와 관련된 참고 문헌들을 검토
- 본 연구에서 PSA를 이용한 기기 중요도 순위화에 사용될 중요도 척도(importance measures)와 기준 값을 설정하고 민감도 분석(sensitivity analysis) 항목 선정
- PSA를 이용한 기기중요도 순위화
- 정성적인 안전성 평가와 전문가 패널을 대신하는 종합적인 중요도 분석 방법 개발
- PSA에 모델링 안되었거나 HSSCs가 아닌 기기에 대한 단순 고장모드 영향분석(failure mode and effect analysis)과 기기 고장 영향의 정량화
- PSA와 단순 고장모드 영향분석/ 고장영향 정량화를 통한 종합적인 기기 중요도 분석

본 논문의 2절에서는 PSA를 이용한 중요도 분석에서 사용할 중요도 척도와 기준치, 수행해야 할 민감도 분석 항목을 3절에서는 PSA를 이용한 중요도분석 결과를 기술하였다. 4절에서는 본 연구에서 개발된 종합적인 중요도 분석 방법과 분석 결과를, 끝으로 5절에서는 토의와 결론을 기술하였다.

## 2. PSA를 이용한 중요도 분석 방법

기존 위험도 정보이용 IST 연구결과를 검토하여 본 연구에서 사용할 중요도 척도와 기준치, 민감도 분석 항목을 설정하였다.

기존 연구에서 사용했던 중요도 척도는 대부분이 FV(Fussel-Vesely) 중요도와 위험도달성가치(Risk Achievement Worth: RAW)이었다. 위험도 감소가치나 노심손상에 차지하는

비율도 일부 사용했으나 이들의 의미 모두는 FV중요도로 모두 나타낼 수가 있다. 주로 사용한 FV 기준치는 0.05, 0.01, 0.005, 0.001이었고, 위험도 달성가치는 2, 10 였다. FV 중요도와 RAW의 정의는 아래와 같다[8];

$$FV = [R_o - R_i(-)] / R_o = 1 - R_i(-) / R_o = 1 - 1/RRW \dots\dots\dots(식 1)$$

$$RAW = R_i(+)/ R_o \dots\dots\dots(식 2)$$

$$RRW = R_o / R_i(-) = 1/(1-FV)\dots\dots\dots(식 3)$$

- R<sub>o</sub>: 기본 위험도,
- R<sub>i</sub>(+): 기기 i가 고장시 증가된 위험도,
- R<sub>i</sub>(-): 기기 i가 완벽 작동시 감소된 위험도

PSA에서 사용되는 전산코드를 이용한 중요도 분석을 하게되면 기기들의 고장모드 (failure mode)에 대해서만 중요도를 알 수 있지 기기 자체의 중요도는 알 수 없다. 이 경우 기기의 고장모드에 대한 분석결과를 이용한 기기의 FV 중요도 및 RAW는 아래와 같이 표시할 수가 있다[9];

$$FV \approx \sum_i f_{v_i} \dots\dots\dots(식 4)$$

$$RAW \approx 1 + \sum_i (raw_i - 1) \dots\dots\dots(식 5)$$

- f<sub>v<sub>i</sub></sub>: 기기의 기본사건 i에 대한 FV 중요도
- raw<sub>i</sub>: 기기의 기본사건 i에 대한 위험도 달성가치
- ∑<sub>i</sub>: i는 1부터 N까지의 모든 기기 고장 모드

본 연구에서도 FV 중요도와 RAW를 중요도 척도로 선정하고 기준치는 표 1처럼 설정하였다. 표 1에서는 FV 중요도와 RAW 값을 기준으로 크게 3가지로 나누었다. 상세하게 나누면 12가지가 된다. 2분법으로 나눌 경우에는 H와 I로 판명된 기기 모두는 중요 기기(HSSCs)로 판정한다. IST 대상 기기이면서 PSA에 모델링된 기기 모두에 대한 중요도 분석 결과에 대해 표 1의 12가지중 한 가지로 표시를 하였다.

표 1. 본 연구에서 사용할 기준치

RAW Ranking	FV ranking			
	FV>0.005	0.001<FV≤0.005	0.0001<FV≤0.001	0.0001≥FV
RAW >10	H1	H4	I1	L3
2<RAW≤10	H2	H5	I2	L4
RAW≤2	H3	L1	L2	L5

H: HSSCs, I: ISSCs(Intermediate Safety Significant Components), L: LSSCs

기존 연구에서 수행했던 주요 민감도분석 항목은 기기 고장율과 관련된 불확실성, 공통원인고장 확률, 회복행위 고려 유무 등이었다. 이에 본 연구에서 수행할 민감도 분석 항목을 ASME 코드 케이스[2]과 RG 1.174 [10]을 토대로 다음과 같이 선정 하였다;

- 공통원인고장: 울진 3&4 PSA[11]에서 사용된 공통원인 고장 확률은 일반(generic) 데이터이고 기본분석 결과 공통원인 고장으로 인한 중요도가 크게 나타났습.

공통원인고장사건 분석에 불확실성이 크기 때문에 공통원인고장으로 인해 단일사건의 중요성이 감소되는 것을 방지하기 위해 공통원인고장 사건을 고려하지 않고 분석

- 회복행위: 회복행위는 대부분이 기기 고장사건에 부울리안 논리의 “AND”로 연결. 회복행위가 고려된 기기의 중요도분석시 이 “AND”논리로 인해 순수한 기기의 중요도 분석 결과가 작아질 수 있음. 회복행위를 고려하지 않고 중요도분석을 수행.
- 95% 에 해당되는 기기고장을 – HSSCs로 판정 안되었지만 상황에 따라 기기의 고장율이 증가할 경우 이 기기가 HSSCs로 평가될 수 있음. 이러한 상황과 중요도분석 관련 참고문헌에서 언급한 기기 고장율과 불확실성 문제를 해결하기 위해 HSSCs가 아닌 기기의 고장율 분포의 95% 값을 사용해 중요도분석 수행.

PSA 수행범위는 내부사건뿐만 아니라 정지/저출력 운전 PSA 등 모든 초기사건과 운전 모드에 대해서이다. 만일 정지/저출력 같이 PSA 모델이 없어 정량적 평가를 수행 못하면 이에 대해 정성적 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 전 PSA 모델의 정량적 분석 결과를 사용하여 기기 중요도 분석을 수행하였다. 사용 PSA 모델은 다음과 같다;

- 1단계 내.외부사건 : 울진 3&4 PSA[11]
- 2단계 내부사건: 울진 3&4 1단계 내부사건 PSA 모델에 단순화된 격납용기 사건수목 모델을 사용해 분석[10, 12]
- 정지/저출력 운전: 영광 5&6 정지/저출력 PSA [13]
- 초기사건: 전출력, 정지/저출력, 2단계, 외부사건

### 3. PSA를 이용한 중요도분석 결과

중요도분석 대상 기기는 2000년 12월 현재 울진 3,4호기에서 수행중인 IST 대상 기기 이다[7]. PSA를 이용한 분석에서 HSSCs로 판정이 안된 기기와 모델링이 안된 기기에 대해서는 본 연구에서 개발한 방법을 사용하여 중요도 분석을 수행하였다.

#### 3.1 가동중시험 대상 기기와 기기 중요도 순위화 규칙

울진 3,4호기의 호기 당 가동중시험 대상 밸브 수는 629개이다. 이를 밸브 중 울진 3,4호기 1단계 내부사건 PSA에 모델링되어 있는 밸브 수는 가동중시험 대상 기기의 31%인 195개이다. 이 기기수는 순수하게 1단계 내부사건 고장수목에 밸브번호의 이름을 갖고 모델링되어 있는 기기수이다. 고장수목 모델링시 기기 고장모드를 고려 했지만 그 발생확률이 낮아 고려를 안한 기기와 1단계 초기사건시 고려된 기기, 2단계 PSA에서 고려된 기기 모두를 합하면 기기수는 가동중시험 대상 기기의 55%인 346개가 된다. 기기 모델링 수를 195개로 한정시킨 것은 보는 관점에 따라 기기 모델링 수가 달라질수 있기 때문이다. 울진 3,4호기의 가동중시험 대상 펌프 수는 40개이다. 이중 1단계 PSA에 모델링된 펌프 수는 70%인 28개이다.

중요도분석시 단일사건과 공통원인고장 사건에 대한 중요도분석 결과는 별도로 다루었다. 이는 공통원인고장 사건에 불확실성이 많기 때문이다. 분석시 사용한 절단치는  $1.0 \times 10^{-11}$ 이고 사용 전산

코드는 KIRAP[14]이었다. 기본분석과 민감도분석의 각각에 대한 중요도 분석 결과는 다음과 같은 규칙아래 기기의 중요도를 평가하였다;

- 1) 기본분석 결과와 민감도분석(외부,정지, 2단계 제외) 결과 중 표 1에서 가장 높게 분류된 범주를 채택
- 2) 표 1에서 표시된 중요도 분석 결과가 동일하면 다음과 같은 순서로 중요도 판정원을 표시; 기본 PSA → 공통원인고장 고려 안 한 경우 →회복행위 고려 안 한 경우 → 기기 이용불능도 95% 값일 경우 순으로 기재
- 3) 단일사건과 공통원인고장의 중요도가 표 1의 분류대로 동일한 범주라면 단일사건을 선정
- 4) 외부사건, 정지운전, 2단계 PSA에 대한 중요도 판정은 본 연구에서 개발된 종합적인 분석 방법에 따라 평가후 최종 판정

### 3.2 내부사건 PSA를 이용한 밸브 중요도 분석결과

표 2에는 내부사건 PSA를 이용한 밸브 중요도 분석 결과가 나타나 있다. 표 2에 나타나 있듯이 1단계 내부사건 PSA에 모델링된 195개 밸브중 HSSCs로 판명된 기기는 94개, ISSCs(Intermediate Safety Significant Components: 이하 ISSCs)로 판명된 기기는 32개, LSSCs로 판명된 기기는 69개로 나타났다. HSSCs와 ISSCs로 평가된 기기들의 85% 이상이 공통원인고장 사건으로 나타났다. 표 3에는 기기중요도 순위화에 민감도분석 결과가 미치는 영향을 나타내고 있다. HSSCs로 평가된 기기중 기본분석보다 높은 중요도 값을 나타낸 경우는 회복행위를 고려하지 않을 경우가 가장 크게 나타났다.

표 2. 내부사건 PSA를 이용한 밸브 중요도 분석 결과 요약

Category	Modeled IST valves 195 84[CV], 72[MO], 8[AO], 11[SO], 4[HO], 16[RV]	Non-IST 밸브 중 ISSCs이상
HSSCs	30[CV], 42[MO], 4[AO], 16[RV]	2[VV]
ISSCs	20[CV], 4[HO], 2[MO], 4[SO]	1[CV], 3[VV]
LSSCs	34[CV], 4[AO], 28[MO], 7[SO]	Not Applicable

표 3. IST 밸브의 민감도분석 결과가 기기 중요도 순위화에 미치는 영향

Category	기본분석	CCF 고려 안할경우	회복행위 고려 안할 경우	HSSCs로 판명되지 않은 기기에 대해 이용불능도 95% 값 사용경우
HSSCs 92	62	6	20	4
ISSCs 30	12	0	0	18
LSSCs 73	61	0	0	12
계	135	6	20	34

### 3.3 내부사건 PSA를 이용한 펌프 중요도 분석결과

표 4에는 내부사건 PSA를 이용한 펌프 중요도 분석 결과가 나타나 있다. 표 4에 나타나 있듯이 1단계 내부사건 PSA에 모델링된 28개 펌프중 HSSCs로 판명된 기기는 10개, ISSCs로

판명된 기기는 4개, LSSCs로 판명된 기기는 14개로 나타났다. 밸브의 경우와는 다르게 공통원인고장 사건이 중요도 결과에 미치는 영향이 크지 않게 나타났다. 표 5에는 기기중요도 순위화에 민감도분석 결과가 미치는 영향을 나타내고 있다. 펌프에 대한 회복행위를 올린 3&4 PSA 모델에서는 고려하지 않았기에 별도로 분석하지 않았다. 밸브와는 다르게 민감도 분석 결과는 기기 중요도 순위화에 미치는 영향이 작았다.

표 4. 내부사건 PSA를 이용한 펌프 중요도 분석 결과 요약

Category	Modeled IST pumps 28	Non-IST pumps 1
HSSCs 10	2[AF TP], 2[AF MP], 2[HS MP], 2[LS MP], 2[CS MP]	1 [FW MP]
ISSCs 4	2[SW MP], 2[CW MP]	
LSSCs 14	4 [CC MP], 2[CV MP], 4 [CV RP], 2[SW MP], 2[CW MP]	

표 5. IST 펌프의 민감도분석 결과가 기기 중요도 순위화에 미치는 영향

Category	기본분석 -19	CCF 고려 안할 경우 -0	HSSCs가 아닌 기기의 이용 불능도 값을 95% 사용 경우 - 9
HSSCs-10	10	0	0
ISSCs - 4	0	0	4
LSSCs -14	9	0	5

#### 4. 종합적인 중요도 분석

##### 4.1 종합적인 중요도 분석 방법 개발 배경 및 특성

위험도정보를 이용한 IST에서 중요도분석은 정량적인 PSA 정보와 정성적인 기기의 안전성 정보, 그리고 기기의 운전 이력 등을 참고로 하여 전문가 패널에서 최종 기기 중요도를 평가한다. ASME 코드 케이스에[2] 따른 전문가 패널 요건을 보면 전문가 패널은 적어도 5명으로 구성되며, 최소 경험 요건은 원자력 분야 경험이 최소한 50 man-year, 그리고 PSA의 일반적인 지식을 갖추고 있어야 한다. 기기 중요도의 최종 평가시, 전문가 패널은 각 기기들의 평가 결과에 대한 근거를 기술하여야 한다.

위에서 언급한 것처럼 전문가 패널을 운용하기 위해서는 많은 인력과 시간을 투입해야 한다. 또한 평가시 근거가 되는 기준 등의 작성과 개별 기기 평가에 대한 근거를 기술하기 위해서는 전문가 패널사이에 많은 의견 조율과 상호 토론을 수행해야 할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 정량적인 방법에 근거해 정성적인 안전성 평가와 전문가 패널을 대신할 종합적인 기기 중요도 분석 방법을 개발하였다. 새로운 기기 중요도 분석 방법의 개발 이유는 다음과 같다;

- 경험있는 PSA 전문가가 PSA와 관련 정보를 이용해 기기의 전체적인 중요도 분석을 수행
- 정량적 평가 방법을 일관성 있게 적용하여 분석 결과의 타당성과 객관성을 확보
- 인력과 시간의 단축

개발된 기기 중요도 평가 방법의 특성은 다음과 같다;

- 단순 FMEA를 이용하여 기기 고장 영향을 정량적으로 평가하는 방법과 전체 기기 중요도를 종합적으로 평가하는 절차로 구성.
- 기기의 중요도는 CDF나 LERF 또는 Off-site consequence에 영향을 주는 정도에 의존한다고 가정
- 기기의 고장이 CDF나 LERF 등에 미치는 영향은 정량적으로 표시 가능
- 전문가 패널에서 평가시 중요하게 고려하는 요소들과 위험도 정보이용 IST 전체 과정을 가능한 반영

단순 FMEA를 이용하여 기기 고장 영향을 정량적으로 평가할 대상 기기는 1단계 내부사건 PSA에서 ISSCS나 LSSCs로 판정된 기기와 PSA에 모델링이 안된 기기이다.

#### 4.2 단순 FMEA와 기기고장 영향의 정량적 평가

단순 FMEA와 기기의 고장 영향에 대한 정량적 평가는 기기의 정성적 안전성 평가시 고려하는 사항들을 토대로 그림 1과 같이 수행한다. 평가 기기는 PSA에 모델링이 안된 기기와 1단계 내부사건 PSA를 이용한 기기중요도 분석에서 ISSCSs 또는 LSSCs로 평가된 기기이다. 일부 기기는 기기의 고장이 발생하기 힘들거나 기기 고장이 발생하여도 그 영향이 작은 것이 있다. 이런 기기들에 대해서는 별도의 분석을 수행하지 않았다.

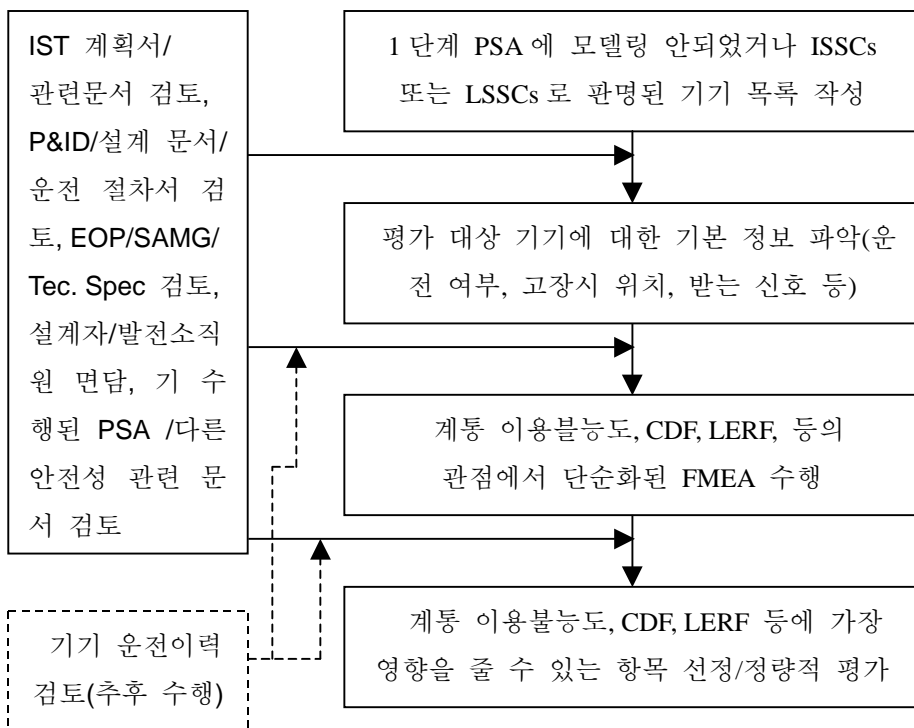


그림 1. 단순 FMEA와 기기고장 영향 정량화 과정

#### 4.3 기기 중요도를 종합적으로 평가하는 절차와 평가 기준

기기 중요도를 종합적으로 평가하는 절차는 앞에서 언급한 PSA를 이용한 기기 중요도의 정량적인 분석 결과와 단순 FMEA와 기기 고장 영향의 정량적인 평가 결과를 토대로 전문가 패널들이 평가시 중요하게 고려하는 요인들을 반영하여 그림 2처럼 수행한다. 기기 중요도를 종합적으로 평가하는 절차와 기준은 다음과 같다;

- 내부사건 PSA(민감도분석 포함)를 이용한 중요도분석 결과 HSSCs로 판정된 기기는 HSSCs로 평가. 하지만 다음과 같은 경우는 다르게 평가할 수도 있음
  - 중요도분석 결과를 적용하는 분야가 본 연구에서 선정한 기준치와 상이할 경우
  - 본 연구에서의 기본분석 결과와 민감도분석 결과를 상이하게 취급할 경우
  - 전문가 패널을 구성하여 별도로 기기 중요도분석을 수행할 경우
  - PSA의 가정사항이나 모델링의 제한성 등이 적용하고자 하는 분야와 일치하지 않을 경우
- 외부사건, 2단계, 정지/저출력 운전 PSA 결과 HSSCs 후보로 판명된 기기는 단순 FMEA와 기기의 고장 영향에 대한 정량적 평가, 그리고 기기 고장이 심층방어 철학을 훼손하거나 안전성 여유도를 감소하는지의 여부를 고려하여 기기의 중요도를 재 결정
- 다음의 기기들은 ISSCs나 HSSCs로 평가
  - 기기 고장으로 CDF, LERF, Off-site consequence에 영향이 크다고 판단
  - 기 고장이 계통 이용불능도에 영향이 크고 그 계통이 안전성에 중요하다고 판단
  - 기기 운전 이력 검토에 근거해 기기의 영향이 크다고 판단

위에서 영향이 크다는 구체적인 판단기준은 다음과 같은데 판단기준의 적용은 종합적으로 한다;

- 단순 FMEA에서 가장 영향이 크다고 밝혀진 항목의 정량적 평가 결과를 정량적 기준치와 비교하여 평가, 정량적 기준치는 기기 이용불능도와 FV중요도는 비례한다는 전제아래 다음의 식을 사용하여 평가;

$$X_{CRI}(i) = X(i) * CRI / FV(X(i)) \dots \dots \dots (식 6)$$

X(i): 기기 i 고장과 관련된 현재의 초기사건빈도, 격납용기 격리실패 빈도, 또는 기기 i가 속한 계통의 이용불능도

X<sub>CRI</sub>(i): FV 중요도가 CRI에 해당되는 기기 i 고장과 관련된 초기사건빈도, 격납용기 격리실패 빈도, 또는 기기 i가 속한 계통의 이용불능도

FV(X(i)): 기기 i 고장과 관련된 현재의 초기사건빈도, 격납용기 격리실패 빈도, 또는 기기 i가 속한 계통의 이용불능도에 대한 FV 중요도

CRI: 표 1에서 HSSCs나 ISSCs 기준되는 값(0.005, 0.001, 또는 0.0001)

- 정량화가 어려우면 CDF, LERF, Off-site consequence 등에 미치는 영향 등을 심층방어 철학이나 안전성 여유도 훼손측면 또는 안전성 또는 PSA 관련문서 등을 참고하여 평가
- 심층방어 철학을 훼손하거나 안전성 여유도를 감소하는지의 정성적인 판단 근거는 RG 1.174[10] 토대로, 기기운전이력에 근거해 기기의 영향이 크다고 판단 하는 정성적인 기준은 ASME 코드케이스 3[2] 근거



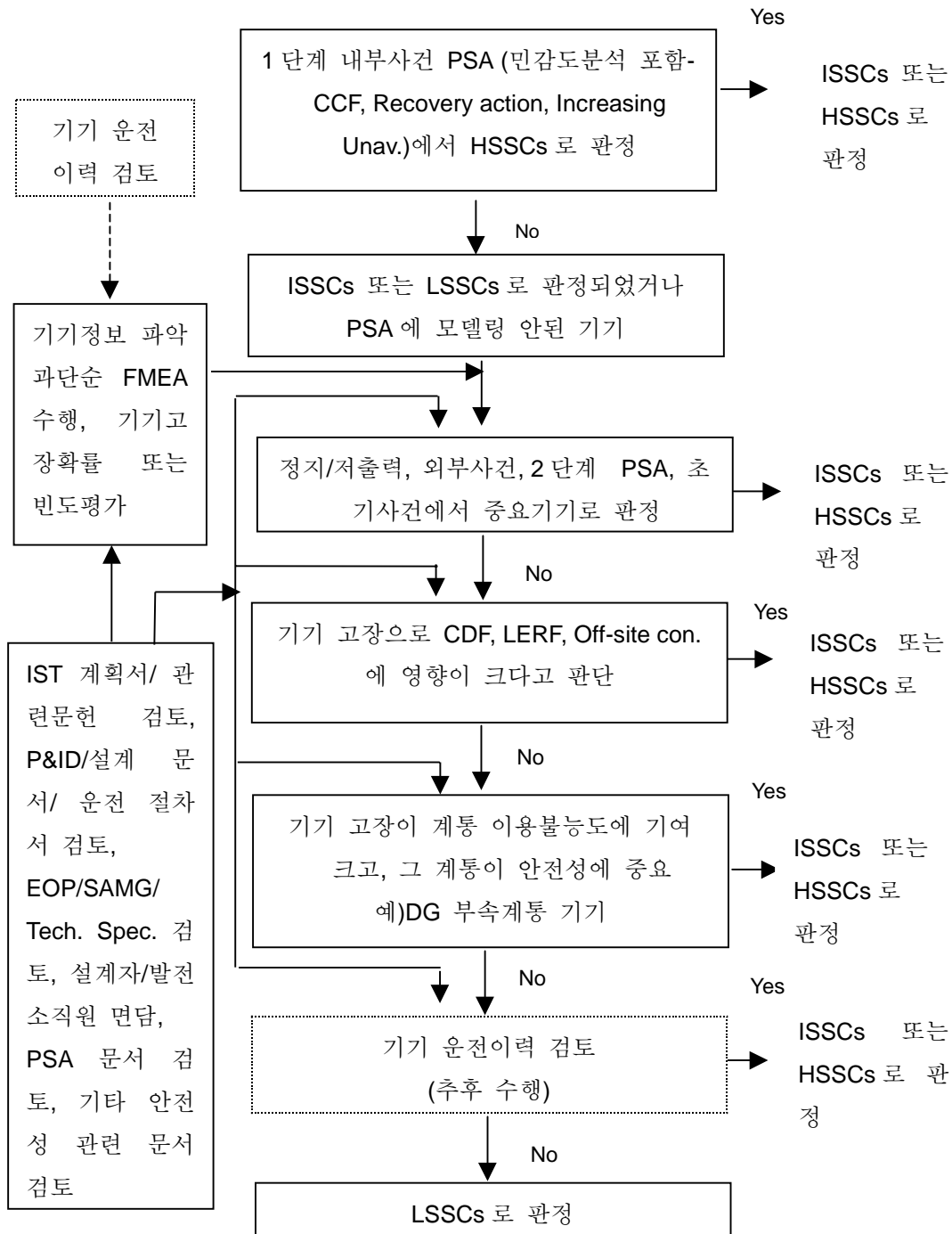


그림 2. 종합적인 기기 중요도 분석 과정

#### 4.4 종합적인 기기 중요도 분석 결과

외부사건 PSA와 정지/저출력 운전 PSA, 2단계 PSA를 이용한 중요도 분석 결과 새로이 HSSCs로 추가 확인된 기기는 외부사건 PSA에서 2개, 정지/저출력 운전 PSA에서 7개, 2단계 PSA에서 8개로 나타났다. ISSCs로 추가 확인된 기기는 정지/저출력 운전 PSA에서 4개, 2단계 PSA에서 2개로 나타났다.

1단계 PSA에서 HSSCs로 평가되지 않은 기기와 PSA에 모델링되지 않은 기기에 대한 단순 고장모드 영향분석(failure mode and effect analysis)과 기기 고장영향에 대한 정량화를 통한 기기 중요도 분석 결과 HSSCs로 추가 확인된 기기는 6개, ISSCs로 추가 확인된 기기는 16개로 나타났다.

올진 3,4호기의 운전 경험이 짧고, 기기 고장 데이터 베이스가 구축이 안되어 있어 기기 운전이력에 관한 검토는 수행하지 않았다.

표 6은 IST 대상 밸브에 대한 종합적인 중요도 분석 결과를 PSA별로 표시하고 있다. 전체 IST 대상 밸브 629개중 HSSCs는 18.28%인 115개, ISSCs는 8.27%인 52개, LSSCs는 73.45%인 462개로 나타났다. 밸브 유형(type)별 최종 중요도 분석 결과는 표 7에 나타나 있다. 표 8은 IST 대상 펌프에 대한 종합적인 중요도 분석 결과를 PSA별로 표시하고 있다. 전체 IST 대상 펌프 40개중 HSSCs는 40%인 16개, ISSCs는 30%인 12개, LSSCs는 30%인 12개로 나타났다. 표 9에는 가동중시험 대상이 아닌 기기중 ISSCs 이상으로 평가된 밸브와 펌프가 나타나 있다. HSSCs로 평가된 밸브는 2개, 펌프는 1개로 나타났으며, ISSCs로 평가된 밸브는 4개로 나타났다.

**표 6. IST 밸브에 대한 종합적인 중요도 분석 결과**

IST Valves	Internal PSA	External PSA	Level 2 PSA	SD/LP PSA	단순 FMEA와 영향 정량화
HSSCs – 115	92	2	8	7	6
ISSCs – 52	30	0	2	4	16
LSSCs – 462	67	0	0	0	395
Sum – 629	189	2	10	11	417

**표 7. IST 밸브 유형별 종합적인 중요도 분석 결과**

밸브종류	Manual valve	Check valve	Motor operated valve	Air operated valve	Solenoid valve	Hydraulic operated valve	Relief valve	Relief valve – vacuum
HSSCs	0	36	46	12	0	0	21	0
ISSCs	0	26	6	2	4	12	2	0
LSSCs	25	147	91	48	57	8	78	8
LSSCs 분율	100	70.3	63.6	77.4	93.44	40	77.2	100
Sum	25	209	143	62	61	20	101	8

**표 8. IST 펌프에 대한 종합적인 중요도 분석 결과**

IST Pumps	Internal PSA	External PSA	SD/LP PSA	Level 2 PSA	단순 FMEA와 영향 정량화
HSSCs – 16	10	0	0	0	6
ISSCs – 12	8	0	4	0	0
LSSCs – 12	6	0	0	0	6
Sum – 40	24	0	4	0	12

**표 9. 가동중시험 대상이 아닌 기기중 중요기기로 판정된 기기**

	Non-IST 밸브	Non-IST 펌프
HSSCs	2	1
ISSCs	4	
Sum	6	1

표 10에는 울진 3,4호기와 유사한 CE형 Palo Verde 발전소의 기기 중요도 분석 결과가 울진 3&4호기와 비교되어 나타나 있다. 울진 3&4 호기의 밸브 중요도 분석 결과는 Palo Verde 발전소와 유사하게 나타났지만 펌프의 경우는 Palo Verde 발전소가 더 크게 나타났다. 표 11에는 다른 여러 발전소의 기기 중요도 분석 결과가 비교되어 나타났다. 울진 3&4 호기와 Palo Verde의 HSSCs 비율이 다른 발전소보다 다소 높게 나타났다. 본 연구 결과와 기존 연구 결과를 비교하였는데 본 연구 결과에서 HSSCs 비율이 다소 높게 나타났다. 이러한 이유는 울진 3,4 PSA와 다른 발전소 PSA와의 특성 차이, 그리고 본 연구에서 고려했던 민감도분석 항목 차이, 중요도 분석시 사용했던 PSA 수행범위 차이, 그리고 전문가 패널대신 별도로 사용한 종합적인 중요도분석 방법 차이로 판단된다. 이러한 요인들 중 PSA의 특성 차이가 제일 큰 것으로 판단된다.

표 10. 울진 3호기와 Palo Verde 발전소의 중요도 분석 결과 비교

가동중시험 적용 코드		울진 3 호기	Palo Verde
		1990년 판 ASME	1986년 판 ASME
기기분류시 PSA 업무수행 범위		1,2단계(내부) & 외부 & 정지 & 자체 방법(FMEA)	1,2단계(내부) & 정지 & 전문가 판단
PSA에서 모델링 대상 수	밸브	629개중 195개(31%)	506개중 174개(34%)
	펌프	40개중 28개(70%)	24개중 16개(67%)
HSSCs 갯 수 - 전체 IST 대상 중	밸브	167개 (26.55%)	137개(27%)
	펌프	16개 (40%)	18개(69%)

표 11. 울진 3호기와 다른 발전소와의 중요도 분석 결과 비교

	IST Pump			IST Valve		
	HSSCs	LSSCs	HSSCs/전체	HSSCs	LSSCs	HSSCs/전체
울진 3	28	12	70%	167	462	26.55%
Palo Verde*	18	6	69%	137	369	27%
Comanche Peak 1	21	12	63.6%	144	537	23.26%
San Onofre 2	18	10	64.28%	85	455	15.74%
South Texas**	24	12	66.67%	141	423	25%

\*: NRC로부터 승인 취소, \*\*: 현재 재분류중

## 5. 결론

본 논문에서는 PSA와 별도로 개발한 중요도 분석 방법을 사용하여 울진 3,4호기의 가동중시험 대상 기기에 대해 중요도분석을 수행하였다. PSA를 이용한 중요도 분석을 수행하기 위해 기존 연구 결과를 참고하여 중요도 평가 척도와 기준치를 새로이 설정하고 민감도 분석 항목을 선정하였다. PSA를 이용한 중요도 분석은 1,2단계 내부사건 PSA 뿐만 아니라 외부사건, 정지/저출력 운전 PSA에 대해서도 수행하였다. 1단계 PSA를 이용한 중요도 분석에서 HSSCs가 아닌 기기로 판정된 기기와 PSA에 모델링이 안된 기기에 대해서는 본 연구에서 개발한 종합적인 중요도 분석 방법을 사용해 기기 중요도를 평가 하였다.

울진 3,4호기의 가동중시험 대상 밸브와 펌프는 각각 629와 40개이며, 이중 밸브는 195개, 펌프는 28개가 울진 3,4 1단계 내부사건 PSA에 모델링되어 있다. 가동중시험 대상 밸브이면서 1단계 내부사건 PSA에 모델링되어 있는 195개의 밸브에 대한 분석 결과 밸브는 HSSCs가 92개, ISSCs는 30개, LSSCs는 73개로 판명되었다. 28개의 펌프에 대한 분석 결과 HSSCs가 10개, ISSCs는 4개, LSSCs는 14개로 판명되었다. 민감도분석에서는 회복행위를 고려하지 않은 경우가 1단계 내부사건 PSA 분석 결과보다 큰 중요도 분석 값을 갖는 기기가 많이 나타났다.

본 연구에서 개발된 종합적인 중요도 분석 방법은 정성적인 안전성 평가와 전문가 패널을 대신하는 방법으로서 기본적으로 PSA 전문가가 PSA와 관련 정보를 이용해 기기 순위화를 수행할 수 있도록 하였다. 개발된 방법은 단순 고장모드 영향분석과 기기 고장 영향이 가장 클 것으로 판단되는 기기 고장모드에 대한 정량적 평가, 그리고 종합적으로 기기 중요도를 평가하는 절차로 이루어졌다.

종합적인 중요도 분석 결과, 가동중시험 대상 밸브 629개중 HSSCs는 18.28%인 115개, ISSCs는 8.27%인 52개, LSSCs는 73.45%인 462개로 나타났다. HSSCs로 평가된 기기를 PSA별로 보면 1단계 내부사건이 92개, 외부사건이 2개, 2단계 PSA가 8개, 정지/저출력 PSA가 7개, 본 연구에서 개발한 단순 FMEA와 정량화가 6개로 나타났다. 가동중시험 대상 펌프는 40개중 HSSCs는 16개로 40%, ISSCs는 12개로 30%, LSSCs는 12개로 30%로 나타났다. HSSCs로 평가된 기기를 PSA별로 보면 1단계 내부사건이 10개, 본 연구에서 개발한 단순 FMEA와 정량화가 8개로 나타났다.

추후에는 기기 운전 이력에 관한 데이터를 검토하여 본 연구 결과에 반영하고 LSSCs로 판정된 기기에 대해서는 시험 주기 완화 가능성을 평가하는 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 각 PSA 별로 중요도 분석을 수행하였지만 내.외부사건 PSA와 정지운전 PSA 등 모두를 고려한 발전소 전체의 위험도 관점에서 수행되는 중요도 분석과 모든 원전 기기에 대한 중요도 분석 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구에 도움을 주신 한국전력기술의 박병호님, 울진 원전의 진수환님, 영광 원전의 이경훈님에게 감사를 드립니다. 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1]. "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decision-making: In-service Testing", RG 1.175, 1998
- [2]. ASME OMN-3 Code Case, "Requirements for Safety Significance Categorization of Components Using Risk Insights for Inservice Testing of LWR Power Plants", 1998

- [3]. C.Wesley Rowley, "*Cost/Benefit Evaluation of Implementing Pump and Valve RI-IST at a Nuclear Power Plant*", ICONE-8, 2000
- [4]. 김길유 외, "위험도 정보를 이용한 원전에서의 의사결정", 한국원자력연구소, KAERI/AR-577/2000, 2000
- [5]. 성계용 외, "위험도기준 규제기술 현황분석 보고서", 한국원자력안전기술원, KINS/RR-49, 2001
- [6]. 강대일 외, "위험도 정보를 이용한 가동중시험방법의 울진 3&4호기 적용", 한국원자력학회, 1998
- [7]. "울진 3,4호기 안전등급 펌프 및 밸브 가동 중 시험 계획서", 2000, 한국전력
- [8] Vesley, et al., "*Measures of risk importance and their applications*", NUREG/CR-3385, 1983, NRC
- [9]. Ian B. Wall and David H Worledge, "*Some Perspectives on Risk Importance Measures*", International Topical meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA 96, ANS, 1996
- [10]. "*An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis*", RG 1.174, 1998
- [11]. "*Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment*", 한국전력공사, 1995
- [12]. 강대일 외, "단순 격납건물 사건수목을 이용한 대량초기누출빈도 평가", 2000년, 추계 원자력학회
- [13]. "영광 5&6 정지/저출력 PSA", 한국전력공사, 2000
- [14]. 김태운, 한상훈 외, "KIRAP을 이용한 사고경위 정량화 방법", KAERI/TR-848/97, 한국원자력연구소, 1997