

# 위험도 정보를 이용한 원자력 발전소에서의 가동중시험

강대일, 김길유, 진영호

한국 원자력연구소

## 1. 서론

원자력발전소는 발전소의 안전성 확보를 위해 대기중인 계통의 기기(component)들을 가동중에 주기적으로 시험하고 있다. 시험 대상은 주로 미국 기계학회(The American Society of Mechanical Engineers: ASME)에서 정해진 안전등급 1,2,3급의 밸브나 펌프 등으로서, 원자력 발전소를 안전하게 정지시키거나 정지상태를 유지시키는 또는 사고를 완화시키는 기능과 관련돼 있는 기기들이다[ 1 ]. 국.내외 원자력 발전소의 안전성 관련 기기들에 대해 수행되는 가동중시험(In-Service Test: IST)의 요건 및 주기 등은 대부분 ASME 코드 규정을 근거로 하고있다.

최근까지 원자력 발전소의 ASME 코드 등급 1,2,3 기기들은, 발전소 안전성에 차지하는 이들 기기들의 비중에 상관없이 ASME 코드 요건을 동일하게 적용 받아 왔었다. 그런데, 미국에서는 최근 확률론적 안전성 평가(probabilistic safety assessment: PSA) 방법을 이용한 원자력 발전소의 위험도(risk)를 평가한 결과, IST 대상 기기들 모두가 발전소 안전성에 중요한 것은 아니다 라는 사실을 알게되었다[ 2 ]. 위험도 정보를 이용한 IST란 확률론적 방법과 결정론적 방법을 이용해 현재의 IST 요건을 변경하거나 새롭게 설정하는 것이다. 위험도 정보를 이용한 IST의 요건은 현재의 IST 대상 기기 뿐만 아니라 IST 대상 기기가 아니지만 발전소 안전성에 중요한 것으로 판단된 기기들에게도 적용된다[ 3 ].

위험도 정보를 이용한 IST에 관한 기존연구에는 위험도 정보를 이용한 IST 방법론의 개발과 원자력발전소에 대한 실제적인 적용, 최적화된 시험주기나 시험방법의 변경, 그리고 중요도 순위화와 관련된

사항이었다[ 2, 4, 5 ].

본 논문에서는 울진 원자력 발전소 3,4호기 PSA 모델에서 고려된 IST 대상 기기들의 중요도를 순위화한 예비 분석결과를 기술하였다. 또한 발전소 안전성에 중요하게 기여하지 않는 IST 대상 기기들의 시험주기 변화에 따른 위험도 평가 결과를 기술하였다.

## 2. 위험도 정보를 이용한 IST 방법

### 2.1 위험도 정보를 이용한 IST 절차

ASME에서 개발한 위험도 정보를 이용한 IST 과정은 기기들을 발전소 안전성 중요 정도에 따라 순위를 정하는 중요도 순위화, 중요 정도에 따라 분류된 기기들에 대한 IST 프로그램 즉, 시험 절차 변경과 새로운 또는 별도의 시험 절차의 개발과, 그리고 IST 프로그램 실행으로 되어있다[ 6 ]. 프로그램 실행 중에 얻어지는 결과와 교훈들은 다시 전 과정에 반영한다. 기기들의 순위화는 안전성에 중요한 정도에 따라, 좀더 안전성에 중요한(more safety significant component: MSSC) 기기와 좀 더 안전성에 덜 중요한(less safety significant component: LSSC) 기기로 분류한다. 이러한 분류 작업은 PSA와 결정론적 평가 방법을 이용한다.

발전소 안전성에 대한 기기들의 중요도 순위화는 먼저 1단계 내부사건의 PSA 결과인 노심손상빈도에 대한 기기들의 Fussel-Vesely(FV) 중요도를 사용해 평가한다[ 6 ]. 두번째로는 PSA가 포함하는 불확실성을 완화시키기 위해 민감도 분석을 수행한다. 마지막으로, IST와 관련된 전문가들 즉, PSA, IST, 발전소 운전 또는 안전 담당자들이 모여 정량적이고 결정론적인 데이터를 사용해 MSSC와 LSSC로 분류한다.

본 논문에서는 기기 분류시 PSA 방법만을 사용하였으며, 분석 범위는 위에서 언급한 첫번째 항목과 두번째 항목중 일부분이다.

### 2.2 중요도 정의

원자력 발전소의 위험도, 즉 노심손상 빈도나 대량 초기방출 빈도에

대한 기기들의 중요도 척도로 많이 사용되고 있는 것은 Fussel-Vesely(FV) 중요도와 위험도 달성 가치(risk achievement worth: RAW)이다. 위험도 감소가치(risk reduction worth)도 보조적으로 사용되고 있다. 이들 각각에 대한 정의는 아래와 같다[ 5 ];

$$FV = [R_0 - R_i(-)] / R_0 = 1 - R_i(-) / R_0 = 1 - 1/RRW,$$

$$RRW = R_0 / R_i(-) = 1/(1-FV),$$

$$RAW = R_i(+)/R_0,$$

FV 중요도: 전체 위험도에 대한 특정 기기를 포함한 사고경위의 위험도

RAW: 전체 위험도에 대한 특정기기가 이용불능할 때의 위험도 비

RRW: 특정 기기가 이용가능할 때의 위험도에 대한 전체 위험도 비

$R_0$  = 기본 위험도,

$R_i(+)$  = 기기 i가 고장시 증가된 위험도,

$R_i(-)$  = 기기 i가 완벽 작동시 감소된 위험도

### 3. 위험도 정보를 이용한 IST 방법의 울진 3,4 호기에의 적용

울진 원자력 발전소 3,4호기 1단계 PSA 모델을 이용하여 IST 대상 기기들의 중요도를 분석하였다. 울진 3, 4호기 각각의 발전소마다 IST 대상기기는 밸브가 516개, 펌프가 40개로 밝혀졌다[ 7 ]. 이들 IST 대상 기기중 울진 3,4호기 1단계 내부사건 PSA에 모델링된 것은 밸브가 193개, 펌프가 22개이다[ 8 ]. 울진 3,4호기 PSA에 모델링된 기기중에는 IST 대상이 아닌 밸브와 펌프도 있다. 본 논문에서는 울진 3,4호기 PSA에 모델링된 기기들만의 중요도를 분석하여 MSSC와 LSSC로 분류하였다. 일반적으로 PSA에 모델링이 안된 IST 대상 기기들은 잠재적으로 LSSC로 분류한다.

#### 3.1 기기 중요도 분석

중요도분석 결과를 이용해 기기를 MSSC와 LSSC로 나누는 뚜렷한 기준은 현재 설정돼 있지 않다. 본 연구에서는 FV 중요도와 RAW의 등급을 다음과 같이 나누었다;

FV 중요도  
 A:  $FV > 0.01$   
 B:  $0.01 > FV > 0.001$   
 C:  $FV < 0.001$

RAW  
 A:  $RAW > 100$   
 B:  $100 > RAW > 10$   
 C:  $10 > RAW > 2$   
 D:  $RAW < 2$

위의 등급 기준과 참고문헌 [ 3 ]과 [ 6 ]을 토대로 PSA 결과를 이용한 MSSC의 분류기준을 표 1과 같이 만들었다. 분류대상 기기들에 대한 분류 기준은 왼쪽에 있는 항목부터 적용하는데 각각의 항목중 임의의 항목 1개에 해당되면 MSSC로 분류한다. 적용 대상은 단일(single) 고장 사건뿐만 아니라 공통원인 고장(CCF) 사건도 포함된다. 표 1에서 CA\*와 CB\*는 각각 공통원인 고장 사건을 나타내는 것으로 FV 중요도 또는 RAW 가 A등급 또는 B 등급을 나타낸다;

표 1. 기기 중요도 분류 기준

category	basic FV	basic RAW	basic FV and basic RAW	without CCF-FV	without recovery-FV
MSSC	A,B, CA*, CB*	A, CA	FV(C or CC*) and RAW(B or CB*)	A, B	A, B, CA*, CB*

울진 3,4호기 PSA에 모델링된 밸브들에 대한 일차적인 중요도분석 결과, MSSC로 판명된 밸브는 108개, LSSC로 판명된 밸브는 190개였다. 가동중 시험 대상이 아닌 밸브 중 MSSC는 8개, LSSC는 113로 판명되었다. 표 2에 표1의 중요도 기준에 해당되는 밸브 수가 나타나 있다.

표 2. 분류기준에 따른 MSSC 밸브 수

basic FV: single	basic FV: CCF	basic RAW: single	basic RAW: CCF	without CCF-FV	without recovery - FV: single	without recovery - FV: CCF
13	56	2	32	2	3	0

펌프에 대한 일차적 중요도분석 결과 MSSC로 판명된 펌프는 10개, LSSC로 판명된 펌프는 12개였다. 가동중 시험 대상이 아닌 펌프는 MSSC가

1개, LSSC는 8개로 판명되었다. 표 3에 표1의 중요도 기준에 해당되는 펌프 수가 나타나 있다.

표 3. 분류기준에 따른 MSSC 펌프 수

basic FV: single	basic FV: CCF	basic RAW: single	basic RAW: CCF	without CCF - FV	without recovery - FV: single	without recovery - FV: CCF
10	1	0	0	0	0	0

IST 대상 기기는 아니지만 MSSC로 판단된 기기들에 대해서는 발전소의 안전성 향상을 위해 이들 기기들의 현 시험 절차나 방법보다 강화된 시험절차나 방법을 마련해야 될 것으로 판단된다.

최종 분석 결과는 외부사건 PSA나 대량 초기방출 빈도에 대한 기기 중요도 분석과 같은 다른 민감도 분석과 함께 IST 관련 전문가들의 의견을 토대로 정해져야 할 것이다.

### 3.2 시험주기 변화에 대한 노심손상 빈도 평가

울진 3,4호기 PSA에 모델링된 IST 대상 기기중 LSSC로 판명된 밸브들에 대해 시험주기 연장 정도를 파악하였다. 이를 위해 시험주기 변화에 대한 울진 3,4호기의 노심손상 빈도를 계산하였다. 표 4에 계산결과가 나타나 있다. 현 시험주기를 2배, 3배로 증가시킬 경우 노심손상 빈도는 각각 약 0.3%, 0.7%씩 증가하였다. 발전소 안전성에 덜 중요한 것으로 판명된 밸브들의 시험주기는 3배까지 연장하여도 노심손상 빈도 증가는 1%미만이기 때문에 현 시험주기의 3배까지 연장이 가능한 것으로 판단된다.

표 4. 시험주기 변화에 따른 노심손상 빈도 변화

기본안	시험주기 2배	시험주기 3배	시험주기 5배	시험주기 10배
8.247E-6(/yr)	8.273E-6(/yr)	8.302E-6(/yr)	8.367E-6(/yr)	8.57E-6(/yr)
1,	1.003, 0.3%	1.007, 0.7%	1.015, 1.5%	1.04, 3.92%

실제적인 시험주기 연장을 위해서는 시험주기 연장으로 인한 대량

초기방출 빈도를 평가하여야 한다[ 3 ]. 아울러 시험주기 완화 대상 기기들의 현 시험 방법과 절차에 대한 검토와 시험주기를 늘렸을 경우 발생될 수 있는 문제점을 파악하고 이에 대한 보완조치를 마련한 후에 최종적으로 결정해야 될 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 위험도 정보를 이용하여 울진 원자력 발전소 3,4호기 IST 대상 기기들 중 울진 PSA 모델에 고려된 기기들에 대해 안전성에 더 중요한 기기와 덜 중요한 기기로 분류하였다. 분류결과, 발전소 안전성에 중요한 기기에는 IST 대상이 아닌 기기도 있는 것으로 나타났다. 또한 안전성에 덜 중요한 기기로 판명된 IST 대상 기기들에 대해 시험주기 변경과 이에 대한 노심손상빈도를 계산하였다. 계산결과 안전성에 덜 중요한 것으로 판명된 기기들의 현 시험주기는 발전소의 위험도를 크게 증가시키지 않으면서 3배까지 확장 가능한 것으로 나타났다.

위험도 정보를 이용한 IST 방법을 조속히 원자력 발전소 운영에 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 즉, 발전소 안전성에 덜 중요한 기기들에 대해서는 현재의 IST 요건을 완화하고, IST 대상이 아니지만 발전소 안전성에 중요하다고 판단되는 기기들에 대해서는 현 시험 요건을 강화할 필요가 있다. 그렇게 함으로써 사업자는 지금보다 더 경제적이고 안전한 발전소 운영을 할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 원자력 발전소를 규제하는 규제자 또한 발전소의 안전성에 대한 규제 업무를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

앞으로 연구가 더 필요한 사항은 외부사건 PSA와 2단계 PSA를 이용한 기기들의 중요도분석과, 초기사건과 정지냉각 운전, 그리고 비상 운전 절차서와 관련된 기기들의 영향 평가이다. 또한 최종적으로 수행되는 전문가 의견의 기기 중요도 분류시 고려되는 사항과 과정들을 파악하고 이것을 기기 분류에 적용하는 것이다. 세부적으로는 기본사건의 중요도를 이용해 기기 중요도를 계산하는 프로그램의 개발, PSA 결과를

이용한 기기 분류에 대한 기준, 이전에 발생했던 기기들의 고장에 대한 데이터베이스 구축 등이다.

### 참고문헌

1. 류용호 외, “안전관련 기기 가동중 시험”, 제 3회 원자력 안전기술 정보회의, 한국원자력안전기술원, 1997
2. C.W. Rowley, “Risk-Based In-service Testing Pilot Project”, EPRI TR-105869, 1995
3. “ An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisionmaking: Inservice Testing”, Draft Regulatory Guide DG-1062, 1997
4. E.T Burns, C.D. Sellers, and G.A. Krueger, “Risk Informed Decisions: IST Intervals using a Blended Approach”, PSA’96, 1996
5. W.E. Vesely, “The Use of Importances for Risk-Based Applications and Risk-Based Regulations”, PSA’96, 1996
6. C. Wesley Rowley, “Risk-Ranking IST Components Into Two Categories”, NUREG/CP-0152, N.R.C, 1996
7. “울진 3,4호기 안전등급 펌프 및 밸브 가동중 시험 계획서”, 1998, 한국전력 공사
8. “ Ulchin 3,4 Final Probabilistic Safety Assessment Report”, KEPCO, 1998