

초음파탐상 PD-RR Test의 통계적 신뢰도 평가(I)

박익근*, 김현묵*, 박은수*, 박운원*, 강석철**, 최영환**

Abstract

원전 가동전/가동중검사 결과의 신뢰도(reliability)는 원전 배관기기의 건전성에 직결되는 것으로써 결함 발견 시 적용되는 파괴역학해석(FMA)은 비파괴검사 결과에 대한 100%의 신뢰를 전제하고 있다. 그러나 비파괴검사가 어느 정도 신뢰성을 가지고 있는지에 대한 평가가 국내에서는 거의 수행된 바가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 원전의 비파괴검사 규제 요건의 기술적 근거를 확보하고, 원전 기기 건전성 평가 및 안전성 향상을 위한 합리적 규제지침을 수립하기 위하여 국내 원전 가동중검사(ISI)에 적용되거나 일반 산업계에 적용되고 있는 초음파탐상검사에 대하여 기량검증 Round Robin Test에 의한 통계적 신뢰도를 평가하고자 한다. 이를 위해 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도 평가 모델을 고찰하고, 결함검출성능 평가, 결함크기 측정 평가, 탐 오차 분석 등 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도를 평가하였다.

1. 서론

비파괴검사는 지금까지 모든 산업발전소의 안전운전에 있어서 본질적인 요소 중의 하나로 인식되어 가동전/가동중에 구조적인 건전성을 비파괴검사로 확인하여 안전운전을 보장하고 있다. 1978년 고리 1호기 가동부터 원전 압력기기의 건전성을 주기적으로 확인하기 위한 유일한 대안으로 가동중검사를 실시하고 있으며, 대부분의 원전에서는 ASME Code에 따른 비파괴검사를 적용하고 있다. 1974년 ASME Code에 표준화된 비파괴검사 규격이 도입된 이래

지난 27여 년 간 많은 사고/고장으로 원자력발전소의 안전운전을 보장하기 위한 비파괴검사기술의 신뢰성을 의심하게 되었고, 1974년부터 원자력 선진국들이 중심이 되어 수행된 PISC(program for inspection of steel components) 프로그램과 EPRI 등에서 수행한 배관의 순회시험(piping inspection round-robin;PIRR trial) 결과 기존 비파괴검사방법은 모의 시험편에 있는 상당히 큰 결함도 검출하지 못하거나 정확하게 결함크기를 측정하는데 실패한 경우가 있으며[1], 검사자의 기량 또는 신체조건에 따라 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다[2]. 또한, 이와 같은 사고/고장으로 각국의 규제기관에서는 비파괴검사의 효용성을 보장하기 위한 대책을 수립하고 있고, 이를 보완하기 위해서 미국 등 선진국

*서울산업대학교 비파괴평가기술연구소

**한국원자력안전기술원

에서는 원전 전체적인 안전성 제고를 위해 원전 배관계통에 대한 위험도기준 가동중검사(risk informed in-service inspection; RI-ISI) 방법과 초음파탐상검사 시스템의 기량검증(performance demonstration initiatives; PDI) 요건이라는 새로운 비파괴검정시험 제도의 도입을 서두르고 있어 우리도 이에 대한 철저한 준비작업이 필요하다고 판단된다. 가동전/가동중검사 결과의 신뢰도(reliability)는 원전 배관기기의 건전성에 직결되는 것으로서 결함 발견 시 적용되는 파괴역학 해석(FMA)은 비파괴검사 결과에 대한 100%의 신뢰를 전제하고 있다. 그러나 비파괴검사가 어느 정도 신뢰성을 가지고 있는지에 대한 평가가 국내에서는 거의 수행된 바가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 원전의 비파괴검사 규제 요건의 기술적 근거를 확보하고, 원전 기기 건전성 평가 및 안전성 향상을 위한 합리적 규제지침을 수립하기 위하여 국내 원전 가동중검사(ISI)에 적용되거나 일반 산업계에 적용되고 있는 초음파탐상검사에 대하여 기량검증 Round Robin Test(이하 PD-RRT라 한다)에 의한 통계적 신뢰도를 평가하고자 한다. 이를 위해 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도 평가 모델을 고찰하고, 결함검출성능 평가, 결함크기 측정 평가, 탐오차 분석 등 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도 평가를 수행하고자 한다.

2. 신뢰도 평가 모델

2.1 검출확률 모델

비파괴검사의 신뢰도는 결함검출확률(probability of detection; POD) 곡선을 이용

하여 다양한 불확실도(uncertainty)를 평가할 수 있다. POD 곡선은 결함크기의 함수로 표현되며, 결함크기를 알고 있는 시험편을 이용하는 Round Robin Test를 통해 평가된다. 확률모델은 일반적으로 모델이 나타내는 곡선과 신뢰구간으로 평가되어진다. 여러 연구자들에 의해 POD 모델이 제안되었으나, 본 연구에서는 Berens[3]가 제안한 모델을 적용하였다.

비파괴검사 시 동일한 크기의 결함도 다른 지시로 나타날 수 있으며, 결함의 크기에 따라 다른 검출확률을 갖게 된다. 이와 같이 검사과정의 불확실도로 인해 발생하는 검사성능을 POD라 하며, 결함크기인 a 의 함수로 $POD(a)$ 로 나타낸다.

$POD(a)$ 는 결함크기를 알고 있을 때 검사의 신뢰도를 평가할 수 있다. $POD(a)$ 를 평가하기 위한 변수들은 통계적인 기법이 사용되고, 시험에서 발생하는 오차가 평가된다.

최근에는 $POD(a)$ 모델을 위한 가정적인 접근 방법들이 발전되었다. NDT 데이터에 대한 검출 신뢰도 분석 함수인 $POD(a)$ 는 누적로그정규분포나 이와 유사한 로지스틱 함수에 의해 이상적으로 모델화 될 수 있는 것으로 나타났다. NDT의 신뢰도 분석에서 통계적인 불확실도에 대한 평가는 신뢰구간으로 평가되며 이러한 신뢰도 분석 모델에 대한 수학적 모델은 고찰하고자 한다.

NDT 신뢰도 평가에 대한 확률적 접근 방법은 검사결과가 단지 결함의 존재여부만을 기록할 때, 찾음/못찾음(hit/miss) 데이터로 분류된다. 이러한 데이터는 고유한 이항데이터의 특징을 갖게 된다.

$POD(a)$ 는 NDT 장비의 적용으로 검출 가능한 모든 결함크기(a)에 대한 비율로 나타난다. 결함을 크랙이라 정의할 때, 일정한 분포의 집단속에 포함되는 각각의

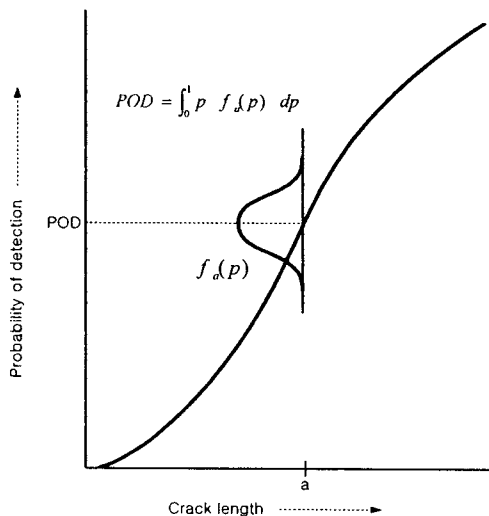


Fig. 1 Schematic of distribution of detection probabilities for cracks of fixed length

크랙의 크기 (a)는 크랙마다 고유한 검출 확률(p)을 가지며 검출확률의 밀도함수는 $f_a(p)$ 가 된다. Fig. 1은 임의의 크랙에 대한 확률밀도함수(probability density function)를 나타낸다. 검사에서 검출되어진 크랙 집단으로부터 임의의 크랙에 대한 검출확률은 $p f_a(p)$ 로 나타난다. 검출되어진 집단으로부터 임의로 선택된 무조건적인 확률은 p 의 모든 범위에 대하여 조건적인 확률의 합으로 나타난다.

$$POD(a) = \int_0^1 p f_a(p) dp \quad (1)$$

따라서, $POD(a)$ 는 연속적인 크랙의 크기 a 에 대한 검출확률들의 평균이다. 식 (1)은 Fig. 1에서와 같이 $POD(a)$ 가 연속적인 크랙의 크기에 대한 각각의 밀도함수의 평균을 지나는 곡선을 의미한다. 이 곡선은 회귀식을 통해 얻을 수 있으며

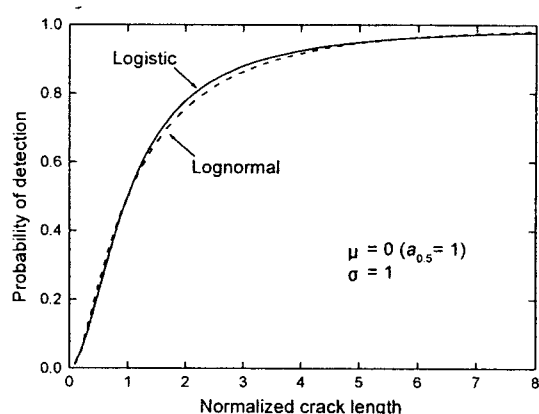


Fig. 2 Comparison of logistic and cumulative log normal models

$POD(a)$ 모델에 대한 실험적인 가정의 기초를 나타낸다. 이러한 회귀 모델을 추정하기 위해 Berens에 의해 7개의 다른 모델을 $POD(a)$ 에 적용하여 평가한 결과 로지스틱(logistics) 모델이 NDT 데이터의 신뢰도 분석에 최상의 모델로 증명되었다. 로지스틱 모델은 이항데이터의 분석에 흔하게 사용되어지는 모델이며, 해석적인 간편성과 누적정규로그분포에 근사하게 일치하는 장점을 갖고 있다.

로지스틱 모델의 두 개의 수학적 등식은 아래와 같다.

$$POD(a) = \frac{\exp(\alpha + \beta \ln a)}{1 + \exp(\alpha + \beta \ln a)}$$

(2)

이 식을 변수, α 와 β 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\ln \left[\frac{POD(a)}{1 - POD(a)} \right] = \alpha + \beta \ln(a) \quad (3)$$

식(3)에서 좌변의 검출확률은 $\ln(a)$ 의

직선의 함수로 표현되고, 이러한 표현은 로지스틱 모델의 전형적인 형태이다. 그러나 식(3)에 의해 $POD(a)$ 를 나타내기 위해서는 많은 수의 크랙에 대한 검출 결과가 필요하게 된다. 식(3)의 변수, α 와 β 는 회귀분석(regression analysis)이나 최우추정분석(maximum likelihood analysis)을 통해 구할 수 있다[2].

또한, 로지스틱 $POD(a)$ 모델의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$POD(a) = \left\{ 1 + \exp - \left[\frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (4)$$

식(4)에서 $\mu = \ln a_{0.5}$ 이며, $a_{0.5}$ 는 50% 검출되는 크랙의 크기이다. 다시 말하면, 검출할 수 있는 크랙크기의 중앙값을 의미한다. $POD(a)$ 의 기울기는 σ 에 반비례하게 된다. 즉, 더 작은 σ 의 값은 $POD(a)$ 의 기울기를 크게 한다. 또한 식(2)와 식(4)의 변수는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\mu = - \frac{\alpha}{\beta} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{(\beta\sqrt{3})} \quad (6)$$

로지스틱 $POD(a)$ 는 식(4)의 μ 와 σ 와 같은 변수를 갖는 누적정규로그분포와 실질적으로 거의 일치하게 된다. Fig. 2는 $\mu = 0$ 이고 $\sigma = 1$ 일 때 누적정규로그분포와 거의 일치하는 것을 보여준다. 식(4)는 찾음/못찾음 데이터의 분석에 사용되어지는 $POD(a)$ 의 로지스틱 모델이다.

2.2 결함크기 평가 모델

ASME Code Sec.XI, App.VIII에서 압력 용기의 용접부에 대한 초음파탐상검사의 결함크기를 평가하는 방법은 최소제곱법(least square method)에 의한 선형회귀분석이 이용된다[4]. Fig. 3은 최소제곱법에 의해 추정된 변수들의 정의를 나타낸다.

Fig. 3에서 직선 A는 선형 회귀선(linear regression line)으로 식(7)과 같은 직선의 방정식으로 나타나며, 최소 제곱법(least square method)에 의해 n 개의 데이터 점 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 들이 최적으로 회귀된 선이다.

$$y = a + bx \quad (7)$$

식(7)의 a 와 b 는 회귀계수(regression coefficient)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$a = \frac{\sum y_i}{N} - b \frac{\sum x_i}{N} \quad (8)$$

$$b = \frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (9)$$

여기서, a 는 회귀선의 y 절편이며, b 는 회귀선의 기울기, N 은 데이터의 수이다. 직선 B는 실제의 결함 크기와 측정된 결함크기가 이상적으로 같게 나타날 경우의 이상적인 선(ideal line), $y = x$ 이다.

회귀분석에서 독립변수와 종속변수의 상관성을 추정하기 위해 상관계수(correlation coefficient)값이 이용된다. 상관계수(correlation coefficient)는 다음과 같이 정의된다.

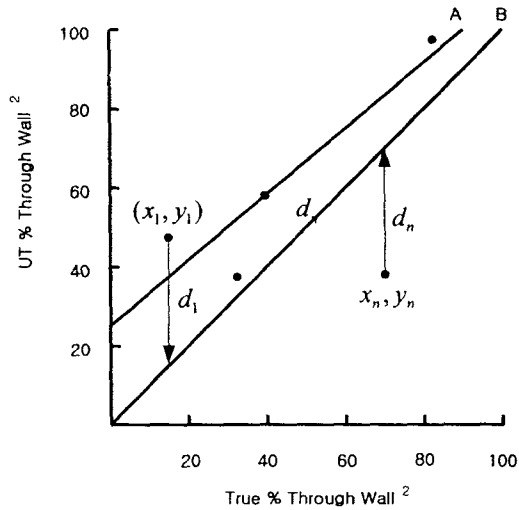


Fig. 3 Linear regression line by least squared method[4]

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}}$$

(10)

또한, 측정의 정확도를 나타내기 위한 평균 편차는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Mean Deviation} = \frac{|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|}{n}$$

(11)

참고적으로 RMS(root mean square) 오차는 다음과 같이 식(12)와 같으며, 초음파 탐상검사로 평가한 결함깊이가 ASME Code 요건에 만족하려면 실제 결함깊이와의 RMS 오차가 배관 용접부인 경우 0.125 inch를 초과하지 않아야 한다.

$$RMS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

(12)

식(12)에서, m_i 는 측정된 결함깊이, t_i 는 실제 결함깊이, n 은 측정된 결함의 개수이다.

3. 초음파검사 PD-RRT Test

초음파검사 PD-RRT의 주요한 목적은 현장 환경 조건하에서 적용되고 있는 검사절차서로 결함검출이나 결함크기 측정 성능에 영향을 미치는 여러 변수들을 평가하여 검출 유효성(detection effectiveness)을 결정하는 것이다. 즉, 초음파검사 PD-RRT를 통해, 1)실제 수행된 ISI방법의 신뢰성을 평가, 2)첨단 NDE 기법의 신뢰도를 향상, 3)더 효율적인 ISI를 확보하기 위한 요구사항 등의 개선과 같은 기대효과를 얻을 수 있다.



Photo. 1 UT PD-RRT specimen



Photo. 2 Ultrasonic PD-RRT

본 연구에서 수행된 PD-RRT는 총 9개 업체가 참여하여, 2개의 규격이 다른 배관 시험편에 원전에 사용되는 용접방법과 동등한 pipe-to-pipe 맞대기 용접부를 제작하였으며, 하나의 배관 시험편에는 2개의 원주용접부를 제작하여 EDM의 결함을 여러 형태로 가공하였고, 다른 하나의 배관 시험편에는 피로균열을 가공하였다. 본 초음파검사 PD-RRT에서는 원전가동중 검사 참여업체 그룹의 경우 반드시 1개의 팀은 ASME Sec. XI Code 요구사항을 충족하는 초음파검사 절차서의 적용을 원칙으로 하고, 다른 1개의 팀은 검사절차를 제한하지 않았으며, 일반 비파괴검사 업체 그룹은 제한없이 원하는 절차를 임의로 사용할 수 있도록 하였다. 모든 팀은 시험에 설계된 변수에 따라 모두 동일하게 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 변수 영향 평가

통상적인 현장조건의 환경 하에서 POD와 FCP는 다양한 스펙트럼으로 나타난다. 이러한 다양한 조건의 스펙트럼에 영향을 미치는 검사와 재료의 조건을 정의하는 변수들을 시험의 '설계 변수(design variable)'라 부른다. 여기서는 한 변수가 다른 변수에 영향을 미치지 않는 이산적(discrete)인 독립변수(independent variable)이며, 외부변수(extraneous variable)는 고려하지 않는다. 본 연구의 초음파검사 PD-RRT에서는 7개의 설계변수가 고려되었다.

Table 2는 검사 그룹과 절차에 따른 검출성능을 요약하여 보여주고 있다. 결함 크기의 분류는 Grading unit내에 결함이 없는 경우에는 Blank, 결함의 d/t (d =결함

Table 1 Design variables

Design Variable	Inspection Conditions Defined by the Variables
Specimen Type	304L Stainless Steel SA 312 TP347 Stainless Steel
Defect Type	Thermal Fatigue Crack(TFC) EDM Notch
Defect Geometric	Axial Crack Circumferential Crack
Defect Size	Blank, Size 1, Size 2, Size 3, Size 4
Inspection Group	ISI Vendor and NDT Co. Ltd.
Inspection Team	15 Teams
Procedure Type	ASME Code or Advanced

Table 2 Summary of detection performance

Defect Size	Group A		Group B	
	ASME	Advanced	ASME	Advanced
Blank				
FCP	0.152	0.400	0.286	0.450
# Insp.	46	20	70	20
Size 1				
POD	0.350	0.063	0.071	0.063
# Insp.	40	16	56	16
Size 2				
POD	0.519	0.583	0.548	0.417
# Insp.	27	12	42	12
Size 3				
POD	0.553	0.625	0.696	0.563
# Insp.	38	16	56	16
Size 4				
POD	0.792	1.000	0.886	0.500
# Insp.	24	10	35	10
FCP ; false call probability				
POD ; probability of detection				
# Insp. : Number of inspection				

깊이, t (시험편 두께)가 30% 이하이면서 a (결함길이)가 10mm이하인 경우에 해당되는 결함을 Size 1이라 하고, Size 2 ($d/t \leq 60\%$, $10\text{mm} < a$), Size 3 ($30\% < d/t \leq 60\%$).

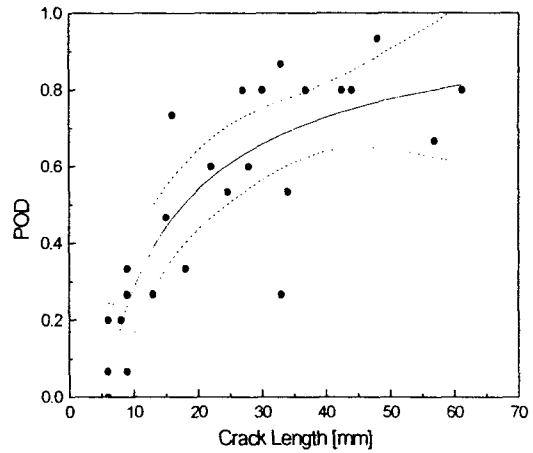
Table 3 Summary of detection performance for specimen variables

Size Type	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4
EDM Notch				
POD	--	0.800	0.800	--
# Insp.	--	15	15	--
TFC				
POD	--	0.567	0.667	0.800
# Insp.	--	30	15	15

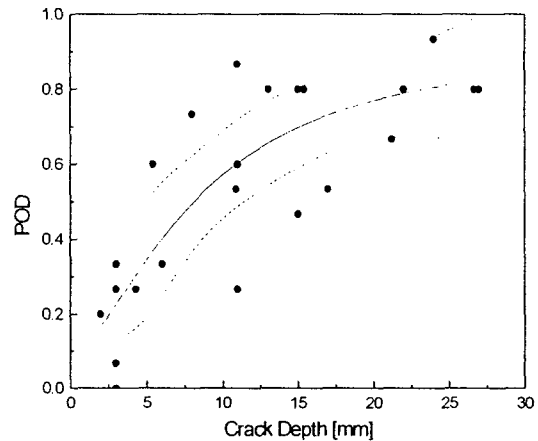
Size 4 ($60\% < d/t \leq 90\%$)의 5개의 범주로 구분하였다. Table 2에서 결함의 크기가 증가할수록 검출성능은 좋아지고 있음을 알 수 있다. 또한, 그룹 A의 ASME 방법이 0.152의 가장 적은 FCP를 발생했으며, 그룹 B의 경우에는 ASME 방법이 Advanced 방법보다 검출성능이 우수하게 나타났다. 이와 같은 비교를 통하여 어떠한 변수가 검출성능에 영향을 미치고 있는지를 파악할 수 있다. 시험편 변수인 결함의 크기는 검출성능에 가장 밀접한 영향을 주고 있으며, 검사 그룹이나 검사 방법 역시 검출성능에 적은 영향을 주는 것으로 나타났다. Table 3은 시험편 변수인 결함의 유형에 따른 검출성능의 비교를 나타내고 있다. EDM Notch형의 크랙이 TFC에 비해 검출이 쉬운 것으로 나타났다. 따라서 결함의 유형에 따라서는 검출성능은 다르게 나타남을 알 수 있다.

4.2 검출성능 평가

Fig. 4는 초음파검사 PD-RRT에 참여한 모든 팀의 검출성능을 보여주는 검출확률 곡선을 나타낸다. 따라서, Fig. 4는 국내 초음파검사의 검출기량을 나타내는 표본이라고 할 수 있다. 크랙의 크기가 증가할수록 검출확률은 증가된다. 이상적인 검출확률 곡선은 95% 신뢰구간의 폭이



(a)



(b)

Fig. 4 Logistic curve fit to POD data with 95% bounds(All teams) (a) POD vs length, (b) POD vs depth

좁으면서 POD가 작은 크랙에서부터 1에 가깝게 나타나는 경우이다. 이러한 POD 곡선의 평가는 POD함수가 갖는 변수를 통해 평가되어질 수 있다.

Table 4는 식(4) POD 함수의 회귀계수 값을 요약하여 보여주고 있다. 두 회귀계수의 값에 물리적인 의미를 부여하는 것은 쉬운 일은 아니다. 다만, 두 변수 중 σ 의 역수는 POD 함수의 기울기를 결정

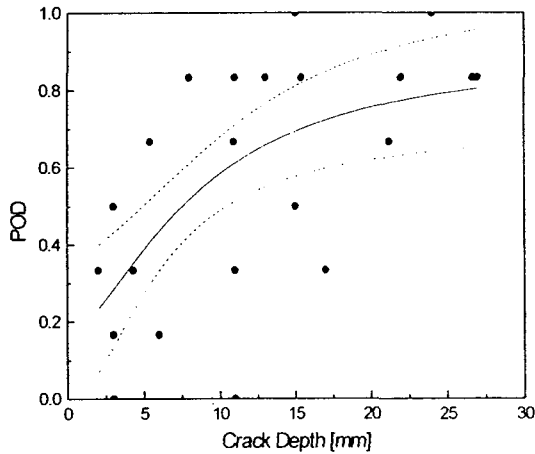


Fig. 5 Logistic curve fit to POD data with 95% bounds(Group A), POD vs depth

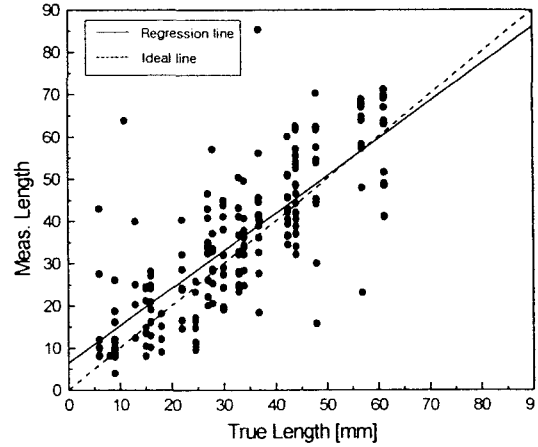
Table 4 Summary of POD logistic curve fits

Team	Length		Depth	
	μ	σ (1/mm)	μ	σ (1/mm)
All	-1.768	1.072	0.096	0.935
Group A	-0.428	0.854	0.171	0.899
Group B	-0.551	0.832	-0.010	0.969
ASME	-0.372	0.830	0.093	0.954
Advanced	-0.514	0.770	-0.021	0.906

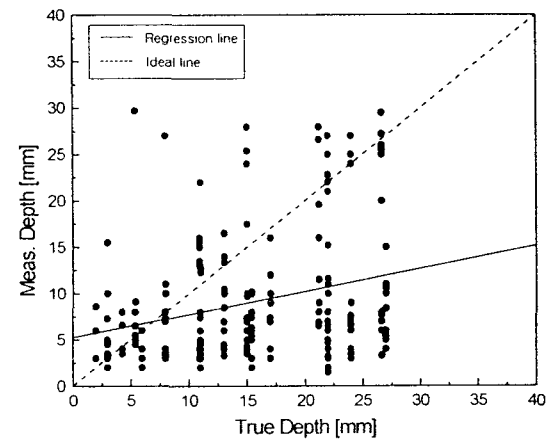
하는 중요한 변수이다. 따라서 μ 는 수치가 증가할수록, σ 는 작을수록 검출확률이 높은 POD 곡선으로 나타나게 된다. Table 4에서 검사그룹별, 검사방법별, 검출확률 곡선의 변수들을 비교하면 미소한 차이는 있으나 크게 검출확률의 차이가 크게 나타나지는 않았다. 그러나 그룹 A의 결함 깊이에 따른 검출확률의 경우 상대적으로 검출확률이 우수한 것으로 나타났다. Fig. 5는 그룹 A의 결함 깊이에 따른 검출확률 곡선을 나타내고 있다.

4.3 결함크기 평가

Fig. 6은 초음파탐상 PD-RR Test에 참



(a)



(b)

Fig. 6 Regression fit of results data of all teams

여한 모든 팀의 데이터에 대한 결함크기 평가를 나타내는 선형회귀선이며, 국내 초음파탐상의 결함크기 측정기량 수준을 가늠해 볼 수 있다. Fig. 6 (a)는 실제결함 길이와 측정된 결함의 길이를 나타내고 (b)는 실제결함 깊이와 측정된 결함의 깊이를 나타낸다. 결함의 길이의 경우 이상적인 선(ideal line)과 거의 일치하고 있으므로 상당히 정확하다고 할 수 있으나 결함의 깊이 측정의 경우 두 선의 기울기 차이가 크기 때문에 측정값은 실제 결함 깊이와 큰 편차를 갖고 있다고 판단할 수

Table 5 Summary of linear regression fits for defect length sizing

Team	a	b	r	M.D.(mm)
All	6.445	0.888	0.778	7.955
Group A	4.006	0.933	0.808	6.743
Group B	8.747	0.842	0.750	8.762
ASME	7.353	0.836	0.759	7.955
Advanced	3.238	1.049	0.842	7.955

a = intercept of $y(x)$
 b = slope of $y(x)$
 r = correlation coefficient
 M.D. = mean deviation

Table 6 Summary of Linear Regression Fits for Defect Depth Sizing

Team	a	b	r	RMS(mm)
All	5.234	0.251	0.274	10.473
Group A	8.168	0.181	0.209	9.975
Group B	2.348	0.342	0.371	17.455
ASME	4.552	0.168	0.252	11.168
Advanced	8.315	0.450	0.406	8.562

a = intercept of $y(x)$
 b = slope of $y(x)$
 r = correlation coefficient
 RMS = root mean squared

있다. 거의 대부분의 깊이 측정이 실제의 결함보다 작게 측정된 것으로 나타났다. Fig. 6의 선형회귀모델의 변수를 이용하면 측정된 결함크기의 정확성을 평가할 수 있다. ASME Sec.XI, App.VIII에서는 배관의 결함의 길이 측정 평가 기준은 평균편차가 1인치(25.4mm)이내이면 기준을 만족하도록 명시되어 있으며, 결함의 깊이는 RMS가 0.125인치(3.125mm)를 초과하지 않아야 한다. ASME Code의 판정기준과 비교할 때, Table 5에서와 같이 결함의 길이 측정은 상당히 우수한 것으로 나타났으나, Table 6에 나타난 결함 깊이 측정의 경우에는 대부분 불량한 것으로 나타났다.

4.6 팀 오차 분석

Table 7 Summary of inspection performance for teams

Team No.	Group	Method	Detection (D/FC)*	Sizing(mm)	
				Length M.D.	Depth RMS
1	A	ASME	12/3	6.337	8.134
2	A	Advanced	16/2	8.372	7.681
3	A	ASME	17/0	8.269	11.281
4	A	Advanced	12/6	7.326	10.605
5	A	ASME	17/0	5.197	11.308
6	A	ASME	12/0	4.959	10.843
7	B	ASME	18/2	5.995	11.701
8	B	ASME	17/0	5.885	13.275
9	B	ASME	11/5	9.523	8.179
10	B	ASME	9/3	14.859	9.369
11	B	Advanced	3/4	6.565	9.205
12	B	ASME	10/5	8.205	15.605
13	B	ASME	12/3	11.503	12.509
14	B	ASME	17/2	6.768	10.646
15	B	Advanced	16/5	9.557	6.757
Mean			13.3/2.67	7.955	10.473

* D = Number of Detection
 FC = Number of False Call

지금까지 검사성능 변수에 따른 검출성능기량과 결함크기측정 기량에 대한 분석을 수행하였으며, 본 절에서는 참여한 15개의 각 팀에 대한 검출성능과 결함크기 측정 기량에 대해 분석하고자 한다. 따라서 위의 분석에 적용한 기법들을 각 팀별마다 적용하고, ASME Code Sec.XI, App.VIII의 판정기준과 비교하여 참여한 팀의 정확성과 신뢰성에 대한 평가를 수행하였다. 본 초음파탐상 PD-RRT에 사용된 시험편의 총 Grading unit이 34개이며, 이중 결함이 있는 Grading unit이 24개, 결함이 없는 Grading unit은 10개이다. Table 7은 각 팀들의 검사성능의 결과를 보여주고 있다. 평가결과 3개 팀은 검출성능이 아주 우수한 것으로 나타났으며, 모든 팀의 길이측정 기량이 상당히 우수한 것으로 나타났으나 결함깊이 측정은 다소 나쁜 것으로 나타났다.

5. 결 론

원전 기기 건전성 평가 및 안전성 향상을 위한 합리적이고 기술적 근거를 파악하기 위해 수행한 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 초음파탐상 PD-RRT를 위한 절차서와 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도 평가 모델을 개발하였다.

2) 검사 그룹이나 절차서 변수는 검출 성능에 큰 영향을 미치지 않았으나, 시험편변수인 결함크기와 결함유형 변수는 검출 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3) 로지스틱 POD 모델을 적용하여 검사 그룹별, 검사방법별, 결함길이와 결함깊이에 따른 결함검출확률을 추정하였다.

4) 결함크기 성능 평가의 경우 결함길이 성능 평가의 경우는 상당히 정확하였으나, 결함깊이 측정 성능의 경우는 대부분 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 시험편의 가공오차일 수도 있으므로 추후 결함부위에 대한 판단시험을 통하여 정확성에 대한 재평가가를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

5) 향후 연구 계획으로는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법에 의한 통계적 분석 활용 프로그램 모의 검증과 Monte Carlo 시뮬레이션 기법에 근거한 초음파탐상 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도의 정밀 분석을 수행하고자 한다.

후 기

본 연구의 통계적 분석은 한국원자력안전기술원의 2000년 원자력 안전규제 기술개발 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] P. G. Heasler, S. R. Doctor, "Piping Inspection Round Robin", NUREG/CR-5068 PNNL-10475, 1996
- [2] Human Reliability in Inspection, Final Report on Action 7 in the PISC III Programme, OECD/NEA Committee on the Safety of Nuclear Installation, 1994
- [3] A. P. Berens, "NDE Reliability Data Analysis", In *Metals Handbook* (ASM International, New York), pp. 689-701, 1989
- [4] Appendix VIII of ASME B & PV Code Sec.XI, Performance Demonstration for Ultrasonic Examination System
- [5] NRC Bulletin No. 88-08, Supplement 1, 2 & 3, Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems.
- [6] 이종포, "원자력발전소 기기 가동중검사에 대한 신규 요건과 그 전망", 비파괴검사학회지 Vol.15, No. 2, 1995
- [7] B. Watkins, "Validation of Ultrasonic Testing Procedures and Operators", 8th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, ASM International, pp. 9-16, 1986
- [8] 이삼래, "원전 초음파검사 관련 기량 검증 시스템 개발", KAERI/RR-1460/94
- [9] J. R. Dickens and D. E. Bray, "Human performance considerations in nondestructive testing", *Materials evaluation*/September, pp. 1033-1041, 1994
- [10] 박은수, 박익근 외 3인, "국내 가동중검사에서 발견된 결함에 대한 조사 분석", KINS 연구결과보고서, 1998
- [11] 박익근, 박은수, 외 3인, "원전 압력용기 용접부의 결함보수 현황과 초음

- 파검사의 신뢰도”, 한국비파괴검사학회
추계학술발표회 논문집, pp.110-120,
1999
- [12] 강석철, "초음파검사 검증제도에 관
한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학
술발표회 논문집, pp. 97-104, 1995
- [13] 강석철, "비파괴검증 시험에 대한 현
황 검토", 원전 기기설비 건전성평가
워크샵, pp.6(1-23), 1997
- [14] 이종포, 최하림, "원전 기기의 초음파
탐상검사 시스템에 대한 기량 검증",
한국비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 1,
pp.29-39, 1993
- [15] R. H. Burkel and D. J. Sturges,
"Probability of Detection for applied
Ultrasonic Inspection", Review of
Progress in QNDE, Vol. 15, Edited by
D. O. Tompson and D. E. Chimenti,
Plenum Press, New York, 1996
- [16] R. S. Figliola and D. E. Beasley,
"Theory and Design for Mechanical
Measurements", 2nd Edition, John
Wiley, 1995