

원자력발전소 지진 PSA의 계통분석방법 개선 연구

임학규*†

A Study of System Analysis Method for Seismic PSA of Nuclear Power Plants

Hak Kyu Lim*†

†Corresponding Author

Hak Kyu Lim

Tel : +82-52-712-7311

E-mail : hklim@kings.ac.kr

Received : July 26, 2019

Revised : September 18, 2019

Accepted : September 25, 2019

Abstract : The seismic PSA is to probabilistically estimate the potential damage that a large earthquake will cause to a nuclear power plant. It integrates the probabilistic seismic hazard analysis, seismic fragility analysis, and system analysis and is utilized to identify seismic vulnerability and improve seismic capacity of nuclear power plants. Recently, the seismic risk of domestic multi-unit nuclear power plant sites has been evaluated after the Great East Japan Earthquake and Gyeongju Earthquake in Korea. However, while the currently available methods for system analysis can derive basic required results of seismic PSA, they do not provide the detailed results required for the efficient improvement of seismic capacity. Therefore, for in-depth seismic risk evaluation, improved system analysis method for seismic PSA has become necessary. This study develops a system analysis method that is not only suitable for multi-unit seismic PSA but also provides risk information for the seismic capacity improvements. It will also contribute to the enhancement of the safety of nuclear power plants by identifying the seismic vulnerability using the detailed results of seismic PSA. In addition, this system analysis method can be applied to other external event PSAs, such as fire PSA and tsunami PSA, which require similar analysis.

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : seismic PSA, seismically induced failure events, system analysis, risk, nuclear power plants

1. 서론

국내 원자력발전소는 설계기준지진(SSE, safe shutdown earthquake)에 대하여 내진능력을 갖추고 있으며, 지진 사건 확률론적안전성평가¹⁾(지진 PSA, Seismic Probabilistic Safety Assessment)를 통하여 지진에 대한 충분한 안전성을 확인하고 있다. 지진 PSA는 대형지진에 의해 유발되는 원자력발전소의 잠재적 피해를 확률론적으로 평가하는 방법으로 지진의 지반가속도 크기와 빈도, 구조 응답, 기기 및 구조물의 지진유발손상확률, 원자력발전소 계통 신뢰도 등을 통합하여 노심손상빈도를 평가한다. 이를 통하여 지진으로 인한 노심손상 발생 원인을 파악하고 보완함으로써, 원자력발전소의 내진 안전성을 제고하고 있다.

지진 PSA는 다음 분석업무로 구성된다.

- 확률론적 지진재해도분석(PSHA, probabilistic seismic hazard analysis): 지진에 의한 지반가속도의 발생 빈도를 평가.
- 지진취약도분석(SFA, seismic fragility analysis): 지반가속도에 대한 구조물과 기기의 손상확률을 평가.
- 계통분석(system analysis): 사건수목과 고장수목 방법을 통해 사고완화를 위한 기능의 신뢰도를 분석하고, 최종적으로 지진에 기인한 원자력발전소의 노심손상빈도(CDF, Core Damage Frequency) 평가.

1970년대 지진 PSA는 기기 및 구조물의 지진유발손상으로 인한 원자력발전소 리스크 평가를 통하여, 내진능력이 취약한 기기 및 구조물을 보강하는데 목적을

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

두었다. 당시 컴퓨터 연산능력의 한계, 분석 모델의 크기와 복잡성 때문에 사고완화기능에 대한 계통분석은 단순하게 고려되었다²⁾. 이후 컴퓨터 연산능력의 향상으로 상세한 계통분석이 가능하게 되었고, 지진 PSA에서 원자력발전소 사고완화 기능의 무작위고장사건을 포함하여 상세한 계통분석이 요구되고 있다³⁾.

지진 PSA 계통분석은 다음 3가지 기본적인 요건을 만족해야 한다⁴⁾.

첫째, 계통분석에 포함된 구조물 및 기기의 지진유발 손상사건의 발생확률은 지반가속도의 변화를 반영할 수 있어야 한다. 따라서 여러 지반가속도수준에서 지진유발손상사건의 발생확률이 각기 평가되어야 한다.

둘째, 계통분석은 사고완화기능의 지진유발손상사건과 더불어 무작위고장사건(random failure events)을 포함하여야 한다. 따라서 계통분석에서 사고완화기능의 무작위고장에 의한 실패를 고려한 상세한 모델을 구축하여야 한다.

셋째, 지반가속도가 증가함에 따라 지진유발손상확률이 증가하여 지진 CDF의 과평가를 초래하므로 이를 보정하기 위해 지진유발손상사건의 여사건(complements)을 고려하여야 한다. 일반적으로 PSA의 계통분석 방법은 고장수목의 기본사건을 희귀사건으로 간주하는 희귀사건근사(rare event approximation)에 따라 여사건을 고려하지 않는다. 즉, 희귀사건 A의 여사건을 /A라 하고, 희귀사건근사를 적용하면, /A의 확률 P(/A)는 1.0으로 근사된다.

기존 지진 PSA의 계통분석 방법은 기본적으로 위의 계통분석 요건을 충족하나, 내진 안전성 제고 등에 필요한 지진유발손상사건과 무작위고장사건을 포괄하는 중요도분석 결과를 도출하는데 한계가 있다. 최근 동일본 대지진 및 국내 경주지진 이후, 국내 원전부지의 지진 리스크를 평가하고 내진 안전성을 제고하기 위한 원전 다수기 지진 PSA⁵⁾가 수행되고 있다.

이를 위하여 기존 지진 PSA 계통분석 방법의 개선 필요성이 대두되었다. 본 연구를 통하여 원전 다수기 지진 리스크 평가에 적합할 뿐만 아니라, 내진 안전성 제고에 필요한 리스크정보를 제공할 수 있도록 계통분석 방법을 개선하였다.

2. 기존 계통분석 방법 비교 및 검토

2.1 지진 PSA 계통분석

지진 PSA의 계통분석은 개념적으로 2단계로 수행된다. 먼저 지진에 의한 원전의 손상상태를 정의하기 위한 1차 지진사건수목(primary seismic event tree) 분석을

수행하고, 정의된 원전의 손상상태에 대한 사고완화기능의 건전성 여부에 따라 노심손상 발생 여부를 판단하는 2차 지진사건수목(secondary seismic event tree) 분석으로 구분된다.

1차 지진사건수목은 지진에 의한 원전의 손상상태를 정의한다. 사건수목의 분기에 따른 원전의 주요 기능 손상여부를 종합하여, 지진에 의한 원전의 손상상태가 사고경위로 표현된다. 지진에 의하여 모든 사고완화기능이 상실되어 노심손상이 발생하는 사고경위는 2차 지진사건수목분석 없이 1차 지진사건수목분석에서 노심손상으로 종결된다. 반대로 지진에 기인한 기능손상에도 불구하고 사고완화기능이 가용한 경우는 2차 지진사건수목분석에서 사고완화기능의 무작위 고장으로 인한 노심손상을 평가한다.

계통분석 모델은 1차 및 2차 지진사건수목분석에서 각기 사건수목과 고장수목으로 구성된다. 1차 지진사건수목분석의 계통분석 모델은 매우 간단한 반면, 희귀사건근사를 적용하지 않으며, 2차 지진사건수목분석의 계통분석 모델은 지진에 의한 원전 손상상태를 내부사건 PSA의 사건수목과 고장수목에 반영하여 작성된다. 국내에서는 1차 지진사건수목분석에 PRASSE⁶⁾와 같은 지진 PSA 전용 전산도구를 사용하고, 2차 지진사건수목분석에는 PSA 전산도구인 AIMS-PSA⁷⁾ 및 정량화 전산도구인 FTREX⁸⁾와 같이 내부사건 PSA 등에 활용되는 전산도구를 사용한다.

2.2 국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법

2.2.1 1차 지진사건수목분석

Fig. 1에 최근까지 국내 원전에 적용된 지진 PSA 계통분석 방법⁹⁾을 개념적으로 제시하였다.

국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법의 특징은 모든 지진유발손상사건을 1차 지진사건수목분석에서 고려하는 것이다. 1차 지진사건수목분석의 사고경위는 지

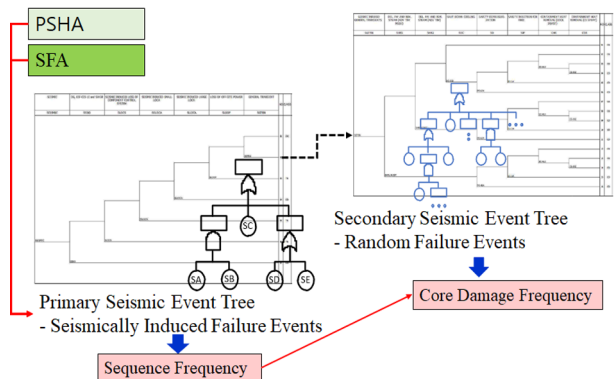


Fig. 1. System analysis method for domestic NPP seismic PSA.

진유발손상사건의 논리조합 (prime implicants; 서로 disjoint 관계의 최소단절집합)으로 변환된다. 각 사고 경위 빈도는 PRASSE와 같은 지진 PSA 전용 전산도구를 사용하여 지진재해도와 논리조합에 대한 지진취약도의 합성곱 (convolution)으로 계산된다. 이 과정에서 희귀사건근사가 적용되지 않고, 지진유발손상사건의 여사건을 포함하는 논리조합으로 사고경위 빈도를 평가하기 때문에 지진 CDF가 과평가되지 않는다.

2.2.2 2차 지진사건수목분석

2차 지진사건수목분석에서는 1차 지진사건수목의 사고경위(원전의 손상상태)를 반영하기 위하여, 지진으로 상실된 사고완화기능을 분석에서 제외한다. 2차 지진사건수목의 초기사건빈도는 이와 연계된 1차 지진사건수목의 사고경위의 빈도로 지정되며, 고장수목에는 지진유발손상사건이 포함되지 않는다.

2.2.3 국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법 검토

국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법에서 지진유발손상사건에 의한 지진 CDF의 과평가는 발생하지 않으나, 1차 및 2차 지진사건수목분석이 논리적으로 단절되어 있다. 이로 인하여 지진유발손상사건에 의한 사고완화기능 실패를 상세하게 고려할 수 없고 2차 지진사건수목분석을 통한 지진유발손상사건의 중요도를 정량적으로 검토하기 어렵다. 또한 1차 및 2차 지진사건수목분석에 각기 다른 전산도구를 사용하므로 원전 다수기 지진 PSA와 같은 대규모 분석에는 적용이 어렵다.

2.3 KAERI의 지진 PSA 계통분석 방법

미국의 지진 PSA 기술동향을 반영하여, KAERI는 원전 다수기 리스크 평가 연구¹⁰⁾에서 지진재해도의 지반가속도를 몇 개의 구간으로 나누고, 2차 지진사건수목분석에 일부 지진유발손상사건을 반영하는 계통분석 방법을 지진 PSA에 적용하였다. Fig. 2에 KAERI 계통분석 방법¹⁰⁾을 개념적으로 나타내었다. 국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법과 KAERI 계통분석 방법의 차이점을 다음에 설명하였다.

2.3.1 1차 지진사건수목분석

KAERI 계통분석 방법¹⁰⁾에서, 노심손상을 유발하지 않는 지진유발손상사건은 2차 지진사건수목분석에만 반영된다(단, 지진유발 소외원인상실사건은 국내 원전 지진 PSA 계통분석 방법과 동일하게 1차 지진사건수목분석에서 고려되었다). 이점을 제외하면, 기존 국내 원전에 적용된 방법과 동일하다.

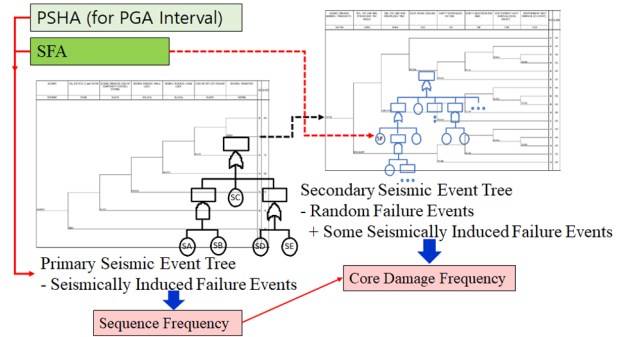


Fig. 2. System analysis method by KAERI.

2.3.2 2차 지진사건수목분석

2차 지진사건수목분석 계통모델은 사고완화기능 상실을 유발하는 지진유발손상사건을 내부사건 PSA 고장수목에 추가하여 작성된다. 즉, 내부사건 고장수목에 포함된 기기의 무작위고장사건 및 시험 및 정비로 인한 이용불능사건 등의 기기 고장모드에 지진유발손상사건이 추가된다. 지진유발손상사건 확률은 지반가속도 구간별로 지진취약도분석 결과에 의하여 계산된다.

2차 지진사건수목 정량화는 1차 지진사건수목의 노심손상사고경위를 포함하여 지반가속도 구간별로 수행된다. 2차 지진사건수목분석에 추가된 지진유발손상사건으로 인하여 과평가된 CDF가 도출되며, 이를 보정하기 위하여 정량화 결과를 후처리한다¹¹⁾.

2.3.3 KAERI의 계통분석방법 검토

KAERI 계통분석 방법¹⁰⁾은 지반가속도를 몇 개의 구간으로 나누어 각 구간별로 분석하기 때문에, 2차 지진사건수목분석에서 지진유발손상사건을 추가할 수 있으며, 지반가속도에 따른 운전원오류확률을 반영할 수 있다. 결론적으로 지반가속도 구간별 정량화결과를 고찰할 수 있어 지진 리스크 특성 파악에 유리하다.

그러나 KAERI의 방법에서도 기존 국내 원전에 적용된 방법과 같이, 1차 및 2차 지진사건수목분석의 분리로 인한 문제점은 해결되지 않았다.

3. 계통분석 방법 개선 연구

원전 규제와 운용에서 리스크정보 활용이 확대되면, 지진 PSA에서 무작위고장과 지진유발손상사건을 모두 포함하는 중요도분석이 가능한 상세한 계통분석 방법이 요구되고 있다. 기존 계통분석 방법은 1차 지진사건수목과 2차 지진사건수목을 분리하여 각기 분석하기 때문에, 1차 지진사건수목에서 고려된 지진유발손상사건이 2차 지진사건수목에 논리적으로 연계되지 않

을 뿐만 아니라, 2차 지진사건수목의 최소단절집합에서 제외되기 때문에 지진 PSA 결과의 제한적 활용만 가능하다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위하여, 지진 PSA의 1차 지진사건수목 사고경위로 정의되는 원전의 손상상태가 상세 계통분석을 수행하는 2차 지진사건수목에 논리적으로 반영됨으로써, 지진 PSA에서 최소단절집합 검토가 가능하도록 계통분석 방법을 개선하였다.

3.1 계통분석 방법 개선 방안

PSA는 근본적으로 희귀사건근사를 적용하기 때문에 희귀사건의 여사건을 고려하지 않는다. 그러나 지진 PSA에서는 지진유발손상사건이 희귀사건에 해당되지 않기 때문에, 이에 대한 대안으로 계통분석에서 여사건을 고려하여야 한다⁴⁾.

임의 사건 A와 여사건인 /A는 disjoint 관계이다. 즉, 동시에 발생할 수 없는 사건이다. 이러한 여사건의 성질을 활용하면 1차 지진사건수목과 2차 지진사건수목을 통합하여 정량화를 수행할 수 있으며, 지진유발손상사건을 포함한 중요도분석이 가능하다.

Fig. 3은 1차 지진사건수목과 2차 지진사건수목의 논리적 연계를 개념적으로 설명한다. 본 논문에서는 효과적인 설명을 위하여 기존의 1차 지진사건수목에 해당하는 부분을 1차 지진사건수목으로 지칭하고, 2차 지진사건수목에 해당하는 부분을 2차 지진사건수목으로 지칭한다.

Fig. 3의 사건수목은 기존 계통분석모델의 1차 지진사건수목과 2차 지진사건수목이 통합된 단일 지진사건수목을 의미한다. 즉, 지진으로 시작된 사고가 최종 노심손상까지 진행되는 모든 사고경위를 포함한다.

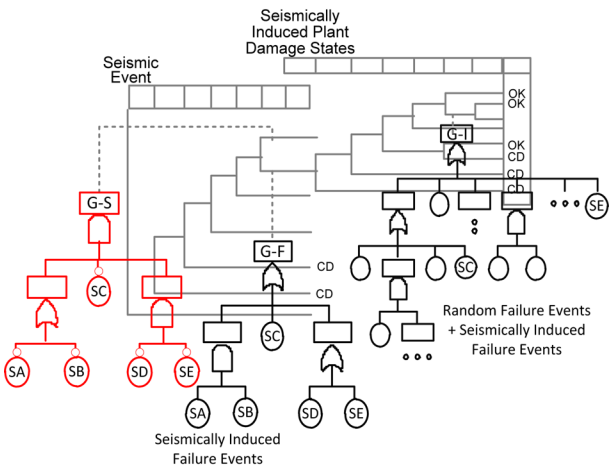


Fig. 3. System analysis method with an integrated primary - secondary seismic event tree.

Fig. 3에서 기본사건 SA, SB, SC, SD, SE는 지진유발손상사건이다. 1차 지진사건수목의 실패분기는 지진유발손상사건으로 구성된 고장수목(정점사건 G-F)과 연계되며, 성공분기는 이 고장수목의 논리부정(NOT) 연산이 적용된 고장수목(정점사건 G-S)과 연결된다. 따라서 1차 지진사건수목의 사고경위는 지진유발손상사건의 여사건을 포함한 논리조합으로 정의된다.

2차 지진사건수목의 분기에 연결되는 고장수목(정점사건 G-I)은 2차 지진사건수목의 사고완화 기능을 상실시키는 지진유발손상사건인 SC와 SE가 내부사건 PSA의 고장수목에 추가된 형태이다. 1차 지진사건수목의 사고경위는 고장수목 형태로 2차 지진사건수목과 직접 연계된다.

Table 1에서 기존 계통분석 방법과 개선된 방법을 비교하였다.

Table 1. Comparison of previous method with this study

	This Study	KAERI Approach ¹⁰⁾
Number of Event Trees	1 (Integrated Seismic Event Tree)	2 (Primary Seismic Event Tree and Partially Integrated Seismic Event Tree)
Software	AIMS-PSA	PRASSE + AIMS-PSA
Coverage of Seismically Induced Failure Events in MCS	All Seismically Induced Failure Events	Some Seismically Induced Failure Events
CDF Calculation	Sum of MCS	Sum of MCS + CDF from Primary Seismic Event Tree
Post-process	Required	Required

MCS: Minimal Cut Sets

3.2 검증

3.2.1 예제

Fig. 4는 1차 지진사건수목이며, Fig. 5와 6은 1차 지진사건수목의 사고경위 1과 2에 각각 연계되는 2차 지진사건수목이다. Fig. 7과 8은 사건수목의 각 분기에 연계된 고장수목이다. 사건 SA1, SB1, SB2는 지진유발손상사건이며, 사건 Y1과 Z1은 계통 Y와 계통 Z의 기능상실을 유발하는 무작위고장사건이다. 계통 X의 기

Initiating Event	Function A	Function B	Seq#	State
GET-EX	SA	SB		
%SEISMIC	G-SA	G-SB	1	To GET-EX1
			2	To GET-EX2
			3	CD

Fig. 4. Primary seismic event tree, GET-EX.(Example).

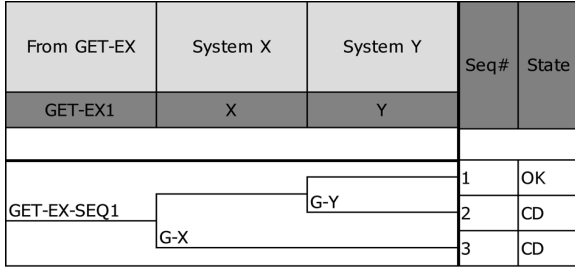


Fig. 5. Secondary seismic event tree, GET-EX1. (Example).

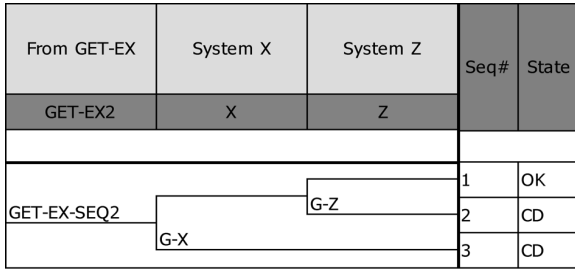


Fig. 6. Secondary Seismic Event Tree, GET-EX2.(Example).

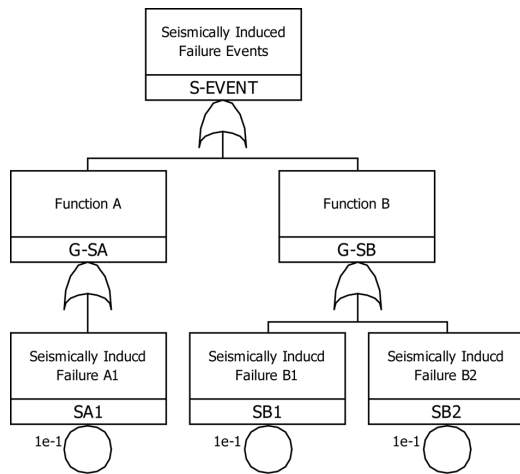


Fig. 7. Fault tree with primary seismic event tree analysis (Example).

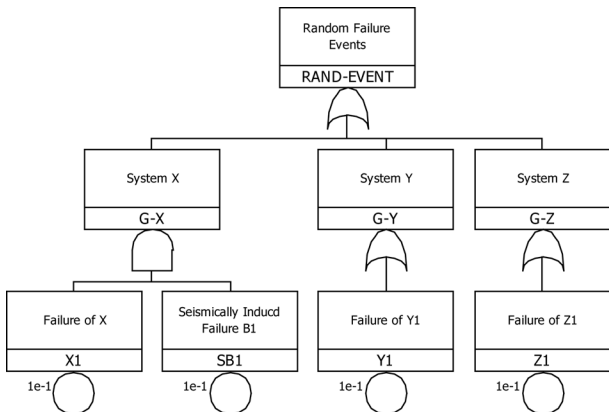


Fig. 8. Fault tree for secondary seismic event tree analysis (Example).

능은 무작위고장사건 X1과 지진유발손상사건 SB1 이 동시에 발생하는 경우에 상실된다.

3.2.2 기존 방법 적용

기존 계통분석 방법을 적용할 경우, PRASSE 코드를 사용하여 1차 지진사건수목인 GET-EX의 사고경위 빈도, %GET-EX-1, %GET-EX-2, %GET-EX-3를 계산한다.

사고경위 1번과 2번, GET-EX-1과 GET-EX-2의 빈도를 2차 지진사건수목인 GET-EX1과 GET-EX2의 초기사건빈도로 지정한다. 2차 지진사건수목은 고장수목 G-X, G-Y, G-Z를 GET-EX의 사고경위 1번과 2번 조건에 따라 개정하고, AIMS 코드를 사용하여 GET-EX1과 GET-EX2의 정량화를 수행한다.

상기의 예제에 대하여, Table 2에 기존 국내 원전에 적용된 방법⁹⁾으로 도출된 최소단절집합을 제시하였다. 이 경우에는 지진유발손상사건, SA1, SB1 및 SB2이 모두 최소단절집합에 포함되지 않는다. Table 3은 KAERI의 방법¹⁰⁾을 적용한 결과이며, 최소단절집합에 지진유발손상사건 SA1, SB1 및 SB2 중 SB1만 포함된다.

기존의 두 방법에서, 1차 지진사건수목에서 노심손상이 발생하는 3번 사고경위의 빈도, %GET-EX-3는 최종 결과(CDF)에 직접 합산된다. 또한 GET-EX1-3 사고경위는 1차 지진사건수목의 1번 사고경위의 빈도(%GET-EX-1)를 갖는 GET-EX1 사건수목의 초기사건과 GET-EX1의 표제 X의 논리곱에 해당된다. GET-EX의 1번 사고경위 조건은 SA1, SB1, SB2 모두 “FALSE”이며, 이러한 조건을 적용한 GET-EX1 사건수목의 표제 X는 SB1이 “FALSE”이므로 발생할 수 없다. 따라서 GET-EX1-3 사고경위에 해당하는 최소단절집합은 존재하지 않는다.

Table 2. Example result by system analysis method for domestic NPP seismic PSA⁹⁾

Sequences	Basic Events		Sequences	
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
1	%GET-EX-3		EX-3	
2	%GET-EX-1	Y1	EX-1	EX1-2
3	%GET-EX-2	X1	EX-2	EX2-3
4	%GET-EX-2	Z1	EX-2	EX2-2

Table 3. Example result by KAERI approach¹⁰⁾

Sequences	Basic Events		Sequences	
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
1	%GET-EX-3		EX-3	
2	%GET-EX-1	Y1	EX-1	EX1-2
3	%GET-EX-2	SB1	EX-2	EX2-3
4	%GET-EX-2	Z1	EX-2	EX2-2

3.2.3 개선된 방법 적용

예제에서 1차 지진사건수목 GET-EX의 성공분기는 해당 표제의 지진유발손상사건이 발생하지 않았음을 의미한다. 사고경위 GET-EX-1은, Fig. 9에서와 같이, G-SA 및 G-SB의 논리부정(NOT)의 곱으로 변환되며, 사고경위 GET-EX-2은, Fig. 10과 같이, G-SA의 논리부정과 G-SB의 논리곱으로 변환된다.

2차 지진사건수목의 초기사건에 연계되는 1차 지진사건수목의 사고경위 GET-EX-1과 GET-EX-2의 고장수목은 Fig. 11과 같다. 이러한 연계 고장수목을 통하여, 1차 지진사건수목분석에서 정의된 원전 손상상태가 2차 지진사건수목분석으로 전이된다.

Fig. 12는 예제의 정량화 대상을 정의하는 정점사건(TOP)의 논리구조를 보여준다. 정점사건에 대하여 1차 지진사건수목인 GET-EX와 2차 지진사건수목인 GET-EX1 및 GET-EX2를 통합하면, Fig. 12와 같은 단일 고장수목이 구성된다. 통합과정은 AIMS 코드에서 자동으로

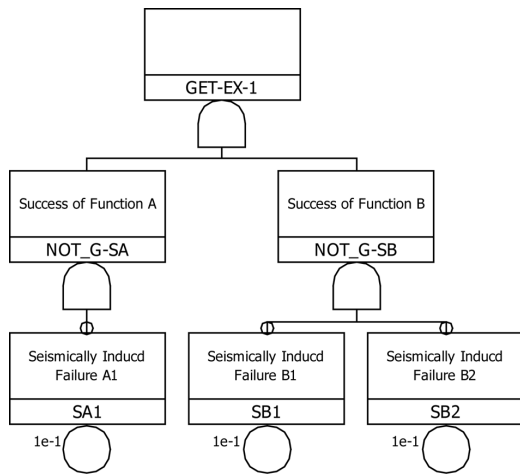


Fig. 9. Fault tree for GET-EX-1 sequence(Example).

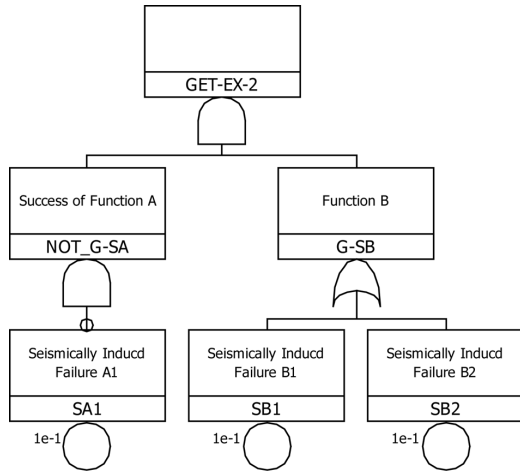


Fig. 10. Fault tree for GET-EX-2 sequence(Example).

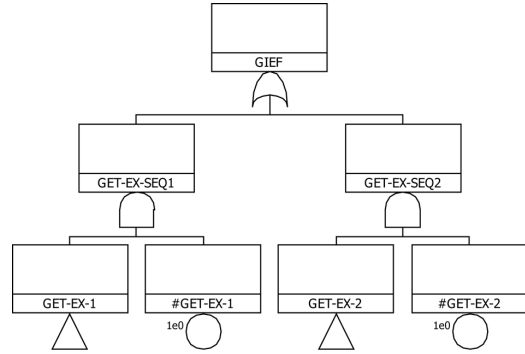


Fig. 11. Fault tree for primary-secondary seismic event tree integration(Example).

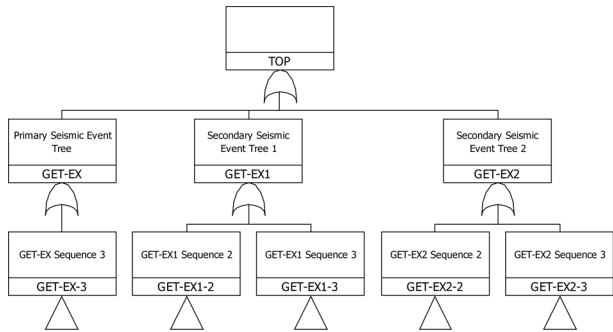


Fig. 12. Fault tree for top event definition(Example).

수행되며, 통합된 고장수목을 정량화하면 지진 PSA의 최소단절집합과 노심손상빈도가 도출된다.

상기 예제에 대하여 개선된 방법을 적용한 결과인 Table 4에는 모든 지진유발손상사건이 최소단절집합에 포함되어 있다.

Table 4. Example result by system analysis method by this study

	Basic Events				Sequences	
					Primary	Secondary
1	%SEISMIC	SA1			EX-3	
2	%SEISMIC	/SA1	/SB1	/SB2	Y1	EX-1
3	%SEISMIC	/SA1	SB1	X1		EX-2
4	%SEISMIC	/SA1	SB2	Z1		EX-2
5	%SEISMIC	/SA1	SB1	Z1		EX-2

Table 4에서, GET-EX1-3 사고경위에 해당하는 최소 단절집합은 존재하지 않는다. GET-EX1-3 사고경위는 1차 지진사건수목의 사고경위 GET-EX-1과 GET-EX1의 표제 X의 논리곱에 해당된다. 이를 논리식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{GET-EX1-3} &= \text{GET-EX-1} \wedge \text{System X} \\
 &= (/SA1 \wedge /SA2 \wedge /SB1) \wedge (SB1 \wedge X1) = \emptyset
 \end{aligned}$$

1차 지진사건수목분석에 반영된 /SB1과 2차 지진사건수목분석에 반영된 SB1 이 disjoint 관계이므로 존재하지 않는 조합에 해당한다. 이를 통하여 1차 지진사건수목과 2차 지진사건수목이 논리적으로 통합된 것을 확인할 수 있다.

개선된 방법을 적용한 결과, 지진유발손상사건과 무작위고장사건이 고장수목을 통하여 논리적으로 연계된다. 또한 모든 지진유발손상사건이 고장수목에 포함되므로 이에 대한 중요도 분석이 가능하다.

3.3 정량화결과의 후처리

본 연구에서 개선된 계통분석 방법은 지진유발손상사건의 여사건이 고장수목에 반영되어 있으나, 지반가속도 구간이 커지면서 노심손상빈도가 과평가된다. 이는 1차 지진사건수목 사고경위를 표현하는 논리조합에 희귀사건근사가 적용되었기 때문이다. 따라서 정량화결과인 최소단절집합에 대한 후처리가 필요하다. 국내에서 개발된 BeEAST 코드¹¹⁾는 과평가된 CDF를 보정할 수 있으며 후처리 결과에 대한 중요도분석결과를 제시할 수 있다.

4. 적용사례

현재 정량화 전산도구인 FTREX는 본 연구결과를 “NEGATE_DOWN” 옵션 기능으로 탑재하고 있으며, 이 옵션에 따라 지정된 사건수목의 분기에 대하여 자동으로 논리부정(NOT)연산을 적용한 고장수목을 생성하여 정량화를 수행한다. 이러한 FTREX의 기능은 현재 수행 중인 원전 다수기 리스크 평가 연구¹²⁾에 활용되고 있으며, Table 5에 실제 지진 PSA 결과의 일부를 제시하였다.

“SEIS”를 포함한 사건명은 지진유발손상사건을 의미한다. 1차 지진사건수목의 사고경위는 “#S1-SEIS”로 표시되며, 2차 지진사건수목의 사고경위는 “#S1-GIE”로 표시된다. Table 5의 1번 및 2번은 1차 지진사건수목에서 노심손상으로 종결된 최소단절집합이다. 3번은 2차 지진사건수목의 노심손상사고경위에서 도출된 지진유발손상사건과 무작위고장사건이 포함된 최소단절

집합이다. 무작위고장사건인 S1-EGDGR01A와 S1-EGDGR01B는 내부사건 PSA의 고장수목에 포함된 기본사건이다. 이와 같이 개선된 계통분석 방법으로 내부사건 PSA의 분석과 동일한 수준으로 지진 PSA 계통분석 결과를 도출할 수 있다.

1차 및 2차 지진사건수목을 통합한 단일 지진사건수목분석에서 도출된 최소단절집합을 종합적으로 검토하여, 효과적인 내진 안전성 제고가 가능하다. 또한 PRASSE 코드와 같은 지진 PSA 전용 전산코드 없이 일반적인 PSA 전산코드인 AIMS-PSA 코드로 계통분석이 가능하므로, 원전 다수기 지진 PSA와 같이 대규모 분석을 용이하게 수행할 수 있다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서 최근 원자력발전소의 지진 PSA에 요구되는 지진유발손상사건과 무작위고장사건이 통합된 최소단절집합 고찰이 가능하도록 계통분석 방법을 개선하였다.

기존 국내에서 사용된 계통분석 방법은 1차 지진사건수목분석과 2차 지진사건수목분석에서 각기 다른 모델과 전산코드를 사용하여, 지진 PSA 결과에 대한 종합적 검토에 필요한 통합된 결과 도출이 어렵다. 또한 단계별로 분석을 수행하기 때문에 분석 과정이 복잡하며, 원전 다수기 지진 PSA와 같이 다수 원전에 대한 분석을 효율적으로 수행할 수 없다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 지진으로 인한 원전의 손상상태를 정의하는 고장수목을 지진유발손상사건의 여사건을 포함하여 구성하고, 이를 사고완화 기능에 대한 고장수목과 연계하여, 모든 지진유발손상사건이 포함된 통합된 계통분석 모델의 정량화를 수행하도록 계통분석 방법을 개선하였다. 이러한 개선된 방법을 통하여, 1차 지진사건수목분석과 2차 지진사건수목 분석을 통합한 계통분석모델을 용이하게 정량화하고, 지진유발손상사건과 무작위고장사건이 통합된 정량화 결과 고찰이 가능하게 되었다.

본 연구 결과는 지진 PSA 결과 검토를 통하여 내진 취약점을 상세하게 파악하고 원전의 안전성 제고에 기

Table 5. Sample minimal cut sets of seismic PSA of domestic NPP by this study

1	%S015_S1-SEIS	/S015_S1-SEIS-SBCSF	/S015_S1-SEIS-SDCSF	/S015_S1-SEIS-SIRSF	/S015_S1-SEIS-SLCSF	S015_S1-SEIS-SPCSSF	/S015_S1-SEIS-SSWSF	/S1-SEIS-OP-HR	#S1-SEIS-MIC-5	
2	%S015_S1-SEIS	S015_S1-SEIS-SSWSF	#S1-SEISMIC-6							
3	%S015_S1-SEIS	/S015_S1-SEIS-SBCSF	/S015_S1-SEIS-SDCSF	/S015_S1-SEIS-SSWRC	/S015_S1-SEIS-SSWSF	S1-EGDGR01A	S1-EGDGR01B	#S1-GIE-LOOP-13	#S1-SEIS-MIC-2

여할 것으로 사료된다. 또한 원전 다수기 지진 PSA와 같은 대규모 분석에 이미 적용되고 있으며, 지진 PSA의 계통분석과 유사한 성격의 계통분석이 수행되는 화재 PSA, 쓰나미 PSA 등 기타 외부사건 PSA에도 본 계통분석 방법을 적용할 수 있을 것이다.

Acknowledgement: 본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1705001).

References

- 1) Chapman & Hall, "Probabilistic Structural Mechanics Handbook", pp. 429-464, 1995.
- 2) D. J. Wakefield, "Which Way SPRA?", Pre-Conference Workshop Presented at Probabilistic Safety Assessment and Management 14, September 16, 2018.
- 3) American Society of Mechanical Engineers/American Nuclear Society (ASME/ANS), ASME/ANS-RA-Sa-2009, "Addenda to ASME/ANS RA-S - 2008 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", 2009.
- 4) Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI 1002989, "Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide", 2003.
- 5) Nuclear Safety and Security Committee (NSSC), "Comprehensive Measures to Strengthen Nuclear Safety Standards (draft)", October 10, 2018.
- 6) Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), KAERI/TR-4649/2012, "Development and Validation of the Seismic Probabilistic Safety Assessment Software PRASSE", 2012.
- 7) Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), KAERI-ISA-MEMO-AIMS-03-KOR, "AIMS-PSA Release 2 Reference Manual", 2012.
- 8) Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI 30020 12968, "FTREX 1.9 Software Manual", 2018.
- 9) Korean Hydro & Nuclear Power (KHNP), Shin-Kori Units 1&2 Probabilistic Safety Assessment
- 10) Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), KAERI/RR-4225/2016, "Development of the Integrated Risk Assessment Technology for Multiple Units", 2017.
- 11) W. S. Jung, "BeEAST Version 1.1 User Manual", Sejong University, 2017.
- 12) Nuclear Safety and Security Committee (NSSC), NSTAR-19NS42-42, "A Study on the Approach for Seismic PSA Modeling and Quantification", 2019.