

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 관련 계통의 STI/AOT에 대한 위험도 평가

Risk Assessment on the STI/AOT of LCO Related Systems in Full Power Operation of CANDU Plant

임재원, 최성수, 김태운
(주)엑트
대전광역시 대덕구 신일동 1688-5

서정관, 성창경
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

중수로의 경우, 월성 2,3,4호기 인허가 요건으로서 운영기술지침서가 도입되어 발전소 운영에 이용되고 있으나 신뢰도 분석 결과 적용 등의 측면에서 미결 사항이 있는 상태이다. 이러한 중수로에서는 전통적으로 계통 수준의 이용불능도 목표치를 설정하여, 이를 초과하지 않는 범위 내에서 STI/AOT를 설정하여 사용하여 왔다. 하지만 캐나다 규제 문서인 R-문서 및 C-문서에서는 정의 등이 분명하지 않고 상세하게 기술배경이 기술되어 있지 않아 운영기술지침서의 변경 등에 어려움이 있다. 본 연구에서는 중수로 STI/AOT에 대한 위험도 정보 활용을 위해 구체적이고 명확한 평가 방법론을 설정하였으며, 이를 기반으로 중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 관련 계통의 STI/AOT에 대한 위험도를 평가하여 최적화된 표준 STI/AOT를 개발하였다.

Abstract

In case of CANDU plants, a technical specification has been introduced in plant operation as a licensing basis of Wolsong 2,3,4 Units. However there are some pending issues related to reliability application. Traditionally, the system unavailability has been used in deciding STI/AOT for CANDU plants. However, because definition is not clear and technical bases are not detail in Canadian regulatory document such as R-documents and C-document, there is some difficulty in modifying STI/AOT. In this study, the establishment of applicable reliability assessment methodology of STI/AOT, and its application to develop optimized STI/AOT for the improved standard technical specifications of CANDU plants were performed.

I. 서론

국내 경수로의 경우, NUREG-1431/1432를 근간으로 한 웨스팅하우스형 및 CE형 표준운영기술지침서(Improved Standard Technical Specification; ISTS)의 개발이 완료됨에 따라, 이를 근거로 하여 기존 운영기술지침서를 개선운영기술지침서로 전환하는 작업이 각 발전소별로 진행 중에 있다. 이러한 표준운영기술지침서에서는 정기점검주기(Surveillance Test Interval; STI) 및 허용정지시간(Allowed Outage Time; AOT)의 기술배경 강화를 통해 위험도가 저해되지 않는 범위 내에서 이들을 합리적으로 설정함으로써 경제적 측면의 이득도 꾀하고 있다.

즉, STI 측면에서는 정기점검을 자주 수행함으로써 기기의 고장 혹은 성능 저하 상태를 빨리 탐지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 잦은 시험에 따른 이용불능도 증가 및 시험 후 원위치 실패 가능성 증가, 기기 마모 및 성능 저하로 인한 기기 신뢰도 저하, 시험 중 원자로 불시정지 가능성 증가 등의 역영향도 있다. 한편, AOT 측면에서 짧은 AOT는 시험 및 정비로 인한 이용불능도를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 불충분한 AOT에 따른 불충실한 시험 및 정비로 인한 기기 신뢰도 저하, AOT 이후의 원자로 불시 정지 빈도 증가, 운전원 스트레스에 의한 인간오류 가능성 증가 등의 역영향도 있다. 이러한 이유로 STI/AOT에 대한 위험도 평가를 통해 안전성을 확보하면서 경제성도 추구하는 최적화된 STI/AOT 설정이 요구되고 있다.

중수로의 경우, 월성 2,3,4호기 인허가 요건으로서 운영기술지침서가 도입되어 발전소 운영에 이용되고 있으나, 신뢰도 분석 결과 적용 등의 측면에서 미결 사항이 있는 상태이다. 이러한 중수로에서는 전통적으로 계통 수준의 이용불능도 목표치를 설정하여, 이를 초과하지 않는 범위 내에서 STI/AOT를 설정하여 사용하여 왔다. 하지만 캐나다 규제문서인 R-문서 및 C-문서에서는 정의 등이 분명하지 않고 상세하게 기술배경이 기술되어 있지 않아 운영기술지침서의 변경 등에 어려움이 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 중수로 원전의 STI/AOT에 대한 위험도 정보 활용을 위해 구체적이고 명확한 평가 방법론을 설정하여, 이를 기반으로 중수로 전출력 운전 시 운전제한조건(Limiting Condition for Operation; LCO) 관련 계통의 STI/AOT에 대한 위험도 평가를 수행하여 최적화된 표준 STI/AOT를 개발함으로써 중수로 원전의 표준운영기술지침서 개발에 기여하는데 그 목적이 있다. 이를 통해, 사업자 측에서는 실질적인 운전 안전성을 확보하고 운전제한조건/점검요구사항의 완화 및 감소를 통한 운영비용 절감효과를 얻을 수 있을 것이다.

II. 중수로 위험도 평가 대상 STI/AOT 선정

1. 중수로 위험도 평가 대상 계통 선정

중수로의 위험도 평가 대상 STI/AOT 선정을 위해, 먼저 캐나다에서 분류한 안전에 중요한 계통들[1]과 중수로 운영기술지침서에서의 LCO 관련 계통들[2] 및 중수로 원전 PSA에서 모델링되는 대상 계통들[3]에 대한 검토를 수행하여 위험도 평가 대상 계통들을 선정하였다. 표 1은 이러한 검토 결과를 요약한 내용을 보여주고 있다.

2. 중수로 위험도 평가 대상 STI/AOT 선정

가. 위험도 평가 대상 STI/AOT 항목 선정

위험도 평가 대상 STI/AOT 항목 선정을 위해, 위험도 평가 대상 계통에서 해당 STI/AOT 항목과 관련된 기기가 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA) 모델링 대상인지를 상세 검토하였다. 이러한 검토 내용을 바탕으로 선정된 위험도 평가 대상 항목의 수는 총 75개로서 전체 STI/AOT 항목(286개)의 약 26%에 해당한다. 표 2에는 이들 평가 대상 항목의 계통별 분포가 정리되어 있다.

나. 타 중수로 원전 기술지침서와 STI/AOT 비교 검토

STI/AOT 최적화 분석 단계에서 중수로 운영기술지침서에 나와 있는 STI/AOT에 대한 합리적인 시간 설정을 위해 타 중수로 원전 기술지침서의 STI/AOT와 비교 분석하는 업무를 수행하였다. 이 때 Bruce 원전[4], 진산 원전[5], 월성 2,3,4호기 원전[6]을 주 비교 대상 원전으로 선택하였고, 필요에 따라 Gentilly-2 원전[7], 월성 1호기 원전[8] 등을 보조 비교 대상으로 선택하였다. Bruce 원전의 OSR 및 진산 원전의 기술지침서는 중수로 원전과 관련해 모두 최근에 작성된 기술지침서로서 조치 및 점검요구사항에 정량적인 값이 제시되어 있어서 주 비교 대상으로 선택하였다.

다. STI/AOT 관련 월성 사업소 운전경험 조사 및 반영

STI/AOT와 관련하여 월성 사업소의 운전경험을 반영하기 위해 월성 2,3,4호기 현행 운영기술지침서를 기준으로 연장 또는 변경이 필요한 항목과, 위험도 평가를 통한 기술배경 작성이 필요한 항목을 조사하여 위험도 평가 대상 선정에 반영하였다.

III. 중수로 STI/AOT에 대한 위험도 평가 방법론 수립

STI/AOT에 대한 위험도 평가를 위해 국내·외의 평가 방법론들에 대한 검토가 수행되었다. 이 과정에서는 기술지침서에서의 위험도 정보 활용 관련한 미국 NRC의 접근방법과 기술지침서에서의 STI/AOT 결정 관련한 캐나다 CNSC의 접근방법 및 국내·외의 연구기관 및 사업자 등이 수행한 STI/AOT 변경 관련 위험도 평가 방법론들에 대한 검토가 이루어졌다. 그리고 검토 결과를 바탕으로 위험도 평가 절차서를 작성하여 관련 전문가들의 검토자문을 거쳐 위험도 평가에 활용하였다.

1. 위험도 평가 절차서 작성

위험도 평가 절차서는, 중수로 운영기술지침서에 나와 있는 STI/AOT 항목들 중에서 위험도 평가를 통해 기술배경을 제시할 수 있는 항목들에 대한 표준 STI/AOT 개발을 위해서, 적합한 PSA 방법론에 따라 위험도 평가를 수행할 수 있도록 해당 절차 및 방법을 제공하기 위한 목적으로 작성되었다. 본 절차서는 중수로 표준운영기술지침서에 사용될 표준 STI/AOT 개발을 위해 작성되었으므로 STI/AOT의 완화/유지/강화 안에 대해서 PSA 방법론을 이용해 실제적으로 위험도 평가를 수행할 수 있도록 하는 범위 내에서 기술되어 있다.

가. STI/AOT 관련 표준안 정의

본 단계에서는 다음과 같은 사항들을 고려하여 중수로 ISTS의 STI/AOT와 관련된 표준안을 정의하는 업무가 수행된다.

- 현행 STI/AOT가 발전소 현장의 점검방법/정비방법 등을 고려할 때 시간적인 측면에서 합리적으로 설정되어 있는가?
- 현행 STI/AOT가 비용편익적인 안전성향상 또는 불필요한 운전 부담 감소 등의 측면들을 고려할 때 완화/유지/강화 대상 중 어디에 해당하는가?

나. 발전소 안전성에 대한 영향 평가

본 단계에서는 "Ⅲ.1.가"에서 정의된 STI/AOT 표준안이 발전소 안전성에 미치는 영향을 평가하는 업무가 수행된다. 이러한 영향 평가는 크게 위험도 관점 및 결정론적 관점에서 수행되어야 한다.

위험도 관점에서는 다음과 같은 4가지 질문들에 대한 답변이 이루어져야 한다.

- 해당 계통/기기가 어떤 초기사건의 완화에 이용되는가?
- 해당 계통/기기의 이용불능이 어떤 초기사건을 유발하는가?
- 해당 계통/기기의 오작동이 어떤 초기사건을 유발하는가?
- 해당 계통/기기 관련해 어떤 backup 계통(안전 등급 또는 비안전 등급)이 가용한가?

결정론적 관점에서는 STI/AOT 표준안이 해당 계통의 설계기준에 미치는 영향이 평가되어야 한다. 또한 Reg. Guide 1.174[9]에 제시된 지침과 부합되도록 심층방어 측면에서 backup 계통의 가용 여부가 고려되어야 하고, 발전소 안전여유도 측면도 고려되어야 한다.

다. PSA 모델에의 영향 파악

본 단계에서는 STI/AOT 표준안에 따라 영향을 받는 모든 인자들을 파악하기 위해 중수로 PSA 모델을 검토하는 업무가 수행된다. 이 과정에서 PSA 모델이 발전소 운전 및 사고 완화의 관점에서 관련 계통을 올바르게 모델링하고 있는지, 적합한 성공기준이 적용되었는지 등이 또한 검토되어야 한다. AOT 표준안에 대한 위험도 평가의 경우에는 관련된 시험 및 정비로 인한 이용불능도가 반영될 수 있도록 모델링되어야 하고, STI 표준안에 대한 위험도 평가의 경우에는 해당 시험 주기에 따른 기기 이용불능도가 반영될 수 있도록 기기 고장 기본사건이 모델링되어야 한다. PSA 모델과 관련해 검토되어야 하는 세부 요소들은 다음과 같다.

(1) 초기사건 빈도

STI/AOT 표준안이 보조계통(전원, 계기용 공기, 용수 관련 계통)과 관련되어 있으면 해당 보조계통 상실이 초기사건으로 고려되어 있는지, 혹은 STI 표준안과 관련해 시험으로 인한 불시정지 발생 위험도 변화의 정량적 평가가 가능한지를 검토한다.

(2) 사건수목 모델

성공기준의 변경이 필요한지 검토한다.

(3) 계통 고장수목 모델

계통 고장수목 모델에 대하여 다음과 같은 내용을 검토한다.

- 기기 Random 고장모드 : STI/AOT 표준안에서 고려하는 고장모드가 기기의 Random 고장모드로서 모델링되어 있는지 검토한다.
- 공통원인고장 : STI/AOT 표준안과 관련된 기기에 대하여 공통원인고장이 모델링되어 있는지 검토한다.
- 인간오류 : STI 변경에 따라 시험 후 원위치 실패로 인한 위험도 변화의 정량적 평가가 필요한지 검토한다.
- 시험주기 : STI 표준안과 관련된 기기에 대하여 standby time-related 고장모드 형태로 모델링되어 있는지 검토한다.
- 시험 및 정비로 인한 이용불능 : AOT 표준안과 관련된 기기에 대하여 시험 및 정비로 인한 이용불능이 모델링되어 있는지 검토한다.

라. PSA 모델과 STI/AOT 관련 인자 수정

본 단계에서는, "Ⅲ.1.다"에서 파악된 내용을 기반으로, STI/AOT 표준안이 위험도에 미치는 영향을 평가하기 위해 PSA 모델을 실제로 수정하는 업무가 수행된다. 수정 대상에는 다음과 같은 6가지 항목이 포함된다.

- 초기사건 빈도
- 사건수목 모델
- 계통 고장수목 모델
- 기기 신뢰도 데이터
- 시험주기
- 시험 및 정비로 인한 이용불능도

초기사건 빈도의 경우, 보조계통 이용불능과 관련된 초기사건 빈도는 고장수목을 작성하여 구하는 것이 일반적이므로, 해당 기기와 관련된 초기사건 빈도가 고장수목 작성을 통해 구해졌다면 STI/AOT 표준안에 따라 초기사건 빈도가 정량화될 수 있도록 해야 한다. 또한 STI 표준안과 관련하여 시험으로 인한 불시정지 발생 위험도 변화의 정량적 평가가 가능한 경우에는 이를 고려하여야 한다.

일반적으로 사건수목 및 계통 고장수목 모델의 경우에는, 성공기준의 변경이 필요하지 않는 한 수정할 필요성은 발생하지 않는다. 다만, "Ⅲ.1.다"에서 계통 고장수목 모델이 STI/AOT 표준안에 대한 영향을 평가할 수 있도록 모델링되어 있지 않는 것으로 파악된 경우에는, 관련 영향 평가가 가능하도록 적합하게 수정되어야 한다.

STI/AOT 표준안이 기기 신뢰도 데이터에 미치는 정량적인 영향 평가는 실제로 매우 어려우므로 별도로 고려하지 않거나, 정성적인 영향만을 기술하도록 한다. "Ⅲ.1.마"에서 평가될 위험도 척도 중 조건부(conditional) CDF의 경우에는, 초기사건 빈도 및 공통원인고장으로 인한 이용불능도가 올바르게 변경되어 적용될 수 있도록 해야 한다. 또한 STI 변경에 따라 시험 후 원위치 실패로 인한 위험도 변화의 정량적 평가가 필요한 경우(고장률에 이미 포함되어 있는 경우에는 고려할 필요 없음)에는 이를 고려하여야 한다.

계통 고장수목의 시험주기 항목 또는 시험 및 정비로 인한 이용불능도의 경우에는 STI/AOT 표준안을 반영할 수 있도록 명시적으로 수정되어야 한다. 시험주기 항목의 경우 해당 기기 관련 기본사건을 standby time-related 고장모드 형태로 모델링한 후에 STI 표준안을 반영하도록 한다.

시험 및 정비로 인한 이용불능도의 경우 AOT 관련 기기 고장 논리의 하부에 있는 standby time-related 고장모드를 갖는 각 기본사건들에 대해 평균수리시간(Mean Time To Repair; MTTR) 대신 AOT를 개별 적용하는 방식을 적용하여 AOT 표준안을 반영하도록 한다.

특수안전계통(제1정지계통, 제2정지계통, 비상노심냉각계통, 격납건물계통)의 경우에는 캐나다의 신뢰도 분석 방법론에 따라 계통 이용불능도를 정량화해야 한다. 이 때 특수안전계통 설계와 관련해 규제요건으로 명시되어 있는 계통 이용불능도 개념에는 공통원인고장으로 인한 이용불능은 고려하지 않고 있으므로, 공통원인고장은 계통 이용불능에 기여하지 않도록 계통 고장수목 모델을 수정해야 한다.

마. PSA 모델을 이용한 위험도 평가

본 단계에서는, 다음과 같은 절차로 위험도 척도들에 대한 평가를 수행하여 허용기준을 충족시키는지 판단하는 업무를 수행한다.

○ Baseline CDF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 Baseline CDF가 1.0E-4/년 미만임을 확인한다.

○ ΔCDF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 ΔCDF가 1.0E-6/년 미만임을 확인한다. ΔCDF는 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta CDF = CDF(STI/AOT \text{ 표준안 반영}) - \text{Baseline CDF} \quad (1)$$

○ ΔLERF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 ΔLERF가 1.0E-7/년 미만임을 확인한다. ΔLERF는 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta LERF = LERF(STI/AOT \text{ 표준안 반영}) - \text{Baseline LERF} \quad (2)$$

○ ICCDP

AOT 표준안의 경우에는 ICCDP가 5.0E-7 미만임을 확인한다. ICCDP는 다음과 같이 정의된다:

$$ICCDP = [\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 CDF} - \text{Nominal Baseline CDF(AOT 표준안 반영)}] * \text{단일 AOT} \quad (3)$$

○ ICLERP

AOT 표준안의 경우에는 ICLERP가 5.0E-8 미만임을 확인한다. ICLERP는 다음과 같이 정의된다:

$$ICLERP = [\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 LERF} - \text{Nominal Baseline LERF(AOT 표준안 반영)}] * \text{단일 AOT} \quad (4)$$

○ 특수안전계통 이용불능도

특수안전계통 관련 STI/AOT 변경안의 경우에는 계통 이용불능도가 1.0E-3 미만임을 확인한다.

상기의 위험도 척도에서 대량조기방출빈도(Large Early Release Frequency; LERF)의 정량화 시 고려해야할 요소는 다음과 같다[3] : 중수로의 경우, 격납건물 1차 손상은 칼란드리아 탱크 손상 이전 시점에 발생하는 손상으로 사고 발생 후 약 1일(경수로의 1차 손상은 약 4시간)이 경과한 후에 발생하는 것으로 분석되었다. 그리고 격납건물 2차 손상은 칼란드리아 탱크 손상 시점 혹은 손상 이후 시점에 발생하는 손상으로 사고 발생 후 약 1.5일 이후에 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 중수로 원전에서 대량조기방출빈도를 정량화할 때는 격납건물 격리 실패와 격납건물 우회사고 등 2가지 경우에 대해 정량화를 수행하면 된다.

캐나다의 전통적인 신뢰도 분석 방법론에서 요구하는 계통 이용불능도는 AECB-1059[10]에 바탕을 두고 있는 특수안전계통 이용불능도 목표치($< 1.0E-3$)[11-13]에 근간을 두고 위험도 척도 중의 하나로서 선정하였다.

이러한 위험도 평가 과정에서 경우에 따라서는 출력 운전 중에 있는 것보다 정지 운전으로 인한 전이위험도 및 정지상태의 위험도가 더 크다는 것을 입증함으로써, 출력 운전 중의 STI/AOT 표준안에 따른 위험도 증가분에 대해 정당성을 간접적으로 제시할 수도 있다.

본 단계에서의 위험도 평가 결과 주어진 허용기준을 만족시키지 못하는 것으로 판명되면 STI/AOT 표준안이 수정되거나 보상조치가 고려되어 재평가되어야 한다. 여기서 보상조치란 사고 완화과정에서 해당 기기와 유사한 기능을 수행할 수 있는 backup 기기의 가용성 또는 사고 완화를 위해 해당 계통을 필요로 하는 초기사건 발생 확률을 낮추는 방법 등을 고려하는 조치이다.

바. 표준 STI/AOT 개발

본 단계에서는, 표준 STI/AOT 개발과 관련한 과정으로서 다음과 같은 정보들을 문서화하는 업무가 수행된다.

(1) 계통/기기 설명

STI/AOT 표준안과 관련된 계통/기기가 안전성 측면에서 수행하는 기능을 설명한다.

(2) 사고 완화를 위해 해당 계통을 필요로 하는 초기사건 목록

초기사건 목록을 기술하고 초기사건 완화를 위해 수행하는 기능을 설명한다.

(3) (2)의 각 초기사건별 계통의 성공기준

중수로 원전 PSA 모델에서 구성된 해당 계통/기기의 성공기준을 기술한다.

(4) STI/AOT와 관련된 모델링 내용을 파악할 수 있는 수준에서의 계통 고장수목 모델

STI/AOT 표준안과 관련된 모델 변경 방식을 다음과 같이 설명한다.

- Δ CDF/ Δ LERF 정량화를 위해 변경된 초기사건 고장수목 및 계통 고장수목 내용을 설명한다.
- Δ CDF/ Δ LERF 정량화를 위해 변경된 이용불능도 값을 통합 데이터베이스 파일에 정의하여 이용한 내용을 제시한다.
- ICCDP/ICLERP 정량화를 위해 변경된 초기사건 고장수목 및 계통 고장수목 내용을 설명한다.
- ICCDP/ICLERP 정량화를 위해 변경된 이용불능도 값을 통합 데이터베이스 파일에 정의하여 이용한 내용을 제시한다.
- 특수안전계통의 경우, 이용불능도를 계산하기 위해 변경된 계통 고장수목 내용을 설명한다.

(5) PSA 모델 정량화 결과

STI/AOT 표준안에 대해 다음과 같은 PSA 모델 정량화결과를 기술한다.

- Baseline CDF
- Δ CDF
- Δ LERF
- ICCDP (AOT 표준안의 경우)
- ICLERP (AOT 표준안의 경우)

- 계통 이용불능도 (특수안전계통 관련 STI/AOT 표준안의 경우)
- 정지상태의 위험도 대비 결과 (해당 시)
- 민감도 분석 결과 (해당 시)

2. 세부 위험도 평가 방법론 수립

STI/AOT에 대한 실제 위험도 평가를 위해 세부 위험도 평가 방법론을 수립한 후, 이를 바탕으로 계통 고장수목 등의 PSA 모델을 일관성 있게 변경하여 분석하는 업무를 수행하였다.

가. AOT에 대한 위험도 평가 방법론

AOT에 대한 위험도 평가 방법은 2개의 트레인으로 구성된 기기와 트레인 구성이 없는 기기에 따라 차이가 있다. 또한 2개의 트레인으로 구성된 기기는 1대 운전불가능 시와 2대 운전불가능 시에 따라 위험도 평가 방법에 차이가 있다.

(1) 2개의 트레인으로 구성된 기기의 위험도 평가 방법

2개의 트레인으로 구성된 기기의 경우 고장수목 구조의 변경이 필요하며, 기기 1대 고장 시 위험도 평가 방법과 2대 고장 시 평가 방법에는 차이가 있다. 2개의 트레인으로 구성된 기기의 위험도를 평가하기 위해서는 고장수목의 구조를 그림 1로부터 그림 2로 수정하는 것이 필요하다. 그림 1은 2개의 트레인으로 구성된 기기의 변경 전 고장수목, 그림 2는 변경 후 고장수목을 나타낸다. 본 위험도 평가 방법은 기기 A 및 기기 B의 논리 및 이용불능도가 동일한 경우에만 적용이 가능하며, 절삭한계치로는 $1.0E-10$ 을 적용하였다.

그림 1 및 그림 2의 고장수목에서 시험 및 정비 이용불능도에는 testing, routine maintenance (preventive maintenance), repair(corrective maintenance)가 포함된다. 일반적으로 운영기술지침서에서 testing 및 routine maintenance의 경우 다중 계열에 대한 동시 시험/정비를 수행하지 않도록 되어 있으나, repair의 경우에는 일정 시간 동시 정비를 허용하고 있는 경우가 있다.

그림 1과 같은 모델링에서 다음과 같은 단절집합들이 AOT와 연관되어 있다.

- $a1*b2$: $a1$ (Random Failure) * $b2$ (Individual T&M Unavailability)
- $a2*b1$: $a2$ (Individual T&M Unavailability) * $b1$ (Random Failure)
- $a2*b2$: 2개의 동시 Individual T&M Unavailability
- $c2$ (c에 포함되어 있음) : Common Cause Failure(CCF) T&M Unavailability

그림 1과 같은 모델로는 1개 고장 정비 및 2개 고장 정비에 대한 분석의 어려움이 있다. 따라서 그림 2와 같이 고장수목 모델을 변경하는 것이 필요하다. 그림 2와 같은 모델에서는 다음과 같은 단절집합들이 AOT와 연관되어 있다.

- $a2'*b1$: $a2'$ (Total Individual T&M Unavailability; $2*a2$) * $b1$ (Random Failure)
- $a3$: 2개의 동시 Individual T&M Unavailability
- $c2$ (c에 포함되어 있음) : CCF T&M Unavailability

(가) 1대가 운전불가능 시 위험도 평가

2개의 트레인으로 구성된 기기 중 1대 고장 시 아래와 같은 방법으로 위험도 평가를 수행한다.

- Δ CDF 계산 시, CDF(AOT 표준안 반영) 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다. 수식

(1) 참조.

- A에서 $a_2 \rightarrow a_2'$ 을 위해 "MTTR + shift" $\rightarrow 2 * "AOT"$ 로 변경
- B에서 b_2 제거를 위해 "MTTR + shift" $\rightarrow '0'$ 으로 변경
- a_3 에는, 그림 1과 같은 고장수목 구조에서 a_1, b_1, c 를 제거한 후 상위 게이트(그림 1의 경우, "기기 A & B 고장" 게이트)를 정량화해서 구한 값을 대입

○ ICCDP의 정량화를 위한 방법은 다음과 같다. 수식 (3) 참조.

- 조건부 CDF 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다.
 - 그림 1의 "기기 A 고장" 게이트를 기본사건으로 변환한 후, 확률값을 '1'로 할당
 - 그림 1의 B의 b_2 에서 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경
 - 그림 1의 B의 c 를 β (기기 A,B의 공통원인고장 모수) 값으로 변경
- Nominal Baseline CDF 값은 CDF(AOT 표준안 반영) 값을 적용한다.
- 단일 AOT에는 1대 고장 시의 전체 AOT 값을 적용한다.

(나) 2대가 운전불가능 시 위험도 평가

2개의 트레인으로 구성된 기기 중 2대 고장 시 아래와 같은 방법으로 위험도 평가를 수행한다.

○ Δ CDF 계산 시, CDF(AOT 표준안 반영) 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다. 수식

(1) 참조.

- A에서 $a_2 \rightarrow a_2'$ 을 위해 "MTTR + shift" $\rightarrow 2 * "MTTR + shift"$ 로 변경
- B에서 b_2 제거를 위해 "MTTR + shift" $\rightarrow '0'$ 으로 변경
- a_3 에는, 그림 1과 같은 고장수목 구조에서 a_1, b_1, c 를 제거한다. 그리고 b_2 에서 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경한 후, 상위 게이트(그림 1의 경우, "기기 A&B 고장" 게이트)를 정량화해서 구한 값을 대입
- c 와 관련해서는 그림 2의 c_2 항에서 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경

○ ICCDP의 정량화를 위한 방법은 다음과 같다: 수식 (3) 참조.

- 조건부 CDF 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다.
 - 그림 1의 "기기 A 고장" 게이트 및 "기기 B 고장" 게이트를 기본사건으로 변환한 후, 확률값을 '1'로 할당
- Nominal Baseline CDF 값은 CDF(AOT 표준안 반영) 값을 적용한다.
- 단일 AOT에는 2대 고장 시의 full AOT 값을 적용한다.

(2) 트레인 구성이 없는 기기의 위험도 평가 방법

그림 3은 트레인 구성이 없는 기기의 고장수목 예제를 보여주고 있다. 트레인 구성이 없는 기기에 대한 위험도 평가는 다음과 같은 방법으로 수행되며, 본 예제는 A 부계통의 AOT에 대한 위험도 평가 방법을 설명하고 있다.

○ Δ CDF 계산 시, CDF(AOT 표준안 반영) 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다. 수식

(1) 참조.

- A에서 a_1 의 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경
- A에서 a_2 의 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경
- A에서 a_3 의 "MTTR + shift" $\rightarrow "AOT"$ 로 변경

○ ICCDP의 정량화를 위한 방법은 다음과 같다: 수식 (3) 참조.

- 조건부 CDF 계산을 위한 고장수목 변경 내용은 다음과 같다.
 - 그림 3의 "A 부계통 고장" 게이트를 기본사건으로 변환한 후, '1' 할당

- Nominal Baseline CDF 값은 CDF(AOT 표준안 반영) 값을 적용한다.
- 단일 AOT에는 고장 시의 전체 AOT 값을 적용한다.

나. STI에 대한 위험도 평가 방법론

STI에 대한 위험도 평가 방법은 트레인에 무관하게 적용되며, 그림 1에 나와 있는 예제에 대한 평가 방법은 다음과 같다. (STI : 기기 A, B 운전가능성 확인)

- STI 관련 위험도 척도 평가 시, 고장수목 변경 내용은 다음과 같다.
 - A에서 a1의 "STI" → "STI 표준안"으로 변경
 - B에서 b1의 "STI" → "STI 표준안"으로 변경

IV. 위험도 평가를 통한 표준 STI/AOT 개발

"Ⅲ"에 기술되어 있는 위험도 평가 절차서 및 세부 위험도 평가 방법에 의하여 중수로 진출력 운전 시 운전제한조건 관련 계통의 STI/AOT에 대한 평가를 수행하였다. 이 중 정지냉각펌프의 정지냉각펌프 2대(3341-P1/P2) 중 1대 고장 시의 AOT 표준안(72시간)에 대한 위험도 평가 및 민감도 분석 결과를 설명하면 다음과 같다.

1. 정지냉각펌프 1대 고장시 AOT 표준안에 대한 위험도 평가 결과

AOT 표준안을 평가하기 위해 중수로 원전 PSA에서 정지냉각펌프 2대가 동일한 이용불능도와 동일한 논리를 갖고 있는지를 확인하였다. 확인 결과 정지냉각펌프 운전 실패에 관한 2개의 논리 게이트(3341-SDCSLOF1-SP, 3341-SDCSLOF2-SP)의 이용불능도는 1.995E-1으로 동일하며 논리 또한 동일함을 확인하였다. $\Delta CDF/\Delta LERF$ 를 계산하기 위해 12개의 기본사건에 대한 이용불능도를 변경하였으며, 고장 복구로 인한 동시 시험 및 정비 이용불능도를 반영하기 위해 신규로 기본사건 1개를 추가하였다. ICCDP/ICLERP 계산을 위해 3341-SDCSLOF1-SP 및 3341-SDCSLOF1-AB 게이트의 하부 논리를 삭제하고 기본사건으로 만든 후 이용불능도 값으로 1을 할당하였으며 펌프 기동 및 운전 공통원인고장 확률로서 공통원인고장 모수 중에서 β 값인 0.0593과 0.08을 각각 할당하였다. Baseline CDF의 경우 2.508E-5/Ry로 허용기준치 미만으로 분석되었다. ΔCDF 와 $\Delta LERF$ 정량화 결과는 0.000/Ry와 -1.800E-9/Ry로 허용기준치 미만으로 분석되었으며, ICCDP와 ICLERP 정량화 결과 또한 9.041E-9와 4.765E-9로 허용기준치 미만으로 분석되어 위험도 관점에서 본 AOT 표준안은 표준 AOT로서 채택될 수 있는 것으로 분석되었다.

2. 정지냉각펌프 1대 고장시 AOT 민감도 분석 결과

정지냉각펌프 1대 고장 시의 AOT와 관련해 캐나다 Bruce-B 원전 OSR의 AOT(14일)와 중국 진산 원전 기술지침서에 설정된 AOT(1개월)에 대하여 민감도 분석이 이루어졌다. AOT가 14일인 경우 ΔCDF , $\Delta LERF$, ICCDP, ICLERP의 정량화 결과는 각각 0.000/Ry, 2.000E-10/Ry, 4.219E-8, 2.222E-8로 모두 허용기준치 미만으로 분석되었으며 ICLERP의 경우 허용기준치(5.0E-8)의 약 44.5%에 해당하는 결과를 나타내었다. AOT가 1개월인 경우, ΔCDF , $\Delta LERF$, ICCDP, ICLERP의 정량화 결과는 각각 1.000E-8, 3.300E-9, 9.041E-8, 4.781E-8로 모두 허용기준치 미만으로 분석되

었으며 ICLERP의 경우 허용기준치의 약 96.5% 해당하는 결과를 나타내었다.

V. 결 론

본 연구는 중수로 원전의 STI/AOT에 대한 위험도 정보 활용을 위해 구체적이고 명확한 평가 방법론을 설정하고, 이를 기반으로 중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 관련 계통의 STI/AOT에 대한 위험도 평가를 수행하여 최적화된 표준 STI/AOT를 개발함으로써 중수로 원전의 표준운영 기술지침서 개발에 기여하는데 그 목적이 있다.

이를 위해, 본 연구에서는 첫째로, 전체 LCO 관련 계통의 STI/AOT 항목들(286개 항목)을 검토한 후 이들 중 위험도 평가가 가능한 STI/AOT 항목들(75개 항목)을 선정하였다. 위험도 평가 대상 항목들은 캐나다에서 분류한 안전에 중요한 계통들, 중수로 운영기술지침서의 LCO 관련 계통들, 중수로 원전 PSA에서 모델링되는 계통들을 검토하여 선정되었다.

둘째로, STI/AOT에 대한 위험도 평가를 위해 국내·외의 평가 방법론들에 대한 검토가 수행되었다. 이 과정에서는 기술지침서에서의 위험도 정보 활용 관련한 미국 NRC의 접근방법과 기술지침서에서의 STI/AOT 결정 관련한 캐나다 CNSC의 접근방법 및 국내·외의 연구기관 및 사업자 등이 수행한 STI/AOT 변경 관련 위험도 평가 방법론들에 대한 검토가 이루어졌다. 그리고 STI/AOT 항목들에 대해 적합한 PSA 방법론에 따라 체계적이고 일관성 있는 위험도 평가를 수행할 수 있도록 해당 절차 및 방법 제공 목적으로 위험도 평가 절차를 작성한 후, 관련 전문가들의 검토자문을 거쳐 완성하여 위험도 평가에 활용하였다.

셋째로, STI/AOT에 대한 실제 위험도 평가를 위해 세부 위험도 평가 방법론을 수립한 후, 이를 바탕으로 계통 고장수목 등의 PSA 모델을 변경하는 업무를 수행하였다. 그런 후, 특수안전계통과 관련된 STI/AOT 항목들의 경우에는 중수로 규제요건인 특수안전계통 신뢰도 목표치와의 비교 분석 목적으로 계통 이용불능도 분석을 수행하였다. 또한 사고경위 정량화를 통한 노심손상빈도 및 대량조기방출빈도 분석을 수행하여 위험도 척도별 평가 및 허용기준과의 비교 분석을 수행하였다.

넷째로, 위험도 평가 대상 STI/AOT에 대한 최적화 분석을 위해 중수로 표준운영기술지침서의 STI/AOT와 타 중수로 원전 기술지침서의 그것들을 비교 검토하였다. 또한 현행 STI/AOT와 관련해 월성 사업소의 운전경험을 조사해 위험도 평가에 반영하였다. 이를 통해 비용편익적인 안전성 향상 또는 불필요한 운전 부담 감소 등의 측면들을 고려해 최적화된 표준 STI/AOT를 개발하는 연구를 수행하였다.

본 연구 결과는 중수로 표준운영기술지침서의 STI 및 AOT에 대한 기술배경을 확립하는데 직접적으로 활용될 계획이다. 그리고 향후 중수로 원전에서의 위험도 정보 활용 방안을 연구하는데 근간이 될 수 있을 것으로 기대된다. 사업자 측면에서는 본 연구 결과인 최적화된 표준 STI/AOT에 근거해 현행 운영기술지침서를 개선 운영기술지침서로 전환함으로써 실질적인 운전 안전성을 확보하고 운전제한조건/점검요구사항의 완화 및 감소를 통한 운영비용 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- [1] Proposed Regulatory Guide, "Reliability of Systems Important to Safety for Nuclear Reactor Facilities", C-98, Rev. 1(E), AECB, 1998.
- [2] "국내 중수로 원전 기술지침서 개선방안 연구", TM.00NE21.P2001.229, 전력연구원, 2001.
- [3] "가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가", TR.93NJ10.97.67-2, 전력연구원, 1997.
- [4] "Bruce Safe Operating Envelope", Ontario Hydro, 1998.
- [5] "The Third Qinshan Nuclear Power Plant Units 1 and 2 FSAR: Ch. 16 Technical Specification", 2001.
- [6] "월성원자력 2호기 운영기술지침서", 한국수력원자력주식회사, 2002.
- [7] "Gentilly-2 Operating Policies and Procedures", Rev. 6, Gentilly-2, 1997.
- [8] "월성원자력 1호기 운영기술지침서", Rev. 49, 한국수력원자력주식회사, 2001.
- [9] "An Approach for Using PRA in Risk-Informed Decision on Plant Specific Changes to the Licensing Basis", Reg. Guide 1.174, NRC, 1998.
- [10] D.G. Hurst and F.C. Boyd, "Reactor Licensing and Safety Requirements", AECB-1059, AECB, 1972.
- [11] "Requirements for Containment Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-7, AECB, 1991.
- [12] "Requirements for Shutdown Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-8, AECB, 1991.
- [13] "Requirements for Emergency Core Cooling Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-9, AECB, 1991.

표 1. 위험도 평가 가능 계통 목록

계통 범주	계통명	중수로 ISTS LCO 관련 계통	중수로 PSA 대상 계통	기능 ^(주) 범주
Special Safety System	제1정지계통	○	○	1
	제2정지계통	○	○	1
	비상노심냉각계통	○	○	1
	격납건물 및 보조계통	○	○	2
Posed Safety System	비상급수계통	○	○	4
	비상전원계통	○	○	4
Auxiliary Safety System	주급수계통		○	5
	복수계통		○	5
	공기조화계통		○	
	감속재상충기체계통	○	○	
Safety Support System	등급 I 전원계통	○	○	3
	등급 II 전원계통	○	○	3
	등급 III 전원계통	○	○	3, 4
	용수계통	○	○	3, 5
	계기용공기계통		○	3, 5
Important Process System	감속재계통	○	○	2, 5
	중단차폐냉각계통	○	○	5
	열수송계통 및 보조계통	○	○	5
	열수송계통 방출계통	○	○	4
	주증기계통	○	○	5
	등급 IV 전원계통	○	○	4, 5
	DCC 계통		○	5
Passive or Posed Process System	정지냉각계통	○	○	4, 5
	보조급수계통	○	○	4
	보조복수계통		○	4
	Setback 계통		○	4

(주) 1 : 중대 공정계통 고장 영향 완화를 위한 특수안전계통
 2 : 노심손상 영향 완화를 위한 특수안전계통 및 타 계통
 3 : 안전에 중요한 계통의 보조계통
 4 : 초기사건의 중대 공정계통 고장으로의 전개 완화를 위한 대기 계통 혹은 능동형 계통 일부
 5 : 초기사건 유발 가능한 능동형 공정계통

표 2. 위험도 평가 대상 STI/AOT 항목 수 현황

ISTS 항목	관련 계통	평가 대상 AOT 수	평가 대상 STI 수
3.1	반응도제어계통	4	2
3.3	계측설비	10	9
3.4	원자로 계통	10	5
3.5	비상노심냉각계통	3	5
3.6	격납건물계통	2	2
3.7	발전소계통	7	12
3.8	전력계통	1	3
합 계		37	38

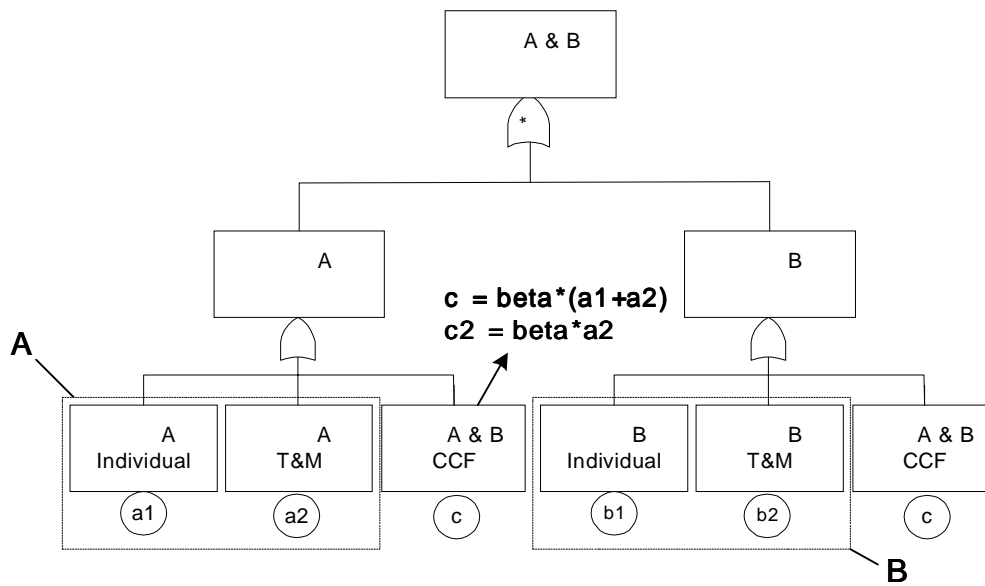


그림 1. 2개의 트레인으로 구성된 기기의 변경 전 고장수목

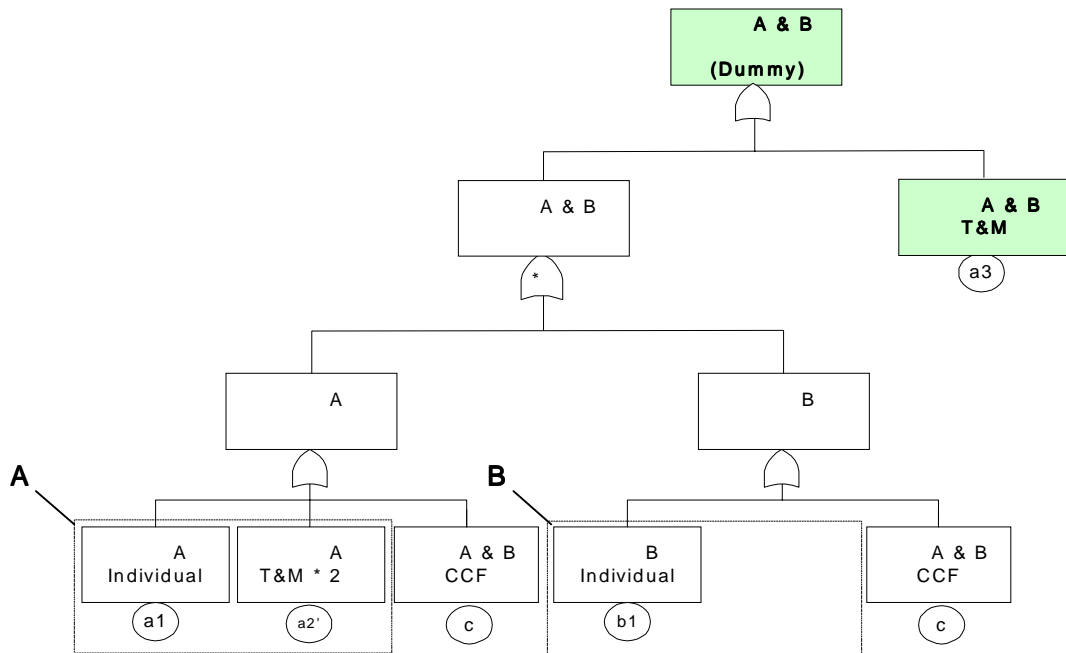


그림 2. 2개의 트레인으로 구성된 기기의 변경 후 고장수목

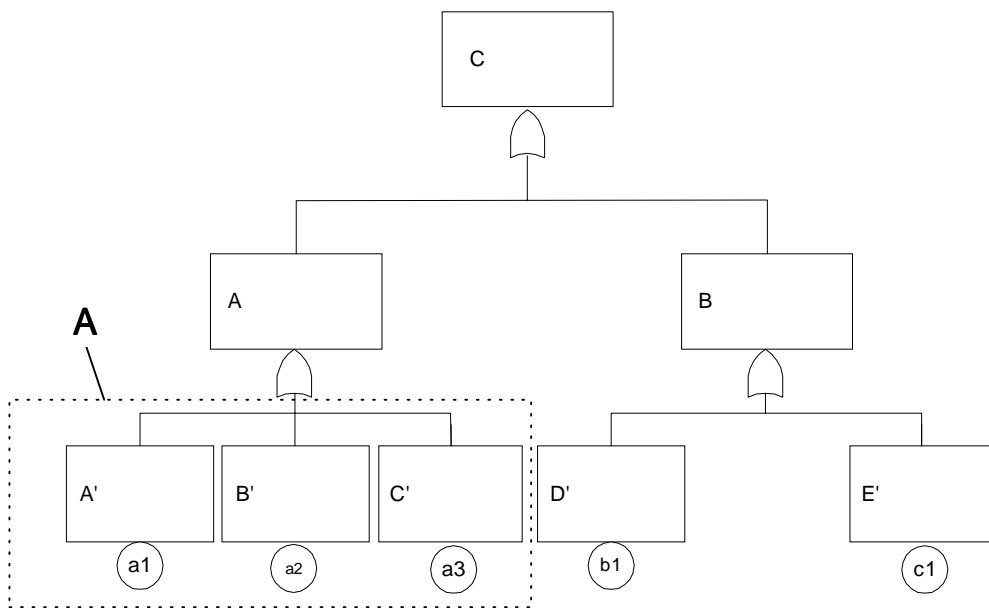


그림 3. 트레인 구성이 없는 기기의 고장수목