

원전 압력용기 용접부 초음파탐상, 결함크기 평가 및 결함 수리 경험

이 종 포* · 박 대 영* · 임 형 택* · 김 병 철* · 주 영 상*

Experience in Ultrasonic Flaw Estimation and its Excavation on the Weldments of Nuclear Pressure Vessels

J. P. Lee, D. Y. Park, H. T. Lim, B. C. Kim, and Y. S. Joo

Abstract The importance and role of preservice and inservice inspection(PSI/ISI) for nuclear power plant components are intimately related to plant design, safety, reliability and operation etc.. The Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) has been performing PSI/ISI in Korea since the PSI of Kori nuclear power plant, unit 1 had been performed in 1977. KAERI has localized PSI/ISI technology and has done much experience in ultrasonic flaw detection, evaluation and its excavation on the weldments of large pressure vessels. The results of flaw estimation using ultrasonic examination are compared with the actual flaw sizes revealed by field excavation. KAERI's experience regarding PSI/ISI was described and some discussions were added.

1. 서 론

원자력발전소 가동전·중 검사는 원전의 설계 개념, 안전성, 신뢰도 및 가동률 등과 밀접한 관련이 있으며, 그 중요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않다. 원전 가동전·중 검사는 비파괴검사가 거의 대부분을 차지하고 있으며 국내 비파괴검사 기술은 고리 원전 1호기 가동전검사 수행 당시인 1977년에는 선진 외국에 비해 많이 뒤떨어져 있었을 뿐 아니

라 원전 검사 수행경험이 전무하였으므로 고리 1호기 가동전검사는 외국 기술진에 의존할 수 밖에 없었다. 그러나 연구소는 1979년 부터 기술 국산화를 시작하여 1980년대 중반에 이를 완성하였으며¹⁾, 현재 국내 모든 원전의 가동전·중 검사를 주관하여 수행해오고 있다. 아울러 새로운 검사 기술의 개발과 이의 현장 적용을 병행하고 있다.

본고에서는 지난 12년간 연구소가 원전 가동전·중 검사를 수행해오면서 증기발생기, 가압기 등과

* 한국원자력연구소 비파괴시험 연구실
접수 : 1991년 2월 1일

같이 대형 압력용기 용접부에 대한 초음파 검사(UT)를 이용한 결함 검출, 이들 결함의 평가, 불합격 결함들에 대한 현장 수리(Field Excavation)와 관련하여 주요 경험사항을 기술하였다. 구체적인 내용으로는 PSI/ISI UT 결함 크기 평가, 제작시 수행한 비파괴검사 결과, UT 결함에 대한 현장 RT 결과, 결함 제거시 측정된 실제 결함 크기 등을 비교 검토하였다. 또한 이들 업무와 관련된 주요 경험내용 등을 기술함으로써 원전 가동전·중 검사 업무중 대형 압력용기 초음파탐상에 의한 결함평가 및 결함수리시에 참고가 되었으면 한다.

2. 결함평가 방법 및 절차

2-1. 초음파 결함 평가 절차

초음파를 이용한 결함평가에는 여러가지 방법이 있으며, 주로 결함 검출, 결함 특성 파악, 결함 크기 평가 등 세 단계²⁾를 거친다. 원전 가동전·중 검사 규격인 ASME B & PV Code, Sec. XI³⁾에 규정한 결함 평가 절차는 다음과 같다.

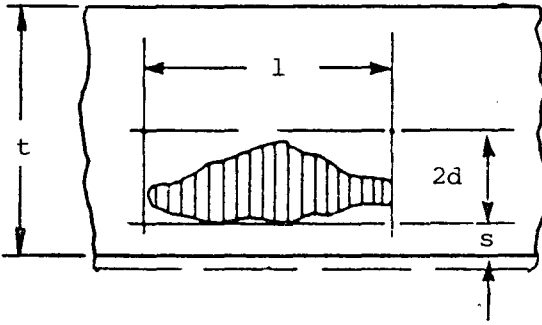


Fig. 1 Schematic diagram of planar flaw sizing evaluation

- (1) 결함 지시는 결함을 포함하는 직(정)사각형으로 나타낸다.
- (2) 결함의 길이(1)는 부품의 내압을 받는 면에 평행한 변의 길이로 한다.
- (3) 결함의 높이는 부품의 내압을 받는 면에 수직인 변의 길이(2d)로 한다.
- (4) 피복 두께는 두께(t)에 포함시키지 않는다.
- (5) a/l은 0.5를 초과하지 못한다.

- (6) 결함의 합부판정은 a/l에 대한 a/t(%)로 한다.

위에서 결함의 높이와 관련된 "a"는 그 결함이 표면결함이나 또는 표면하 결함이나에 따라 달라진다.

- (i) $0.4 d > s$: 표면결함, $a = d$
- (ii) $0.4 d \leq s$: 표면하 결함, $a = 2d + s$

단, s는 표면에서 결함까지 떨어진 거리 공칭 벽 두께 51mm(2 inch)를 초과하는 탄소강으로 된 압력용기 용접부 초음파탐상의 경우 ASME Sec. V⁴⁾를 적용하도록 되어 있는바, 결함의 끝점은 다음과 같이 결정한다.

즉, 결함 상단 및 하단(높이)은 신호진폭이 100% DAC를 초과할 경우 1/2 Max.로, 신호 진폭이 100% DAC 이하인 경우 50% DAC으로 결정하며, 결함의 좌단 및 우단(길이)은 50% DAC으로 결정한다. 그러나 라미네이션(Lamination) 같은 결함은 결함의 면적으로 합부를 평가하기 때문에 위의 사항이 적용되지 않는다.

2-2. UT 장비, 탐촉자 및 보정시험편

가압기, 증기발생기 등은 외경이 20 inch를 넘기 때문에 평판인 시험편을 사용할 수 있으며 거리 진폭 보정곡선(DAC Curve)을 설정기 위한 인공 결함은 규격⁴⁾에 따라 측면공(Side Drilled Holes)과 내외면 2% T(T: 시험 두께)의 노치를 사용하였다. 초음파 탐상기는 Sonic Mark I 수동장비를, 탐촉자는 1~5MHz, 1/2" R(Round), 1" R, 1/2" x 1" 등을 사용하였다.

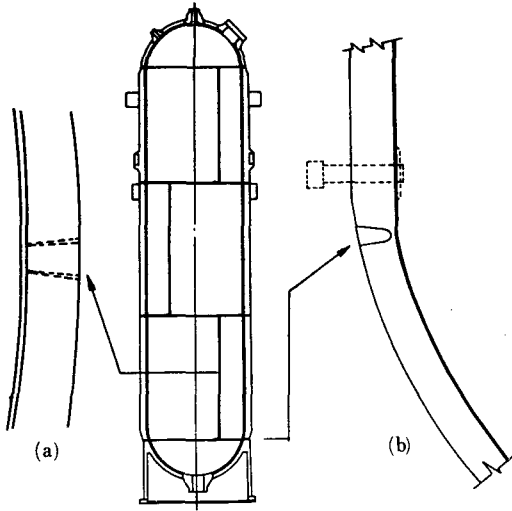
3. 결함 검출, 크기 평가 및 결함 수리 사례

3-1. 가압기 원주 용접부 UT 결함

3-1-1 용접 절차, UT 결과, 공장 및 현장 RT 결과

고리 원전 4호기 가동전 검사시(1984) 가압기 "Lower Shell-to-Lower Head" 원주 용접부위 초음파 탐상에서 20개의 불합격 결함이 검출 평가되었다.^{5,6)}

동 용접부위는 Fig. 2와 같으며 외부에서 잠호아크용접(SAW)을, 내부에서는 아크 가우징 후 피복아



(a) Longitudinal weld(shell to shell)
 (b) Circumferential weld(lower shell to lower head)

Fig. 2 Pressurizer drawing

크용접(SMAW)을 하였다. 결합검출 및 평가에서는 2.25MHz, 1/2" x 1", 45° 및 60° 굴절 횡과 탐촉자

를 사용하였으며 결합 평가 결과는 Table 1.과 같다. 20개 결합중 대부분은 45° 사각빔 보다는 60°사각빔에서 더 크게 평가되었으며, Table 1.의 결합평가 결과는 두 탐촉자중 더 크게 평가된 것을 기준하였다. 20개 결합중 반은 표면결합이었으며, 나머지 반은 표면하 결합이었다.

동 가압기는 ASME Sec. III⁷⁾에 의거 제작토록 구매자와 공급자간에 제약이 되었고, 공장 검사 역시 ASME Sec. III 이외의 검사요건(예 : UT)을 추가하지 않아 제작시의 UT는 수행되지 않았다. 이는 1971년 미국의 Hatch Plant PSI 당시 UT 불합격 결합 검출과 현장 수리⁸⁾ 경험 이후 미국내에서는 원전 대형 압력용기 구매시 ASME Sec. III의 RT 요건 이외에 UT를 추가하는 것이 관례였으나 국내에서는 이를 파악하고 있지 못한 상태였다. 본 가압기 결합의 Field Repair를 경험한 이후 영광 3, 4호기부터 제작 UT가 구매계약에 추가되었으며, 울진 1, 2호기는 프랑스 규격⁹⁾에 따라 UT를 공장에서 수행하였다. 제작 당시 수행한 방사선 투과검사는 Panoramic RT Co-60였으며 가동전검사시 초음파탐상 결과

Table 1. Twenty UT defects on the girth weld of a pressurizer

Ind. No.	Ampl.* % DAC	S*	Thru-* wall	Ind. Length	Ind. No.	Ampl.* % DAC	S*	Thru-* wall	Ind. Length
1	125	5	22	25	11	200	13	19	41
2	200	13	23	38	12	100	13	15	29
3	159	0	14	53	13	178	10	23	38
4	224	0	14	48	14/15*	251	8	30	130
5	251	0	23	38	16	316	0	24	98
6	159	0	18	29	17	70	19	10	51
7	159	0	20	48	18	447	4	29	64
8	125	0	25	44	19	112	17	19	38
9	200	0	25	70	21	159	9	18	19
10	80	0	18	29	23	63	18	13	6

Note* : 1. Ampl. % DAC : Percentage of indication amplitude per DAC.
 2. S : Distance from cladding interface to the flaw
 3. Thru-wall : Through-wall dimension of UT indication
 4. Ind. 14/15 : Considered single planar flaws per IWA-3330.

불합격된 결함에 대해 "Shop RT" 기록(Records)을 검토한 결과 관련 결함을 발견할 수 없었다. 현장에서 20개의 초음파검사 불합격 결함에 대해 방사선투과검사를 수행한 결과는 Table 2.와 같다. 20개 결함 중 #14/15번은 "Straight Shot"에서 나머지 7개 결함은 UT 결과를 이용한 "Angulation Shot"에서 RT로 확인되었고 나머지 결함은 RT로 검출되지 않았다.

당성이 있으나, 압력용기 건전성 측면을 고려하여 최종수리 결정이 있기까지는 오랜 시간(3개월여)이 소요되었다. 결국 RT로 확인된 UT 결함을 먼저 수리하고 수리시 실제로 결함이 확인될 경우 UT 결함을 수리하도록 합의를 본 후 먼저 7개의 결함의 수리를 착수하게 되었다.

3-1-2 Repair(결함제거) 결정 과정 및 책임 문제

UT 불합격 결함에 대한 처리 및 책임문제가 크게 부각되었으며, 더구나 Repair는 건설 공기와 밀접한 관련이 있으며, 현장에서의 Repair는 많은 어려움을 수반하기 때문이다. 공급자는 공급계약에 제작검사 UT 요건이 없으므로 UT 결함에 대한 책임을 질 수 없으며, 공장에서의 RT 요건을 충족시켰으므로 단지 "Straight Shot"에서 발견된 결함만 수리하겠다는 주장을 하였으나, 이는 기술적으로 현장 RT에서 미검출된 UT 결함은 결함특성상 제작시의 RT에서 발견되기 어려운 점을 감안할 때 공급자의 주장도 타

3-1-3 결함의 연삭제거, 실제 결함크기 및 UT 결과 비교¹⁰⁾

연삭에 의한 결함 제거작업중 확인된 실제 결함크기는 Table 2.와 같다. Fig. 3은 결함 제거 작업중 실시한 PT 지시를 나타낸 것이며 Fig. 4는 결함제거 작업이 끝난 후의 Excavation Cavity를 나타낸 것이다. Table 2.에 표시된 MT 결함 길이는 Grinding Depth에 따라 측정된 MT 결함 길이들중 가장 긴 것을 기준하여 나타낸 것이며 실제 결함의 총길이는 Table 2.에 나타낸 수치보다 최소한 같거나 크다고 할 수 있다. 총 20개의 결함중 단지 8개 결함만이 여러차례의 현장 RT에서 확인된 것은 결함이 방향성을 갖고 있는 Crack성 결함이었으며, 비교적 결함 개구면이 큰 것만 Angulation Shot에서 검출되었다

Table 2. Comparisons of UT results with those of RT & MT (mm)

Ind. No.	UT Length	RT Result	MT* Length	UT* (s+2d)	Excav. Depth*	Ind. No.	UT Length	RT Result	MT* Length	UT* (s+2d)	Excav. Depth*
1	25	N/D*	Missed*	27	41	11	41	N/D	33	32	35
2	38	N/D	17	36	31	12	29	N/D	27	28	41
3	53	LOF*	17	14	15	13	38	N/D	21	33	36
4	48	LOF	45	14	20	14/15	130	LOF	110	38	34
5	38	N/D	Missed	23	34	16	98	LOF	40	24	25
6	29	LOF	25	18	26	17	51	N/D	Missed	29	32
7	48	LOF	53	20	24	18	64	N/D	43	33	33
8	44	LOF	50	25	23	19	38	N/D	Missed	36	29
9	70	LOF	25	25	26	21	19	N/D	24	27	37
10	29	N/D	22	18	20	23	6	N/D	24	31	37

- Note* : 1. N/D : Not detected by RT.
 2. LOF : Lack of fusion, rejectable RT indication
 3. Missed : Failed to leave MT records
 4. MT Length : MT flaw length revealed by grinding
 MT flaw length is the max. instantaneous one.
 The actual total flaw length is at least greater than the dimension in this table
 5. UT(s-2d) : Maximum depth of UT indication from clad interface.
 6. Excav. depth : Max. depth of flaw excavation from clad interface.

고 볼 수 있다.¹¹⁾ UT 및 Excavation 결과를 비교할 때 S+2d와 Excavation Depth, 즉 결함의 최대 깊이는 아주 잘 일치함을 알 수 있으며 실제 결함 제거시 나타난 MT 결함 길이는 대부분 UT 평가치보다 작게 나타난 바, 이는 앞서 언급한 바와 같이 연삭 단계별 MT 결과중 순간 최대치를 나타내었기 때문이며, 각 단계별 결함을 종합하여 총 MT 길이(결함 최좌단-결함 최우단=길이)로 나타내었을 경우 좀더 UT 결과에 근접하였을 것으로 추정된다. MT 결함중 "Missed"로 표시된 것은 Grinding Depth에 따른 MT를 수행하지 않았거나 MT를 하였다. 하더라도 Excavation Cavity의 형상에 기인하여 Cavity 내에 자장이 충분히 형성되지 못해 정확한 MT 결과를 얻지 못한 것을 의미한다. 그렇지만 결함은 실제 존재하였던 것으로 추정할 수 있다. 결함 크기 평가에 있어 적용하는 기술, 장비 및 탐촉자, 검사자, 평가자 뿐만 아니라 실제 결함의 여러가지 특성에 따라 평가치와 실제 결함의 크기는 상당한 차이를 나타낼 수 있음을 감안할 때 상기 UT 평가 결과는 실제 결함크기와 잘 일치함을 알 수 있다.



Fig. 3 PT Ind. revealed by grinding

Fig. 4 Excavation cavity

이와같은 가압기 UT 결함 검출, 평가 및 결함 제거는 국내에서는 중요한 첫경험이었으며, 여기서 도출된 몇가지 유념해야 할 사항은 다음과 같다.

첫째, 결함의 제거시 Reference Marking에 의해 실제 결함크기를 보다 정확하게 측정해야 한다.

둘째, 공급자측을 기술적으로 이길 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

셋째, 결함제거시 MT 수행은 Prod법을 사용해야 한다.

3-2. 가압기 축 용접부 UT 결함¹²⁾

3-2-1 UT 결과, 공장 및 현장 RT 결과

영광원전 2호기 가동전검사시(1986) 가압기 축 용접부(최하단) 초음파 탐상에서 여러개의 결함이 검출된 바, 2개의 결함이 최종 불합격 결함(Sec. XI, 1983 ed)으로 평가되었다. 동 용접부 형상은 Fig. 2와 같고 외부에서는 잠호 아크 용접을 내부에서는 피복 아크용접을 하였다. 가동전검사시 사용하였던 탐촉자는 Table 3.에 나타난 바와 같이 2.25MHz, 3.5MHz, 5MHz, 크기는 1/2" x 1", 1" R, 1/2" R, 굴절각은 44°~61°의 횡파탐촉자를 사용하였다. 불합격된 2개의 결함에 대한 평가 결과는 Table 3.과 같다. 여러가지 탐촉자중 결함이 가장 크게 평가된 2.25 MHz, 1/2" x 1", 2.25MHz, 59° 횡파 탐촉자를 사용한 결과(7번 결함) 및 44° 횡파, 2.25MHz, 1/2" x 1" 탐촉자 사용 결함 평가 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 위와 같이 여러종류의 탐촉자를 사용한 것은 공급자측에서 1984년 고리 4호기 PSI 당시 연구소에서 검출한 UT 결함을 수리한 경험이 있는 바, 결함의 크기를 정확하게 평가한다는 명분아래 다양한 탐촉자를 사용토록 구매자에 요구하였기 때문이다. 초음파 탐상후 검출된 결함에 대해 Shop RT Records를 검토한 결과 해당 부위에는 결함 지시가 없었으며, 불합격 UT 결함에 대해 현장에서 RT를 수행한 결과 UT 결함이 확인되었다. 결함 지시는 균열성 결함이었다.

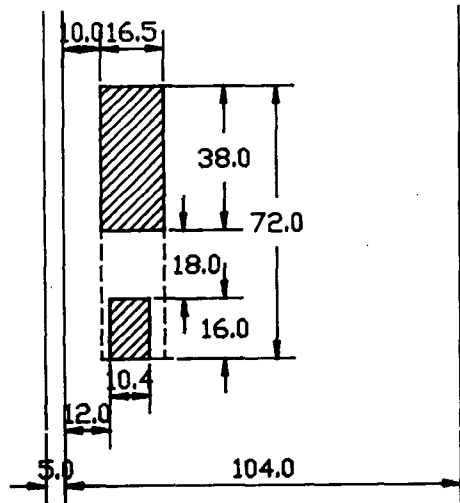


Fig. 5 UT indication evaluation results.

Table. 3 The Results of Ultrasonic Flaw Sizing
(Pressurizer Longitudinal weld)

(단위 : inch)

S / N	Ind. NO	Search Units			Amp1 % DAC	Size of Indications			Acceptability			
		Angle (deg.)	Freg MHz	Size (inch)		S (inch)	Thruwall (inch)	Length (inch)	a/1	a/t (%)	a/t (%) _a	A or U
1	7	59°	2.25	1/2 x1	159	0.4	0.65	1.5	0.2	7.3	3.6	U
2	7	61°	3.5	1.0 R	112	0.70	0.35	0.75	0.2	3.7	3.6	U
3	7	61°	3.5	1/2 R	112	0.70	0.39	0.75	0.27	4.9	4.3	U
4	7	61°	5.0	1/2 R	100	0.80	0.31	0.5	0.3	3.7	4.6	A
5	7	56°	3.5	1/2 R	90	0.60	0.34	0.8	0.19	3.7	3.5	U
6	7	56°	5.0	1/2 R	90	0.55	0.25	0.70	0.14	2.4	3.1	A
7	7	61°	2.25	1.0 R	251	0.70	0.35	1.20	0.17	4.9	3.4	U
8	4	44°	2.25	1/2 x1	90	0.47	0.41	0.65	0.31	4.9	4.7	U
9	Other Transducers gave no dimension.(Amp1. is less than 50% DAC)											

3-2-2 실제 결함 크기와 UT 결함 평가 결과 비교

동 가압기는 비록 공급 계약시 제작 UT 검사 조건이 부가되지 않았어도 이들 결함은 현장 RT에서 불합격 결함으로 재확인 되었기 때문에 쉽게 공급자 측에서 공급자 부담으로 수리 결정이 이루어졌다. 불합격 결함을 연삭 제거하면서 나타난 결함지시는 Fig. 6과 같으며, 초기 연삭깊이가 너무 깊어 결함의 시작점 즉, 결함의 하단점(S Dimension)을 측정치 못하였다. 연삭깊이 15, 20, 25, 30mm에서의 결함 길이는 각 67, 75, 73, 84mm였고 d=33mm에서 결함이 완전히 제거되었다.



	Grinding Depth	MT Flaw length
(1)	15 mm	67 mm
(2)	20 mm	75 mm
(3)	25 mm	73 mm
(4)	30 mm	84 mm
(5)	33 mm	Flaw was removed

Fig. 6 MT results of UT defects revealed by excavation.

결함 제거시 측정된 MT 지시를 재구성하여 실제 결함크기를 Fig. 7에 표시하였다. 가압기 내부 표면에서 연삭하면서 MT 지시를 측정하였으나 위에서 언급한 바와 같이 내부 표면으로 부터 연삭 깊이를 증가시키면서 MT를 수행하여 결함의 시작점(결함 하단, S Dimension)을 측정하였어야 하나 초기 연삭 깊이가 너무 깊어 첫 MT 결과 67mm 결함지시를 얻은 바 실제 결함의 정확한 시작점은 편의상 결함의 하단(Fig. 7의 좌측 점선)을 UT결과와 일치시켜 그렸다. 그러나 실재는 이보다 더 안쪽 표면에 가까

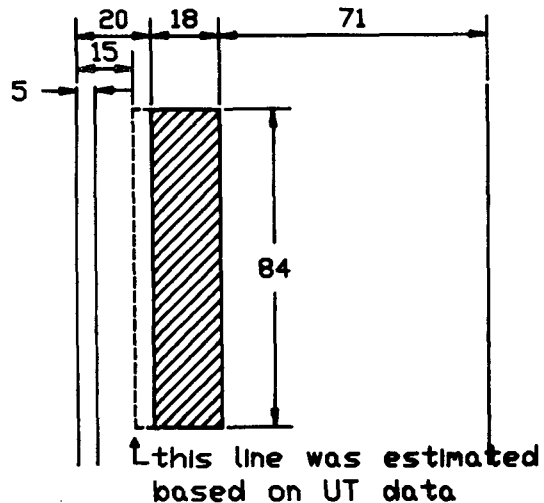


Fig. 7 Flaw size reconstructed using MT results after excavation.

을 것으로 추정된다.

Fig. 5의 UT 결과(최대로 크게 평가된 것)와 Fig. 7의 실제 결함 크기를 비교할 때 UT 결과가 실제 결함보다 과소 평가되었음을 알 수 있다. 따라서 용접결함의 크기 평가에 있어 신중을 기하여야 할 것으로 생각된다.

3-3. 증기발생기 원주 용접부 UT 결함

3-3-1 용접 절차, UT 결과 및 RT 결과

1987년 울진 원전 2호기 가동전 검사시 증기발생기 "Upper Shell-to-Transition Cone" 용접부에서 가동전 검사 초음파탐상에서 불합격 결함이 검출되어 보수하였다. Fig. 8은 증기발생기의 용접부 형상을 나타내며 용접은 외부에서 잠호 아크용접을 하고 내측에서 Back Plate를 연삭 제거한 부위이다. 초음파탐상 결과는 Table 4.와 같으며 7번 결함을 제외하면 모두 "No Recordable Size"의 결함이었다. 압력용기 제작 공정에서의 비파괴검사는 RCC-M Code에 의거 동 용접부에 대해 RT/MT/UT가 수행되었으며 최종 합격처리되어 현장에 설치되었다. RCC-M 규격에서 요구하는 UT 요건과 ASME Sec. XI, V에서 요구하는 UT 요건은 서로 상이하지만 결함 검출면에서 RCC-M 규격이 더 엄격하여(인공결함의 SDH 크기, Recording Criteria 등) 제작 UT시는 PSI시 기록되지 않는 지시 일부도 "Shop Records"에 기록되었지만 결함 특성 판정(Planer or Volumic)과, 결함 위치 특성상 "Geometric Indication"이나 실제 결

함이나의 판단에 문제가 있었다. 그러나 현장 PSI UT 결과 7번 결함이 불합격 결함으로 평가되었고 나머지 결함도 비록 신호진폭은 50% DAC 미만의 "No Recordable" 크기가었지만 결함 양상이 7번 결함과 유사하여 기록하였다. 현장 RT 수행결과 UT 결함이 RT로 확인되지 않았다. 이는 결함의 크기가 작고 아주 미세한 결함이었기 때문으로 판단되었다.

3-3-2 결함 제거 및 UT 결과 비교

증기발생기 내면쪽에 접근이 가능하여 "Geometric Indication" 여부를 확인한 결과 실제 결함으로 판명되었으며 7번 결함에 대해 내부표면에서 MT를 수행하였으나 확인되지 않았다. 표면을 연삭한 후 MT를 수행한 결과 결함이 확인되었고, 비록 신호진폭이 작았지만 결함 특성이 동일하게 평가되었던 나머지 결함들은 연삭제거가 용이한 위치에 있어 모두 연삭 제거하였다. 이들 결함의 실제 크기는 Table 4.에 표시한 바와 같다. 상기 결함들은 비록 일부는 관련 Code에 함격한 결함들이라 하여도 내압을 많이 받는 내부 표면 가까이에 위치한 결함들로써 원전 수명기간 동안 사용중 성장 가능성이 높다. 특히 동 결함들은 내부표면 근방에 위치하여 "Geometric Indication"으로 판단하고 지나치기 쉬운 결함으로 국내는 아직도 용접부 Root 부위 지시에 대한 평가 기술이 부족한 상태이므로 이에 대해 검사자에 대한 실제 결함 시편으로의 훈련이 절실하다 하겠다.

4. 결 론

국내의 경우 체적 검사법으로서 초음파탐상을 적용해온 역사가 오래되지 않기 때문에 기술의 축적 및 저변 확대 등이 미흡함과 아울러 초음파탐상 기술의 정확성 및 신뢰도에 있어 개선의 여지가 많다고 할 수 있다. 특히 실제 초음파탐상 결과와 파괴 시험 결과를 비교하여 어떤 초음파 탐상 기술이 실제 어느정도 정확한지 가늠할 수 있는 데이터와 경험의 축적이 절실하다. 본고에서는 원전의 가동전·중 검사시 실시되는 대형 압력용기 용접부 초음파탐상에서 결함 검출, 크기 평가, 불합격 결함의 수리 등과 관련하여 지난 10여년간의 주요 경험사례를 요

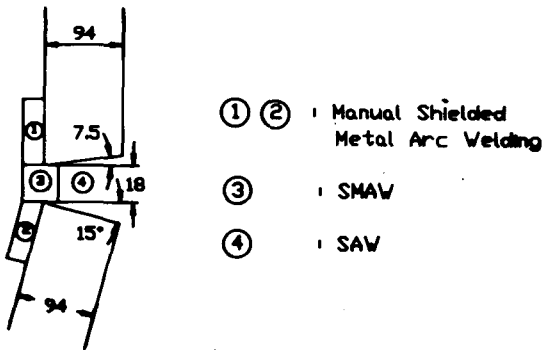


Fig. 8 Weld joint preparation of S/G upper shell to transition cone.

Table. 4 The Comparisons Between UT Results and Excavation Data.

S / N	UT Data						Excavation Results			
	% DAC	Lmax (inch)	W (inch)	M. P (inch)	Angle (deg.)	Loc.	Flaw Length (mm)	Grind- ing depth	Type of Ind.	t (mm)
1	36	85	4	5.3	45°	shell	19	1.5	linear	93.5
2	32	84-3/4	7-5/8	7.9	60°	cone	19	1.5	linear	93.5
3	36	121-3/4	4-1/2	5.3	45°	shell	10	3.0	inclusion	93.7
4	36	128-1/2	4-1/4	5.2	45°	shell	4	3.0	inclusion	93.7
5	36	259	4-1/4	5.2	45°	shell	16	4.0	linear	93.5
6	36	259	4-1/4	5.2	45°	cone	16	4.0	linear	93.5
7	63*	437-5/8	4-5/8	5.2	45°	shell	37	4.5	linear	91.9
8	40	480-1/2	4-3/4	5.2	45°	shell	5	4.5	linear	91.4

* Indication Length=0.62 inch

약 정리하였다. 따라서 여기에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, UT 결과 불합격 결함을 수리함으로써 실제 결함크기와 UT 결함평가 결과를 비교 할 수 있는 중요한 경험을 쌓았다.

둘째, RT와 UT는 상호 보완적 관계에 있으며 중요한 압력용기의 경우 규격에 덧붙여 체적 검사법으로써 두 검사법을 병용하여야 한다.

셋째, 검사법, 사용 탐촉자 주파수, 굴절각 등의 선택은 실제 실험(Performance Demonstration)을 통하여 결정되어야 한다.

넷째, 신뢰성 있는 UT의 적용을 위해서는 UT 결함 평가와 결함 제거시 측정된 실제 결함크기를 측정 비교함으로써 정확한 결함검출, 평가를 위한 기술 개발 및 허용기준의 선정에 대한 UT 신뢰도를 쌓아가야 한다.

끝으로 국내 원전의 가동년수 증가에 따른 사용중 발생 결함(피로 균열 등)이 예상되므로 이들 결함의 검출 및 평가, 검사장비의 자동화, 각종 Computer Software에 의한 신호처리/분석, 결함 성장 감시 등에 보다 많은 투자와 기술개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

References

1. Day Y. Park, Jong-Po Lee, Korean Experience

in Inservice Inspection, Proceeding of "9-th International Conference on Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry", ASM International, Tokyo, Japan, April 25~28, 1988.

2. George J. Gruber, Development of Multibeam/Multimode Ultrasonic Flaw Identification Procedures, Proceedings of 15th Educational Seminar for Energy Industries, San Antonio, Texas, April 18-21, 1988.
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components(1983 ed.)
4. ASME B and PV Code, Section V, Nondestructive Examination(1983 ed.)
5. Day. Y. Park & J. P. Lee, Detection, Evaluation and Repair of the Code Rejectable UT Indications on the Pressurizer C4 Weld of the Kori Nuclear Plant, Unit 6, Vol. I - Vol. IV, Korea Advanced Energy Research Institute, 1985.
6. 이종포, 김병철, 임형택, 1984~1985 Preservice & Inservice Inspection of Class 1, 2 and 3 Components of the Kori Nuclear Plant, Unit 6, Vol. 1 thru Vol. 29, KAERI, 1985.
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NB-Class 1 Components(1983 ed.)

8. Summary of the Detection and Evaluation of Ultrasonic Indications, Edwin I Hatch Unit 1 Reactor Pressure Vessel, Southwest Research Institute, January, 1972.
9. Design & Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands RCC-M, Section III, Examination Methods, AFCEN, (1981 ed.)
10. J. P. Lee, S. L. Lee, H. T. Lim and Day Y. Park, "Ultrasonic/Radiographic Flaw Sizing and its Excavation on Heavy Section Welds", Proceedings of 12th World Conference on NDT, AMSTERDAM, 1989.
11. 원승환, 이의중, 방사선 투과검사, 1990년도 제1회 산업응용 토론회, 보문집, 한국비파괴검사학회, 1990년
12. 박대영, 이종포 외 12인, "원자력 발전소 가동전·중 검사 현황 및 주요 결함", 한국원자력연구소, 1990.