

# 유효 POD를 이용한 물리적 결함 수의 추정

이재봉 · 박재학<sup>†</sup> · 김홍덕<sup>\*</sup> · 정한섭<sup>\*</sup>

충북대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>한전전력연구원

(2006. 5. 22. 접수 / 2006. 7. 27. 채택)

## Estimation of the Number of Physical Flaws Using Effective POD

Jae Bong Lee · Jai Hak Park<sup>†</sup> · Hong-Deok Kim<sup>\*</sup> · Han-Sub Chung<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

<sup>\*</sup>Korea Electrical Power Research Institute

(Received May 22, 2006 / Accepted July 27, 2006)

**Abstract :** The strategies of maintenance and operation are usually established based on the number of flaws and their size distribution obtained from nondestructive inspection in order to preserve safety of the plant. But non destructive inspection results are different from the physical flaws which really exist in the equipments. In case of a single inspection, it is easy to estimate the number of physical flaws using the POD curve. However, we may be faced with some difficulties in obtaining the number of physical flaws from the periodic in-service non destructive inspection data. In this study a simple method for estimating the number of physical flaws from periodic in-service nondestructive inspection data was proposed. In order to obtain the flaw growth history, the flaw growth was simulated using the Monte Carlo method and the flaw size and the corresponding POD value were obtained for each flaw at each periodic inspection time. The flaw growth rate used in the simulation was statistically calculated from the in-service inspection data. By repeating the simulation numerous flaw growth data could be generated and the effective POD curve was obtained as a function of flaw size. From the effective POD curve the number of physical flaws was obtained. The usefulness and convenience of the proposed method was evaluated from several applications and satisfactory results were obtained.

**Key Words :** POD(probability of detection), effective POD, steam generator tube, structural integrity

### 1. 서 론

설비산업분야에서는 비파괴검사로부터 검출된 결함의 크기 및 수를 기반으로 설비의 보전 및 운전 계획을 세우고 있다. 그러므로 비파괴검사의 결과는 설비의 안전성확보에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 그러나 비파괴검사 시스템의 불확실성으로 인하여 검출된 결함의 크기와 수는 실제 물리적으로 존재하는 것과 차이가 있을 수 있다.<sup>1,2)</sup>

비파괴검사에 대한 불확실성은 검출에 대한 불확실성(uncertainty of detection)과 크기 평가에 대한 불확실성(uncertainty of size)으로 나눌 수 있다. 크기 평가에 대한 불확실성은 비파괴검사로 측정된 결함의 크기와 파괴실험 후 측정된 실제 결함 크기의

관계식을 이용하여 평가될 수 있으며, 이를 이용하여 비파괴검사로부터 측정된 결함의 크기를 실제 결함의 크기로 보정 또는 추정할 수 있다. 검출에 대한 불확실성은 비파괴검사와 파괴검사를 병행하여 평가할 수 있으나, 결함 크기에 대한 불확실성의 평가보다 절차와 비용에서 보다 어려운 점이 많다. 또한 비파괴검사로 검출된 결함자료를 이용하여 미검출 결함에 대한 정보를 도출하는 과정은 크기평가의 경우보다 고려해야할 사항들이 많아지게 된다.

일반적으로 비파괴검사의 결함 검출에 대한 불확실성은 POD(probability of detection)의 값으로 확률적으로 정량화한다<sup>3)</sup>. POD를 이용하여 비파괴검사 자료로부터 실제 물리적으로 존재하는 결함의 수를 예측하는 연구가 최근에 시도되었다<sup>4)</sup>. 이 방법은 결함에 대하여 한 번의 검사가 이루어졌을 때 사용할 수 있는 방법이다.

결함은 비파괴검사 장비가 검출할 수 있는 최소

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jhpark@chungbuk.ac.kr

크기(minimum detectable size)에 도달하였을 때 일정 확률을 가지고 검출된다. 일반적으로 결함의 크기가 커질수록 검출확률도 증가한다. 그러므로 하나의 결함에 대하여 시간의 간격을 두고 여러 번 검사가 수행될 경우 몇몇의 결함은 검출되고 나머지 결함은 다음 검사까지 성장한 후 일정확률을 가지고 검출되게 된다. 그러므로 시간의 간격을 두고 여러 번 반복되는 비파괴검사에서의 검출에 대한 불확실성을 보정하기 위해서는 이러한 사항들을 고려해 주어야 한다. 반복된 비파괴검사에서의 검출에 대한 불확실성을 실험적으로 평가하는 연구가 EPRI에서 진행된 바 있다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 가동중검사(in service inspection, ISI)와 같은 일정시간 간격을 두고 반복되는 비파괴 검사에서 검출된 결함 수로부터 물리적으로 실제할 수 있는 결함의 수를 Monte Carlo 방법을 이용하여 예측하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 방법과 기존의 방법을 국내 원자력발전소 증기발생기 전열관의 가동중검사 자료에 각각 적용하여 결과를 비교하였다.

## 2. 물리적 결함 수의 추정

### 2.1. POD

비파괴검사로부터 검출된 결함은 검사대상에 물리적으로 존재하는 결함과 차이를 보일 수 있다. 비파괴검사 시스템에 대한 불확실성은 비파괴검사에 사용되는 장비와 이를 운용하는 검사자 그리고 결함의 위치 등 여러 원인에 의해 발생할 수 있으며, 결함 검출에 대한 불확실성과 크기평가에 대한 불확실성으로 나눌 수 있다<sup>3)</sup>.

크기 평가에 대한 불확실성은 비파괴검사로 측정된 결함의 크기와 파괴실험 후 실제 측정된 결함 크기의 관계식을 이용하여 평가될 수 있으며, 이를 이용하여 비파괴검사로부터 측정된 결함의 크기를 실제 결함의 크기로 어렵지 않게 보정 또는 추정할 수 있다. 그러나 검출에 대한 불확실성의 경우에는 이보다 고려되어야 할 사항이 많아지게 된다.

일반적으로 결함 검출에 대한 불확실성은 POD 함수를 이용하여 정량화한다. POD는 결함 크기의 함수로 나타내며 식 (1)의 log-logistic 함수 또는 식 (2)의 log-normal 함수가 널리 사용되고 있다<sup>1-3)</sup>.

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

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

여기서  $\beta_0, \beta_1, \mu, \sigma$ 는 각각 식 (1)과 식 (2)에서의 변수이며  $a$ 는 결함의 크기이다. 이들 사이에는 식 (3)의 관계가 성립한다.

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

Fig. 1에 일반적인 POD곡선의 형태를 나타내었다. Fig. 1에서 결함크기가 커짐에 따라 결함의 검출확률이 증가하고 있는 경향을 볼 수 있으며, 이로부터 실제 존재하는 결함의 수가 변하지 않아도 비파괴검사로부터 검출된 결함의 수는 POD에 의해 달라질 수 있는 것을 알 수 있다.

비파괴검사의 대상이 되는 실제 존재하는 결함을 물리적 결함(physical flaws)이라고 하자. 물리적 결함은 비파괴검사로부터 검출된 결함(detected flaws)과 미검출 결함(undetected flaws)을 포함한 결함을 의미한다. 미검출 결함에 대한 정보는 파괴실험을 거치지 않고서는 정확한 내용을 알 수는 없으나 POD의 정의로부터 추정이 가능하다.

POD의 정의는 다음의 식 (4)와 같다.

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

식 (4)로부터 물리적 결함의 수는 다음의 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{The number of physical flaws} \\ = \frac{\text{The number of detected flaws}}{POD(a)} \end{aligned} \quad (5)$$

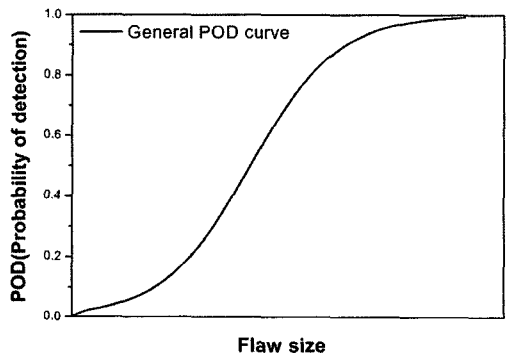


Fig. 1. General shape of POD(a) curve.

식 (4)에서 결함 크기의 함수인 POD의 정의를 물리적 결함의 수에 대한 비파괴검사로 검출된 결함수의 비로 나타내고 있다. 즉 결함이 검출될 확률이 된다. 그러므로 이론적으로 실제 존재하는 물리적 결함의 수는 식 (5)에서와 같이 검출된 결함의 수를 POD로 나누어 주게 되면 쉽게 계산될 수 있다. 그러나 이는 하나의 결함에 대하여 한번의 검사가 수행되었을 경우이며, 만약 결함이 성장하고 어떤 임의의 결함에 대하여 여러 번의 비파괴검사가 수행된다면 물리적 결함의 수를 계산하는 방법은 보다 복잡해지며 고려해야 할 사항들이 늘어나게 된다.

### 2.2. 반복 검사에서의 물리적 균열 수 계산

성장하는 어떤 임의의 결함에 대하여 주기별로 여러 번의 비파괴검사가 수행되는 경우 가동중검사 자료로부터 물리적 결함 수를 추정하기 위해서는 결함이 한번도 발견되지 않을 확률을 이용하여야 한다.

$n$ 회의 가동중검사에서  $x$ 회 결함이 검출될 확률을 계산하는 과정을 binomial 함수를 이용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (6)에서  $n$ 은 검사 횟수가 되며,  $x$ 는 검출된 횟수  $p$ 는 POD 그리고  $q$ 는 1-POD를 의미한다.

식 (6)의 검출횟수,  $x$ 에 0을 대입하게 되면  $n$ 회의 가동중검사에서 결함이 한번도 발견되지 않을 확률이 되며, 1에서 이 확률을 빼주게 되면  $n$ 회의 검사에서 한번이상 검출될 확률이 된다. 식 (7)에  $n$ 회의 검사에서 한번이상 결함이 검출될 확률을 계산할 수 있는 식을 나타내었다. 식 (7)에서 검사가 일정시간의 간격을 두고 이루어질 경우 결함이 성장함에 따라 POD가 달라질 수 있는 상황을 고려하기 위해  $p$ 와  $q$  대신에  $p_i$ 와  $q_i$ 를 사용하였다.

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

식 (7)에서  $p_i$ 와  $q_i$ 는  $i$ 번째 검사에서의 POD와 1-POD를 의미한다.

식 (7)을 이용하여 물리적 결함 수를 계산하는 간단한 예를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서  $i$ 번째 운전주기 동안에 25개의 결함이 생성되었다고 가

Table 1. Calculation procedure of the number of physical flaws in periodic ISI data

25 flaws initiated in the $i$ th cycle			
The number of inspection times	1st	2nd	3rd
Periodic ISI	$i^{\text{th}}$ ISI	$(i+1)^{\text{th}}$ ISI	$(i+2)^{\text{th}}$ ISI
The number of detected flaws	10	7.5	6
Cumulative number of detected flaws	10	17.5	23.5
POD	0.4	0.5	0.8
Probabilistic of miss	$(1-0.4)=0.6$	$0.6 \times (1-0.5)=0.3$	$0.3 \times (1-0.8)=0.06$
Probabilistic of detection	$1-0.6=0.4$	$1-0.3=0.7$	$1-0.06=0.94$
The number of physical flaws	$10/0.4=25$	$17.5/0.7=25$	$23.5/0.94=25$

정하였다. 여기서 결함의 생성은 결함의 크기가 비파괴검사 장비가 검출할 수 있는 최소 크기(minimum detectable size)이상이 되었음을 의미한다. 이들 25개의 결함은 운전기간 동안 성장하게 되며, 각 결함에 대한 POD도 달라진다. 그러나 Table 1에서는 설명을 간편히 하기 위해 각 결함의 성장속도가 모두 동일하다고 가정하였다. 그리고  $i$ 번째 가동중검사에서는 0.4,  $(i+1)$ 번째 가동중검사에서는 0.5 그리고  $(i+2)$ 번째 가동중검사에서는 0.8의 POD가 25개 모든 결함에 적용된다고 가정하였다.

$i$ 번째 가동중검사에서 POD가 0.4이므로 25개의 결함 중 검출될 결함의 수는 10개가 된다. 그리고 미검출 결함은 15개가 되며, 이들 미검출 결함들은 해당 POD에 따라  $(i+1)$ 번째와  $(i+2)$ 번째 가동중검사에서 검출되게 된다. 그러므로 Table 1에서 각 주기에서의 검출된 결함의 누적된 수는 10, 17.5 그리고 23.5개가 된다. 여기서 소수로 표시되는 결함의 수는 물리적으로 발생할 수 없지만 설명의 편의상 이를 허용하기로 한다.

Table 1에서 식 (7)을 이용하여 결함이 검출되지 않을 확률과 반복검사를 고려한 검출확률을 계산하였다. 계산된 검출확률을 누적된 검출 결함의 수에 적용하여 처음 가정한 25개의 물리적 결함 수가 계산된다.

매주기 운전 중에 새로운 결함이 생성되는 경우에는 각 주기에서 새로 생성된 결함에 대해서 Table 1에서의 계산을 반복하면 된다.

Table 1에서의 예로부터 식 (7)을 이용한 검출확률이 이론적으로 유용함을 알 수 있다. 그러나 현실적으로 식 (7)을 사용하는 데는 중요한 문제가 발생하게 된다. 모든 결함이 동일한 성장속도를 나타내지

않기 때문이다. 동일한 크기로 동일한 시점에 생성된 결함이라도 가동중검사에서 나타나는 결함의 크기 및 이에 해당하는 POD가 다를 수 있다. 더욱이 결함이 생성되는 명확한 시점도 파악하기 어렵다.

식 (7)을 적용하기 위해서는 결함이 언제 생성되었으며, 성장과정에서 몇 번의 가동중검사를 거쳤는지를 알아야 한다.

### 2.3. 유효 POD

매주기 반복되는 가동중검사에서 각각의 결함은 한번 이상의 검사를 거치게 되므로 결함이 검출될 확률은 비파괴검사의 POD와는 다르게 된다. 반복되는 가동중검사에서 결함이 검출될 확률을 “유효 POD(effective POD)”로 나타내면 물리적 결함 수의 계산은 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{The number of physical flaws} \\ & = \frac{\text{The number of detected flaws}}{\text{effective POD}(a)} \end{aligned} \quad (8)$$

$n$ 회 반복된 가동중검사에서 유효 POD를 계산하기 위해서는 성장과정에서 각각의 결함이 몇 번의 가동중검사를 거쳤는지를 알아야 한다.

본 연구에서는 결함의 성장과정을 확률적으로 모사함으로써 일정크기의 결함이 몇 번의 가동중검사를 거치는지 추정하였다.

Fig. 2는 결함성장과정을 확률적으로 모사하는 과정을 나타낸 개략도이다. Fig. 2는 POD가 결함크기의 함수로 나타낼 수 있고, 결함의 성장속도를 확률적으로 나타낼 수 있다는 가정아래 설명된 개략도이다.

Fig. 2에서  $i$ 번째 가동중검사에서 일정 크기의 결함( $a_i$ )이 처음 검출되면 (-)시간의 방향으로 균열성장을 모사함으로써  $i-1$ 번째 가동중검사 때 결함의 크기분포( $a_{i-1}$ )를 확률적으로 추정할 수 있다. 그리고  $i-1$ 번째 가동중검사 때 결함의 크기분포( $a_{i-1}$ )를 이용하여  $i-2$ 번째 가동중검사 때 결함의 크기분포( $a_{i-2}$ )를 추정할 수 있다. 이러한 과정을 반복하면 일정 크기

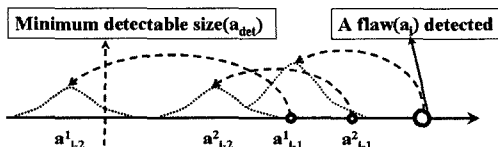


Fig. 2. Schematic diagram of a statistical simulation for estimating crack growth history.

의 결함( $a_i$ )이 비파괴검사 장비의 검출한계에 해당하는 결함의 크기(minimum detectable size,  $a_{det}$ )에 이를 때까지 몇 번의 가동중검사를 거쳤으며 가동중검사 시점에서의 균열길이와 해당 POD를 확률적으로 추정할 수 있다. 또한 이들 값들로부터 해당 균열의 유효 POD를 계산할 수 있다.

### 3. 확률적 균열성장률의 도출

본 연구에서는 Model F 증기발생기를 운용하는 국내 원자력발전소에서의 관관상단 축방향균열에 대한 가동중검사 자료에 대하여 확률적 균열성장속도를 계산하였다.

증기발생기 전열관의 각 주기 가동중검사 자료로부터 균열성장속도를 계산하여 균열크기에 따른 분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 물리적으로는 존재할 수 없는 (-)의 균열성장속도를 볼 수 있다. 이러한 현상은 균열크기결정에서의 비파괴검사불확실성에 기인하고 있으며, 다음과 같은 방법으로 보정할 수 있다.

Fig. 4에 각 주기 가동중검사에서 탐지된 균열의 성장추세를 나타내었다. Fig. 4에서 크기평가의 불확실성에 의해 탐지된 균열의 크기가 증가와 감소를 반복하고 있으나, 전체적인 경향은 증가를 보이고 있다. 균열크기의 전체적인 증가추세를 다항식으로 회귀분석한 후 균열성장속도를 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 4개 이하의 균열 데이터에서는 1차 다항식을 5개 이상의 균열 데이터에서는 2차 다항식을 사용하였다. 계산된 균열성장속도는 대부분 (+)의 성장속도를 보였으나 (-)의 값을 나타낸 소수의 성장속도는 분석대상에서 제외하였다.

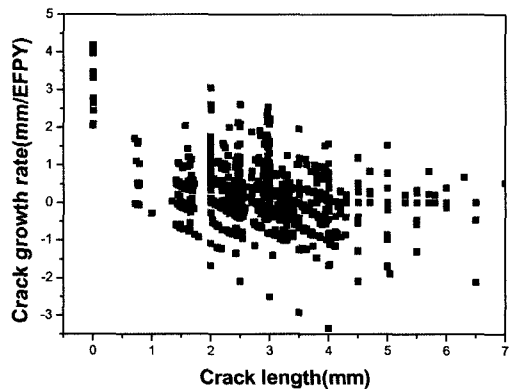


Fig. 3. NDE crack growth rate data.

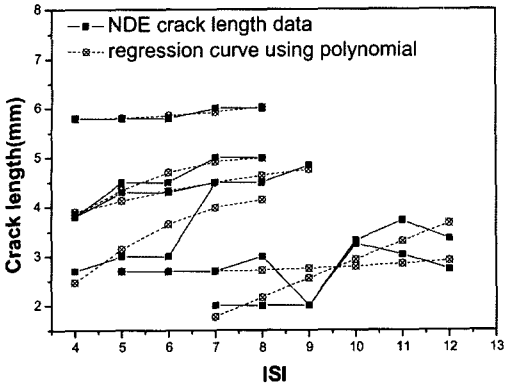


Fig. 4. Regression of crack length data with polynomials.

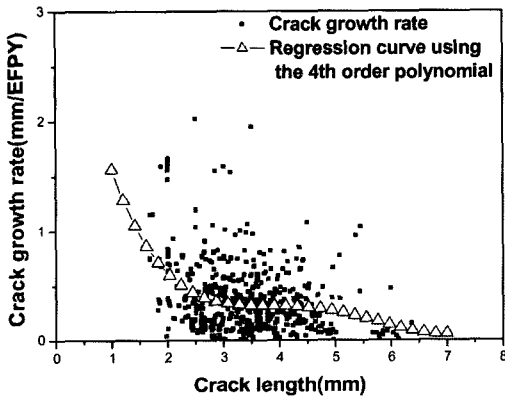


Fig. 5. Crack growth rate data and regression with a polynomial.

균열성장속도와 균열크기의 전체적인 관계를 파악하기 위해 4차 다항식을 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 균열이 성장함에 따라 균열성장속도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

기존의 연구결과에<sup>5,6)</sup> 따르면 응력부식균열에 해당하는 관판상단 축방향균열의 성장속도는 소성변형과 잔류응력에 크게 영향을 받는다. 균열이 성장함에 따라 심하게 소성 변형된 영역 또는 잔류 응력이 큰 영역을 벗어나면서 균열성장속도가 감소하게 되므로 Fig. 5와 같은 결과를 보이게 된다.

Fig. 5에서 나타나는 균열크기와 균열성장속도의 관계를 확률적으로 나타내기 위해 균열성장속도와 균열크기와의 관계를 나타내는 임의의 함수,  $f(a)$ 와 확률변수,  $z$ 를 이용한 식 (9)를 이용하였다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는 균열성장속도와 균열크기의 관계를 나타내는  $f(a)$ 의 함수로서 일반적으로 사용되는  $Ca^\lambda$ 의 식을 이용하였다<sup>7)</sup>. 최종적으로 본 연구에서 확률적 균열성장률을 계산하는데 사용된 것은 식

(10)이다.

$$\frac{da}{dt} = f(a)z \tag{9}$$

$$\frac{da}{dt} = Ca^\lambda z \tag{10}$$

식 (10)의 양변에  $\log$ 를 취하게 되면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 6에 Fig. 5의 양변에  $\log$ 를 취하였을 때의 균열성장률과 균열크기와의 관계를 도시하였다. Fig. 6에서의 자료에 대하여 식 (11)을 이용하여 선형회귀분석을 수행하였으며,  $\log C$ ,  $\lambda$  그리고  $\log z$ 의 값을 구할 수 있었다.

$$\log\left(\frac{da}{dt}\right) = \log C + \lambda \log a + \log z \tag{11}$$

여기서  $\log z$ 의 값은 Fig. 6에 나타낸 각각의 데이터와 식 (11)로부터 계산된 값과의 편차를 나타내며, 평균이 0이고 표준편차가 선형회귀분석에서의 RMSE(root mean square error)값을 갖는 정규분포로 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>.  $\log z$ 의 값을 정규분포를 따르는 확률변수로 나타내어 확률적인 분포를 갖는 균열성장속도를 얻을 수 있다. 식 (11)을 이용한 회귀분석에서 F-test를 수행한 결과 1% 유의수준에서 회귀모델이 유의함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 Fig. 6의 회귀분석으로부터  $C$ 는 1.09126,  $\lambda$ 는 -1.08700 그리고 RMSE는 0.84248로 값을 각각 구하였으며, 이를 식 (10)에 대입하여 균열성장속도를 확률변수로 생성하였다. 이때 균열성장속도의 단위는 mm/EPFY이며, 균열길이의 단위는 mm이다.

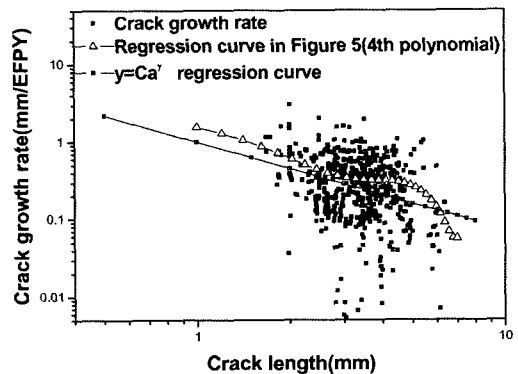


Fig. 6. The regression analysis of crack growth rate.

#### 4. 유효 POD의 계산 및 적용

본 연구에서는 Model F 증기발생기를 운용하는 국내 원자력발전소에서 12주기 동안의 관판상단 축방향균열에 대한 가동중검사 자료에 대하여 유효 POD를 계산하였다.

0.5mm부터 4.0mm까지 1mm간격으로 균열의 크기를 가정하였다. 각각의 균열 크기에 대하여 확률적 성장과정을 Monte Carlo 시뮬레이션하였다. 반복 횟수는 10000회 이며, 전체 결과의 평균값을 유효 POD로 계산하였다. 각각의 확률변수를 발생시키는 데 사용된 방법은 역변환방법과 acceptance-rejection 방법을 이용하였다<sup>9)</sup>.

Table 2에 본 연구에 사용된 각각의 균열 크기에 대한 POD를 나타내었다. 검증된 POD곡선에 대한 자료가 미흡한 관계로 비파괴시험을 수행한 검사자와 전문가의 의견에 따라 Table 2와 같이 POD를 가정하였다. Table 2에서 9주기와 10주기 사이에 POD 변동이 있는 것은 비파괴검사 장비가 바뀌면서 POD가 변하였기 때문이다.

Fig. 7에 Monte Carlo 시뮬레이션으로 계산된 주기별 유효 POD를 나타내었다. Fig. 7에서 1st ISI의 유효 POD 곡선은 일반 POD의 값과 동일한 값을 보이고 있으나 2nd ISI부터는 유효 POD가 일반 POD보다 큰 값을 보이고 있으며, 주기가 거듭됨에 따

Table 2. POD values for each crack length range at each ISI

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

crack size(mm)

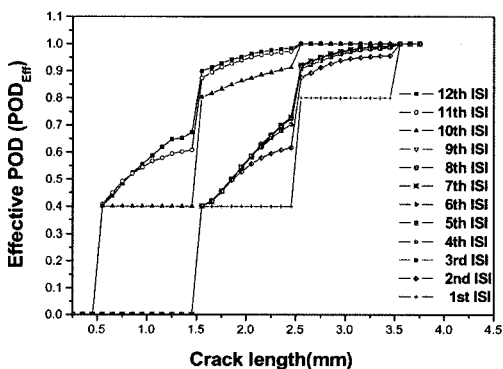


Fig. 7.  $POD_{Eff}$  curves obtained from the simulation.

라 일반 POD와의 차이가 커지고 일정한 확률에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 유효 POD가 일정한 확률에 수렴되는 이유는 비파괴검사장비의 검출한계에 해당하는 균열 크기에서 현재 균열크기까지 성장하는 동안 가동중검사 상황에 놓이는 횟수가 수렴하기 때문이다.

또한 9주기와 10주기에서 검사장비의 변화에 따른 유효 POD의 변화도 확인 할 수 있다. 10th ISI의 유효 POD의 경우 1.5mm보다 작은 크기의 균열 크기 구간에서는 Table 2에서의 POD와 동일한 확률을 보이지만 1.5mm 이상의 균열크기 구간에서는 Table 2에서의 확률보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 10th ISI 이전의 검출한계에 해당하는 균열크기가 1.5mm 이므로 이보다 작은 크기의 균열은 처음 비파괴검사 상황아래 놓이게 되며, 보다 큰 크기의 균열은 이전 가동중검사에서 검출될 수 있기 때문이다.

주기별 유효 POD와 Table 2에서의 일반 POD를 각각 이용하여 각 주기에서의 물리적 균열 수를 계산하고 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 계산된 물리적 균열 수를 검출균열 수로 나누어 일반화한 값을 나타낸 것이다. 3주기 가동중검사까지는 균열이 검출되지 않았으며 4주기 가동중검사부터 검출되기 시작하였다.

Fig. 8에서 5주기에서의 물리적 균열수가 다른 주기에서의 값보다 작은 값을 보이고 있다. 이는 5주기에 검출된 균열의 크기가 다른 주기에서 검출된 균열의 크기보다 상대적으로 큰 값을 나타내기 때문이다.

Fig 8에서 일반 POD에 의해 계산된 물리적 균열 수는 검출된 균열 수의 1.3배에서 1.4배 정도의 값을 보이고 있다. 반면에 유효 POD를 이용하여 계산된 물리적 균열 수의 경우 1.1배에서 1.2배의 값을 보이

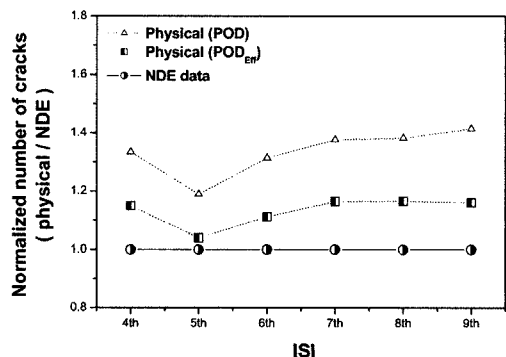


Fig. 8. Normalized number of physical cracks obtained using POD and  $POD_{Eff}$  at each ISI.

고 있다. 이로서 일반 POD로 계산된 물리적 균열 수가 유효 POD로 계산된 것보다 보수적인 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

일정 시간 간격을 두고 반복되는 비파괴검사에서 검출된 결함 수로부터 물리적으로 실제할 수 있는 결함의 수를 Monte Carlo 방법을 이용하여 예측하는 방법을 개발하였으며, 이를 원자력발전소 증기발생기 전열관의 가동중검사 자료에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정 시간 간격을 두고 반복되는 비파괴검사 자료로부터 “유효 POD”를 사용하여 물리적결함 수를 예측할 수 있었다.
- 2) 원자력발전소 증기발생기 전열관에서의 관관상단 축방향 균열 가동중검사 자료로부터 물리적 균열 수를 예측한 결과 일반 POD를 적용하였을 경우 유효 POD를 적용하였을 경우보다 보수적인 결과를 보였다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Steam Generator Integrity Assessment Guidelines: Revision 1, EPRI, Palo Alto, CA: TR-107621-R1, 2000.
- 2) Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook, EPRI, Palo Alto, CA: 1001191, 2001.
- 3) A. P. Berens, “NDE Reliability Data Analysis”, Metals Handbook, 9th ed., Vol. 17, pp. 689~701, 1989.
- 4) J. Davis, “ANL/CANTIA: A Computer Code for Steam Generator Integrity Assessments”, Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6786, 2001.
- 5) PWR Steam Generator Tube Repair Limits: Technical Support Document for Expansion Zone PWSCC in Roll Transitions (Revision 1), EPRI, Palo Alto, NP-6864-L, 1991.
- 6) H. S. Chung, G. T. Kim, and H. D. Kim, A Study on the Integrity Assessment of Detected S/G Tube, KEPRI, 2000.
- 7) J. W. Provan, Probabilistic Fracture Mechanics and Reliability, Martinus Nijhoff, Netherland, 1987.
- 8) W. Mendenhall, R. J. Beaver, and B. M. Beaver, Probability and Statistics, 11th ed., Thomson, 2003.
- 9) R. Y. Rubinstein, Simulation and the Monte Carlo Method, John Willy & Sons, Inc., 1981.