

원자력발전소의 화재사건 확률론적안전성평가 모델 구축에 관한 연구

강대일* · 김길유

한국원자력연구원 종합안전평가부

(2016. 8. 26. 접수 / 2016. 9. 21. 수정 / 2016. 9. 22. 채택)

A Study on the Constructions of Fire Events Probabilistic Safety Assessment Model for Nuclear Power Plants

Dae Il Kang^{*} · Kilyoo Kim

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 26, 2016 / Revised September 21, 2016 / Accepted September 22, 2016)

Abstract : A single fire event within a fire area can cause multiple initiating events considered in internal events probabilistic safety assessment (PSA). For an example, a fire event in turbine building fire area can cause a loss of the main feed-water and loss of off-site power initiating events. This fire initiating event could result in special plant responses beyond the scope of the internal events PSA model. One approach to address a fire initiating event is to develop a specific fire event tree. However, the development of a specific fire event tree is difficult since the number of fire event trees may be several hundreds or more. Thus, internal fire events PSA model has been generally constructed by modifications of the pre-developed internal events PSA model. New accident sequence logics not covered in the internal events PSA model are separately developed to incorporate them into the fire PSA model. Recently, many fire PSA models have fire induced initiating event fault trees not shown in an internal event PSA model. Up to now, there has been no analytical comparative study on the constructions of fire events PSA model using internal events PSA model with and without fault trees of initiating events. In this study, the changing process of internal events PSA model to fire events PSA model is analytically presented and discussed.

Key Words : nuclear power plants, fire event, probabilistic safety assessment, boolean algebra

1. 서론

국내 원전은 결정론적 화재 위험성 분석과 더불어 화재 PSA(probabilistic safety assessment)^{1,2)}가 수행되고 있다. 화재 PSA는 원전의 화재발생으로 인해 원자로내의 핵연료가 손상되는 노심손상(Level 1)과 방사성 물질이 격납용기 밖(Level 2)으로 방출되는 사고의 시나리오를 파악하여 그 빈도를 정량적으로 평가한다. 노심 손상은 원전의 원자로내에 있는 핵연료가 손상되는 것을 말한다. 화재 PSA에서 수행되는 업무는, 동일하거나 유사한 업무에 대해 결정론적 화재위험도분석에서 수행되는 업무와 비교시, 화재 PSA에서의 업무 범위가 더 크고 깊다. 예를 들면 화재 PSA에서 고려하는 기기들은 결정론적 안전성분석에서 고려하는 기기 이외에 사고완화에 필요한 비안전기기를 포함하여 내부사건 PSA에서 고려하는 기기, 인적요류 관련 계측기

등을 추가적으로 고려해야 한다³⁾.

단일 화재 사건으로 내부사건 PSA에서 고려하는 초기사건들이 다수 발생할 수 있다. 예를 들면 터빈건물 방화지역내의 화재사건은 주급수상실과 소외전원상실 사건을 유발할 수 있다. 이러한 화재 초기사건은 내부사건 PSA 모델 범위를 넘어서는 특별한 발전소 반응을 가져다 줄 수 있다. 화재 초기사건을 다루는 한 방법은 특유의 화재 사건수목(event tree)을 개발하는 것이다. 하지만 개발할 화재 사건수목의 수가 수백개 또는 그 이상 될수 있기에 특유의 화재 사건수목 개발은 매우 어렵다⁴⁾. 따라서, 화재사건 PSA 모델은 일반적으로 개발된 내부사건 PSA 모델을 수정하여 구축한다. 내부사건 PSA에 포함되지 않은 새로운 화재 사고 경위 논리는 별도로 개발한다.

현재 국내외의 많은 화재 PSA 모델은 내부사건 PSA 모델에는 나타나지 않은 화재유발 초기사건 고장수목

* Corresponding Author : Dae Il Kang, Tel : +82-42-868-8639, E-mail : dikang@kaeri.re.kr

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Korea

(fault tree: FT)을 가지고 있다⁴⁾. 화재 사건 PSA 모델 구축은 화재유발 초기사건 FT 모델을 만들지 않고서도 구축할 수 있다^{5,6)}. 지금까지 초기사건 FT가 있는 내부사건 PSA 모델의 화재사건 모델 변경 비교에 대한 해석적 연구는 없었다. 본 논문에서는 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 과정을 해석적으로 기술하고 논의하였다. 가상원전에 대해 화재 PSA 모델 구축과정을 초기사건 FT가 없을 경우와 있을 경우에 대해 해석적으로 기술하고 논의하였다. 2절에서는 노심손상빈도를 정의하고 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 규칙에 대해 기술하였다. 3절에서는 가상원전과 내부사건 노심손상빈도 식을 소개하였다. 소개된 노심손상빈도 식에 대해 화재사건 모델로 변경하는 과정과 논의사항을 기술하였다.

2. 노심손상빈도와 수정규칙

이 절에서는 노심손상빈도 식과 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 규칙에 대해 기술하였다.

2.1 노심손상빈도 식

원전의 화재로 인한 리스크인 노심손상빈도(CDF) 식은 일반적으로 다음처럼 표시될 수 있다^{3,5)}.

$$CDF = \sum_{k=1}^n CDF_k = \sum_{k=1}^n \%R_k S \%R_k C C D P_k \quad (1)$$

CDF_k = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 노심손상빈도

$\%R_k$ = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 화재빈도

$S \%R_k$ = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 심각도 인자(severity factor)와 진압실패확률(non-suppression probability)을 나타내는 심각도

$C C D P_k$ = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 조건부 노심손상확률(conditional core damage probability: C C D P)

2.2 수정규칙

내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 규칙은 초기사건 FT가 있을 경우와 없을 경우가 상이하다. 다음의 경우는 초기사건 FT가 없을 경우의 수정 규칙이다⁵⁾.

- 내부사건 PSA 초기사건: 만일 특정 화재 시나리오로 인해 내부사건이 발생하면 내부 초기사건과

특정 화재 시나리오를 ‘OR’ 논리로 변경한다. 이때 내부 초기사건 빈도 값은 ‘0’을 할당한다.

- 내부사건 PSA 기본사건(basic event): 만일 기기, 계측기, 또는 케이블이 특정 화재 시나리오에 의해 손상 받았다면, 기기와 계측기 및 케이블과 연관된 기기의 내부사건 PSA 기본사건과 ‘AND’ 논리를 ‘OR’ 논리로 변경한다. ‘AND’ 논리는 화재로 인한 손상기기나 계측기 또는 케이블과 연관된 기기의 화재 손상 사건과 심각도를 포함한 특정 화재 시나리오 발생사건 곱이다.

초기사건 FT가 있을 경우에는 초기사건 FT가 기기 고장 조합으로 이루어지기 때문에 기기 손상에 대한 내부사건 PSA 기본사건 수정 규칙을 적용하면 된다. 내부사건 PSA 초기사건 수정규칙은 적용이 안된다. 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 수정 알고리즘은 다음과 같다⁵⁾.

- 내부사건 PSA 초기사건

$$\%I = > \sum \%R_k S \%R_k \quad (2)$$

- 기기 손상에 대한 내부사건 PSA 기본사건

$$a \Rightarrow a + \sum \%R_k S \%R_k P \%R_{k-a} \quad (3)$$

$\%I$: 내부사건 PSA 초기사건

a : 기기 임의 고장(random failure)에 대한 내부사건 PSA 기본사건

$P \%R_{k-a}$: 기기나 계측기 또는 케이블과 관련된 PSA 기본사건에 대한 화재 손상사건

3. 가상 원전과 적용

이 절에서는 가상원전(hypothetical plant)의 소개와 수정규칙 적용결과와 논의사항을 기술하였다.

3.1 가상 원전

Fig. 1^{6,7)}에 나타난 가상원전은 기기 A, B, C, D와 케이블 1과 2에 있는 화재구역 R_1 과 R_2 로 구성되어 있다. 화재구역 R_1 에서 화재가 발생되면 내부사건 PSA 초기사건 IE_1 이 발생되고, 화재구역 R_2 에서 화재가 발생되면 내부사건 PSA 초기사건 IE_1 과 IE_2 가 발생한다고 가정한다. 화재로 인한 기기들 A, B, C, D의 고장사건이나 확률은 각각 a_f , b_f , c_f , 그리고 d_f 이다. 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하기 위한 사건들의 정의는 Table 1에 나타나 있다.

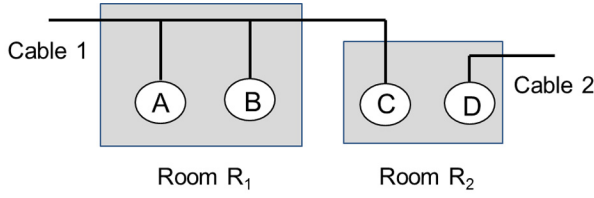


Fig. 1. Components located at fire rooms of hypothetical plant.

Table 1. Event descriptions

Event name	Event descriptions
%R ₁	Fire occurrence event or frequency in room 1
%R ₂	Fire occurrence event or frequency in room 2
S%R ₁	Severity for %R ₁
S%R ₂	Severity for %R ₂
a	Component A failure event or probability due to a random failure
b	Component B failure event or probability due to a random failure
c	Component C failure event or probability due to a random failure
d	Component D failure event or probability due to a random failure
e	Component E failure event or probability due to a random failure
g	Component G failure event or probability due to a random failure
a _f	Component A failure event or probability due to a fire in room 1
b _f	Component B failure event or probability due to a fire in room 1
c _{f1}	Component C failure event or probability due to a fire in room 1
c _{f2}	Component C failure event or probability due to a fire in room 2
d _f	Component D failure event or probability due to a fire in room 2

내부사건 PSA 모델이 다음의 2개의 단절집합 (minimal cutsets: MCS)으로 구성되어 있다고 가정한다.

$$\{IE_1abce, IE_2acd\} \quad (4)$$

식 (4)에서 ‘e’와 ‘g’는 화재와 무관한 사건이다. 식 (4)의 CDF 식은 다시 다음처럼 표현된다.

$$CDF = IE_1abce + IE_2acd \quad (5)$$

3.2 초기사건 FT가 없을 경우 화재 PSA 모델 구축

초기사건 FT 없이 화재 PSA 모델을 구축한 경우, 식(4)의 2개의 최소단절집합에 수정규칙 식(2)와 식(3)을 적용한다. 식(4)의 사건들 IE₁, IE₂, a, b, c, d는 다음의 오른쪽의 부울리안 식(Boolean formulas)^{1,7}으로 대치된다:

$$\begin{aligned} IE_1 &=> \%R_1S\%R_1 + \%R_2S\%R_2 \\ IE_2 &=> \%R_2S\%R_2 \\ a &=> a + \%R_1S\%R_1a_f \\ b &=> b + \%R_1S\%R_1b_f \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} c &=> c + \%R_1S\%R_1c_{f1} + \%R_2S\%R_2c_{f2} \\ d &=> d + \%R_2S\%R_2d_f \end{aligned}$$

변경과정의 단순화를 위해 %R₁, %R₂, c_{f1}을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정한다. 이 경우 식(6)의 부울리안 식은 다음 식(7)처럼 변경된다.

$$\begin{aligned} IE_1 &=> \%R_1 + \%R_2 \\ IE_2 &=> \%R_2 \\ a &=> a + \%R_1 \\ b &=> b + \%R_1 \\ c &=> c + \%R_1c_{f1} + \%R_2 \\ d &=> d + \%R_2 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (5)의 CDF식에 적용하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} CDF &= IE_1abce + IE_2acd \quad = \\ &(\%R_1+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2)e \\ &+ (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2)(d+\%R_2)g \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)을 계산하기 위해 부울리안 대수(Boolean algebra) 규칙^{1,8}의 멱등법칙(idempotent law)과 흡수법칙(absorption law), 그리고 화재가 동시에 발생하지 않는다는 규칙을 적용한다. 이들 법칙과 규칙을 식으로 표시하면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \text{멱등법칙: } X+X &= X, XX = X \\ \text{흡수법칙: } X+XY &= X \\ \text{화재가 동시발생안함: } \%R_1\%R_2 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 CDF 식(8)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} CDF &= (\%R_1a + \%R_1 + \%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2)e \\ &+ (\%R_2a)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2ab)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2)e+ \\ &(\%R_2ac+\%R_2a)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1c+\%R_1c_{f1}+\%R_2abc+\%R_2ab)e+ \\ &(\%R_2ad+\%R_2a)g \\ &= (\%R_1c+\%R_1c_{f1}+\%R_2ab)e+(\%R_2a)g \\ &= \%R_1ce+\%R_1c_{f1}e+\%R_2abe+\%R_2ag \end{aligned} \quad (10)$$

3.3 초기사건 FT가 있을 경우 화재 PSA 모델 구축

초기사건 FT가 있을 경우 화재 PSA 모델 구축은 초기사건 FT 모델 구축부터 시작된다. Fig. 1에서 내부사

건 PSA 초기사건 IE_1 은 화재사건 $\%R_1$ 또는 $\%R_2$ 에 의해 발생되고, IE_2 는 $\%R_2$ 에 의해 발생된다. 그리고 각 화재구역(fire room)에서의 화재시 기기가 손상되므로 IE_1 은 기기 A나 B 또는 C의 고장에 의해 발생되고 IE_2 는 기기 C나 D에 의해 발생한다고 가정할 수 있다. 따라서 IE_1 과 IE_2 는 직관적으로 다음의 부울리안 식(Boolean formulas)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} IE_1 &= > \%I-a + \%I-b + \%I-c \\ IE_2 &= > \%I-c + \%I-d \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 $\%I-x$ 는 기기 X의 기본사건 또는 빈도로 초기사건을 유발하는 기기들을 나타낸다.

화재사건 $\%R_1$ 발생시 기기 C가 고장날 가능성이 있다 할지라도 화재사건 $\%R_1$ 은 초기사건 IE_2 를 발생시키지 않는다. 따라서 식(11)은 다음처럼 표시된다.

$$\begin{aligned} IE_1 &= > \%I-a + \%I-b + \%I-c \\ IE_2 &= > \%I-d \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서, IE_1 과 IE_2 의 고장수목은 기기 고장사건으로 나타낼 수 있다. 식(3)의 기기 고장사건에 대한 수정규칙을 적용할 수 있다. 변경과정의 단순화를 위해 3.2절의 가정사항을 동일하게 사용한다. 즉, $\%R_1, \%R_2, c_{f-1}$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정한다. 이 경우, $\%I-a, \%I-b, \%I-c, \%I-d, IE_1$ 과 IE_2 는 다음처럼 표시할 수 있다:

$$\begin{aligned} \%I-a &= > 0 + \%R_1 \\ \%I-b &= > 0 + \%R_1 \\ \%I-c &= > 0 + \%R_1c_{f-1} + \%R_2 \\ \%I-d &= > 0 + \%R_2 \\ IE_1 &= > \%I-a + \%I-b + \%I-c = \\ &\quad \%R_1 + \%R_1 + \%R_1c_{f-1} + \%R_2 = \\ &\quad \%R_1 + \%R_2 \\ IE_2 &= > \%I-d = \%R_2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 초기사건 식들이 FT 초기사건 모델이 없는 식(7)에서의 초기사건 식과 같고 기기고장 식은 동일하기에, 식(10)과 같은 동일 CDF 식을 얻게된다.

화재 PSA 모델 구축을 위한 초기사건 FT는 많은 기기들의 고장조합으로 이루어지기 때문에 초기사건 FT를 정확하게 모델링을 못할 수도 있다. 예를 들면 식(13)대신 식(11)을 초기사건 FT 구축에 사용할 경우 $\%I-a, \%I-b, \%I-c, \%I-d, IE_1, IE_2$ 는 다음처럼 표시된다:

$$\begin{aligned} \%I-a &= > 0 + \%R_1 \\ \%I-b &= > 0 + \%R_1 \\ \%I-c &= > 0 + \%R_1c_{f-1} + \%R_2 \\ \%I-d &= > 0 + \%R_2 \\ IE_1 &= > \%I-a + \%I-b + \%I-c = \\ &\quad \%R_1 + \%R_1 + \%R_1c_{f-1} + \%R_2 = \\ &\quad \%R_1 + \%R_2 \\ IE_2 &= > \%I-c + \%I-d = \%R_1c_{f-1} + \%R_2 \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)에서 IE_2 는 식(13)의 IE_2 와 달리 표현되기에 CDF식은 다음처럼 표시된다:

$$\begin{aligned} CDF &= IE_1abce + IE_2acd g \\ &= (\%R_1+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_1c_{f-1}+\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1a+\%R_1+\%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_1ac_{f-1}+\%R_1c_{f-1}+\%R_2a)(c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2ab)(c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_1c_{f-1}+\%R_2ac+\%R_2a)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1c+\%R_1c_{f-1}+\%R_2abc+\%R_2ab)e + \\ &\quad (\%R_1c_{f-1}d+\%R_2a)g \\ &= \%R_1ce+\%R_1c_{f-1}e+\%R_2abe+\%R_2ag+\%R_1c_{f-1}dg \end{aligned} \quad (15)$$

식(15)를 식(10)과 비교시 추가적인 단절집합 $\%R_1c_{f-1}dg$ 가 얻어진다.

3.4 다른 가정 사용 경우

앞의 3.2와 3.3절에서는 $\%R_1, \%R_2, c_{f-1}$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정하였다. 이 절에서는 3가지 경우를 추가적으로 가정하였다:

- 가정 1: $\%R_1, \%R_2, c_{f-2}$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정
- 가정 2: $\%R_1, \%R_2, c_{f-1}, c_{f-2}$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정
- 가정 3: $\%R_1, \%R_2$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정. 그리고 R_1 에서의 초기사건 IE_1 유발 기기고장 조합이 달리 표시될 경우

3.4.1 가정 1의 경우

$\%R_1, \%R_2, c_{f-2}$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정하였다. 따라서, 초기사건 FT 없이 화재 PSA 모델 구축 경우, 식(6)의 사건들 IE_1, IE_2 는 식(7)과 동일하고 a, b, c, d는 다음의 오른쪽의 부울리안 식¹⁷⁾으로 대체된다:

$$\begin{aligned}
 a &=> a + \%R_1 \\
 b &=> b + \%R_1 \\
 c &=> c + \%R_1 + \%R_2c_{f2} \\
 d &=> d + \%R_2
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

식 (16)을 식 (5)의 CDF식에 적용하면 아래 식과 같다:

$$\begin{aligned}
 CDF &= IE_1abce + IE_2acd g \\
 &= (\%R_1+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1a+\%R_1+\%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2ab)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1c+\%R_1+\%R_2abc+\%R_2abc_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})g \\
 &= R_1e + \%R_2abce + \%R_2abc_{f2}e + \\
 &\quad \%R_2acg + \%R_2ac_{f2}g
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

초기사건 FT 모델이 있는 경우 IE₁과 IE₂는 아래식으로 표시된다.

$$\begin{aligned}
 IE_1 &=> \%I-a + \%I-b + \%I-c = \\
 &\%R_1 + \%R_1 + \%R_1 + \%R_2c_{f2}= \\
 &\%R_1 + \%R_2c_{f2} \\
 IE_2 &=> \%I-d = \%R_2
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

위의 식에서 IE₁은 식 (16)의 IE₁과 달리 표현된다. 결과적으로 CDF 식은 다음처럼 표현된다:

$$\begin{aligned}
 CDF &= IE_1abce + IE_2acd g \\
 &= (\%R_1+\%R_2c_{f2})(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1+\%R_2ac_{f2})(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1+\%R_2abc_{f2})(c+\%R_1+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1+\%R_2abc_{f2})e+(\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})g \\
 &= \%R_1e + \%R_2abc_{f2}e + \%R_2acg \\
 &\quad + \%R_2ac_{f2}g
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

식 (17)과 식(19)를 비교할 경우 식(17)에서는 %R₂abce의 추가적인 단절집합이 생성된다.

3.4.2 가정 2의 경우

%R₁, %R₂, c_{f1}, c_{f2}을 제외하고 Table 1의 모든 사건들

의 확률을 1이라고 가정하였다. 따라서, 초기사건 FT 없이 화재 PSA 모델 구축 경우, 식(6)의 사건들 IE₁, IE₂는 식(7)과 동일하고 a, b, c, d는 다음의 오른쪽의 부울리안 식¹⁷⁾으로 대체된다:

$$\begin{aligned}
 a &=> a + \%R_1 \\
 b &=> b + \%R_1 \\
 c &=> c + \%R_1c_{f1} + \%R_2c_{f2} \\
 d &=> d + \%R_2
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

식 (20)을 식 (5)의 CDF식에 적용하면 아래 식과 같다:

$$\begin{aligned}
 CDF &= IE_1abce + IE_2acd g \\
 &= (\%R_1+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1a+\%R_1+\%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2ab)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1c+\%R_1c_{f1}+\%R_2abc+\%R_2abc_{f2})e + \\
 &\quad (\%R_2ac+\%R_2ac_{f2})g \\
 &= \%R_1ce + \%R_1c_{f1}e + \%R_2abce + \%R_2abc_{f2}e \\
 &\quad + \%R_2acg + \%R_2ac_{f2}g
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

초기사건 FT 모델이 있는 경우 IE₁과 IE₂는 아래식으로 표시된다.

$$\begin{aligned}
 IE_1 &=> \%I-a + \%I-b + \%I-c = \\
 &\%R_1 + \%R_1 + \%R_1c_{f1} + \%R_2c_{f2} = \\
 &\%R_1 + \%R_2c_{f2} \\
 IE_2 &=> \%I-d = \%R_2
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

위의 식(22)에서 IE₁은 식(20)의 IE₁과 달리 표현된다. 결과적으로 CDF 식은 다음처럼 표현된다:

$$\begin{aligned}
 CDF &= IE_1abce + IE_2acd g \\
 &= (\%R_1+\%R_2c_{f2})(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1a+\%R_1+\%R_2ac_{f2})(b+\%R_1)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2abc_{f2})(c+\%R_1c_{f1}+\%R_2c_{f2})e+ \\
 &\quad (\%R_2ac + \%R_2ac_{f2})(d+\%R_2)g \\
 &= (\%R_1c+\%R_1c_{f1}+\%R_2abc_{f2})e+(\%R_2ac + \%R_2ac_{f2})g \\
 &= \%R_1ce+ \%R_1c_{f1}e+ \%R_2abc_{f2}e + \%R_2acg \\
 &\quad + \%R_2ac_{f2}g
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

식 (21)과 식(23)를 비교할 경우 식(21)에서는 3.4.1과 마찬가지로 $\%R_2abce$ 의 추가적인 단절집합이 생성된다.

3.4.3 가정 3의 경우

$\%R_1, \%R_2$ 을 제외하고 Table 1의 모든 사건들의 확률을 1이라고 가정하였다. 초기사건 FT 없이 화재 PSA 모델을 구축할 경우에는, R_1 에서의 초기사건 IE_1 유발 기기고장 조합이 달리 표시될 경우와 무관하므로 식(6)의 사건들 IE_1, IE_2 는 식(7)과 동일하고 a, b, c, d는 다음의 오른쪽의 부울리안 식^{1,8)}으로 대치된다:

$$\begin{aligned} a &=> a + \%R_1 \\ b &=> b + \%R_1 \\ c &=> c + \%R_1 + \%R_2 \\ d &=> d + \%R_2 \end{aligned} \tag{24}$$

식 (24)을 식 (5)의 CDF식에 적용하면 아래 식과 같다:

$$\begin{aligned} CDF &= IE_1abce + IE_2acd \\ &= (\%R_1+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1a+\%R_1+\%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1b+\%R_1+\%R_2ab)(c+\%R_1+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_2ac+\%R_2a)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1c+\%R_1+\%R_2abc+\%R_2ab)e + \\ &\quad (\%R_2ac+\%R_2a)g \\ &= R_1e + \%R_2abe + \%R_2ag \end{aligned} \tag{25}$$

R_1 에서의 초기사건 IE_1 유발 기기고장 조합이 달리 표시되기 때문에 초기사건 FT 모델이 있는 경우에는 IE_1 을 아래 식으로 표시하자.

$$\begin{aligned} IE_1 &=> \%R_1h_f + \%R_1m_f + \%R_2= \\ IE_2 &=> \%I-d = \%R_2 \end{aligned} \tag{26}$$

식(26)에서 h_f, m_f 는 Fig. 1에서 화재구역 R_1 에 있는 기기 H, M이 화재로 인해 손상되는 기기의 사건이나 확률이다. 식 (26)은 초기사건 유발 기기와 조건부노심손상확률(CCDP) 평가에 기여하는 기기들이 서로 다를 경우이다. 3.2와 3.3, 그리고 3.4.1과 3.4.2에서는 초기사건 유발 기기들과 조건부노심손상확률(CCDP) 평가에 기여하는 기기들 일부가 같을 경우이다. 결과적으로 식 (5)의 CDF식은 다음처럼 표현된다:

$$\begin{aligned} CDF &= IE_1abce + IE_2acd \\ &= (\%R_1h_f+\%R_1m_f+\%R_2)(a+\%R_1)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)e \\ &\quad + (\%R_2)(a+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1h_f+\%R_1m_f+\%R_2a)(b+\%R_1)(c+\%R_1+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_2a)(c+\%R_1+\%R_2)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1h_f+\%R_1m_f+\%R_2ab)(c+\%R_1+\%R_2)e + \\ &\quad (\%R_2ac+\%R_2a)(d+\%R_2)g \\ &= (\%R_1h_f+\%R_1m_f+\%R_2ab)e+(\%R_2ac+\%R_2a)g \\ &= \%R_1h_fe+\%R_1m_fe+\%R_2abe+\%R_2ag \\ &= \%R_1(h_f+m_f)e+\%R_2abe+\%R_2ag \end{aligned} \tag{27}$$

식 (27)에서 $h_f=m_f=1$ 이면 식 (25)와 동일하다. FT 정량화는 희 사상 근사(rare event approximation)⁸⁾을 하기에 h_f 와 m_f 가 모두 0.5보다 크면 식 (27)의 정량화 결과는 식 (25)보다 큰 값을 갖게 된다. 희 사상 근사는 다음과 같이 정의된다⁸⁾:

$$P(X+Y) \approx P(X) + P(Y) \tag{28}$$

식(28)에서 $P(X)$ 는 사건 X가 발생할 확률이다. 식 (28)의 정확한 표현은 $P(X) + P(Y) - P(XY)$ 이다. PSA에서는 X, Y의 확률이 0.1보다 작을 경우 식(28)을 유효하게 사용할 수 있다⁸⁾. 하지만 화재유발 기기고장 확률은 0.1보다 큰 값으로 평가될 경우가 많다⁹⁾. 만일 식 (26)에서 $\%R_1h_f + \%R_1m_f$ 이 $\%R_1h_fm_f$ 로 표현된다면 식 (27)의 정량화 결과는 식 (25)보다 작게된다.

3.5 논의

본 연구에서는 내부사건 PSA 모델을 이용한 화재 PSA 모델 구축시 초기사건 FT 모델이 있는 경우와 없는 경우에 대해, 화재유발 기기고장 확률 값의 변화에 따른 화재 PSA 모델 변환과정을 보이고 있다. 식(2)와 식(3)에서 심각도($S\%R_k$)는 항시 점화 빈도($\%R_k$)와의 곱으로 표시된다. 이 두 변수는 한 개의 변수로 표현할 수 있기에 본 연구에서는 심각도 값의 변화는 고려하지 않았다.

본 연구의 3.2, 3.3, 그리고 3.4.1과 3.4.2는 특정 기기의 화재유발 고장이 초기사건과 조건부노심손상확률(CCDP) 평가에 동시에 영향을 줄 경우이다. 하지만 실제 화재 PSA에서는 본 연구의 3.4.3처럼 특정 기기의 화재유발 고장이 초기사건과 조건부노심손상확률 평가에 동시에 영향을 주지 않을 경우도 있을 수 있다.

본 논문의 3.2, 3.3, 그리고 3.4.1과 3.4.2의 연구결과를 보면, 내부사건 PSA 모델을 이용한 화재 PSA 모델을

구축시 초기사건 FT가 없는 경우에는, 추가적인 단절 집합이 만들어질 수 있다. 하지만 초기사건 FT 모델이 있는 경우에도, 초기사건 FT 모델을 정확히 표현하지 못하면 추가적인 단절집합이 만들어질 수 있다. 따라서 내부사건 PSA 모델을 이용한 화재 PSA 모델 구축 후 정량화 결과에 대한 상세한 검토가 필요하다. 본 연구에서 초기사건 FT가 없는 경우 만들어지는 추가적인 단절집합(%R_{2abce})은 화재빈도와 내부사건 임의의 고장 사건(random failure event) 곱으로 표시된다. 기기 고장확률이 10⁻²~10⁻³ 크기임을 고려시 추가적인 단절집합의 빈도는 크지 않다. 초기사건 FT 모델이 제대로 만들어지지 않을 경우에, 추가적으로 만들어지는 단절 집합(%R_{1c₁dg})은 화재빈도와 화재유발 기기 고장확률, 그리고 내부사건 임의의 사건 곱으로 표시된다. 화재 유발 기기 고장확률이 기기의 임의 고장확률보다 상대적으로 크기 때문에 단절집합의 빈도는 큰 값을 나타낼 수도 있다.

특정 기기의 화재유발 고장이 초기사건과 조건부 노심손상확률(CCDP) 평가에 동시에 영향을 주지 않을 경우에는, 화재 PSA 모델 구축에 초기사건 FT를 이용한 경우가 이용하지 않은 경우보다 더 보수적인 정량화 결과를 나타낼 수 있다. 이 경우 초기사건 FT 모델은 기기들의 화재유발 고장조합이 'OR' 논리로 이루어진다. 화재 PSA의 상세분석을 위해 화재 시나리오를 많이 만들면 만들수록 초기사건과 조건부노심손상 확률에 동시에 영향을 주지 않는 경우가 많아질 수 있다. 이는 많은 기기가 동시에 손상될 수 있는 하나의 화재 시나리오를 세분화하여 몇 개의 기기만 손상되는 여러 시나리오로 분류하면 초기사건과 조건부노심손상 확률 평가에 동시에 영향을 줄 가능성이 작아지기 때문이다.

초기사건 FT 모델 없이 만들어진 화재 PSA 모델 정량화 결과는, 초기사건 FT 모델을 이용한 정량화 결과보다 일반적으로 보수적인 결과를 나타낸다. 이러한 보수적인 결과를 완화시키기 위한 한 방안으로는, 화재빈도 값을 그대로 사용하지 않고 초기사건 유발 기기 고장확률을 고려해 화재시나리오 빈도를 재 평가하여 화재 PSA 모델을 정량화 하는 것이다. 초기사건 FT 모델을 이용한 화재 PSA 모델 구축에는 초기사건 FT를 별도로 만들어야 하는 추가적인 업무가 필요하다. 특정 초기사건에 대한 기기와 케이블들의 파악이 어려우면 특정 초기사건을 모델링하지 않고 화재 PSA 모델을 구축할 수 있다. 이 경우에는 초기사건 FT가 없기 때문에 본 연구에서 제시된 방법과 절차와 같이 화재 PSA 모델을 구축한다.

4. 결론

본 논문에서는 내부사건 PSA 모델을 화재사건 PSA 모델로 변경하는 과정을 해석적으로 기술하고 논의하였다. 초기사건 FT 모델 없이 만들어진 화재 PSA 모델 정량화 결과는, 초기사건 FT 모델을 이용한 정량화 결과보다 일반적으로 보수적인 결과를 나타낸다. 하지만, 특정 기기의 화재유발 고장이 초기사건과 조건부노심손상확률 평가에 동시에 영향을 주지 않을 경우에는, 화재 PSA 모델 구축에 초기사건 FT를 이용한 경우가 이용하지 않은 경우보다 더 보수적인 정량화 결과를 나타낼 수 있다. 화재 PSA의 상세분석을 위해 화재 시나리오를 많이 만들면 만들수록 초기사건과 조건부노심손상확률에 동시에 영향을 주지 않는 경우가 많아질 수 있다.

내부사건 PSA 모델을 이용한 화재 PSA 모델 구축시 초기사건 FT가 없는 경우에는, 추가적인 단절집합이 만들어질 수 있다. 하지만 초기사건 FT 모델이 있는 경우에도, 초기사건 FT 모델을 정확히 표현하지 못하면 추가적인 단절집합이 만들어질 수 있다. 따라서 내부사건 PSA 모델을 이용한 화재 PSA 모델 구축 후 정량화 결과에 대한 상세한 검토가 필요하다.

감사의 글: This work was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant, funded by the Korean government, Ministry of Science, ICT & Future Planning.

References

- 1) John C. Lee and Norma J. McCormick, "Risk and Safety Analysis of Nuclear Systems", Wiley, 2011.
- 2) H. -J. Jeon, "A Risk Impact Assessment According to the Reliability Improvement of the Emergency Power Supply System of a Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No. 5, pp. 224-228, 2012.
- 3) B. Najafi, S.P. Nowlen, F. Joglear, D. Funk, R. C. Anoba, M. Kazarians, F. Wyant, A. Kolaczowski, G. Hannaman and J. Forester, "Fire PRA methodology for Nuclear Power Facilities", NUREG/CR-6850, USNRC, 2005.
- 4) R. C. Anoba, "MAPPING OF FIRE EVENTS TO MULTIPLE INTERNAL EVENTS PRA INITIATING EVENTS", International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis PSA 2011, March 13-17, 2011.

- 5) D. I. Kang, S. H. Han and K. Kim, "An Approach to the Construction of a One-top Fre Event PSA Model", Nucl. Eng. Des, Vol. 239, pp. 2514-2520, 2009.
- 6) D. Il. Kang, K. Kim, D. -S. Kim, M. J. Hwang and J. -E. Yang, "Analytic Expressions for the Construction of a Fre Event PSA Model", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 12-13, 2016.
- 7) K.Y. Kim and S.H. Han, "A Study on Importance Measures and a Quantification Algorithm in a Fire PRA Model", Reliability Engineering & System Safety 94, pp.969-972, 2009.
- 8) W. E. Vecely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts and D. F. Haasl, "Fault tree handbook", NUREG-0492, USNRC, 1981.
- 9) M. Subudhi and M. Martinez-Guridi, "Joint Assessment of Cable Damage and Quantification of Effects from Fire (JACQUE-FIRE) Volume 2: Expert Elicitation Exercise for Nuclear Power Plant Fire-Induced Electrical Circuit Failure", NUREG/CR-7150, USNRC, 2014.