

유효POD를 이용한 증기발생기 전열관에서의 물리적 결함 수 추정

이재봉 · 박재학 · 이성호* · 김홍덕* · 정한섭*
충북대학교 안전공학과 · *한국전력공사 전력연구원

1. 서론

원자력발전소에서는 증기발생기 전열관에 대하여 가동 중 검사에 의해 검출되는 결함의 크기 및 수를 기반으로 보전 및 운전계획을 수립하고 있다. 그러므로 가동 중 검사에서 시행되는 비파괴검사 결과는 증기발생기 전열관의 건전성 평가에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 그러나 비파괴 검사 시스템의 불확실성 때문에 검출된 결함의 크기와 수는 실제 물리적으로 존재하는 것과 차이가 있을 수 있다. 현재 원자력발전소에서는 비파괴 검사에 대한 불확실성을 보수적인 안전율을 적용하여 보정하고 있다¹⁾. 만약 과도한 안전율의 적용 대신에 확률적인 방법을 도입한다면 보다 신뢰할 수 있는 건전성 평가를 수행함과 동시에 증기발생기 전열관의 보전에 드는 비용을 줄일 수 있을 것이다.

비파괴 검사에 대한 불확실성은 POD(probability of detection)의 값으로 확률적으로 정량화 될 수 있다. POD를 이용하여 비파괴 검사 자료로부터 실제 물리적으로 존재하는 결함의 수를 예측하는 연구가 최근에 시도되었다²⁾. 그러나 실제 원자력발전소의 가동 중 검사 자료에 적용하는 것에는 방법상의 한계를 보이고 있다.

본 연구에서는 원자력발전소의 가동 중 비파괴 검사에서 측정된 결함 수로부터 실제 물리적으로 존재할 수 있는 결함의 수를 예측할 수 있는 방법을 개발하였다. 본 연구에서의 개발된 방법은 기존의 연구²⁾에서 적용된 방법의 한계를 극복하였으며, 원자력발전소의 가동 중 검사 자료에 직접 적용할 수 있도록 개발되었다.

2. 본론

2.1 POD(probability of detection)

비파괴 검사에서 검출된 결함은 실제 증기발생기 전열관에 물리적으로 존재하는 결함과 차이를 보인다. 비파괴 검사 시스템이 완벽하게 모든 결함을 검출하지 못하기 때문이다. 비파괴 검사에 대한 불확실성은 비파괴 검사 장비와 검사자 그리고 결함의 위치 등 여러 원인에 의해 발생할 수 있으며, 결함 검출에 대한 불확실성(detection uncertainty)과 크기평가에 대한 불확실성(size uncertainty)으로 나눌 수 있다³⁾.

일반적으로 결함 검출에 대한 불확실성은 결함 크기의 함수로 나타나는 POD(probability of detection)함수를 사용하여 정량화하며, 결함 크기평가에 대한 불확실성은 비파괴 검사와 파괴 검사를 병행하는 실험에 의한 보정관계식을 이용하여 정량화

할 수 있다. 결함 크기평가에 대한 불확실성은 보정관계식을 이용하여 쉽게 보정 할 수 있으나, POD를 이용한 검출된 결함 수를 보정하는 기존의 방법은 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

일반적으로 POD는 결함 크기의 함수로 나타내며 식(1)의 logistic function 또는 식(2)의 log-normal function으로 나타낸다³⁾.

$$POD(a) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 \ln a)}{1 - \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln a)} \quad (1)$$

$$POD(a) = \left\{ 1 + \exp - \left[\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (2)$$

여기서 β_0 , β_1 , μ , σ 는 각각 식(1)와 식(2)에서의 parameter이며 이들 사이에는 식(3)의 관계가 성립한다.

$$\mu = -\beta_0 / \beta_1 \quad \sigma = \pi / (\beta_1 \sqrt{3}) \quad (3)$$

물리적 결함(physical flaw)은 실제 전열관에 존재할 것이라고 추정된 결함으로서 비파괴검사로부터 검출된 결함과 미발견 결함(undetected flaw)을 포함한 결함을 말한다. 비파괴검사의 결함 검출능력(POD)이 완전하지 못하기 때문에 비파괴검사로 검출된 결함 이외에 다수의 결함이 측정되지 않고 전열관에 실제 존재할 것이라고 추정하는 것이다. 미발견 결함의 계산방법은 POD의 정의로부터 쉽게 알 수 있다.

$$POD(a) = \frac{\text{The number of detected flaw}}{\text{The number of physical flaw}} \quad (4)$$

$$\text{The number of physical flaw} = \frac{\text{The number of detected flaw}}{POD(a)} \quad (5)$$

식(3)에서 결함 크기의 함수인 POD의 정의는 전열관에 실제 존재하는 물리적 결함 수와 비파괴검사로 검출된 결함 수의 비로 나타내고 있다. 즉 결함이 검출될 확률이 된다. 그러므로 이론적으로 전열관에 실제 존재하는 물리적 결함의 수는 식(5)에서와 같이 측정된 결함의 수를 POD로 나누어 주게 되면 쉽게 계산 될 수 있다. 그러나 이는 하나의 결함에 대하여 한번의 측정을 하였을 경우이며, 만약 균열이 성장하고 어떤 임의의 결함에 대하여 여러 번의 비파괴검사가 수행 되었다면 물리적 결함의 수를 계산하는 방법은

매우 복잡해지며 많은 경우에 있어서는 이론적인 방법이 불가능하게 된다.

2.2 반복되는 가동 중 검사에서의 물리적 균열 수 계산

반복되는 가동 중 검사 자료에 POD를 적용하는데 있어서 각 주기에 걸쳐 검사된 균열의 수를 단순히 POD로 나누어 주게 되면 실지 존재하는 균열 수 보다 많게 추정하게 된다.

여러 번의 가동 중 검사에서 균열이 한번도 발견되지 않을 확률을 계산한 다음 이를 이용하여 최소 한번 이상비파괴검사에 측정될 확률을 계산하면 이 값이 여러 횟수의 가동 중 검사를 고려한 POD가 된다. n회의 가동 중 검사에서 균열이 한번도 발견되지 않을 확률을 계산하는 과정을 binomial 함수를 이용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(x; n, p) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (6)$$

식(6)에서 n은 검사 횟수가 되며, x는 검출된 횟수가 된다. 여기서 검출된 횟수는 0이 되며, p는 POD, q는 1-POD의 값을 의미한다. 이 값들을 대입하게 되면 식(6)은 간단히 표현될 수 있으며, 이를 이용하여 n회의 가동 중 검사에서 결함이 최소 한번 이상 측정될 확률을 구하는 식을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$1 - \left(\frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \right) = 1 - (1-p)^n \quad (7)$$

식(7)을 이용하면 이론적으로는 반복되는 가동 중 검사에서 검출된 결함자료로부터 물리적 결함 수를 계산할 수 있다. 그러나 원자력 발전소의 실제자료에 식(7)을 적용하는 데는 중요한 문제가 발생하게 된다. 가동 중 검사가 반복될 때 마다 결함이 성장하며 결함크기의 함수로 표현되는 POD값이 바뀌기 때문이다. 모든 결함이 동일한 성장속도를 나타내지 않기 때문에 동일한 크기로 동일한 시점에 생성된 결함이라도 가동 중 검사에서 나타나는 결함의 크기 및 이에 해당하는 POD가 다를 수 있다. 더욱이 결함이 생성되는 시점도 알 수가 없다.

식(7)을 적용하기 위해서는 결함이 언제 발생하였으며, 성장과정에서 몇 번의 가동 중 검사를 거쳤는지를 알아야 한다. 그러나 정확한 결함성장 내역을 밝히는 것은 거의 불가능에 가깝다.

2.3 유효POD(effective probability of detection)

정확한 결함 성장내역은 파악하기 어렵지만, 이를 시뮬레이션 하여 추정하는 것은 가능

하다. 임의의 주기에 발견된 결함은 적절한 결함성장속도를 적용하여 각각의 가동 중 검사에 해당하는 시간에서의 결함크기를 시뮬레이션 할 수 있으며, 이때의 POD를 도출 할 수 있다.

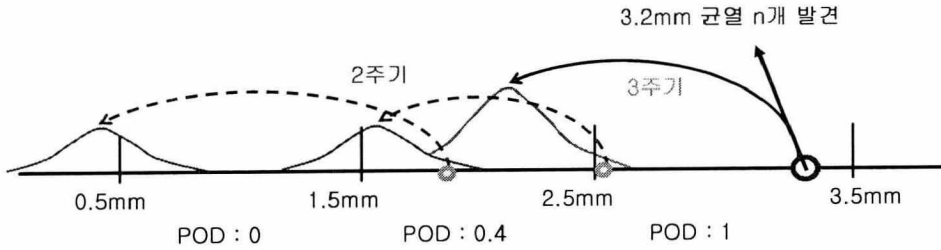


Fig. 1 The schematic diagram of a statistical simulation for estimating flaw growth history.

Fig. 1은 결함의 성장내역을 역으로 추적하는 시뮬레이션의 개념도이다. 3주기 가동 중 검사에서 3.2mm 크기의 결함 n개가 검출되었다고 가정한다. 이 결함들은 2주기와 1주기 가동 중 검사에서는 발견되지 않은 결함이다. 이 결함들이 이전 주기에서의 각각의 결함 크기를 확실적인 값을 갖는 결함성장속도를 이용하여 계산 할 수 있다.

결함성장속도는 원자력발전소 가동 중 검사에서 측정된 자료를 이용하여 계산하였다.

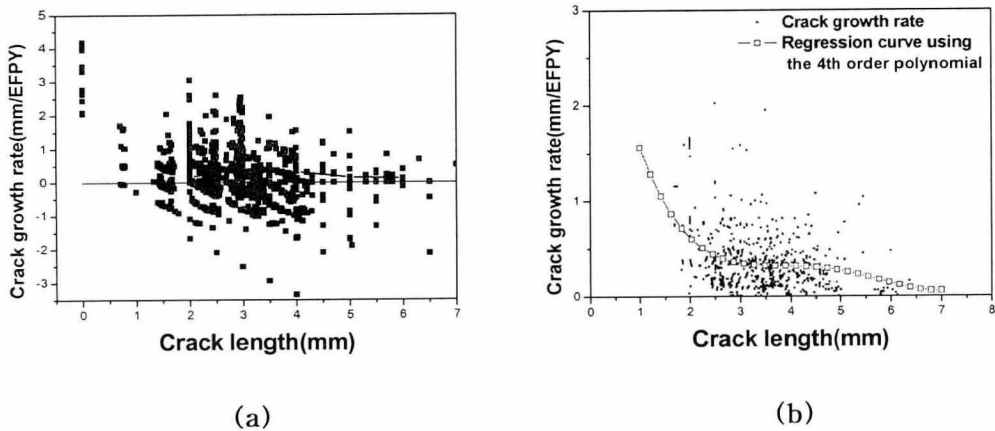


Fig. 2 The crack growth rate data and regression with the 4th order polynomial.

Fig. 2(a)는 Model F 증기발생기를 운용하는 국내 원자력발전소에서의 12주기 동안의 가동 중 검사 자료를 이용하여 결함성장속도를 계산하여 균열길이에 대해 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 물리적으로는 발생할 수 없는 (-)의 결함성장속도가 나타나는 것을 볼 수

있다. 이는 크기평가에 대한 불확실성 때문이다. 각 주기별로 나타나는 결함의 크기를 curve fitting 하여 기울기를 결함성장속도로 나타내면 결함성장에 대한 전체적인 경향을 도출할 수 있다. Fig. 2(b)는 이러한 방법으로 계산된 결함성장속도를 결함크기에 대하여 도시한 것이다. 결함이 성장함에 따라 결함성장속도가 감소하는 관계를 확인 할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = Ca^\lambda z \quad (8)$$

Fig. 2(b)에서 나타나는 결함성장속도와 결함크기의 관계를 기존의 연구결과와 같이 식 (8)로 나타낼 수 있다¹⁾. 식(8)에서 a는 결함크기, C와 λ 는 각각 상수를 나타내며, z는 랜덤 변수이다. z에 의해 결함성장속도를 확률적으로 나타낼 수 있게 되며, Fig. 1에서 나타내는 시뮬레이션에 적용하면 결함의 성장내역을 확률적으로 파악할 수 있다. 시뮬레이션을 1000~10000회 반복함으로써 검사횟수를 고려한 POD를 기대값으로 추정할 수 있다. 이 값을 유효POD(effective POD)로 정의하며, 이를 식(5)에 대입하면 물리적 결함 수를 쉽게 구할 수 있다.

3. 유효POD 시뮬레이션 결과

가동 중 검사에서 측정이 예측되는 결함 크기에 대하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 유효POD를 계산하였다. 발생 결함 크기는 0.5mm ~ 4.0mm의 구간에 0.1mm 간격으로 가정하였으며, 이들 결함이 1주기부터 12주기 사이에 처음 발견 되었다고 가정하고 유효POD를 계산하였다. 결함성장속도와 원자력발전소 운전내역(가동 중 검사시의 EFPY)은 결함성장속도를 계산한 자료와 동일한 것을 사용하였다. Table 2는 시뮬레이션에 사용된 구간별 POD이다. 증기발생기 전열관의 가동 중 검사에서 발생할 수 있는 모든 현상을 고려하기 위해 9주기와 10주기 사이에 검사장비의 성능향상으로 인한 POD변화도 고려하였다.

Table 2 The POD value corresponding to the flaw size in each ISI.

| | | POD | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|------|
| | | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 2.5~3.5 | 3.5< |
| ISI | size | | | | |
| | 4 ~ 9 | 0 | 0.4 | 0.8 | 1 |
| | 10 ~ 12 | 0.4 | 0.8 | 1 | 1 |

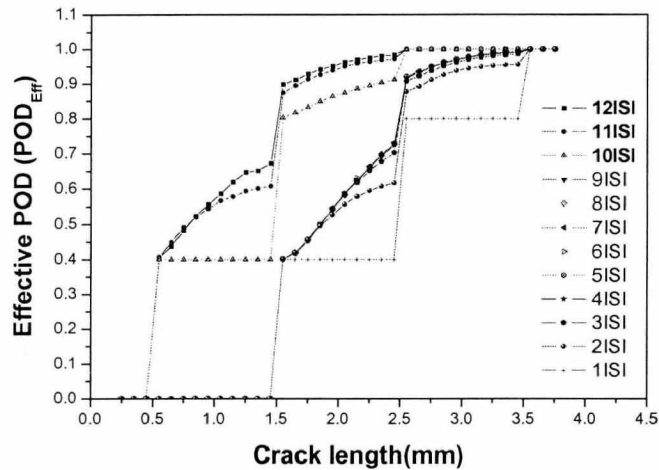


Fig. 3 The simulation results of effective POD.

Fig. 3은 시뮬레이션 결과로 구한 결함크기에 따라 유효POD를 나타낸 것이다. 시뮬레이션은 하나의 균열에 대하여 1000가지의 경우를 계산하였으며, Fig. 3에 도시한 것은 이 1000가지 경우에 대한 기대값이다.

주기가 반복됨에 따라 유효POD가 커지는 것을 확인 할 수 있으며, 처음 주기의 POD와 차이가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 9주기와 10주기에서 검사장비의 변화에 따른 유효POD의 변화도 확인 할 수 있다.

참고문헌

- 1) Han-Sub Chung, Gi-Tae Kim, and Hong Deok Kim, A Study on the Integrity Assessment of Detected S/G Tube, Korea Electric Power Research Institute, 2000.
- 2) Davis, J., ANL/CANTIA: A Computer Code for Steam Generator Integrity Assessments, Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6786, 2001.
- 3) Berens, A.P., NDE reliability data analysis, Metals Handbook, 9th ed., Vol.17, pp.689-701, 1989.