

## 原電 機器의 超音波探傷檢査 시스템에 대한 技量 檢證

이 종 포

한국원자력연구소

### Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems of Nuclear Power Plant Components

Jong Po Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

요 약 1974년에 유럽에서 시작된 PISC(Program for the Inspection of Steel Components; PISC-I, II, III) 수행결과나 1980년대초 실시된 미국의 BWR 원전 배관계통의 입계응력부식균열(IGSCC; Intergranular Stress Corrosion Cracks)검사결과에서 나타난 바와 같이 기존의 규격 요건과 절차에 따른 원자력발전소 기기에 대한 초음파탐상검사는 그 실효성에 많은 문제점이 제기되었다. 따라서, 원전기기의 건전성 및 초음파탐상검사 결과의 신뢰도를 보증하기 위한 각종 연구가 진행되고 여러 방안이 모색되어 왔다. 그 결과, 원전 가동중검사 규격에 “초음파탐상검사자 자격인정 요건”과 “초음파탐상검사 시스템(검사자, 장비 및 절차서)에 대한 기량검증 요건”이 새로이 부가되었다. 본고에서는 초음파탐상검사 결과의 신뢰도 확보에 있어 필수불가결한 요건인 원전기기 초음파 탐상검사 시스템에 대한 기량검증 요건을 자세히 기술한다.

### 1. 서 론

초음파탐상검사는 원자력발전소의 Class 1 및 Class 2 기기에 대해 가동중중검사시 널리 적용되어 왔다. 그러나, 기존의 ASME B & PV, Sec. XI 규격 요건과<sup>1)</sup> 절차에 따른 원자력발전소 기기에 대한 초음파탐상검사는 1974년에서 1980년까지 수행된 PISC-I

수행 결과나<sup>2)</sup> 1980년대초 미국의 Boiling Water Reactor(BWR) 배관계통의 입계응력부식균열(IGSCC) 검사결과 또는 미국의 Electric Power Research Institute(EPRI)에서 실시한 Round Robin Test 결과에서<sup>3)</sup> 나타난 바와 같이 그 실효성에 많은 문제점이 제기되었으며, 이를 개선하고 극복하기 위한 연구개발 및 이에 대한 대책이 강구되어 왔

다. 그 결과, 초음파 탐상검사 결과의 신뢰도 제고를 위해 ASME XI에서는 1989년판과 그해 부록판에서 “초음파탐상검사자 자격인정 요건”과 “초음파 탐상검사시스템에 대한 기량검증 요건”을 각각 부가하였으며 현재까지 이를 보완해 가고 있다.

본고에서는 전번의 “원전 가동전증검사 초음파탐상검사자 자격인정 요건”에 이어 원전 기기 초음파탐상검사 시스템(장비, 인원, 절차서)에 대한 기량검증 요건을 ASME XI, 1992년판을 기준으로 자세히 기술한다. 본 요건은 이를 충족시킬 수만 있다면 초음파탐상검사의 신뢰도를 보증할 수 있는 구체적인 방법이 될 수 있을 것이다. 그러나, 이를 시행하기 위해서는 기술과 예산이 뒷받침되어야 할뿐만 아니라 상당한 실시 준비기간이 소요되어야 함을 감안할 때 되도록 빨리 그 구체적인 실시계획을 수립하고 실제 준비에 착수하여야 할 것이다. 본 초음파 탐상검사 시스템에 대한 기량검증에 대한 준비가 완료되고 이의 적용이 성공적으로 이루어지면 국내 초음파탐상검사의 기술수준도 급속히 선진국 수준으로 향상될 것으로 판단된다.

**2. ASME XI, APPENDIX VIII ; 초음파탐상검사 시스템에 대한 기량 검증 요건**

**VIII-1000 범 위**

**VIII-1100 일 반**

- (a) 본 부록은 결함검출 및 크기평가용 초음파탐상검사 절차서, 장비, 및 요원에 대한 기량검증 요건을 규정한다.
- (b) 각 조직(즉, 사업자 또는 공급자)은 본 부록의 이행을 보증하는 서면계획을 가져야 한다. 초음파 탐상검사를 수행하는 각 조직은 본 부록에 따라서 절차서, 장비, 및 요원을 자격인정시켜야 한다. 조직은 계획의 이행을 계약할 수 있다.
- (c) 기량검증 요건은 지시를 검출, 기록, 또는 판독하거나, 용접부 또는 기기에 있

는 결함의 크기를 평가하는 요원에 적용한다.

- (d) 본 부록에 규정된 기량검증 요건은 업무가 주사장치 설치, 배관 표식 또는 초음파 지식이 중요하지 않은 기타 상황에 국한된 요원에게는 적용하지 않는다.
- (e) 본 부록에 따라 자격인정된 모든 절차서는 합격이다.
- (f) 보충서 1에 기술된 계기 특성평가는 선택 가능하다. 보충서 1을 선택할 때, 원 장비 및 대체 장비는 특성을 평가해야 한다.

**VIII-2000 검사 시스템 일반 요건**

**VIII-2100 절차서 요건**

- (a) 검사절차서에는 절차서 적용한계(예, 재료, 두께, 직경, 제작 방식)범위를 명확하게 정의하여 기술해야 한다.
- (b) 검사 절차서에는 VIII-2100(d)에 수록된 변수에 대해 단일값의 범위를 명시해야 한다.
- (c) 어떠한 교정도 그 방법을 기술하고, VIII-2100(d)(5)를 충족할 경우, 사용할 수 있다.
- (d) 검사절차서에는 다음의 필수변수를 명시해야 한다.
  - (1) 제작자 및 모델, 혹은 일련의 펄서, 리시버, 및 증폭기를 비롯한 계기 또는 시스템 ;
  - (2) 다음 사항을 비롯한 탐촉자 ;
    - (가) 중심주파수와 VIII-4000에 정의한 대역폭 또는 파형 지속시간
    - (나) 전파 모드 및 공칭검사 각도
    - (다) 진동자 수, 크기, 모양 및 형상과 썬기 또는 슈
  - (3) 다음 사항을 비롯한 탐촉자 케이블 ;
    - (가) 형태
    - (나) 최대 길이
    - (다) 최대 콘넥터 수
  - (4) 다음 사항을 비롯한 검출 및 크기 평가 기술 ;
    - (가) 주사 패턴 및 빔 방향

- (나) 최대 주사 속도
- (다) 최소 및 최대 펄스 반복 주파수
- (라) 최소 샘플링 주파수(자동 기록 시스템)
- (마) 주사 범위 및 접근 제한에 대해 취한 조치
- (5) 검출 및 크기 평가를 위한 교정방법 (예, 신호 진폭의 감도 및 정확도, 검사 시스템의 시간출력이 디스 플레이, 기록 또는 자동처리에 관계없이 검사 때마다 재현되는가를 확인하는데 요하는 조치)
- (6) 기록해야 할 검사 및 교정 데이터
- (7) 데이터 기록 방법
- (8) 사용 기록 장비(예, 스트립 차트, 아날로그 테이프, 디지털화)
- (9) 지시 구별 방법 및 기준(예, 기하학적 지시 대 결함지시와 결함길이 및 깊이 평가에 대한 것)
- (10) 표면 준비 요건

**VIII-2200 검사요원 요건**

검사요원은 부록 VII의 요건을 충족시켜야 하며 VIII-3000에 따라 자격인정을 받아야 한다.<sup>4)</sup>

**VIII-3000 자격 인정 요건**

**VIII-3100 자격인정시험 요건**

**VIII-3110 검출**

- (a) 자격 인정 시험에 사용될 시험편은 표 VIII-3110-1에 수록된 해당 보충서 요건을 충족시켜야 한다.
- (b) 검사 절차서, 장비 및 요원은 표 VIII-3110-1에 수록된 해당 보충서 규정의 기량 검증을 성공적으로 마치면 결함검출에 대해 자격인정된 것으로 간주해야 한다.
- (c) 요건이 준비중에 있는 배관 용접부에 대해 표 I-2000-1에 보충된 대로 부록III의 요건을 충족시켜야 한다.

**VIII-3120 크기 평가**

- (a) 자격 인정 시험용 시험편은 표 VIII-31

10-1에 수록된 해당 보충서 규정의 기량 검증을 성공적으로 마치면 결함 크기 평가에 대해 자격인정이 된 것으로 간주해야 한다.

- (b) 검사 절차서, 장비 및 요원은 표 VIII-3110-1에 수록된 해당 보충서 규정의 기량 검증을 성공적으로 마치면 결함 크기 평가에 대해 자격인정이 된 것으로 간주해야 한다.
- (c) 요건이 준비중에 있는 배관 용접부에 대해 표 I-2000-1에 보충된 대로 부록III<sup>5)</sup>의 요건을 충족 시켜야 한다.

표BIII-3110-1 기기 자격 인정 보충서

| 기 기 형 태        | 적용 보충서 |
|----------------|--------|
| 배관 용접부         |        |
| 가단 오스테나이트      | 2      |
| 페라이트           | 3      |
| 주조 오스테나이트      | [주(1)] |
| 이종 금속          | [주(1)] |
| 오버 레이(Overlay) | [주(1)] |
| 용기             |        |
| 피복/모재 경계 부위    | 4      |
| 노즐 내부 반경 부위    | 5      |
| 원자로 용기 용접부     | 6      |
| 피복/모재 경계 이외의   |        |
| 노즐-용기용접부       | 7      |
| 볼트 및 스톨드       | 8      |

주 : (1) 준비중에 있음.

**VIII-3130 필수 변수 범위**

- (a) 동일 필수 변수[VIII-2100(d)]를 갖는 두 절차서는 동등한 것으로 간주한다. VIII-4100에 명시된 허용 범위 이내로 변하는 펄서, 탐촉자 및 리시버는 동등한 것으로 간주한다. 펄서, 탐촉자 및 리시버가 VIII-4100의 허용범위를 넘어 변하거나 검사 절차서에서 필수 변수에 대해 단일 값 또는 일정 범위의 값을 초과하여 허용할 때는 모든 다른 변수를 공칭값에 놓고 각 필수 변수에 대해 최소 및 최대 값에서 자격 인정시험을

되풀이 해야 한다. 연속하여 요원 기량 검증을 할 동안에는 필수 변수를 변경할 수 있다. 각 검사자는 모든 필수 변수의 전 범위에 걸쳐 기량 검증을 할 필요는 없다.

- (b) 절차서에 필수 변수 범위가 명시되지 않고 값 선정에 대한 기준을 정해 놓았을 때는 그 기준을 검증 해야 한다.

**VIII-3140 재자격 인정**

검사절차서의 변경으로 인해 필수 변수가 자격인정 범위를 초과할 때 검사 절차서는 수정범위에 대해 재자격 인정을 실시해야 한다.

**VIII-4000 필수 변수 허용 범위**

**VIII-4100 절차서 수정**

**VIII-4110 펄서, 리시버 및 탐촉자**

다음 조건이 충족될 때는 펄서, 리시버 또는 탐촉자를 대체 또는 교체하기 위하여 재자격 인정 없이도 자격 인정된 절차서를 수정할 수 있다.

- (a) 리젝트, 댐핑 또는 펄서 동조 조정이 있는 계기에 대해서는 개별 세팅을 절차서에 명시해야 한다.
- (b) 다음 사항을 이용하여 장비를 평가한다.
  - (1) 펄서 및 리시버의 경우, 보충서 1:
  - (2) 탐촉자의 경우, ASTM E-1065 “초음파 탐촉자의 특성 평가”
- (c) 교체된 장비는 원장비의 다음 허용 범위 이내여야 한다.
  - (1) 계기 또는 시스템 펄스 부위는 측정치 50오음 비유도, 비충전 저항 부하;
    - (가) 펄스 진폭,  $\pm 10\%$  :
    - (나) 펄스 상승 시간,  $\pm 10\%$  :
    - (다) 펄스 지속 시간,  $\pm 10\%$  :
  - (2) 계기 시스템의 리시버 부위
    - (가) -6 dB점에서의 하한 및 상한 주파수,  $\pm 0.2$  MHz
    - (나) 중심 주파수,  $\pm 0.2$  MHz
  - (3) 탐촉자
    - (가) 전파 모드는 동일하고 측정각은  $\pm 3$ 도 이내

**(나) 주파수 응답**

① 중심 주파수,  $\pm 20\%$

② 파형 지속 시간,  $\pm 1/2$  사이클 또는 20%중 큰것(-20 dB에서 측정), 혹은 밴드폭,  $\pm 10\%$

**VIII-4120 탐촉자 특성 평가**

탐촉자의 특성은 사인 톤버스트 기법 또는 충격 여기를 사용하여 평가해야 한다. 충격 여기를 사용할 때, 특성평가 펄서 및 UT 계기 펄서는 VIII-4110(C)(1)의 한계 이내로 동일해야 한다.

**VIII-4200 컴퓨터화한 시스템 알고리즘**

기량 검증시 사전 기록된 데이터를 사용할 경우 변경된 알고리즘이 자격 인정된 알고리즘과 동등함을 검증할 때는 자동 결정 알고리즘을 변경할 수 있다. 기량검증 결과 VIII-3000의 합격 요건을 충족 시킬 때, 그 알고리즘은 자격 인정된 것으로 간주해야 한다.

**VIII-4300 교정 방법**

대한 교정 방법이 자격 인정된 절차서에 기술된 교정 방법과 동등함을 재자격 인정 없이 검증할 수도 있다. 동등함에 대한 검증은 적용할 각 빔각도 및 전파 모드에 대해 다음과 같이 실시해야 한다.

- (a) 대안 방법에 따라 검사 시스템을 교정한다.
- (b) 대안 교정 방법의 감도와 자격 인정된 교정 방법의 감도를 비교한다.
- (c) 시스템 감도가 자격 인정된 방법에서 얻은 감도보다 2 dB 이하로 작을 때는 대안 교정 방법이 합격이다.

**VIII-5000 자격 인정 기록**

**VIII-5100 일반**

조직의 기량 검증 계획서에 자격인정 기록으로 유지해야 할 문서를 명시해야 한다. 문서에는 요원의 주민등록번호, 비파괴검사 절차서, 자격 인정 동안 사용한 장비 및 시험편과 기량 검증 결과가 포함되어야 한다.

### VIII-보충서

#### 보충서 1-초음파 계기의 전자적 특성 평가

- 1. 펄스 상승 시간, 지속 시간 및 진폭
- 2. 리시버 부위 주파수 특성

보충서 1의 내용은 위의 소제목에서 암시하는 바와 같이 초음파 장비에 대한 각종 요건을 세부적으로 명시하고 있다. 본 요건은 선택가능하며 여기에서는 지면관계상 구체적인 내용은 생략한다.

#### 보충서 2-가단 오스테나이트 배관 용접부 자격 인정 요건

##### 1. 시험편 요건

자격인정 시험용 시험편은 검사 절차서 범위에 기술된 특정 제한 사항을 수용하기 위해 시험편 세트를 설계하지 않은 이상(예, 배관 크기 및 접근 제한 사항)여기에 수록된 요건을 충족시켜야 한다. 검출 및 크기 평가 자격 인정을 하기 위해 동일한 시험편을 사용할 수도 있다. 시험편은 다음 요건을 따라야 하며 한 개의 시험편이 다음 요건중 1가지 이상을 충족시킬 수도 있다.

- (a) 시험편은 판독 과정에 방해가 될 수 있는 유사 반사를 최소화할 수 있도록 충분한 면적을 갖고 있어야 한다.
- (b) 시험편 시험 세트는 서로 다른 공칭 배관 직경 및 두께를 갖는 적어도 4개의 시험편으로 구성해야 한다. 이들 시험편에는 검사 절차서가 적용될 최소 최대 배관직경과 두께가 포함되어야 한다. 절차서가 직경 24인치 이상인 배관에 적용될 경우 시험편 세트는 절차서가 다루는 최대 두께와 함께 직경이 24인치 이상인 시험편이 최소한 1개가 포함되어야 하나 최대 직경을 포함시킬 필요는 없다.

(c) 시험편에는 다음 보기가 포함되어야 한다.

- (1) 제작 상태
  - (가) 연삭하지 않은 용접 보강 덧붙임(크라운);
  - (나) 전체 크라운 폭이 공칭 배관 벽두께의 1.5-2배가 되는 넓은 크라운;
  - (다) 정상적으로 결함과 구별해야 하는 기하학적 상태(예, 카운터보아 또는 과다 내경 보강 덧붙임과 같은 용접부 루트 상태);
  - (라) 직경 감소 혹은 세이프엔드 또는 끼워 맞춤과 같이 한쪽만 접근 가능한 전형적 주사 표면 제한 상태;

##### (2) 불합격 결함 상태

- (가) 기계적 피로 균열과 열피로 균열 또는 입계 응력 부식(IGSC)균열을 사용해야 한다. 균열의 최소 75%는 열피로 균열 또는 IGSC 균열 이라야 한다
- (나) 균열의 적어도 50%는 상기 1.(c) (1)에 기술된 부위에 있어야 한다.

##### (d) 검출 시험편

- (1) 시험편은 채점 단위로 나누어야 한다. 각 채점 단위는 적어도 용접부 길이3 인치가 포함되어야 한다. 채점 단위를 무결함으로 설계하는 경우는 애매한 데이터 판독을 방지하기 위해 채점 단위 양쪽에 적어도 결함이 없는 재료가 1인치는 존재해야 한다. 한개의 채점 단위에 사용되는 용접부 길이의 특정 부위는 다른 채점 단위로 사용될 수 없을 수도 있다. 채점단위는 배관 계통 둘레에 균일하게 배치할 필요는 없다.
- (2) 검출 시험 세트는 표 VIII-S2-1에서 선정해야 한다. 최소 검출 샘플 세트는 5개의 결함있는 채점단위와 10개의 무결함 채점단위이다. 무결함 채점단위의 갯수는 결함있는 채점단위의 적어도 2배가 되어야 한다.

(3) 결함있는 채점 단위는 결함 깊이, 방향 및 형태에 대해 다음 기준을 충족시켜야 한다.

(가) 결함의 최소 1/3(다음 높은 자연수로 반올림)을 공칭 배관 벽두께 5%에서 30% 사이의 깊이를 가져야 한다. 적어도 결함의 1/3(다음 높은 자연수로 반올림)은 공칭 배관 벽두께의 30%보다 깊어야 한다.

(나) 적어도 1개 및 결함의 최대 10%(다음 높은 자연수로 반올림)는 축방향으로 배치해야 한다. 나머지 결함은 원주 방향으로 배치해야 한다.

(다) 가능할 경우 사용중 발생 결함을 포함시켜야 한다.

(e) 크기 평가 시험편

(1) 최소 결함갯수는 10개라야 한다.

(2) 샘플 세트 결함은 다음과 같이 배분해야 한다.

| 결함깊이(벽두께%) | 최소 결함 갯수 |
|------------|----------|
| 5- 30 %    | 20 %     |
| 31- 60 %   | 20 %     |
| 61-100 %   | 20 %     |

나머지 결함은 아래 범주중 어느 것이라도 관계없다.

## 2. 기량 검증 시행

### 2.1. 검출 시험

유결함 및 무결함 채점 단위는 내면 및 시험편 식별을 알 수 없도록 임의로 섞어서 수험자에게 제공해야 한다. (즉, 블라인드 시험) 결과를 채점하고 결과를 수험자에게 제시하기 전에 모든 검사를 완전히 끝내야 한다. 기량 검증 이후 특수 시험편 결과를 공개하거나 수험자가 가리지 않은 시험편을 보는것은 금지된다.

### 2.2 길이 및 깊이 평가 시험

(a) 길이 평가 시험의 경우 내면 및 시험편 식별을 알 수 없게 해야 한다. 평가할

결함이 내재된 각 시험편의 부위를 수험자에게 알려 주어야 한다. 후보자는 각 부위에 있는 결함 깊이를 결정해야 한다.

(b) 깊이 평가 시험의 경우, 결함의 80 %는 후보자에게 알려준 시험편 표면상의 특정 위치에서 크기를 평가해야 한다. 나머지 결함의 경우, 평가할 결함이 내재된 각 시험편 부위를 후보자에게 알려 주어야 한다. 후보자는 각 부위에 있는 결함의 최대 깊이를 결정해야 한다.

## 3. 합격 기준

### 3.1. 검출 합격 기준

검사 절차서, 장비 및 요원은 기량 검증 결과가 검출 및 잘못 판단에 대해 표 VIII-S-2-1의 합격 기준을 만족할 때 검출 자격인정이 된 것으로 간주해야 한다.

### 3.2. 크기 평가 합격 기준

표 VIII-S-2-1 기량 검증 검출 시험 합격 기준

| 검출 시험 합격 기준 |         | 잘못 판단 시험 합격 기준 |             |
|-------------|---------|----------------|-------------|
| 유결함 채점단위 갯수 | 최소 검출기준 | 무결함 채점단위 갯수    | 최대 잘못 판단 갯수 |
| 5           | 5       | 10             | 0           |
| 6           | 6       | 12             | 1           |
| 7           | 6       | 14             | 1           |
| 8           | 7       | 16             | 2           |
| 9           | 7       | 18             | 2           |
| 10          | 8       | 20             | 3           |
| 11          | 9       | 22             | 3           |
| 12          | 9       | 24             | 3           |
| 13          | 10      | 26             | 4           |
| 14          | 10      | 28             | 5           |
| 15          | 11      | 30             | 5           |
| 16          | 12      | 32             | 6           |
| 17          | 12      | 34             | 6           |
| 18          | 13      | 36             | 7           |
| 19          | 13      | 38             | 7           |
| 20          | 14      | 40             | 8           |

검사 절차서, 장비 및 요원은 기량 검증 결과가 다음 기준을 만족할 때 크기 평가 자격 인정이 된 것으로 간주해야 한다.

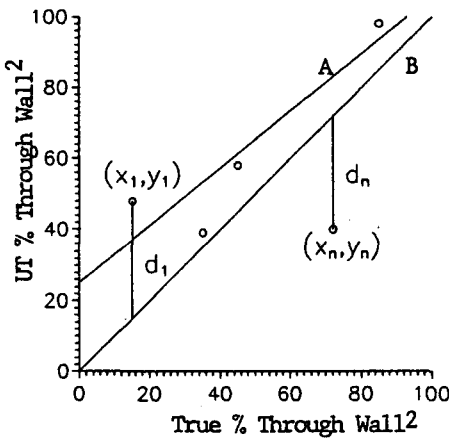
- (a) 한 결함도 배관 벽 두께의 25%가 넘게 결함 깊이를 과소 평가하지 아니함
- (b) 초음파로 평가한 결함 길이가 실제 길이의 1인치 이내 이고
- (c) 초음파로 평가한 깊이를 y축에 실제 깊이를 x축에 2차원으로 그렸을 때(그림 VIII-S2-1) 후보자가 보고한 기량 검증 결과가 다음의 통계파라미터를 만족 시킴
  - (1) 선형 회귀선 기울기 b가 0.60 이상임
  - (2) UT두께 %의 평균 편차(그림 VIII-S2-1)가 20% 이하임
  - (3) 상관 계수 r이 0.7이상임

**보충서 3-페라이트 배관 용접부에 대한 자격 인정요건**

**1. 가단 오스테나이트 배관에 관한 기량 검증**

증은 (보충서 2) 다음 요건이 충족될 때 페라이트 배관 검사에 대한 검사 절차서, 장비 및 요원의 기량이 검증된 것으로 본다.

- (a) 검출의 경우, 페라이트 배관에 최소 3개의 추가 결함 채점 단위 및 6개의 추가 무결함 단위를 시험 세트에 추가해야 한다. 채점 단위는 최소 3인치의 연속 용접부 길이로 정의한다. 모두 9개의 페라이트 채점단위를 올바르게 식별해야 한다.
- (b) 길이 평가의 경우, 페라이트 배관에 최소 3개의 추가 결함을 시험 세트에 추가해야 한다. 모든 결함을 보충서 2, 3.2의 길이 기준 이내로 크기 평가해야 한다.
- (c) 깊이 평가의 경우, 페라이트 배관에 최소 3개의 추가 결함을 시험 세트에 추가해야 한다. 결함 깊이는 보충서 2, 1.0(e)(2)의 범위 중에서 배분해야 한다. 이들 결함을 특정 위치에서 크기 평가를 해야 한다. 크기 평가 결과는 오스테



선 A : n개 데이터 점(x1, y1), ……(xn, yn)에서 최소 자승법으로 얻은 가장 잘 맞는 선형회귀선 :  $y = a + bx$ ,  
 여기서  
 $a = y$  교점 =  $(\sum yi) / N - b(\sum xi) / N$   
 $b =$  회귀선의 기울기

$$= \frac{N\sum xiyi - (\sum xi)(\sum yi)}{N\sum xi^2 - (\sum xi)^2}$$

N = 데이터점의 갯수

선 B : 이상적인 선,

$y = x$  (완전 무결 UT 측정)

상관 계수 : 상관 계수는 다음과 같이 정의함.

$$r = \frac{[n\sum xiyi - (\sum xi)(\sum yi)]}{\sqrt{[n\sum xi^2 - (\sum xi)^2][n\sum yi^2 - (\sum yi)^2]}}$$

이는 최소 자승법 회귀선이  $y = x$ 의 이상적인 것과 상관하여 데이터가 얼마나 잘 맞는가의 척도임.

평균 편차 : 평균 편차는 측정의 정확도 척도로서 다음과 같이 정의한다.

$$\text{평균 편차} = \frac{|d_1| + \dots + |d_n|}{n}$$

주 : (2) 벽두께 단위%는 보충서 2와 3에 적용한다. 결함깊이 단위는 보충서 4에서 7까지 적용한다.

그림 VIII-S2-1 통계학적 파라미터의 정의

나이트 자격인정의 크기 평가와 합쳐야 하며, 합친 결과는 보충서 2, 3.2의 합격 기준을 충족시켜야 한다.

2. 가단 오스테나이트 배관검사에 대한 자격 인정 없이 페라이트 배관 검사에 대한 자격 인정은 샘플 재료가 페라이트여야 하며, 샘플 세트 불합격 결함[보충서 2, 1.(c)(2)]의 75 %가 기계 또는 열피로 균열이어야 하는 것을 제외하고는 보충서 2의 요건을 충족시킴으로 달성할 수 있다.

### 보충서 4-원자로 용기 피복/모재 금속 경계에 대한 자격 인정 요건

#### 1. 시험편 요건

자격 인정 시험용 시험편은 시험편 세트가 검사 절차서 범위에 기술된 특정 제한사항을 수용하기 위해 설계된 경우가 아닌 한 여기 수록된 요건을 충족시켜야 한다. 동일 시험편을 검출 및 크기 평가 자격 인정 검증용으로 사용할 수 있다.

##### 1.1. 검출 시험편

검출 시험편(실물 크기의 모형도 가능)은 다음 요건을 따라야 한다.

- (a) 시험편은 판독 과정을 방해할 수 있는 유사 반사를 최소화하기 위해 충분한 면적을 가져야 한다. 시험편 길이 및 폭은 적어도 12인치는 되어야 한다. 시험편 세트에 피복면이 적어도 10ft<sup>2</sup>은 되어야 한다.
- (b) (1) 검사 절차서가 검사를 요구 내면(피복면)에서 수행토록 요구하면, 시험편의 최소 두께는 3인치 또는 용기의 최대 두께(작은 것)로 해야 한다.
- (2) 검사 절차서가 용기 외면에서 수행토록 요구하면, 시험편은 적어도 피검사 최대 두께의 90%가 되어야 한다.
- (c) 기량 검증은 다음의 예외 사항을 제외하고는 피검사 피복과 동일 형태의 피복상

에서 행해야 한다.

- (1) 피복 금속 아크 용접(SMAW) 단선 와이어 피복에서의 기량 검증은 단선 와이어 또는 스트립 피복 과정에 적용 불가능하다.
- (2) 단선 와이어 또는 스트립 피복의 기량 검증은 SMAW 형태의 피복과 동등한 것으로 간주하나 SMAW 형태의 피복에 적용 불가능하다.
- (d) 시험편의 표면 상태는 용기 주사면의 일반적 상태와 전형적으로 동일해야 한다.
- (e) 검출 시험 매트릭스에는 다음 설명과 함께 결함이 포함되어야 한다.
  - (1) 결함형태 : 적어도 결함의 50%는 균열이어야 한다. 나머지 결함은 슬래그, 게재물 또는 기계 가공 노치와 같은 균열, 제작 불합격 결함 이라도 좋다. 기계 가공 노치는 다음 요건을 충족시켜야 한다.
    - (가) 노치는 표면에  $\pm 2$ 도 이내로 수직이어야 한다.
    - (나) 노치는 최대폭이 0.010인치이고 피복전에 전 깊이에 걸쳐 모재로 막아야 한다.
  - (2) 모든 결함은 피복 모재 경계면에서 시작되어야 하며 주로 모재쪽으로 진전해야 한다. 결함의 최소 40%는 피복 방향에 평행( $\pm 10$ 도 이내)해야 하며 최소 40%는 피복 방향에 수직( $\pm 10$ 도 이내)이어야 한다.
  - (3) 결함 크기는 두께 방향 깊이(인치)를 다음 범위로 균일하게 분포시켜야 한다.
    - (가) 0.075-0.200
    - (나) 0.201-0.350
    - (다) 0.351-0.550
    - (라) 0.551-0.750
 어느 결함도 형상비(깊이/길이)가 0.1미만이 되어서는 안된다.
- (f) 검출 시험 매트릭스에 있는 결함 갯수는 표 VIII-S4-1에서 선정해한다. 밀접한 결함들을 분리된 결함으로 취급할 지



여부를 결정하기 위해서는 IWA-3000의 규칙을 사용해야 한다.

1.2. 크기 평가 시험편

- (a) 크기 평가 시험 매트릭스에는 최소 10개의 결함이 포함되어야 하며 이 중 적어도 반은 균열이어야 한다.
- (b) 크기평가 시험편은 1.1(b), 1.1(c) 및 1.1(e)의 요건에 따라야 한다.

표 VIII-S4-1 기량 검증 검출 시험 합격 기준

| 검출 시험 합격 기준 |        |      |        |
|-------------|--------|------|--------|
| 결함갯수        | 최소검출기준 | 결함갯수 | 최소검출기준 |
| 7           | 7      | 14   | 13     |
| 8           | 8      | 15   | 14     |
| 9           | 9      | 16   | 14     |
| 10          | 10     | 17   | 15     |
| 11          | 11     | 18   | 16     |
| 12          | 11     | 19   | 17     |
| 13          | 12     | 20   | 18     |

2. 기량검증 시험

2.1. 검출 시험

- (a) 시험편 식별 및 결함 위치는 “블라인드 시험”을 유지할 수 있도록 알 수 없게 해야 한다. 모든 검사는 결과 채점전 및 결과를 후보자에게 발표하기 전에 끝내야 한다. 특정 시험편 결과를 공개하거나 가리지 않은 시험편을 후보자가 검토하는 것은 금지된다.
- (b) 결함을 실제 위치(x 및 y)의 1/2인치 이내로 보고할 때 결함을 검출한 것으로 간주해야 한다. 모든 다른 보고 결함들은 잘못 판단으로 간주해야 한다.

2.2. 길이 및 깊이 평가 시험

- (a) 길이 평가 시험의 경우, 내면 및 시험편 식별을 할 수 없게 해야 한다. 평가할 결함이 내재된 각 시험편 부위를 후보자에게 알려 주어야 한다. 후보자는 각 부위에 있는 결함 길이를 결정해야 한

다.

- (b) 깊이 평가 시험의 경우, 결함의 80%는 후보자에 알려준 시험편 표면상의 특정 위치에서 크기를 평가해야 한다. 나머지 결함의 경우, 평가할 결함이 내재된 각 위치 부위를 후보자에게 알려 주어야 한다. 후보자는 각 부위에 있는 결함의 최대 깊이를 결정해야 한다.

3. 합격 기준

3.1. 검출 합격 기준

기량 검증 결과가 표 VIII-S4-1의 합격 기준을 만족하면 검사 절차서, 장비 및 요원이 검출에 대한 자격 인정이 된 것으로 간주해야 한다. 추가로 잘못 판단 갯수가 다음 자연수로 반올림한 A/10를 초과해서는 안된다. 여기서 A는 ft<sup>2</sup>로 측정된 시험 시험편의 전체 주사 면적이다.

3.2. 크기 평가 합격 기준

기량 검증 결과가 다음 조건을 만족하면 검사 절차서, 장비 및 요원은 크기 평가 자격 인정이 된 것으로 간주해야 한다.

- (a) 깊이를 0.2인치 초과하여 과소 평가한 결함이 없음.
- (b) 초음파로 평가한 결함깊이가 실제 길이의 -1/4 인치, +1인치이러야 한다.
- (c) 초음파로 평가한 깊이를 y축에, 실제 깊이를 x축에 2차원 그림(그림 VIII-S2-1)으로 그렸을 때 후보자가 보고한 기량 검증 결과가 다음의 통계 파라미터를 만족 시킨다.
  - (1) 선형 회귀선의 기울기가 0.7 이상임
  - (2) 결함 깊이의 평균 편차가 0.25인치 미만임
  - (3) 상관 계수가 0.70이상임

보충서 5-노즐 내부 반경 부위에 대한 자격 인정 요건

원자로 용기관 시험편의 피복/모재 금속 경계면에 대한 기량 검증(보충서 4)은 다음

요건이 충족될 때 노즐 내부 반경 검사 부위에 대한 검사 절차서, 장비 및 요원이 자격 인정된 것으로 본다.

- (a) 검출의 경우, 1개 이상의 실물 크기 노즐 모형(보충서 7)에 내부 반경 부위에 최소 3개의 추가 결함을 시험 세트에 추가해야 한다. 시험편은 보충서 4, 1.1을 따라야 하나 결함은 노치 또는 균열로 할 수 있다. 결함은 그림 IWB-2500-7과 같이 노즐내부 반경 부위의 반지름 축 평면상에 위치해야 한다. 검사 절차서가 검사를 용기 외면에서 수행토록 요구하면 시험편 세트의 적어도 한 노즐은 그림 IWB-2500-7의 피검사체 최고 두께  $t_w$ 의 90%가 되어야 하며 노즐 두께 대 셸 두께비가 피검사 용기 노즐에 대해 이 비의  $\pm 30\%$ 이내에 들어야 한다. 검사 절차서가 검사를 내면에서 수행토록 요구하면 시험편은 절차서가 다루는 최소 노즐 직경을 가져야 한다. 기량 검증용으로 제시된 결함의 각각은 보충서 4, 2.1에 따라 잘못 판단이 없이 올바르게 식별해야 한다. 피복 노즐 실물 모형에서의 기량 검증은 비피복 노즐의 검사용으로 사용 가능하다. 비피복 노즐 실물 모형으로 수행한 기량 검증은 피복 노즐 검사용으로 사용해서는 않된다.
- (b) 길이 평가의 경우, 상기 (a)에서와 같이 최소 3개의 추가 결함을 시험편 세트에 추가해야 한다. 모든 결함은 보충서 4의 합격 기준으로 크기 평가를 해야 한다.
- (c) 깊이 평가의 경우 상기 (a)에서와 같이 최소 3개의 추가 결함을 시험편 세트에 추가해야 한다. 이들 깊이는 보충서 4, 1.1(e)(3)(가), 1.1(e)(3)(나) 및 1.1(e)(3)(다)의 범위로 고르게 배분시켜야 한다. 이들 결함의 크기 평가 결과를 피복/모재 금속 경계 자격인정 크기평가 결과와 합쳐야 하며, 합친 결과는 보충서 4, 3.2의 합격 기준을 충족시켜야 한다.

## 보충서 6--피복/모재 금속 이외의 원자로 용기 용접부에 대한 자격 인정 요건

### 1. 시험편 요건

자격 인정 시험용 시험편은 시험편 세트가 검사 절차서의 범위에 기술된 특정 제한 사항을 수용키 위해 설계되지 않은 이상 여기 수록된 요건을 충족시켜야 한다. 검출 및 크기 평가 자격 인정을 위해 동일 시험편을 사용할 수 있다.

#### 1.1 검출시험편

검출시험편(실물 크기의 모형일 수 있음)은 다음 요건을 따라야 한다.

- (a) 시험편은 판독과정을 방해할 수 있는 유사 반사를 최소화 할 수 있는 충분한 면적을 가져야 한다. 시험편 길이 및 폭은 적어도 12인치가 되어야 한다. 시험편 세트에 적어도 10ft<sup>2</sup>의 주사면적이 있어야 한다.
- (b) 피검사체 세트에는 피검사체 최대 두께의 적어도 90%인 시험편이 적어도 1개는 있어야 한다. 시험편 세트는 표 VIII-S6-1과 같이 위치 및 크기 범위 각각에 대해 1개 이상의 결함이 있어야 한다.
- (c) 검사절차서가 검사를 용기 내면에서 수행토록 요구할 경우, 실물 모형상의 피복은 피검사 기기의 피복과 동일한 형태의 피복이라야 한다. 단, 다음사항은 예외이다.
- (1) 피복금속 아크 용접(SMAW) 단일 와이어 피복에 대한 기량검증은 다선-와이어 또는 스트립 피복 공정에 적용할 수 없다.
- (2) 다선-와이어 또는 스트립 피복에 대한 기량검증은 SMAW형태피복과 동등한 것으로 간주하나 SMAW형태 피복에 적용할 수 없다.
- (d) 시험편의 표면 상태는 주사표면의 일반적 상태와 전형적으로 같아야 한다.
- (e) 검출시험 매트릭스에는 아래에 기술한

결합들이 포함되어야 한다.

(1) 결합 형태

적어도 결합의 50%는 균열이라야 한다. 나머지 결합은 슬래그 계재물, 또는 기계가 공노치 같은 균열, 제작불합격 결합이라도 좋다. 기계가공 노치는 다음 요건을 충족시켜야 한다.

표 VIII-S6-1 검출 및 크기 평가 시험 결합과 그 위치

| 결합 위치    | 결합 높이 치수, 인치 |             |             |             |            |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|          | 0.075-0.200  | 0.201-0.350 | 0.351-0.550 | 0.551-0.750 | 0.751-2.00 |
| 내부10%(1) | X            | X           | S           | S           | ...        |
| 외부10%    | X            | X           | S           | S           | ...        |
| 11-30% T | ...          | ...         | X           | X           | S          |
| 31-60% T | ...          | ...         | X           | X           | S          |
| 61-89% T | ...          | ...         | X           | X           | S          |

주 : (1) 피복용기에 적용치 않음(보충서 4 참조)  
 범례 : X는 결합 검출 및 크기 평가에 적용됨  
 S는 결합 크기 평가에만 적용됨  
 T는 시험편 세트중 가장 두꺼운 시험편의 두께임

(가) 노치는 표면에 ±2도 이내로 수직이어야 한다.

(나) 노치는 최대 폭이 0.010인치이고 모재로 전체 깊이를 막아야 한다.

(2) 결합의 10%이하는 외면(비피복)에서 시작해야 한다. 용접 방향은 시험편에 용접부 유무에 따라 결정해야 한다. 결합의 최소 40%는 용접부 방향에 평행(±10도 이내)해야 하며, 최소 40%는 용접부 방향에 수직(±10도 이내)하게 해야 한다.

(3) 검출시험 매트릭스용 결합은 표 VIII-S6-1에 포함된 검출시험 결합에서 선정해야 한다. 선정된 결합은 기량 검증할 최소 및 최대 빔노정 범위에 있어야 할 뿐 아니라 결합크기 및 위치를 균일하게 분포시켜야 한다.

(4) 검출시험 매트릭스의 결합 갯수는 표

VIII-S6-2에서 선정해야 한다. 밀접한 결합을 분리된 결합으로 취급해야 할지의 결정은 IWA-3000의 규칙을 사용해야 한다.

1.2. 크기평가 시험편

- (a) 크기평가 시험 매트릭스에는 최소한 10개의 결합이 포함되어야 하며 이중 적어도 반은 균열이라야 한다.
- (b) 크기평가시험편은 1.1(b), 1.1(c), 1.1(d) 및 1.1(e)의 요건을 충족시켜야 한다. 단, 시험편 매트릭스를 표 VIII-S6-1에 포함된 크기평가 및 검출 시험 결합에서 선정해야하는 것은 예외이다.

2. 기량검증의 시행

2.1. 검출 시험

- (a) 시험편 식별 및 결합위치는 “블라인드 시험”을 유지 할 수 있도록 보지 못하게 해야한다. 결과를 채점하기 전에 및 후보자에게 제시하기 전에 모든 검사를 끝내야 한다. 특정시험편 결과를 공개하거나 가리지않은 시험편을 후보자가 보게 하는 것은 금지된다.
- (b) 결합은 실제위치(x 및 y)의 1/2인치 이내로 보고할 때, 검출한 것으로 간주해야 한다. 모든 다른 보고결합은 잘못 판단으로 간주해야 한다.

2.2. 길이 및 깊이 평가시험

표 VIII-S6-2 기량검증 검출시험 합격기준

| 검출 시험 합격 기준 |        |      |        |
|-------------|--------|------|--------|
| 결합갯수        | 최소검출기준 | 결합갯수 | 최소검출기준 |
| 7           | 7      | 14   | 13     |
| 8           | 8      | 15   | 14     |
| 9           | 9      | 16   | 14     |
| 10          | 10     | 17   | 15     |
| 11          | 11     | 18   | 16     |
| 12          | 11     | 19   | 17     |
| 13          | 12     | 20   | 18     |

- (a) 길이 평가시험의 경우, 내면을 보거나 시험편을 식별하지 못하게 해야한다. 크기평가를 할 결함이 내재된 각 결함시험편 부위를 후보자에게 알려주어야 한다. 후보자는 각 부위의 결함길이를 결정해야 한다.
- (b) 깊이 평가시험의 경우, 결함의 80%는 후보자에게 알려준 시험표면의 특정위치에서 크기를 평가해야 한다. 나머지 결함에 대해서, 평가할 결함이 내재된 각 시험편 부위를 후보자에게 알려주어야 한다. 후보자는 각 부위 결함의 최대깊이를 결정해야 한다.

**보충서 7-노즐-용기 용접부에 대한 자격 인정 요건**

원자로 용기 판 시험편에 대한 기량 검증(보충서 6)은 다음 요건이 충족될 때 노즐대 용기 용접부 검사에 대한 검사 절차서, 장비 및 요원이 자격 인정된 것으로 본다.

표 VIII-S7-1 결함 위치 및 방향

| 위 치   | 용접부에 평행 | 용접부에 수직 |
|-------|---------|---------|
| 내부 표면 | X       | X       |
| 외부 표면 | X       | X       |
| 내부    | X       | X       |

**3. 합격 기준**

**3.1. 검출 합격 기준**

기량 검증결과가 표 VIII-S6-2의 합격기준을 만족하면, 검사절차서, 장비, 및 요원은 자격 인정이 된 것으로 간주 해야 한다 추가로, 잘못 판단 갯수가 A/10를 다음 자연수로 반올림한 숫자를 넘지 않아야 한다. 여기서 A는 ft<sup>2</sup>으로 측정된 시험시 시험편의 총주사 면적이다.

**3.2. 크기 평가 합격 기준**

기량 검증 결과가 다음 기준을 만족하면 검사 절차서, 장비 및 요원은 크기 평가 자격 인정이 된 것으로 간주해야 한다.

- (a) 결함 깊이를 0.2인치 초과하여 과소 평가한 결함이 없음
- (b) 초음파로 평가한 결함 길이가 실제 결함 길이의 -1/4인치, +1인치 이내라야 한다.
- (c) 초음파로 평가한 깊이를 y축에 실제 깊이를 x축에 2차원 그림(그림 VIII-S2-1)으로 그렸을 때 후보자가 보고한 기량 검증 결과가 다음의 통계 파라미터를 만족시켜야 한다.
  - (1) 선형 회귀선 기울기가 0.7이상임
  - (2) 결함 깊이의 평균 편차가 0.25인치 미만임
  - (3) 상관 계수가 0.70 이상임

- (a) 검출의 경우, 1개 이상의 실물 크기 모형에 최소 3개 이상의 추가 결함을 시험편 세트에 추가한다. 시험편은 보충서 6, 1.1에 따라야 한다. 결함은 노치 또는 균열이라도 된다. 결함 위치 및 방향은 표 VIII-S7-1의 종류 중에서 선정해야 한다. 적어도 1개의 표면 직하 결함이 포함되어야 하며 각 범주에서 1개 결함만 포함되어야 한다.
  - (1) 용기 셀 쪽에서 수행된 기량 검증의 경우, 시험편은 적어도 피검사체 최대 두께의 90%가 되어야 한다.
  - (2) 노즐 보아 쪽에서 수행된 검사의 경우, 용접부에 평행인 적어도 1개의 결함은 빔 노정이 가장 두꺼운 피검사기기의 용접부 중심선까지 등가 노정 길이의 10%이내에 들어야 한다.
  - (3) 기량 검증용 각 결함을 잘못 판단 없이 보충서 6, 2.1에 따라 올바르게 확인해야 한다.
- (b) 길이 평가의 경우, 상기(a)에서와 같이 최소 3개의 추가 결함을 시험 세트에 추가해야 한다. 모든 결함을 보충서 6의 합격 기준 이내로 평가해야 한다.
- (c) 깊이 평가의 경우, 상기(a)와 같이 최소 3개의 추가 결함을 시험편 세트에 추가해야 한다. 이들 깊이는 보충서 6, 1.1의 범위에서 골고루 분포시켜야 한다. 이들 결함의 크기 평가를 원자로 용기 용접

부 자격 인정 결과와 합쳐야 하며 합친 결과는 보충서 6, 3.2의 합격 기준을 충족시켜야 한다.

### 보충서 8-볼트 및 스테드에 대한 자격 인정 요건

#### 1. 시험편 요건

자격 인정 시험용 시험편은 시험편 세트가 검사 절차서의 범위에 기술된 특정 제한 사항을 수용하기 위해 설계되지 않은 이상 여기 수록된 요건을 충족 시켜야 한다.

##### 1.1. 시험편은 다음 요건을 따라야 한다.

- (a) 자격 인정 과정은 범노정을 포함하고 주사기법을 인정할 수 있을 만큼 충분한 실물 크기 일부의 볼트 또는 스테드로 수행해야 한다.
- (b) 자격 인정 시험편은 피검사 볼트 또는 스테드와 유사한 화학 조성, 인장 강도 및 금속학적 구조를 가져야 한다. 자격 인정 시험편의 주사면은 피검사 볼트 또는 스테드와 유사한 형상을 가져야 한다.

표 VIII-S8-1 최대노치 치수

| 볼트 또는 스테드 크기     | 노 치, 인치 [주(1)] | 반사 면적 (인치) <sup>2</sup> |
|------------------|----------------|-------------------------|
| 직경 4인치 초과        | 0.157          | 0.059                   |
| 직경 2인치 초과 4인치 이하 | 0.107          | 0.027                   |

주 : (1) 나사산 표면의 경우, 깊이는 나사산 뿌리에서 노치 바닥까지 측정한다.

- (c) 원주 방향 노치는 자격 인정 시험편에 최소 및 최대 자격 인정 범노정에 위치해야 한다. 이들 노치는 외측 나사산 표면 및 보아가 있는 스테드의 보아 구멍

내면상에 표 VIII-S8-1에 명시된 대로의 최대 깊이 및 면적을 가져야 한다.

- (d) 추가노치가 다른 노치의 검출을 방해하지 않으면 추가 노치를 상기(c)에 명시된 범위 이내에 배치할 수 있다.

#### 2. 기량 검증 시행

시험편 식별 및 노치 위치는 “블라인드 시험”을 유지하기 위해 보지 못하게 해야 한다. 노치를 1.1에 정한대로 검출할 때 결함을 검출한 것으로 간주해야 한다. 노치의 축 방향 위치는 ±1/2인치 혹은 볼트 또는 스테드 길이 ±5% 중 큰값 이내여야 한다.

#### 3. 합격 기준

3.1 각 자격 인정 노치(1.1에 기술된 대로)를 검출하고 이의 응답이 절차서에 규정된 보고 기준을 초과할 때 검출 자격 인정이 된 것으로 간주해야 한다. 노치 응답은 최고 신호 대 최고 잡음비가 최소한 2:1 이상이어야 한다.

#### References

- 1) ASME B & PV Code Sec. XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components.
- 2) PISC 관련 보고서
- 3) B. D. Law, Future Content and Implementation of Section XI-A Regulatory Review, J. of Pressure Vessel Technology, Feb. 1985, Vol. 107/1
- 4) 이종포, 原電稼動中検査音波探傷検査 要員에 대한 資格認定要件 비파괴검사학회지 Vol. 13, No.1 1993
- 5) Appendix III, ASME, Sec. XI(1992)