

## 원전 ISI UT 자동 결함평가 및 판정 모듈 개발

박 익근\* · 박 은수\* · 김 현묵\* · 김정석\* · 엄 병국\*\* · 이 종포\*\*

### Development of ISI UT Auto Flaw Evaluation and Acceptance Module of Nuclear Power Plants

Ik Keun Park, Un Su Park, Hyun Mook Kim, Chung Seok Kim  
Byong Guk Um, Jong Po Lee

**Key Words** : nuclear power plant, pre-/in-service inspection(PSI/ISI), database program, ultrasonic testing, auto flaw evaluation, acceptance module

#### Abstract

The importance and role of pre-/in-service inspection(PSI/ISI) for nuclear power plant(NPP) components are intimately related to plant design, safety, reliability, operation, etc. In this paper, for an effective and efficient management of large amounts of PSI/ISI data in NPPs, an intelligent database program(WS-IDPIN) for PSI/ISI data management of NPP was developed. WS-IDPIN program enables the prompt extraction of previously conducted PSI/ISI conditions and results so that the time-consuming data management, painstaking data processing and analysis in the past are avoided. Furthermore, development of ISI UT auto flaw evaluation and acceptance module based on ASME Code Sec. XI were presented. This module can be used for any angle beam examination from flat plate to spherical shapes as selected by the proper azimuthal angle. This program can be further developed as a unique PSI/ISI data management expert system.

#### 1. 서 론

국내 원자력발전소의 건전성(integrity) 확보를 위한 주요 기기의 가동전/중검사(PSI/ ISI)는 관련기술 기준(고리, 영광, 울진 원자력발전소의 경우 ASME Code Sec.XI, 월성 원자력발전소의 경우 CAN/CSA N 285.4-M83, 94)에 따라 철저히 수행되고 있다. 결함을 내재하고 있는 구조물의 사용중 건정성을 판정하기 위한 신뢰도 높은 파괴역학적 분석(fracture mechanics analysis; FMA)이 요구되고 있으며, 결함의 합부 판정기준(acceptance criteria)은 결

합지시길이나 지름과 단순 비교할 수 없고, 주어진 구조물의 재료특성, 응력 그리고 결함의 크기와 위치 등 모두가 합부성(acceptability)을 결정하는 주요한 인자이다. 일반적으로 표면(surface) 및 표면직하(subsurface) 결함에 대한 파괴역학 개념에 근거한 판정 기준은 표면이나 표면직하에서의 결함의 위치, 길이, 벽두께 방향 치수 등에 의해 지시의 합부성을 결정한다.

ISI UT 비파괴검사서 평판의 사각탐상은 삼각법으로 간단히 계산할 수 있으나, 실린더나 구형형상에 사각탐상을 적용할 경우, 축 방향이나 원주 방향 이외의 방향으로 빔이 진행될 때에는 탐상방향에 따라 빔 진행거리가 달라지기 때문에 기하학적 조건을 고려하여 정확한 산정이 요구된다. 예를

\* 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소

\*\* (주)카이텍

들면 완전 용입 nozzle-to-vessel 용접부를 vessel 의 부 표면에서 UT 사각탐상을 할 때 두께 방향의 빔 진행거리는 초음파 빔이 축 방향에서 원주 방향으로 회전함에 따라 일정하게 변화하게 된다. 이 빔 진행거리는 실린더나 구의 내경과 외경, 탐촉자의 굴절각(ultrasonic beam angle)과 빔의 탐상각도(azimuthal angle) 등에 대한 함수로 고려하여, 빔 진행거리를 도식적으로 표현할 수 있고, 굴절각과 빔 탐상각도 선정에 도움이 될 수 있다.

초음파 사각탐상은 넓은 범위에 걸쳐 결함을 검출할 수 있고, 결함의 검출과 이들의 깊이 방향의 위치 뿐 만 아니라 내부 또는 외부 표면으로부터의 결함의 최대 또는 최소깊이로부터 거리를 측정할 수 있는 장점이 있다. 이 정보로부터 결함의 두께 방향의 치수와 내·외면으로부터 결함의 높이를 계산할 수 있다. ASME Code Section XI 등의 파괴역학에 근거한 규격들은 평면 결함의 길이와 위치, 벽두께 방향의 크기에 의존한다. 실린더나 구형 형상을 갖는 벽두께 방향의 결함크기는 벽두께 방향의 빔 진행거리에 비례한다. 실린더에서 탐촉자의 탐상 방향이 6시와 12시 방향에 평행하지 않을 때 빔 진행거리로부터 결함의 깊이와 저면까지 거리의 계산은 복잡하여 결함평가 및 판정에 상당한 시간이 소요되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 월성 원자력발전소 PSI/ISI 자료 관리를 위한 지능형 데이터베이스 프로그램(WS-IDPIN)<sup>1)~4)</sup>이 포함하고 있는 UT 자동 결함평가 및 합격/불합격 판정 모듈을 개발하기 위해 실린더와 구형 시험체 표면에서 12시와 6시 방향 이외의 원주 방향으로 탐상 시 벽두께 방향의 빔 진행거리를 정확히 산정하여 결함의 위치와 크기의 정량적평가와 가시화(visualization)에 필요한 빔 방정식의 모델을 검증하고 윈도우 사용 환경의 프로그램을 개발하여 원전 PSI/ISI 데이터 관리 전문가시스템(expert system)화에 한 단계 접근하고자 한다.

## 2. 빔 방정식<sup>5)</sup>

Fig. 1은 탐촉자의 탐상 방향이 축과 원주방향 사이인 경우의 빔 진행거리를 나타내고 있다. 초음파 빔은 탐상 각도가 변하면 두께 방향의 빔 진행거리는 점차적으로 최단 거리에서 최장거리로 증가하게 된다. 최대 빔 진행거리는 압력 용기나 파이프의 외경과 내경, 굴절각 그리고 파이프나 압력

용기의 축과 이루는 탐상 각도에 의존한다. 두께 방향의 결함 위치의 계산과 결정에는 이런 조건을 고려해야 한다.

어떤 탐상 각도에서 두께 방향의 빔 진행거리는 장축과 단축의 타원의 방정식을 이용하여 계산할 수 있다. 벽두께 방향의 결함 치수는 두께 방향으로 진행되는 빔 진행거리에 직접 관련한다. 초음파 탐상이 압력용기나 파이프 축에 평행하면 내면에 도달하는 빔 진행거리는 최소가 되고 원주 방향의 탐상에서는 초음파 빔 진행거리는 최대가 된다. 90° 이하의 탐상 각도에서 두께 방향의 빔 진행거리는 이들 두 가지 조건에 따라 다양하게 변화한다. 압력 용기나 파이프에서의 초음파 빔은 Fig. 2와 같이 타원의 단축에서의 입사점 위치로 가시화할 수 있다.

Fig. 3은 실린더 축에 대해 45° 방향에서의 이러한 개념을 설명해 주고 있다. 평판이나 축 방향 탐상 조건은 실린더 내경의 단축 조건과 무한의 장축을 갖는 타원으로 표현할 수 있다. 원주 방향의 탐상은 실린더 지름이 단축과 장축을 갖는 타원으로 표현된다. 벽두께 방향의 결함은 압력용기나 파이프에 대한 정보(지름), 탐촉자의 굴절각, 실린더 축과 이루는 탐상 각도 그리고 결함으로부터의 빔 진행거리에 관한 정보의 입력으로부터 계산할 수 있다. 두께 방향의 빔 진행거리의 결정에는 도식법(graphical methods)을 이용할 수 있으며, 정확한 두께 방향의 빔 진행거리의 결정과 2d의 계산 그리고 S의 치수(결함에서 각 실린더 표면까지의 거리)가 이 연구의 주 내용이다. 두께 방향의 결함 크기 2d는 두께 방향의 빔 진행거리를 이용하여 정확히 계산할 수 있으나, S의 치수는 이와 같은 방법으로는 정확히 계산할 수 없다. 이러한 치수를 정확히 알기 위해서는 추가적인 계산이 필요하게 된다.

Fig. 3과 같이 몇 개의 결함 측정 파라미터를 정의하면, 초음파 빔의 입사면에서 결함의 상단부까지의 거리를  $S_1$ , 내면에서부터 결함의 하단부까지의 거리를  $S_2$ 라 한다. 벽두께 방향의 치수인 결함 크기 2d는 두 길이를 뺀 값이다. 그리고 CRT 화면에서 측정되는 결함의 상단부와 하단부에서의 빔 진행거리는  $W_1$ ,  $W_2$ 라 한다. 이들 값의 측정에는 코드와 규격에 따라 달리 정의되어 있다.  $W_1$ 과  $W_2$ 로 표현되는 이 점들은 압력 용기 벽 내부의 좌표값( $X_1$ ,  $Y_1$ )과 ( $X_2$ ,  $Y_2$ )로 나타낼 수 있다. 이들 치수를 산정하기 위한 정확한 방법은 다음과 같이 좌표값

$(X_1, Y_1)$ 과  $(X_2, Y_2)$ 에 해당하는  $b_1$ 과  $b_2$ 로 계산한다.

ASME Code Section XI에서  $S_1$ 과  $S_2$ 는 결함지시가 표면인지 표면 직하 지시인지 여부를 정하는데 2d와 비교한다. 합부 판정은 결함의 형상비(aspect ratio;  $a/l$ , a:벽두께 방향 치수, l:길이)의 계산에 의해 결정되고, 벽두께의 결함 퍼센트와 특정 형상비의 허용치와 비교한다. 이 점에서 2d는 초음파 굴절각과 실린더 축과 이루는 탐상 각도에 따라 두께가 고려된 벽두께 방향의 실제 치수이다.(이것은 결함의 실제 치수를 의미하는 것은 아니고 코드 절차에 의해 정해지는 치수를 의미한다) 그것은 표면 또는 표면직하로 분류되느냐에 따라서 2d는 2a(표면직하의 경우) 또는 표면 지시의 (a)값을 구하기 위해  $S_1$ 이나  $S_2$ 의 값을 더한다.

### 3. 프로그램 개발 및 유용성 검증

Fig. 4에서 자동결합평가의 버튼을 클릭하면 Fig. 5와 같은 창이 나타나고, 실린더나 구형에서 탐상 위치가 내부인지 외부인지를 선택할 수 있다. WS-IDPIN 프로그램은 사용자 인터페이스부, PSI/ISI 데이터베이스부 외에 PSI/ISI 결과의 통계적 신뢰도 평가부, PSI/ISI UT 검사 보고서 양식의 표준화와 전산 시스템화 외에 UT 자동결합 평가부 등이 추가되어 있다. Fig. 4는 WS-IDPIN 프로그램의 주 화면으로 메인 메뉴의 구성은 월성 원전의 각 호기(unit), 문서자료(적용코드 및 연도, 검사수행현황, 부적격사항보고서(customer notification form; CNF)발생현황, CAN/CSA Code, ASME Code), 평가부(신뢰도평가, 자동결합평가), UT 검사보고서(calibration record, examination record), 도움말 등으로 되어 있다.

Fig. 6은 자동결합평가를 하기 위한 실린더나 구형의 스캐닝에서 얻은 데이터 입력부로 두께 1인치, 지름 24인치인 압력용기 노즐 용접부에 적용한 예를 보여주고 있다. 프로그램에는 실린더나 구에 대한 1)내경(ID), 2)외경(OD), 3)굴절각(degree)(BA), 4)실린더 축과 이루는 탐상각도(A), 5)결함 상단부까지의 빔진행거리( $W_1$ ), 6)결함 하단부까지의 빔진행거리( $W_2$ ) 등의 정보와 탐상 파라미터의 입력이 필요하다. 압력용기 노즐의 용접부에서 얻은 결함 지시의 측정조건으로는 초음파 굴절각( $BA=59^\circ$ ), 결함까지의 최소 빔 진행거리( $W_1=5.6$  inch), 결함까지

의 최대 빔 진행거리( $W_2=6.8$  inch), 압력용기 축과 이루는 탐상각도( $A=45^\circ$ ), 압력용기 OD=176.25 inch, 압력용기 ID=166.5 inch이다. 여기서, EVALUATION 버튼을 클릭하면 Fig. 7과 같은 결함지시길이( $\ell$ )와 판정기준(acceptance standard)을 묻는 대화상자가 나타난다. 결함지시길이( $\ell=0.5$ ), 판정기준값 6.5를 대화상자에 입력하게 되면, Fig. 8과 같이 결함의 평가에 관련되는 변수 값  $S1=2.80$ ,  $S2=1.50$ ,  $2d=0.60$ , 형상비( $a/l$ )=0.5,  $(a/t)_{allowable}=6.1\%$ , 합부판정(acceptable) 등의 결과를 확인할 수 있다.

결함의 두께 방향 치수 비율( $a/t$ )%, 형상비( $a/l$ )와 합부 판정 표와 같은 결함의 합부성을 결정하기 위한 계산도 포함한다. 제시한 식들은 실린더형, 구형의 형상에서 측정된 결함지시와의 관계를 정확하게 결정하는데 이용될 수 있다. 이 프로그램은 적당한 탐상각도를 선택함으로써 평판에서 구형 형상까지 어떠한 사각시험에도 사용 가능하다. 여기서 표현한 식들은 결함을 정확하게 산정하는데 필요하다. 이 치수는 실제의 벽두께 방향 치수가 아니고 코드와 규격의 치수임을 주지해야 한다. 그리고 결함의 방향성, 유형, 탐상면의 거칠기 그 외 요소 등과 같은 결함 조건에 의해 충분한 변화 가능성이 있다. 데이터의 정확도는 현장 보수와 허용 결함 치수와의 차를 의미할 수 있다. 이 프로그램은 훨씬 빠르고 정확하게 결함 지시를 산정하는 수단이 된다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 탐상방향을 측방향과 원주방향으로 탐상하였을 때 데이터 입력 창을 보여주고, Fig. 11과 Fig. 12는 각각 결함의 평가결과를 나타내고 있다.

Table 1은 ISI 수행시 Level III가 작성한 원전 ISI UT examination record 데이터의 예를 나타내고 있으며, Fig. 13은 ISI UT resolution record로 Level III가 수작업으로 결함평가와 판정한 결과이다. UT 자동 결함평가 및 판정 프로그램의 유용성 유무를 검증하기 위해 Table 1의 모든 데이터를 입력하고, 프로그램에 의해 자동 결함평가와 판정을 수행한 결과, ISI UT resolution record의 Level III가 수작업으로 한 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 PSI/ISI 자료 관리를 위한 지능형 데이터베이스 프로그램(WS-IDPIN)

에 포함되어 있는 UT 자동 결함평가 및 합격/불합격 판정 모듈을 개발하고 그 유용성을 검증하였다. 실린더와 구형 시험체 표면에서 12시와 6시 방향 이외의 원주 방향으로 탐상 시 벽두께 방향의 빔 진행거리를 정확히 산정하여 결함의 위치와 크기의 정량적평가와 가시화(visualization)에 필요한 빔 방정식의 모델을 검증하고 윈도우 사용 환경의 프로그램을 개발하여 원전 PSI/ISI 데이터 관리 전문가 시스템(expert system)화에 한 단계 접근하였다.

## 참고문헌

- (1) 박 은수, 박 익근, 엄 병국, 박 윤원, 강 석철, "원자력발전소 PSI/ISI 데이터 관리를 위한 지능형 데이터 베이스 프로그램 개발", 한국비파괴 검사학회지 Vol. 18, No. 5, pp 389-397, 1998
- (2) 박 익근, 박 은수, 엄 병국, 박 윤원, 강 석철, 이 종포, 박 치승, "원전 압력용기 용접부의 결함보수 현황과 초음파검사의 신뢰도", 한국비파괴 검사학회 '99 춘계학술발표회 논문집 KSNT/SC9911, pp 110-120, 1999
- (3) 박 은수, 박 익근, 엄 병국, 박 윤원, 강 석철, 이 종포, 박 치승, 장 기상, "월성 원자력발전소 PSI/ISI 데이터 관리를 위한 지능형 데이터 베이스 프로그램 개발", 한국비파괴 검사학회 '99 추계학술발표회 논문집 KSNT/FC9929, pp 293-299, 1999
- (4) Ik Keun Park, Un Su Park, Byong Guk Um, Yun Won Park, Suk Chul Kang, Jong Po Lee and Chi Seung Park, "Development of Intelligent data base program and Preliminary Probabilistic Reliability Assessment of PSI/ISI Inspection results in nuclear power plant", FENDT'99, pp 483-490, 1999
- (5) Frank J. Sattler, Lee Jong P., " Beam equation for ultrasonic examination of cylindrical and Spherical Shapes, ASNT Spring Convention, 1988

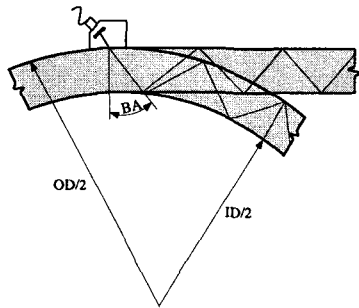


Fig. 1 Ultrasonic beam paths for axial and circumferential direction scans

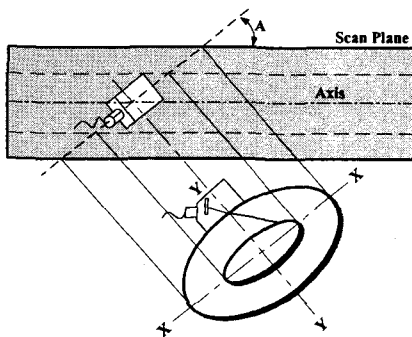


Fig. 2 A true scale view of a plane intersecting a cylindrical vessel or pipe at an angle of 45 degrees to the cylindrical axis.

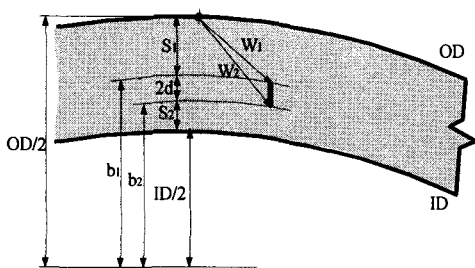


Fig. 3 Measurement of the beam paths to the upper and lower boundaries of a discontinuity to produce  $W_1$  and  $W_2$  respectively

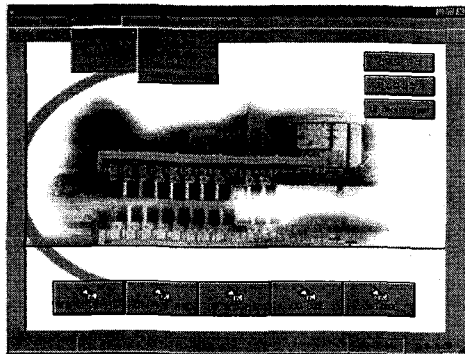


Fig. 4 Main windows of WS-IDPIN program

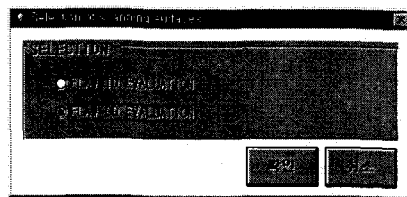


Fig. 5 Selection of inner/outer scanning surfaces

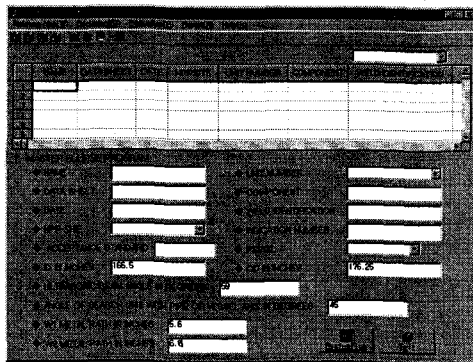


Fig. 6 Auto flaw evaluation module(45°)

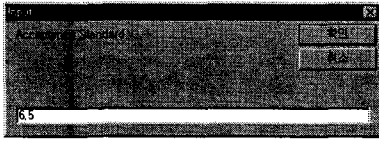


Fig. 7 Input window of the indication length and acceptance standard

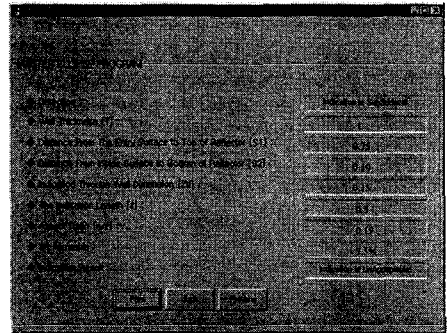


Fig. 10 Results of auto flaw evaluation(Axial)

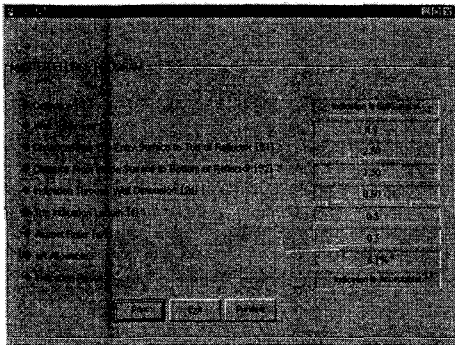


Fig. 8 Results of auto flaw evaluation(45° )

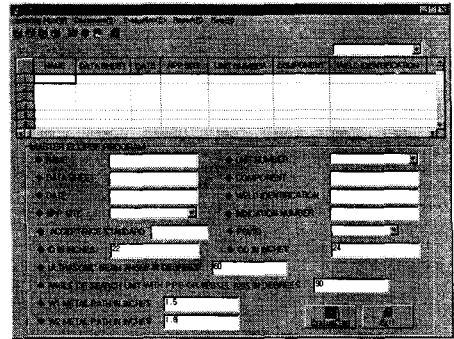


Fig. 11 Auto flaw evaluation module (Circumferential)

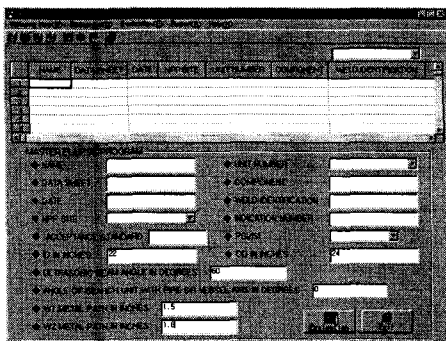


Fig. 9 Auto flaw evaluation module(Axial)

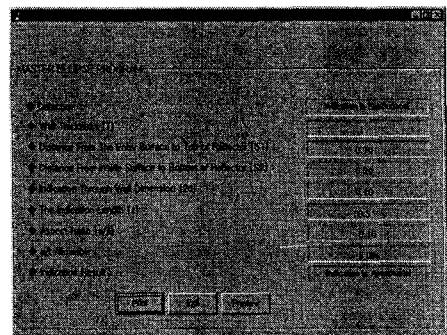
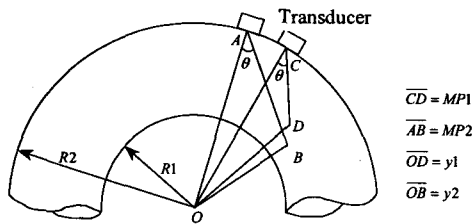


Fig. 12 Results of auto flaw evaluation (Circumferential)



$y1^2 = R2^2 + MP1^2 - 2R2MP1 \cos \theta$   
 $y2^2 = R2^2 + MP2^2 - 2R2MP2 \cos \theta$   
 $MP1=8.1$   $MP2=11.2$ ,  $R2=46$   $R1=41.9$   $t=4.1$ ,  
 $\theta=61.5^\circ$   
 $\therefore y1=42.67$   $y2=41.74 < 41.9 \quad \therefore y2=41.9$   
 $2d=y1-y2=0.77$ ,  $S=y2-41.9=0 \quad \therefore$  Surface flaw  
 $a=0.77 \approx 0.75$   $\ell = 1 \frac{1}{16} = 1.06 < 2a \quad \therefore \ell = 2a$   
 $a/\ell = 0.5$   $a/t = 18.3\%$  of  $t$ ,  
 Exceeds the code allowable limit

Fig. 13 Resolution record (ISI PRZ)

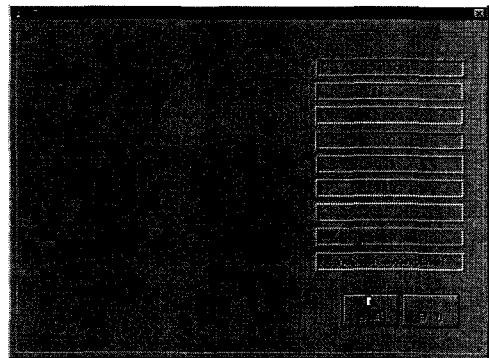
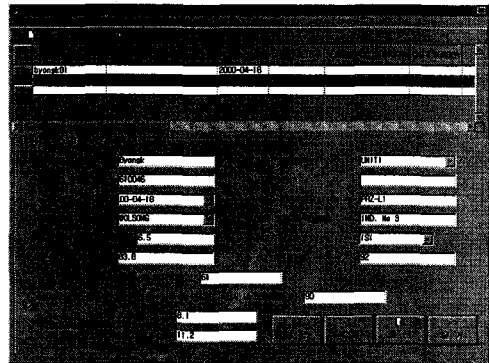


Fig. 14 Results of auto flaw evaluation (ISI PRZ)

Table 1 UT examination record (ISI data)

| No. | % OF DAC MAX | 50% DAC OR 1/2 MAX |     | W MAX.  |     | 50% DAC OR 1/2 MAX |      | L1<br>50% DAC | Lmax     | L2<br>50% DAC | ANGLE | REMARKS  |
|-----|--------------|--------------------|-----|---------|-----|--------------------|------|---------------|----------|---------------|-------|----------|
|     |              | W1                 | MP  | W       | MP  | W2                 | MP   |               |          |               |       |          |
| 1   | 90           | 7 3/4              | 7.6 | 8 3/8   | 8.2 | 10 3/8             | 9.8  | 83 3/8        | 83 3/4   | 84 1/16       | 60°   | 2.25 MHz |
| 2   | 141          | 9                  | 8.6 | 10      | 9.6 | 13 1/4             | 12.4 | 88 1/8        | 88 11/16 | 88 11/16      | 60°   | 2.25 MHz |
| 3   | 100          | 8                  | 8.1 | 9       | 8.9 | 11 1/2             | 11.2 | 83 1/4        | 83 5/8   | 84 5/16       | 60°   | 5 MHz    |
| 4   | 112          | 8 5/16             | 8.2 | 9 7/16  | 9.2 | 11                 | 10.6 | 86 3/8        | 86 11/16 | 88 1/8        | 60°   | 5 MHz    |
| 5   | 100          | 7 13/16            | 8.0 | 8 13/16 | 8.8 | 11 1/2             | 11.2 | 83 1/4        | 83 5/8   | 84 5/16       | 60°   | 5 MHz    |
| 6   | 121          | 8 1/4              | 8.1 | 9 5/16  | 9.2 | 11                 | 10.6 | 86 3/8        | 86 11/16 | 88 1/8        | 60°   | 5 MHz    |