

RI-ISI 배관파손에 따른 간접피해 평가

Evaluation of Indirect Effects from the Postulated Piping failure in Risk-informed ISI

홍승열, 김명기, 정백순, 오해철, 서미로

한전전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 기기의 가동중검사는 ASME Section XI의 요건에 따라 수행하고 있으나, 지난 20년 동안 미국에서의 배관 파손사례에 의하면 검사요건에 의한 검사부위와 실제 파손경험 부위는 밀접한 관계가 없는 것으로 확인되었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 위험도 정보를 이용한 배관 가동중검사 부위 선정기술(RI-ISI; Risk-Informed In-service Inspection)이 개발되었으며, 미국 규제기관에 의하여 승인되었다. 배관 파손에 따른 피해는 초기사건의 발생 및 안전계통의 사고완화 기능을 저하시키는 직접피해 뿐만 아니라 침수, 분사, Pipe whip 및 Jet Impingement 등에 의해 주변의 안전관련 기기의 기능 저하를 유발하는 간접피해를 유발할 수 있다. 본 논문에서는 울진4호기 Risk-informed ISI 평가의 일환으로 수행한 간접피해 평가 방법 및 울진4호기 평가 결과를 소개하고자 한다.

Abstract

Inservice inspections of nuclear components are currently performed based on requirements in ASME Section XI. Operating experience over the past 20 years in U.S.A has shown that actual failure location does not have cross relation with the locations which are selected based on requirements in ASME Section XI. To reduce those problems, risk-informed ISI methods has been developed and approved by U.S. NRC. The consequences from the postulated piping failure could cause indirect effects from flooding, spray, pipe whip and jet impingement in addition to initiating events and degradation of mitigating systems. This paper introduces the indirect effects evaluation method and the evaluation results performed as a part of RI-ISI program for Ulchin Unit 4.

I. 서론

현재 미국의 원자력산업계 및 규제기관을 중심으로 원자력발전소의 운영 및 정비에 위험도 정보를 이용하는 기술 (Risk-Informed Technology)을 폭넓게 적용하고 있고, 또한 국내에서도 기존에 수행된 몇몇 위험도기반 기술적용 사례를 비롯해서, 점차 활발해지는 경향이다. 현재 미국의 경향은 위험도 정보기반 응용기술중 배관 가동중검사 부위 선정에 적용하는 RI-ISI(Risk-Informed Inservice Inspection)가 기존의 ASME Section XI 코드 요건중 검사부위 선정 방법을 대체하는 방안으로 가장 폭 넓게 발전소에 적용되고 있다. 위험도정보를 이용한 배관 가동중검사(RI-ISI)는 발전소 안전성을 유지하면서 인적 및 기술자원을 효과적으로 이용하므로써 비용을 절약할 수 있어 각광을 받고 있다. 이 방법은 배관의 검사부위를 선정할 때에 배관부위의 위험도를 평가해서 위험도가 높은 부위에 검사를 집중한다. 본 논문에서는 RI-ISI 평가의 일환으로 수행하고 있는 간접피해 평가 방법론을 기술하고 울진4호기 간접피해 평가 결과를 소개하고자 한다.

II. 본론

1. RI-ISI 방법론 소개

현재 ASME Section XI, Code Case N-577과 WCAP-14572에 기술된 RI-ISI 프로그램은 다음 과정을 단계별로 수행한다.(참고문헌 [1])

- 분석범위 정의 (Scope Definition)
- 분석부위 구분 (Segment Definition)
- 사고결말 평가 (Consequence Evaluation)
- 배관파손확률 평가 (Failure Probability Assessment)
- 위험도 평가 (Risk Evaluation)
- 전문가 위원회 검토 (Expert Panel Categorization)
- 비파괴 검사부위 선정 (Element/NDE Selection)
- 프로그램 이행 (Implement Program)

2. 간접피해 방법론 소개

다른 Risk-Informed technology 적용분야와 마찬가지로 배관 압력경계파손으로 인한 안전성 관련 사고결말은 노심손상빈도(CDF : Core Damage Frequency)와 대량조기방출(LERF : Large Early Release Frequency)로 평가한다. 배관 압력경계 파손으로 인해서 노심손상에 미치는 영향은 직접 (Direct) 및 간접피해(Indirect Effects)를 고려해야 한다. 직접피해 파손된 배관으로 인해 발전소 안전정지에 필수적인 유체의 유동을 더 이상 공급할 수 없는 계통 기능상실이고, 간접피해는 파손된 배관으로 인해 야기된 침수, 분사, Pipe Whip 및 Jet Impingement로 중요한 전기 기기 등의 기능상실로 야기되는 사고결말이다. 간접피해는 배관 파손에 따라 발생하는 아래의 현상으로부터의 피해를 평가한다.

- 침수 (Flooding)
- 분사 (Spray)
- Pipe whip
- Jet Impingement

침수와 분사는 발전소 PSA 침수보고서를 활용하여 피해를 평가하며, Pipe whip과 Jet Impingement는 최종안전성분석보고서 및 고에너지 배관에 대한 재해분석계산서를 활용하여 평가를 수행한다. 간접피해 분석은 아래와 같은 단계로 이루어진다.

가. 현장답사 전 서류검토

현장답사 전에 발전소 관련 최종안전성분석보고서, 도면, 확률론적 안전성평가보고서 및 재해분석계산서 등을 검토하여 각 건물별 침수구역별로 설치된 안전성 관련 기기를 확인한다. 또한 침수 및 pipe whip/jet impingement 계산서를 검토하여 각 분석대상 침수구역을 지나는 배관을 확인하고 현장답사를 수행할 구역을 선정하여 현장답사 점검표를 작성한다.

Pipe whip, Jet impingement에 대한 평가는 최대 운전압력이 275 Psig를 초과하거나, 또는 최대 운전온도가 200°F를 초과하는 계통 또는 일부 배관을 대상으로 실시한다. 단, 안전주입계통은 최종안전성분석보고서에서 주어진 기능을 수행하는 시간이 상대적으로 짧아 (2% 이내인) 중에너지 배관으로 분류되어 있으나, RI-ISI 관점에서 상대적으로 중요한 배관으로 판단되어 고에너지 배관으로 분석대상에 포함한다.

나. 현장답사

현장답사 점검표를 사용하여 해당건물에 대한 답사를 실시한다. 침수구역별로 침수원, 안전성관련 주요기기의 존재 유무와 고에너지 배관 주변에 전기 및 계측기기가 있는지 확인한다. 고에너지 배관 파단 시의 피해를 확인하기 위하여 안전성 관련 기기의 이격거리, barrier 또는 restraint와 같은 추가적인 보호설비의 존재유무를 확인하고 이를 점검표에 기록하였다. 배관의 파단은 다음과 같은 조건에서 발생한다고 가정한다.

- 원주방향파단은 pipe to fitting, branch run to main run 및 다른 terminal 용접부에서 발생하며, 1 inch 이하의 배관에서는 발생하지 않음

- 축 방향 파단은 용접된 Attachment의 중앙에서 발생하는 것으로 가정하며, 4 inch 이하 배관에서는 발생하지 않음

- 배관 직경의 10배 거리를 벗어난 구조물은 jet impingement의 영향을 받지 않는다.

현장답사 시의 확인사항은 그림 1의 간접피해평가 수행 Flow Chart와 같다.

다. 현장답사 후 평가

현장답사 수행 중 문서를 통한 확인이 필요한 사항들을 정리하고 답사결과를 평가하였다. 침수 및 고에너지 배관에 의한 pipe whip/ jet impingement의 간접피해를 받은 관련 기기가 전기부분 등의 기능상실시 어떤 상태를 유지하는지 확인하여 계통에 미치는 영향을 평가한다. 또한 관련기기의 Equipment Qualification 상태를 확인하여 간접피해 발생 여부를 결정한다. 간접피해가 확인된 경우는 배관 세그먼트와 Mapping을 실시하여 확인된 세그먼트의 직접피해와 같은 방법으로 배관 파손에 따른 피해를 평가한다.

라. 간접피해의 정량화

간접피해의 발생원인에 따라 별도로 또는 직접피해와 함께 정량화를 수행한다.

- 분사와 jet impingement 피해는 직접피해와의 구분하여 별도로 정량화한다.
- 침수피해는 직접피해와 함께 정량화를 수행한다.
- pipe whip 피해는 직접피해와 함께 정량화를 수행하며, 또한 직접피해만의 정량화를 별도로 수행한다.
- 직접피해와의 병합하여 선정된 PSA-Run 번호에 따라 직접피해와 같은 방법으로 PSA 모델을 이용하여 정량화를 수행한다.

3. 울진4호기 간접피해 평가

가. 목 적

간접피해(Indirect Effects) 평가는 직접피해의 평가와 함께 배관 세그먼트의 위험도 관점에서의 중요도를 평가하기 위하여 수행한다. 대상 배관이 파손되었을 때 직접적인 피해는 계통의 기능상실을 초래이지만, 배관 파손의 영향으로 주변의 전기 기기 등에 침수, 분사, pipe whip 및 jet impingement에 의한 간접피해를 일으킬 수 있다. 이를 평가하여 배관 세그먼트의 위험도 평가에 반영하는데 목적이 있다.

나. 울진4호기 현장답사

1) 현장답사 점검표의 작성(참고문헌 [2][4])

울진3,4호기 PSA 침수보고서 및 Flood Barrier 도면을 기준으로 구역을 나누었으며, 영광5,6호기의 Flood Barrier 도면을 참고하였다. 각 구역별 안전성관련 주요기기 및 원자로 안전정지에 중요한 기기는 울진3,4호기 PSA 침수사건보고서 및 울진3,4호기 최종안전성분석보고서 3장을 기준으로 작성하였다.

현장답사 대상 건물은 본 분석의 대상인 ASME class 1 & 2 배관이 설치되어 있는 1차 보조건물(Primary Auxiliary Building; PAB), 2차 보조건물(Secondary Auxiliary Building; SAB) 및 핵연료 건물(Fuel Building; FB)을 대상으로 하였다. 대상건물인 PAB, SAB 및 FB에 대해서는 침수원 및 분석 대상기기의 존재 유무에 관계없이 현장답사를 실시하였다. 격납건물 내에서의 배관파손에 따른 영향 평가는 인허가사항의 하나이며, 계통의 물리적인 격리, 간접피해를 방지하기 위한 restraint와 같은 hardware의 설치 및 극한 환경에 대한 기기의 자격부여를 통하여 설계 및 건설에 충분히 반영되었으므로, 격납건물에 대한 현장답사는 수행하지 않았다.

현장답사 대상 건물 및 구역에 대한 현장답사 점검표(walkthrough worksheet)를 작성하였다. 각 건물별 침수구역은 아래와 같이 작성하였다. 울진3,4호기 최종안전성분석보고서, PSA 침수보고서 및 재해분석보고서를 기준으로 현장답사 점검표를 작성하였고, 영광5,6호기 PSA 침수보고서를 참고하였다.

- 1차 보조건물; A-01~A-70까지의 70개 구역으로 나누었다.
- 2차 보조건물; P55-1~P165-2의 12개 침수구역으로 나누었다.
- 핵연료건물; F77-1~F142-2의 10개 구역으로 나누었다.

울진4호기 고에너지 배관은 최종안전성분석보고서 제3장에 의하여 아래와 같이 확인되었다.(참고문헌 [3])

- 보조급수 터빈 구동펌프 계통
- 보조증기 계통

- 화학 및 체적제어 계통
- 주급수 계통
- 주증기 계통
- 원자로 냉각재 배기 계통
- 원자로 냉각재 계통
- 안전주입 및 안전정지 계통(안전주입탱크에서 RCS 연결부)
- 증기발생기 추출 계통

울진4호기 Risk-informed ISI 의 현장답사 확인 대상인 중에너지 배관은(Moderate Energy Piping)은 아래와 같이 확인되었다.

- 안전주입 및 안전정지 계통(고에너지 배관 제외)
- 보조급수펌프에서 급수계통에 연결되는 역지밸브
- 격납건물 살수 계통

2) Walkthrough의 수행

배관파손에 따른 간접피해를 분석하여 위험도분석에 반영하기 위한 현장답사를 수행하였다. 대상건물은 울진4호기 1,2차 보조건물 및 핵연료 건물을 대상으로 수행하여, 배관파손에 따른 주변기기에 대한 평가를 수행하였다. 침수, 분사, pipe whip 및 jet impingement에 의한 간접피해를 평가하였다. 울진4호기 현장답사에는 전력연구원, Westinghouse, 한국전력기술(주) 및 울진4호기 운전원으로 구성된 답사팀이 참여하였다. 발전소 현장 답사팀은 발전소 확인 점검표를 작성하여 공동으로 현장답사를 실시하였다. 현장실사에서 주요한 가정사항은 아래와 같음

- 대기 상태인 안전주입계통은 울진3,4호기 최종안전성분석보고서의 재해분석에서는 중에너지 배관으로 분류하였으나, 간접피해분석에서는 고에너지 배관으로 분류하여 평가한다.
- 평가 대상구역에 안전성 관련기기가 없거나 평가대상 계통 배관이 통과하지 않을 경우 현장 실사대상에서 제외하였다.
- 운전원 조치로 간접피해 자체의 발생을 방지할 수는 없으며, 침수피해는 관련 안전성 기기가 침수전에 운전원 조치가 가능한 것으로 가정하였다.
- 사고완화를 위한 운전원 조치는 직접피해와 마찬가지로 가능한 것으로 평가하였다.
- 일반적으로 직접피해와 같은 간접피해는 별도로 평가하지 않으며 jet impingement 및 flood에 의한 간접피해는 별도로 평가하였다.
- 간접피해가 격납건물 격리밸브의 기능상실을 초래할 경우는, 각각 별도로 평가한다.

가) 침수

울진3,4호기 최종안전성분석보고서의 침수위 분석결과를 확인하여 안전성 관련기기가 침수위 아래에 있으면 관련 기기의 검증여부를 확인하였다. 최종안전성분석보고서 3장의 각 침수구역별 침수위 (flood height)를 확인해 본 결과 대부분의 구역이 6"로 기본적인 기기 받침대 높이를 초과하지 않았으나, 1차 보조 건물의 47 feet 레벨만이 21 feet로 침수 시 해당구역만이 침수되도록 설계되어있다.

나) 분사

안전성 관련 기기가 침수위 위에 설치되어 있으면 분사피해를 확인하였다. 침수위의 아래에 설치되어 있고, 배관 직경의 10배 거리 이내에 안전관련 기기가 설치되어 있으면 관련 기기의 내 환경 검증여부를 확인하여 피해여부를 판단하였다.

다) pipe whip

답사구역에 고에너지 배관이 설치되어 있는지를 확인하고, 고에너지 배관이 관통하면 pipe whip 및 jet impingement의 피해 반경내에 있는지를 확인하였다. 또한 같은 구역내에 격리거리, 기기 보호설비가 있는지를 확인하였다.

라) Jet impingement

Jet impingement에 대한 평가는 고에너지 배관 위치에서 배관구경의 10배 거리 이내에 설치되어 있는 기기를 jet 반경으로 평가하며 이는 에너지의 95% 상실거리로 가정하였다.

마) 고온/다습

또 다른 고려사항은 고온 또는 다습에 의한 피해이며 기기의 검증여부를 확인하였다.

3) 현장답사 후 평가

현장답사(Walkdown) 수행 결과 발견된 사항 중 중요한 사항을 기술하면 아래와 같다.

가) 1차 보조건물

(1) LPSI 펌프Room(Room No. 047-A01A, A01B)

LPSI 펌프(PP01A, B)의 모터 및 MOV-306, 307 밸브가 예상 침수위(68 feet) 아래에 있어 침수가 예상됨

(2) HPSI 펌프 Room(047-A03A, A03B)

HPSI 펌프 후단 배관 파단 시 jet impingement로 V-603, 604 밸브의 기능상실이 예상됨

(3) Mechanical Penetration Room(100-A10A)

- HPSI train 상호간의 jet impingement로 SI-646, 647 기능상실
- SI-689 LPSI 후단의 pipe whip으로 SI-321 기능상실
- SI-689 LPSI 전단에서의 jet impingement로 HPSI SI-646, 647 기능상실
- SI-636 후단 RCS Loop 1A HP header #2에서의 jet impingement로 SI-637 기능상실
- SI-637 후단 RCS Loop 1A HP header #1에서의 jet impingement로 SI-636 기능상실

(4) MSIV Room(165-A06A)

- FW-122 근처 배관의 jet impingement 발생으로 FW-132 기능 상실
- MSIV-151 전단에서의 jet impingement로 FW-122 기능상실
- FW-121 근처 배관에서의 jet impingement로 FW-131 기능상실
- FW-121 근처 배관에서의 jet impingement로 BD-007 후단의 증기추출배관 파손
- MSIV-151 후단 배관에서의 jet impingement로 BD-007 후단의 증기추출배관 파손
- MSIV-151 전단 배관에서의 jet impingement로 BD-005, 007 기능상실
- MSIV-151 후단 배관에서의 jet impingement로 MS-020 기능상실
- MSIV-152 전단 배관에서의 jet impingement로 BD-005, 007 기능상실

나) 2차 보조건물/ 핵연료 건물

현장답사결과 간접피해를 야기할 것으로 예상되는 사항이 발견되지 않았음

4) 간접피해의 정량화

간접피해의 유형에 따라 직접피해와 함께 고려하여 사고결말(consequence) 번호를 부여하였다. 간접피해의 정량화를 위하여 정성적인 분석결과 동일한 성질의 사고결말을 묶어서 PSA 모델 Run 번호를 부여하였다. 계통별로 다른 계열의 동일한 사고결말에 대한 정량화를 같이 수행하며, 간접피해에 의하여 사고결말은 47건이고 17개의 PSA Run 번호를 부여하였다.

III. 결론

울진4호기 RI-ISI 시범적용연구의 일환으로 수행하고 있는 간접피해 평가 방법론을 고찰하고, 울진4호기 평가 결과를 소개하였다. 간접피해에 의한 정량화 결과는 직접피해 평가결과에 추가하여 배관 세그먼트의 중요도 결정에 활용할 예정이다. 앞으로 간접피해에 대한 정량화 작업을 수행할 예정이며, 간접피해가 배관의 중요도 평가에 미치는 영향을 Sensitivity Study로 평가할 계획이다.

참고문헌

- [1] WCAP-14572, Revision 1-NP-A "Westinghouse Owners Group Application of Risk-Informed Methods to Piping Inservice Inspection Topical Report". Feb. 1999
- [2] Water Level (flood) Design (FSAR Chapter 3.4 for Ulchin Unit 3 & 4) (Rev.1)
- [3] Protection against Dynamic Effects Associated with the Postulated Rupture of Piping (FSAR Chapter 3.6 for Ulchin Unit 3 & 4) (Rev.1)
- [4] PSA Report for Ulchin Unit 3 & 4 (Rev. 1)

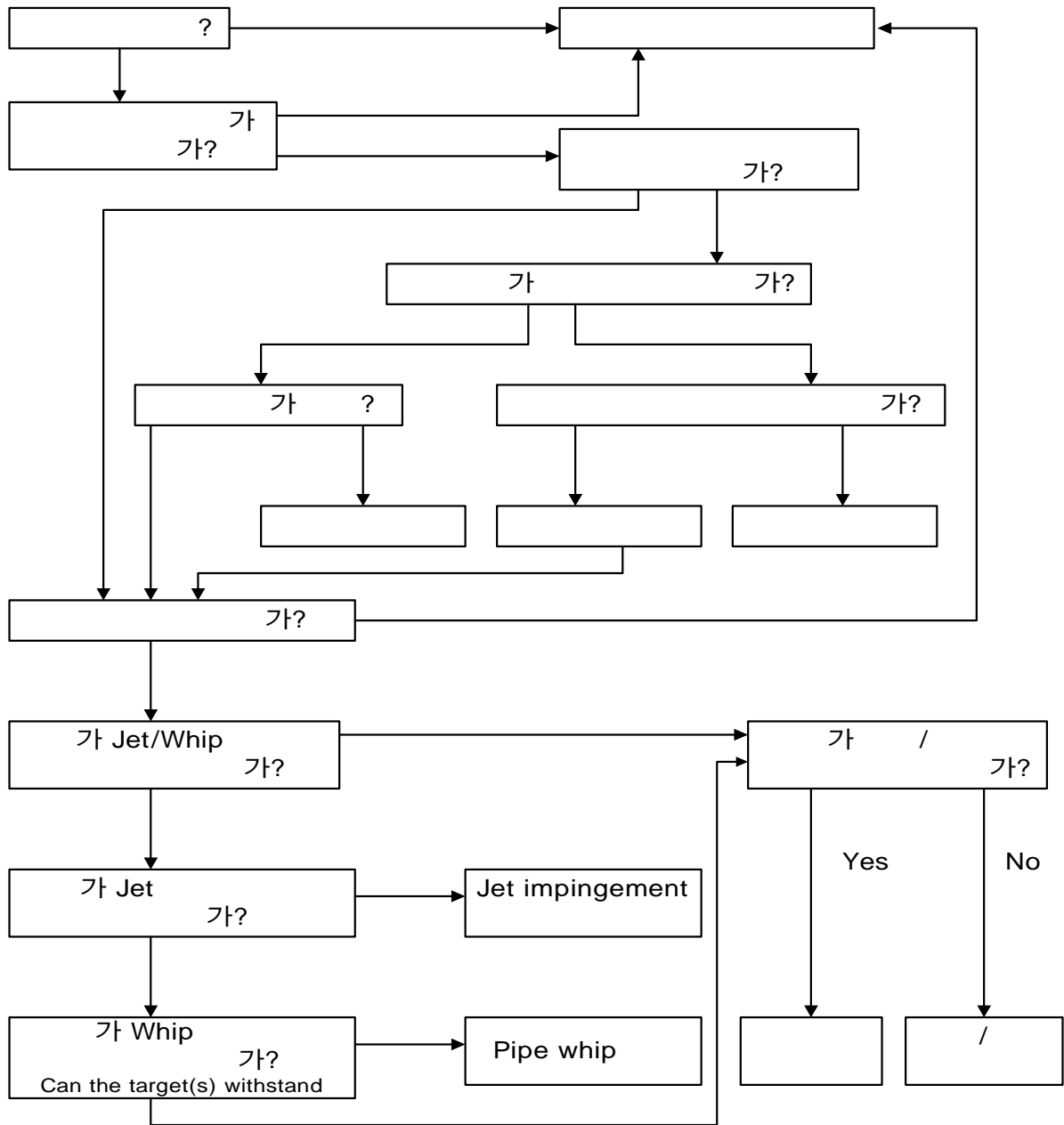


그림 1 간접피해 평가 수행 Flow Chart