

# 원전 배관 결함의 크기측정성능에 대한 초음파 검사시스템의 확률론적 신뢰도 평가

김현묵\*, 정지홍\*, 지용우\*, 장경영\*\*, 박익근\*\*\*, 박윤원\*\*\*\*

## Probabilistic Reliability Analysis of Ultrasonic Inspection System about Sizing Performance of Defects in Piping on Nuclear Power Plant

Hyun-Mook Kim, Jee-Hong Jung, Yong-Woo Jy, Kyung-Young Jang, Ik-Keun Park, Yoon-Won Park

**Key Words:** Ultrasonic Inspection, Reliability, Probability, ISI, PDI, POD, Monte Carlo Simulation

### Abstract

The performance demonstration round robin test was conducted to quantify the capability of ultrasonic inspection for in-service and to address some aspects of reliability for nondestructive evaluation. The fifteen inspection teams who employed procedures that met or exceeded ASME Sec. XI code requirements detected the piping of nuclear power plant with various cracks to evaluate the capability of detection. With data from PD-RR test, the performance of ultrasonic nondestructive inspection could be assessed using probability of length and depth sizing of cracks.

### 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 압력 기기의 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 비파괴검사 기술의 신뢰성을 의심하게 되었고, 1974년부터

원자력 선진국들이 중심이 되어 수행된 PISC(program for inspection of steel components) 프로그램과 EPRI 등에서 수행한 배관의 순회 시험(piping inspection round-robin;PIRR trial) 결과 기존 비파괴검사방법은 모의 시험편에 있는 상당히 큰 결함도 검출하지 못하거나 정확하게 결함크기를 측정하는데 실패한 경우가 있으며<sup>(1)</sup>, 검사자의 기량 또는 신체조건에 따라 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다<sup>(2)</sup>. 또한, 이와 같은 사고/고장으로 각국의 규제기관에서는 비파괴검사의 효용성을 보장하기 위한 대책을 수립하고 있고, 이를 보완하기 위해서 미국 등 선진국에서는 원전 전체적인 안전성 제고를 위해 원전 배관계통에 대한 위험도기준 가동중검사(risk informed in-service inspection;RI-ISI) 방

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과, \*\* 한양대학교 기계공학부, \*\*\* 서울산업대학교 기계공학과, \*\*\*\* 한국원자력안전기술원

법과 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 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 Test(이하 PD-RRT라 한다)에 의한 확률론적 결함크기측정 성능의 신뢰도를 평가하고자 한다.

## 2. 초음파검사 PD-RRT

초음파검사 PD-RRT의 주요한 목적은 현장 환경 조건하에서 적용되고 있는 검사절차서로 결함 검출이나 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.

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 원전가동중검사 참여업체 그룹의 경우 반드시 1개의 팀은 ASME Sec. XI Code 요구사항을 충족하는 초음파검사 절차서의 적용을 원칙으로 하고, 다른 1개의 팀은 검사절차서를 제한하지 않았으며, 일반 비파괴검사업체 그



Photo. 1 UT PD-RRT specimen



Photo. 2 Ultrasonic PD-RRT

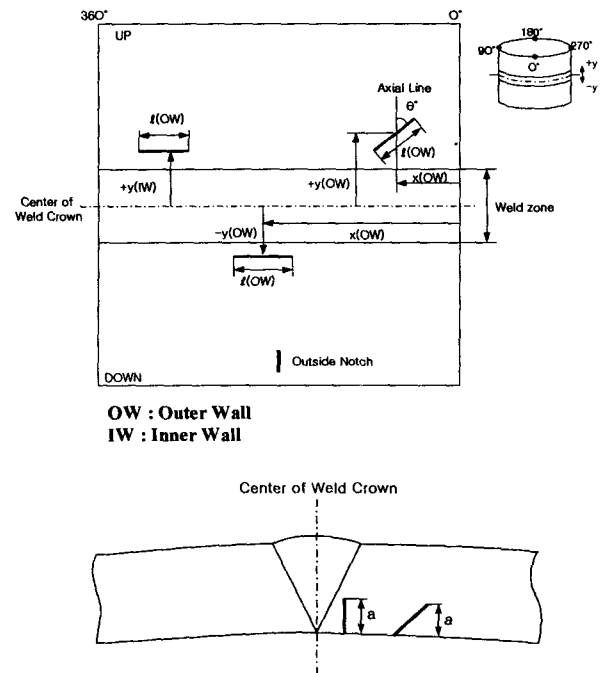


Fig. 1 Index of Measurements

룹은 제한없이 원하는 절차를 임의로 사용할 수 있도록 하였다. 모든 팀은 시험에 설계된 변수에 따라 모두 동일하게 수행되었다. Fig. 1은 검사팀들이 측정해야 할 항목을 나타낸다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 설계변수

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 1).

결함 크기의 분류는 Grading unit내에 결함이 없는 경우에는 Blank, 결함의  $d/t$ ( $d$ =결함깊이,  $t$ =시험편 두께)가 30% 이하이면서  $a$ (결함길이)가 10mm이하인 경우에 해당되는 결함을 Size 1이라고 하고, Size 2( $d/t \geq 30$ ,  $10\text{mm} < a$ ), Size 3( $30\% < d/t \leq 60\%$ ), Size 4( $60\% < d/t \leq 90\%$ )의 5개의 범주로 구분하였다. 시험편에는 EDM notch형 결함과 TFC형 결함이 인공적으로 제작되었다. EDM notch에 비해 TFC는 비교적 자연결함에 유사한 결함의 유형으로 검출이 용이하지 않을 것으로 사료된다.

이와 같은 설계변수는 검사시스템이 크기를 측정할 때 영향을 미치게 되는 중요한 변수들이며 각각의 설계변수들에 대한 비교분석을 통해 크기 측정에 영향을 미치는 변수들을 정의할 수 있으며, 우수한 검사변수를 판정하여 크기측정성능을 향상시킬수 있는 방향을 제시할 수 있다.

#### 3.2 길이측정성능 분석

본 연구에서는 검사성능 변수와 시험편 변수에 따른 길이측정성능을 평가하였다. 검사성능변수는 크게 검사절차(inspection procedure)와 검사그룹(inspection group)으로 분류된다. Fig. 2는 초음파검사 PD-RRT에 참가한 모든 팀의 길이측정결과에 대한 선형회귀선을 보여준다. 그림에서와 같이 길이측정 결과데이터로부터 얻은 회귀선은 이상적인 선( $y=x$ )에 상당히 근접해 있는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 국내 초음파검사 시스템의 길이측정 성능을 대표하는 표본이라고 할 수 있으

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	A : ISI Vendor B : NDT Co. Ltd.
Inspection Team	15 Teams
Procedure Type	ASME Code or Advanced

며, 길이측정 성능은 상당히 우수함을 알 수 있다. Fig. 3은 각각 ASME Code 절차서 방법과 Advanced 절차서를 적용하여 검사한 팀에 대한 회귀선을 나타낸다. 두 그림의 회귀선을 비교할 때 Advanced 절차서를 이용한 팀이 비교적 우수하나 절차서 변수에 따른 길이측정성능의 차이는 크지 않다. Fig. 3은 검사그룹에 따른 길이측정 결과의 회귀선을 나타낸다. Table 2는 길이측정데이터를 회귀분석으로부터 얻은 파라미터값을 나타내며, Table 3은 검사성능 변수에 대한 초음파검사 길이측정성능의 신뢰도를 나타낸다. 길이측정의 신뢰도는 각각의 결함길이에 대한 평균과

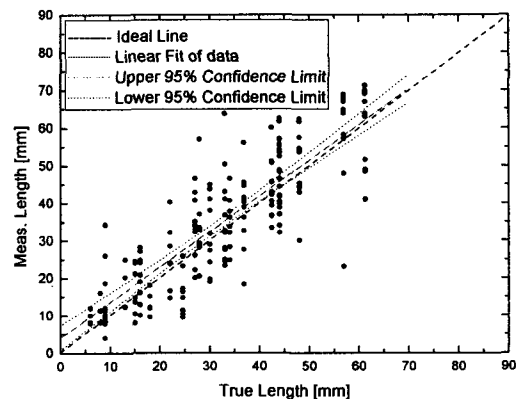
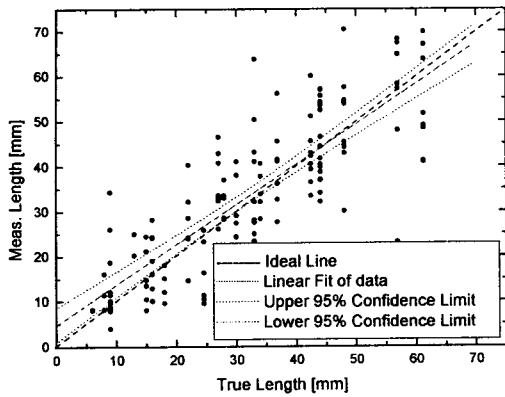
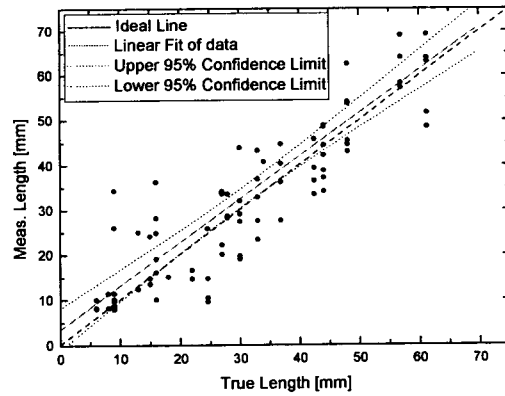


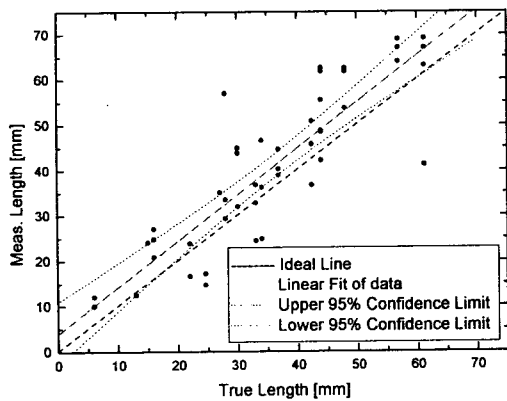
Fig. 2 Regression fit of all team's length sizing



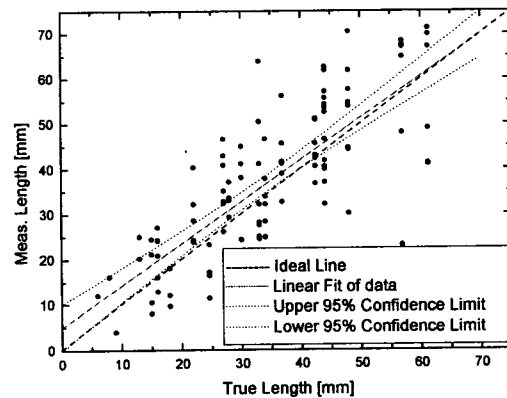
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Regression fit of length sizing (a) ASME Code (b) Advanced

Fig. 4 Regression fit of length sizing (a) Group A, (b) Group B

Table 2 Summary of linear regression fits for length sizing

Team	a	b	r	RMS(mm)	
All	4.03046	0.94849	0.81973	9.81299	
Inspection Group	A	3.54538	0.96187	0.84166	9.86193
	B	4.96085	0.92585	0.78367	10.0525
Inspection Type	ASME	4.75415	0.89398	0.7998	10.06745
	Adv.	3.95375	1.02287	0.86354	8.83462

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

Table 3 Reliability of length sizing performance with inspection variables

Inspection Variables	Size	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4	M.D. [mm]	Mean S.D. [mm]
Total		12.5 ± 5.0* #18	26.8 ± 24.5* #49	36.5 ± 29.6 #75	47.7 ± 25.0 #62	3.7	12.3
	Group	A	12.5 ± 5.6** #13	28.3 ± 12.4** #21	35.5 ± 32.3 #27	46.4 ± 25.3 #26	3.5
B		12.6 ± 11.9* #5	25.7 ± 24.1 #28	36.1 ± 28.6 #48	48.7 ± 25.2 #36	3.6	11.1
Procedure	ASME	12.7 ± 5.4** #16	25.7 ± 25.3* #37	34.8 ± 29.0 #56	45.9 ± 23.8 #47	2.6	12.3
	Advanced	11.0 ± 8.8* #2	30.1 ± 25.9 #12	39.2 ± 32.4 #19	53.6 ± 27 #15	6.3	10.7

# : Number of Inspection, \* : 90% Confidence Level, \*\* : 50% Confidence Level

Table 4 Reliability of length sizing performance with specimen variables

Defect Variables	Size	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4	M.D. [mm]	Mean S.D. [mm]
		Defect Type	TFC	--	25.3±21* #17	58.7±31.9 #10	--
	EDM notch	--	42.4±36.3 #12	43.8±16.5 #12	--	3.5	12.0
Defect Geometric	Axial	14.2±10.5** #4	17.6±13.4 #12	--	46.7±20.2 #12	3.5	9.7
	Circumferential	12.2±11.0 #14	29.8±26.0* #37	--	48.0±26.4 #50	4.1	11.2

# : Number of Inspection, \* : 90% Confidence Level, \*\* : 50% Confidence Level

신뢰수준으로 표시하였다. 검사 횟수가 30 미만일 경우에는 Student t-distribution의 유의수준을 이용하였으며 30 이상일 경우에는 정규분포의 유의 수준을 이용하여 각각의 Size 변수에 대한 평균과 신뢰수준을 나타내었다. Table 4는 시험편 변수에 대한 초음파검사의 신뢰도를 나타낸다.

### 3.3 깊이측정성능 분석

Fig. 5는 초음파검사 PD-RRT에 참가한 모든 팀의 깊이측정결과에 대한 선형 회귀선을 보여준다. 그림에서와 같이 깊이측정 결과데이터로부터 얻은 회귀선은 이상적인 선(y=x)에 상당히 큰 편차를 보임을 알 수 있다. Fig. 5는 국내 초음파검사 시스템의 깊이측정성능을 대표하는 표본이라 할 수 있으며, 깊이측정 성능은 미흡한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 각각 ASME Code 절차서 방법과 Advanced 절차서를 적용하여 검사한 팀에 대한 회귀선을 나타낸다. 두 그림의 회귀선을 비교할 때 Advanced 절차서를 이용한 팀이 상대적으로 깊이측정성능이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 두 절차서 모두 비교적 큰 결함에서는 실제 결함 깊이보다 작게 측정됨을 알 수 있다. Fig. 7은 검사그룹에 따른 깊이측정 결과의 회귀선을 나타낸다. 그룹변수에 따른 깊이측정 기량의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. Table 4는 깊이측정데이터로부터 회귀분석에 의해 얻어진 파라미터값이다. Table 5는 검사성능 변수에 대한 초음파검사 깊이측정성능의 신뢰도를 나타내며, Table 6은 시험편 변수에 따른 깊이측정성능의 신뢰도를 보여준다. 대부분의 결함크기에서 평균편차는 크지않으나 표준편차의 크기가 크게 나타났다.

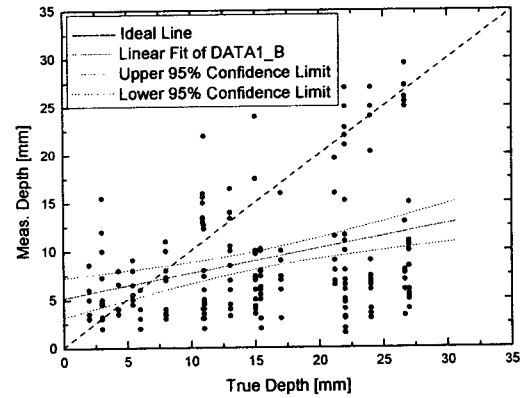
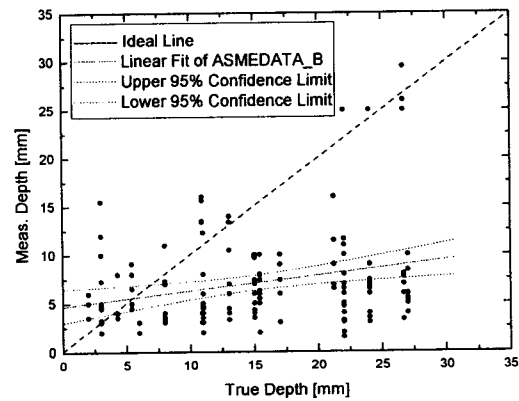
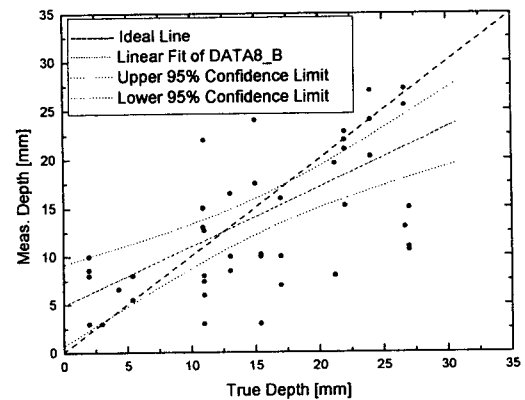


Fig. 5 Regression fit of all team's length sizing



(a)



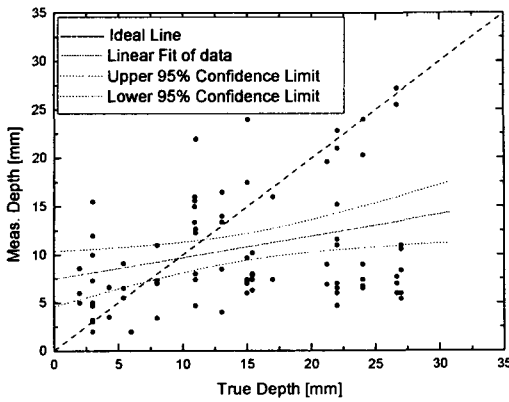
(b)

Fig. 6 Regression fit of depth sizing (a) ASME Code (b) Advanced

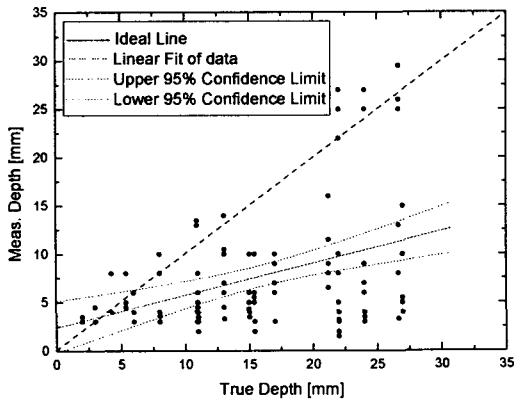
Table 6 Reliability of depth sizing performance with specimen variables

Defect Variables		Size	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4	M.D. [mm]	Mean S.D. [mm]
Defect Type	TPC	--	10.3±4.6* #17	14.1±5.7** #10	--	--	4.6	7.4
	EDM notch	--	9.3±7.9* #12	6.8±5.8 #12	--	--	6.2	3.6
Defect Geometric	Axial	8.1±2.9** #4	9.6±7.9* #12	--	12.1±6.9** #12	--	5.7	6.3
	Circumferencial	5.2±2.4** #14	8.1±6.1* #37	--	10.8±8.1* #50	--	5.5	5.9

# : Number of Inspection, \* : 90% Confidence Level, \*\* : 50% Confidence Level



(a)



(b)

Fig. 7 Regression fit of depth sizing (a) Group A, (b) Group B

Table 5 Reliability of depth sizing performance with inspection variables

Inspection Variables		Size	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4	M.D. [mm]	Mean S.D. [mm]
Total			4.5±2.5** #18	7.8±4.7* #49	8.2±4.7 #75	11.1±7.9* #62	5.4	5.2
Group	A		6.8±2.7** #13	11.2±5** #21	11.4±4.6** #27	12.3±5.1** #26	5.6	6.4
	B		3.4±1.8 #5	6.4±5.8* #28	6.8±3.7* #48	10.2±7.4* #36	6.0	4.2
Procedure	ASME		5.9±2.6** #16	6.3±4.2* #37	6.6±2.7** #19	7.8±4.5** #15	7.2	4.7
	Advanced		5.8±3.2** #2	13.2±5.4** #12	13.9±5.7** #19	20.4±12.8 #15	3.2	6.5

# : Number of Inspection, \* : 90% Confidence Level, \*\* : 50% Confidence Level

#### 4. 고찰

본 연구에 사용된 시험편은 오스테나이트계 스테인레스강이다. 내식성이 우수하여 발전설비 특히, 원자력발전의 배관이나 압력용기의 소재로 널리 사용되고 있다. 그러나 기계적으로 우수한 성질이 높은 온도와 압력으로 인해 응력부식크랙과 같은 재료의 파괴에 직접적으로 영향을 미치는 결함이 생성된다. 초음파탐상검사법은 이러한 크랙을 정량적으로 측정할 수 있는 유일한 대안이다. 오스테나이트계 스테인레스강은 용접부에서 재료가 이방성으로 존재하며 결정입계가 커서 초음파의 산란이 많아 검사자가 가장 어렵게 생각하는 시험편이다. 따라서 본 연구에서는 결함의 크기를 측정하는데 최대한 악조건으로 PD-RRT를 설계하였기 때문에 검사결과의 신뢰도가 떨어지는 것은 당연한 것으로 사료된다. 특히 깊이측정의 신뢰도는 상당히 의심스럽다. Fig. 6에서 ASME 절차서에 비해 Advanced 방법이 깊이측정성능이 비교적 우수한 것으로 나타났는데 이러한 원인은 기존의 ASME Code에 의존했던 결함의 깊이측정절차에 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서 보다 신뢰성있는 초음파검사의 결과를 얻기 위해서는 결함의 깊이를 정량적으로 측정할 수 있는 방법에 대한 연구와 체계화가 필요한 것으로 사료된다. Table 3, 4, 5, 6의 결과에서와 같이 측정편차가 상당히 큼을 알 수 있다. 그러나 평균편차의 차이가 크지 않았기 때문에 보다 반복적인 검사가 수행된다면 신뢰수준을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 참고적으로 ASME Sec.XI, App. VIII에서 검사기량의 판정기준은 깊이측정의 경우 RMS값이 0.15in(3.81mm)이내, 길이측정의 경우에는 RMS값이 0.75in(19.05mm)이내

이면 검사성능을 우수한 것으로 평가하고 있다.

## 5. 결 론

원전 기기 건전성 평가 및 안전성 향상을 위해 초음파 PD-RRT를 통계 확률적으로 결함의 크기측정성능의 신뢰도를 평가한 결론은 다음과 같다.

1) 초음파검사 PD-RRT를 이용하여 국내 초음파 검사의 크기측정성능에 대한 신뢰도 평가가 가능하였다.

2) 검사성능변수인 검사그룹과 절차서변수는 깊이측정성능에는 큰 영향이 없었으나 깊이측정성능에는 Advanced 절차서를 사용한 방법이 우수한 것으로 나타났다.

3) 깊이측정성능은 우수하였으나 깊이측정의 경우에는 대부분 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 시험편의 가공오차일 수도 있으므로 추후 결함부위에 대한 파단시험을 통하여 정확성에 대한 재평가를 통해 검증할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4) 초음파검사 결과의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 동일한 검사부위에 대해 반복적인 검사가 필요하나, 많은 반복적인 검사는 시간과 비용이 동반되는 문제를 발생하기 때문에 신뢰도가 높은 검사방법의 개발과 검사자의 기량향상을 위한 지속적인 노력이 필요하다고 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국원자력안전기술원의 2000년 원자력 안전규제 기술개발 연구비 지원으로 수행되었으며, PD-RRT에는 비파괴검사 전문업체인 (주)카이텍, 대한검사기술(주), 세안기술(주), 동양검사기술(주), 삼영검사ENG(주), 호남ENG(주), 한전기공(주), 한국중공업(현 두산중공업), KNDT&I(주) 등 총 9개 업체 15팀이 참여하였습니다. 관계하신 모든 분들께 감사드립니다.

## 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) B. Jones, "MATLAB Statistics Toolbox User's Guide", The Math Works, 1997
- (6) I. Manno, "Introduction to the Monte Carlo Method", Akademiai Kiado, Budapest, 1999
- (7) C. P. Robert, G. Casella, "Monte Carlo Statistical Methods", Springer, New York, 1999
- (8) NRC Bulletin No. 88-08, Supplement 1, 2 & 3, Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems.
- (9) 이종포, "원자력발전소 기기 가동중검사에 대한 신규 요건과 그 전망", 비파괴검사학회지 Vol.15, No. 2, 1995
- (10) B. Watkins, "Validation of Ultrasonic Testing Procedures and Operators", 8th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, ASM International, pp. 9-16, 1986
- (11) 이삼래, "원전 초음파검사 관련 기량검증 시스템 개발", KAERI/RR-1460/94
- (12) J. R. Dickens and D. E. Bray, "Human performance considerations in nondestructive testing", *Materials evaluation/September*, pp. 1033-1041, 1994
- (13) 박은수, 박익근 외 3인, "국내 가동중검사에서 발견된 결함에 대한 조사분석", KINS 연구결과보고서, 1998
- (14) 박익근, 박은수, 외 3인, "원전 압력용기 용접부의 결함보수 현황과 초음파검사의 신뢰도", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp.110-120, 1999
- (15) 강석철, "초음파검사 검증제도에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 97-104, 1995
- (16) 강석철, "비파괴검증 시험에 대한 현황 검

- 토”, 원전 기기설비 건전성평가 워크샵, pp.6(1-23), 1997
- (17) 이종포, 최하림, “원전 기기의 초음파탐상검사 시스템에 대한 기량 검증”, 한국비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 1, pp.29-39, 1993
- (18) 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
- (19) R. S. Figliola and D. E. Beasley, "Theory and Design for Mechanical Measurements", 2nd Edition, John Wiley, 1995