

원자력시스템에서 순차적 다중실패상태의 신뢰도 평가 방법에 관한 고찰

한 석 중

한국원자력연구원

(2011. 5. 4. 접수 / 2011. 8. 4. 채택)

A Study on Reliability Estimation of Sequential-ordered Multiple Failure Modes in Nuclear System

Seok-Jung Han

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received May 4, 2011 / Accepted August 4, 2011)

Abstract : A study on reliability estimation of sequential-ordered multiple failure modes, which are sequentially ordered between failure modes in a considering system, was performed. Especially, an approach to estimate the probabilities of failure modes has been proposed under an assumption that failure modes are mutually exclusive and sequentially ordered by only a critical variable. A feasibility of the proposed approach were studied by a practical example, which is a reliability estimation of passive safety systems for a probabilistic safety assessment(PSA) of a very high temperature reactor(VHTR) that is under development as a future nuclear system with enhanced safety features. It is difficult to define a robust failure state of this nuclear system because of its enhanced radiation release characteristics, so the new approach is a useful concept to estimate not only its safety but also a PSA. A feasibility study applied two failure modes(e.g., small and large release of radioactive materials) with considering the integrated behavior of this nuclear system. It is expected that the multiple release states for a practical estimation can be easily extended to the aforementioned example. It was found out that the proposed approach was a useful technique to cover the unfavorable features of this nuclear system as to performing a VHTR PSA.

Key Words : reliability estimation, stress-strength interference model, multiple failure modes, probabilistic safety assessment, passive safety systems, nuclear system, very high temperature reactor(VHTR)

1. 서론

원자력시스템과 같은 복잡하고 거대한 시스템은 구성 요소의 개별적인 신뢰도 평가를 종합하여 전체 신뢰도 평가나 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)를 수행한다. 이러한 복잡한 시스템에서 신뢰도 평가를 위한 구성 요소의 성능 특성은 성공 또는 실패의 간단한 상태만으로 묘사하기 어려운 경우가 존재한다. 여러 유형의 실패 상태가 존재하는 시스템에서 신뢰도 평가를 수행하기 위해서는 다중 실패 상태를 고려할 수 있어야 한다¹⁾.

다중 실패 상태를 고려한 신뢰도 평가가 요구되는 경우로 미래 원자력시스템의 하나인 초고온가

스로(Very High Temperature Reactor, VHTR)의 피동안전계통의 신뢰도 평가를 들 수 있다. VHTR의 피동안전계통은 동 시스템의 안전성을 보장하기 위하여 설치된 공학적 안전 설비로 사고 상황과 같은 비상시 VHTR의 건전성을 보장하는 핵심 안전 설비이다²⁾. 이 피동안전계통의 성능 특성은 VHTR의 고유한 방사선 안전 특성으로 인하여 성공과 실패의 분명한 형태로 정의하기 어렵다³⁾. 이 경우 다중 실패 상태의 개념을 도입하여, 고유한 방사선 안전 특성에 따라 몇 가지 유형의 실패 모드(예를 들어, 안전 사고시 방사성 물질의 누출 정도)를 고려할 수 있다⁴⁾.

이러한 문제에서 각 실패 상태가 독립적으로 발생하여 각 실패 상태 간의 관계를 추정하기 어렵다면 신뢰도를 평가하기 어렵다. 그러나 각 실패 상

태가 특정한 관계를 갖는다면 신뢰도를 이 특정 관계를 이용하여 평가할 수 있다. 특히, 각 실패 상태를 추정하는 임계 변수(critical variable)가 존재하여 각 실패 상태의 기준을 정할 수 있다면, 이론적으로 각 실패 상태의 확률을 도출할 수 있다.

본 논문은 특정 변수에 의해서 각 실패 상태 간에 관계를 추정할 수 있는 경우에 한정하여 신뢰도를 평가하는 방법을 제안하고 타당성을 검토하였다.

먼저 시스템의 성능 특성에 근거한 일반적인 신뢰도 평가 방법의 하나인 SSI(Stress-Strength Interference) 모델의 기본 특성을 고찰하고, 본 연구에서 제안한 다중 실패의 경우에 대하여 기본 모델의 확장 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 VHTR 피동안전계통의 신뢰도 평가에 적용하여 타당성을 검증하였다.

2. 신뢰도 평가 방법

2.2. 일반 신뢰도 평가 방법

특정 기기의 신뢰도를 평가하는 다양한 방법이 있지만, 본 논문에서 고려하는 대상은 성능 특성을 기반으로 신뢰도를 추정해야 하는 경우이다⁵⁾. 이러한 방법 중의 대표적인 접근법은 고려하는 기기의 내성(strength)이 어떤 허용치를 초과하는 부하(stress)가 주어졌을 때 실패한다는 개념에 기초하고 있다. 이 개념은 정량화를 위한 실패 기준의 할당 방법에 따라 2가지 유형의 방법이 있다:

- 1) 초과 확률(exceedance probability) 모델
- 2) SSI (stress-strength interference) 모델

두 방법의 개념적 차이점을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

초과 확률 모델에서 실패 확률은 Fig. 1과 같이 성능 결정 변수의 부하 확률 분포에서 성능 기준을 넘어서는 초과 확률로 평가된다. 반면에 SSI 방법에서 실패 확률은 Fig. 2와 같이 동일한 성능 변수의 내성 확률 분포와 부하 확률 분포 간의 간섭 영역의 확률 값으로 가정한다. 원자력시스템의 PSA와 같이 특정한 공학적 평가에서는 내성 확률 분포

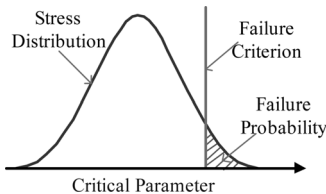


Fig. 1. Conceptual Diagram of Exceedance Probability Model.

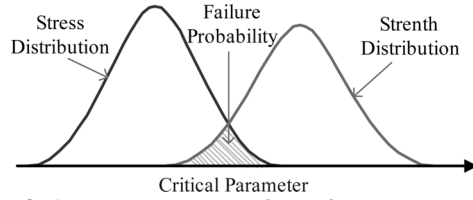


Fig. 2. Conceptual Diagram of Stress-Strength Interference Model.

추정의 어려움과 사용의 편리성 등으로 인하여 초과 확률 모델에 의한 평가 방법을 많이 활용한다⁶⁾.

2.1.1. 초과 확률 모델

개념적으로 초과 확률 모델에서 계통의 실패 확률 Pr_F 즉, 초과 확률은 결정변수 z 의 어떤 임계값 c 에 대하여 c 를 초과하는 확률변수 S 의 확률 $Pr(S > c)$ 로 정의한다. 이 경우 계통의 실패 확률 Pr_F 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Pr_F &= Pr(S > C_S) \\ &= \int_{C_S}^{\infty} f(z) dz \\ &= 1 - F(C_S) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 S 는 결정변수 z 에 대한 계통 부하의 확률 변수이고, C_S 는 계통의 성공/실패를 평가하는 계통 성능 기준을 의미한다. f 와 F 는 각각 계통 부하 S 의 확률밀도함수와 누적분포함수를 의미한다.

2.1.2. SSI 모델

전형적인 SSI 방법에서 결정변수 z 에 대한 부하 확률변수 $S(z)$ 와 내성 확률변수 $R(z)$ 를 연속 분포 함수로 가정하면, 계통의 실패 확률은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Pr_F &= Pr(S > R) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(r) dr \right] dz \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 f 는 각각 확률변수 S 와 R 에 대한 확률밀도 함수이다.

2.1.3. 초과 확률 모델과 SSI 모델의 관계

한 가지 주목할 점은 초과 확률 모델의 경우는 SSI 모델의 한 유형으로 파악할 수 있다는 점이다. 이는 초과 확률 모델에 적용되는 단일값 실패 기준 c 을 Dirac delta로 정의하면 가능하다.

계통의 내성 확률변수 $R(z)$ 를 어떤 실패기준 c 에 대한 Dirac delta $\delta(c)$ 로 정의한다면, 누적분포함수는 다음과 같은 unit step 함수로 정의할 수 있다.

$$H(z-c) = \begin{cases} 1 & \text{if } z \geq c \\ 0 & \text{if } z < c \end{cases} \quad (3)$$

이 경우, SSI 모델에서의 계통 실패 확률은 unit step 함수를 이용하여 평가할 수 있다. 계통 부하 함수의 누적분포함수 $G(z)=H(z-c)$ 이니까, 계통 실패 확률 Pr_F 는 수식 (3)에 의해서 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} Pr_F &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z)G(z)dz \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z)H(z-c)dz \\ &= \int_c^{\infty} f(z)dz = 1 - F(c) \end{aligned} \quad (4)$$

이 수식에 의해 유도된 결과는 초과 확률 모델의 개념에서 출발하여 유도한 수식 (1)와 일치된 결과이다. 따라서 초과 확률 모델은 특수한 내성 확률 함수 즉, Dirac delta를 적용한 SSI 모델의 특별한 경우라고 할 수 있다.

2.2. 다중 실패 상태

다중 실패 상태란 정상 상태를 제외한 다양한 비정상 상태 즉, 다양한 실패 상태가 존재할 경우를 의미한다. 다중 실패 상태가 있는 경우에도 각 실패 상태가 독립적으로 발생한다면 이에 대한 신뢰도 평가 모델을 제시하기 어렵다.

그러나 다중 실패 상태가 존재하는 대상의 신뢰도를 성능 특성에 기반하여 평가할 경우는 다음과 같은 가정을 하면 이를 모델할 수 있다¹⁾.

- 동일한 임계 변수로 실패 상태 평가
- 각 실패 상태 간의 배타성
- 각 실패 상태 간의 순차적 연관관계

다중 실패 상태를 고려하여 신뢰도를 평가하기 위해서는 각 실패 상태를 동일한 임계 변수에 의해서 측정 가능하다는 가정을 하여야 한다.

또한 다중 실패 상태를 적용하기 위해서는 각 실패 상태들 간에는 배타적인 특성을 부여하여야 한다.

마지막으로 각 실패 상태 간에는 일정한 관계가 있어야 한다. 각 실패 상태 간의 연관 관계는 여러 가지 경우를 적용할 수 있지만, 일반적으로 적용할

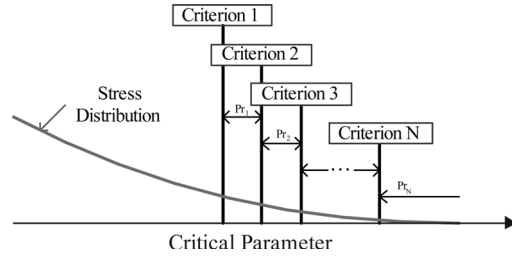


Fig. 3. Conceptual Diagram of Multiple Failure Modes.

수 있는 관계식은 존재하지 않는다. 각 실패 상태의 관계는 적용 사례에 따라 특성이 다르므로 적용 사례를 기준으로 정의하여야 한다. 본 논문에서 각 실패 상태가 임계 변수에 따라 순차적으로 발생하는 경우만을 고려하였다.

위의 가정에 근거하여 다중 실패 상태를 고려한 신뢰도 평가 방법의 기본 개념은 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 이해를 돕기 위해 초과 확률 모델의 개념을 적용하였다. 일반 SSI 모델의 경우에도 유사하게 각 실패 기준으로 확률분포를 적용하면 쉽게 개념을 확장할 수 있다.

신뢰도 평가를 위해 고려되는 다중 실패 상태가 배타성을 갖고, 특정 변수에 의해서 순차적으로 발생한다는 조건은 본 논문에서 고려하고 있는 VHTR의 피동안전계통의 신뢰도를 평가를 위한 유용한 가정이다.

2.3. 다중 실패 상태의 신뢰도 평가 방법

2.3.1. 초과확률 모델

2.2절의 가정을 적용한 다중 실패 상태를 적용하기 위하여 다음과 같은 모델을 만들 수 있다. i 번째 실패 상태 확률 Pr_i 는 계통의 부하 S 가 i 의 실패 상태 기준 C_i 과 $i+1$ 의 실패 상태 기준 C_{i+1} 사이의 확률로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Pr_i &= \Pr(C_i < S < C_{i+1}) \\ &= \int_{C_i}^{C_{i+1}} f(z)dz \\ &= F(C_{i+1}) - F(C_i) \end{aligned} \quad (5)$$

각 상태간의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Pr_0 &= \Pr(S < C_1) \\ Pr_1 &= \Pr(C_1 < S < C_2) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ Pr_N &= \Pr(C_N < S) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 C_i 는 $1 \leq i \leq N$ 인 모든 i 에 대한 실패 상태 기준이다.

만일 계통의 부하가 최소 기준인 C_1 을 초과하는 경우는 계통이 성능 열화 또는 실패의 한 상태에 있다고 볼 수 있다. 계통의 신뢰도 즉, 계통이 정상 상태에 있는 경우의 확률 Pr_R 은 계통의 성능 열화가 발생하지 않은 상태 즉, 수식 (6)의 Pr_0 로 정의할 수 있다. 계통 신뢰도는 계통 실패의 모든 경우를 제외한 경우에 해당한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Pr_R = Pr_0 = 1 - \sum_{i=1}^N Pr_i \quad (7)$$

2.3.2. SSI 모델

SSI 모델 방법에 있어서 초과 확률 모델 방법과의 기본적인 차이는 실패 상태 기준을 하나의 값으로 정의하는 것이 아니라 확률변수로 취급하는 것이다.

다중 실패 상태를 적용하기 위해서는 각 실패 상태에 대한 내성 분포를 찾아야 한다. 2.2 절의 가정을 적용하면 각 실패 상태 함수는 다음과 같은 분포를 갖는 것으로 정의할 수 있다.

먼저 각 실패 상태를 나타내는 특성 변수 z 가 있고, $1 \leq i \leq N$ 인 모든 i 의 실패 상태를 나타내는 내성에 대한 확률변수를 $R_i(z)$ 라 할 수 있다. 또한, 실패 상태 i 를 발생 순서에 따라 순차적으로 나열할 수 있다면, 모든 $j > i$ 에 대하여 j 의 실패 상태는 i 의 실패 상태가 발생한 후 발생한다고 기술할 수 있다. i 실패 상태에 대한 실패 확률 $Pr_i(z)$ 는 특정 부하 z 에 대하여 각각의 실패 상태가 배타적으로 발생할 확률 $G_i(z)$ 의 결합으로 정의할 수 있다. 즉,

$$Pr_i(z) = G_i(z) \prod_{j>i}^N [1 - G_j(z)] \quad (8)$$

여기서 $G_i(z) = \int_{-\infty}^z g_i(\tau) d\tau$ 는 모든 실패 상태 i 에 대한 내성 확률변수 $R_i(z)$ 의 누적분포함수이고, g_i 는 확률밀도함수이다. 이때 주어진 부하 z 에 대한 총 실패 확률 $Pr(z)$ 는 다음 수식과 같이 정의할 수 있다.

$$Pr(z) = \sum_{i=1}^n Pr_i(z) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - G_i(z)] \quad (9)$$

수식 (9)를 이용하면, 부하 확률밀도함수 f 가 주어진 조건에서 i 번째 실패 상태 확률 Pr_i 은 수식 (2)로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Pr_i = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) Pr_i(z) dz = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) G_i(z) \prod_{j>i}^N [1 - G_j(z)] dz \quad (10)$$

또한 초과 확률 모델과 유사하게 대상의 신뢰도 Pr_R 즉, 실패 상태가 아닌 경우의 확률은 모든 실패 상태의 경우를 제외한 경우에 해당한다. 이는 다른 말로 수식 (10)의 총 실패 확률 $Pr(z)$ 를 이용하여 계통 신뢰도 Pr_R 을 계산할 수 있다.

$$Pr_i = Pr(S < \forall R_i, 1 < i < N) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(z) Pr(z) dz = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \sum_{i=1}^N Pr_i(z) dz = 1 - \sum_{i=1}^N Pr_i \quad (11)$$

다중 실패 상태의 SSI 모델의 신뢰도는 초과 확률 모델의 신뢰도 수식 (7)과 일치한다.

2.1.3. 초과확률 모델과 SSI 모델의 관계

단일 실패 기준 모델에서와 마찬가지로 다중 실패 상태를 적용한 경우에도 초과 확률 모델은 SSI 모델의 하나의 유형으로 파악할 수 있다. 이는 초과 확률 모델에 적용되는 각 실패 상태 기준 C_i 을 Dirac delta $\delta(C_i)$ 로 정의하면 가능하다. 각 실패 상태에 대한 누적분포함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Pr_i(z) = G_i(z) \prod_{j>i}^N [1 - G_j(z)] = H_i(C_i) \prod_{j>i}^N [1 - H_j(z)] \quad (12)$$

여기서 $H_i(C_i)$ 는 unit step 함수로 $H_i(C_i) = H(z - C_i)$ 이다.

부하 확률밀도함수 f 가 주어진 조건에서 i 번째 실패 상태 확률 Pr_i 은 수식 (5)과 수식 (12)을 이용하여 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Pr_i &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z)Pr_i(z)dz & (13) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z)H_i(z)\prod_{j>i}^N [1-H_j(z)]dz \\
 &= \int_{C_i}^{C_{i+1}} f(z)dz = F(C_{i+1}) - F(C_i)
 \end{aligned}$$

Dirac delta를 적용한 SSI 모델은 초과 확률 모델에서 유도한 각 실패 상태 확률과 일치한다. 또한 SSI 모델에서의 계통 신뢰도 Pr_R 도 유사하게 유도됨을 확인할 수 있다.

이상의 유도 과정을 통해서 본 연구에서 제시한 기본 가정을 적용할 경우 다중 실패 상태에 대한 초과 확률 모델과 SSI 모델이 동일한 개념적 접근이 가능한 강건한 형태를 가짐을 확인할 수 있다.

3. 타당성 평가

3.1. 예제

원자력시스템의 사고 발생시 방사성 물질의 방출 특성은 다양한 물리적 환경적 변수에 의해서 결정된다. 원자력시스템의 방사성 물질의 방출 특성은 일반적으로 핵연료의 특성에 따른다. 특히, 핵연료의 방사성 물질의 방출 특성은 핵연료의 온도에 일치적으로 의존한다. VHTR의 경우 핵연료의 온도에 따른(노심 용융 등) 변형이 발생하지 않아서 핵연료의 온도에 따라 방사성 물질의 방출 특성을 모델할 수 있다. 이는 VHTR의 고유한 방사선 안전 특성에 기인한다. 참고문헌 3의 부록 A에 VHTR의 특성 자료에 대한 요약을 참조할 필요가 있다.

원자력시스템에 설치된 공학적 안전 설비의 일차적 임무는 다양한 사고 상황 하에서 원자력시스템의 안전성을 보장하는 것으로 이는 방사성 물질의 방출을 방지하는 것이다. 따라서 예제에서 고려하는 VHTR의 피동 안전 계통의 성능은 기본적으로 방사성 물질의 방출 특성을 기초로 평가되어야 하며, 이는 VHTR의 핵연료 온도 특성을 동 계통의 성능 평가를 위한 핵심 평가 요소로 취급하는 이유이다. 즉, VHTR의 피동 안전 계통의 신뢰도 평가는 핵연료 온도 특성을 기반으로 수행하는 것이 가능하다³⁾.

이 경우 각 피동 안전 계통의 비정상 상태는 방사성 물질의 방출 수준에 따라 분류할 수 있다. 또한 비정상 상태들 간에는 방사성 물질의 방출 수준에 따라 방출 수준이 높은 경우는 낮은 경우의

상태를 초과할 때만 발생한다. 따라서 방출 수준이 낮은 상태에서 방출 수준이 높은 상태로 순차적으로 발생한다고 볼 수 있다.

예제는 VHTR 피동안전계통인 RCCS(Reactor Cavity Cooling System)이다. RCCS 실패 상태의 추정을 위한 임계 변수는 VHTR의 핵연료 온도로 가정하였다. 실제 평가에서는 실패 상태를 나눌 수 있는 타당성이 있어야 한다. 그러나 본 연구는 제시한 모델 방법에 대한 타당성을 검토하는 것이 주안점이기 때문에 각 모델에 대한 각 실패 상태의 기준은 임의로 설정하였다.

RCCS의 부하 확률분포는 특정 사고경위 하에서 최대 핵연료 온도의 확률분포로 참고문헌 3에서 분석한 다음과 같은 정상분포를 적용하였다³⁾.

$$Pr(z) = N(1405.55^\circ\text{C}, 55.98) \quad (14)$$

타당성 평가에서 임의 가정된 각 실패 상태에 대한 기준은 Table 1과 같다. 예제에서는 다중 실패를 고려하는 경우 2개의 실패 상태(즉, 소량 방사성 물질 방출 상태와 대량 방사성 물질의 방출 상태)가 있다고 가정하였다.

- 첫 번째 실패 상태 기준은 소량 누출 기준
- 두 번째 실패 상태 기준은 대량 누출 기준

타당성 평가에서는 Table 1의 예제 기준을 적용하였다. SSI 모델을 평가하기 위해서는 내성 분포에 대한 특정화 작업이 선행되어야 한다. VHTR은 현재 연구 개발 중인 원자력시스템으로 적용하기 적합한 내성 분포에 대한 논의는 아직 미미한 실정이다. 내성 분포의 적합성에 대해서는 참고문헌 3에서 정상분포와 감마분포의 특성 비교를 수행하였다. 본 예제는 순차적 다중 실패 상태의 적용 타당성을 보이는 것으로 특정 분포로 한정하지 않았다. 내성 분포 기준을 결정하는 것은 또다른 주제로 본 논문에서 이에 대한 내용을 다루는 것이 무리가 있다.

Table 1. An Example of System Failure Criteria for Feasibility

Failure Criterion		1 st Criterion	2 nd Criterion
EP Model		$T_S = T_{S1} = 1,600^\circ\text{C}$	$T_{S2} = 1,700^\circ\text{C}$
SSI Model		$\Gamma(r - T_{S1}; k, \theta)$	$\Gamma(r - T_{S2}; k, \theta)$
Meaning of Criteria	Single Failure Approach	System Failure	Not Applicable
	Multiple Failure Approach	Small Release of Radioactive Materials	Large Release of Radioactive Materials

내성 분포는 감마 분포 $\Gamma(r - T_S; k, \theta)$ 를 적용하였지만 특정 분포로 한정하지 않고 k, θ 값에 따라 몇 가지 유형의 민감도 분석을 수행하였다. 적용한 값은 $k=2, 3$ and $\theta=200, 400, 600$ 이다.

3.2. 실패 상태 모델

3.2.1. 초과 확률 모델: 단일 실패 상태

단일 실패 기준의 경우, RCCS의 실패 확률은 수식 (1)를 적용하여 평가할 수 있다. 이 경우는 RCCS의 성능 분포로 수식 (14)의 최대 핵연료온도 확률 분포를 적용하고, 실패기준으로 Table 1의 $T_S = 1,600^\circ\text{C}$ 를 적용하면 실패 확률 $\text{Pr}_F = \text{Pr}(S > T_S)$ 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\text{Pr}_F = \int_{1,600^\circ\text{C}}^{\infty} f_N(1405.55^\circ\text{C}, 55.98) d_z = 1.58E - 04$$

만일 예제에 적용 경우가 타당하다면 이 결과는 VHTR의 안전성을 보장할 정도의 충분히 낮은 수준의 RCCS 실패 확률이다.

3.2.2. 초과 확률 모델: 다중 실패 상태

두개의 실패 상태 기준을 적용할 경우, RCCS의 상태는 정상, 실패 1, 실패 2 등 세 개의 상태로 나누어진다. 단일 실패와 유사하게 RCCS의 동일 성능 분포 함수에 Table 1의 각 실패 기준을 적용하면, 다음과 같은 각 실패 상태의 확률을 얻을 수 있다.

- 방사성 물질 소량 누출 확률:
 $\text{Pr}_{S1} = \text{Pr}(T_{S1} < S < T_{S2}) = 1.58E - 04$
- 방사성 물질 대량 누출 확률:
 $\text{Pr}_{S2} = \text{Pr}(S > T_{S2}) = 2.45E - 08$

한 가지 주목할 점은 2번째 실패 기준인 대량 누출의 확률은 첫 번째 실패 기준인 소량 누출의 확률에 비해서도 매우 낮은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 적용된 부하 분포인 정상 분포의 특성상 중심 값으로부터 멀어질수록 확률밀도가 낮아짐에 기인한다.

Table 2. Sensitivity of Single Failure Mode of SSI Model ($T_S = 1,600^\circ\text{C}$ for $k=2,3$ and $\theta=200, 400, 600$)

$\Gamma(r - T_S; k, \theta)$		Failure probability	
		$T_{S1} = 1,600^\circ\text{C}$	
$k = 2$	$\theta = 200$	5.871E-07	
	$\theta = 400$	1.556E-07	
	$\theta = 600$	7.051E-08	
$k = 3$	$\theta = 200$	3.368E-08	
	$\theta = 400$	4.580E-09	
	$\theta = 600$	1.396E-09	

Table 3. Sensitivity of Multiple Failure Modes of SSI Model ($T_S = 1,600 \& 1,700^\circ\text{C}$ for $k=2,3$ and $\theta=200, 400, 600$)

$\Gamma(r - T_S; k, \theta)$		Failure probability	
		$T_{S1} = 1,600^\circ\text{C}$	$T_{S1} = 1,700^\circ\text{C}$
$k = 2$	$\theta = 200$	5.871E-07	4.754E-11
	$\theta = 400$	1.556E-07	1.241E-11
	$\theta = 600$	7.051E-08	5.595E-12
$k = 3$	$\theta = 200$	3.368E-08	2.021E-12
	$\theta = 400$	4.580E-09	2.691E-13
	$\theta = 600$	1.396E-09	8.145E-14

3.2.3. SSI 모델: 단일 실패 상태

단일 실패 상태 기준을 확률 분포로 적용하기 위해서는 RCCS의 계통 실패 기준을 확률 분포로 나타낼 수 있어야 한다. 본 논문에서는 Table 1의 감마 분포를 적용하였다. 각 $k=2, 3$ and $\theta=200, 400, 600$ 에 대한 민감도 분석 결과는 Table 2에 있다.

3.2.4. SSI 모델: 다중 실패 상태

두 가지 확률 분포를 각 실패 상태에 적용하기 위해서는 앞에서 논의한 바와 같이 각 상태 간의 관계를 설정할 수 있어야 한다. 다중 실패 상태의 경우도 단일 실패와 유사하게 $k=2, 3$ and $\theta=200, 400, 600$ 에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과는 Table 3에 나타내었다.

SSI 모델을 적용할 경우 초과 확률 모델에 비하여 낮은 값으로 평가됨을 확인할 수 있다. 이는 초과 확률 모델이 SSI 모델에 비하여 보수적인 평가 모델임을 반증한다. 아울러 내성 확률 분포를 정확하게 평가할 수 있다면 SSI 모델은 정확한 평가가 가능하다. 그러나 내성 확률 분포를 평가하는 것은 매우 어려운 문제로 또 다른 주제임으로 본 연구에서는 다루지 않았다.

5. 결론 및 논의사항

실패 모드 간에 순차적 관계를 갖는 다중 실패 모드가 존재하는 대상의 신뢰도 평가 방법에 대한 고찰을 시도하였다. 특히, 상호 배타적인 각 실패 모드를 결정하는 변수가 동일하고, 순차적으로 발생한다는 가정 하에 각 실패 모드의 확률, 즉 실패 확률을 평가하는 방법을 제안하였다.

이러한 평가가 요구되는 예제를 제시하고, 순차적 다중 실패 상태의 신뢰도 평가 방법의 타당성을 검토하였다. 예제는 미래 원자력시스템인 VHTR의 피동 안전 계통의 신뢰도 평가이다. 피동 안전

계통의 신뢰도 평가는 VHTR의 안전성 검증뿐만 아니라 PSA를 수행하기 위한 핵심 요소이다. VHTR은 방사선 안전 특성으로 인하여 관련 안전 계통의 성공과 실패를 분명한 형태로 정의하기 어렵기 때문에 본 제안 방법은 원자력시스템의 안전성을 평가할 수 있는 유용한 방법이다.

예제에서는 VHTR의 종합적 거동 특성을 고려하여 2개의 실패 모드(방사성 물질 소량 누출/대량 누출)의 경우를 고려하여 평가 방법의 타당성을 고찰하였다. 본 방법은 실제적인 평가에서 다중 실패 모드가 있는 경우에도 충분히 확장 가능할 것으로 판단된다. 본 고찰을 통해서 제안 방법이 VHTR 확률론적안전성평가(PSA)를 수행하는 데 있어 VHTR의 불리한 특성을 감안한 유용한 방법임을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구개발기금을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) K. Ahn and J. Yang, "On the plant-specific impact of different pressurization rates in the estimation of containment failure mode probabilities", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 84, pp. 129~139, 2004.
- 2) Jonghwa Chang et al, "A Study of a nuclear hydrogen production demonstration plant", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 2, 2007.
- 3) S. Han and J. Yang, "A quantitative evaluation of reliability of passive systems within probabilistic safety assessment framework for VHTR", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 37, No. 3, pp. 345~358, 2010.
- 4) S. Han and J. Yang, "A study on multiple failure states criteria for assessing reliability of passive systems for innovative reactor", PSAM10, Seattle, Washington, USA, 7-11 June, 2010.
- 5) L. Burgazzi, "Reliability evaluation of passive system through functional reliability assessment", *Nuclear Technology*, Vol. 144, pp. 145~151, 2003.
- 6) L. Burgazzi, "State of the art in reliability of thermal-hydraulic passive systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, No. 5, pp. 671~675, 2007.