

초기사건의 위험달성가치 중요도 척도 계산 방법에 대한 연구

김길유 · 정우식 · 강대일 · 양준연

한국원자력연구소 종합안전평가부

1. 서 론

원자력발전소를 비롯한 위험 시설물의 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)는 고장수목(Fault Tree) 및 사건수목(Event Tree) 분석으로 이루어지며, 분석 결과로 그 시설물의 위험도(Risk)는 최소단절집합(Minimal Cutsets)들의 합으로 구성된다.

최근 원자력발전소 등에 국내외적으로 많이 활용되는 위험도 정보 활용 원전 규제 및 응용 (Risk Informed Regulation & Applications: RIR&A)에서 핵심부분은 원전의 안전에 미치는 영향의 순위에 따라 구조물/계통/기기 (Structures, Systems, Components: SSC)를 안전에 중요한(Safety Significant) SSC와 중요하지 않은 (Non-Safety Significant) SSC로 구분하는 것이다. 안전에 중요한 SSC를 구분할 때 중요도 척도를 사용하며, 이 중 Fussell-Vesely (FV) 값과 Risk Achievement Worth (RAW)값을 많이 이용하고 있다[1-4].

본 논문은 한 기기나 계통의 RAW 계산시 그 기기의 이용불능도를 1로 놓는 것과 True로 놓는 것의 차이점과 단점을 기술하였으며, 특히 현행 방법으로 초기사건의 중요도를 계산할 때 나타는 문제점에 대하여 살펴보았다.

2. RAW 중요도 척도의 문제점

리스크 (예를 들면, 원자력발전소의 노심손상빈도(Core Damage Frequency:CDF))를 R 이라고 하면, base 위험도는 R_0 , 특정 기기 i 의 이용불능에 의해 증가된 위험도는 R_i' 라고 표시한다. 그러면, RAW는 전체 위험도에 대한 특정사건이 완전 이용불능할 때의 위험도 비로서 다음과 같다.

$$RAW = R_i' / R_0 \quad \text{-----} \quad (1)$$

현재의 PSA는 기본사건(Basic Event) 중심으로 최소단절집합 이루어 지고, 이를 이용하여 중요도를 계산하고 있다. 그러나, 한 기기(Component)라도 여러 고장 모드별로 기본사건이 존재하므로, 그 기기와 관련된 고장 모드별 기본 사건을 이용하여 그 기기의 중요도를 구해야 하는데, 현재까지 다음과 같은 방법이 있다[3].

C_1, C_2, C_3, C_4 를 C 그룹을 이루는 개별 기본사건 확률 (또는 기기 C의 고장 모드들)로 생각할 때, C 그룹 (또는 기기 C)의 RAW를 식(1)를 이용하여 구하는 법을 살펴보자. 먼저, 위험도 R을 다음의 간단한 식과 같이 표시된다고 하자.

$$R = AB(C_1+C_3) + DE(C_2+C_4) + F(C_1+C_3)(C_2+C_4) + GH \text{ ----- (2)}$$

이때, 그룹 C의 RAW 및 R_C' 를 구하는 방법은 다음과 같은 몇가지 방법이 있다.

방법 1: R_C' 는 식(2)에 C_1, C_2, C_3, C_4 을 1로 대입하여 계산한다. 즉,

$$R_C' = 2AB + 2DE + 4F + GH$$

이 경우, R_C' 에 non-minimal cutsets이 포함되어 아래처럼 RAW(C)을 과대 평가하게 된다.

$$RAW(C) = \frac{2AB + 2DE + 4F + GH}{AB(C_1+C_3) + DE(C_2+C_4) + F(C_1+C_3)(C_2+C_4) + GH}$$

방법 2: $RAW(C_1), RAW(C_2), \dots$ 을 구해 더한다. $RAW(C_1)$ 는 아래 식처럼 구하게 된다. 그럼 RAW(C)는 분자에 $4GH$ 항이 존재하게 되는 불합리한 결과가 나온다.

$$RAW(C_1) = \frac{AB + ABC_3 + DE(C_2+C_4) + F(C_1+C_3)(C_2+C_4) + GH}{AB(C_1+C_3) + DE(C_2+C_4) + F(C_1+C_3)(C_2+C_4) + GH}$$

방법 3: Cutset 집합에서 C_1, C_2, \dots 을 C로 놓고 Boolean Reduction한 후 구한다. 그러면,

$$R = ABC + DEC + FC + GH$$

이 되므로, C를 1로 대입하여 계산하면, (또는, C_1, C_2, \dots 를 True로 놓고, Boolean Reduction하면 같은 결과가 나온다.)

$$R_C^+ = AB + DE + F + GH$$

$$RAW(C) = \frac{AB + DE + F + GH}{AB(C_1+C_3) + DE(C_2+C_4) + F(C_1+C_3)(C_2+C_4) + GH}$$

위의 방법 중에서 방법 3이 정확하게 그룹 C의 RAW를 구하는 방법이다. 비록, 이 방법은 그룹 C를 이루는 개별 기본사건들의 RAW들을 이용하여 구하는 방법은 아니나, 참고문헌[3]에 언급 되었듯이, 그룹 C를 이루는 개별 기본사건들의 RAW들을 이용하여 그룹 C의 RAW를 구하는 방법은 아직은 없으므로(C_1, C_2, C_3, C_4 를 기기 C의 고장 모드들로 생각할 때, 기기 C의 RAW를 구하는 법도 위의 그룹 RAW를 구하는 방법과 마찬가지로 없다.), 현재로는 방법 3이 많이 사용된다. 그러나, 방법 3으로 RAW 중요도 척도 계산시 다음과 같이 RAW를 저평가하는 문제가 발생할 수 있다.

3. 초기사건 중요도 평가의 문제점

사고경위 정량화시 초기사건 빈도가 전위계통이나 보조계통 고장수목과 같이 사용되는데, 전위계통이나 보조계통 고장수목은 이용불능도(Unavailability) 모델로서 고장수목 내의 사건(event)이나 gate가 모두 1보다 작은 확률값을 가지고 rare event approximation이 성립되는 0.1 보다 작은 확률값을 가지지만, 초기사건 빈도는 확률값이 아니고 빈도로서, 표 1에서 보듯이 매우 큰 값을 가지며 심지어 1 보다 큰 값도 가진다. 예를 들면, 표 1에서 영광 5,6 호기 PSA의 일반과도사건, 급수상실, 복수기진공상실의 초기사건 빈도는 각각 3.4/년, 0.55/년, 0.23/년 이다. 따라서 다음의 예를 보면서 문제점을 생각해 보자.

다음의 간단한 식으로 표시되는 위험도 R에 대하여 생각해 보자.

$$R = C_1f_1 + AC_2f_1 + Bf_1 + C_1f_2 + Af_3 \quad \text{-----} \quad (3)$$

(여기서, A, B, C_1, C_2 는 모두 0.1의 이용불능도를 갖는 계통이나 기기 관련 사건이고, f_1, f_2, f_3 는 0.1/년, 3.4/년, 0.23/년 이라는 빈도를 갖는 어떤 초기사건이라고 가정하자.)

여기서 계통의 RAW인 RAW(C)를 구하는 방법은 위의 방법 3이 정확하다. 그러나, 초기사건의 중요도 척도 (예, RAW(f_1))를 구할 때는 위의 방법 3이 정확하지 않다. 즉,

방법 4: 위의 방법 3처럼 $R_{f_1}^*$ 는 식(3)에 f_1 를 True로 놓고, Boolean Reduction한다. 즉,

$$R_{f_1}^* = C_1 + AC_2 + B + Af_3$$

$R_{f_1}^*$ 에서 C_1f_2 까지 없어져 아래처럼 $RAW(f_1)$ 가 1보다 작아지는 불합리한 결과가 초래된다.

$$RAW(f_1) = \frac{C_1 + AC_2 + B + Af_3}{C_1f_1 + AC_2f_1 + Bf_1 + C_1f_2 + Af_3} = 0.233 \div 0.384 = 0.607$$

방법 5: f_1 을 1로 대입하여 계산한다. 즉,

$$R_{f_1}^* = C_1 + AC_2 + B + C_1f_2 + Af_3$$

이 경우, 올바른 $RAW(f_1)$ 가 계산된다.

$$RAW(f_1) = \frac{C_1 + AC_2 + B + C_1f_2 + Af_3}{C_1f_1 + AC_2f_1 + Bf_1 + C_1f_2 + Af_3} = 0.573 \div 0.384 = 1.492$$

위의 예제에서 $RAW(f_1)$ 를 구하는 방법 중 방법 5가 방법 4보다 적합한 것으로 판단된다. 왜냐하면, f_2 는 초기사건 빈도이므로, Boolean 수식 $C_1 + C_1f_2$ 의 C_1f_2 는 이미 확률이론이 잘 적용되지 않는 확률*빈도의 차원을 가졌기 때문에 $C_1 + C_1f_2$ 가 C_1 으로 Boolean Reduction 할 수 없기 때문이다. 따라서 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

그러나, 방법 5도 완벽한 방법은 아니다. $RAW(f_2)$ 를 f_2 을 1로 대입하여 계산하면, $RAW(f_2) = 0.375$ 이 되어 RAW 가 1보다 작아지는 불합리성이 여전히 존재하기 때문이다. $RAW(f_2)$ 를 구할 때 f_2 을 True로 놓고 구한 값은 0.349이므로 $RAW(f_2)$ 를 구할 때 f_2 을 1로 대입한 결과가 보다 정확할지라도 RAW 가 1보다 작아질 수도 있다는 것은 현재 관행의 한계이다. 실제 원자력발전소의 PSA의 경우에는 이런 일이 일어나지 않았지만 이와 같은 문제는 이론상 발생 가능한데, 이는 높은 빈도(예, 3.4/년)를 1/년로 낮추어 대입할 경우이다.

표 1 전출력 내부사건 초기사건빈도[5]

| 유형 | 초기사건 | 초기사건빈도 (발생건수/년*) |
|----------|---------------|---------------------|
| 냉각재상실사고 | 대형 냉각재상실사고 | 1.70E-4 |
| | 중형 냉각재상실사고 | 1.70E-4 |
| | 소형 냉각재상실사고 | 3.00E-3 |
| | 증기발생기 세관과단 | 4.50E-3 |
| | 저압경계부냉각재상실사고 | 1.77E-9 |
| | 원자로용기 파손사고 | 2.66E-7 |
| 과도사건 | 대형이차측과단 | 1.50E-3 |
| | 급수상실 | 5.50E-1 |
| | 복수기진공상실 | 2.30E-1 |
| | 기기냉각수상실 | 1.01E-1 |
| | 4.16KV 교류모선상실 | 1.75E-3 |
| | 125V 직류모선상실 | 3.50E-3 |
| | 소외전원상실 | 3.13E-2 |
| | 발전소정전 | 6.26E-6 |
| | 일반과도사건 | 3.4 |
| 정지불능과도사건 | 2.24E-5 | |

4. 결론

고장수목과 사건수목을 연계하여 원자력발전소 같은 시설물의 위험도를 정량화한 후, 각 기기들의 RAW 중요도 척도를 구할 때 보통 해당 기기의 이용불능도를 1로 놓거나 True로 놓고 구하는데, 각각의 방법에 단점이 존재한다. 기기의 RAW를 구할 때 해당 기기의 이용불능도를 1로 놓을 때는 non-minimal cutset이 생겨 고평가하는 단점이 있고, True로 놓을 때는 정확하나, 초기사건의 RAW를 구할 경우에는 True 보다는 1로 놓는 것이 정확하다. 즉, 기기들의 RAW 계산시는 해당 기기의 이용불능도를 True로 놓아 Boolean Reduction을 하고, 초기사건 빈도들의 RAW 계산시는 1로 놓고 계산하는 방법이 상대적으로 정확하다. 그러나, 초기사건 빈도들의 RAW의 계산의 의미는 더 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

- [1]. 김길유 외, "위험도 정보 활용 원전 규제 및 응용을 위한 중요도 척도 연구", KAERI/ TR-2432/2003, 한국원자력연구소, 2003, 3
- [2]. W.E. Vesley, et al., Measures of risk importance and their applications , NUREG/CR-3385, 1983, NRC
- [3]. M.C. Cheok, et. al., Use of Importance measures in risk-informed regulatory applications , *Reliability Engineering and System Safety*, 1998, **60**, 213-226
- [4]. I.B. Wall, and D.H. Worledge, Some perspectives on risk importance measures, In *Proceedings of PSA 96*, Park City Utah, September 29-October 3, 1996.
- [5]. 한국수력원자력(주) "영광 5,6호기 확률론적 안전성 평가 : 내부사건 분석 (최종보고서)