2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

위험도정보활용을 위한 대량조기방출빈도 추정의 단순화 방법

Simplified Method of Estimating Large Early Release Frequency for Risk-Informed Applications

한석중, 장승철, 강대일, 박진희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

오늘날 확률론적 안전성 평가 (PSA) 기법은 여러 공학분야에 널리 적용되어질 뿐만 아니라 규제 분야로의 사용도 확장되고 있다. 노심손상빈도 (CDF)나 대량조기방출빈도 (LERF) 와 같은 PSA 결과들이 위험도 정보이용 의사결정에 사용되기 위해서는 기본적으로 고품질의 인증된 위험도 분석을 근간으로 하여야 한다. 하지만, 원자력 발전소와 같이 매우 복잡한 시스템에 대한 위험도 분석은 비용과 시간이 많이 소요되는 일이다. 본 논문에서는 울진 3,4 호기 리스크 모니터링을 위한 PSA 모델에서 적용된 단순화된 LERF 추정 방법론들을 논의하고자 한다. 특히, LERF의 계산을 위하여 단순화된 격납건물 사건수목 (CET)의 사용은 리스크 모니터(RM)의 개발과정을 매우 용이하게 할 수 있다.

Abstract

Today, probabilistic safety analysis (PSA) is being productively applied to a variety of engineering technologies, and is being more extensively used in regulation. PSA results, such as core damage frequency (CDF) and large early release frequency (LERF), must basically be derived from high-quality, validated risk analyses in order to be used in risk-informed decision making. However, performing a comprehensive and rigorous risk analysis of a complex system are costly and time consuming undertakings. In this paper, we focus the simplified LERF methodology adopted into PSA model for monitoring risk in Ulchin 3 and 4. In particular, the use of the simplified containment event tree (CET) for calculating LERF can greatly facilitate the process of developing risk monitor (RM) model.

1. 서 론

원자력시설의 확률론적 안전성평가 (PSA) 방법을 기본으로 하는 위험도정보활용에서 중요하게 활용되는 위험도 척도는 노심손상빈도 (Core Damage Frequency, CDF)와 대량조기방출빈도 (Large Early Release Frequency, LERF)이다. LERF는 “근접지역의 주민의 효과적인 대피 전시간대에 격납건물로부터 심각하고 완화할 수 없는 방출을 초래하여 초기 공중보건에 영향을 줄 수 있는 잠재력을 지닌 사고의 빈도”라고 정의한다. 이러한 이유로 LERF는 원전의 사고로 인한 공중 보건에 미치는 영향을 가름하는 대용 척도로써 중요하게 활용되고 있다. 원전의 사고로 인한 공중 보건에 미치는 영향은 일반적으로 원자력 시설에 대한 3단계 PSA에 해당하는 사고결말 분석을 수행하여 평가한다. 대부분 원전의 경우 3 단계에 걸친 전체 PSA를 수행하지 않고 2 단계 PSA에 해당하는 격납건물성능해석분야의 일부분으로써 LERF를 추정한다. 그러나 2 단계 PSA를 수행하기 위해서

는 복잡한 과정을 거쳐야 하기 때문에 시간과 인력이 많이 필요하다.

NUREG/CR-6595에서 Pitt 등이 제시한 단순 CET(Simplified CET)을 이용한 LERF 추정 방법은 원래 상세 분석-2단계 PSA를 수행하지 않은 경우에 위험도정보활용에 사용할 대강의 LERF를 추정할 목적으로 개발되었다. 이 방법에서는 제시된 단순 CET상의 각 분기점 확률을 추정하는데 있어서 2 단계 PSA 에 경험이 많은 전문가로부터 적합한 각 분기점 확률 값을 추정하도록 하여 최종적으로 LERF를 추정할 수 있도록 구성되어 있다.

2단계 PSA 결과를 이용한 LERF의 추정은 결과의 상세함으로 인해 위험도정보활용에 이용하기 적합하나 비효율적이다. 단순 CET에 의한 LERF 추정은 효율적이지만 결과가 상세하지 못함으로 적용에 한계가 있다. 본 연구는 2 단계 PSA를 수행하여 분석 정보가 주어진 경우에 이 상세 분석 정보를 최대한 반영할 목적으로 위의 단순 LERF 추정 방법을 개선하였다. 즉, 본 방법은 Pitt 등이 제시한 단순 CET를 사용하였으나 CET의 분기점 확률 추정에 2 단계 PSA의 상세 정보를 이용하였다. 본 방법은 국내의 2 단계 PSA 분석 방법 특히, 울진 3,4 호기의 2단계 PSA 분석 방법을 기초로 작성되었다[4]. 본 방법의 적용성을 검증하기 위해서 울진 3,4 호기에 대하여 단순 CET를 이용한 LERF 평가를 수행하였고 LERF 추정에 2 단계 PSA의 상세 정보를 적절하게 반영하고 있음을 보일 수 있었다. 본 방법은 많은 추가적인 작업 없이도 2 단계 PSA의 상세정보를 이용하여 효과적으로 LERF를 추정할 수 있으므로 위험도정보활용 분야뿐만 아니라 원전의 실시간 위험도 감시시스템에 효과적으로 활용할 수 있다. 본 방법의 적용성을 높이기 위해서는 상세 정보의 축약에 따른 상대적인 정보의 손실 즉, 오차에 대한 상세한 분석 및 평가가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

2. LERF의 추정 방법

2.1 2 단계 PSA 분석 방법

일반적으로 2 단계 PSA 수행 과정은 크게 (1) 발전소손상상태(Plant Damage States, PDS) 군(Bins) 분석, (2) CET 작성 및 평가, (3) 방사선원항범주 (Source Term Category, STC) 정의 및 평가 등의 세가지 단계로 구분할 수 있다. 2단계 PSA 수행 방법은 김시달 외의 논문에 상세한 내용이 기술되어있다. 본 논문에서는 각 분석단계에 대한 간략한 특징만을 기술하였다.

<u>발전소손상상태 군 분석</u>

발전소손상상태란 원자로 노심에 손상이 일어났을 때 발전소의 상태(원자로 압력, 격납건물 관련계통 상태, 안전 계통 상태 등)를 의미한다. 즉, 격납건물 계통의 기능상실과 결합된 노심손상 사고경로를 의미한다. PDS 군(Bin) 분석이란 수많은 PDS를 유사한 격납건물 거동 특성을 갖는 사고경로로 합치는 작업이다. 따라서 PDS 군은 명백하게 구별되는 PDS를 의미하며 일반적으로 PDS 군 논리도(Plant Damage State Bin Logic Diagram)로 작성된다.

<u>CET 작성 및 분석</u>

CET은 중대사고시 일어나는 여러 현상학적 과정, 격납건물 조건, 격납건물 고장모드를 나타내며, PDS에 따른 격납건물 반응을 모델링 하는데 사용된다. CET은 노심손상에서 환경으로 방사선 누출까지의 사고 진행 과정을 예측하는데 이용된다. CET 상의 표제는 보조 분석 수목인 분해사건 수목 (Decomposition Event Tree, DET)을 이용하여 상세 분석을 수행한다. DET은 주로 표제에 대한 세부적인 현상, 격납건물 거동 특성, 운전원 행위 등을 다룬다. 또한 세부적 현상 및 격납건물의 파손 유형 등에 대한 평가는 중대사고 분석용 전산 코드인 MAAP 코드 등을 이용하여 계산한 각 사고경로에 대한 분석결과를 이용하여 추정한다. CET과 DET을 작성하고 DET의 정점사상의 조건확률이 지정되면 CET 상의 각 표제의 분기점 조건확률을 추정할 수 있다. 이러한 분석이 완료되면, 각 CET 별로 정량화를 수행한다.

STC 작성 및 분석

최종적으로 환경으로 방출되는 방사선원항(Source Term Category)의 종류 및 방출량, 방출시간 및 방출기간, 방출위치, 그리고 에너지에 따라 STC를 정의한다. 대부분의 CET 사고경로는 환경으로 방출되는 방사선원항의 양과 시간에는 유사한 특성을 보이기 때문에 유사한 방사선원항 특성을 가질 것으로 예상되는 CET의 종결상태를 STC로 합한다. 방사선원항 특성에 영향을 미치는 변수들을 이용하여 방사선원항 논리도(Source Term Logic Diagram)를 작성한다. 방사선원항 논리도는 CET의 사고경로를 방사선원항의 특성에 따라 체계적으로 STC를 분리하기 위해 사용한다. 방사선원항 논리도의 최종점은 STC를 나타내며, 그 경로는 각각의 STC의 특성을 나타낸다. 상세 방사선원항 분석은 각 STC를 적절히 대표할 수 있는 사고경로에 대하여 수행한다.

2.2 단순 CET을 이용한 추정 방법

그림 1은 Pitt 등이 제시한 LERF 추정을 위한 단순 CET을 보여주고 있다. 단순 CET는 한 개의 초기빈도 표제와 6개의 표제로 구성되어 있다 (표 1). 각 표제에 대한 특징은 본 논문에서는 생략하였다. 단순 CET를 이용한 LERF의 평가는 각 표제에 대한 분기점확률을 2 단계 PSA 수행경험이 풍부한 전문가의 의견을 참조하여 할당하고 이를 이용하여 LERF를 평가하도록 되어있다.

3. 개선된 단순 LERF 추정 방법

개선된 단순 LERF 추정 방법은 Pitt 등이 제시한 그림 1의 단순 CET를 이용한 단순 LERF 추정 방법을 상세 분석-2 단계 PSA-과 비교 분석하여 필요한 분기점들을 일치시킴으로써 얻을 수 있다. 개선된 단순 LERF 추정 방법은 다음과 같은 3 단계로 구성되어 있다.

1. 상세 분석 및 단순 분석의 이해
2. 상세 분석과 단순 분석의 비교 검토
3. 상세정보의 단순 방법으로의 전환 및 LERF 정량화

3.1 상세 분석과 단순 분석의 이해

상세 분석과 단순 분석의 주요한 내용만 요약하였다. 구체적인 비교 검토는 실재 수행내용을 바탕으로 진행하였으며 울진 3,4호기의 2 단계 PSA를 기준으로 하였다. 2 단계 PSA 수행 결과는 크게 (1) PDS 군(Bins) 분석 결과, (2) CET 작성 및 평가 결과, (3) STC 정의 및 평가 결과 등 세가지를 얻을 수 있다. 단순 분석은 상세 분석의 3 단계 분석결과를 단일한 단순 CET로 단순화 하였음을 알 수 있다.

3.2 상세 분석과 단순 분석의 비교 검토

본 논문에서는 편의상 단순 CET를 중심으로 비교 검토를 수행하였다. 상세 분석의 단순화 과정은 단순 CET의 각 표제에 상세 분석결과를 배치하는 것이다. 단순 CET 표제에 대한 설명과 여기에 상세 분석결과를 매칭한 내용을 기술하였다. 그림 1의 CET는 표 1에 표기한 바와 같이 한 개의 초기빈도 (Initial frequency) 표제와 6개의 표제로 구성되어 있다.

상세 분석 결과와 비교하면 이 단순 CET는 다음과 같은 특징이 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 앞에서 3개의 표제-표제 1, 표제 2, 표제 3-를 울진 3,4 호기 결과와 비교하면 PDS에 해당하는 표제임을 확인할 수 있다. 울진 3,4호기 PDS 논리도에 나타난 격납건물 우회 (CONBYPASS) 표제, 격납건물 격리 (CONISOLAT) 표제, 및 원자로냉각재계통 압력 (RCSPRESS) 표제와 일치한다. 따라서 PDS 논리도를 단순 CET에서 표제 3개로 축약하고 있음을 확인할 수 있다.

표제 4, 표제 5, 표제 6은 울진 3,4 호기 결과와 비교하면 CET에 해당하는 표제임을 확인할 수 있다. 울진 3,4 호기의 대표적인 CET에 나타난 앞에서 5개의 표제 즉, 일차계통 압력 경계 유도 파단 (RCSFAIL) 표제, 원자로용기 내부에서의 사고 정지 (MELTSTOP) 표제, 알파모드 격납건물 파손 (ALPHA) 표제, 원자로공동에 방출된 코륨(Curiom)의 양 (CR-EJECT) 표제, 조기 격납건물 파손 (CF-EARLY) 표제 등을 나타냄을 확인할 수 있다. 단순 CET에 나타나지 않는 표제들은 대량 조기방출 외의 다른 방출유형을 모사한다. 따라서 상세 분석인 CET을 단순 CET에서 표제 4, 표제 5, 표제 6의 3개의 표제로 축약하고 있음을 확인할 수 있다.

표제 7은 울진 3,4 호기 결과와 비교하면 CET 종결점에서 방사선원항의 영향을 고려하고 있는 표제임을 확인할 수 있다. 울진 3,4 호기 방사선원항 논리도를 검토하면 뒤의 세가지 표제 즉, 격납건물 파손시간 및 형태 (TIME-CF & MODE-CF) 표제, 원자로용기 외부 노심 용융물 냉각도 (EXVCOOL) 표제, 살수계통의 재순환 여부 (NO-RECSP) 표제 등이 관련이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 단순 CET에서 표기된 표제 7에 의한 9 번째 사고경로의 경우 상세 분석에서는 명확하게 나타나 있지 않음을 울진 3,4 호기 방사선원항 논리도에서 확인할 수 있다.

그림 1에서 단순 CET에 의해서 총 12개의 각기 다른 격납건물 사고경로로 분기됨을 확인할 수 있다. 이를 울진 3,4 호기의 방사선원항 논리도에 따른 STC로 분류하면 표 2와 같이 배치할 수 있다. 여기서 대량조기방출에 해당하는 울진 3,4호기 STC는 다음과 같다.

격납건물 우회:
- STC 18 (V-sequence)
- STC 19 (Steam Generator Tube Rupture)

격납건물 격리실패:
- STC 16 (Isolation failure– Succeed)
- STC 17 (Isolation failure – Fail)

기타(고압용융/수소 폭발, 등)
- STC 4 (Early containment failure – Rupture)
- STC 14 (Alpha mode failure)

따라서 단순 CET에서 Pitt 등이 지정한 사고경로 4번, 사고경로 9번, 사고경로 10, 사고경로 12번 등이 대량조기방출 사고경로임을 확인할 수 있다.

3.3 상세 정보의 단순 CET로의 전환 및 LERF 정량화

기본적인 비교 검토를 바탕으로 단순 CET의 각 표제에 대한 상세한 비교 검토 및 정량화를 수행한다. 정량화 과정은 상세 분석의 각 단계-즉, PDS, CET, ST-에 해당하는 표제 별로 구분하여 정량화 하여야 한다.

PDS 해당 표제

상세 분석의 PDS에 해당하는 표제의 경우 각 경로에 따라 상세 분석의 PDS로 분류하여 배치하면 된다. 따라서 상세 분석의 PDS 해당하는 각 표제 분기점의 조건확률은 다음과 같은 방식으로 정량화 할 수 있다.

표제 1 : Core Damage (Level 1 CDF)

이 표제는 LERF의 초기빈도(Initial Frequency)에 해당하는 항목으로 1 단계 PSA에서 평가된 CDF를 의미한다. 보다 정확한 의미는 PDS ET에서 얻어진 *PDSF* 로 나타내어야 한다.

본 계산에서는 표면적으로는 언급되어 있지 않지만 상세 분석인 2 단계 PSA에서 추정된 결과를 이용하므로 정확한 연결을 위해서는 *PDSF* 로 나타내어야 한다. *PDSF* 는 노심손상빈도 *CDF* 에서 격납건물내의 거동에 영향을 미치는 각 계통들의 이용불능도 R_C 를 의미하므로 이 표제의 정

확한 계산은 다음과 같이 계산되어야 한다.

$$PDSF = CDF \times R_C \quad (1)$$

상세 분석 결과와 일치시키기 위해서는 보다 정확하게 본 표제의 의미를 정의하여야 한다. 이 경우 본 표제는 각 $PDSF$들의 총합인 총 $PDSF$를 의미하는 것으로 보아야 상세 분석 결과와 정확한 일치 작업이 가능하다. 총 발전소손상상태 빈도 $PDSF$는 상세 분석에서 주어진 각 PDS군 빈도 PDS_i를 합하여 계산한다.

$$PDSF = \sum_i PDS_i \quad (2)$$

여기서 $PDSF$는 총 발전소손상상태 빈도를 의미하며 i는 각 PDS 군을 의미한다.

표제 2 : Containment Isolation or Not Bypassed (CINB)

격납건물의 격리여부와 우회여부를 의미하는 표제로서 노심손상 시점에서 격납건물 건전성을 다룬다. 이 표제는 노심손상 시점에서만 적용하고 온도로 인한 증기발생기 세관 파단 (temperature induced SGTR) 사고에는 적용하지 않는다.

이 표제 이후로는 관련된 분기점들의 조건확률을 계산하여야 한다. 본 표제의 경우 상세 분석의 PDS 논리도를 이용하여 일치 작업을 수행하여야 한다. 본 표제는 PDS 논리도 상의 해당 PDS 군들을 분류하여 각 분기점에 할당하여야 한다. 본 표제의 분기점 조건확률은 각 해당 $PDSF$의 합을 총 $PDSF$로 나누어서 구할 수 있다.

$$P(CINB) = \frac{\sum_j PDS_j}{\sum_i PDS_i} \quad (3)$$

$$P(\overline{CINB}) = \frac{\sum_{i \neq j} PDS_i}{\sum_i PDS_i} \quad (4)$$

여기서 $CINB$는 본 표제가 성공(Yes)인 경우이고 $\overline{CINB}$는 반대인 실패(No)의 경우이다. 그리고 i는 모든 PDS 군을 의미하고, j는 격납건물이 격리되지 않거나 우회된 PDS 군을 의미한다. 본 표제의 분기점들의 조건확률의 합은 1이 되어야 한다. 식 (3)과 식(4)의 합을 구해보면 정확하게 위의 조건을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

$$P(CINB) + P(\overline{CINB}) = \frac{\sum_j PDS_j}{\sum_i PDS_i} + \frac{\sum_{i \neq j} PDS_i}{\sum_i PDS_i} = 1$$

표제 3 : RCS Depressurized (RCSDP)

원자로냉각계통(RCS)의 감압 여부를 의미하는 표제로서 노심손상 동안 원자로 압력 상태를 다룬다. 본 표제는 원자로냉각계통의 고압상태와 저압상태만을 구분하고 있다. 상세 분석에서는 원자로의 압력 상태를 3가지로 구분하고 있다. 즉, 고압 상태, 중압 상태, 저압 상태이다. 상세 분석과 비교 검토에서 본 표제의 구분은 표제 5에서 다루는 유도 SGTR의 여부를 구분하는 기준으로 제 분류할 수 있다. 즉, 상세 분석에서 유도 SGTR이 존재하는 경우는 고압 상태에서만 발생한다. 유도 SGTR이 발생하는 상세 분석의 고압 상태와 유도 SGTR이 발생하지 않는 중압/저압 상태를 저압상태로 분류할 수 있다. 상세 분석에서 과도사건의 경우 고압 상태로 분류하고, 냉각재상실사고의 경우 중압/저압 상태로 분류한다. 따라서 본 표제의 경우 과도사건을 고압으로 냉각재상실사고를 저압으로 구분할 수 있다.

본 표제의 상세 분석과의 일치작업은 PDS 논리도를 이용하여 위에서 언급한 분류 작업이다. 본 표제는 PDS 논리도 상의 해당 PDS 군들을 분류하여 각 분기점에 할당하여야 한다. 본 표제는

전 단계의 표제 2의 *CINB* 분기점에서만 다루어지므로 본 표제의 분기점 조건확률은 해당 *PDSF* 의 합을 *CINB* 분기점에 해당하는 PDS 빈도의 합으로 나누어서 구할 수 있다.

$$P(RCSDP \mid CINB) = \frac{\sum_{k} PDS_k}{\sum_{j} PDS_j} \tag{5}$$

$$P(\overline{RCSDP} \mid CINB) = \frac{\sum_{j \neq k} PDS_j}{\sum_{j} PDS_j} \tag{6}$$

여기서 $RCSDP$ 는 본 표제가 성공(Yes)인 경우-즉, 감압에 성공하여 저압 상태인 경우이고, *RCSDP* 는 반대인 실패(No)의 경우-즉, 감압에 실패하여 고압 상태인 경우이다. 따라서 j 는 $CINB$ 인 PDS 군을 의미하고, k 는 감압에 성공하여 저압 상태에 해당하는 PDS 군을 의미하며, $j \neq k$ 는 저압 상태가 아닌 경우이므로 당연히 고압 상태에 해당하는 PDS 군을 의미한다.

위의 상세 비교에서 저압 상태는 냉각재상실사고 유형에서만 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 저압 상태는 냉각재상실사고 유형, 고압 상태는 과도사고 유형으로 분류할 수 있다.

PDS 해당 표제 경로

단순 CET 상의 어느 한 종결점 S 에 해당하는 사고경로 S 의 발생빈도 $F(S)$ 는 PDS 발생빈도 *PDSF* 과 해당 사고경로 S 의 조건확률 $P_S(s)$ 의 곱으로 표현할 수 있다. 즉,

$$F(s) = PDSF \cdot P_S(s) \tag{7}$$

단순 CET의 표제 4 이후-즉, CET, ST 해당 표제-의 분기점 조건확률을 계산하기 위해서는 표제 3까지-PDS 해당표제-의 종단점에 해당하는 발생빈도를 구분할 필요가 있다. 표제 3까지는 상세분석에서 PDS에 해당하는 부분으로 상세분석의 PDS를 더 간략하게 분류하는 것으로 보면 된다. 상세 분석의 PDS 들은 단순 CET에서 각기 세 가지 PDS 군들로 분류된다. 각 경로별로 발생빈도를 계산하면 다음과 같다.

첫번째 경로

첫번째 경로 $S1$ 의 발생빈도 F_{S1} 는 총 발전소손상상태 빈도 곱하기 표제 1의 성공 곱하기 표제 2의 성공임으로 다음과 같다.

$$F_{S1} = PDSF \cdot P(CINB) \cdot P(RCSDP \mid CINB)$$

여기에 해당하는 각각의 식 (2), 식 (3)과 식 (5)를 대입하면 다음과 같은 첫번째 경로 $S1$ 의 발생빈도 F_{S1} 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{S1} &= \sum_{i} PDS_i \cdot \frac{\sum_{j} PDS_j}{\sum_{i} PDS_i} \cdot \frac{\sum_{k} PDS_k}{\sum_{j} PDS_j} \\ &= \sum_{k} PDS_k \end{aligned} \tag{8}$$

두번째 경로

두번째 경로 $S2$ 의 발생빈도 F_{S2} 는 총 발전소손상상태 빈도 곱하기 표제 1의 성공 곱하기 표제 2의 실패임으로 다음과 같다.

$$F_{S2} = PDSF \cdot P(CINB) \cdot P(\overline{RCSDP} \mid CINB)$$

여기에 해당하는 각각의 식 (2), 식 (3)과 식 (6)를 대입하면 두번째 경로 $S2$ 의 발생빈도 F_{S2} 를 구할 수 있다.

$$F_{S2} = \sum_i PDS_i \cdot \frac{\sum_j PDS_j}{\sum_i PDS_i} \cdot \frac{\sum_{j \neq k} PDS_j}{\sum_j PDS_j} = \sum_{j \neq k} PDS_j \quad (9)$$

세번째 경로

세번째 경로 $S3$의 발생빈도 F_{S3}는 총 발전소손상상태 빈도 곱하기 표제 1의 실패임으로 다음과 같다.

$$F_{S3} = PDSF \cdot P(\overline{CINB})$$

여기에 해당하는 각각의 식 (2)와 식 (4)를 대입하면 세번째 경로 $S3$의 발생빈도 F_{S3}를 구할 수 있다.

$$F_{S3} = \sum_i PDS_i \cdot \frac{\sum_{i \neq j} PDS_i}{\sum_i PDS_i} = \sum_{i \neq j} PDS_j \quad (10)$$

이상과 같이 표제 3까지의 각 종단점 $S1$, $S2$, $S3$에 해당하는 경로 t에 속하는 PDS 군 빈도의 합이므로 표현할 수 있다.

$$F_{Sn}(t) = \sum_l PDS_l \quad (11)$$

여기서 $F_{Sn}(t)$는 표제 3까지의 각 경로의 발생 빈도이고, l은 각 경로에 해당하는 모든 PDS 군이다.

CET (CET) 해당 표제

일반적으로 상세 분석에서 CET은 각 PDS에 따라 작성한다. 따라서 단순 분석에서 CET에 해당하는 표제들을 정량화 하기위해서는 다음과 같은 작업이 필요하다. 우선 상세 분석의 각 PDS별로 상세 분석의 CET 분석 결과를 단순 분석의 CET에 해당하는 표제들과 일치시킨 후 해당 표제의 분기점 확률로 전환한다. 다음 각 PDS별로 작성된 단순 CET의 각 표제의 분기점 조건확률 값은 PDS 빈도에 따라 가중 합(Weighted Sum)을 구하는 방식으로 단순 CET의 각 표제의 분기점의 조건확률 값을 구하여야 한다.

또한 해당 표제가 상세 분석의 CET의 표제와 일치한다면 위의 방식에 따라 간단하게 표제 분기점의 조건확률을 구할 수 있지만, 울진 3,4 호기의 상세 분석에서처럼 각 표제의 의미나 분기점들이 정확하게 일치하지 않는 경우가 일반적이다. 이러한 경우에 단순 CET 표제의 분기점 조건확률 값은 단순하게 표제들을 일치시키는 방법으로는 구할 수 없다. 이때는 각 CET의 경로들에 따라 서로 일치하는 경로들로 분류한 다음에 재 구성하여야 한다. 즉, 단순 CET의 각 경로(path)들에 따라 상세 분석의 CET의 각 사고경로-즉 종결점-을 재 분류한다.

이 과정을 상세하게 설명하면 다음과 같다. 단순 CET에서 해당하는 표제들-표제 4, 표제 5, 표제 6에 의해서 분기되는 각 사고경로와 상세 분석의 CET의 각 종결점을 비교 검토하여 동일한 사고경로에 해당하는 것을 찾아 분류하고 재 결합하는 것이다. 우선 분류 작업은 상세 분석의 CET과 단순 CET의 각 종결점을 비교 검토하여 상세 분석의 CET의 각 분기점 중에서 단순 CET의 종결점과 일치하는 점을 표시한다. 단순 CET의 종결점이 상세 분석의 CET의 중간 분기점에 나타나는 이유는 단순 CET은 대량조기방출만을 평가하기 위해서 작성된 반면에 상세 분석의 CET은 모든 방출유형을 추적하기 때문이다.

상세 분석의 CET 상에 표기된 종결점 r은 단순 CET의 어느 한 종결점 s에 해당한다. 따라서 단순 CET 상에 종결점 s에 해당하는 상세 CET 상의 종결점 r의 조건확률 $P_D(r)$들의 합은 단순 CET 상의 일치하는 종결점 s의 조건확률 $P_S(s)$과 일치하여야 한다. 즉,

$$P_S(s) = \sum_r P_D(r) \tag{12}$$

여기서 $P_S(s)$은 단순 CET 상의 어느 한 종결점 s인 경로의 조건확률을 의미한다. 단순 CET 상의 종결점 s인 경로는 그림 1에서 확인할 수 있듯이 총 12 개의 경로가 존재한다. $P_D(r)$은 상세 CET의 어느 한 종결점 r인 경로의 조건확률을 의미한다. r은 단순 CET상의 한 종결점 s에 해당하는 경로들이다. 상세 분석의 CET의 해당 종결점 r의 조건확률 $P_D(r)$은 이미 분석된 상세 분석 결과를 이용하여 구한다.

$$P_D(r) = \prod_{HB} P_{HB} \tag{13}$$

여기서 P_{HB}는 경로상의 존재하는 표제의 분기점 HB들의 조건확률을 의미한다. 예를 들어 3번째 종결점까지 존재하는 표제들의 분기점이 각각 A표제 1분기점, B표제 2분기점, C표제 1분기점 등이라면 $P_D(3) = P_{A1} \cdot P_{B2} \cdot P_{C1}$이 이 종결점 경로의 조건확률이 된다.

상세 분석 결과에서 얻어진 각 경로상의 조건확률 $P_D(r)$을 이용하여 해당 단순 CET의 종결점의 조건확률 $P_S(s)$을 구하였으면 이를 이용하여 단순 CET 의 해당 표제의 분기점 조건확률을 구할 수 있다.

먼저 상세 분석 CET에 해당하는 단순 CET의 표제의 출발점은 상세 분석의 PDS에 해당하는 표제 1, 표제 2, 표제 3에서 분기된 경로들이다. 이는 그림 1에서와 같이 각각 3가지 경로로 분기된다. 각 경로는 먼저 분석에서처럼 상세 분석의 각 PDS로 할당됨으로 각각의 할당된 PDS에 해당하는 CET로부터 표제 3, 표제 4, 표제 5의 해당 분기점 조건확률을 구할 수 있다. 그림 1에서 위에서 첫번째 PDS 군들은 단순 CET의 경로 1 ~ 경로 4에 해당하며, 두 번째 PDS 군들은 경로 5 ~ 경로 10까지 해당하며, 세 번째 PDS 군들은 경로 11과 경로 12에 해당한다. 여기서 세 번째 PDS 군들은 경로 11과 경로 12는 그림 1에서 확인할 수 있듯이 상세 분석의 CET에 해당하는 표제가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 본 CET 분석 단계에서는 고려하지 않고 세 번째 PDS 군에 해당하는 상세 분석의 CET는 표제 7에서 다루었다.

단순 CET의 각 해당 표제별 분기점 e의 발생빈도는 해당 표제의 발생빈도 $\sum_l PDS_l$와 분기점의 조건확률 w^e의 곱이다. 이는 각 PDS 군별로 작성된 단순 CET 표제의 분기점 조건확률 w_l^e을 해당 PDS의 발생 빈도 PDS_l의 곱을 전부 합한 결과와 같아야 한다. 따라서 두 식은 동일하므로 다음과 같이 되어야 한다.

$$w^e \sum_l PDS_l = \sum_l w_l^e PDS_l \tag{14}$$

단순 CET를 이용한 분석에서 특정 표제의 한 분기점 조건확률 w^e은 상세 분석결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w^e = \frac{\sum_l w_l^e PDS_l}{\sum_l PDS_l} \tag{15}$$

각 CET 의 조건확률

***표제** 4 : Core Damage Arrested without Vessel Breach (CDAVB)*

먼저 첫번째 PDS 군들에서 표제 4을 살펴보면 각각 경로 1과 경로 2 ~ 경로 4까지가 분기점상에서 구별됨으로 표제의 분기점 확률은 각각 다음과 같다.

$$P(\overline{CDAVB} \mid S1) = \frac{\sum_{s=2}^{4} P_S(s)}{\sum_{s=1}^{4} P_S(s)} \tag{16}$$

$$P(CDAVB \mid S1) = \frac{P_S(1)}{\sum_{s=1}^{4} P_S(s)} \tag{17}$$

두 번째 PDS 군들에서 표제 4을 살펴보면 각각 경로 5과 경로 6 ~ 경로 10까지가 분기점상에서 구별됨으로 표제의 분기점 확률은 각각 다음과 같다.

$$P(\overline{CDAVB} \mid S2) = \frac{\sum_{s=6}^{10} P_S(s)}{\sum_{s=5}^{10} P_S(s)} \tag{18}$$

$$P(CDAVB \mid S2) = \frac{P_S(5)}{\sum_{s=5}^{10} P_S(s)} \tag{19}$$

표제 *5 : No Induced Steam Generator Tube Rupture (NISGT)*

먼저 첫번째 PDS 군들에서 표제 5을 살펴보면 해당하는 분기점들이 없음을 확인할 수 있다. 따라서 본 표제는 당연히 성공 분기점만 존재하므로 성공 분기점의 조건 확률은 각각 1 이다.

$$P(NISGT \mid \overline{CDAVB}, S1) = 1 \tag{20}$$

$$P(NISGT \mid CDAVB, S1) = 1 \tag{21}$$

두 번째 PDS 군들에서 표제 5을 살펴보면 $\overline{CDAVB}$ 상에서만 분기점이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 $\overline{CDAVB}$ 조건에서 각각 경로 6 ~ 경로 8과 경로 9, 경로 10으로 분기점상에서 구별됨으로 표제의 분기점 확률은 각각 다음과 같다.

$$P(NISGT \mid \overline{CDAVB}, S2) = \frac{\sum_{s=6}^{8} P_S(s)}{\sum_{s=6}^{10} P_S(s)} \tag{22}$$

$$P(\overline{NISGT} \mid \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(9) + P_S(10)}{\sum_{s=6}^{10} P_S(s)} \tag{23}$$

표제 *6 : No Containment Failure at Vessel Breach (NCFVB)*

먼저 첫번째 PDS 군들에서 표제 6을 살펴보면 $\overline{CDAVB}$ 조건에서만 분기점이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 $\overline{CDAVB}$ 조건에서 각각 경로 2와 경로 3,경로 4로 분기점상에서 구별되므로 본 표제의 분기점 조건확률은 각각 다음과 같다.

$$P(NCFVB \mid \overline{CDAVB}, S1) = \frac{P_S(2)}{P_S(2) + P_S(3) + P_S(4)} \tag{24}$$

$$P(\overline{NCFVB} \mid \overline{CDAVB}, S1) = \frac{P_S(3) + P_S(4)}{P_S(2) + P_S(3) + P_S(4)} \tag{25}$$

두 번째 PDS 군들에서 표제 6을 살펴보면 *NISGT* 조건에서만 분기점이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 *NISGT* 조건에서 각각 경로 6과 경로 7, 경로 8로 분기점상에서 구별되므로 표제의 분기점 조건 확률은 각각 다음과 같다.

$$P(NCFVB \mid NISGT, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(6)}{P_S(6) + P_S(7) + P_S(8)} \quad (26)$$

$$P(\overline{NCFVB} \mid NISGT, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(7) + P_S(8)}{P_S(6) + P_S(7) + P_S(8)} \quad (27)$$

방사선원항 (ST) 해당 표제

방사선원항 (ST) **해당 표제는 표** 1**과 같이** STC**의 분류에 따라 구분된다. 따라서 본 표제들은 위의** CET **정량화의 연장으로 볼 수 있으며 다음과 같이 조건 확률 값을 구할 수 있다. 단지 세 번째** PDS **군으로 구분된 경로** 11**과** 12**를 여기서 다루어야 한다.**

표제 *7 : No Potential for Early Fatalities (NPFEF)*

먼저 첫번째 PDS **군들에서 표제** 7**을 살펴보면** $\overline{NCFVB}$ **조건에서만 분기점이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서** $\overline{NCFVB}$ **조건에서 각각 경로** 3**와 경로** 4**로 분기점상에서 구별되므로 본 표제의 분기점 조건확률은 각각 다음과 같다.**

$$P(NPFEF \mid \overline{NCFVB}, \overline{CDAVB}, S1) = \frac{P_S(3)}{P_S(3) + P_S(4)} \quad (28)$$

$$P(\overline{NPFEF} \mid \overline{NCFVB}, \overline{CDAVB}, S1) = \frac{P_S(4)}{P_S(3) + P_S(4)} \quad (29)$$

두 번째 PDS **군들에서 표제** 6**을 살펴보면** $\overline{NCFVB}$ **조건과** $\overline{NISGT}$ **에서만 분기점이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서** $\overline{NCFVB}$ **조건에서는 각각 경로** 7**과 경로** 8**로 분기점상에서 구별되므로 표제의 분기점 조건 확률은 각각 다음과 같다.**

$$P(NPFEF \mid \overline{NCFVB}, NISGT, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(7)}{P_S(7) + P_S(8)} \quad (30)$$

$$P(\overline{NPFEF} \mid \overline{NCFVB}, NISGT, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(8)}{P_S(7) + P_S(8)} \quad (31)$$

$\overline{NISGT}$ **조건에서는 각각 경로** 9**과 경로** 10**로 분기점상에서 구별되므로 표제의 분기점 조건 확률은 각각 다음과 같다.**

$$P(NPFEF \mid \overline{NISGT}, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(9)}{P_S(9) + P_S(10)} \quad (32)$$

$$P(\overline{NPFEF} \mid \overline{NISGT}, \overline{CDAVB}, S2) = \frac{P_S(10)}{P_S(9) + P_S(10)} \quad (33)$$

세 번째 PDS **군에 해당하는** PDS **들은 격납건물의 격리 실패와 우회 경로들을 의미함으로 일반적으로 단일한 사고경로를 형성한다. 그러함에도 불구하고 여러 경로로 구성되는** CET**으로 구성되어 있다면 위에서** CET**의 방법에 따라 얻어진 조건확률을 경로** 11**과 경로** 12**에 대입하여 얻을 수 있다. 여기서는** $\overline{CINB}$ **조건에서는 각각 경로** 11**과 경로** 12**로 분기점상에서 구별되므로 표제의 분기점 조건 확률은 각각 다음과 같다.**

$$P(NPFEF \mid \overline{CINB}, S3) = \frac{P_S(11)}{P_S(11) + P_S(12)} \quad (34)$$

$$P(\overline{NPFEF} \mid \overline{CINB}, S3) = \frac{P_S(12)}{P_S(11) + P_S(12)} \quad (35)$$

이상과 같이 각 PDS **별로 단순** CET**상의 분기점 조건확률을 구하였으면 식** (15)**를 이용하여 단순** CET**상의 분기점 조건확률을 구할 수 있다.**

제 4 장 울진 3,4 호기 적용 사례

이상의 정량화 방법을 이용하여 울진 3,4 **호기의 상세 분석인** 2 **단계** PSA **결과에 적용하면**

다음과 같은 단순 CET를 이용한 LERF를 정량화 할 수 있다. 먼저 PDS에 해당하는 단순 CET의 표제를 정량화 하면 다음과 같다.

4.1 PDS 해당 표제 정량화

표제 1

울진 3,4 호기의 경우 PDS은 PDS 논리도에 따라 총 45개로 정의되어 있다. 따라서 울진 3,4 호기에 대한 본 표제의 초기 빈도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PDSF = \sum_{i=1}^{45} PDS_i$$

울진 3,4 호기의 각 PDS의 발생빈도는 표 3과 같다. 울진 3, 4호기의 경우 총 PDS 발생 빈도는 8.315E-06/년이다. 따라서 단순 CET 방법에서 표제 1의 발생빈도는 8.315E-06/년이다.

표제 2

울진 3,4 호기의 경우 본 표제의 실패에 해당하는 PDS 군들은 울진 3,4 호기 PDS 논리도에서 확인할 수 있듯이 각각 PDS 1, PDS 2, PDS 43, PDS 44, PDS 45로 구성되어 있다. 따라서 울진 3,4 호기에 대한 본 표제의 분기점 조건확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(CINB) = \frac{\sum_{i=3}^{42} PDS_i}{\sum_{i=1}^{45} PDS_i}$$

$$P(\overline{CINB}) = \frac{PDS_1 + PDS_2 + PDS_{43} + PDS_{44} + PDS_{45}}{\sum_{i=1}^{45} PDS_i}$$

울진 3,4 호기의 경우 PDS 3 ~ PDS 42까지의 발생빈도 $\sum_{i=3}^{42} PDS_i$ 는 6.804E-06/년이다. 따라서 $P(CINB) = 0.818$， $P(\overline{CINB}) = 0.182$ 이다.

표제 3

울진 3,4 호기의 경우 본 표제의 실패에 해당하는 고압상태의 PDS 군들은 울진 3,4 호기 PDS 논리도에서 확인할 수 있듯이 각각 PDS 3 ~ PDS 26로 구성되어 있다. 본 표제의 성공에 해당하는 저압상태의 PDS 군은 PDS 27 ~ PDS 42로 구성되어 있다. 따라서 울진 3,4 호기에 대한 본 표제의 분기점 조건확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(RCSDP \mid CINB) = \frac{\sum_{k=27}^{42} PDS_k}{\sum_{j=3}^{42} PDS_j}$$

$$P(\overline{RCSDP} \mid CINB) = \frac{\sum_{k=3}^{26} PDS_k}{\sum_{j=3}^{42} PDS_j}$$

울진 3,4 호기의 경우 PDS 27 ~ PDS 42까지의 발생빈도 $\sum_{i=27}^{42} PDS_i$ 는 2.9E-06/년이다. 따라서 $P(RCSDP \mid CINB) = 0.595$， $P(\overline{RCSDP} \mid CINB) = 0.405$ 이다.

4.2 CET 및 STC 해당 표제 정량화

CET 및 STC에 해당하는 표제 4, 표제 5, 표제 6, 표제 7의 경우 앞의 방법론에서 언급하였듯이 상세 CET를 분류하여 재 정량화하여야 한다. 울진 3,4 호기 2 단계 PSA에서 CET은 각 PDS에 따라 작성되어 있다. 이중 울진 3,4 호기 PDS 논리도에 따르면 PDS 1, PDS 2, PDS 43, PDS 44, PDS 45의 경우 단일 경로를 형성하여 단순한 CET가 작성되었으며, PDS 3 ~ PDS 42까지는 동일한 상세 CET가 작성되었다. 단순 CET 상의 본 해당 표제들은 울진 3,4 호기 상세 CET에서 앞에서 5개까지의 표제에 해당하며, 여기까지의 종결점 경로는 총 19개로 구성되어 있다. PDS 3 ~ PDS 42까지의 각 PDS 별로 총 19개의 종결점에 대한 조건확률을 구하였다. 이 19개의 종결점 조건확률을 표 2에 표시된 각 STC별로 단순 CET에 배치하면 각 PDS 별 단순 CET의 각 경로에 대한 조건확률을 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다. 이러게 구한 각 경로별 조건확률 $P_S(s)$ 을 이용하여 식 (16) ~ 식 (35)를 이용하여 단순 CET의 각 표제의 조건확률을 구할 수 있다.

RCS 감압 경로

울진 3,4 호기의 경우 앞서 언급한 3 가지 경로로 구분된 각 PDS 군집에 따라서 정량화를 하여야 한다. RCS가 감압에 성공한 경우에 해당하는 첫번째 PDS 군-즉, PDS 27 ~ PDS 42까지는 단순 CET 상에서 경로 1- 경로 4에 해당한다. 상세 CET상의 19개 종결점 $P_D(r)$ 들 중에서 $P_D(13)$ ~ $P_D(19)$ 은 RCS 고압인 경우로 상세 CET 상에서 값이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 각각 단순 CET상의 4개 종결점 $P_S(1)$ ~ $P_S(4)$ 에 다음과 같이 배당된다.

$$P_S(1) = P_D(1)$$
$$P_S(2) = P_D(2) + P_D(5) + P_D(8) + P_D(12)$$
$$P_S(3) = P_D(3) + P_D(6) + P_D(9)$$
$$P_S(4) = P_D(4) + P_D(7) + P_D(10) + P_D(11)$$

$P_S(1)$ ~ $P_S(4)$ 의 조건확률 값을 이용하여 단순 CET의 각 표제의 조건확률 값은 식 (16), 식 (17), 식 (24), 식 (25), 식 (28), 식 (29)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 구해진 각 PDS 별 단순 CET 표제들의 조건확률 값은 다시 식 (15)을 이용하여 최종 값을 구할 수 있다.

표 4는 RCS가 감압에 성공한 경우에 해당하는 첫번째 PDS 군-즉, PDS 27 ~ PDS 42까지의 단순 CET 표제의 조건확률 값을 구한 결과이다.

RCS 비감압 경로

울진 3,4 호기의 경우 두 번째 PDS 군집인 RCS 고압 경로는 다음과 같이 정량화를 하여야 한다. RCS가 감압에 실패한 경우에 해당하는 두 번째 PDS 군-즉, PDS 3 ~ PDS 26까지는 단순 CET 상에서 경로 5- 경로 10에 해당한다. 상세 CET상의 19개 종결점 $P_D(r)$ 들을 각각 단순 CET상의 6개 종결점 $P_S(5)$ ~ $P_S(10)$ 에 다음과 같이 배당된다.

$$P_S(5) = P_D(1) + P_D(13)$$
$$P_S(6) = P_D(2) + P_D(5) + P_D(8) + P_D(12) + P_D(14) + P_D(18)$$
$$P_S(7) = P_D(3) + P_D(6) + P_D(9) + P_D(15)$$
$$P_S(8) = P_D(4) + P_D(7) + P_D(10) + P_D(11) + P_D(16) + P_D(17)$$
$$P_S(9) = 0$$
$$P_S(10) = P_D(19)$$

$P_S(5)$ ~ $P_S(10)$ 의 조건확률 값을 이용하여 단순 CET의 각 표제의 조건확률 값은 식 (18), 식 (19), 식 (22), 식 (23), 식 (26), 식 (27), 식 (30), 식 (31), 식 (32), 식 (33)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 구해진 각 PDS 별 단순 CET 표제들의 조건확률 값은 다시 식 (15)을 이용하여 최종 값을 구할 수 있다.

표 5는 RCS가 감압에 실패한 경우에 해당하는 두 번째 PDS 군-즉, PDS 3 ~ PDS 26의 단순 CET 표제의 조건확률을 구한 결과이다.

격납건물 격리 실패 경로

울진 3,4 호기의 경우 세번째 PDS 군집인 격납건물 격리 실패 경로는 다음과 같이 정량화를 하여야 한다. 이 경우는 해당 PDS인 PDS 1, PDS2, PDS 43, PDS 44, PDS 45중에서 PDS 43은 노심손상 전 격납건물 파손에 관한 PDS 로 노심손상전 격납건물 파손은 상세 분석에서 24시간 내에 발생하지 않는 발전소손상 유형이기 때문에 결국 조기 방출에 해당하지 않는 경로이다. 따라서 PDS 43은 경로 11에 해당하고 나머지는 경로 12에 해당한다.

$$P(NPFEF \mid \overline{CINB}) = \frac{PDS_{43}}{PDS_1 + PDS_2 + PDS_{43} + PDS_{44} + PDS_{45}}$$

$$P(\overline{NPFEF} \mid \overline{CINB}) = \frac{PDS_1 + PDS_2 + PDS_{44} + PDS_{45}}{PDS_1 + PDS_2 + PDS_{43} + PDS_{44} + PDS_{45}}$$

따라서 $P(NPFEF \mid \overline{CINB}) = 0.240$， $P(\overline{NPFEF} \mid \overline{CINB}) = 0.760$ 이다.

4.3 최종 정량화 결과

위의 결과들을 종합하면 LERF를 산출하기 위한 단순 CET의 정량화 결과는 다음의 표 6과 같다. 표 6에서 확인할 수 있듯이 상세 CET의 분석결과를 단순 CET로 함축한 결과 울진 3,4 호기의 LERF는 1.237E-6/년으로 상세 분석결과와 일치함으로 확인할 수 있다. 또한 LERF의 조건확률 값은 0.1488로 계산되었다.

5. 결론 및 논의 사항

Pitt 등이 NUREG/CR-6595에서 제시한 단순 CET을 이용한 LERF 추정 방법은 원래 상세 분석 2 단계 PSA를 수행하지 않은 경우에 위험도정보활용에 사용할 대강의 LERF를 추정할 목적으로 개발되었다. 본 연구에서는 2 단계 PSA를 수행하여 분석 정보가 주어진 경우에 이 상세 분석 정보를 최대한 반영할 목적으로 위의 단순 LERF 추정 방법을 개선하였다. 그리고 적용성을 검증하기 위해서 2 단계 PSA가 수행된 울진 3,4 호기에 대한 정량화를 수행하였다. 울진 3,4 호기에 적용결과 상세 분석 정보의 손실 없이 단순화된 LERF 추정이 가능함을 보였다.

본 방법은 위험도 정보를 이용한 의사결정 분야인 기술지침서 변경 등에 활용할 수 있는 중요 척도의 하나인 LERF를 기존의 상세 분석 결과를 이용하여 추가적인 상세한 분석 없이도 효율적으로 추정하여 반영할 수 있음을 보였다. 또한 본 방법은 간단하면서도 기존의 상세 분석 정보를 담고 있어서 원전의 실시간 위험도 감시 시스템의 개발 시에 Pitt 등이 제시한 단순 추정방법보다도 정확하고 효율적으로 LERF를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

그러나 본 방법의 적용성을 높이기 위해서는 상세 정보의 축약에 따른 상대적인 정보의 손실 즉, 오차 범위에 대한 상세한 분석 및 평가가 있어야 한다. 이러한 오차 범위에 대한 분석 및 평가는 추가적인 연구를 통해서 해결하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

US NRC, “An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis,” Regulatory Guide 1.174, NRC, 1998

김시달 외, “**원자력발전소의 정량적인 안전해석을 위한 사건수목 기법의 응용**,” **한국산업안전학회지**, Vol. 15, No.4, 2000

W.T.Pratt et al., “An Approach for Estimating the Frequencies of Various Containment Failure Modes and Bypass Events,” B.N.L & S.N.L, NUREG/CR-6595, 1999

Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment, **한국전력공사**, 1995

W.T.Pratt et al., “Simplified Approach for Estimating Large Early Release Frequency,” Proceedings of PSAM4, Sep. New York, USA, 1998

Deepark Rao, “Insights from the Development of a Large Early Release Frequency (LERF) Risk Monitor Model,” Proceedings of ICONE8, Baltimore, USA, April 2000

강대일 외, “**위험도 정보를 이용한 울진 3,4호기 허용정지시간 변경**,” KAERI/TR-1772/2001, **한국원자력연구소**, 2001

강대일 외, “**전이위험도 평가를 이용한 허용정지시간 변경**,” KAERI/TR-1773/2001, **한국원자력연구소**, 2001

한석중 외, “**위험도정보활용을 위한 대량조기방출빈도 추정의 단순화 방법**,” KAERI/TR-2025/2002, **한국원자력연구소**, 2002

표 1. 단순 CET 표제

번호	기호	제목	관련 단계
표제 1	CDF	Core Damage (Initial Frequency)	PDS
표제 2	CINB	Containment Isolation or Not Bypassed	PDS
표제 3	RCSDP	RCS Depressurized	PDS
표제 4	CDAVB	Core Damage Arrested without Vessel Breach	CET
표제 5	NISGT	No Induced Steam Generator Tube Rupture	CET
표제 6	NCFVB	No Containment Failure at Vessel Breach	CET
표제 7	NPEF	No Potential for Early Fatalities	STC

표 2. 단순 CET 사고경로에 대한 울진 3,4 호기 STC 배치도

표제 1	표제 2	표제 3	표제 4	표제 5	표제 6	표제 7	경로	울진 3,4호기 STC
PDS	PDS	PDS	CET	CET	CET	ST		
							1	1
							2	2, 5~13, 15
							3	3
							4	4, 14
							5	1
							6	2, 5~13, 15
							7	3
							8	4, 14
							9	-
							10	19
							11	15
							12	16~19

표 3. 울진 3,4 호기 각 PDS의 발생 빈도

PDS 번호	빈도(/년)
PDS 1	5.400E-09
PDS 2	2.760E-09
PDS 3	1.540E-08
PDS 4	2.410E-11
PDS 5	7.900E-12
PDS 6	5.510E-12
PDS 7	3.190E-13
PDS 8	0.000E+00
PDS 9	3.160E-09
PDS 10	1.980E-12
PDS 11	2.780E-12
PDS 12	1.080E-13
PDS 13	4.450E-07
PDS 14	1.010E-08
PDS 15	5.420E-12
PDS 16	7.740E-12

PDS 번호	빈도(/년)
PDS 17	3.840E-13
PDS 18	6.240E-09
PDS 19	2.110E-06
PDS 20	2.540E-09
PDS 21	7.140E-09
PDS 22	6.270E-10
PDS 23	1.250E-08
PDS 24	2.200E-09
PDS 25	1.140E-09
PDS 26	2.870E-07
PDS 27	1.010E-06
PDS 28	2.080E-09
PDS 29	2.680E-07
PDS 30	6.280E-08
PDS 31	4.860E-09
PDS 32	7.470E-10

PDS 번호	빈도(/년)
PDS 33	2.040E-07
PDS 34	4.480E-10
PDS 35	8.370E-07
PDS 36	9.060E-10
PDS 37	1.160E-09
PDS 38	8.620E-11
PDS 39	2.860E-08
PDS 40	1.190E-06
PDS 41	2.460E-07
PDS 42	4.400E-08
PDS 43	3.620E-07
PDS 44	1.200E-09
PDS 45	1.140E-06
총 PDS 빈도	8.315E-06

표 4. PDS 27- PDS42에 해당하는 단순 CET 표제들의 조건확률

SEQ	LERF	CDAVB	NISGTR	NCFVB	NPFEF	
1		3.25E-1				3.25E-1
2		6.75E-1	1.00E+0	9.92E-1		6.70E-1
3				8.51E-3	1.32E-1	7.60E-4
4	LERF				8.68E-1	4.98E-3

표 5. PDS 3- PDS26에 해당하는 단순 CET 표제들의 조건확률

SEQ	LERF	CDAVB	NISGTR	NCFVB	NPFEF	
5		3.67E-1				3.67E-1
6		6.33E-1	9.67E-1	9.90E-1		6.06E-1
7				1.03E-2	3.79E-1	2.38E-3
8	LERF				6.21E-1	3.91E-3
9						
10	LERF		3.26E-2			2.06E-2

표 6. 단순 CET를 이용한 LERF 및 조건 확률

PDS	CIONB	RCSDP	CDAVB	NISGT	NCFVB	NPFEF	조건확률	발생빈도	경로	LERF
8.32E-06	0.818	0.595	0.325				0.158	1.31E-06	1	
			0.675	1	0.992		0.326	2.71E-06	2	
					0.008	0.132	0.0004	3.08E-09	3	
						0.868	0.0024	2.02E-08	4	LERF
		0.405	0.367				0.1217	1.01E-06	5	
			0.633	0.967	0.990		0.2009	1.67E-06	6	
					0.010	0.379	0.0008	6.57E-09	7	
						0.621	0.0013	1.08E-08	8	LERF
									9	
				0.033			0.0068	5.69E-08	10	LERF
	0.182					0.240	0.0435	3.62E-07	11	
						0.760	0.1382	1.15E-06	12	LERF
							0.1488	1.24E-06		Sum

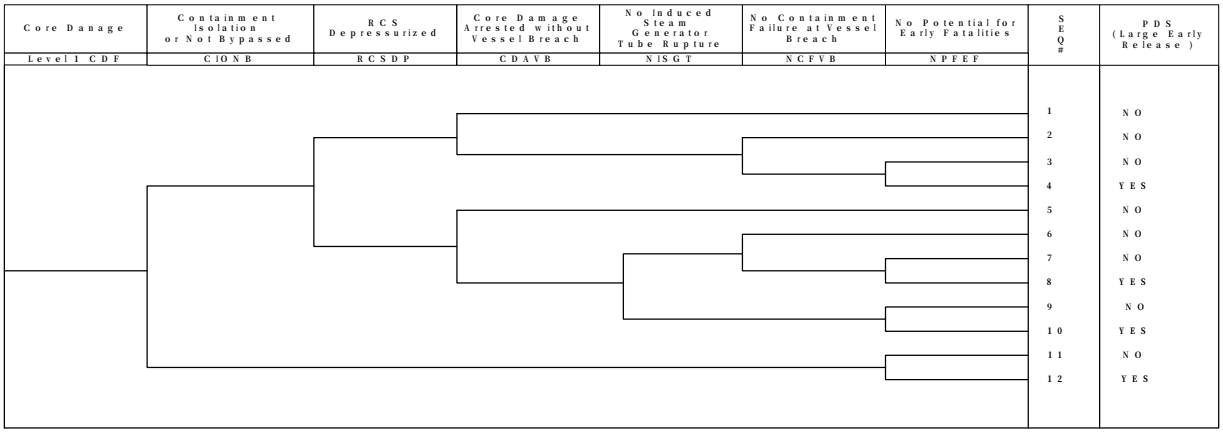

그림 1. Pitt 등이 제시한 LERF 추정을 위한 단순 CET