

OPTION-2에서 RISC-3 SSC 분류를 위한 정량적인 검증 measure로써 Burden to Importance Ratio

Burden to Importance Ratio as a Quantitative measure to validate the RISC-3 SSC in OPTION-2

하준수, 성풍현

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

위험도 정보이용 안전중요도 분류는 원자력발전소의 structures, systems, 또는 components (SSCs)를 확률론적 위험도정보와 결정론적 위험도정보에 근거한 안전중요도에 따라 둘 또는 그 이상의 그룹으로 분류하는 것이다. 이러한 분류를 통해 안전성에 중요한 기기에 더 많은 자원을 할당함으로써 위험도 정보에 기반을 둔 효율적인 자원관리를 할 수 있는 것이다. 최근 들어 SSCs를 안전 중요도뿐만이 아니라 안전등급까지 고려하여 4개의 그룹으로 분류하는 OPTION-2가 개발됨에 따라 안전관련 기기일지라도 안전 중요도가 낮은 기기 (RISC-3 SSC)는 법개정을 통해 보수적이었던 기존의 요구사항들을 완화하거나 면제시킬 수 있게 되었다. 기존의 안전 중요도 분류방법들은 대부분 안전 중요도를 나타내는 measure를 통해 원자력 발전소 전체의 SSCs에 대한 분류를 위해 개발되었다. 본 연구에서는 OPTION-2가 적용됨에 따라 RISC-3 SSC에 초점을 맞춘 분류방법으로 SSCs의 안전 중요도와 함께 자원의 할당이 어느 정도인가를 나타내는 Burden to Importance Ratio (BIR)를 RISC-3 SSC로 분류된 기기의 검증을 위한 measure로써 사용할 것을 제안하고 그 효용성을 입증하고자 한다. 효용성을 입증하기 위해 울진 원자력 발전소의 In-Service Test (IST) 대상 Motor Operated Valve (MOV) 512개중 22개의 기기를 모집단으로 선정하였으며 3개의 대상기기에 대한 검증을 수행하였다. 분석결과는 제안된 방법이 위험도 정보이용 규제 및 적용의 실질적인 목적 즉, 안전중요도에 부합하는 자원의 할당에 유용함을 보였으며, 안전중요도 관점만이 아닌 자원할당의 관점에서도 분석이 가능한 measure로서 RISC-3 SSC 분류를 위한 검증의 도구로써 유용하다고 판단되었다.

Abstract

A Risk-Informed Safety Significance Categorization (RISSC) is to categorize structures, systems, or components (SSCs) of a Nuclear Power Plant (NPP) into two or more groups, according to their safety significance using both probabilistic and deterministic insights. Recently, OPTION-2 (which is an emerging risk-informed paradigm) recommends that SSCs should be categorized into four groups according to whether they are safety-related or not

as well as their safety significance. With the change of 10 CFR 50, safety-related components which categorized into low safety significant SSC (RISC-3 SSC) can be exempted from the existing conservative requirements. Consequently, as OPTION-2 paradigm is applied, a validation process focused on the RISC-3 SSC is needed to assure the categorization results, because most of existing RISSC methods focused on the categorization of the whole SSCs of NPPs based on importance measures obtained from probabilistic and deterministic insights. In this work, Burden to Importance Ratio (BIR) is utilized as a measure for the validation of RISC-3 SSC in OPTION-2. To demonstrate the usefulness of the proposed approach, the approach is applied to 22 components selected from 512 In-Service Test (IST) components of Ulchin unit 3. The results of the application show that the proposed approach is useful for the validation of RISC-3 SSC in OPTION-2.

1. 서론

전통적으로 원자력발전소는 특정한 일련의 사고가 발생하리라는 가정 하에 사고를 미연에 방지하고 만약 발생시에는 사고를 완화하는 접근방법으로 설계, 운영되어왔다. 사고의 발생확률이 고려되어 있지 않은 이러한 접근방법을 “결정론적 접근방법”이라 한다. 점차적으로 전 세계 원자력발전소들의 운전이력이 축적됨에 따라 실제 과도현상, 사고, 운전이력과 관련된 자료들이 축적되게 되었고, 이러한 자료들에 기반을 둔 “확률론적 접근방법” 즉, 확률론적 안전성 분석 (PSA)이 원자력발전소에도 적용되어 유용한 정보를 제공하고 있는 실정이다. 지금은 거의 모든 원자력 발전소에 확률론적 안전성 분석이 수행되어 왔으며, 이러한 분석을 통해 유용하게 사용될 수 있는 Risk 정보를 얻게 되었다. 얻어진 Risk정보를 활용하여 원자력 발전소를 보다 효과적으로 설계, 운전, 규제하고자 하는 것이 최근 들어 많은 관심을 받고 있는 “위험도 정보이용 규제 및 적용”의 기본 개념인 것이다. 이러한 위험도 정보이용 규제 및 적용의 중요한 한 분야인 “위험도 정보이용 안전중요도 분류”는 원자력발전소의 SSCs를 확률론적 위험도정보와 결정론적 위험도정보에 근거한 안전중요도에 따라 둘 또는 그 이상의 그룹으로 분류하는 것이다. 이러한 분류를 통해 안전성에 중요한 기기에 더 많은 자원을 할당함으로써 위험도 정보에 기반을 둔 효율적인 자원관리를 할 수 있다. 초기의 “위험도 정보이용 규제 및 적용”은 OPTION-1 paradigm에 기반을 두고 있다. OPTION-1 paradigm에서는 법의 개정 없이 위험도 정보이용 Reg. Guide에 따라 위험도 정보이용 규제 및 적용이 시행되었었다. 따라서 위험도 정보에 따라 기기의 안전중요도가 낮더라도 안전 관련기기는 법에 따라 보수적인 기존의 요구사항을 충족시켜야만 했다. 그러나 최근 들어 SSCs를 안전 중요도뿐만이 아니라 안전등급까지 고려하여 4개의 그룹으로 분류하는 OPTION-2가 개발됨에 따라 안전관련 기기일지라도 안전중요도가 낮은 기기 (RISC-3 SSC)는 법개정을 통해 보수적이었던 기존의 요구사항들을 완화하거나 면제시킬 수 있게 되었다 (Figure 1 [1]). 기존의 안전 중요도 분류방법들이 SSCs 안전중요도를 나타내는 measure에 중점을 두었던데 반해서 본 저자는 이러한 measure들과 정보들을 이용하여 합리적으로 의사결정을 수행하여 효율적으로 안전중요도 분류를 수행하기 위한 방법을 제안한 바 있다 [2]. 그러나 이러한 안전 중요도 분류방법들은 대부분 안전 중요도를 나타내는 measure를 통해 원자력 발전소 전체의 SSCs에 대한 분류를 위해 개발되었다. 따라서 OPTION-2가 적용됨에 따라 RISC-3 SSC에 초점을 맞춘 분류방법의 도입이 요구되고 있으며 미국 Nuclear Energy Institute (NEI)에서 발간된 OPTION-2 implementation guideline에서도 RISC-3 SSC에 대한 분류는 보다 신중해야 함을 직접적으로 기술하고 있다 [1].

High	RISC-1 SSCs Safety Related Safety Significant	RISC-2 SSCs Non-Safety Related Safety Significant
	RISC-3 SSCs Safety Related Low Safety Significant	RISC-4 SSCs Non-Safety Related Low Safety Significant
Low	Safety Related	Non-Safety Related

Figure 1. Risk Informed Safety Classification (RISC) [1]

이에 본 연구에서는 SSCs의 안전 중요도와 함께 자원의 할당이 어느 정도인가를 나타내는 Burden to Importance Ratio (BIR)를 RISC-3 SSC로 분류된 기기의 검증을 위한 measure로써 사용할 것을 제안하고 그 효용성을 입증하고자 한다. RISC-3 SSC 검증을 위한 measure로써 BIR의 가장 큰 장점은 효율적인 자원관리를 위해서 어느 정도의 요구사항 면제 또는 완화를 해도 되는지 정량적으로 알 수 있다는 점이다 [3]. 다시 말해 위험도 정보이용 규제 및 적용의 목적에 정확히 부합되는 measure라 볼 수 있다. 이에 BIR에 대한 정의 및 설명은 2장에서 기술되며, 3장에서는 22개의 선별된 모집단 기기 중에 3개의 대상기기에 대한 분석이 수행되고, 그에 따른 결과 및 토의가 4장에서 논의되며, 마지막으로 5장에서는 결론 및 고려사항이 논의 된다.

2. Burden to Importance Ratio (BIR)

전술한 바와 같이 위험도 정보이용 규제 및 적용은 기본적으로 확률론적 및 결정론적 정보에 근거한 안전 중요도에 따른 합리적이고 효율적인 자원의 활용을 목적으로 하고 있다. Risk를 유지 또는 감소시키면서 burden은 줄이기 위해서 cost-benefit principle의 위험도 정보이용 규제 및 적용으로의 도입이 필요하였고 그에 따른 resource-effectiveness의 한 measure로써 BIR이 사용되었다 [3]:

$$\text{Burden to Importance Ratio} = \frac{\text{Relative Burden}}{\text{Relative Importance}}$$

- ◇ Relative Burden: 해당 SSC에 사용되는 상대적인 자원 (예: 연간 test 횟수)
- ◇ Relative Importance: 해당 SSC의 상대적인 중요도 값 (예: Fussell-Vesely importance)

BIR을 계산하기 위해서는 상대적인 자원과 상대적인 중요도 값이 필요하다. 상대적인 자원으로는 연간 test 횟수, 연간 드는 비용, 또는 연간 사용되는 man-power등 사용목적에 따라 적합한 인자를 선택해야 하며, 상대적인 중요도 값으로는 PSA의 Fussell-Vesely (FV) 중요도나 Risk Achievement Worth (RAW)와 같은 importance measure가 사용 될 수 있다 [4].

3. RISC-3 SSC 검증을 위한 measure로써 BIR의 적용

앞서 기술된 바와 같이 BIR을 구하기 위해서는 상대적인 burden과 importance measure가 필요

하다. 따라서 합리적인 BIR 계산을 위해서는 상대적인 비교의 대상이 되는 모집단 기기들의 선별이 어느 한쪽으로 치우치지 않도록 공평하게 이루어져야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 기기들의 선별을 위해 FV 중요도 0.001과 0.005 그리고 RAW 2와 10을 기준값으로 사용하여 [2], 기기를 High safety significant SSC (Hi), Potentially safety significant SSC (Po), 또는 Low safety significant SSC (Lo)에 치우침이 없이 균등하게 분포되도록 Table 1과 같이 512개의 울진원전3호기 IST 대상 MOV중에 22개를 모집단 기기들로 선별하였다.

Number	System	Valve Number	Valve Name	Safety	basic FV- Sin	basic RAW- Sin
1	CC	73	SCS Hx A Inlet W	3	0.0004	1.09
2	CV	530	RWT To SI Pp Iso W	2	0.0006	4.62
3	SI	644	SIT 01D Out W	1	0.0001	1.05
4	CC	105	D/G CCW Inlet W	3	0.0001	1.01
5	CC	141	CV Spray Hx- A Inlet W	3	0.0007	1.17
6	CS	35	CNMT Spray Hx- 1A Out W	2	0.0007	1.17
7	SI	321	HPSI Pp-2A To HL Loop 1 W	2	0.0070	1.16
8	SI	603	HPSI Pp-2A To HL Loop 1 W	2	0.0007	1.16
9	SI	651	RCS To LPSI Pp- 1A Suct W	1	0.0010	1.26
10	SI	652	RCS To LPSI Pp- 1B Suct W	1	0.0016	1.4
11	SI	655	RCS To LPSI Pp- 1A Suct W	2	0.0004	1.09
12	SI	656	RCS To LPSI Pp- 1B Suct W	2	0.0005	1.12
13	SI	657	SCS Hx- 1A Out W	2	0.0004	1.09
14	SI	658	SCS Hx- 1B Out W	2	0.0005	1.12
15	SI	675	CV Recir Sump A Out W	2	0.0088	3.2
16	SI	676	CV Recir Sump B Out W	2	0.0097	3.42
17	SI	689	LPSI Pp-1A To Loop 1 Iso W	2	0.0004	1.09
18	SI	690	LPSI Pp-1A To Loop 2 Iso W	2	0.0005	1.12
19	SI	695	SCS Hx- 1A Out W	2	0.0004	1.09
20	SI	696	SCS Hx- 1B Out W	2	0.0010	1.4
21	SI	698	HPSI Pp-2B Disch W	2	0.0012	5.53
22	SI	699	HPSI Pp-2A Disch W	2	0.0012	5.42

Table 1. 모집단 기기 선별

Figure 2에서 볼 수 있듯이 이들의 PSA에서의 중요도 값의 분포는 노심손상빈도 (CDF)의 FV 중요도와 RAW에 대한 기본분석, 공통원인고장 (CCF) 분석, 회복조치를 고려하지 않을 때의 기본분석, 회복조치를 고려하지 않을 때의 공통원인고장 분석과 초기대량방출빈도 (LERF)의 FV 중요도, RAW에 대한 기본분석, 공통원인고장 (CCF) 분석을 포함 한다 [5]. 따라서 22개의 모집단 기기에 대한 6개의 분석으로 총 132개의 항목 중 기기에 따라 분석이 불가능한 28개의 항목을 뺀 104가지 경우가 분포분석 대상이 된다. 이들 104가지 경우 중 Hi는 29가지 경우, Po는 38가지 경우, Lo는 37가지 경우에 해당되었다. 따라서 모집단 선별은 대략적으로 균등하게 이루어졌다고 판단된다.

본 연구에서 BIR 계산을 위해 사용되는 상대적인 중요도 값은 전술된 여러 분석들 중에 노심손상빈도 및 초기대량방출빈도의 FV 중요도와 RAW에 대한 기본분석에서의 중요도 값에 해당된다. 또한 상대적인 자원은 연간 수행되는 test 횟수이다. 여기서는 전행정 test (F), 위치지시 test (Z), 누설 test (L)를 포함하며 test 주기는 매3개월마다 1회 (3), 재장전주기마다 1회 (R)로 표시된다.

분석 대상기기로는 본 저자에 의해 제안되었던 안전중요도 분류방법에서 분석되었던 울진 원자력 발전소 3호기의 CC-V073, CV-V530, 그리고 SI-V644를 선정하였다 [2]. 앞선 연구에서 해당기기들은 각각 Lo, Hi, 그리고 Lo 로 분류되었다. 이 3개의 기기들은 모두 안전등급이므로 OPTION-2에서는 각각 RISC-3 SSC, RISC-1 SSC, 그리고 RISC-3 SSC로 분류될 수 있다. 이렇게 기분류된 기기들의 검증을 위해 모집단 기기를 포함한 각각의 BIR 값들이 Table 2와 같이 계산되었다.

Table 2에서 3번째와 4번째 열은 각각 상대적인 FV값과 RAW를 나타내고 7번째 열은 상대적인 연간 총 test 횟수를 나타낸다. 이들은 모두 상대적인 값이므로 각 열의 합이 1이 될 수 있도록 normalize되었다. Table 2의 8열과 9열은 각각 노심손상빈도의 FV중요도와 RAW에 대한 BIR을 나타내고 10열과 11열은 각각 초기대량방출빈도의 FV중요도와 RAW에 대한 BIR을 나타낸다.

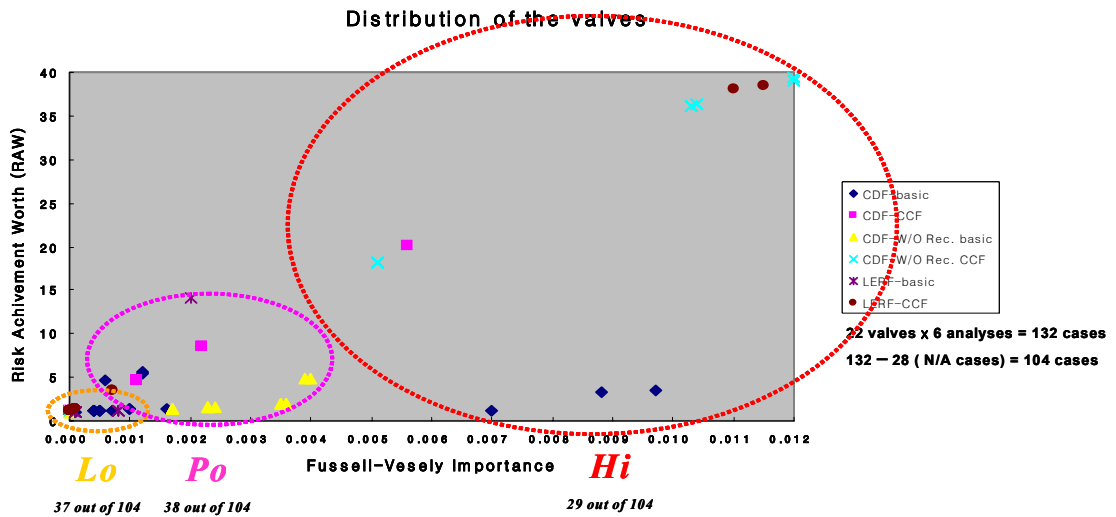


Figure 2. 모집단 기기의 중요도 값 분포

초기대량방출빈도의 FV중요도와 RAW에 대한 BIR은 22개의 기기중 단지 6개의 기기에 대해서만 분석이 가능하였다.

#	Valve #	Re.C-B-FV	Re.C-B-RAW	Test Item	Test Interval	Re. # of test	BIR (C-FV)	BIR (C-RAW)	BIR (L-FV)	BIR (L-RAW)
1	73	0.0106	0.0261	F/Z	3/R	0.043	4.067	1.650		
2	530	0.0159	0.1106	F/Z	3/R	0.043	2.711	0.389	0.084	0.068
3	644	0.0025	0.0251	F/Z	3/R	0.043	371.245	1.712		
4	105	0.0026	0.0242	F/Z	3/R	0.043	16.268	1.780		
5	141	0.0105	0.028	F/Z	3/R	0.043	2.324	1.537		
6	35	0.0185	0.028	L/F/Z	R/3/R	0.051	2.734	1.808		
7	321	0.0102	0.0278	F/Z	3/R	0.043	0.232	1.55		
8	603	0.0185	0.0278	F/Z	3/R	0.043	2.32	1.55		
9	651	0.0265	0.0302	L/F/Z	R/3/R	0.051	1.914	1.679	1.975	0.971
10	652	0.0423	0.0335	L/F/Z	R/3/R	0.051	1.196	1.511	1.975	0.952
11	655	0.0106	0.0261	L/F/Z	R/3/R	0.051	4.785	1.941		
12	656	0.0132	0.0268	L/F/Z	R/3/R	0.051	3.828	1.889		
13	657	0.0106	0.0261	F/Z	3/R	0.043	4.067	1.650		
14	658	0.0132	0.0268	F/Z	3/R	0.043	3.254	1.605		
15	675	0.2328	0.0766	F/Z	3/R	0.043	0.185	0.562	0.210	0.670
16	676	0.2566	0.0819	F/Z	3/R	0.043	0.168	0.526	0.210	0.701
17	689	0.0106	0.0261	L/F/Z	R/3/R	0.051	4.785	1.941		
18	690	0.0132	0.0268	L/F/Z	R/3/R	0.051	3.828	1.889		
19	695	0.0106	0.0261	F/Z	3/R	0.043	4.067	1.650		
20	696	0.0265	0.0335	F/Z	3/R	0.043	1.627	1.284	1.679	0.909
21	698	0.0317	0.0324	F/Z	3/R	0.043	1.356	0.325		
22	699	0.0317	0.1297	F/Z	3/R	0.043	1.356	0.338		
Total		1	1			1				

Table 2. 각 기기들의 BIR 값

4. 결과 및 토의 사항

계산되어진 모집단 기기들과 대상기기들의 BIR 분포가 Figure 3에 도시되어있다. x축은 FV 중요도에 대한 BIR을 y축은 RAW에 대한 BIR을 나타낸다. Figure 3에서 원점에서 멀리 떨어진 BIR값을 갖는 기기일수록 중요도 값에 대한 자원의 할당이 많음을 나타낸다. 따라서 그러한 기기들이 만약 RISC-3 SSC로 분류된다면 요구사항을 면제 또는 완화시켜도 될 수 있음을 보여준다.

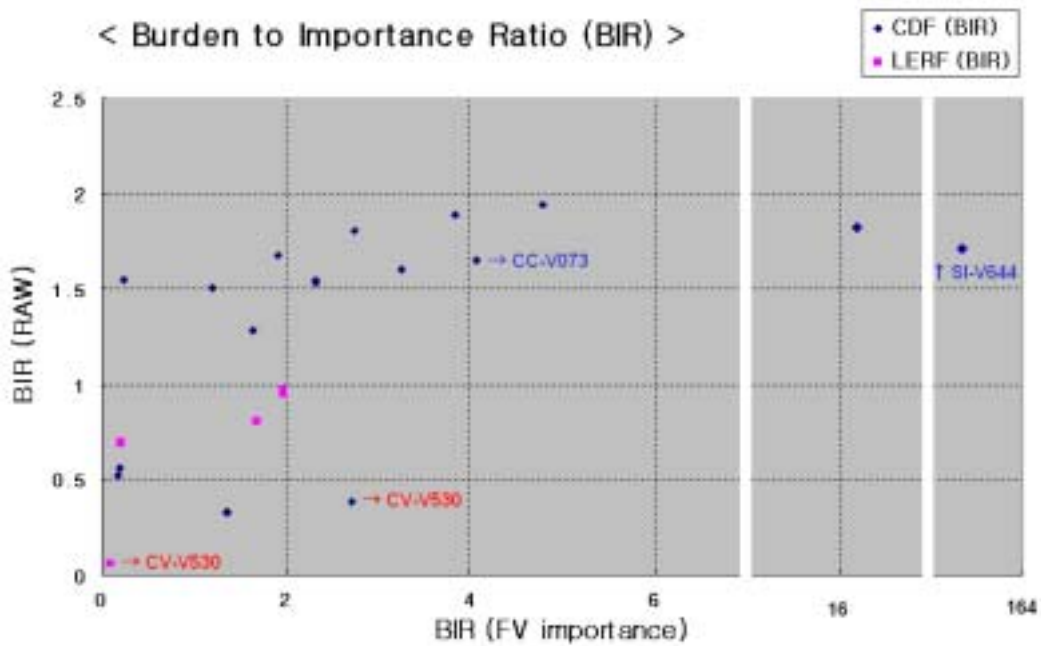


Figure 3. BIR 값들의 분포

대상기기였던 CC-V073과 SI-V644는 안전등급이지만, 안전중요도가 낮게 분석된 기기들, 즉 RISC-3 SSC이다. 이들의 FV 중요도 및 RAW에 대한 BIR값은 아래 Table 3에 정리되어 있듯이 전체 모집단 기기에 대해서 상대적으로 높은 값을 알 수 있다. 특히 SI-V644의 경우는 극단적으로 큰 값의 BIR을 갖는다. 따라서 위 두 기기는 안전 중요도에 비해 상대적으로 충분한 test를 받고 있다고 볼 수 있으며, 결과적으로 안전등급이지만 안전중요도가 낮은 RISC-3 SSC로 분류되어도 된다고 결론 지을 수 있다.

Valve	BIR	CDF	LERF
CC-V073	F-BIR	4.067	N/A
	R-BIR	1.65	
SI-V644	F-BIR	162.68	
	R-BIR	1.712	

Table 3. CC-V073과 SI-V644의 BIR 값

게다가 추가적으로 CV-V530의 경우 안전등급이며 안전 중요도가 높은 RISC-1 SSC로 간주될 수 있는데 Table 4에서 볼 수 있듯이 상대적으로 작은 BIR값을 가짐을 볼 수 있다. 특히 대량초기방출

(LERF)에 대한 BIR의 경우는 극단적으로 작음을 알 수 있다. 따라서 이 기기는 RISC-1 SSC로 분류해야 함을 다시 한번 확인시켜주는 근거라 할 수 있다.

Valve	BIR	CDF	LERF
CV-V530	F-BIR	2.711	0.084
	R-BIR	0.389	0.060

Table 4. CV-V530의 BIR 값

5. 결론 및 고려 사항

본 연구에서는 OPTION-2의 위험도 정보이용 안전 중요도 분류에서 RISC-3 SSC로 분류될 수 있는 기기에 대한 검증을 위한 measure로써 Burden to Importance Ratio (BIR)의 사용을 제안하였다. 또한 그 효용성을 입증하기 위해 울진 원자력 발전소의 IST 대상 MOV 512개중 22개의 기기를 안전 중요도 값에 대해 균등히 선별하여 모집단으로 선정하였으며 3개의 대상기기(CC-V073, CV-V530, 그리고 SI-V644)에 대한 검증을 수행하였다. 검증을 위한 BIR의 계산에는 연간 총 test 횟수와 노심손상빈도 (CDF) 및 초기 대량 방출 빈도 (LERF)에 대한 기본분석 FV 중요도와 RAW가 사용되었다. 분석결과는 제안된 방법이 위험도 정보이용 규제 및 적용의 실질적인 목적 즉, 안전 중요도에 부합하는 자원의 할당에 유용함을 보였으며, 안전중요도 관점만이 아닌 자원할당의 관점에서 분석이 가능한 measure로서 RISC-3 SSC 분류를 위한 검증의 도구로써 유용하다고 판단되었다. 그러나, 본 연구에서 사용된 PSA의 안전 중요도는 충분한 이론적 근거 하에서 구해질 수 있는 measure이지만, relative burden의 경우는 단지 연간 총 test 횟수만이 고려되었다. 실제로 각각의 상이한 test에서의 자원의 할당은 다를 것이다. 본 연구에서는 자원의 할당이 동일하다 가정 하에 연간 총 test 횟수를 계산하였다. 따라서 상대적으로 빈약한 이론적 배경 하에 있는 relative burden에 대한 계층적이고 분석적인 계산방법의 도입이 필요하다.

참고문헌

- [1] NEI Risk Applications Task Force and NEI Risk-Informed Regulatory Working Group, "Option 2 Implementation Guideline", NEI/NEI 00-04 (DRAFT-Revision A2), 2000.
- [2] Jun Su Ha and Poong Hyun Seong, "A method for Risk-Informed Safety Significance Categorization using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Bayesian Belief Networks (BBN)", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp. 1-15, 2004.
- [3] W.E. Vesely, "Principles of resource-effectiveness and regulatory-effectiveness for risk-informed applications: Reducing burdens by improving effectiveness", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 63, pp. 283-292, 1999.
- [4] Wall IB, Haugh JJ, Worlege DH, "Recent application of PSA for managing nuclear power plant safety", Prog Nuclear Energy, Vol. 39 (3/4), pp. 367-425, 2001.
- [5] 강대일 외 다수, "울진 3호기 가동중시험 대상 기기의 위험도 정보를 이용한 중요도 분석", 한국원자력 연구소, KAERI/TR-1927, 2001