

Modelling and Quantification of Pre-Accident Human Error Dependency

강대일, 정원대, 이윤환, 황미정, 양준언

Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-600, Korea, dikang@kaeri.re.kr

1. 서론

사고 전 인적오류(pre-accident human error)는 기기의 정비, 시험, 교정작업후 기기의 상태를 원래의 상태로 두지 못할 경우 발생할 수 있다. 이들 인적오류 사이에서는 정비, 시험 등의 작업시 사용되는 동일 절차서나 동일 작업자 등의 이유로 인적오류 사이 종속성(dependency)이 발생할 수 있다[1,2]. 원전의 안전계통 대부분은 다중성(redundancy)을 생각하여 2계열이상으로 설계되었다. 사고전 인적오류 대부분이 10⁻²미만으로 평가되기에 3계열 이상으로 이루어진 계통내의 사고전 인적오류 종속성은 PSA의 정량화 단계에서 사용되는 절단치(truncation limit)가 매우 작지않으면 사고전 인적오류 종속성이 제대로 다루어질 수 없다. 본 논문에서는 이러한 사고전 인적오류 종속성을 PSA의 정량화전에 처리하여 계통 고장수목에 모델링할 경우의 그 타당성을 보이고자 한다.

2. 방법과 결과

2.1 종속성이 있는 사고 전 인적오류 사건 표시

국내 표준 원전의 원자로보호계통(RPS)과 공학적 안전설비 작동신호계통(ESFAS)의 채널(channel)은 보통 4가지인 A, B, C, D로 구성되어 있다[3]. 일반적으로 안전계통 작동신호 발생에 대한 계통의 고장 기준은 4개중 3개가 고장이 나와야 한다. A, B, C, D를 각 채널의 개별 인적오류 사건이라면 인적오류 종속성은 AB(AC, AD, BC, BD, CD)*hardware, ABC, ABD, ACD, BCD사이 발생된다.

앞에서 언급한 4 채널사이의 인적오류 종속성을 PSA 정량화 단계에서 고려하지 않기 위한 방안으로 채널 A에 대한 사고 전 인적오류를 다음과 같이 표시하자[4]:

$$A_T = A_I + C_{AB} + C_{AC} + C_{AD} + C_{ABC} + C_{ABD} + C_{ACD} + C_{ABCD} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, A_T: 채널 A의 사고 전 전체 인적오류,
A_I: 채널 A의 사고 전 개별 인적오류,
C_{XY}: 채널 X와 채널 Y의 사고전 공통 인적오류

식(1)에서 각각의 사건은 서로 배타적(mutually exclusive)이다. P(x)는 사건 x의 확률이고, P(B|A)를

사건 A가 발생한다는 조건하에 사건 B가 발생할 확률이라고 할 경우 단, P(B|A)= P(A|B)이며, 채널 A, B, C, D의 전체 사고전 인적오류와 독립 사고전 인적오류, 공통 사고전 인적오류는 다음과 같이 표시할 수 있다:

$$\begin{aligned} P(A_T) &= P(B_T) = P(C_T) = P(D_T) = Q_T \\ P(A_I) &= P(B_I) = P(C_I) = P(D_I) = Q_I \\ P(C_{AB}) &= P(A_T)P(B_T|A_T) = Q_{21} \\ P(C_{AC}) &= P(A_T)P(C_T|A_T) = Q_{22} \\ P(C_{AD}) &= P(A_T)P(D_T|A_T) = Q_{23} \\ P(C_{BC}) &= P(B_T)P(C_T|B_T) = Q_{24} \\ P(C_{BD}) &= P(B_T)P(D_T|B_T) = Q_{25} \\ P(C_{CD}) &= P(C_T)P(D_T|C_T) = Q_{26} \\ P(C_{ABC}) &= P(A_T)P(B_T|A_T)P(C_T|A_TB_T) = Q_{31} \\ P(C_{ABD}) &= P(A_T)P(B_T|A_T)P(D_T|A_TB_T) = Q_{32} \\ P(C_{ACD}) &= P(A_T)P(C_T|A_T)P(D_T|A_TC_T) = Q_{33} \\ P(C_{BCD}) &= P(B_T)P(C_T|B_T)P(D_T|B_TC_T) = Q_{34} \\ P(C_{ABCD}) &= P(A_T)P(B_T|A_T)P(C_T|A_TB_T)P(D_T|A_TB_TC_T) \\ &= Q_4 \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

2.2 사고 전 인적오류의 종속성 평가

표준 인간신뢰도분석[5]에서 사고 전 인적오류 종속성 수준은 참고문헌을 토대로 만든 아래의 그림 1을 이용하여 평가하고 종속성 수준에 따른 조건부 확률은 표 1을 이용하여 평가한다:



그림 1. 사고 전 인적오류 종속성평가 규칙

2.3 종속성이 있는 사고 전 인적오류 모델링과 정량화

본 논문에서는 핵연료 재장전시 수행되는 4개의 채널에 있는 전송기(transmitter) 등의 교정작업(calibration work)에서 사고전 인적오류 종속성을 평가하였다. 표준 원전의 경우 A와 C 채널, B와 D채널은 같은 계열(train)에 있다. 핵연료 재장전시에는 교정작업이 보통 지역별로 수행되기 때문에 그림 1을 토대로 종속성을 평가하면 동일 계열의 채널 A와 C, 채널 B와 D 사이의 교정작업은 high dependency이고 다른

계열 사이의 채널간에는 계열사이의 거리가 떨어져 있으므로 의존성이 low dependency로 평가된다.

표 1. 종속성 수준에 따른 정량화 식[6]

종속성 수준	계산 식	최소 조건부 확률
Complete	$P\{A \cap B\} = P\{A\}$	1.0
High	$P\{A \cap B\} = P\{A\} \frac{1 + P\{B\}}{2}$	0.5
Moderate	$P\{A \cap B\} = P\{A\} \frac{1 + 6 \cdot P\{B\}}{7}$	0.14
Low	$P\{A \cap B\} = P\{A\} \frac{1 + 19 \cdot P\{B\}}{20}$	0.05
Zero	$P\{A \cap B\} = P\{A\} \cdot P\{B\}$	P(B)

교정작업에 대한 사고 전 인적오류 확률을 보수적으로 10^{-2} 이라고 하면, 고, 중, 저 종속성 수준에 따른 조건부 확률은 각각 0.505, 0.151, 0.0595가 된다. 표준원전의 교정작업에 대해, 앞절의 2.1에서 제시한 식(2)의 사고전 공통 인적오류는 다음과 같이 표시되고 정량화된다:

$$\begin{aligned}
 P(C_{AB}) &= P(C_{AD}) = P(C_{BC}) = P(C_{CD}) = \\
 Q_{21} = Q_{23} = Q_{24} = Q_{26} &\approx 0.06Q_T = Q_{221} \\
 P(C_{AC}) = P(C_{BD}) &= Q_{22} = Q_{25} = 0.505Q_T = Q_{222} \\
 P(C_{ABC}) = P(C_{ABD}) &= P(C_{ACD}) = P(C_{BCD}) = \\
 Q_{31} = Q_{32} = Q_{33} = Q_{34} &= 0.03 \cdot Q_T = Q_{333} \\
 P(C_{ABCD}) = Q_4 &= 0.015 Q_T = Q_{444}
 \end{aligned}$$

따라서, 사고전 인적 오류만을 고려한 계통 고장 확률은 다음과 같이 표시가 가능하다:

$$P(S_{fail-human}) \approx 4\{Q_1\}^3 + 4Q_1Q_{222} + 8Q_1Q_{221} + 6\{Q_{221}\}^2 + 8Q_{221}Q_{222} + \{Q_{222}\}^2 + 4Q_{333} + Q_{444}$$

각 채널의 사고전 인적오류 확률을 $P(A_T, B_T, C_T$ or $D_T) \approx Q_{ind}(=Q_1) + Q_{ccf}$ 로 모델링 한다면, 즉 각 채널의 사고전 인적오류 확률을 독립 인적오류와 공통원인 인적오류 확률 2가지로 모델링 한다면 공통원인 인적오류 확률은 다음과 같이 표시가 된다:

$$Q_{ccf} \approx 4Q_1Q_{222} + 8Q_1Q_{221} + 6\{Q_{221}\}^2 + 8Q_{221}Q_{222} + \{Q_{222}\}^2 + 4Q_{333} + Q_{444}$$

일반적으로 $Q_T \approx Q_1$ 이므로, 위식을 다시 정리하면,

$$Q_{ccf} \approx 3.02\{Q_1\}^2 + 0.135Q_1 \approx 0.135Q_1$$

예를 들어 채널 교정 작업에 대한 인적오류 확률이 1.0×10^{-3} 으로 평가 되었다면, 채널 개별

교정작업 인적오류(다른 인적오류와 독립인)는 8.81×10^{-4} , 채널 교정작업에 대한 사고 전 공통원인 고장 확률은 1.19×10^{-4} 가 된다.

본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 보이기 위해 성공기준이 본 논문과 동일하게 2 of 4이고, 사고전 채널 전체 인적오류 확률이 1.0×10^{-3} , 채널의 하드웨어 독립 고장확률이 3.0×10^{-3} , 공통원인고장확률이 3.0×10^{-4} 인 경우의 계통 이용불능도를 평가하였다. 사고전 인적오류 종속성을 정량화 단계에서 처리하는 일반적인 방법에 의해 평가한 결과 계통이용불능도는 4.116×10^{-4} , 본 논문에서 제시한 방법을 사용한 경우 4.19×10^{-4} 로 평가되었다. 따라서, 다중 사고전 인적오류 종속성이 있을 경우 본 논문에서 제시한 방법은 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 논문에서는 다중 사고전 인적오류 종속성이 있을 경우 인적오류를 2가지인 독립 인적오류와 공통원인 인적오류로 모델링하는 방법을 제안하고 그 모델링 방법의 타당성을 보였다. 추후에는 본 논문에서 제시한 방법을 일반화(generalization)시키고 정량화 결과의 정밀도를 높이는 연구가 필요하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1]. ASME, "Standard for PRA for NPP Applications", Rev. 15, 2003
- [2]. Dae-II Kang et al., "Guidelines for System Modeling: Pre-Accident Human Errors", KAERI/TR-2679/2004(in Korean), KAERI, 2004
- [3]. 민경란 외, "신뢰도 상세분석: 표준원전 공학적 안전설비 작동계통", KAERI/TR-2165/2002, 한국 원자력연구소, 2002
- [4]. A. Mosley et al., "Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies", NUREG/CR-4780, NRC(1987)
- [5]. 정원대 외, "표준 인간신뢰도분석 방법", KAERI/TR-XXXX, 미발간보고서
- [6]. A.D.Swain and H.E.Guttman, "Handbook of HRA with Emphasis on NPP Applications", NUREG/CR-1278, S.N.L, Aug. 1983