

## 원자력발전소 초음파검사자 기량검증시험 결과 검토

### Study on Performance Demonstration Test Result of Ultrasonic Examination in Nuclear Power Plant

정남두\*<sup>†</sup>, 문용식\*, 이승표\*

Nam-Du Jung\*<sup>†</sup>, Yong-Sig Moon\* and Seung-Pyo Lee\*

**초 록** 본 논문에서는 국내 원자력발전소 초음파검사자 기량검증시험 결과를 검토하였다. 원자력발전소 안전관련 설비에 대한 초음파검사 기량검증 요건은 ASME B&PV Code Section XI 1989 겨울 부록에서 최초로 언급되었다. 한국수력원자력(주)은 ASME Code Section XI, Appendix VIII의 요건 적용을 위해 국내 원자력발전소에 적합한 한국형 초음파검사 기량검증(KPD) 시스템을 개발, 규제기관의 승인을 받아 2004년 7월부터 운영하고 있다. 본 논문에서는 2004년부터 2013년까지 수행한 초음파검사자 기량검증시험 결과의 검토 내용으로 초음파검사 결함 검출 향상 및 기량훈련시스템 연구 개발에 도움을 줄 것으로 기대한다.

**주요용어:** 초음파검사, 기량검증

**Abstract** In this paper, the result of an ultrasonic performance demonstration are analyzed. The requirements for an ultrasonic performance demonstration (PD) for a nuclear power plant were first described in ASME B&P Code Section XI, Appendix VIII (1989 winter addenda). In order to establish the performance demonstration scheme in Korean nuclear power plants, the Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd (KHNP) has developed the Korean Performance Demonstration (KPD) system for the for the ultrasonic examination of nuclear power plants. An analysis of the ultrasonic performance demonstration results from 2004 through 2013 will improve the detection of flaws in an ultrasonic examination, as well as the further development of the KPD training system.

**Keywords:** Ultrasonic Performance Demonstration

#### 1. 서 론

원자력발전소 가동전/중검사 결함 검출 향상 및 초음파검사의 정확성을 향상하기 위해 원자력발전소의 검사 부위에서 발생하는 실제 결함과 유사한 결점을 내포한 시편을 검사 부위, 재료, 두께 및 형상별로 각각 제작하여 이를 이용, 초음파탐상 검사자, 절차서 및 장비에 대하여 사전에 능력을 검증하는 한국형 비파괴검사 기량검증(KPD)제도는 국내 원자력발전소의 가동중검사 기술기준 ASME B&P Vessel Code Sec. XI 및 미국 연방 규제기관 NRC 발행 10CFR50.55a를 기

반으로 개발되었다[1]. 국내 한국형 비파괴검사 기량검증(KPD)제도의 원자력발전소 적용은 과학기술부 고시 제2004-13호의 공표를 시작으로 현재는 원자력안전위원회 제2012-10호의 원전시설의 가동중검사에 관한 고시에 따르고 있다. 한국형 비파괴검사 제도의 비파괴 적용 분야는 초음파검사와 와전류검사로서, 본 연구에서는 배관 동종금속(수동,자동), 스테드/볼트(straight/bore), 배관 이종금속 초음파검사에 관한 것으로써 2004년부터 2013년도까지의 기량검증(PD) 시험 결과의 내용을 기술하고자 한다[2,3].

[접수일: 2014. 7. 15, 수정일: 2014. 8. 22, 게재확정일: 2014. 10. 8] \*한국수력원자력(주) 중앙연구원 비파괴기량검증팀, <sup>†</sup>Corresponding Author: NDE Performance Demonstration Team, Korea Hydro & Nuclear Power, Central Research Institute, Daejeon 305-343, Korea (E-mail: jungnd@khnp.co.kr)

Table 1 Aus &amp; Feri system metal weld specimen

	Specimen	Normalinal Dia.(in)	External Dia.(in)
Aus (ss)	2" Sch 160	0.237	2.375
	~ 24" Sch 100	~ 1.531	~ 24.000
Feri (cs)	2" Sch 160	0.218	2.375
	~ 50" With Clad	~ 3.85	~ 50

Table 2 Dissimilar metal weld specimen

External Dia.(in)	Metal Weld Thick.(in)	Applied NPP Type
2.2	0.45	OPR1000
~	~	W/F
37.2	4.81	CANDU

## 2. 시험편 구성 및 평가/합격 기준

### 2.1. 초음파검사 기량검증 시험편

초음파검사 기량검증 시험편은 기량검증 적용 기술기준 ASME Sec. XI Appendix VIII, Code Case 및 10CFR50.55a등에 따라 제작되고 있다. 기량검증 시험편은 2011년도 정부의 원자력분야 R&D 일원화 정책에 따라 한수원 중앙연구원에서 보유 및 관리되고 있으며, 기량검증체도의 독립성과 객관성 강화를 위해 제3기관(現, 한국비파괴 검사학회)에 의한 기량검증 이행상태 확인, 인정 서류 검토 등 운영절차를 보완하여 시행하고 있다. 국내 기량검증 시험편은 크게 동종금속배관 시험편, 스테드/볼트 시험편, 이종금속배관 시험편으로 분류되며 동종금속 기량검증용 시험편은 재질의 종류에 따라 스테인레스계(SS) 시험편과 페라이트계(FE) 시험편으로 구분되며, Table 1은 시험편의 사양을 대략적으로 나타내고 있다[4,5].

스테드/볼트 시험편은 크게 보아(bore)가 없는 시험편과 보아가 있는 시험편으로 구분되며 외경 50.8~166.93 mm, 길이 406.4~1,862.1 mm의 시험편으로 구성되어 있다.

이종금속용접부 기량검증 시험편은 일반 기량검증 시험편과 특정기량검증 시험편 2가지가 있다[5]. 일반 기량검증 시험편은 국내 원전 배관 이종금속용접부의 두께, 직경, 수량, 재질을 고려하여 전체적으로 대표적인 형상이 포함될 수 있

Table 3 Dissimilar metal weld specific specimen

External Dia.(in)	Metal Weld Thick.(in)	Applied NPP Type
4.63	0.55	OPR1000 W, F
~	~	
37.4	3.7	

도록 선정하였다. Table 2는 이종금속배관의 일반 기량검증 시험편 사양을 나타내고 있다.

이종금속배관의 특정기량검증 시험편은 일반 기량검증 시험편의 형상에 포함되지 않는 형상을 고려하여 설계 및 제작되었다. Table 3은 특정 기량검증 시험편에 대한 사양을 나타내고 있다. 시험편의 배관 모재중 일부는 주조 스테인레스 강이 포함되어 있다. 특정기량검증 시험편은 특정 검사 대상부 위에 대한 검사 기법을 개발하기 위하여 설계, 제작되었다.

### 2.2. 초음파검사 기량검증 평가 기준

초음파검사 기량검증 시험평가는 ASME Code Section XI Appendix VIII와 10CFR50.55a에 따른다. 초음파검사 기량검증은 실기시험으로 구성되며 외면으로부터의 인정을 위해 시험편 내면과 시험편 식별 번호는 응시자에게 보이지 않도록 해야 한다. 인정이 내면에서 수행될 경우에는 "blind test"가 유지될 수 있도록 결점의 위치와 시험편 식별 번호가 숨겨져야 한다. 시험 결과를 채점하고 채점 결과를 응시자에게 제시하기 이전에 모든 검사가 완료되어야 한다. 기량검증 이후에도 특정 시험편의 시험 결과를 공개하지 말아야 하며 응시자가 사용한 시험편을 볼 수 없도록 해야 한다. 초음파검사 기량검증 시험 평가 요건으로 2가지가 있으며, 배관(동종/이종금속) 기량검증 시험 평가와 스테드/볼트 기량검증시험 평가가 있다. 배관 기량검증시험 평가 요건은 결점의 검출시험과 길이 및 깊이 크기 평가로 구분된다. 배관 초음파검사 기량검증 검출 시험의 결점 및 무결점 채점 단위는 무작위로 섞어야 하며, 모든 채점 단위는 최소 3in의 용접 길이를 포함해야 한다. 모든 결점의 끝은 최소 1in의 무결점 재료에 의해 무결점 채점 단위와 구분하며, 하나의 채점 단위에서 사용된 용접 길이 부분은 다른 채점 단위에서 사용되어서는 안 된다. 채점 단위가

배관시험편 둘레에 균일한 간격으로 위치될 필요는 없다. 길이 평가시험만 별도로 시행하는 경우, 크기를 평가하는 결점을 포함하고 있는 각 시험편의 부위를 시험 응시자에게 알려줘야 한다. 응시자는 각 부위에 있는 결점 길이를 결정해야 하며, 깊이 평가 시험의 경우, 응시자는 각 부위에 있는 결점의 최대 깊이를 결정해야 한다. 스테드/볼트 초음파검사 기량검증의 경우 시험편 식별 및 노치 위치는 "blind test"를 유지하기 위해 응시자가 육안으로 볼 수 없도록 해야 한다. 노치를 규정대로 검출할 때 결점을 검출한 것으로 간주한다. 노치의 축 방향 위치 상관관계는  $\pm 1/2$  in. 혹은 볼트 또는 스테드 길이  $\pm 5\%$  중 큰 값 이내여야 한다. 노치 응답은 최대신호 대 최대잡음비가 최소한 2:1이어야 한다.

### 2.3. 초음파검사 기량검증 합격 기준

배관(동중/이중급속) 초음파검사 기량검증 합격 기준은 검출 합격 기준과 크기 평가 합격 기준이 있다. 검출 합격 기준은 검사절차서, 장비 및 검사자의 기량검증 결과가 검출 및 잘못된 판정에 대해 Table 4의 합격 기준을 만족할 때 검출에 대하여 인정이 된 것으로 간주한다.

Table 5는 이중급속배관에 대한 기량검증 검출 허용 기준을 나타내고 있다.

크기 평가 합격 기준은 검사절차서, 장비 및 검사자의 기량검증 결과, 실제 결점 길이와 비교 시 초음파에 의해 평가된 결점 길이의 RMS 오차가 0.75 in.를 초과해서는 안 된다. 또한, 결점 깊이의 경우 실제 결점 깊이와 비교 시 초음파에 의해 평가된 결점 깊이의 RMS 오차가 0.125 in.를 초과하지 않아야 인정이 된 것으로 간주한다. 스테드/볼트 초음파검사 기량검증시험의 허용 기준은 Table 6과 같이 검출 기준과 오류 판정 기준으로 구성된다.

노치의 개수 및 판정은 기본적으로 외면노치만을 기준으로하나 KEPIC MI 2003A 이전 코드인 경우는 외면 및 내면노치를 기준으로 병행하여 합부 판정을 하고 있으며, 기량검증인정 서류에 두 기준에 따른 결과를 별도로 명시하고 있다.

현재 초음파검사 기량검증 분야중 국내 기량검증체계가 구축이 되지 않은 원자로 용기, 배관 오버레이용접부, 원자로 상부 헤드관통관의 기량

Table 4 Similar metal weld detection criteria

Detection Acceptance Criteria		False Call Acceptance Criteria	
Flaw Units	Minimum Detec. Criteria	Unflaw Units	Maximum False Call
5 ~ 20	5 ~ 14	10 ~ 40	0 ~ 8

Table 5 Dissimilar metal weld detection criteria

Detection Acceptance Criteria		False Call Acceptance Criteria	
Flaw Units	Minimum Detec. Criteria	Unflaw Units	Maximum False Call
10 ~ 20	8 ~ 14	15 ~ 30	2 ~ 5

Table 6 Stud/Bolt detection criteria

No. of Notch	No. of Minimum Detection Criteria	No. of False Call
5 ~ 10	4 ~ 8	0 ~ 2

검증은 미국전력연구소(EPRI)의 기량검증시스템에 따라 수행되며 국내 기량검증 운영조직은 미국 기량검증시스템(PDI)에 의해 인정된 자격에 대한 관련서류와 목록을 유지, 관리하며 이를 근거로 한국형 기량검증 인정확인서를 발행한다. 현재 국내 원자로 상부 헤드관통관 기량검증체계를 개발중에 있다.

### 2.4. 초음파검사 연차 실기훈련

초음파검사자의 기량검증 실기훈련은 원자력발전소의 가동중검사를 위한 초음파검사 수행 전 6개월 이내에서 연간 10시간 이상을 실시하여야 한다. 연차 실기훈련은 기량검증시험을 통과한 검사자를 대상으로 개개인의 자격인정 범위에 국한하여 시행하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 실기훈련 참가자의 사용할 장비는 기량검증된 장비와 절차서를 사용한다. 초음파검사자 실기훈련은 수동 초음파검사 및 자동 초음파검사로 구분하여 실시하며, 실기훈련 시간은 1개 분야 기량검증 자격보유자에 대해서는 10시간, 2가지 분야 기량검증 자격을 보유한자에 대해서는 각 분야별로 8시간씩, 총 16시간을 하는 것을 기준으로 한다. 초음파검사자는 실기훈련시 참여자의 기량검증 범위에 적합한 결점 검출, 길이 평가 또는 깊이 평가를 실시한다. 실기훈련 참여자가 검출, 길이

및 깊이 평가에 대하여 자격 인정을 받은 경우, 위 시험편 중 최소 1개 이상의 결점에 대해서는 결점 검출, 길이 평가, 깊이 평가를 동시에 하여야 한다. 실기훈련은 시험이 아니므로 합격·불합격을 구분하지 않으며 실기훈련 결과는 이미 취득한 실기훈련 참여자 개인의 자격인정 범위에는 영향을 주지 않는다.

3. 기량검증시험 결과 및 고찰

한국형 초음파검사 기량검증시험 결과에 대한 검토 대상은 2004년부터 2013년까지 시행한 동종배관(수동/자동), 스테드/볼트, 이종급속배관에 대한 것이다. Fig. 1은 동종배관 수동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정시험 응시자중 불합격자의 불합격 원인을 나타내고 있다.

Fig. 1의 시험 결과에 대한 검토 결과, 동종배관 수동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 불합격 주요 원인은 결점을 검출하지 못한 것이었다. Fig. 2는 동종배관 수동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험응시자에 대한 합부 현황을 나타내고 있다.

동종배관 수동 초음파검사 응시자는 1차 시험에 56% 합격하였으며, 최종 합격자는 90%이었다. 동종배관 자동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정시험 최종합격자 88%와 비슷한 합격률을 보였다. Fig. 3은 동종배관 수동 초음파검사 결점 깊이 측정 시험응시자에 대한 합부 현황을 나타내고 있다.

Fig. 3의 시험 결과에 대한 검토 결과, 동종배관 수동 초음파검사 결점 깊이 시험응시자는 1차 시험에서 67% 합격하였으며, 수동 및 자동 결점 검출 및 길이 측정 1차 시험 합격률보다 높았으나, 최종 합격률은 수동 및 자동 초음파 결점 검출 및 길이 측정 합격률 81%로 다소 낮은 합격률을 보였다. Fig. 4는 동종배관 자동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험응시자중 불합격자에 대한 원인을 나타내고 있다.

Fig. 4의 시험 결과에 대한 검토 결과, 동종배관 자동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 불합격 주요 원인은 결점의 miss 및 miss & false인 것으로서 배관 수동의 61% 보다 많은 79%로 파악되었다. Fig. 5는 동종배관 자동 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험응시자에 대한 합부

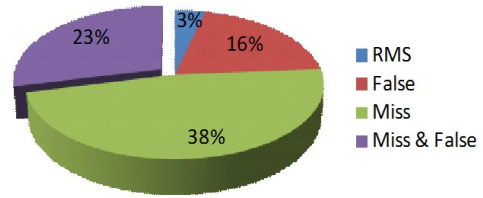


Fig. 1 Similar metal weld manual UT test fail status

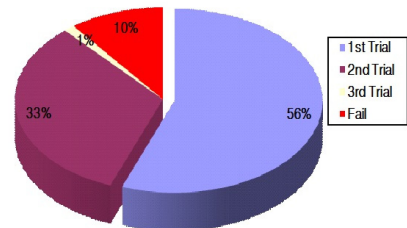


Fig. 2 Similar metal weld manual UT dect & leng test pass status

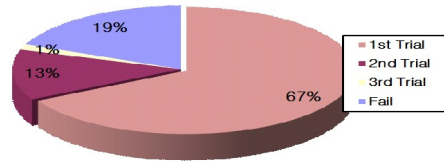


Fig. 3 Similar metal weld manual UT flaw depth test pass status

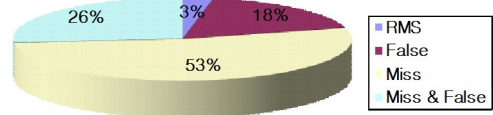


Fig. 4 Similar metal weld automated UT test fail status

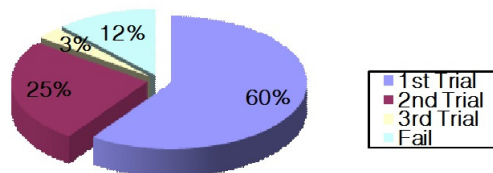


Fig. 5 Similar metal weld manual UT dect & leng test pass status

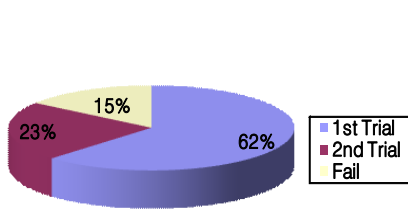


Fig. 6 Stud/Bolt straight detection test pass status

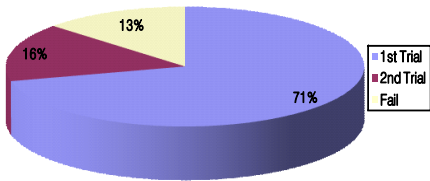


Fig. 7 Stud/Bolt bore detection test pass status

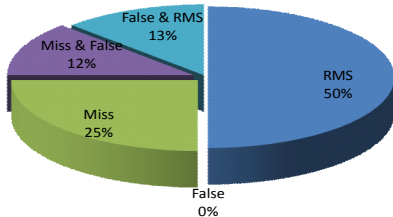


Fig. 8 Dissimilar metal weld manual UT test fail status

현황을 나타내고 있다.

Fig. 5의 시험 결과에 대한 검토 결과, 동종배관 자동 초음파검사 응시자는 1차 시험에서 60% 합격하였으며, 수동 초음파검사 결점 길이 및 깊이 측정 시험 합격률 90%와 비슷한 88% 수준을 보였다. Fig. 6은 스테드/볼트 수직(straight) 초음파검사 결점 검출 시험응시자에 대한 합부 결과를 나타내고 있다. Fig. 6의 스테드/볼트 straight 검사 결점 검출 시험 합격률은 85%였으며, 스테드/볼트 보아검사의 합격률 87%와 비슷한 수준이었다.

Fig. 7은 스테드/볼트 보아검사 결점 검출 시험 응시자에 대한 합부 결과를 나타내고 있으며, 최종합격률은 87%이다.

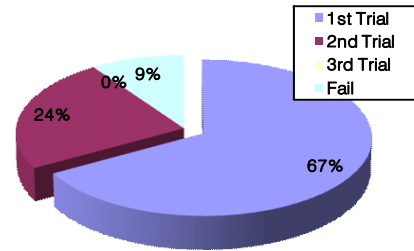


Fig. 9 Dissimilar metal weld dect & leng test pass status

Fig. 8은 이종금속배관 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험응시자중 최종 불합격자에 대한 원인을 나타내고 있다.

Fig. 8의 시험 결과에 대한 검토 결과, 이종금속배관 검사의 결점 검출 및 길이 측정 불합격 주요 원인은 측정오차값(RMS) 초과로 인한 불합격률이 50%를 차지하고 있다. 반면에, 동종배관 수동검사의 측정 오차값 초과로 인한 불합격률 3%, 동종배관 자동검사 측정 오차값 초과로 인한 불합격률 3%와는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 이종금속배관 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험 응시자에 대한 합부 결과를 나타내고 있다. Fig. 9의 이종금속배관 초음파검사 결점 검출 및 길이 측정 시험 합격률은 91%이다.

#### 4. 결 론

본 논문은 초음파검사 기량검증시험 결과 검토 내용으로서 2014년 신규 기량검증시험 응시자의 결함 검출 향상 및 훈련용 결함 시편 개발에 활용하고자 한다.

- 1) 초음파검사 기량검증시험 결과 검토 대상은 동종배관 수동 초음파검사 검출/길이 측정 및 깊이 측정, 동종배관 자동 초음파검사 검출/측정, 스테드/볼트 Straight 및 보아 초음파검사, 이종금속배관 수동 초음파검사의 검출/길이 측정으로서 분야별 불합격 주요 원인을 파악하였다.
- 2) 초음파검사자의 기량 증진을 위해서는 분야별 특성에 맞는 기량훈련용 시편의 개발 및 실습 훈련이 필요한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] S. K. Kim, Y. S. Kim, H. J. Lee, M. W. Nam, C. H. Cho, H. J. YOO, B. S. Yoon, S. H. Han, "Development of Performance Demonstration System for Non-Destructive Examination of Nuclear Power Plant", Final Report, KHNP (2004)
- [2] ASME XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components" (1995, 1998)
- [3] EPRI, "Steam Generator Management Program: Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines (2007)
- [4] J. C. Drury, Ultrasonic Flaw Detection For Technicians, (1997)
- [5] Y. S. Moon, Y. B. Cho, Y. S. Kim, H. J. Lee, M. W. Nam, C. H. Cho, S. N. Choi, "Development of Performance Demonstration System for Dissimilar Metal Weld-1" (2011)