

배관 용접부 결함 평가에 대한 round robin test Round robin test for flaw sizing of piping weld

윤병식*, 김용식*, 양승한*, 김영호*, 이희종*

* 한국전력공사 전력연구원

1. 서 론

1980년대 초 미국의 비등형 경수로(Boiling Water Reactor : BWR) 원자력발전소 배관 계통의 입계 응력 부식 균열(Inter-Granular Stress Corrosion Crack) 검사 결과 및 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 실시한 round robin test 결과에서 기존 초음파 검사 방법의 실효성에 많은 문제점이 제기 되었다. 초음파 검사방법의 실효성을 높이기 위해 많은 연구들이 수행되었으며 그 결과 초음파 검사방법 뿐만 아니라 검사자 및 절차서도 모두 기량검증(Performance Demonstration : PD)을 수행하여야 한다는 결론이 도출되었다. 이에 따라 ASME Section XI 1989년 Winter Addenda에서는 초음파검사에 대한 신뢰성 향상을 위하여 원자력발전소 가동중검사를 수행하는 초음파검사 시스템에 대한 기량검증을 요구하게 되었다. 기량검증이란 원자력발전소의 검사 부위에서 발생하는 실제 결함과 유사한 결함을 내포한 시험편을 검사부위, 재질, 두께 및 형상 별로 제작하여 초음파탐상 검사자로 하여금 정해진 절차서 및 장비를 사용하여 결함을 검출하도록 하고, 그 결과가 일정 수준 이상의 능력이 됨을 검증하여 자격을 부여하는 것이다. 미국에서는 2000년부터 EPRI에 의하여 기량검증이 시행되고 있으며, 국내 원자력발전소에 대하여는 2004년 7월 1일부터 기량검증이 적용될 예정이다. 본 연구에서는 국내에 기량검증이 본격적으로 시행되기에 앞서 기존의 원자력발전소 초음파 검사에서 사용하고 있는 결함 크기평가방법과 기량검증에서 사용하고 있는 결함의 크기평가방법을 상호 비교하기 위해 round robin test를 실시하였고, 그 결과를 평가함으로써 새롭게 적용되는 기량검증 초음파검사의 결함 크기평가 방법에 대한 신뢰성을 비교 분석하고자 한다.

2. Round robin test

Round robin test는 현재 국내 원자력발전소를 검사하고 있는 3개의 검사업체를 대상으로 시행하였다. 각 검사업체에서 2명의 검사자가 본 round robin test에 참여하였으며, 초음파검사 경력 100개월 미만인 검사자 3명과 경력 100개월 이상인 검사자 3명으로 구성되었다.

2.1 시험편 구성

2.1.1 검출 및 길이 측정 시험편

검출 및 길이 측정에 대한 round robin test는 총 11개의 시험편을 사용하였다. 11개의 시험편은 각 각 오스테나이트 시험편 7개와 페라이트 시험편 4개로 구성되었다. 또한 전체 11개의 시험편 내에는 열피로 균열 7개와 기계피로 균열 5개가 삽입되었다. 결함은 각각 방향성을 가지고 있으며 원주방향 결함 11개와 축방향 결함 1개로 구성하고 11개의 시험편은 모두 양쪽면 접근이 가능한 조건으로 부여하였다. 시험편의 기하학적 조건은 wide weld crown이 6개, counterbore가 6개로 구성되었으며, 클래딩된 시험편도 2개를 포함하였다. 표 1은 결함의 길이에 대한 분포를 나타내고 있다.

표 1 결함의 길이에 따른 수량

결함길이	1.0"~2.0"	2.0"~3.0"	3.0"~4.0"	≥4.0"
수량	3	3	1	5

2.1.2 깊이 측정 시험편

결함의 깊이측정을 위한 시험편은 오스테나이트 배관 4개 및 페라이트 배관 4개로 총 8개의 결함 시험편으로 구성하였다. 결함의 종류는 열피로 균열 4개와 기계 피로 균열 4개의 결함으로 구성하고, 방향은 모두 원주 방향이 되도록

하였다. 깊이 측정용 시험편에서 배관의 기하학적 조건은 counterbore를 가진 시험편이 5개이고 클래딩이 된 시험편이 2개가 되도록 구성하였다. 또한 결함 깊이 측정을 위해 용접부 크라운을 제거한 flat top 형상을 가지고 있도록 하였다. 표 2는 결함의 깊이에 따른 분포를 나타낸다.

표 2 결함의 깊이별 분포 수량

깊이 분포	오스테나이트	페라이트
0~30% t	1	1
30~60% t	2	2
60~100% t	1	1

2.2 Round robin test 순서

검사 참여자에 대한 round robin test는 먼저 기존의 원자력발전소 배관 용접부의 검사방법인 DAC¹⁾ 방법을 이용하여 용접부 검사를 수행하였다. 다음으로 PD에서 사용되는 방법에 의한 검출 및 길이측정을 위해 검사 참여자에게 사전 실습 교육(Guided practice)을 수행하였다. 교육 후 각 검사 참여자별로 PD 방법에 의한 결함의 검출 및 크기평가 연습을 수행하고 시험을 시행하였다. 검사 참여자에게는 DAC 방법에서 검사한 배관과 동일한 배관을 PD 방법시에도 부여하였으며 선입관에 의한 검사결과 영향을 배제하기 위해 참여자가 동일한 시험편임을 인식하지 못하도록 하였다.

3. 결과 분석

3.1 결함 길이 평가 분석

현재 국내 원자력발전소에서 사용 중인 용접부 길이 측정 방법은 DAC을 사용하여 결함 신호의 최대 진폭을 80%까지 설정하고 신호의 진폭이 좌, 우 40%까지 감소하는 위치를 결함의 길이로 보고하고 있다. 그러나 기량검증에서 사용하는 결함의 길이 평가방법은 DAC을 사용하지 않고 각 시험편의 ID Roll 신호를 5%~20%까지 나타나도록 감도 설정하고 결함의 최대 진폭이 나타나는 위치에서 진폭을 80%로 설정하고 좌, 우 20%까지 감소하는 지점까지를 결함의 길이로 사용한다. 그림 1은 검사 참여자가 측정된

결함의 길이를 DAC에 의하여 측정된 결과와 기량검증에 의하여 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 PD에 의하여 측정된 결함의 길이가 DAC에 의한 측정 길이보다 더 상적인 결과에 근접하였음을 알 수 있다.

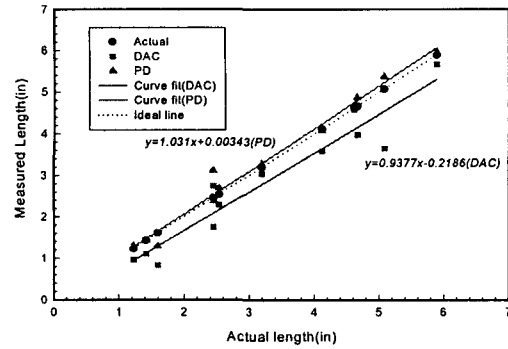


그림 1 DAC 방법과 PD 방법에 의한 결함길이 측정값 비교

3.2 결함 깊이 평가 분석

원자력발전소 배관 용접부에 발생된 결함의 깊이를 측정하기 위해 현재 사용 중인 방법은 DAC 곡선을 이용하고 있으나, PD 방법에서는 결함의 팁(tip)에서 반사된 신호를 검출하여 결함의 깊이를 측정하는 AATT²⁾ 또는 RATT³⁾ 검사방법을 사용하도록 되어 있다. 그림 2는 검사 참여자가 측정된 결함의 깊이를 DAC 방법에 의한 결과와 PD 방법에 의한 결과를 표시한 그림이다.

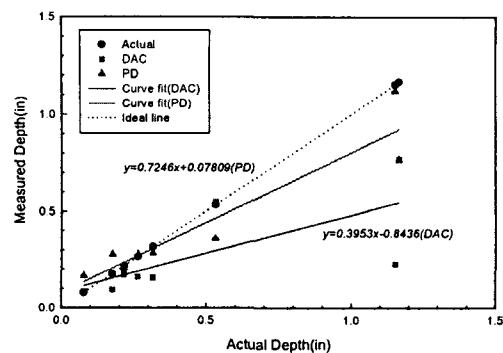


그림 2 DAC 방법과 PD 방법의 결함깊이 측정값 비교

깊이 측정 결과는 길이 측정에서 나타난 결과보다 오차가 많이 발생하였으나 DAC 방법에 비

1) DAC : Distance Amplitude Correction

2) AATT : Absolute Arrival Time Technique

3) RATT : Relative Arrival Time Technique

하여 PD 방법에 의한 측정방법이 더욱 정확한 것으로 나타났다. DAC 방법에 의한 결함의 깊이 측정은 이상적인 결과와 오차가 많이 나고 있고 PD에 의한 방법은 그 오차가 많이 줄어있음을 알 수 있다. 그러나 DAC 방법과 PD 방법 모두 낮은 깊이(0.3인치 이하)의 결함에 대해서는 결함의 깊이를 과대 평가하는 경향을 보였으며 깊은 결함에 대해서는 과소평가하는 경향을 보였다. 오차가 많이 발생하는 원인으로서는 결함의 틱 신호를 정확하게 검출하지 못하여 나타난 것으로 분석된다.

3.3 검사자 경력에 따른 분석

검사 참여자의 검사 경력에 따른 측정 결과의 영향을 평가하기 위해 다음 사항을 고려하였다. 그림 3은 검사자의 경력에 따라서 DAC 방법으로 측정하였을 때 RMS⁴⁾ 오차와 PD 방법으로 측정하였을 때의 RMS 오차 값을 비교하였다. .

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n} \dots \dots \dots (1)$$

여기서

m_i =measured flaw length/depth

t_i =true flaw length/depth

n =number of flaws measured

그림 3은 검사 참여자의 대한 경력에 따른 결함 길이와 깊이 측정 결과를 RMS 오차값으로 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 검사참여자의 경력에 관계없이 DAC 방법에 의한 RMS 오차가 PD 방법에 의한 RMS 오차보다 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 DAC 방법에 의한 RMS 오차는 경력에 따라 크고 작음을 반복하는 것으로 나타났지만 PD 방법에 의한 RMS 오차는 경력에 관계없이 0.3 이하로 나타난 것을 알 수 있다. PD에 의한 평가가 전반적으로 DAC 평가방법에 의해 낮은 RMS 오차값을 나타내었다. 이는 깊이 측정 방법 역시 PD 방법이 DAC 방법보다 우수함을 나타낸다고 볼 수 있다.

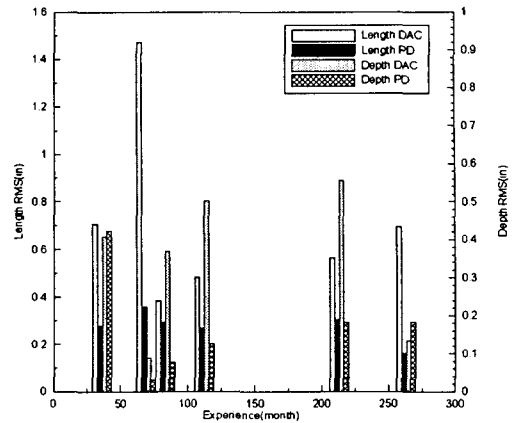


그림 3 경력에 따른 결함 길이와 깊이의 RMS 오차값
4. 결 론

본 연구를 통하여 현재 사용되고 있는 원자력 발전소 배관 용접부 초음파 검사 방법과 새롭게 부상하고 있는 초음파 검사 방법인 기량검증(PD) 방법의 신뢰성을 상호 비교하였으며 아래와 같은 비교 결과를 도출할 수 있었다.

1) 용접부 길이 및 깊이 측정에서 기존의 DAC에 의한 검사 방법과 PD에 의한 검사 방법의 비교 결과 전체적으로 PD에 의한 검사 방법이 매우 우수한 것으로 나타났다.

2) 결함 길이 측정의 경우는 PD 방법이 실제 결함의 길이와 매우 근사하게 평가가 되는 것을 알 수 있었다.

3) 결함 깊이 평가에서는 DAC 방법 및 PD 방법 모두 결함의 깊이가 작은 경우는 실제 결함의 크기보다 과대평가하고 결함의 깊이가 큰 경우는 결함의 깊이를 실제 결함보다 과소평가하는 경향을 보였다.

4) 검사자의 경력보다는 검사 방법(DAC 방법 또는 PD 방법)에 따라서 초음파 결과가 크게 의존함을 알 수 있었으며 전체적으로 PD 방법이 우수함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. ASME B&PV Code Section XI, "Rule for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components" 1995 Edition & 1996 Addenda
2. "Ultrasonic Sizing Capability of IGSCC and Its Relation to Flaw Evaluation Procedures", August 4, 1983, EPRI

4) RMS : Root Mean Square