Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 35, No. 1, pp. 97-106, February 2020
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2020.35.1.97

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

다수기 PSA 수행을 위한 새로운 정량화 방법

박성규* · 정우식**†

A New Quantification Method for Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment

Seong Kyu Park* · Woo Sik Jung**†

†Corresponding Author
Woo Sik Jung
Tel : +82-2-3408-4413
E-mail : woosjung@sejong.ac.kr

Received : October 18, 2019
Revised : October 22, 2019
Accepted : February 4, 2020

Copyright@2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : The objective of this paper is to suggest a new quantification method for multi-unit probabilistic safety assessment (PSA) that removes the overestimation error caused by the existing delete-term approximation (DTA) based quantification method. So far, for the actual plant PSA model quantification, a fault tree with negates have been solved by the DTA method. It is well known that the DTA method induces overestimated core damage frequency (CDF) of nuclear power plant (NPP). If a PSA fault tree has negates and non-rare events, the overestimation in CDF drastically increases. Since multi-unit seismic PSA model has plant level negates and many non-rare events in the fault tree, it should be very carefully quantified in order to avoid CDF overestimation. Multi-unit PSA fault tree has normal gates and negates that represent each NPP status. The NPP status means core damage or non-core damage state of individual NPPs. The non-core damage state of a NPP is modeled in the fault tree by using a negate (a NOT gate). Authors reviewed and compared (1) quantification methods that generate exact or approximate Boolean solutions from a fault tree, (2) DTA method generating approximate Boolean solution by solving negates in a fault tree, and (3) probability calculation methods from the Boolean solutions generated by exact quantification methods or DTA method. Based on the review and comparison, a new intersection removal by probability (IRBP) method is suggested in this study for the multi-unit PSA. If the IRBP method is adopted, multi-unit PSA fault tree can be quantified without the overestimation error that is caused by the direct application of DTA method. That is, the extremely overestimated CDF can be avoided and accurate CDF can be calculated by using the IRBP method. The accuracy of the IRBP method was validated by simple multi-unit PSA models. The necessity of the IRBP method was demonstrated by the actual plant multi-unit seismic PSA models.

Key Words : multi-unit PSA, delete-term approximation (DTA) method, intersection removal by probability (IRBP) method

1. 서 론

1.1 배경

2011년 3월 11일에 발생한 후쿠시마 원전 사고는 지진과 쓰나미로 인하여 후쿠시마 제 1 발전소 부지의 3개 원전에서 동시에 노심손상(Core Damage)이 발생한 사고였으며, 이러한 경험을 통하여 실제로 다수기 원전에서 동시에 노심손상 사고가 발생할 수 있음이 확인되었다.

다수기 원전에서 동시에 노심손상 사고가 발생하여 방사성 물질이 소외로 방출되는 경우, 매우 심각한 소외결말이 초래될 수 있다. 지금까지 원전에 의한 대중의 리스크 평가에 가장 중요한 척도로 고려되었던 조기 사망 및 장기 건강 영향은 선형 피폭모델을 따르지 않는다. 따라서 다수기 원전에서의 방사성 물질 동시 방출에 의한 소외결말은 각 개별 호기의 방사성 물질

*(주)액트 원전안전성평가센터 이사 (Atomic Creative Technology)
**세종대학교 원자력공학과 교수 (Department of Nuclear Engineering, Sejong University)

방출에 의한 소외 영향을 선형적으로 결합한 소외결말을 심각하게 초과할 수 있다.

또한 원전 부지 전체의 사고 빈도는 부지에 위치한 호기 수와 직접적으로 관련된다. 따라서 단일기 PSA (Probabilistic Safety Assessment)를 통하여 평가된 호기별 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF) 및 대량조기방출빈도(Large Early Release Frequency, LERF)와 같은 리스크 척도를 다수기 부지에 대한 리스크를 평가할 때 동일하게 적용하는 것은 적합하지 않다. 그러므로 다수기 사고에 의한 리스크를 합리적으로 평가하여 새로운 규제요건을 수립하거나 기존 비상대응 및 사고관리체계의 개정 여부를 결정하여야 한다. 이러한 결정에 필수적으로 요구되는 리스크 정보를 제공하기 위해서는 다수기 PSA를 수행하는 것이 반드시 필요하다.

후쿠시마 원전사고 이후 국내외에서 다수기 PSA와 관련된 다양한 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구에는 다수기 PSA 모델에 대한 효율적인 정량화 방법의 개발도 포함하고 있다.

아래의 Fig. 1은 다수기 PSA에서 정량화 대상이 되는 발전소 상태조합을 사건수목으로 표현하였다. Fig. 2는 다수기 발전소 상태조합을 Venn diagram으로 표현하였다.

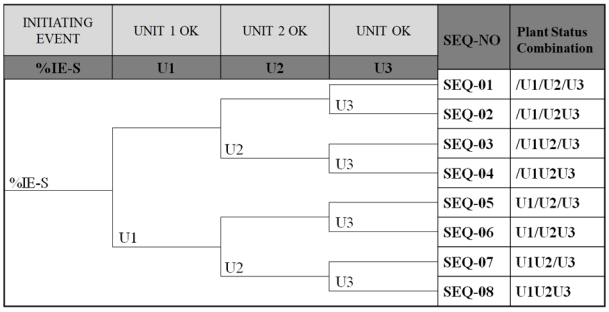

Fig. 1. Event tree for multi-unit PSA.

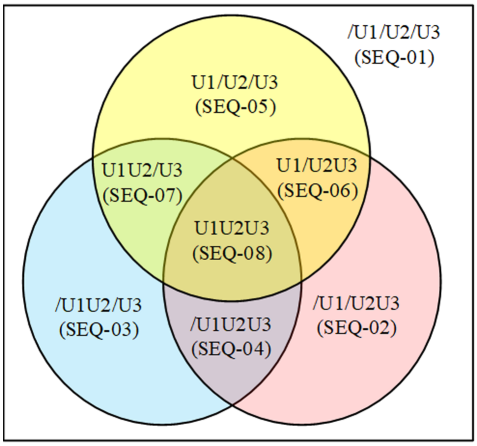

Fig. 2. Venn diagram for multi-unit PSA event tree.

예를 들어, 다수기 PSA 사건수목의 6번 사고경위(SEQ-06)에 대한 발전소 상태조합 U1/U2U3의 경우 U2 호기는 노심손상이 발생하지 않은 상태이고 U1 호기와 U3 호기는 노심손상이 발생한 경우에 대한 논리조합을 표현하고 있다.

다수기 PSA를 수행하기 위해서는 (1) 단일기 PSA 모델에 호기간 종속성을 반영하여 각 호기별 다수기 PSA 모델을 개발하고 (2) 각 호기별 다수기 PSA 모델을 이용하여 Fig. 1과 Fig. 2에 제시된 바와 같은 발전소 상태조합을 고장수목에 반영하고, (3) 각 발전소 상태조합 고장수목에 대하여 노심손상 부울리안 해(Boolean solution)를 계산하고 이를 이용하여 노심손상 확률이나 빈도를 계산하는 정량화를 수행한다.

다수기 PSA 고장수목에서 노심손상이 발생한 호기는 일반 게이트로 구성하고 노심손상이 발생하지 않은 호기는 Negate로 구성한다. 따라서 다수기 PSA를 수행하기 위해서는 일반 게이트와 Negate로 구성되는 발전소 상태조합 고장수목을 정확하게 정량화할 수 있는 방법을 사용하여야 한다.

다수기 PSA에서 1개 호기 이상에서 노심손상이 발생하는 Site CCDP(Conditional Core Damage Probability)와 2개 호기 이상에서 노심손상이 발생하는 Multi-unit CCDP 는 아래의 식(1)로 표현될 수 있다. 방법에 따라 Site CDF와 Multi-unit CDF로 구분할 수도 있다. 본 논문은 Site CCDP와 Multi-unit CCDP를 사용한다.

$$\begin{aligned} Site\ CCDP = {} & p(U1/U2/U3) \\ & + p(/U1\,U2/U3) \\ & + p(/U1/U2\,U3) \\ & + p(U1\,U2/U3) \\ & + p(U1/U2\,U3) \\ & + p(/U1\,U2\,U3) \\ & + p(U1\,U2\,U3) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} Multi-unit\ CCDP = {} & p(U1\,U2/U3) \\ & + p(U1/U2\,U3) \\ & + p(/U1\,U2\,U3) \\ & + p(U1\,U2\,U3) \end{aligned}$$

고장수목 정점사건의 확률을 계산하는 정량화는 (1) 고장수목으로부터 부울리안 해를 계산하고 (2) 계산된 부울리안 해의 확률을 계산하는 단계로 구성된다.

고장수목으로부터 정확한 부울리안 해를 계산하는 다양한 방법(2.1절 참조)들이 알려져 있으나 이들 방법들은 실제 발전소에 대한 PSA와 같은 대형 고장수목에 대하여는 사용이 불가능하다. 따라서 실제 발전소에 대한 PSA는 대부분의 경우 근사 부울리안 해를 계산하는 DTA(Delete Term Approximation) 방법(2.1절 참조)을 사용하고 있다. 또한 실제 발전소에 대한 PSA에

서 부울리안 해의 확률을 계산하는 경우에도 근사적인 방법을 사용하여 왔으나 최근에는 부울리안 해의 확률을 계산하는 단계에서의 과평가 오류를 제거할 수 있는 방법들이 제시되었다(2.2절 참조).

1.2 논문의 목적 및 구성

고장수목에 다수의 비희귀 사건이 포함되어 있는 경우, DTA 방법으로 계산된 CDF는 심각한 과평가가 유발될 수 있음이 알려져 있다(5장 참조). 본 논문의 목적은 DTA 기반 정량화 방법 대신에 다수기 PSA에서 CDF를 정확하게 계산할 수 있는 새로운 정량화 방법을 제시하는 것이다. 본 논문은 새로운 다수기 PSA 정량화 방법의 설명과 적용에 대한 체계적인 설명을 위하여 아래와 같이 구성되어 있다.

(1) 2장에서 일반 게이트와 Negate로 구성된 고장수목을 정량화하는 방법들을 기술하였고
(2) 3장에서 DTA 기반의 다수기 PSA 모델에 대한 정량화 방법을 설명하였고
(3) 4장에서 DTA 기반의 정량화 방법을 대체하여 CDF 과평가를 대폭 감소시킬 수 있는 새로운 다수기 PSA 정량화 방법을 설명하였고
(4) 5장에서 새로운 다수기 PSA 정량화 방법을 단순 다수기 PSA 모델과 실제 다수기 PSA 모델 예제에 적용하여, 새로운 다수기 PSA 정량화 방법의 장점을 보여 주었고
(5) 6장에서 본 논문의 내용과 결론을 요약하여 기술하고 있다.

2. 고장수목 정량화 방법

2.1 부울리안 해 계산 방법

고장수목으로부터 부울리안 해를 계산하는 방법에는 정확한 부울리안 해를 계산하는 방법과 근사 부울리안 해를 계산하는 방법이 있다.

본 논문에서는 부울리안 해를 계산하는 방법에 대한 설명을 보조하기 위하여 아래의 식(2)와 같은 고장수목 예제를 사용하였다.

$$\begin{aligned} F &= U1 / U2 \\ U1 &= A + B + C \\ U2 &= C + D \end{aligned} \tag{2}$$

고장수목으로부터 정확한 부울리안 해를 계산하는 정량화 방법은 고장수목의 Negate에 포함된 모든 기본사건과 관련된 정보가 부울리안 해에 포함되도록 하는 정량화 방법이다. 즉, 각 기본사건의 성공 및 실패의 영향이 고장수목으로부터 계산된 부울리안 해에 명확하게 표현되는 방법이며 이는 기본적으로 Shannon-Decomposition[1)]의 개념에 기반하고 있다. 고장수목으로부터 정확한 부울리안 해를 계산하는 다양한 방법 가운데 전산프로그램으로 구현되어 활용이 가능한 방법은 진리표 방법과 고장수목을 BDD(Binary Decision Diagram)로 변환하는 방법이 있다. 정확한 부울리안 해를 계산하는 정량화 방법을 본 논문에서는 Exact Method로 명명한다.

진리표 방법은 고장수목에 포함된 모든 기본사건에 대한 성공/실패 조합 가운데 고장수목 정점사건의 발생조건을 만족시키는 조합을 식별하는 방법이다[2)]. 정점사건 F에 대한 진리표 적용결과는 아래의 식(3)와 같다.

$$\begin{aligned} F &= AB/C/D + A/B/C/D + /AB/C/D \\ &= A/C/D + /AB/C/D \\ &= B/C/D + A/B/C/D \end{aligned} \tag{3}$$

진리표 방법을 적용한 정량화 방법은 미국 EPRI의 DPC(Direct Probability Calculator) 전산프로그램[3)]에 구현되어 있다. 그러나 고장수목에 포함된 기본사건의 수가 n이 되면 각 기본사건의 상태 조합은 2^n이 되므로 대부분의 실제 발전소 PSA와 같이 다수의 기본사건을 포함하는 고장수목에는 본 방법의 사용이 불가능하다. 그러나 본 방법을 적용한 DPC 전산프로그램은 단일 계통의 이용불능도 또는 아주 단순한 사고 완화가 모델링되는 일부 지진 PSA 모델에는 사용이 가능한 것으로 알려져 있다.

고장수목의 BDD 변환은 고장수목의 논리구조를 BDD 논리구조로 변경하는 방법이다. BDD는 기본적으로 진리표 적용 방법에 단순화 규칙을 적용하여 진리표 적용을 통하여 계산되는 부울리안 해를 가장 단순한 기호체계로 표현하는 기법이다[4)]. 고장수목의 논리구조를 직접 BDD로 변환하는 방법에 대하여는 이미 다수의 연구결과가 제시되어 있다. Rauzy[5)]와 Jung[6,7)]은 고장수목을 BDD로 변환하기 위하여 요구되는 다수의 이론적 기반과 이를 반영한 다양한 알고리즘을 제시하였다. 또한 KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)는 고장수목을 BDD로 변환하는 알고리즘을 FTREX[8)] (Fault Tree Reliability Evaluation eXpert) 전산프로그램에 구현하였다. FTREX를 이용하여 위의 고장수목을 BDD로 변환하면 진리표를 적용한 경우와 동일한 부울리안 해를 얻을 수 있다.

고장수목의 논리구조를 BDD로 표현하는 방법은 최근 가장 각광받고 있는 PSA 정량화 방법이다. 그러나

본 정량화 방법 또한 고장수목을 구성하는 기본사건의 수가 증가하면 BDD 구조가 기하급수적으로 확대되므로 대부분의 경우, 실제 발전소 PSA 모델 정량화에 사용하는 것은 불가능하다. 따라서 본 방법의 적용성은 DPC 전산프로그램을 사용하는 경우와 유사하다.

근사 부울리안 해를 계산하는 정량화 방법은 현재 대부분의 실제 발전소 PSA에서 사용하고 있는 DTA 방법이다. DTA 방법은 Negate 하부의 논리를 만족시키는 일반 게이트의 최소단절집합을 제거하여 최종 최소단절집합을 계산하는 방법이다[9]. DTA 방법을 식(2)의 고장수목으로 설명하면 아래와 같다.

(1) F = U1/U2이기 때문에 U1에 대한 세 개의 최소단절집합 A, B, C 각각을 TRUE로 바꾸어 U2에 전파한다.
(2) 최소단절집합 A혹은 B는 U2를 TRUE로 바꾸지 않기 때문에 F의 최소단절집합이 된다.
(3) 최소단절집합 C는 U2를 TRUE로 만들고, 따라서 /U2를 FALSE로 만들고, 결국 F를 FALSE로 만들기 때문에 삭제된다.
(4) 위의 (2)와 (3)의 과정을 통하여 F의 최종 최소단절집합은 A와 B가 된다.

DTA 방법은 최근 일부 지진 PSA에서 고장수목에 비희귀 사건 모델링을 시작하기 전까지는 희귀사건 모델링을 근본적으로 가정하는 모든 PSA에서 정량화의 근간으로 사용되어 왔다.

2.2 부울리안 해의 확률 계산 방법

정확한 부울리안 해가 계산된 경우에는 부울리안 해 각각의 최소단절집합은 확률적으로 분리(Disjointed)되어 있으므로 부울리안 해의 각 변수에 확률을 대입하면 정확한 부울리안 해의 확률을 계산할 수 있다.

DTA 방법으로 계산된 근사 부울리안 해의 확률을 계산하는 방법에는 1) 근사 부울리안 해의 확률을 정확하게 계산하는 방법과 2) 근사 부울리안 해의 확률을 근사적으로 계산하는 방법으로 구분된다. 근사 부울리안 해의 확률을 정확하게 계산할 수 있는 방법에는 IE(Inclusion-Exclusion) 방법, SDP(Sum of Disjoint Products) 방법, 부울리안 해의 BDD 변환 방법이 있다. 부울리안 해의 확률을 근사적으로 계산하는 방법에는 희귀사건근사(Rare Event Approximation, REA) 방법, MCUB(Min Cut Upper Bound) 방법이 있다. 각 개별 방법에 대한 상세한 설명과 수식 표현 방법은 Jung[9]에 상세하게 기술되어 있다. 아래에서는 실제 발전소 PSA에서 부울리안 해(최소단절집합)의 확률 계산에 사용되는 REA, MCUB, 최소단절집합의 BDD 변환 방법을 간략하게 설명하고 있다.

REA 방법은 고장수목으로부터 계산된 최소단절집합에 포함되는 기본사건이 동시에 발생할 가능성을 무시하는 방법이며 아래의 식(4)을 이용하여 최소단절집합의 근사 확률을 계산한다. 본 식에서 c_i는 각 개별 최소단절집합이다.

REA 방법은 최소단절집합을 구성하는 기본사건의 확률이 희귀사건인 경우에는 정확한 계산과 비교하여 과평가 오류가 상당히 적다. 그러나 최소단절집합에 다수의 비희귀 기본사건이 포함되면 계산된 최소단절집합의 확률은 상당한 과평가 오류를 포함하는 것으로 알려져 있다.

$$p(F) \approx p_{REA} = \sum_i p(c_i) \tag{4}$$

MCUB 방법은 아래의 식(5)을 이용하여 최소단절집합의 근사 확률을 계산한다. 본 계산식에서 최소단절집합에 포함된 동일한 기본사건에 의한 종속성은 무시한다. 본 식에서 c_i는 각 개별 최소단절집합이다.

MCUB 방법을 사용하여 계산된 최소단절집합 확률은 REA 방법을 통하여 계산된 확률에 비하여 과평가 오류가 적다. 그러나 본 방법을 적용하더라도 최소단절집합에 다수의 비희귀 기본사건이 포함되어 있는 경우, 계산된 최소단절집합의 확률은 상당한 과평가 오류를 가지는 것으로 알려져 있다.

$$p(F) \approx p_{MCUB} = 1 - \prod_i (1 - p(c_i)) \tag{5}$$

최소단절집합을 BDD로 변환하는 방법은 Shannon decomposition 방법을 이용하여 최소단절집합을 BDD로 변환한다. 최소단절집합 F의 모든 변수에 대해 순차적으로 아래의 식(6)과 같이 분해한 후에 정점사건의 정확한 발생확률을 계산한다.

$$\begin{aligned} &F = xF_x + \bar{x}F_{\bar{x}} = ite\,(x, F_1, F_0) \\ &F_x = F_1 = F(x=1) = F(x = true) \\ &F_{\bar{x}} = F_0 = F(x=0) = F(y = true) \\ &p(F) = p_{BDD} = p(x)p(F_x) + p(\bar{x})p(F_{\bar{x}}) \end{aligned} \tag{6}$$

본 방법은 최소단절집합의 정확한 확률을 계산할 수 있지만 최소단절집합의 수가 많아지면 BDD 크기가 급격하게 증가되어 실제 발전소 PSA에서 계산되는 모든 최소단절집합에 대하여 적용하는 것은 불가능하다. 따

라서 최소단절집합을 BDD로 변환하는 전산프로그램은 최소단절집합의 크기가 매우 큰 경우에는 일부의 최소단절집합에 대하여 선택적으로 적용할 수 있는 기능을 제공하고 있다. 최소단절집합을 BDD로 변환하는 방법은 세종대학교에서 개발한 BeEAST(Boolean Equation Evaluation, Analysis, and Sensitivity Tool)[10] 전산프로그램과 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 ACUBE(Advanced Cutset Upper Bound Estimator)[11]전산프로그램에 구현되어 있다.

3. 기존의 다수기 PSA 정량화 방법

2장에서 살펴본 바와 같이 고장수목으로부터 정확한 부울리안 해를 계산하는 정량화 방법을 실제 발전소 단일기 또는 다수기 PSA 모델에 사용하는 것은 현 시점에서는 불가능하다. 이러한 이유로 현재까지 대부분의 실제 발전소 단일기 또는 다수기 PSA에서는 근사 부울리안 해를 계산하는 정량화 방법 즉, DTA를 고장수목으로부터 부울리안 해(최소단절집합)를 계산하는 방법으로 사용하여 왔다.

본 논문에서는 DTA에 기반하고 있는 기존의 다수기 PSA 정량화 방법을 Method 1으로 명명하여 사용한다. 다수기 PSA의 정량화 대상인 발전소 상태조합 고장수목에 대하여 DTA 방법을 사용하는 경우에 대한 확률 표현식은 아래의 식(7)과 같다.

(Method 1 - DTA)

$$\begin{aligned} p(U1/U2) &\approx p(U1') \\ p(U1/U2/U3) &\approx p(U1'') \end{aligned} \tag{7}$$

Where,

U1' is cutsets of U1 delete-termed by U2

U1" is cutsets of U1 delete-termed by U2 and U3

DTA 방법에 의하여 계산된 최소단절집합의 확률은 REA, MCUB, 최소단절집합의 BDD 변환 방법을 이용하여 계산할 수 있다.

고장수목으로부터 근사 부울리안 해를 계산하는 방법 즉, DTA 방법은 Negate 하부에 모델링된 기본사건들이 정점사건의 최소단절집합에 정확하게 반영되지 못하는 단점이 있다. 고장수목에 모델링되는 기본사건들이 모두 희귀사건인 경우에는 이러한 과평가가 미미하여 실제 발전소에 대한 다수기 PSA의 정량화에 사용될 수 있다. 그러나 기본사건들이 비희귀사건인 경우에는 최종 계산되는 최소단절집합 확률에 상당한 과평가 오류가 유발될 수 있다.

4. 새로운 다수기 PSA 정량화 방법

본 논문에서는 DTA 방법 대신에 아래의 식(8)에 기반하여 새로운 다수기 PSA 정량화 방법을 제시한다. 식(8)에서 보는 바와 같이 새로운 다수기 PSA 정량화 방법은 Negate에 모델링된 기본사건의 정보를 부울리안 해를 계산하는 단계에서 개별적으로 고려하지 않고 게이트 수준의 확률 계산을 통하여 통합적으로 반영하는 방법이다.

$$p(U1/U2) = p(U1) - p(U1U2) \tag{8}$$

위의 식은 다수기 PSA에서 정량화 대상인 모든 발전소 상태조합 고장수목 게이트에 적용이 가능하며 위의 식을 이용하여 다수기 PSA 모델의 정량화가 가능하다. 본 논문에서 제시하는 새로운 다수기 PSA 정량화 방법은 Method 2 또는 IRBP(Intersection Removal By Probability) 방법이라 명명하여 사용한다. 3개 호기에 대한 다수기 PSA에서 U1 호기만 노심손상이 발생하며 U2 호기와 U3 호기는 노심손상이 발생하지 않는 발전소 상태조합에 대하여 IRBP 방법을 사용하는 경우에 대한 확률 표현식은 아래의 식(9)와 같다.

(Method 2 - IRBP)

$$\begin{aligned} & p(U1/U2/U3) \\ &= p(U1/(U2+U3)) \\ &= p(U1) - p(U1(U2+U3)) \\ &= p(U1) - p(U1U2+U1U3) \\ &= p(U1) - p(U1U2) - p(U1U3) + p(U1U2U3) \end{aligned} \tag{9}$$

위의 개념을 Fig. 1의 3개 호기에 대한 다수기 PSA 모델에 확장하면, 각 발전소 상태 조합에 대한 확률은 아래의 식(10)을 이용하여 정량화가 가능하다.

$$\begin{aligned} p(/U1/U2/U3) &= 1 - p(U1+U2+U3) \\ p(U1/U2/U3) &= p(U1) - p(U1U2+U1U3) \\ p(/U1U2/U3) &= p(U2) - p(U1U2+U2U3) \\ p(/U1/U2U3) &= p(U3) - p(U1U3+U2U3) \\ p(U1U2/U3) &= p(U1U2) - p(U1U2U3) \\ p(U1/U2U3) &= p(U1U3) - p(U1U2U3) \\ p(/U1U2U3) &= p(U2U3) - p(U1U2U3) \\ p(U1U2U3) &= p(U1U2U3) \end{aligned} \tag{10}$$

위의 식 (10)의 우변에서 $p(U1U2+U1U3)$ 등은 IE 방법으로 $p(U1U2)+p(U1U3)-p(U1U2U3)$와 같이 확장하여 정확하게 계산한다. 다수기 PSA 모델 정량화 식은 4개 이상의 호기에 대한 다수기 PSA 모델에서도

용이하게 확장된다. 예를 들어, 4개 호기로 구성된 다수기 PSA 모델에서 2개 호기에서만 노심손상이 발생하고 다른 두 개 호기에서 노심손상이 발생하지 않는 모든 발전소 상태 조합의 확률은 다음의 식(11)과 같이 표현될 수 있다. 식 (11)에서 우변의 식들은 IE 방법으로 확장하여 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} & p(2-units\ CD) \\ & = p(U1U2+U1U3+U1U4+U2U3+U2U4+U3U4) \\ & \quad -p(U1U2U3+U1U2U4+U1U3U4+U2U3U4) \end{aligned} \tag{11}$$

IRBP 방법은 특정 호기 손상 조합에 대한 최소단절집합을 계산하는 과정에서 Negate를 사용하지 않기 때문에 DTA 기반의 기존 정량화 방법론에 의하여 유발되는 과평가 오류를 극복할 수 있다. 또한 고장수목으로부터 계산된 최소단절집합을 BDD로 변환하는 방법을 추가로 사용하면 최소단절집합의 확률 계산 과정에서 유발되는 과평가 오류는 REA 또는 MCUB에 비하여 매우 적다. 따라서 현시점에서 가용한 최신 기술의 적용성을 고려하면 본 논문에서 제시하는 새로운 다수기 정량화 방법인 IRBP 방법은 다수기 PSA에서 정량화 오류를 최소화하는 현실적인 방법으로 판단된다.

그러나 본 방법은 고장수목 정점사건 정량화를 수행하기 위하여 두 개 이상의 별도의 정점사건 확률을 사용하기 때문에 정량화 대상이 되는 고장수목 정점사건의 확률을 직접 계산할 수 있는 부울리안 해가 계산되지 않는 단점이 있다. 아래의 Table 1은 다수기 정량화 방법 Method 1과 Method 2의 PSA 모델 특성별 과평가 오류 정도를 비교하고 있다.

Table 1. Comparison of result overestimation by quantification method

Model Characteristics	Method 1 - DTA (see section 3)	Method 2 - IRBP (see Eq.(9))
Rare events - internal PSA	Very small overestimation	Very small overestimation
Non-rare events - Seismic PSA	Very large overestimation	Very small overestimation

5. 다수기 PSA 정량화 방법 적용 예제

본 장에서는 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화 방법과 새로운 다수기 PSA 정량화 방법인 IRBP를 다수기 PSA 모델 예제에 적용하여 계산된 결과를 비교하여 설명하고 있다. 본 연구에서 사용한 다수기 PSA 모델의 예제는 단순 다수기 PSA 모델과 실제 다수기 PSA 모델이다. 단순 다수기 PSA 모델에 대하여는 각 기본사건이 희귀 사건인 경우와 비희귀 사건인 경우에 대하여 정량화한 결과를 비교하였다. 실제 다수기 PSA 모델의 경우는 모델링된 대부분의 기본사건이 희귀사건인 소외전원상실사고 다수기 PSA 모델과 상당수의 비희귀 기본사건을 포함하고 있는 지진사건 다수기 PSA 모델을 사용하여 정량화한 결과를 비교하였다. 또한 단일기 PSA에서 과평가 오류가 크게 유발될 수 있는 사고경위에 대하여 본 논문에서 제시하고 있는 새로운 정량화 방법인 IRBP를 사용하는 예제를 설명하였다.

(1) 5.1절의 Exact Method는 고장수목을 BDD로 변환하는 방법이고 (2) Method 1의 DTA-MCUB는 MCUB를 이용하여 최소단절집합의 확률을 계산한 경우이고, (3) Method 1의 DTA-BDD는 최소단절집합을 BDD로 변환하여 확률을 계산한 경우이고, (4) Method 2는 본 논문에서 제시하는 IRBP 방법이다.

5.1 단순 다수기 PSA 모델

본 예제에서 사용한 단순 다수기 PSA 모델은 아래의 Fig. 3와 같다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 본 단순 다수기 PSA 모델은 3개의 호기로 구성되어 있으며 호기별 독립사건과 호기간 종속사건을 모두 포함하고 있다.

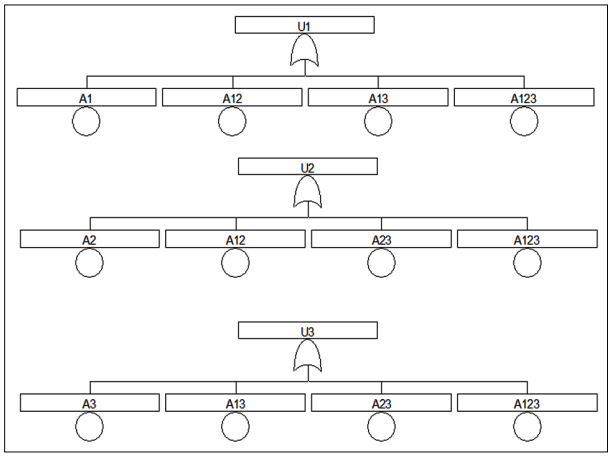

Fig. 3. A simple multi-unit PSA model.

단순 다수기 PSA 모델의 모든 기본사건 확률이 0.001인 경우(모든 기본사건이 희귀사건인 경우)와 모든 기본사건 확률이 0.2인 경우(모든 기본사건이 비희귀사건인 경우)에 대하여 각 정량화 방법을 적용하여 계산한 결과를 아래의 Table 2와 Table 3에 제시하였다.

희귀사건 단순 다수기 PSA 모델에 대하여는 Table

Table 2. Comparison with simple multi-unit PSA model (rare events)

Plant Status Combination	Exact Method(a)	Method 1				Method 2	
		DTA-MCUB(b)	Error(e)	DTA-BDD(c)	Error(f)	IRBP(d)	Error(g)
/U1/U2/U3	9.930210E-01	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
U1/U2/U3	9.940150E-04	1.000000E-03	0.602%	1.000000E-03	0.602%	9.94015E-04	0.000%
/U1U2/U3	9.940150E-04	1.000000E-03	0.602%	1.000000E-03	0.602%	9.94015E-04	0.000%
/U1/U2U3	9.940150E-04	1.000000E-03	0.602%	1.000000E-03	0.602%	9.94015E-04	0.000%
U1U2/U3	9.970011E-04	1.000999E-03	0.401%	1.001000E-03	0.401%	9.97001E-04	0.000%
U1/U2U3	9.970011E-04	1.000999E-03	0.401%	1.001000E-03	0.401%	9.97001E-04	0.000%
/U1U2U3	9.970011E-04	1.000999E-03	0.401%	1.001000E-03	0.401%	9.97001E-04	0.000%
U1U2U3	1.005987E-03	1.005995E-03	0.001%	1.005987E-03	0.000%	1.00599E-03	0.000%
Site CCDP	6.979035E-03	7.008992E-03	0.429%	7.008987E-03	0.429%	6.979035E-03	0.000%
Multi-Unit CCDP	3.996990E-03	4.008992E-03	0.300%	4.008987E-03	0.300%	3.996990E-03	0.000%

(a) Exact method (see section 2.1).
(b) DTA-MCUB (see section 3 and Eq.(5)).
(c) DTA-BDD (see section 3 and Eq.(6)).
(d) IRBP (see section 4).
(e) 100*(b-a)/a.
(f) 100*(c-a)/a.
(g) 100*(d-a)/a.

Table 3. Comparison with simple multi-unit PSA model (non-rare events)

Plant Status Combination	Exact Method(a)	Method 1				Method 2	
		DTA-MCUB(b)	Error(e)	DTA-BDD(c)	Error(f)	IRBP(d)	Error(g)
/U1/U2/U3	2.09715E-01	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
U1/U2/U3	5.24288E-02	2.000000E-01	281.5%	2.000000E-01	281.5%	5.24288E-02	0.000%
/U1U2/U3	5.24288E-02	2.000000E-01	281.5%	2.000000E-01	281.5%	5.24288E-02	0.000%
/U1/U2U3	5.24288E-02	2.000000E-01	281.5%	2.000000E-01	281.5%	5.24288E-02	0.000%
U1U2/U3	9.50272E-02	2.320000E-01	144.1%	2.320000E-01	144.1%	9.50272E-02	0.000%
U1/U2U3	9.50272E-02	2.320000E-01	144.1%	2.320000E-01	144.1%	9.50272E-02	0.000%
/U1U2U3	9.50272E-02	2.320000E-01	144.1%	2.320000E-01	144.1%	9.50272E-02	0.000%
U1U2U3	3.47917E-01	3.788034E-01	8.9%	3.479168E-01	0.0%	3.47917E-01	0.000%
Site CCDP	7.902843E-01	1.674803E+00	111.9%	1.643917E+00	108.0%	7.902843E-01	0.000%
Multi-unit CCDP	6.329979E-01	1.074803E+00	69.8%	1.043917E+00	64.9%	6.329979E-01	0.000%

(a) Exact method (see section 2.1).
(b) DTA-MCUB (see section 3 and Eq.(5)).
(c) DTA-BDD (see section 3 and Eq.(6)).
(d) IRBP (see section 4).
(e) 100*(b-a)/a.
(f) 100*(c-a)/a.
(g) 100*(d-a)/a.

2에서 보는 바와 같이 실제 발전소 PSA에서 가장 많이 사용되고 있는 정량화 방법인 DTA-MCUB와 Exact Method를 사용하여 계산한 결과를 비교하면 부지 CCDP와 다수기 CCDP 모두 0.5% 이하의 과평가 오류만을 보여주고 있다. IRBP 방법은 Exact Method를 이용하여 계산된 결과와 완전히 일치하고 있음을 보여준다. 본 예제와 같이 고장수목에 포함되는 모든 기본사건이 희귀사건인 경우에는 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화 방법과 IRBP 방법 모두 사용이 가능하다.

비희귀 단순 다수기 PSA 모델에 대하여는 Table 3에서 보는 바와 같이 실제 PSA에서 가장 많이 사용되고 있는 정량화 방법인 DTA-MCUB 방법과 Exact Method를 사용하여 계산한 결과를 비교하면 부지 CCDP는 약 111.9%, 다수기 CCDP는 약 69.8%의 과평가 오류가 발생하는 것으로 나타났다. DTA-MCUB 방법 보다 상대적으로 정확한 방법인 DTA-BDD을 사용하는 경우에도 Exact Method를 사용한 결과와 비교해 보면 부지 CCDP는 약 108.0%, 다수기 CCDP는 약 64.9%의 과평가 오류가 있는 것으로 나타났다. IRBP 방법은 Exact Method를 사용하여 계산된 결과와 완전히 일치하고 있음을 보여준다. 따라서 본 예제와 같이 고장수목에 포함되는 모든 기본사건이 비희귀사건인 경우에는 과도한 과평가 오류를 유발하는 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화

방법은 사용이 불가능하다. 이러한 경우에는 본 논문에서 제시하는 새로운 정량화 방법인 IRBP의 사용을 추천한다.

5.2 실제 다수기 PSA 모델

실제 다수기 PSA 모델은 3개 호기로 구성되어 있으며 2개 호기는 동일한 설계의 발전소이며 1개 호기는 다른 설계의 발전소이다. 각 정량화 방법별로 계산된 확률의 정확성을 용이하게 확인하기 위하여 실제 다수기 PSA 모델의 소외전원상실사건 및 지진사건의 초기사건 빈도는 1로 설정하였다.

5.2.1 희귀 기본사건 - 소외전원상실사고 다수기 PSA 모델

본 다수기 PSA 모델은 3개 호기 동시 다수기 소외전원 상실 초기사건을 대상으로 하고 있으며 호기간 공통원인고장이 매우 보수적으로 모델링되어 있다. 본 예제는 실제 다수기 PSA 모델로서 고장수목의 거대함으로 인하여 Exact Method를 사용한 정량화는 불가능하다. U1U2U3 발전소 상태조합 고장수목에 대한 본 소외전원상실 초기사건 다수기 PSA 모델 고장수목에 대한 요약은 아래와 Table 4와 같다.

본 실제 발전소 소외전원상실사고 다수기 PSA 모델에 대하여 각 정량화 방법을 적용하여 계산한 결과는 아래의 Table 5와 같다.

Table 4. Multi-unit PSA model (LOOP initiating event, 3 NPPs)

No. of gates	No. of basic events	No. of NOT gates	No. of negate events
28,524	9,578	190	0

Table 5에서 보는 바와 같이 실제 PSA에서 가장 많이 사용되고 있는 정량화 방법인 DTA-MCUB와 IRBP를 사용하여 계산한 결과를 비교하면 부지 CCDP는 약 4.9%, 다수기 CCDP는 약 5.7%의 과평가 오류가 발생하는 것으로 나타났다. 본 예제와 같이 고장수목이 매우 거대하더라도 고장수목에 모델링되는 대부분의 기본사건이 희귀사건인 경우에는 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화 방법과 새로운 다수기 PSA 정량화 방법인 IRBP 모두 사용이 가능하다.

5.2.2 비희귀 기본사건 - 지진사건 다수기 PSA 모델

본 다수기 PSA 모델은 지진사건을 대상으로 하고 있으며 지진 구간 0.6g~0.8g에 대하여 모델하고 있다. 본 모델에서 동일 설계 2개 호기의 경우, 지진 유발 설비 손상은 완전 종속(완전 상관성)으로 고려하고 있으며 호기간 공통원인고장은 소외전원상실사고에 대한 다수기 PSA 모델과 동일하다. 본 예제는 실제 다수기 PSA 모델로서 고장수목의 거대함으로 인하여 Exact Method를 사용한 정량화는 불가능하다. U1U2U3 발전소 상태조합에 대한 지진사건 다수기 PSA 모델 고장수목에 대한 요약은 아래의 Table 6과 같다.

본 실제 발전소 다수기 지진사건 PSA 모델에 대하여 각 정량화 방법을 적용하여 계산한 결과는 아래의 Table 7과 같다.

Table 7에서 보는 바와 같이 실제 PSA에서 가장 많이 사용되고 있는 정량화 방법인 DTA-MCUB 방법과 IRBP 방법을 사용한 결과를 비교하면 부지 CCDP는 약 265.0%, 다수기 CCDP는 약 74.0%의 과평가 오류가 발생하는 것으로 나타났다. DTA-MCUB 방법 보다 더

Table 5. Comparison with multi-unit PSA model (LOOP initiating event, 3 NPPs)

Plant Status Combination	Method 1				Method 2
	DTA-MCUB(a)	Error(d)	DTA-BDD(b)	Error(e)	IRBP(c)
/U1/U2/U3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
U1/U2/U3	7.252757E-05	3.5%	7.106072E-05	1.4%	7.00497E-05
/U1U2/U3	7.345654E-05	3.5%	7.199286E-05	1.4%	7.09765E-05
/U1/U2U3	3.861386E-05	9.0%	3.841424E-05	8.4%	3.54239E-05
U1U2/U3	5.706679E-05	5.9%	5.654955E-05	4.9%	5.38948E-05
U1/U2U3	2.014084E-07	19.4%	1.996869E-07	18.3%	1.68751E-07
/U1U2U3	2.014084E-07	19.4%	1.996869E-07	18.3%	1.68751E-07
U1U2U3	2.677731E-06	0.5%	2.663827E-06	0.0%	2.66383E-06
Site CCDP	2.447453E-04	4.9%	2.410806E-04	3.3%	2.33346E-04
Multi-Unit CCDP	6.014734E-04	5.7%	5.961275E-05	4.8%	5.68961E-05

(a) DTA-MCUB (see section 3 and Eq.(5)).
(b) DTA-BDD (see section 3 and Eq.(6)).
(c) IRBP (see section 4).
(d) 100*(a-c)/c.
(e) 100*(b-c)/c.

Table 6. Multi-unit PSA model (seismic event, 3 NPPs)

No. of gates	No. of basic events	No. of NOT gates	No. of negate events
45,154	9,817	185	0

욱 정확한 방법인 DTA-BDD 방법을 사용한 경우에도 부지 CCDP는 약 238.5%, 다수기 CCDP는 약 49.4%의 과평가 오류가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 DTA-MCUB와 DTA-BDD 방법으로 계산한 부지 CCDP가 모두 1보다 큰 확률을 가지는 것은 방법론 자체의 한계에 의한 과평가에 기인한다.

본 예제와 같이 고장수목에 상당수의 비희귀 기본사건이 모델링되는 실제 다수기 지진 PSA 모델에서도 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화 방법은 과도한 과평가 오류를 유발하므로 본 논문에서 제시하고 있는 새로운 다수기 PSA 정량화 방법인 IRBP 방법의 사용을 추천한다.

5.3 단일기 PSA 사건수목 사고경위

그림 Fig. 4에는 전형적인 단일기 내부사건 PSA 사건수목이 제시되어 있으며 사고경위 5는 사고경위 표제 수준에서 %I-KV*/RT*SHR*/HCI*BLD로 구성되어 있다. 본 사고경위는 실패(일반) 게이트 %I-KV, SHR, BLD와 성공 게이트 RT, HCI로 구성되어 있다.

따라서 본 사고경위에 대한 정량화 대상이 되는 정점사건의 구성은 앞에서 설명한 다수기 PSA에서의 정량화 대상 정점사건인 발전소 상태조합 고장수목 정점사건과 근본적으로 동일하다. 따라서 본 사고경위는

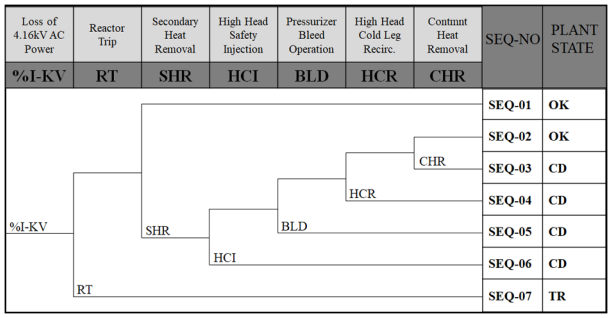

Fig. 4. An example single unit PSA event tree.

IRBP 방법을 사용하여 아래의 식(12)와 같이 정량화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} p(SEQ-05) &= p(\%I-KV^*SHR^*BLD) \\ &\quad - p(\%I-KV^*SHR^*BLD^*(RT+HCI)) \end{aligned} \tag{12}$$

위의 식에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제시된 새로운 다수기 정량화 방법은 단일기 PSA 사건수목의 특정 사고경위 정량화에도 동일하게 사용 가능하다. 즉, 단일기 PSA 모델에서 DTA 기반의 기존 정량화 방법의 사용에 의하여 상당한 수준의 과평가 오류 가능성이 존재하는 특정 사고 경위에 대하여는 IRBP 방법의 사용을 추천한다.

6. 결 론

본 논문에서는 DTA 기반의 기존 다수기 PSA 정량화 방법의 한계에 기인하는 과도한 과평가 오류를 극

Table 7. Comparison with multi-unit PSA model (seismic event, 3 NPPs)

Plant Status Combination	Method 1				Method 2
	DTA-MCUB(a)	Error(d)	DTA-BDD(b)	Error(e)	IRBP(c)
/U1/U2/U3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
U1/U2/U3	5.759165E-01	37132.8%	5.624757E-01	36263.8%	1.54680E-03
/U1U2/U3	5.759165E-01	37132.8%	5.624757E-01	36263.8%	1.54680E-03
/U1/U2U3	1.600698E-01	155.7%	1.592145E-01	154.3%	6.26023E-02
U1U2/U3	5.729942E-01	22.5%	5.599323E-01	19.7%	4.67600E-01
U1/U2U3	1.347813E-01	20324.5%	9.299243E-02	13991.9%	6.59900E-04
/U1U2U3	1.347813E-01	20324.5%	9.299243E-02	13991.9%	6.59900E-04
U1U2U3	1.337803E-01	44.9%	9.233253E-02	0.0%	9.23325E-02
Site CCDP	2.288240E+00	265.0%	2.122416E+00	238.5%	6.26948E-01
Multi-unit CCDP	9.763371E-01	74.0%	8.382497E-01	49.4%	5.61252E-01

(a) DTA-MCUB (see section 3 and Eq.(5)).
(b) DTA-BDD (see section 3 and Eq.(6)).
(c) IRBP (see section 4).
(d) 100*(a-c)/c.
(e) 100*(b-c)/c.

복할 수 있는 새로운 다수기 PSA 정량화 방법인 IRBP 방법을 제시하였다.

단순 다수기 PSA 모델에 대하여 IRBP 방법을 사용한 결과는 Exact Method를 사용한 결과와 완전히 일치하고 있음을 보여주었다. 비희귀 사건이 상당수 포함된 실제 발전소 지진 사건 다수기 PSA 모델에 대하여 기존의 DTA 기반 정량화 방법을 적용하는 경우, 심각한 과평가 오류가 발생할 수 있음을 확인하였다(5장 참조). 반면에 IRBP 방법을 사용하면 이러한 과평가 오류를 방지할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 다수기 PSA 고장수목을 구성하는 기본사건의 대부분이 희귀 사건인 경우에는 DTA 기반의 기존 정량화 방법과 IRBP 방법 모두 사용이 가능하다.
(2) 다수기 PSA 고장수목에 상당수의 비희귀 기본사건이 모델링되어 있는 경우, DTA 기반의 기존 정량화 방법은 과도한 과평가 오류를 유발하므로 사용이 불가능하다. 이러한 다수기 PSA 모델에 대하여는 본 논문에서 제시하고 있는 새로운 다수기 PSA 정량화 방법인 IRBP 방법의 사용을 추천한다.
(3) 본 연구에서 제시한 새로운 다수기 정량화 방법인 IRBP 방법은 단일기 PSA 사건수목의 특정 사고경위에 대한 정량화에도 동일하게 사용이 가능하다. 따라서 단일기 PSA에서도 다수의 비희귀 사건이 모델링되어 있는 특정 사고경위에 대하여는 IRBP 방법의 사용을 추천한다.

Acknowledgments: This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation of Nuclear Safety (KOFONS), granted financial resource from the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Republic of Korea (No. 1075000910).

References

1) C.E. Shannon, “The Synthesis of Two-terminal Switching Ccircuits”, Bell System Technical Journal, Vol. 28, pp. 59-98, 1948.
2) C.H. Roth Jr. and L. L. Kinney, Fundamentals of Logic Design, Seventh Edition, 2014.
3) EPRI, Direct Probability Calculator (DPC) Version 4.0, Product ID # 1019191, 2009.
4) S. Epstein and A. Rauzy, “Can We Trust PRA?”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 88, pp. 195-205, 2005.
5) A. Rauzy, “New Algorithms for Fault Tree Analysis”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 40, pp. 203-211, 1993.
6) W. S. Jung, “A Fast BDD Algorithm for Large Coherent Fault Trees Analysis”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp. 369-374, 2004.
7) W. S. Jung, S. H. Han and J. E. Yang, “Fast BDD Truncation Method for Efficient Top Event Probability Calculation”, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 40, pp. 571-580, 2008.
8) EPRI, FTREX 1.9 Software Manual, Product ID # 3002012968, 2018.
9) W. S. Jung, “A Method to Improve Cutset Probability Calculation in Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 134, pp. 134-142, 2015.
10) W.S. Jung, BeEAST 1.1 User Manual, 2015.
11) EPRI, Advanced Cutset Upper Bound Estimator(TM) (ACUBE), Version 1.0, Test Report, Product ID #1024896, 2012.