'02 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

조건부 RAW 중요도 연구

A Study of Conditional RAW Importance Measure

김길유, 황미정, 강대일

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 논문에서는 Risk Achievement Worth (RAW)의 확장된 형태인 조건부 RAW (Conditional RAW)를 새로운 중요도 척도로 제안하였으며, 이 중요도의 특성을 살펴보았다. 고장이 잘 안나는 기기의 RAW가 높아서 중요기기로 구분하는 것은 정비규정 등에서는 불합리하며, 이를 수정하는 중요도가 Conditional RAW이다. Defense In Depth 개념이 미흡한 기기인 경우에 Conditional RAW는 Fussell-Vesely 중요도 척도와 같아지며, Defense In Depth 개념이 양호한 기기의 Conditional RAW는 그 기기의 unavailability에 비례한다. 새 중요도 척도로써 Conditional RAW 만을 이용하여 중요기기를 가릴 수있으며, 기존의 Fussell-Vesely와 RAW의 기준치 조합으로 중요기기를 선정하는 방법도 Conditional RAW로 수행할 수 있다.

Abstract

In this paper, Conditional RAW, an extened Risk Achievement Worth (RAW), was introduced, and its characteristics were studied to improve the problem caused by the conventional RAW in the Maintenance Rule application. If Defense In Depth (DID) of a Structures, Systems, Component(SSC) is good , then Conditional RAW approaches FV value, and if DID of a SSC is poor , then Conditional RAW approaches the unavailability of the SSC. As a new importance measure, Conditional RAW can be used to find the risk significant SSCs as the combination of FV and RAW values are used .

1. 서론

최근에 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 중요 SSC와 중요하지 않은 SSC로 구분하는 것이다. 안전에 중요한 SSC를 구분할 때 중요도 척도를 사용하며, 이 중 Fussell-Vesely (FV) 값과 Risk Achievement Worth (RAW) 값을 이용하는 것이 많이 쓰이고 있다.

한 SSC의 RAW는 그 SSC가 고장 등으로 이용 못할 때를 가정하고, 그때의 중요도 척도를 보여준다. 그러므로, RAW는 그 SSC와 연관된 Defense In Depth를 보여주는 지표로서 유용하나, 실제로 그 SSC가 고장이 얼마나 잘 일어나고, 얼마나 이용 못하는지 등의 특성이 전혀 반영이 안되어, RAW는 실제 그 SSC가 위험을 초래하는 정도, 즉, 안전에 미치는 영향을 보여주는 척도로는 미흡하다. 즉, 고장이 잘 안일어나는 SSC의경우, RAW가 높다고, 그 SSC가 위험하고 안전에 중요하다고 말할 수 는 없고, 단지 그 SSC의 Defense In Depth 가 나쁘다고 말할 수 있을 뿐이다. 예를들어, 그 SSC의 Availability가 매우 높은경우 (또는 신뢰도가 매우 좋은 경우)에 Defense In Depth가 나쁘면, RAW가 매우 커지지만, 신뢰도가 매우 높은 그 SSC가 안전에 위험한 SSC로 분류하는 것은 정비규정 등에서는 모순이기 때문이다. (물론, Out of service(OOS) 상황에서, 원상복귀 순서 등을 선정할 때 같은 경우에는 RAW가 유용하다.)

따라서, 본 논문에서 새로운 RAW를 정의하여, 기존 RAW가 미흡했던 면을 보완하고자 하였으며, 새로운 RAW의특성을 살펴보았다.

새로운 RAW는 한 SSC가 고장 등으로 이용 못할 경우의 위험도를 표시하는 것은 물론, 새로운 RAW가 FV로 수렴도 될 수 있는 경우도 보임으로써, 새로운 RAW 중요도 척도 한 개로 기존의 RAW와 FV 두 중요도 척도를 겸할 수 있는가를 검토하였다.

2. 새로운 RAW 정의 및 활용 예

노심손상빈도(Core Damage Frequency : CDF)는 여러 사고의 경우의 수에 따라 나타날 수 있는 최소단절집합(MCS)들의 합으로 표현할 수 있다. 이 때 각 단절은 Basic Event로 여기서는 편의상 그 SSC의 unavailability로 정의 하자. (이때의 unavailability는 시험 및 정비로 인한 unavailability, 고장난 상태로 있음으로 인한 unavailability, 요구 및 작동시 고장인 Unreliability를 포함한다.) CDF는 아래 식(1)처럼 어떤 한 SSC의 unavailability P의 선형함수로 표현할 수 있다.

$$CDF = a \times P + b \qquad (1)$$

여기서, aP는 P를 포함하고있는 모든 최소단절집합 합이며, b는 그외의 모든 최소단절집합의 합을 표시한다[1]. 그러면, FV는 식(2) 처럼, 그리고 RAW는 식 (3) 처럼 표현된다[1].

$$FV = aP/CDF = aP/(aP+b) \qquad (2)$$

$$RAW = (a+ b) / (aP + b) \qquad (3)$$

Conditional RAW (CRAW)

정비규정에서 RAW 결과를 사용하여 위험성이 큰 SSC를 선정하면, 일반적인 기대와는 상이한 결과를 얻을 수 있는 가능성이 있다. 즉, 신뢰도가 높은 SSC가 적절하지 못한 정비 수행으로 인해 그 기능을 상실하게 될 경우, 신뢰도가 상대적으로 낮은 SSC에 비하여 위험도에 미치는 영향이 커진다. 이는 RAW 중요도가 실제의 계통이나 기기의 실패 경향을 포함하지 않으므로, RAW 중요도는 신뢰도가 높은 기기일수록 높게 나타나게 된다. 그러므로 본 논문에서는 기기의 신뢰도값을 RAW값에 곱하여 중요성을 다루는 조건부 RAW (Conditional RAW:CRAW)를 고려해 보았다.

SSC i 또는 Basic Event i에 대한 조건부 RAW (Conditional RAW: CRAW)의 정의는 다음과 같다.

$$CRAW_i = RAW_i * P_i \qquad (4)$$

두개의 SSC i,j 또는 Basic Event i, j에 대한 CRAW는 다음과 같다.

$$CRAW_{i,j} = RAW_{i,j} * P_i * P_j \qquad (5)$$

단, 여기서, Basic Event i, j는 서로 독립 사건이어야 한다. i,j가 서로 독립적이지 않을 경우는

$$CRAW_{i,j} = Max[(RAW_i * P_i), (RAW_j * P_j)] \qquad (6)$$

와 같이 표시된다.

일반적으로 k개의 SSC 1,2,..k 또는 Basic Event 1,2,..k에 대한 CRAW는 다음과 같다.

$$CRAW_{1,2,..k} = RAW_{1,2,..k} * P_1 * P_2 \ ...* P_k \qquad (7)$$

단, 여기서, Basic Event 1, 2, .. k는 서로 독립 사건이어야 한다. 서로 독립적이지 않는 경우는 식 (6)과 유사하게, 독립적이지 않은 사건들의 CRAW 중에서 최대치를 취한다.

극단적인 예로 고장확률이 높은 기기 A와 상대적으로 고장확률이 낮은 기기 B가 있을 경우, 고장 확률이 낮은 기기 B가 더 큰 RAW값을 갖지만 기기 고장확률을 곱하게 되면 고장 확률이 높은 기기 A의 CRAW 값이 더 커질 수 있다. 즉, 기기 A와 B의 고장확률을 각각 P(A)를 0.01, P(B)를 0.001이라 가정하고, 이 때의 RAW를 각각 1, 2라 하면 CRAW는 각각 0.01과 0.002가 되어 RAW를 비교해 볼 때, B의 RAW가 더 크지만 CRAW값을 비교하면 반대로 A의 값이 더 크다. 그러므로 CRAW를 사용하여 위험도에 미치는 영향이 큰 SSC를 선정하는 것이 정비규정이나 RCM 적용 등을 위해서는 효율적일 것으로 예상된다.

CRAW 개념은I^W (Weld Inspection Importance Measure)[2], [3]와 유사하다 생각할 수 있으나, I_i^W 는 오히려 비 정규화된 FV 중요도로 볼 수 있다 [3].

즉,

$$I_i^W = P_i \ I_i^B \qquad (8)$$

여기서, P_i는 계통 i의 파이프 파손확률이고, I_i^B 는 Birnbaum 중요도이다.

CRAW 의 특성

식 (3)으로 표현된 RAW의 특성을 들면 다음과 같다[1]. 다중방호(Defense In Depth: DID) 가 나쁜 경우는 a가 큰 경우로서 a >> b 라고 할 수 있으며, DID이 좋은 경우는 a << b이 된다.

식 (4)에서 DID가 나쁜 경우, 즉, a >> b인 경우,

$$CRAW = RAW * P = (a+ b)P / (aP + b) \cong aP / (aP + b) = FV \qquad (9)$$

식 (4)에서 DID가 좋은 경우, 즉, a << b인 경우,

$$CRAW = RAW * P = (a+ b)P / (aP + b) \cong bP / b = P \qquad (10)$$

그림 1에서 FV가 작을수록 CRAW = P에 근접하고, FV가 클수록 CRAW = FV에 근접한다. FV가 0이면 RAW는 1로 수렴한다.

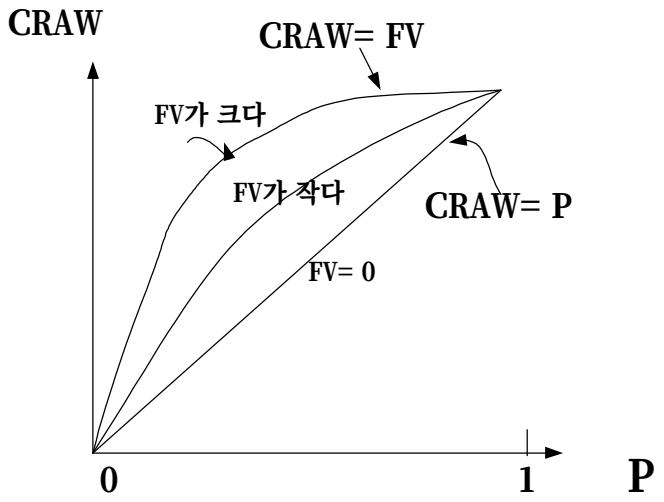

그림 1. CRAW, P 와 FV의 관계

정비규정 등의 위험도 정보 이용 규제에서 Risk Significant SSC의 구별을 RAW > 2 이거나 FV > 0.005인 경우로 선정한다. 따라서, 그림 2에서 I 구역에있는 SSC는 Risk Significant SSC로 정해지고, 구역 III에 있는 기기는 Non-Risk Significant SSC 로 정해진다.

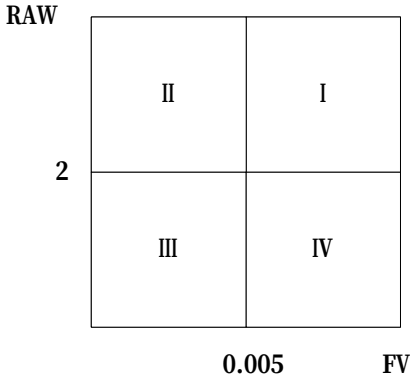

그림 2 중요기기 선정을 위한 FV와 RAW와의 기준

그림 2에 상응하는 CRAW 의 값을 얼마로 설정하여야 할 것인가를 살펴보자.

다음은 대략적으로 안전에 중요한 기기를 선정하는 방법이다.

일단 DID가 나쁜 경우, 즉, a >> b인 경우, CRAW ≅ FV (식 (9) 참조)이고 FV가 0.005이면 Risk Significant SSC로 구분하므로, CRAW >0.005이면 일단 Risk Significant SSC 이다.

그런데, DID가 좋은 경우, 즉, a << b인 경우, CRAW ≅ P (식 (10) 참조) 이고, 이때, CRAW 가 0.005 보다 클 수가 있다. 즉, a 가 작을 지라도 P가 크면 가능하다. 이 경우, 그 기기는 고장은 잘 나는데, DID이 잘되어 있어 그 기기가 고장 나도 안전에 영향을 별로 주지 않는 경우이다. 이 경우는 보통 RAW와 FV가 기준치 보다 작은 경우인데(그림 2에서 III 구역), 그 기기가

안전에 중요하지 않다고 생각하면, 그 기기는 제외해야 한다. CRAW >0.005 중 CRAW ≅ P인 경우 (예, P > 0.5 * CRAW)는 보통 CRAW 상에서 Risk Significant SSC한 기기로 볼 수 없다.

다음은 식 (11) [4]을 사용하여 CRAW 의 중요도 선정 기준값을 정하는 방법이다.

$$RAW = 1 + [(1-P)/P]* FV \qquad (11)$$

만일 RAW >2, FV > 0.005 를 Risk Significant SSC의 선정 기준으로 정했다면, 식 (11) 에서,

$$2 < RAW$$
$$2 < 1 + [(1-P)/P]* FV$$
$$P/(1-P) < FV$$

위 식에서 0.005 < FV 이어야 하므로

$$0.005 \geq P/(1-P),$$

즉, $\sim 0.005 \geq P$ (12)

또, FV > 0.005 이므로, 식(11)에서

$$CRAW= P+(1-P)*FV$$
$$CRAW > 0.005 + (1-0.005)* 0.005$$
$$CRAW > 0.01 \qquad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 만족하는 SSC가 그림 2에서 RAW >2, FV > 0.005를 만족하는Risk Significant SSC라고 할 수 있다. 즉, 식 (12)과 식 (13) 기준은 그림2에서 I 구역에 들어간 SSC 구분 방법으로 볼 수 있다. 구역 II, III, IV 에 속하는 SSC도 유사한 방법으로 구할 수 있다.

정비규정, RCM, Option 2 등에서 CRAW를 이용하면, 단순한 RAW 보다, 조건부 RAW를 이용하므로, 보다 현실적인 중요도를 이용한다고 할 수 있다. 또, CRAW 한 개의 중요도만을 이용하여 (실제로는 RAW와 Unavailability P 를 이용) 중요기기를 구분할 수 있다.

다음 표1에서는 울진 3,4호기의 PSA 모델 일부 계통에 대하여 CRAW와 RAW에 따른 중요도 변화를 비교하였다. 표 1에서 1, 2번 event는 CRAW > 0.01이고 P < 0.005 이므로 그림 2의 I 구역에 속한다. 실제로 FV와 RAW가 기준치를 0.005와 2를 각각 넘고있다. 또, 3번 event는 CRAW > 0.01 이나 P > 0.005 이므로 그림 2의 I 구역에 속하지 않는다. (다른 방법으로 생각하면 CRAW > 0.005 이나 CRAW ≅ P 이므로 그림 2의 I 구역에 속하지 않는다.)

표 1. RAW와 CRAW 중요도 비교

번호	EVENT	MEAN	FV	RAW	CRAW
1	HSMPW00102	8.90E-05	0.0323	364.362	3.24E-02
2	AFCVW104849	2.08E-06	0.0313	15069.8678	3.13E-02
3	EGDGS01B	1.40E-02	0.0051	1.0187	1.42E-02

Option 2에서 활용

Option 2 방법론이 적힌 NEI 00-004 [5]에서 기기 고장 모드를 이용한 기기의 RAW는 표 2의 RAW 선정 방법 처럼 각 기기 모드의 RAW 중 최대 RAW를 그 기기의 RAW로 취한다. 이와 유사하게,

식(6) 처럼, 기기 고장 모드를 이용한 기기의 CRAW는 각 기기 고장 모드의 CRAW의 최대치를 취할 수 있다.

표2. 기기의 중요도 척도 예

기기 고장 모드	F-V	RAW
Valve ‘A’ Fails to Open	0.002	1.7
Valve ‘A’ Fails to Remain Closed	0.00002	1.1
Valve ‘A’ In Maintenance	0.0035	1.7
Common Cause Failure of Valves ‘A’ & ‘B’	0.004	n/a
기기 중요도	0.00952	1.7

3. 결론

RAW의 확장된 형태인 CRAW를 새로운 중요도로 제안하였으며, 이 중요도의 특성을 살펴보았다. 고장이 잘 안나는 기기의 RAW가 높아서 중요기기로 구분하는 것은 정비규정 등에서는 불합리하며, 이를 수정하는 중요도가 CRAW이다. Defense In Depth 개념이 미흡한 기기인 경우에 CRAW는 FV 중요도 척도와 같아지며, Defense In Depth 개념이 양호한 기기인 CRAW는 그 기기의 unavailability에 비례한다. 새 중요도 척도로써 CRAW 만을 이용하여 중요기기를 가릴 수 있는 방법을 제시하여, 기존의 FV와 RAW의 기준치 조합으로 중요기기를 선정하는 방법도 CRAW만으로 수행할 수 있음을 보였다. 그러나, FV가 불필요한 것인지는 향후 더 연구해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. I.B. Wall, D.H. Worledge, “Some Perspectives on Risk Importance Measure”, PSA ‘96, Utah, U.S.A, 1996

2. Truong V. Vo, et. al., “Probabilistic Risk Assessment Based Guidance For Piping In-Service Inspection”, Nuclear Technology, Vol. 88, Oct, 1989

3. R. Fullwood, R. Hall, “ Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry”, 1988, Pergamon Press

4. S. Martorell,et.al., “Safety-related equipment prioritization for reliability centered maintenance purposes based on a plant specific level 1 PSA”, Reliability Eng. And System Safety, Vol 52, 1996

5. NEI 00-04 , “Industry Guideline for Risk-Informed Categorization and Treatment of Structures, Systems, and Components, Draft, March, 2000