

원전 배관 초음파 비파괴검사의 신뢰도 평가 - PD-RR Test Results - (I)

박익근* · 박은수* · 김현목** · 박윤원*** · 강석철*** · 최영환*** · 이진호***

Reliability Assessment of Ultrasonic Nondestructive Inspection on Piping in NPP - The Result of PD-RR Test - (Part I)

Ik-Keun Park*, Un-Su Park*, Hyun-Mook Kim**,
Yoon-Won Park***, Suk-Chull Kang***, Young-Hwan Choi*** and Jin-Ho Lee***

Key Words: Ultrasonic Inspection, Reliability, Probability, ISI, PDI, POD

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 pinping 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 detection and length and depth sizing of cracks.

1. 서론

비파괴검사는 지금까지 모든 산업발전소의 안전운전에 있어서 본질적인 요소 중의 하나로 인식되어 가동전 또는 가동중에 구조적인 건전성을 비파괴검사로 확인하여 안전운전을 보장하는 수단으로 이용되고 있다. 1974년 ASME Code에 표준화된 비파괴검사 규격이 도입된 이래 지난 30여년간 전 세계적으로 많은 사고와 고장이 발생하여 원자력발전소의 안전운전을 보장하는 비파괴검사기술에 대한 신뢰성을 의심하게 되었다. 따라서 1970년대부터 원자력 선진국들이 중심이

되어 PISC(program for inspection of steel components)와 미국의 EPRI에서 수행한 PIRR(piping inspection round robin)등의 결과에서 기존의 비파괴검사방법은 모의 시험편에 있는 상당히 큰 결함도 검출하지 못하거나 정확하게 결함의 크기를 측정하는데 실패한 사례가 보고되었으며, 검사자의 기량이나 신체조건에 따라서도 측정결과의 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다⁽¹⁾.

이와 같은 사고/고장으로 각국의 규제기관에서는 비파괴검사의 효용성을 보장하기 위한 대책을 수립하고 있고, 이를 보완하기 위해서 원자력 선진국에서는 원전 전체의 안전성 제고를 위해 원전 배관계통에 대한 RIISI(risk informed in-service inspection) 방법과 초음파탐상검사 시스템의 기량 검증(performance demonstration initiatives;PDI) 요건이라는 새로운 비파괴검정시험 제도가 일부 도입되어 적용되고 있어 국내에서도 이에 대한 철

* 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소
** 한양대학교 대학원
*** 한국원자력안전기술원

저한 준비작업이 필요한 실정이다.

원전 배관 기기에서 결함의 발견 시 적용되는 파괴역학해석(fracture mechanics analysis;FMA)은 비파괴검사결과에 대한 100%의 신뢰를 전제하고 있으므로 가동전/가동중검사 결과의 신뢰도는 원전 배관기기의 건전성과 직결된다. 그러나 비파괴검사가 어느 정도 신뢰도를 가지고 있는지에 대한 평가가 국내에서는 거의 수행된 바가 없다.

본 연구에서는 원전 비파괴검사 규제요건의 기술적 근거를 확보하고, 원전 기기 건전성 평가 및 안전성 향상을 위한 합리적인 규제지침을 수립하기 위하여 국내 원전 가동중검사에 적용되거나 일반 산업계에 적용되고 있는 초음파탐상검사에 대하여 기량 검증 순회시험(performance demonstration round robin test;PD-RRT)에 의한 통계적 신뢰도를 평가하고자 한다.

2. 초음파검사 PD-RRT

초음파검사 PD-RRT의 주요한 목적은 현장환경 조건하에서 적용되고 있는 검사절차서로 결함검출이나 결함크기 측정성능에 영향을 미치는 여러 변수들을 평가하여 검출 유효성을 결정하는 것이다. 즉, 초음파검사 PD-RRT를 통해, 1)실제 수행된 ISI방법의 신뢰도를 평가, 2)첨단 NDE 기법의 신뢰도 평가 및 향상, 3)보다 효율적인 ISI를 확보하기 위한 요구사항 개선과 같은 기대효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 수행된 PD-RRT는 총 9개의 비파괴검사 업체가 참여하여 2개의 규격이 다른 배관 시험편을 검사하였다. 각각의 시험편은 원전에서 사용되는 용접방법과 동등하게 pipe-to-pipe 맞대기 용접부로 제작되었으며, 하나의 배관 시험편에는 2개의 원주용접부를 제작하여 EDM notch의 결함을 다양한 형태로 가공하였으며, 다른 하나의 시험편에는 TFC(thermal fatigue crack)와 EDM notch를 가공하였다.

초음파검사 PD-RRT에 참여하는 업체는 두 그룹으로 분류되었다. A 그룹은 원전가동중검사 참여업체이고, B 그룹은 일반비파괴검사업체이다. 원전가동중검사 참여업체의 경우에는 반드시 1개의 팀은 ASME Sec. XI Code의 요구사항을 충족하는 검사절차서의 적용을 원칙으로 하고, 다른



Photo. 1 UT PD-RRT specimen

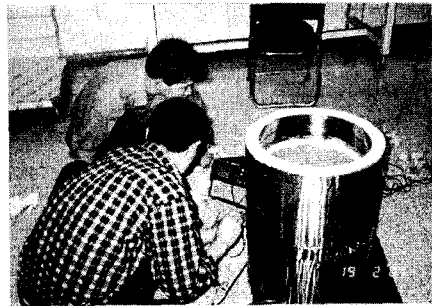


Photo. 2 UT PD-RRT

팀과 B 그룹은 제한 없이 원하는 절차서를 임의로 사용할 수 있도록 하였다. 모든 팀은 시험에 설계된 변수에 따라 모두 동일한 조건에서 수행되었다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 변수영향평가

통상적인 현장조건의 환경에서 검출확률(probability of detection;POD)과 오판확률(false call probability;FCP)은 다양한 스펙트럼으로 나타나며 이러한 다양한 조건의 스펙트럼에 영향을 미치는 검사와 재료의 조건을 정의하는 변수들을 시험의 설계변수라 한다. 본 연구에서는 한 변수가 다른 변수에 영향을 미치지 않는 이산적인 독립변수이며, 외부변수는 고려하지 않는다. 초음파검사 PD-RRT에서는 총 7개의 설계변수가 고려되었다.

Table 2는 검사그룹과 검사절차서에 따른 검출 성능을 요약하고 있다. 결함 크기의 분류는 채점 단위(grading unit)내에 결함이 없는 경우에는 Blank라하고 시험편 두께와 결함깊이의 비와 결함의 길이에 따라 Size 1, Size 2, Size 3, Size 4로 결함크기를 분류하였다. Table 2에서 결함의 크기가 증가할수록 검출확률이 높아짐에 따라 검출 성능은 좋아지고 있음을 알 수 있다. 또한, A 그룹의 ASME 방법이 0.152의 가장 적은 FCP를 나타냈으며, B 그룹의 경우에는 ASME 절차가

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

Table 3 Summary of detection performance for specimen variables

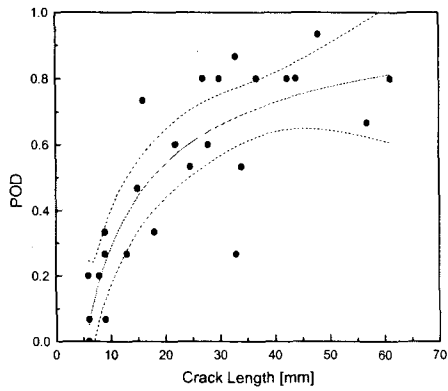
Size Type	Size 1	Size 2	Size 3	Size 4
EDM Notch				
POD	--	0.800	0.800	--
# Insp.	--	15	15	--
TFC				
POD	--	0.567	0.667	0.800
# Insp.	--	30	15	15

Advanced 절차보다 검출성능이 우수하게 나타났다. 이와 같은 비교를 통하여 어떠한 변수가 검출성능에 영향을 미치고 있는지를 파악할 수 있으며, 원인분석을 통하여 검사성능을 향상시킬 수도 있다.

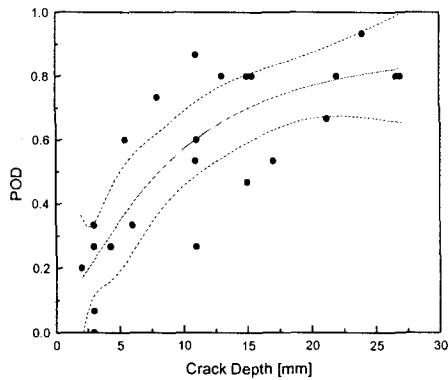
시험편 변수인 결함의 크기는 검출성능에 가장 밀접하게 영향을 주고 있으며, 검사그룹이나 검사절차 역시 검출성능에 미소한 영향을 주는 것으로 나타났다. Table 3은 시험편 변수인 결함의 유형에 따른 검출성능의 비교를 나타내고 있다. EDM notch가 비교적 자연결함과 유사한 TFC에 비해 검출확률이 높게 나타난 것으로 보아 실제 자연 크랙의 경우에 대한 검출확률은 보다 낮게 나타날 것으로 예측이 가능하다. 따라서 결함의 유형이 검출성능이 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

3.2 검출성능 평가

Fig. 1은 초음파검사 PD-RRT에 참여한 모든 팀의 검출성능을 보여주는 POD 곡선을 나타낸다. 따라서 이 곡선은 국내 초음파검사의 검출성능을 나타내는 표본이라 할 수 있다. 크랙의 크기가 증가할수록 검출확률은 증가하게 된다. 이상적인 검출확률 곡선은 95% 신뢰구간의 폭이 좁으면서 POD가 작은 크랙에서부터 1로 나타나는 경우이다. 보다 정확한 POD 곡선을 평가하기 위해서는 POD 함수가 갖고 있는 회귀변수를 평가하는 것이다. 그러나 이러한 회귀변수에 물리적인 의미를 부여하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 각각의 설계변수에 따른 회귀변수의 변화를 통해 POD를 추정하여 검출성능을 평가할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 1 Logistic curve fit to POD data with 95% bounds(All teams) (a) POD vs length, (b) POD vs depth

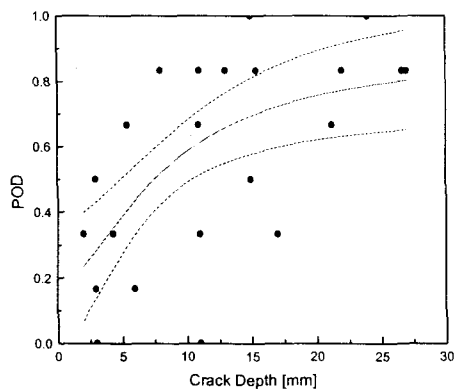
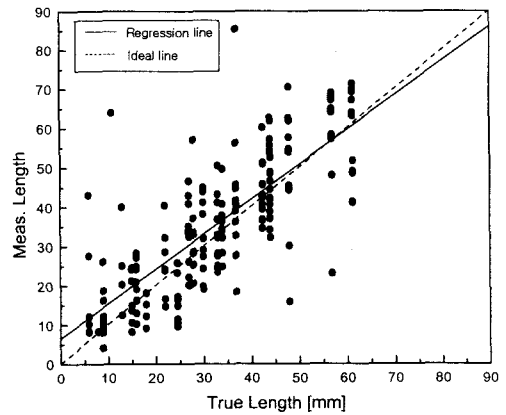


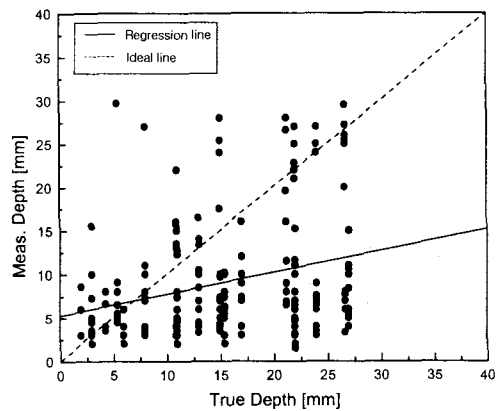
Fig. 2 Logistic curve fit to POD data with 95% bounds(Group A), POD vs depth

3.3 결함크기측정 평가

Fig. 3은 초음파검사 PD-RR Test에 참여한 모든 팀의 데이터에 대한 결함크기 평가를 나타내는 선형회귀선이며, 국내 초음파검사의 결함크기 측정기량 수준을 가늠해 볼 수 있다. Fig. 3 (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 차가 크기 때문에 측정값은 실제 결함 깊이와 큰 편차를 갖고 있다고 판단할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Regression fit of results data of all teams

Table 4 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 5 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

대부분의 깊이 측정이 실제의 결함보다 작게 측정된 것으로 나타났다. Fig. 3의 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 4에서와 같이 결함의 길이 측정은 상당히 우수한 것으로 나타났으나, Table 5에 나타난 결함 깊이 측정의 경우에는 대부분 불량한 것으로 나타났다.

3.4 팀 오차 분석

지금까지 검사성능 변수에 따른 검출성능기량과 결함크기측정 기량에 대한 분석을 수행하였으며, 본 절에서는 참여한 15개의 각 팀에 대한 검출성능과 결함크기측정 기량에 대해 분석하고자 한다. 따라서 위의 분석에 적용한 기법들을 각 팀 별마다 적용하고, ASME Code Sec.XI, App.VIII의 판정기준과 비교하여 참여한 팀의 정확성과 신뢰성에 대한 평가를 수행하였다. 본 초음파검사 PD-RRT에 사용된 시험편의 총 Grading unit이 34개이며, 이중 결함이 있는 Grading unit이 24개, 결함이 없는 Grading unit은 10개이다.

Table 6은 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.

Table 6 Summary of inspection performance for teams

Team No.	Group	Method	Detection (D/FC)*	Sizing	
				Length M.D.(mm)	Depth RMS(mm)
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

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

4. 결 론

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

1) 검사 그룹이나 절차서 변수는 검출성능에 큰 영향을 미치지 않았으나, 시험편 변수인 결함크기와 결함유형 변수는 검출성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

2) 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 재평가를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

3) 초음파검사 PD-RRT를 이용하여 국내 초음파검사의 검출성능과 크기측정성능에 대한 신뢰도 평가가 가능하였다.

3) 향후 연구 계획으로는 자동 초음파검사 PD-RRT 결과의 통계적 신뢰도의 평가를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국원자력안전기술원의 2000년 원자력 안전규제 기술개발 연구비 지원으로 수행되었으며, PD-RR Test에는 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 15개 팀이 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) 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 기량검증 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) 박익근, 박은수, 외 3인, "원전 압력용기 용접부의 결함보수 현황과 초음파검사의 신뢰도", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp.110-120, 1999
- (11) 강석철, "초음파검사 검증제도에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 97-104, 1995
- (12) 강석철, "비파괴검증 시험에 대한 현황 검토", 원전 기기설비 건전성평가 워크샵, pp.6(1-23), 1997
- (13) 이종포, 최하림, "원전 기기의 초음파탐상검사 시스템에 대한 기량 검증", 한국비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 1, pp.29-39, 1993
- (14) 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
- (15) R. S. Figliola and D. E. Beasley, "Theory and Design for Mechanical Measurements", 2nd Edition, John Wiley, 1995