

# 국내 원자력발전소 지진 PSA의 CDF 과평가 방지를 위한 비희귀사건 모델링 방법 연구

임학규\*

## A Simple Approach to Calculate CDF with Non-rare Events in Seismic PSA Model of Korean Nuclear Power Plants

Hak Kyu Lim\*

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Hak Kyu Lim

Tel : +82-52-712-7311

E-mail : hklim@kings.ac.kr

Received : September 14, 2021

Revised : October 6, 2021

Accepted : October 7, 2021

**Abstract** : Calculating the scrutable core damage frequency (CDF) of nuclear power plants is an important component of the seismic probabilistic safety assessment (SPSA). In this work, a simple approach is developed to calculate CDF from minimal cut sets (MCSs) with non-rare events. When conventional calculation methods based on rare event approximations are employed, the CDF of industry SPSA models is significantly overestimated by non-rare events in the MCSs. Recently, quantification algorithms using binary decision diagrams (BDDs) have been introduced to prevent CDF overestimation in the SPSA. However, BDD structures are generated from a small part of whole MCSs due to limited computational memory, and they cannot be reviewed due to their complicated logic structure. This study suggests a simple approach for scrutinizing the CDF calculation based on whole MCSs in the SPSA system analysis model. The proposed approach compares the new results to outputs from existing algorithms, which helps in avoiding CDF overestimation.

**Key Words** : seismic PSA, non-rare events, overestimation, CDF, nuclear power plants

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

## 1. 서론

지진 PSA 방법론<sup>1)</sup>은 1970년대 미국에서 개발되었으며, 1980년대 미국 원전 적용사례를 통하여 완성되었다<sup>2)</sup>. 초기에는 지진으로 인한 기기 및 구조물의 손상이 원전의 리스크에 미치는 영향에 중점을 두고 지진 PSA가 수행되었다. 지반가속도에 따라서는 지진유발 손상확률은 클 수 있기 때문에, 기본적 PSA 가정사항인 희귀사건근사(Rare Event Approximation, REA)<sup>3)</sup>를 적용하지 않으며, 지진유발손상사건의 여사건(complements)을 포함한 서로 배반관계(disjoint)인 최소단절집합으로 발전소 손상상태를 정의하고, 각 손상상태별 발생빈도를 지진재해도와 지진취약도의 합성곱(convolution)으로 평가하였다. 계통분석에서 사고완화기능을 수행하

는 기기의 무작위고장은 상대적으로 단순하게 고려되었으며, 상세한 최소단절집합이 도출되지 않았다.

원전 규제와 운용에 리스크정보 활용이 확대되면서, 지진 PSA 계통분석에서도 상세한 무작위고장사건의 모델링이 요구되었으며, 내부사건 PSA의 사건수목과 고장수목 모델을 활용하게 되었다. 지진 PSA에서 내부사건 PSA 모델을 활용하기 위하여, 희귀사건으로 구성된 계통분석모델(내부사건 PSA 모델)과 비희귀사건으로 구성된 계통분석모델을 구분하여 정량화를 2단계로 수행하였다. 즉, 지진유발손상사건으로 구성된 계통분석모델은 여사건을 추가하여 서로 배반관계의 최소단절집합을 도출하여 발전소 손상상태별 발생빈도를 계산하고, 내부사건 PSA 모델에 이들 빈도를 기본사건으로 반영하는 방법으로 과평가되지 않은 지진 CDF를

\*한국전력국제원자력대학원대학교 원자력산업학과 부교수 (Department of NPP Engineering, KEPCO International Nuclear Graduate School)

도출하였다.

최근에는 희귀사건근사를 만족하지 않는 지진유발 손상사건 및 희귀사건근사를 만족하는 내부사건 PSA 모델을 통합하여, 지진 PSA 계통분석 모델을 구성하고 있다<sup>4,5)</sup>. 이러한 방법은 희귀사건근사를 불만족하는 지진유발손상사건을 희귀사건으로 처리함으로써 CDF가 과평가되며, 이를 보정하기 위하여 지진 PSA 모델에서 도출된 최소단절집합에 대한 후처리 요구된다. 그러나 정량화 결과인 최소단절집합의 후처리 이후에는 리스크정보 활용에 필수적인 최소단절집합 검토작업이 용이하지 않다.

현재 국내에서 널리 사용되는 PSA 전산도구인 AIMS<sup>6)</sup> 및 고장수목을 최소단절집합으로 변환하여 정점사건의 확률을 평가하는 전산도구인 FTREX<sup>7)</sup>는 여사건을 논리적으로 처리할 수 있다. 이를 활용하면, 지진유발손상사건과 내부사건 PSA 모델이 통합된 지진사건 PSA 계통분석 모델의 최소단절집합에서 과평가 되지 않은 지진사건 CDF를 도출할 수 있다.

본 논문은 일반적으로 사용되는 PSA 전산도구인 AIMS와 FTREX를 활용하여 과평가되지 않는 지진 PSA 계통분석 모델링 방법을 제시하였다. 제2장에서는 기존 지진사건 PSA 모델링 및 정량화 방법의 현안을 간단하게 검토하였으며, 제3장에 지진사건 CDF 과평가 현안을 해결할 수 있는 방법을 상세하게 설명하였다. 제4장은 개발된 방법과 기존 방법과의 결과를 비교하였다. 마지막으로 결론에서 개발된 방법의 활용분야를 제시하였다.

## 2. 국내 지진 PSA 계통분석 방법 검토

### 2.1 국내 지진 PSA 계통분석 방법

국내 지진 PSA의 계통분석은 개념적으로 2 단계로 수행된다. 먼저 지진에 의한 원전의 손상상태를 정의하기 위하여 지진유발손상사건을 중심으로 1차 지진사건수목(primary seismic event tree, PSET) 분석을 수행하고, 정의된 원전의 손상상태에 대한 사고완화기능의 건전성 여부에 따라 노심손상 발생 여부를 판단하는 2차 지진사건수목(secondary seismic event tree, SSET) 분석을 수행한다<sup>8)</sup>. Fig. 1은 국내 지진 PSA에서 널리 사용되는 계통분석 방법을 도식적으로 보여준다.

국내 원전의 구조물 및 기기 대부분은 충분한 내진 성능이 확보되어 있으며, 원전부지에서 설계기준 초과 지진의 발생가능성이 크지 않기 때문에 지진취약도분석에 따른 구조물 및 기기의 지진유발손상사건은 수 개에서 수십 개 정도로 한정된다. 또한 지진 PSA의 계

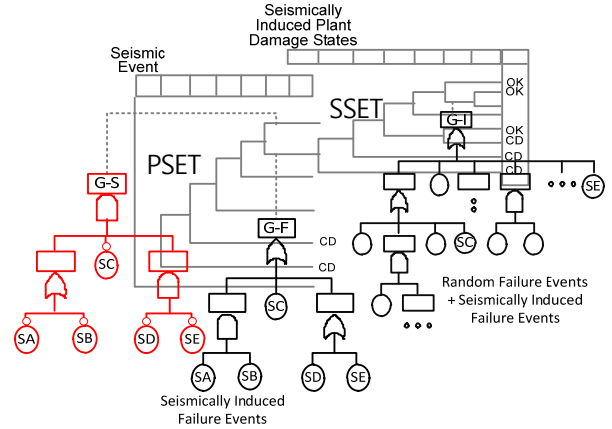


Fig. 1. Schematic diagram of system analysis method in Korean seismic PSA<sup>8)</sup>.

통분석은 다중성을 갖는 기기에 대하여 완전 지진상관성을 적용한다.

지진 PSA의 1차 지진사건수목 사고경위로 정의되는 원전의 손상상태는 상세 계통분석을 수행하는 2차 지진사건수목에 논리적으로 연계된다. 2차 지진사건수목 분석의 계통분석 모델은 희귀사건으로 구성된 내부사건 PSA 계통고장수목에 소수의 지진유발손상사건을 추가하여 작성된다.

국내 지진 PSA 계통분석 방법은 1차 및 2차 지진사건수목을 논리적으로 연계하여 모든 지진유발손상사건과 무작위고장사건 등을 하나의 통합된 고장수목으로 구성한다. 통합된 고장수목의 정량화는 일반적인 PSA 정량화도구인 FTREX를 사용하여 최소단절집합을 도출하고, 이를 BeEAST<sup>9)</sup>를 사용하여 BDD(Binary Decision Diagram) 방법으로 최소단절집합을 변환하여 과평가되지 않는 CDF가 계산된다.

### 2.2 지진 CDF 과평가 원인

국내 지진 PSA 계통분석방법에서 지진유발손상사건의 여사건을 고려함에도 불구하고 계통모델의 정량화결과가 과평가되는 원인을 다음의 예제를 통하여 설명하였다.

Initiating Event	System SA	System SB	Seq#	State
GET-EX	SA	SB		
%IE	G-SA	G-SB1	1	ok
		G-SB2	2	cd
	G-SA	G-SB1	3	ok
		G-SB2	4	cd

Fig. 2. An example of simple event tree<sup>10)</sup>.

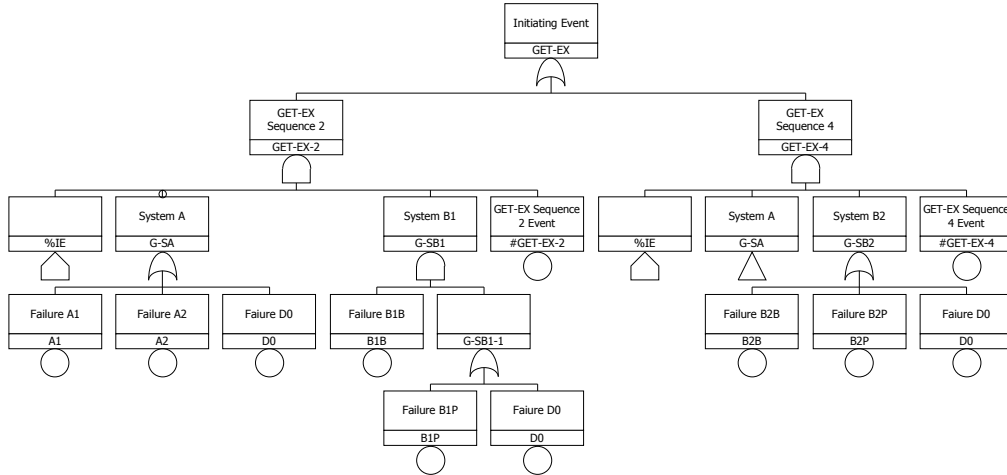


Fig. 3. Fault tree for simple event tree<sup>10)</sup>.

AIMS로 작성한 단순 사건수목과 고장수목 예제는 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

참고문헌 8의 방법에 따라 예제에 대한 최소단절집합은 모두 6개이다. 기본사건 A1의 여사건은 /A1으로 표시되어있다. Table 1의 결과는 일반적인 국내 지진 PSA 정량화 방법으로 제시되는 최소단절집합이며, 국내 지진 PSA 방법의 특징인 여사건으로 구성된 G-SA의 성공분기 논리, /A1  $\wedge$  /A2  $\wedge$  /D0를 포함하는 최소단절집합을 보여주고 있다.

Table 1에 제시된 최소단절집합들은 여사건을 포함하고 있음에도 불구하고 #2 사고경위의 최소단절집합

Table 1. Minimal cut sets for an example before post processing by BeEAST

No	Basic Events						Sequence in Event Tree
1	%IE	D0					#4
2	%IE	A2	B2P				#4
3	%IE	A1	B2P				#4
4	%IE	A1	B2B				#4
5	%IE	A2	B2B				#4
6	%IE	B1B	B1P	/A1	/A2	/D0	#2

Table 2. Minimal cut sets for an example to prevent overestimation

No	Basic Events						Sequence in Event Tree
1	%IE	D0					#4
2	%IE	A1	B2B	/D0			#4
3	%IE	A2	B2B	/D0	/A1		#4
4	%IE	A1	B2P	/D0	/B2B		#4
5	%IE	A2	B2P	/D0	/B2B	/A1	#4
6	%IE	B1B	B1P	/D0	/A1	/A2	#2

들은 disjoint 관계가 아니며, 최소단절집합을 disjoint 관계로 변환하면 Table 2와 같다.

기본사건이 희귀근사에 해당되지 않는 경우, 최소단절집합의 단순 합 또는 MCUB 방법에 의한 정점사건 (GET-EX)은 과평가된다.

### 3. 국내 지진 PSA에서 CDF 과평가 방지 방법

#### 3.1 비희귀사건과 희귀사건 분리

PSA 방법론에서는 기본적으로 희귀사건근사를 적용하기 때문에, 기본사건의 확률이 희귀사건 범주를 벗어나면 과도한 보수성 또는 오차를 보인다. 내부사건 PSA에서는 대부분의 기본사건이 희귀사건근사를 만족하므로, CDF 과평가 가능성을 고려하지 않는다. 그러나 지진사건 등과 같은 외부사건 PSA에서는 일반적으로 CDF 과평가는 중요한 현안이며, 이를 보정하기 위한 추가 작업이 요구된다.

기본사건의 확률 크기와 무관하게 PSA 모델의 정점사건을 정량화하려면, 서로배반(disjoint or mutually exclusive) 관계의 최소단절집합을 도출하여야 한다. 간단한 고장수목의 경우, BDD 방법을 적용하여 disjoint 관계의 최소단절집합을 도출할 수 있으나, 일반적인 PSA 모델과 같이 대규모 고장수목은 기본사건의 여사건으로 인하여, 무한에 가까운 사건조합이 발생되기 때문에 현실적으로 가용하지 않다.

지진 PSA 계통분석 모델의 대부분 기본사건은 내부사건 PSA 모델의 기본사건이므로 희귀사건근사를 만족하며, 추가된 지진유발손상사건만 희귀사건근사를 만족하지 않는다. 실제 국내원전 지진사건 PSA에 반영되는 지진유발손상사건은 수십 개에 불과하다. 특히 국내 지진 PSA의 계통분석 모델에서 1차 지진사건수

목 분석모델은 지진유발손상사건으로 구성되며, 이를 disjoint 관계의 최소단절집합으로 도출되도록 고장수목에 구현하는 것이 가능하다. 반면에, 2차 지진사건수목 분석 모델은 수 개 정도의 지진유발손상사건을 제외하면 희귀사건근사를 만족하는 기본사건으로 고장수목이 구성되며, 이 부분에서 도출된 최소단절집합은 내부사건 PSA 정량화에서와 같이 후처리를 수행하지 않더라도 CDF 과평가에 미치는 영향이 미미하다.

지진 PSA 계통분석의 고장수목을 희귀사건으로 구성된 고장수목 부분과 비희귀사건으로 구성된 고장수목 부분으로 분리하고, 비희귀사건 고장수목 부분에서 disjoint 관계의 최소단절집합이 도출되도록 구성하고, 희귀사건 고장수목 부분은 일반적인 정량화방법으로 최소단절집합을 도출하여 통합하면, 후처리없이 과평가되지 않는 CDF 도출이 가능하다.

이와 같이 희귀사건과 비희귀사건의 분리를 통한 CDF 과평가 방지 계통모델링 방법을 간단한 예제에 적용하여, disjoint 관계의 최소단절집합을 도출함으로써 정량화과정에서 별도의 전산도구를 사용한 최소단절집합의 후처리 없이 과평가되지 않는 결과를 용이하게 도출하는 과정을 설명하였다.

### 3.2 고장수목 작성 예제

일반적으로 PSA 전산도구(AIMS와 FTREX)를 사용하여, 2장에 제시된 예제에서 표 3과 같은 disjoint 관계의 최소단절집합이 도출되도록 지진유발손상사건으로 구성된 고장수목을 개발하는 것이 본 분석방법의 핵심이다. 2장의 예제를 활용하여, disjoint 관계의 최소단절집합이 도출되는 고장수목을 다음에 제시하였다.

Fig. 4는 최소단절집합이 disjoint 관계를 갖도록 Fig. 3의 고장수목에 기본사건의 여사건을 추가하였다. 추가

된 여사건은 최소단절집합이 서로 disjoint 관계가 되도록 한다. Fig. 3에 비하여 Fig. 4의 고장수목은 복잡한 모양이나 실제로는 단순하고 반복적인 작업을 통하여 개발가능하다. Fig. 4를 FTREX로 정량화하면, Table 2와 같이 disjoint 관계의 최소단절집합이 도출되며, 단순 합으로 정점사건의 정확한 값을 계산할 수 있다. 따라서 지진 PSA 계통분석에서 정점사건의 과평가를 방지하려면, 최소단절집합이 서로 disjoint 관계를 갖도록 가능한 한 비희귀사건의 여사건을 고장수목에 반영한다.

### 4. 국내 원전 지진 PSA 계통모델 적용예제

지진 PSA 모델의 정량화 결과가 disjoint 관계의 최소단절집합이 되도록 고장수목으로 작성하는 방법은 다음과 같다. 이러한 계통분석모델링방법(Simple Approach for Seismic PSA Quantification, SASQ)은 국내 원전 지진 PSA에 적합하며, 단순한 작업을 통하여 구현할 수 있다.

- (1) 1차 지진사건수목은 가능한 한 모든 지진유발손상사건을 포함하도록 사고경위를 정의한다.
- (2) 각 사고경위별로 disjoint 관계의 최소단절집합이 도출되도록 기본사건의 여사건을 반영하여 고장수목을 구성한다.
- (3) 이후 국내 지진 PSA 계통분석과 마찬가지로 1차 지진사건수목에서 노심손상이 발생하지 않는 사고경위는 지진에 의한 원전의 손상상태를 반영한 2차 지진사건수목을 구성한다.
- (4) 2차 지진사건수목 분석에서, 사고완화기능에 영향을 주는 지진유발손상사건을 고장수목에 추가한다.
- (5) 지진 PSA 계통모델은 최소단절집합에 대한 후처리 없이, 일반적인 내부사건 PSA 모델과 동일한 방법

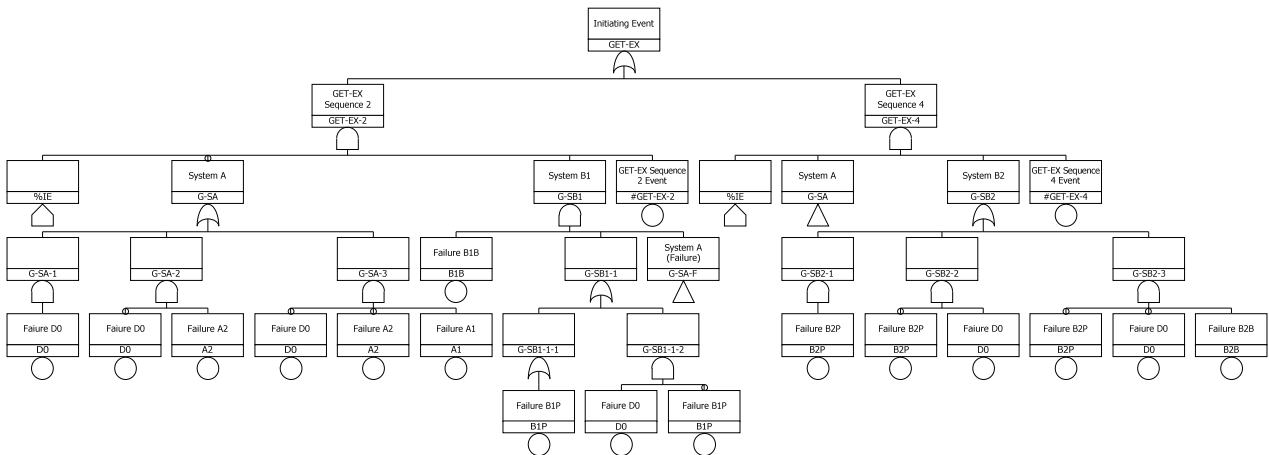


Fig. 4. Fault tree converted for disjoint relation.



Table 3. Comparisons of CDF for a domestic SPSA model

Seq. in PSET	PGA = 0.1 g ~ 0.2 g					PGA = 0.3 g ~ 0.4 g					
	CDF by FTREX	BeEAST		CDF by SASQ	Num. of MCS	Seq. in PSET	CDF by FTREX	BeEAST		CDF by SASQ	Num. of MCS
		CDF	Num of Converted MCS					CDF	Num of Converted MCS		
#1	3.145E-07	8.126E-08	6413	7.897E-08	67474	#1	1.105E-08	3.151E-09	606	3.043E-09	4670
#2	7.039E-07	1.960E-07	13574	1.765E-07	87760	#2	3.221E-07	8.858E-08	9381	8.843E-08	43699
#3	8.701E-12	4.368E-12	2	4.368E-12	2	#3	9.474E-11	5.184E-11	2	5.184E-11	2
#4	2.833E-11	1.422E-11	2	1.422E-11	2	#4	1.074E-08	5.876E-09	2	5.876E-09	2
#5	8.477E-08	4.256E-08	2	4.256E-08	2	#5	8.916E-07	4.878E-07	2	4.887E-07	2
#6	5.222E-08	5.222E-08	7	5.222E-08	7	#6	9.482E-07	9.308E-07	7	9.308E-07	7

으로 정량화한다. 도출된 최소단절집합은 1차 지진사건수목 분석에서 유래한 여사건을 포함하는 비희귀사건의 조합과 2차 지진사건수목 분석에서 유래하는 희귀사건의 조합으로 구성되며, 비희귀사건조합 부분은 disjoint 관계를 갖는다. 노심손상빈도는 희귀사건근사를 적용하여 계산된다.

이러한 절차에 따라 SASQ 방법을 적용한 국내 원전 지진 PSA 정량화결과를 희귀사건근사가 적용된 FTREX의 결과 및 최소단절집합을 BeEAST로 후처리된 결과와 함께 Table 3에 제시하였다.

Table 3은 지반가속도(peak ground acceleration, PGA)가 0.1g에서 0.2 g 구간과 0.3 g에서 0.4 g 구간에 대한 1차 지진사건수목 사고경위별 CDF 이다. FTREX의 결과는 비희귀사건으로 인하여 CDF 가 과평가되었으며, 이를 BeEAST로 후처리하여 보정한 결과와 본 연구의 SASQ 결과는 유사한 CDF를 도출하였다.

사고경위 3번에서 6번까지의 노심손상빈도는 BeEAST로 후처리된 결과와 SASQ 결과가 일치한다. 이들 사고경위는 2차 지진사건수목으로 전이되지 않으므로, 최소단절집합에 내부사건 PSA 모델의 기본사건이 포함되지 않으며, 1차 지진사건수목 계통분석모델만으로 구성된다. 이와 같이 일치된 결과는 SASQ 방법으로 개발된 비희귀사건의 여사건이 포함된 계통분석모델을 PSA 전산도구인 AIMS와 FTREX 가 정확하게 처리할 수 있음을 보여준다.

SASQ 방법과 BeEAST 결과에서 차이가 나타나는 사고경위 1번과 2번은 2차 지진사건수목으로 연계되는 사고경위이다. 이러한 차이는 다음과 같이 설명된다.

이론적으로 BeEAST는 BDD 방법으로 모든 최소단절집합을 disjoint 관계로 변환하여 정확한 노심손상빈도를 계산할 수 있다. 그러나 현실적으로는 변환과정에서 최소단절집합의 개수가 증가하기 때문에, 컴퓨터의 성능, 특히 컴퓨터 메모리 용량에 따라 변환 가능한 최소단절집합의 개수가 제한된다. 이러한 한계로 인하여

여 BDD 변환방법을 사용할 경우, 기본사건 중요도 등을 기준으로 변환대상 최소단절집합을 선정하는 방법<sup>11)</sup>과 최소단절집합의 순위로 선정하는 방법<sup>9)</sup>이 사용된다. 변환되지 않은 최소단절집합에 포함되어 있는 비희귀사건은 CDF 과평가를 유발하게 되나, 노심손상빈도 관점에서 매우 미미한 영향에 그치게 된다.

또한 disjoint 관계로 변환하는 과정에서 희귀사건과 비희귀사건을 구분하지 않으므로 내부사건 PSA 계통모델을 구성하는 비희귀사건에 대하여도 여사건이 고려된다. 이는 내부사건 PSA 계통모델에 적용된 희귀사건근사를 적용하지 않는 결과를 초래한다.

SASQ 방법은 계통모델링 과정에서 비희귀사건의 여사건을 고장수목에 반영하여, 희귀사건의 여사건 추가를 피하면서, CDF 과평가의 원인인 비희귀사건에 한정하여 여사건이 반영된 최소단절집합이 도출된다. 따라서 계산된 CDF는 비희귀사건인 지진유발손상사건의 여사건을 고려한 결과이며, 모든 최소단절집합을 disjoint 관계로 변환한 이론적 정보보다는 보수적인 값이다.

위와 같은 이유로 SASQ 방법과 BeEAST 후처리 결과의 차이가 발생함에도 불구하고, 표에서 보는 바와 같이 그 차이는 미미하며, 일반적인 경우 무시 가능한 차이로 판단된다.

### 5. 결론 및 고찰

본 연구에서 국내에서 널리 사용되는 PSA 전산도구인 AIMS 코드와 정량화전산도구인 FTREX 코드를 활용하여 지진 PSA에서 BeEAST 코드에 의한 후처리 없이 지진사건 CDF 과평가를 방지하는 계통모델링 방법인 SASQ 방법을 개발하였다.

지진 PSA의 계통모델링과 정량화 방법은, 희귀사건근사를 만족하지 않는 지진유발손상사건으로 인하여 CDF가 과평가되며, 이를 보정하기 위하여 최소단절집

합을 disjoint 관계로 변환하는 후처리가 필요하다. 이는 우리나라뿐만 아니라 미국 등 해외에서도 지진 PSA에서 널리 사용되는 방법이지만, disjoint 관계를 갖도록 변환되는 최소단절집합의 개수가 제한되며, 희귀사건의 여사건이 포함될 수 있는 등으로 인하여 CDF 계산에 사용된 최종적인 최소단절집합에 대한 논리적 검토가 어렵다.

본 연구에서는 희귀사건과 비희귀사건을 분리하여 고장수목을 구성하여 disjoint 관계의 최소단절집합을 도출하는 SASQ 계통모델링 방법으로 국내 원전 지진 PSA 계통분석모델을 정량화하여 후처리 없이 과평가 되지 않은 지진사건 CDF를 계산하였다. 일반적으로 비희귀사건을 포함한 모든 계통분석을 SASQ 방법으로 수행하는 것은 현실적이지 않으나, 국내 원전 지진 PSA의 경우 비희귀사건에 해당하는 지진유발손상사건의 개수가 수십개 정도에 그치므로, 계통분석과정에서 비희귀사건의 여사건을 고장수목에 반영할 수 있다.

SASQ 방법은 희귀사건에 대하여 내부사건 PSA 모델의 정량화와 일관성을 유지하며, CDF 계산에 사용된 최종적인 최소단절집합에 대한 논리적 검토가 가능하다. 이러한 지진 PSA 결과 검토를 통하여 내진 취약점을 상세하게 파악하고 지진 리스크 관리에 필요한 정보를 보다 효과적으로 도출함으로써 원전의 안전성이 제고될 것으로 사료된다. 또한 지진 PSA의 계통분석 외에도 비희귀사건을 고려하는 화재 PSA, 쓰나미 PSA 등 기타 외부사건 PSA에도 연구결과를 적용할 수 있을 것이다.

**Acknowledgement:** This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS) using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea. (No 1705001)

## References

- 1) M. K. Ravindra and C. R. Sundararajan, "Seismic Risk Assessment, Probabilistic Structural Mechanics Handbook-Theory and Industrial Applications", Chapter 19, Springer Science+Business Media Dordrecht, 1995.
- 2) Kennedy, R.P., Cornell, C.A., Campbell, R.D., Kaplan, S., Perla, H.F., "Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant", Nucl. Eng. & Des., 59(2), pp.315-338, 1980 .
- 3) S. K. Park and W. S. Jung, "A New Quantification Method for Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment", J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 1, pp. 97-106, 2020.
- 4) Electric Power Research Institute, "Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide", EPRI 1002989, 2003.
- 5) American Society of Mechanical Engineers/American Nuclear Society (ASME/ANS), "Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications", ASME/ANS-RA-Sa-2009, Addenda to ASME/ANS RA-S-2008, 2009.
- 6) Korea Atomic Energy Research Institute, "AIMS-PSA Release 2 Reference Manual", KAERI-ISA-MEMO-AIMS-03-KOR, 2012.
- 7) Electric Power Research Institute, "FTREX 1.9 Software Manual", EPRI 3002012968, 2018.
- 8) H. K. Lim, "A Study of System Analysis Method for Seismic PSA of Nuclear Power Plants", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 5, pp. 159-166, 2019.
- 9) W. S. Jung, "BeEAST Version 1.1 User Manual", Sejong University, 2017.
- 10) Nuclear Safety and Security Committee, "A Study on System Modeling of Seismic PSA to Prevent Overestimation of Seismic CDF", NSTAR-19NS42-91, 2019.
- 11) P. Zvonckea and O. Nusbaumer, "Comparison of MCUB and MCS BDD Fault Tree Solution Algorithms using Leibstadt Nuclear Power Plant Model", Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14, Los Angeles, CA, USA, 2018.