

초음파검사자 기량검증 체계를 위한 다자비교시험

Round Robin Test for Performance Demonstration System of Ultrasonic Examination Personnel

윤병식*[†], 양승한*, 김영호*, 김용식*, 양동순*

Byung-Sik Yoon*[†], Seung-Han Yang*, Yong-Ho Kim*, Yong-Sik Kim* and Dong-Soon Yang*

초 록 국내 원자력발전소의 Class1과 Class2 배관검사에 적용할 수 있는 초음파탐상 검사자, 장비 그리고 절차서에 대한 한국형 기량검증(KPD) 시스템을 구축하였다. PD 방법을 적용한 검사결과와 전통적인 dB-drop 방법을 이용한 검사결과를 상호 비교하기 위하여 Round Robin Test(RRT)를 수행하였다. RRT 결과는 PD 방법의 신뢰성이 dB Drop 방법보다 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 원자력발전소 가동중검사에 PD 방법을 적용함으로써 초음파탐상검사 결과의 신뢰성이 더욱 향상될 것으로 기대된다.

주요용어: 기량검증, 초음파탐상검사, 다자비교시험

Abstract The Korean Performance Demonstration(KPD) System for the ultrasonic testing personnel, equipments and procedures applicable to the Class 1 and 2 piping examination for nuclear power plant in Korea has been established. A round robin test was conducted in order to compare the examination results by the method of Performance Demonstration(PD) with the traditional dB-drop method. The round robin test shows that the reliability of the PD method is better than that of the dB-drop method. As a result, adoption of the PD method to the in-service inspection of the nuclear power plants will improve the reliability of the ultrasonic test results.

Keywords: performance demonstration, ultrasonic test, round robin test

1. 서 론

초음파탐상검사는 원자력발전소 Class 1, 2기기의 건전성평가를 위한 가동전검사와 가동중검사 수행을 위한 비파괴검사기술의 한가지로서 널리 사용되어 왔다. 그러나 초음파탐상검사는 다른 타 비파괴검사방법에 비하여 검사결과가 검사자의 기량, 장비, 절차서 및 경험에 따라 크게 달라진다. 최근의 세계적인 원자력관련 기술기준은 검사의

신뢰도 및 검사결과에 대한 신뢰도를 부여하기 위해 검사자의 자격관리 및 기량검증을 더욱 강화하는 추세에 있다. 기존의 ASME Code Sec.XI 요건과 원자력 초음파탐상검사 관련 절차서는 1983년도에 미국의 BWR 배관계통의 입계응력부식균열(Intergranular Stress Corrosion Cracking : IGSCC) 결함에 대한 Round Robin Test 결과와 1974년부터 수행한 PISC(Program for Inspection of Steel Components) 결과에서 나타난 바와 같이 많은 문

제점들이 부각되었다[1,2]. 이에 따라 ASME Section XI 1989년 Winter Addenda[3]에서는 초음파탐상검사에 대한 신뢰성 향상을 위하여 원자력 발전소 가동중검사를 수행하는 초음파탐상검사 시스템에 대한 기량검증을 요구하게 되었다. 기량검증(Performance Demonstration)이란 원자력발전소의 검사 부위에서 발생하는 실제 결함과 유사한 결함을 내포한 시험편을 검사부위, 재질, 두께 및 형상별로 제작하여 초음파탐상검사자로 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 적용되고 있다.

본 연구에서는 국내에 기량검증이 본격적으로 시행되기 전에 앞서 기존의 원자력발전소 초음파검사에서 사용되고 있는 DAC를 이용한 결함 크기 평가방법(dB-drop method)과 기량검증(PD)에서 사용하고 있는 결함의 크기평가방법을 상호 비교하기 위해 다자비교시험을 실시하였고, 그 결과를 평가함으로써 새롭게 적용되는 기량검증 초음파검사의 결함 크기평가 방법에 대한 신뢰성을 비교 분석하고자 한다[4-6].

2. 다자비교시험(Round Robin Test) 수행 방법

다자비교시험은 현재까지 원전 가동중검사를 수행하고 있는 3개의 검사업체를 대상으로 시행하였다. 각 검사업체에서 2명의 검사자가 본 다자비교 시험에 참여하였으며, 초음파검사 경력 100개월 미만인 검사자 3명과 경력 100개월 이상인 검사자 3명으로 구성되었다.

2.1. 기량검증 결함 평가 요건

ASME Code Section XI Appendix VIII의 요건에 따른 기량검증 시험은 검출(detection), 길이측정(length sizing) 및 깊이측정(depth sizing)으로 크게 분류할 수 있다. 검출 시험에서는 배관 용접부의 원주방향으로 분포된 채점단위(grading unit)로 나누어진 오스테나이트(Austenite)재질의 배관과 페라이트(Ferrite) 재질의 배관에 대하여 원주방향 및 축 방향 결함을 검출하여야 한다. 여기에서

축 방향 결함의 수는 원주방향 결함의 최소 10% 이상이어야 한다. 상기의 배관에는 접근제한 조건(Limited access condition), 용접부의 형상에 다양한 기하학적 조건이 코드요건에 의하여 엄격하게 적용된다. 또한 배관의 재질에 따른 손상기구를 고려하여 기계피로 균열(Mechanical fatigue crack) 및 열 피로 균열(Thermal fatigue crack)이 적절하게 고려되었다. 길이측정시험은 검출된 결함에 대하여 원주방향 길이를 측정하는 것으로서 응시자는 검출한 원주방향 결함들을 평가하여 실제 결함의 길이의 오차에 대한 RMS 오차값이 0.75인치 이내의 값으로 측정을 하여야만 한다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n}} \quad (1)$$

여기서 m_i = 응시자가 측정한 결함의 길이 또는 깊이
 t_i = 실제 결함의 길이 또는 깊이
 n = 측정한 결함의 수

깊이 측정시험은 결함이 삽입된 위치에 대하여 2인치의 window를 응시자에게 알려주며, 알려진 window내에서 결함의 최대높이를 찾아서 측정을 한다. 깊이 측정시험에서는 실제 결함의 깊이에 대하여 RMS 오차값이 0.125인치 이내의 값으로 평가를 하여야 한다.

2.2. 검출 및 길이 측정 시험편세트

한국형 기량검증 시험에 사용되는 배관 용접부 시험편은 국내 전 원전의 1차 계통 배관의 기하학적 조건을 조사하고 분석결과를 고려하여 배관의 최대, 최소 직경과 최대, 최소 두께를 결정하였으며, 발전소의 다양한 용접부의 형상을 모두 고려하여 설계 및 제작 하였다. 배관 직경이 6인치 이하인 시험편은 원주방향으로 분할없이 하나의 시험편으로 사용하고, 직경이 12인치 이상인 배관에 대하여는 360도 원주둘레를 축 방향으로 분할하여 시험편으로 사용하였다. 시험용 시험편은 결함이 삽입된 용접부를 중심으로 upstream 방향으로 12인치, down stream 방향으로 12인치로 가공하여 총 24인치의 축 방향 길이로 되어 있다.

검출 및 길이 측정에 대한 다자비교시험은 총 11개의 시험편을 사용하였다. 11개의 시험편은 각

각 오스테나이트 시험편 7개와 페라이트 시험편 4개의 조건으로 부여하였다. 또한 전체 11개의 시험편 내에는 열피로 균열 7개와 기계피로 균열 5개가 삽입되었다. 결함은 각각 방향성을 가지고 있으며 원주방향 결함 11개와 축 방향 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. Table 1은 결함의 길이에 대한 분포를 나타내고 있다.

Table 1 Flaw length distribution for RRT

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

2.3. 깊이 측정 시험편 세트

결함의 깊이측정을 위한 다자비교시험용 시험편 세트는 오스테나이트 배관 4개 및 페라이트 배관 4개로 총 8개의 용접 시험편으로 구성하였다. 시험편 세트내의 결함의 종류는 열피로 균열 4개와 기계 피로 균열 4개로 구성하고, 결함의 방향은 모두 원주 방향이 되도록 하였다. 깊이 측정용 배관 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. Table 2는 결함의 깊이에 따른 분포를 나타낸다.

Table 2 Flaw depth distribution for RRT

Depth range	Austenite	Ferrite
0~30% t	1	1
30~60% t	2	2
60~100% t	1	1

2.4. 다자비교시험 절차

다자비교시험 참여자에 대한 시험은 기존의 원자력발전소 배관 용접부의 검사방법인 dB-drop 방법

을 이용하여 용접부 검사를 수행하였다. 다음으로 PD에서 사용되는 방법에 의한 검출 및 길이측정을 위해 검사 참여자에게 사전 실습교육(guided practice)을 수행하였다. 사전 실습 교육시에는 새로운 검사방법에 대한 교육 후 각 검사 참여자별로 PD 방법에 의한 결함의 검출 및 크기평가 연습을 수행하고 시험을 시행하였다. 검사 참여자에게는 DAC 곡선을 이용한 검사 방법에서 검사한 배관과 동일한 배관을 PD 방법시에도 부여하였으며 신입 관에 의한 검사결과에 영향을 배제하기 위해 참여자가 동일한 시험편임을 인식하지 못하도록 하였다. Fig. 1은 본 다자비교시험의 진행 절차를 개략적으로 나타낸 그림이다.

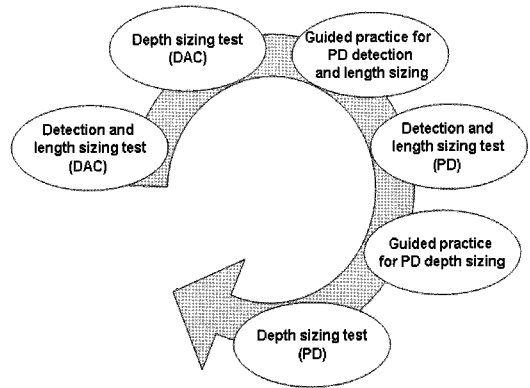


Fig. 1 Flow chart for round robin test

3. 결과 및 고찰

3.1. 결함 검출 결과 분석

지금까지 원자력발전소 초음파 검사시 탐상감도는 교정시험편에 가공된 측면공(Side drill hole)으로부터 감도를 설정하고 6 dB 또는 12 dB 높은 감도에서 검사를 수행하고 있다. 그러나 기량검증에서 사용중인 일반절차서에는 교정시험편의 내부에 가공된 10% notch를 이용하여 80% 진폭에서 교정 감도를 설정하고 실제검사 시에는 5~20% ID roll 신호를 사용하여 탐상을 하도록 요구하고 있다. 두 가지 방법에 의하여 나타난 검사감도를 비교하면 측면공에 의한 감도 설정보다 ID roll에 의한 검사감도 설정이 조금 높은 dB값을 나타내었다. 본 RRT에 참여한 6명의 응시자 모두 원주방향 결

함에 대하여 100% 검출을 하였으나 축방향 결함에 대하여는 한명의 응시자만이 축방향 채점단위에서 축방향 결함을 원주방향으로 검출을 하였다. 이는 축방향 결점에 대한 충분한 훈련이 이루어지지 않아 발생한 것으로 사료된다. 그리고 결함이 없는 곳에서 결함이 있는 것으로 평가를 한 False call은 dB drop 방법에서 3개가 있었으나, PD 방법에서는 하나의 False call도 기록되지 않았다.

3.2. 결함 길이 평가 결과 분석

현재 국내 원자력발전소에서 사용 중인 용접부 길이 측정 방법은 DAC 곡선을 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 DAC 곡선을 사용하지 않고 각 시험편의 ID Roll 신호를 5%~20%까지 나타나도록 감도를 설정하고 결함의 최대 진폭이 나타나는 위치에서 진폭을 80%로 감도 조절 후 좌, 우 20%까지 감소하는 지점까지를 결함의 길이로 측정한다. Fig. 2은 검사 참여자가 측정된 결함의 길이를 DAC 곡선에 의하여 측정된 결과와 기량검증에 의하여 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 PD에 의하여 측정된 결함의 길이가 DAC 곡선에 의한 측정 길이보다 더 이상적인 결과에 근접하였음을 알 수 있다.

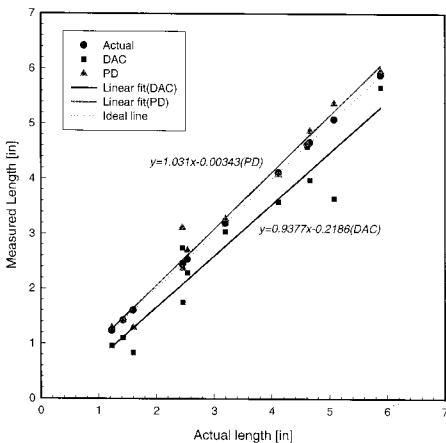


Fig. 2 The flaw length measurement result according to the dB-drop method and PD method

3.3. 결함 깊이 평가 결과 분석

원자력발전소 배관 용접부에 발생된 결함의 깊이를 측정하기 위해 현재 사용 중인 방법은 DAC 곡선을 이용한 dB-drop 방법을 사용하고 있으나, 한국형 기량검증체제에서 개발한 일반 절차서에는 결함의 팁(tip)에서 반사된 신호를 검출하여 결함의 깊이를 측정하는 AATT(Absolute Arrival Time Technique) 또는 RATT(Relative Arrival Time Technique) 검사방법을 사용하도록 요구하고 있다. Fig. 3은 검사 참여자가 측정된 결함의 깊이를 DAC 방법에 의한 결과와 PD 방법에 의한 결과를 표시한 그림이다.

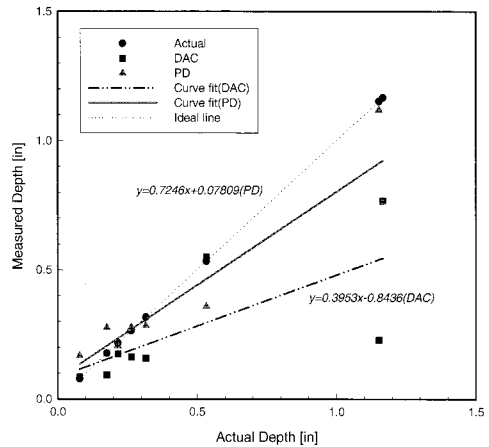


Fig. 3 The flaw depth measurement result according to the dB-drop method and PD method

깊이 측정 결과는 길이 측정에서 나타난 결과 보다 오차가 많이 발생하였으나 dB-drop 방법에 비하여 PD 방법에 의한 측정방법이 더욱 정확한 것으로 나타났다. DB-drop 방법에 의한 결함의 깊이 측정은 이상적인 결과와 오차가 많이 나고 있고 PD에 의한 방법은 그 오차가 많이 줄어들었음을 알 수 있다.

그러나 dB-drop 방법과 PD 방법 모두 낮은 깊이 (약 0.3인치 이하)의 결함에 대해서는 결함의 깊이를 과대평가하는 경향을 보였으며 깊은 결함에 대해서는 과소평가하는 경향을 보였다. 오차가 많이 발생하는 원인은 결함의 팁 신호를 정확하게 검출하지 못하여 나타난 것으로 분석된다.

3.4. 검사자 경력에 따른 영향

검사 참여자의 검사 경력에 따른 측정 결과의 영향을 평가하기 위해 다음 사항을 고려하였다. Fig. 4는 검사 참여자의 경력에 따른 결함 길이 측정결과를 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 비해 낮은 RMS 오차값을 나타내었다. 이는 길이 측정 방법 역시 PD 방법이 DAC 방법보다 우수함을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 4에서 점선은 ASME 코드에서 요구하는 결함의 길이 측정시 합격을 위한 최대 RMS값인 0.75인치를 나타낸다.

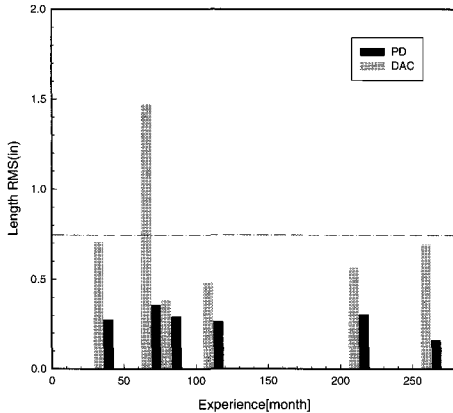


Fig. 4 The RMS value of the flaw length versus field experience

Fig. 5는 검사 경력에 따라 결함의 깊이에 대한 RMS값을 DAC 방법에 의한 결과와 PD방법에 의한 결과를 동시에 나타낸 결과이다.

깊이 측정결과도 길이 측정결과와 동일하게 검사 결과의 정밀도는 검사자의 경력과 무관한 것으로 나타났으며 검사방법에 따라 측정결과가 달라짐을 알 수 있다. Fig. 5에서 수평 점선은 깊이 측정시 ASME 코드에서 요구하는 최대 RMS 값인 0.125인치 선을 표시하고 있다.

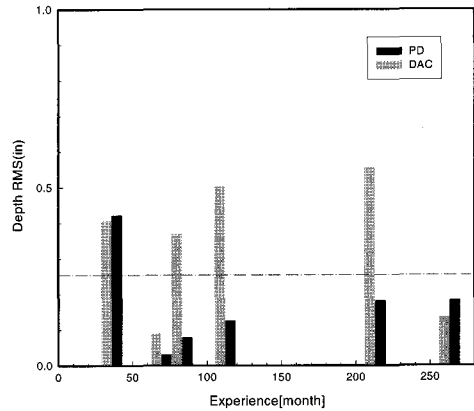


Fig. 5 The RMS error of the flaw depth versus field experience

3.5. 검사자 자격에 따른 영향

본 다자비교시험에 참가한 응시자중 3명은 EPRI에서 시행하고 있는 기량검증시험에 응시하여 배관에 대한 미국기량검증 자격을 이미 보유하고 있으며, 나머지 3명은 기량검증에 대하여 전혀 경험이 없는 검사자로 구성되어 있다. Fig. 6은 EPRI 기량검증 시험에 대한 자격 보유자와 자격 미 보유자에 대한 길이 측정시험결과를 RMS 오차값으로 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 것과 같이 기량검증 자격보유자와 자격 미보유자에 대한 차이는 크게 나타나지 않았다.

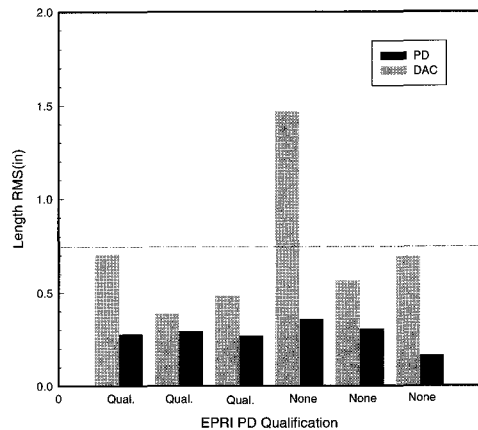


Fig. 6 The RMS error of the flaw length versus EPRI PD qualification status

Fig. 7은 EPRI 기량검증 시험에 대한 자격 보유자와 자격 미 보유자에 대한 깊이 측정시험결과를 RMS 오차값으로 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난것과 같이 기량검증 자격보유자와 자격 미보유자에 대한 차이는 크게 나타나지 않았다.

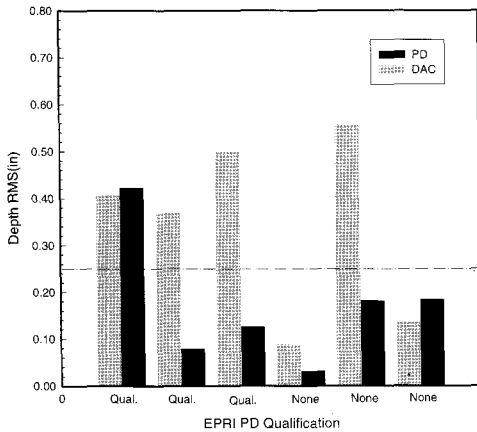


Fig. 7 The RMS error of the flaw depth versus EPRI PD qualification status

4. 결 론

본 연구를 통하여 지금까지 사용한 원자력발전소 배관 용접부 초음파탐상검사 방법과 새로 적용될 초음파탐상검사 방법인 기량검증(PD) 방법의 신뢰성을 상호 비교하였으며 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 1) 용접부 결함의 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) RRT의 참여자가 많지는 않았으나 검사자의 경력이나 기존의 PD 자격 취득과는 무관하게 검사 방법(DAC 방법 또는 PD 방법)에 따라서 초음파 결과가 크게 의존함을 알 수 있었으며 전체적으로 PD 방법이 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 다자비교시험에 협조하여 주신 각 검사 업체 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Gary J. Dau, "Ultrasonic Sizing Capability of IGSCC and Its Relation to Flaw Evaluation Procedures," EPRI, pp. 1-5, (1983)
- [2] M. Beth and J. L. Monjaret "Round Robin Test Results on Ultrasonic Testing of Austenitic Welds," 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New Orleans, Vol. 6, No. 1, (2001)
- [3] ASME B & PV Code Section XI, "Rule for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components," 1995 Edition & 1996 Addenda
- [4] 박문호, 강석철, "ASME 및 CSA 코드에 의한 초음파 결함 크기 측정", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 313-315, (1998)
- [5] 박은수, 박익근, 김현묵, 강석철, "초음파 비파괴 검사 신뢰도 평가 모델", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 6, pp. 607-611, (2001)
- [6] 박익근, 박은수, 김현묵, 박운원, 강석철, 최영환, 김진호, "초음파탐상 PD-RR Test의 통계적 신뢰도 평가(3)", 2003 비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 214-219, (2003)