2002 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

위험도 정보 가동중시험 방법을 이용한 울진 3호기 역지밸브의 시험 주기 최적화 연구

A Study on the Optimization of Test Interval for Check Valves of Ulchin Unit 3 Using the Risk-informed In-Service Testing Approach

강대일, 김길유, 양준언, 하재주
한국원자력연구소

요 약

위험도 정보 가동중시험 방법을 사용해 울진 3호기 가동중시험 역지밸브의 시험주기를 최적화 하였다. 이를 위해, 울진 3호기 가동중시험 대상 역지밸브들을 발전소 안전성에 기여하는 중요도에 따라 분류하였다. 다음, 상대적으로 낮은 중요도로 판명된 역지밸브들의 시험주기 증가에 대한 위험도를 평가하여 증가 가능한 최대 시험주기를 파악하였다. 마지막으로 시험주기 증가에 대한 변경 시험횟수를 평가하였다. 연구 결과는 다음과 같다:

- 중요도 분류 결과 HSSCs는 11.48%인 24대, ISSCs는 19.14%인 40대, LSSCs는 69.38%인 462대
- 파악된 증가 가능한 최대 시험주기는 ISSCs2가 현 시험주기의 6배, LSSCs는 40배
- 시험주기 증가이후 6번의 핵연료 재장전 동안 수행해야 하는 시험 횟수는 7692에서 1333회로 82.7%감소 가능

Abstract

We optimized the test interval for check valves of Ulchin Unit 3 using the risk-informed in-service testing (IST) approach. First, we categorized the IST check valves for Ulchin Unit 3 according to their contributions to the safety of Ulchin Unit 3. Next, we performed the risk analysis on the relaxation of test interval for check valves identified as relatively low important to the safety of Ulchin Unit 3 to identify the maximum increasable test interval of them. Finally, we estimated the number of tests of IST check valves to be performed due to the changes of test interval. These study results are as follows:

- The categorization of IST check valve importance; the number of the HSSCs is 24(11.48%), the ISSCs is 40 (19.14%), and the LSSCs is 462(69.38%)
- The maximum increasable test interval; 6 times of current test interval of ISSCs2 and 40 times of that of LSSCs
- The number of tests of IST check valves to be performed during 6 refueling time can be reduced from 7692 to 1333 (82.7%).

1. 서론

위험도 정보를 이용한(risk-informed) 가동중시험(In-Service Testing: 이하 IST)은 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: 이하 PSA)와 결정론적 방법을 사용하여 기기들을 발전소 안전성에 기여하는 중요도에 따라 분류하고 분류된 기기에 따라 시험 주기나 방법 등을 달리 적용한다 [1, 2, 3, 4, 5]. 기기들의 중요도 분류는 기기들이 발전소의 안전성에 기여하는 중요도에 따라 일반적으로 높은 안전성(high safety significant components: 이하 HSSCs) 기기와 낮은 안전성(low safety significant components: 이하 LSSCs) 기기로 분류한다. 이러한 분류 작업은 PSA와 결정론적 평가 방법을 이용하여 얻어지는 기기들의 정량적/정성적 정보를 토대로 전문가 패널 (expert panel)에서 수행된다. 이후 두 그룹으로 나누어진 기기들에 맞는 IST 프로그램을 개발하여, 즉 시험 절차 변경과 새로운 또는 다른 시험 방법을 적용하여, 실행한다. 일반적으로 HSSCs의 IST 프로그램 목적은 고장을 예측하거나 성능 저하(performance degradation) 경향을 찾아내는 것이고, LSSCs의 IST 프로그램 목적은 기기 작동 준비(operability readiness) 여부를 확인하기 위해 시험을 수행한다 [2].

가동중시험 대상 기기 모두가 발전소 안전성에 주요하게 기여하는 것이 아니라는 사실이 밝혀지면서, 미국에서는 1992년부터 IST에 대한 PSA의 적용에 관심을 두기 시작하였다 [6]. 1998년 현재 위험도정보를 이용한 IST와 관련된 ASME 코드 케이스와[5] 규제 지침서가[1] 출간되었다. 위험도 정보를 이용한 IST의 발전소 적용은 위험도 정보를 이용한 기술지침서 변경(risk-informed technical specification change)이나 가동중검사(risk-informed in-service inspection)처럼 비용/이득 측면에서 발전소 사업자에게 그 효과가 크지않아 미국이나 국내에서는 아직 활발하게 수행되고 있지는 않다. 하지만 기기 중요도 분류에 대한 시범연구 [4, 6, 7, 8], 모터구동밸브 안전성 평가와 관련한 시험주기 최적화 연구 [9], 그리고 일부 발전소에서 전체 IST 대상 밸브나 특정 밸브들에 대한 시험요건 최적화 연구 등 [10, 11, 12]이 수행되어 점차 위험도 정보를 이용한 IST 연구의 관심이 제고되고 있다.

본 연구에서는 울진 3호기 IST 대상 밸브 중에 가장 많은 숫자를 차지하는 역지밸브에 대해 위험도 정보이용 IST 방법을 적용하여 울진 3호기 역지밸브의 시험주기를 최적화 하였다. 이를 위해 울진 3호기 역지밸브들을 중요도에 따라 분류하여 낮은 중요도로 파악된 역지밸브들의 시험주기를 완화시키고 이에 대한 위험도 평가와 경제성분석을 수행하였다. 현재의 역지밸브에 대한 시험방법 평가나 성능감시에 관한 연구는 수행하지 않았다. 본 논문의 2장에서는 본 연구에서 사용하는 역지밸브 중요도 분류 방법과 시험주기 변경으로 인한 역지밸브 이용불능도 평가 방법을 기술하였다. 3장에서는 역지밸브 중요도 분류 결과와 시험주기 변경에 대한 위험도 평가, 그리고 경제성 분석 결과를 기술하였다. 끝으로 4장에서는 결론을 기술하였다.

2. 방법론

이 장에서는 역지밸브 중요도 분류방법과 분류된 기기들의 시험주기 변화에 대한 위험도 평가 방법을 기술하였다.

2.1 역지 밸브 중요도 분류

위험도 정보를 이용한 규제 지침서[1, 13]와 ASME 코드 케이스[5]를 토대로 PSA를 이용한 역지밸브 중요도 분류는 원전의 위험도 (risk)를 나타내는 노심손상빈도 (core damage frequency:

CDF)와 대량조기누출빈도 (large early release frequency: :LERF)에 대한 FV(Fussel-Vesely)중요도와 위험도 달성가치 (Risk Achievement Worth: RAW)를 사용하여 수행하였다. 이들의 중요도 척도 (importance measures)에 대한 정의는 다음과 같다:

$FV=[R_o-R_i(-)]/R_o=1-R_i(-)/R_o$ ……....(식 1)

$RAW=R_i(+)/R_o$..............................(식 2)

R_o: 기본 위험도,

$R_i(+)$: 기기 i가 고장시 위험도,

$R_i(-)$: 기기 i가 완벽 작동시 위험도

표 1에 나타난 것처럼 FV 중요도와 RAW 값에 따라 역지 밸브들을 3가지 즉, HSSCs (High Safety Significant components), ISSCs (Intermediate Safety Significant components), LSSCs (Low Safety Significant components)로 분류하였다. ISSCs는 다시 RAW> 2이고, 0.005 > FV > 0.001로 평가된 역지밸브는 ISSCs1으로, RAW> 2 이고 FV < 0.001로 평가된 역지밸브는 ISSCs2로 분류하였다.

표 1. PSA를 이용한 역지밸브 중요도 분류 기준

역지밸브 중요도 분류 범주	중요도 값 범위	
	FV 중요도	위험도 달성가치(RAW)
HSSCs	FV{CDF} or FV{LERF} > .005	모든 기기
ISSCs	FV{CDF} and FV{LERF} < .005	RAW{CDF} or RAW{LERF} > 2.0
LSSCs	FV{CDF} and FV{LERF} < .005 or Truncated Components	RAW{CDF} and RAW{LERF} < 2.0 or Truncated Components

본 연구에서 수행된 역지밸브 중요도 분류 과정이 그림 1에 나타나 있다 [4, 7, 11]. 역지밸브 중요도 분류는 먼저 PSA를 이용하여 역지밸브들의 노심손상빈도 (core damage frequency: CDF)와 대량조기누출빈도 (large early release frequency: LERF)에 대한 FV 중요도와 위험도 달성가치를 평가한 후, 노심손상빈도의 FV 중요도와 위험도 달성가치에 대한 민감도분석을 수행하였다. 또한 외부사건 PSA, 정지/저출력 운전 PSA, 초기사건 분석 결과도 검토하였다 [14, 15]. PSA를 통해 ISSCs나 LSSCs로 분류된 역지 밸브에 대해서는 단순화된 고장모드 영향분석 (simplified failure modes and effect analysis)을 수행하여 이들 밸브들이 HSSCs가 아님을 확인하였다. 이를 위해 배관계측도(P&ID)와 안전성 평가 보고서 등의 검토, 발전소 직원이나 설계자 등의 면담 등을 수행하였다.

PSA에 모델이 안된 역지밸브의 중요도 분류는 밸브 고장과 관련된 초기사건 또는 계통 등의 FV 중요도와 위험도 달성가치로부터 구해진 정량적인 정보와 배관계측도(P&ID)와 안전성 평가 보고서 등의 검토, 발전소 직원이나 설계자 등의 면담 등을 통해 얻어진 정성적 정보와 PSA 전문성 (expertise)에 근거한 공학적 판단 (engineering judgment)에 의해 수행하였다. 울진 3호기는 운전 경험이 짧기 때문에 역지밸브에 대한 운전이력 검토는 본 연구에서 수행하지 않았다.

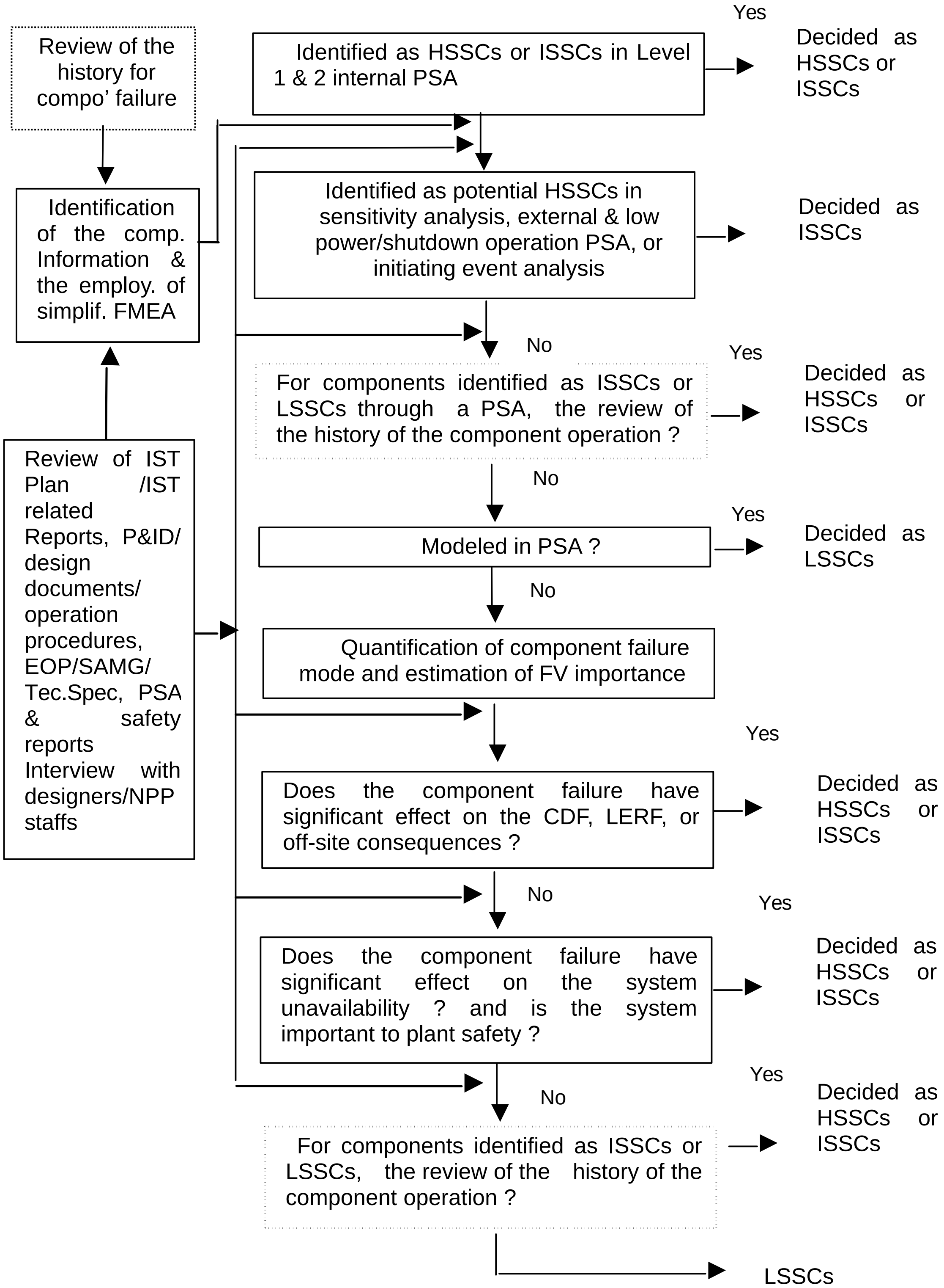

그림 1. 종합적인 역지밸브 중요도 분류 과정

참고문헌에 [4, 5, 11, 13] **따라** PSA**를 이용한 중요도 분류에 대한 민감도분석 항목은 다음과 같이 선정하였다**;

- **공통원인고장**
  - ■ **사건 분석에 불확실성이 크기 때문에 공통원인고장으로 인해 단일사건의 중요성이 감소되는 것을 방지하기 위해 공통원인고장 사건을 고려하지않고 중요도 분석 수행**

- 역지밸브 공통원인고장 확률값이 작은 것으로 판단되기에 공통원인고장 확률을 10배로 증가시켜 중요도 분석 수행
- 고장율: HSSCs가 아닌 기기의 고장율 분포의 95% 값을 사용해 중요도 분석 수행.
- 시험과 정비: 역지밸브에는 시험과 정비에 관련된 사건이 모델링되 있지 않아 별도의 민감도 분석을 수행하지 않았음
- 회복행위: 역지밸브에 대해 회복행위를 고려하지 않았기 때문에 모델링하지 않았음

중요도 분석시, 단일고장사건(single failure event)과 공통원인고장사건(CCF)의 중요도 분석 결과는 별도로 다루었다. 이는 공통원인고장 사건에 불확실성이 많기 때문이다. 분석시 사용한 절단치는 1.0×10^{-11}이고 사용 전산 코드는 KIRAP[16]이었다.

PSA에 모델링이 안된 역지밸브의 중요도에 대한 정량적인 정보는 다음과 같은 절차를 통해 구했다 [4, 7, 11]:

- 단순 고장모드 영향분석 (simplified failure modes and effects analysis)을 수행하여 역지밸브 고장이 원전의 안전성에 가장 심한 영향을 줄 수 있는 고장모드와 그 고장 모드와 관련된 초기사건이나, 계통 등을 파악
- 파악된 역지밸브의 고장모드에 대한 정량적 평가 결과를 밸브 고장과 관련된 초기사건이나 계통 등의 FV 중요도로 부터 구해진 중요도 분류 기준치와 비교하여 밸브 중요도를 평가
- 역지밸브의 FV 중요도 기준치는 기기 이용불능도와 FV 중요도가 비례한다는 전제아래 다음의 식을 사용하여 평가하였다:

  $X_{CRI}(i)=X(i)*CRI / FV(X(i))$……..(식 3)

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

  $X_{CRI}(i)$: 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 HSSCs 기준되는 값(0.005)

위험도 달성가치는 기기 이용불능도보다 기기 고장과 연관된 논리수목 구조(logic tree structure)에 직접적으로 의존하고 기준치를 구하기가 용이하지 않기 때문에 정량적 기준치를 구하지 않았다. 평가 대상 역지밸브에 대한 위험도 달성가치는 역지밸브 고장과 관련 있는 계통 실패나 초기사건 발생을 일으키는 논리구조와 이들 계통 실패나 초기사건 발생에 대한 위험도 달성가치를 검토하여 간접적으로 평가하였다.

PSA에 모델링 안 된 역지밸브의 중요도 분류의 최종 결정은 역지밸브에 대한 정량적 정보와 정성적 정보, 그리고 PSA의 전문성을 토대로 공학적 판단에 의해 수행하였다. 역지밸브 중요도에 대한 정량적 정보는 (식 3)과 역지밸브와 관련된 계통이나 초기사건의 위험도 달성가치 값으로 구할 수 있다. 하지만, (식 3)에 의한 얻어지는 FV 중요도는 정확하지 않고 위험도 달성가치 값은 간접적으로 추정된다. PSA에 모델링 된 역지밸브들 처럼 정확한 FV 중요도와 RAW 값을 구할 수

없기 때문에 PSA에 모델링이 안된 역지밸브들의 중요도에 대한 정량적 정보는 역지밸브 중요도 분류시 참고적으로 사용된다. 역지밸브 중요도의 정성적 정보는 설계문서, P&ID, 안전 관련 문서 등의 검토와 설계자와 원전직원과의 면담을 통해 구했다.

2.2 시험주기 변경으로 인한 이용불능도

밸브와 같은 기기들을 고장수목에 모델링할 경우 일반적으로 고려되는 고장모드는 요구 시 고장(failure on demand)과 대기중의 고장(standby failure)이다. 이를 표현하면 (식4)와 같다:

$q_T = q_D + \lambda * T/2$ ....…………………(식 4)

여기서, q_D는 요구 시 고장이고, λ는 대기중 고장률(standby-time failure rate), T는 시험간격 (test interval) 또는 시험주기 (test period) 이다.

(식 4)에서 밸브의 경우는 대부분 요구시 고장만 모델링 되어 있거나 대기중 고장만이 모델링 되어있다. 본 연구에서는 참고문헌 [17]에 따라 시험주기가 증가하면 기기 이용불능도 역시 비례해 증가한다고 가정한다. 즉, 시험 기간을 3배로 증가 시킬 경우 대기중 고장이나 요구 시 고장으로 인한 기기 이용불능도는 3배가 된다. 이러한 결과는 대기중 고장률과 요구 시 고장률이 일정하다는 등의 여러 가지 가정사항을 근거로 하고 있다. 역지 밸브의 고장모드는 주로 개방요구시 열림 실패 (fail to open), 닫힘 요구시 닫힘 실패 (fail to close), 이송 닫힘 (transfer closed), 역 누설 (reverse leakage)이 있다. 이들 고장모드를 다시 분류하면 요구시 고장과 관련된 것이 열림 실패와 닫힘 실패가 있고, 닫힘 고착과 역 누설은 시험주기와 관련이 있다. 위에서 언급한 사항을 바탕으로 본 연구에서는 역지밸브의 시험주기 증가로 인한 기기 이용불능도 계산시 다음과 같은 가정을 하였다:

- 시험기간이나 시험주기가 늘어날 경우 요구시 기기 고장 확률과 대기중 고장 확률은 선형적으로 증가한다.
- 고장율 λ는 시간에 따라 변하지 않고 일정하다.
- 시간에 따른 기기의 자연적인 노화효과(aging effect)와 감시시험으로 인한 노화 효과는 고려하지 않는다.
- 시험이 끝날때 기기는 완전히 재생된다고 가정한다.

3. 분석 결과

이 장에서는 역지밸브 중요도 분류 결과와 시험주기 변경으로 인한 위험도 평가와 시험횟수 평가 결과를 기술하였다.

3.1 중요도 분류 결과

울진 3호기 가동중시험 대상 역지밸브 209대 중 울진 3,4 PSA에 모델링된 84대의 밸브에 대해 1,2단계 내부사건 PSA를 이용하여 역지밸브 중요도를 분류하였다 [14, 18]. 또한 1단계 내부사건 PSA에 대한 민감도 분석도 수행하였다. PSA를 이용한 84대의 역지밸브 중요도 분류결과는 다음과 같다;

- HSSCs는 28.57%인 24대. 24대의 HSSCs는 1단계 내부사건에서 14대, 2단계 내부사건에서 10대.
- ISSCs은 40.47%인 34대, ISSCS1은 10대, ISSCs2는 24대
- LSSCs는 30.95%인 26. 기기 고장율 분포의 95% 고장율을 사용할 경우나 CCF 고장을 고려하지 않을 경우에 대한 민감도분석시, 별도로 확인된 HSSCs나 ISSCs는 없슴.

모든 역지밸브에 대한 최종 중요도 분류 결과가 표 2에 나타나 있다. 전체 IST 대상 역지밸브 209대중 HSSCs는 11.48%인 24대, ISSCs는 19.14%인 40대, LSSCs는 69.38%인 462대로 나타났다. 중요도 분류를 2가지 즉, HSSCs와 LSSCs로 나누면 HSSCs는 30.62%인 64대로 나타났다. 정지/저출력 운전 PSA와 외부사건 PSA 분석 결과와 초기사건 분석 결과를 검토하였지만 별도로 확인된 HSSCs나 ISSCs 밸브들은 없었다. PSA에 모델링 안된 역지밸브들 중에는 6대의 기기가 새로이 ISSCs2로 확인되었다.

표 2. 역지밸브 최종 중요도 분류 결과

	1단계	2단계	1단계 민감도	정지/저출력	외부사건	PSA에 모델링 안된 밸브
HSSCs : 24	14	10	0	0	0	0
ISSCs1: 10	0	8	2	0	0	0
ISSCs2: 30	24	0	0	0	0	6
LSSCs: 145	26	0	0	0	0	119
합계 – 209	64	18	2	0	0	125

표 3에는 울진 3호기 역지밸브 최종 중요도 분류 결과가 ASCO 원전 [12]과 비교되어 나타나있다. PSA 수행범위를 보면 ASCO 원전은 1단계 내부사건 PSA와 민감도분석, 그리고 2단계 내부사건은 정성적 분석만을 수행하였다. PSA에 모델링된 역지밸브 비율은 ASCO원전이 70.12%로 상당히 높게 나타났다. 울진 3호기가 40%밖에 안 나타났지만 이는 1단계 PSA에 모델링된 역지밸브 만을 고려했기 때문이다. HSSCs 비율을 보면 울진 3호기가 높게 나타났다. 이는 두 원전의 설계차이와 사용된 PSA 방법의 차이, 그리고 PSA를 이용한 HSSCs 평가시 적용한 기준의 차이 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 PSA를 이용한 HSSCs 판단기준은 ASCO 원전보다 보수적이다. 본 연구에서는 표 3에 나타나 있듯이, 1,2단계 내부사건 PSA 결과 중 역지밸브 중요도 값이 기준치 이상인 밸브에 대해 HSSCs로 평가했다. 그러나, ASCO원전에서는 1단계 내부사건 PSA에서만 기준치 이상인 밸브를 HSSCs로 평가하고, 2단계 PSA와 민감도분석에서 HSSCs로 판정 된 역지밸브는 ISSCs로 평가하고 최종 전문가 패널에서 각 밸브들의 중요도를 판정하였다.

3.2 시험주기 변경에 대한 위험도 평가와 경제성분석 결과

역지밸브 중요도가 ISSCs2와 LSSCs로 분류된 역지밸브들의 시험주기를 변경시켜 위험도를 평가하면서 최대 완화 가능한 시험주기를 파악하였다. 시험 요건을 최적화하기 위해서는 기기들의 고장이력을 검토하고 시험방법을 평가하여 시험주기를 결정해야 한다. 하지만 본

연구에서는 시험방법과 운전이력을 검토하지 않았기 때문에 현재의 시험방법으로 시험 수행시 시험주기 변경에 대해서만 위험도를 평가하였다. 위험도 평가와 최대로 완화 가능한 시험주기 파악은 다음과 같은 가정을 토대로 수행하였다:

- 시험주기 변경에 따른 중요도분석 결과가 변동이 없어야 됨, 즉 ISSCs나 LSSCs로 평가된 기기가 HSSCs나 ISSCs로 평가되면 안됨
- 시험주기 변경으로 인한 위험도 평가결과가
  - △CDF(시험주기 변경후 CDF – 시험주기 변경전 CDF) < 1.0E-5 이고
  - △LERF(시험주기 변경후 LERF – 시험주기 변경전 LERF)< 1.0E-6를 만족 [13]
- 최대 증가 가능한 시험주기는 10년 가정
- 시험주기 증가에 따라 각 밸브에 시행되는 모든 시험의 주기는 증가 가능
- 한 밸브에 여러 종류의 시험이 수행되고 밸브 각각의 시험에 대한 시험주기 증가가 상이하다면 시험주기 증가에 대한 위험도 평가시 가장 높은 고장확률을 사용하여 위험도 평가

표 **3.** 울진 **3**호기와 **ASCO** 원전 역지밸브에 대한 중요도 분류 결과 비교

	울진 3 호기[14]	ASCO 원전 [12]
기기분류시 PSA 업무수행 범위	1,2단계(내부), 민감도분석, 외부 & 정지/저출력 & 방법(FMEA)	1단계 내부 PSA, 2단계 내부는 정성적 분석, 민감도 분석
전문가 패널 사용 여부	전문가 패널대신 종합적 평가방법 사용	사용
PSA에서 모델링 대상 수	209대중 84대(40%)	164대중 115대(70.12%)
HSSCs 대 수	64(30.62%)	37대(22.56%)

위험도 평가 결과 LSSCs로 판정된 역지 밸브의 시험주기를 100배까지 늘려도 위험도 증가는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 시험주기를 80배, 100배까지 늘릴 경우 울진 3호기 PSA에 사용된 공통원인 고장 확률이 상대적으로 작기 때문에 공통원인 고장 확률을 10배로 증가시켜 중요도분석을 하면 일부 ISSCs로 판명된 역지밸브가 HSSCs로 평가된다. 위험도 평가와 중요도분석 결과를 토대로 시험주기 변경으로 인해 기기 중요도가 변경되지 않으면서 증가할 수 있는 최대 시험주기는 다음과 같이 파악되었다:

- HSSCs/ISSCs1으로 평가된 역지밸브의 시험주기는 변경 없음
- ISSCs2로 평가된 역지밸브의 시험주기는 6배까지 증가가능
- LSSCs로 평가된 역지밸브의 시험주기는 40배까지 증가가능

앞의 3.2에 있는 위험도 평가 결과를 반영하여 ISSCs2와 LSSCs로 평가된 밸브들의 시험주기를 완화시켜 시험횟수를 평가하였다. 본 연구와 같이 시험주기가 완화되면, 6번의 핵연료 재장전 (18월 기준으로 9년)동안 수행될 울진 3호기 역지밸브 시험 횟수는 7692회에서 1333회로 시험주기 완화전보다 82.7%로 감소될 수 있는 것으로 나타났다. 일부 역지밸브 시험은 펌프시험

수행동안 확인이 가능한데, 펌프 시험과 겹치는 것을 고려한 역지밸브 시험 횟수는 3468회에서 422회로 87.8% 감소될 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결론과 논의

본 연구에서는 울진 3호기 역지밸브의 중요도를 분류하고, 낮은 중요도로 파악된 역지밸브들의 시험주기 완화에 대한 위험도 평가와 경제성분석을 수행하였다. 현재의 울진 3호기 역지밸브에 대한 시험방법의 평가나 성능감시에 관한 연구는 수행하지 않았다. 역지밸브 중요도 분류는 먼저 울진 3,4호기 1,2 단계 PSA와 민감도분석, 정지/저출력 운전과 외부사건 PSA를 이용하여 수행하였다. PSA에 모델링 안된 역지밸브의 중요도 분류는 단순화된 고장모드 영향분석 (simplified failure modes and effects analysis)의 적용과 주요 고장모드 (critical failure mode)에 대한 정량화를 통해 얻어진 정량적 정보, 안전성분석 보고서 등의 검토와 역지밸브 관련 엔지니어와의 면담 등을 통해 얻어진 정성적 정보, 그리고 PSA의 전문성에 토대를 둔 공학적 판단에 의해 수행하였다. 시험주기 완화에 대한 경제성분석은 역지밸브 각각에 대해 수행되고 있는 시험에 대한 비용을 산정하여야 하나 현실적으로 그 비용 산정이 어려워 시험횟수 변경에 대한 분석을 함으로써 경제성 분석을 대신하였다.

울진 3호기 가동중시험 대상 역지밸브 209대의 최종 중요도 분류 결과는 HSSCs가 11.48%인 24대, ISSCs가 19.14%인 40대, LSSCs는 69.38%인 462대로 나타났다. 울진 3호기 역지밸브 중요도 분류를 2가지 즉, HSSCs와 LSSCs로 나누게 되면 HSSCs는 30.62%인 64대로 나타났다. 역지밸브 중요도가 ISSCs2와 LSSCs로 분류된 역지밸브들의 시험주기를 변경시켜 위험도를 평가하면서 최대 완화 가능한 시험주기를 파악하였다. 파악된 증가가능 최대 시험주기는 다음과 같다:

- HSSCs/ISSCs1으로 평가된 역지밸브의 시험주기는 변경 없음
- ISSCs2로 평가된 역지밸브는 6배까지 증가가능
- LSSCs로 평가된 역지밸브는 40배까지 증가가능

본 연구와 같이 시험주기가 증가되면, 6번의 핵연료 재장전 (18월 기준으로 9년)동안 수행되야 하는 울진 3호기 역지밸브 시험 횟수는 7692회에서 1333회로 시험주기 완화전보다 82.7%로 감소될 수 있는 것으로 나타났다. 일부 역지밸브 시험은 펌프시험 수행하는동안 확인이 가능한데 펌프시험과 겹치는 것을 고려한 역지밸브 시험 횟수는 3468회에서 422회로 87.8% 감소될 수 있는 것으로 나타났다.

위험도 정보이용 IST에 관한 RG 1.175 [1]에서는 시험주기 증가를 6년까지 허용(3번의 핵연료재장전까지)하고 그 이상인 경우에는 수집된 기기 데이터가 시험주기 증가를 허용할 수 있다는 것을 보여야 한다고 했지만, 본 연구에서는 최대 증가 가능한 시험주기를 파악하기 위해 이러한 사항들은 고려하지 않았다. 울진 3호기 역지밸브 시험요건 최적화에 대한 본 연구 결과는 기기 운전 이력 등을 검토하지 않았는기 때문에 본 연구 결과를 직접 발전소에 적용하는 것에 한계가 있다. 역지밸브 시험주기이외에 시험방법도 포함한 시험요건을 실제적으로 최적화하기 위해서는 다음과 같은 사항이 추후 연구될 필요가 있을 것으로 판단된다:

- 현장 데이터 수집.분석
- 역지밸브들의 시험 방법 평가

- 시험주기 증가로 인한 기기 모니터링 프로그램 확립과 시행, 그리고
- 국내 IST 요건, ASME OMA 코드 Appendix II [17,18], 계통시험 요건 등의 검토와, 발전소 IST 담당자와의 면담 등을 통한 최종 시험요건 확정

감사의 글

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 CRTD Volume 40-2, Light Water Reactor Nuclear Power Plant Components: Risk Based In-service Testing – Development Of Guidelines, 1996

[3].김길유 외, “위험도 정보를 이용한 원전에서의 의사결정”, 한국원자력연구소, KAERI/AR-577/2000, 2000

[4].강대일 외, “울진 3호기 가동중시험 대상 기기의 위험도 정보를 이용한 중요도분석”, KAERI/TR-1927/2001, 2001, 한국원자력연구소

[5]. ASME OMN-3 Code Case, Requirements for Safety Significance Categorization of Components Using Risk Insights for Inservice Testing of LWR Power Plants, 1998

[6]. C.W Rowley, “Risk-Based In-service Testing Pilot Project”, EPRI/TR-105869, 1995

[7]. Dae-il Kang, Kil-yoo Kim and Jae-joo Ha, “Importance Analysis of In-Service Testing Components for Ulchin Unit 3”, ICONE-10, Arlington, VA, USA, 2002

[8]. 강대일, 김길유, “울진 3호기 안전성 관련 모터구동밸브 중요도 분류”, KAERI/TR-2073/2002, 2002

[9]. Craig Sellers, Kar; Fleming, et al., “Optimized Periodic Verification Testing, Blended Risk and Performance-Based MOV IST Program”, NUREG/CP-0152, Proceedings of the 4th NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing, 1996

[10]. C.Wesley Rowley, “Cost/Benefit Evaluation of Implementing Pump and Valve RI-IST at a Nuclear Power Plant”, ICONE-8, 2000

[11] 강대일 외, “ 위험도 정보를 이용한 가동중시험 방법 적용 시범 연구: 울진 3호기 역지밸브”, KAERI/TR-2109/2002, 한국원자력연구소, 2002

[12]. Isabel March, et al.,“ASCO NPP Risk-Informed Inservice Testing Program for Check Valves”, ICONE8, Baltomore, MD, USA, 2000

[13]. “ An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis”, RG 1.174, 1998

[14]. “Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment”, 한국전력공사, 1995

[15]. ”영광 5&6 정지/저출력 PSA”, 한국전력공사, 2000

[16].김태운, 한상훈 외, “KIRAP을 이용한 사고경위 정량화 방법”, KAERI/TR-848/97, 한국원자력연구소, 1997

[17]. J. W. Hckman, et al., “PRA Procedure Guide: A Guide to the Performance of PRA for NPPs”, NUREG/CR-2300, 1983

[18]. “울진 3,4호기 안전등급 펌프 및 밸브 가동 중 시험 계획서”, 2000, 한국전력

[19]. ASME OMN-4 Code Case, Requirements for Risk Insights for In-service Testing of Check Valves at LWR Power Plants, 1998

[20] ASME OMA Code 1996 – Appendix II. Check Valve Monitoring Program