

'98 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

위험도 정보를 이용한

가동중시험 방법의 울진 3,4호기 적용

Applications of Risk-Informed Inservice Testing Methodology to Ulchin Units 3 & 4

강대일, 김길유, 진영호

한국 원자력연구소

요 약

위험도정보이용 가동중시험 방법론을 울진 3,4호기에 부분적으로 적용하였다. 현재 울진 3,4호기 1단계 내부사건 PSA에는 가동중시험 대상 밸브의 38%, 펌프의 55%가 모델링돼 있다. 가동중 시험대상 밸브의 22%, 펌프의 20%가 발전소 안전성에 매우 중요한 기기로 판명되었다. 가동중시험 대상이 아닌 기기중 발전소 안전성에 매우 중요한 밸브 수는 8개, 펌프는 1개로 판명되었다. 가동중시험 대상 밸브중 발전소 안전성에 중요하지 않은 기기로 판명된 밸브들의 시험주기 변경에 따른 노심손상빈도를 평가하였다. 평가결과 안전성에 덜 중요한 것으로 판명된 밸브들의 시험주기를 3배까지 증가시켜도 울진 3,4호기의 노심손상빈도 증가는 1%미만으로 나타났다.

Abstract

Risk informed inservice testing(IST) methodology was partly applied to Ulchin Units 3 & 4. Currently 38% of the IST valves and 55% of the IST pumps are modeled in the Level 1 internal Probabilistic Safety Assessment(PSA) for Ulchin Units 3 & 4. 22% of the IST valves and 20% of the IST pumps are classified as more safety significant components(MSSCs). 8 of non-IST valves and 1 of non-IST pumps are also identified as MSSCs. New core damage frequency was calculated by changing the IST interval of less safety significant(LSS) valves. The calculation results showed that the IST interval of LSS valves can be increased up to 3 times of current IST interval with less than 1% increase of core damage frequency.

1. 서론

원자력발전소는 발전소의 안전성 확보를 위해 안전계통의 기기(component)들을 가동중에 주기적으로 시험하고 있다. 시험 대상은 주로 안전등급 1,2,3급의 밸브나 펌프 등으로서, 원자력 발전소를 안전하게 정지시키거나 정지상태를 유지시키는 또는 사고를 완화시키는 기능과 관련돼 있는

기기들이다[1]. 시험 항목은 주로 펌프의 경우 압력, 유량, 속도, 차압, 진동 등이고, 밸브는 누설, 작동, 위치확인, 특수시험 등이다. 국.내외 원자력 발전소의 안전성 관련 기기들에 대해 수행되는 가동중시험(Inservice Testing: IST)의 요건 및 주기 등은 대부분 미국 기계학회(The American Society of Mechanical Engineers: ASME)에서 정해진 ASME 코드 규정을 근거로 하고있다.

최근까지 원자력 발전소의 안전 등급 1,2,3 기기들은, 이들 기기들이 발전소 안전성에 차지하는 비중 정도에 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 중요하지 않고 IST 대상이 아닌 기기들도 발전소 안전성에 중요할 수 있다는 사실이 밝혀졌다[2]. 또한 IST 대상 밸브중 약 70 ~ 75%, 펌프는 10 ~ 50% 가 발전소 안전성에 중요하지 않다는 것이 밝혀졌다. 미국의 원자력 규제위원회에서는, IST 대상이 아닌 기기일지라도 안전성에 중요한 기기로 판명된 것은 현재의 시험요건보다 강화된 시험 요건을 확립하고, IST 대상 기기이지만 안전성에 별로 중요치 않은 기기들은 현 시험요건을 완화할 수 있다는 규제 지침 초안을 1997년에 발표하였다[3]. 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 기존의 연구를 살펴보면 크게 위험도 정보를 이용한 IST 방법론의 개발과 원자력발전소에 대한 실제적인 적용, 최적화된 시험주거나 시험방법의 변경, 그리고 중요도 순위화와 관련된 사항이었다[2, 4, 5, 6]. 본 논문에서는 위험도 정보이용 가동중시험의 예비적인 연구로 올진 원자력 발전소 3,4호기 PSA 모델에서 고려된 IST 대상 기기들 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 그림 1에 나타나 있듯이 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[7]. 이때 프로그램 실행으로 얻어지는 결과와 교훈을 다시 전 과정에 반영한다.

기기들의 순위화는 기기들이 발전소의 안전성에 기여하는 따라, 좀더 안전성에 중요한(more safety significant components: MSSCs) 기기와 좀 더 안전성에 덜 중요한(less safety significant components: LSSCs) 기기로 분류한다. 이러한 분류 작업은 PSA와 결정론적 평가 방법을 이용한다. 두 그룹으로 나누어진 기기들에 대해서는 새로운 IST 프로그램을 개발해 실행한다. MSSCs와 LSSCs에 대한 IST 프로그램 목적은 다르다. MSSCs의 IST 프로그램 목적은 기기의 고장을 탐지하고 고장 선행자(failure

precausor)의 중요 조건을 탐지한다. 그러나 LSSCs의 IST 프로그램 목적은 LSSCs가 발전소 안전성에 기여하는 영향이 적기 때문에 기기 고장만을 탐지한다.

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 위한 민감도 분석을 수행한다. 민감도 분석항목은 PSA에서 일반적으로 다루어지는 민감도분석 항목이외에 다음과 같은 항목을 수행한다[2, 3, 6];

- 1) 기기들의 위험도 달성가치(risk achievement worth: RAW) 분석,
- 2) 공통원인고장 고려 유무와 회복행위 고려 유무에 대한 기기들의 FV 중요도 분석
- 3) 외부사건 노심손상빈도에 대한 기기들의 FV 중요도 분석
- 4) 정지사건 노심손상빈도에 대한 기기들의 FV 중요도 분석
- 5) 대량초기 방출사고(large early release frequency)에 대한 기기들의 FV 중요도 분석

마지막으로, IST와 관련된 전문가들 즉, PSA, IST, 발전소 운전 또는 안전 담당자들이 모여 정량적이고 결정론적인 데이터를 사용해 MSSCs와 LSSCs로 분류한다.

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

2.2 중요도

PSA 결과를 이용하여 발전소 안전성에 대한 기기들의 중요 정도를 분류하는데 사용되는 것은 Fussel-Vesely(FV) 중요도와 위험도 달성 가치(risk achievement worth: RAW)이다. 위험도 감소가치(risk reduction worth: RRW)도 보조적으로 사용되고 있다. 이들 각각에 대한 정의는 아래와 같다[5];

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

$$RRW = R_o / R_i(-) = 1/(1-FV)\dots\dots\dots(식 2)$$

$$RAW = R_i(+)/ R_o \dots\dots\dots(식 3)$$

FV 중요도: 전체 위험도에 대한 특정 기기를 포함한 사고경위의 위험도

RAW: 전체 위험도에 대한 특정기기가 이용불능할 경우의 위험도 비

RRW: 특정 기기가 이용가능할 경우의 위험도에 대한 전체 위험도 비

R_o : 기본 위험도,

R_i(+): 기기 i가 고장시 증가된 위험도,

R_i(-): 기기 i가 완벽 작동시 감소된 위험도

엄밀한 의미에서 어떤 기기가 발전소 안전성에 중요(safety significant)하다는 의미와 위험도에 중요(risk significant)하다는 의미는 서로 다르다[6]. 위험도 정보이용 IST에 대한 규제지침 초안에서는 이 두가지의 의미를 동일한 의미로 사용하고 있다[3]. 발전소의 위험도에 중요한 기기 파악은 FV 중요도를, 안전성에 중요한 기기 파악은 RAW를 이용한다.

PSA에서 사용되는 전산코드를 이용하여 노심손상빈도나 대형 초기 방출사고에 대한 기기들의 중요도 분석시, 기기들의 고장모드(failure mode)에 대해서만 중요도를 알 수 있지 기기 자체의

표 3에는 표2의 MSSCs 기준에 해당되는 밸브 수가 나타나 있고 표 4에는 밸브 종류와 가동중시험 대상 유무에 따라 분류된, MSSCs와 LSSCs의 갯수가 나타나 있다. 울진 3,4 호기 1단계 PSA에 모델링된 밸브 317개중 MSSCs는 122개, LSSCs는 195개였다. 가동중 시험대상 밸브 196개중 MSSCs는 114개, LSSCs는 82개로 판명되었다. 가동중 시험 대상이 아닌 밸브 121개 중 MSSCs는 8개, LSSCs는 113로 판명되었다.

표 5에는 표2의 MSSCs 기준에 해당되는 펌프 수가 나타나 있고 표 6에는 계통 펌프 종류와 가동중시험 대상 유무에 따른 MSSCs와 LSSCs 숫자가 나타나 있다. 울진 3,4호기 1단계 PSA에 모델링된 펌프 31개중 MSSCs는 11개, LSSCs는 20개였다. 가동중시험 대상 펌프 22개중 MSSCs는 10개, LSSCs는 12개로 판명되었다. 가동중 시험 대상이 아닌 펌프 9개중 MSSCs는 1개, LSSCs는 8개로 판명되었다.

표 7에는 울진 3,4호기와 울진 3,4호기와 동일 노형(reactor type)인 Palo Verde 발전소에 대해 위험도 정보 이용 가동중시험 방법론을 적용한 결과가 나타나 있다. IST 대상 기기중 PSA에 모델링된 있는 기기는 울진 3,4호기의 경우 밸브는 38%, 펌프는 55%로 나타났고, Palo Verde 발전소의 경우 밸브는 34%, 펌프는 67%로 나타났다. 가동중시험 대상 밸브와 펌프중 MSSCs의 비율은 울진 3,4호기가 22%와 20%로, Palo Verde 발전소는 27%와 69%로 나타났다. 울진 3,4호기는 1단계 PSA만을 사용했기 때문에 추후 외부사건과 2단계, 정지운전 PSA와 전문가 의견을 이용해 기기를 분류하면 보다 많은 기기들이 MSSCs로 분류될 것이다.

기기분류시 적용하는 FV 중요도 및 RAW 기준 값, 그리고 이 중요도 값의 조합에 대한 기준은 현재 뚜렷하게 정해져 있지 않다. FV 중요도 기준 값에 대해 ASME[7]에서는 0.001로, 미국 전력연구원(EPRI)[11]에서는 0.005로 설정하고 있다. IST 대상 기기는 아니지만 MSSCs로 판단된 기기들에 대해서는 발전소의 안전성 향상을 위해 이들 기기들의 현 시험 절차나 방법보다 강화된 시험절차나 방법 또는 시험방법이 없으면 새로운 시험절차를 마련하는 것이 바람직한 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 LSSCs로 판명된 밸브들의 시험주기 연장이 노심손상 빈도에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 시험주기 연장에 따른 기기 이용불능도는 아래의 이용불능도 모델을 사용하였다;

$$q_T = q_D + \lambda * T / 2 \dots \dots \dots (식 6)$$

여기서, q_D 는 요구시 고장이고, λ 는 대기중 고장율(standby-time failure rate), T는 시험구간이다. 기기 이용불능도 계산시 아래와 같은 가정을 하였다;

- 1) 고장율 λ 는 시간에 따라 변하지 않고 일정하다.
- 2) 시간에 따른 기기의 자연적인 노화효과(aging effect)와 감시시험으로 인한 노화 효과는 고려하지 않는다.
- 3) 시험이 끝날때 기기는 완전히 재생된다고 가정한다.

4) 시험기간이 늘어날 경우 요구시 고장 확률과 시간에 따른 고장 확률은 선형적으로 증가한다.

표 8에 LSSCs로 판명된 밸브들의 시험주기 연장에 따른 노심손상빈도 비의 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 시험주기를 3배까지 연장하여도 노심손상 빈도 증가는 1%미만이기 때문에 현 시험주기의 3배까지 연장이 가능한 것으로 판단된다. 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 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 이에 대한 보완조치를 마련한 후에 최종적으로 결정해야 될 것이다.

4. 결론

최근 미국에서 활발하게 수행되고 있는 위험도정보이용 가동중시험 방법론을 올진 3,4호기에 부분적으로 적용하였다. 현재 올진 3,4호기 1단계 내부사건 PSA에는 가동중시험 대상 밸브의 38%, 펌프의 55%가 모델링돼 있다. 가동중 시험대상 밸브의 22%, 펌프의 20%가 발전소 안전성에 매우 중요한 기기로 판명되었다. 가동중시험 대상이 아닌 기기중 발전소 안전성에 매우 중요한 밸브 수는 8개, 펌프는 1개로 판명되었다. 가동중시험 대상 밸브중 발전소 안전성에 중요하지 않은 기기로 판명된 밸브들의 시험주기 변경과 이에 따른 노심손상빈도 변화를 평가하였다. 평가결과 안전성에 덜 중요한 것으로 판명된 밸브들의 시험주기를 3배까지 증가시켜도 노심손상빈도 증가는 1%미만으로 나타났다.

위험도 정보를 이용한 가동중시험 방법을 조속히 원자력 발전소 운영에 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 즉, 발전소 안전성에 덜 중요한 기기들에 대해서는 현재의 가동중시험 요건을 완화하고, IST 대상이 아니지만 발전소 안전성에 중요하다고 판단되는 기기들에 대해서는 현 시험 요건을 강화할 필요가 있다. 그렇게 함으로써 사업자는 지금보다 더 경제적이며 안전한 발전소 운영을 할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 원자력 발전소를 규제하는 규제자 또한 가동중시험 검사 업무를 발전소의 안전성에 중요한 기기들을 중심으로 수행함으로써 효과적인 규제활동을 할 수 있을 것으로 기대된다.

앞으로 연구가 더 필요한 사항은 기기를 분류하는 기준 값의 변동에 따른 분석, 외부사건 PSA와 2단계 PSA 등을 이용한 기기들의 중요도분석과, 초기사건과 정지냉각 운전, 그리고 비상 운전 절차서와 관련된 기기들의 영향 평가이다. 또한 기기 중요도 분류에서 최종적으로 수행되는 전문가 의견의 과정을 파악하고 이를 적용하는 것이다. 세부적으로는 기기들의 기본사건에 대한 중요도를 이용해 기기 중요도를 계산하는 프로그램의 개발, 이전에 발생했던 기기들의 고장에 대한 데이터베이스 구축, 그리고 가동중시험 전략을 평가하기 위한 요소를 파악하고 평가를 위한 모델 개발과 프로그램의 개발 등이다.

감사의 글

논문 작성시 자료 협조에 도움을 주신 한전의 영광 2 발전소와 울진 2 발전소의 가동중시험 담당자 분과 한상훈씨에게 감사의 말을 전합니다. 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

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. U.S. NRC, “ 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. M. C. Cheok, G.W. Parry, and R.R Sherry, “Use of Importance Measures in Risk-Informed Regulatory Applications”, Reliability Engineering and System Safety, page 213-226, Vol. 60, 1998
7. C. W. Rowley, “Risk-Ranking IST Components Into Two Categories”, NUREG/CP-0152, N.R.C, 1996
8. Ian B. Wall and David H. Worledge, “Some Perspectives on Risk Importance Measures”, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA 96, ANS, 1996
9. “울진 3,4호기 안전등급 펌프 및 밸브 가동중 시험 계획서”, 1998, 한국전력 공사
10. “Ulchin 3,4 Final Probabilistic Safety Assessment”, KEPCO, 1998
11. EPRI, “PSA Application Guide”, EPRI/TR-105396, 1995

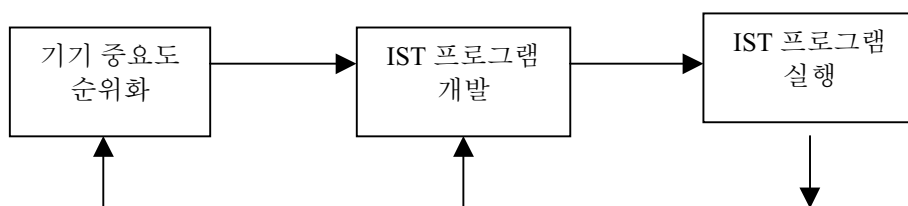


그림 1 위험도 정보이용 IST 절차

표 1. FV 중요도와 RAW의 분류 등급

등급	FV 중요도	RAW
A	$FV > 0.01$	$RAW > 100$
B	$0.01 > FV > 0.001$	$100 > RAW > 10$
C	$FV < 0.001$	$10 > RAW > 2$
D		$RAW < 2$

표 2. 기기 분류 기준

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

표 3. 분류기준에 따른 MSSCs 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	46	2	3	0

표 4. 밸브 분류 결과

category	IST valves - 196	Non-IST valves - 121
MSSCs- 122	114 4 [AOV], 54 [CV], 40 [MOV], 16 [RV]	8 4 [CV], 1 [MOV], 3 [VV]
LSSCs - 195	82 6 [AOV], 19 [CV], 10 [HOV], 7 [SOV], 39 [MOV], 1 [RV]	113 11 [AOV], 25 [CV], 1 [MOV], 4 [PV], 72 [VV]

AOV: air operated valve, CV: check valve, MOV: motor operated valve, RV: safety/relief valve, HOV: hydraulic operated valve, SOV: solenoid operated valve, VV: manual valve, PV: pneumatic valve

표 5. 분류기준에 따른 MSSCs 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

표 6. 펌프 분류 결과

category	IST pumps - 22	Non-IST pumps -9
MSSCs- 11	10 2 [AF TP], 2 [AF MP], 2[HS MP], 2[LS MP], 2[CS MP]	1 1 [MF MP]
LSSCs - 20	12 4 [CC MP], 4[CW MP], 4[SW MP]	8 1[BD MP], 1[CD MP], 2[CV MP], 4 [CV RP]

TP: turbine operated pump, MP: motor operated pump, RP: reciprocating pump

표 7. 울진 3,4호기와 Palo Verde 발전소의 위험도 정보이용 가동중 시험 방법론의 적용 결과 비교

	울진 3&4 호기	Palo Verde 발전소
가동중시험 적용코드	1990년 판 ASME OM 코드	1986년 판 ASME 코드
기기분류시 사용된 PSA 범위	1단계 내부사건 PSA	1,2단계와 정지운전 PSA(내부사건만) + 전문가 판단
PSA에서 IST 대상 기기 모델링 수	밸브	516개중 196개(38%)
	펌프	40개중 22개(55%)
MSSCs 갯수 - 전체 IST 대상 중	밸브	506개중 174개(34%)
	펌프	24개중 16개(67%)
	114개 (22%)	137개(27%)
	8개 (20%)	18개(69%)

표 8. 시험주기 변화에 따른 노심손상 빈도 비 변화

기본안	시험주기 2배	시험주기 3배	시험주기 5배	시험주기 10배
1, 0%	1.003, 0.3%	1.007, 0.7%	1.015, 1.5%	1.04, 3.92%

