



# 한국형 초음파 탐상 기량 검증 시스템 개발

박 양 기

한수원(주) 발전처 기계부 과장

## 서 론

한국수력원자력(주)는 원자력발전소의 안전성 확보 및 향상은 재료 건전성 확보가 전제 조건임을 인식하고, 가동 전/중 검사 신뢰도 향상을 위하여 한국형 기량 검증 시스템을 개발하고 있다. 그러나 한국의 원자력발전소는 미국의 원자력발전소와는 달리 비등형 경수로가 없는 대신에 가압중수로가 있으므로 미국의 기량 검증 시스템을 그대로 적용하기 곤란하다.

따라서 금번 개발중인 기량 검증 시스템을 가압중수로 및 중수로에 동시 적용할 수 있는 한국형 기량 검증 시스템(Korean Performance Demonstration : KPD)을 구축하고 있다.

이번에 개발중인 KPD에는 경수로 및 중소로의 배관 및 스테드/볼트가 포함되며 다음 사항들은 이미 완료된 상태이다.

① 배관 및 압력 용기 용접부에 대한 현장 조사, ② 시편 종류 및 수량 결정, ③ 시편 설계, 시편 운영 및 제작을 위한 품질 보증 절차서, ④ UT 표준 절차서 개발

KPD에 사용될 모든 절차서 및 시편은 PWR에 대하여는 미국 10 CFR 50.55 a 및 ASME Sec. XI의 요건을 만족할 수 있도록 개발하였다.

한편 PHWR에 대하여는 CSA Code에서 기량 검증을 요구하고는 있으나, 기량 검증 방법 및 요건이 명시되어 있지 않을 뿐 아니라 캐나다 내에서는 2005년을 시행 목표로 요건을 준비중에 있어, PHWR 원자로 배관에 대하여도 ASME Sec. XI에 따라 기량 검증 시스템을 구축하였다.

한수원은 시행 착오 및 개발 기간을 최소화하고 개발된 기량 검증 시스템의 활용성을 높이기 위하여 기량 검증을 시행하고 있는 미국의 시

스템을 구축한 미국 EPRI NDE Center와 2000. 10부터 공동으로 시스템을 개발중에 있으며, 미국 기량 검증 프로젝트(PDI : Performance Demonstration Initiative)에 회원으로 가입하여, 그들의 개발 경험을 국내 기량 검증 기술 개발에 반영하고 있다.

현재 한수원은 마지막 단계로 2003년 10월부터 시편을 제작중에 있으며, 2003년 5월 이전에 시편을 확보하여 2003년 7월부터 국내 검사 업체를 대상으로 기량 검증 시험을 실시하여 2004년 1월부터 배관 및 스테드/볼트 기량 검증 시행에 차질이 없도록 할 예정이다.

## 현장 실사

기량 검증 시스템 구축에 가장 중요한 업무인 시편의 설계·제작을 위하여 먼저 국내 원전의 원자로/배관/볼트(스테드) 용접부 형상 조

〈표 1〉 국내 PWR 배관의 최대·최소 직경 및 두께 분포

구분	오스테나이트	페라이트
최소 직경	2.0 in	6.0 in
최소 두께	0.22 in	0.38 in
최대 직경	24 in	42 in
최대 두께	1.6 in	4.4 in

사를 실시하였다.

기기/배관/볼트 용접부 형상 조사에서는 국내에서 운영중인 미국 웨스팅하우스사·프랑스 프라마돔사 및 캐나다의 AECL에서 공급한 발전소를 대상으로 하였다.

국내 PWR 발전소의 원자로 냉각재 계통 배관 중 주조 스테인리스강은 현재 기량 검증을 시행할 수 없어 본 분석에서는 제외하였다.

RCS 배관에 대한 배관 사양 조사 결과 각 재질에 대한 최대, 최소 두께 및 직경은 〈표 1〉과 같다.

월성 1~4호기 발전소는 검사 대상 배관이 모두 페라이트강으로 되어 있다. 월성 발전소 배관의 두께 및 직경 분포는 〈표 2〉와 같다.

이 표 및 〈그림 1〉에서 알 수 있듯이 월성 1~4호기의 배관은 경수로형 발전소 배관 범주 내에 포함되므로 시험편 배관 종류 선정시 경수로형 배관만을 고려하여도 가압경수로 기량 검증에는 문제가 없을 것으로 보인다. 한편 시험 분류 B-G-1에 따라 표면 또는 체적 검사를 수행하도록 되어 있는 스테드/볼트 검사의 주요한 변수는 재질, 헤드 형상, 보어 홀의 직경, 스테드/볼트의 직경, 길이 등을 조사하였으며 그 결과는 〈표 3〉과 같다.

**시험편의 종류/수량 결정 및 설계**

기량 검증에 사용될 배관 시험편의

〈표 2〉 국내 PHWR 배관의 최대·최소 직경 및 두께 분포

최소 직경	6.0 in
최소 두께	14.27 mm (0.56 in)
최대 직경	20 in
최대 두께	45 mm (1.77 in)

〈표 3〉 국내 원전 볼트/스터드의 길이 및 직경 분포

구분	PWR	PHWR
길이	45.5~78.7 in	9.5~25 in
직경	2.3~6 in	1.5~3 in
Center Hole 직경	1.0 in	N/A

종류 및 개수는 위의 현장 조사 결과를 이용하여 ASME CODE Appendix VIII의 요건을 만족하도록 선택하였으며, 시험 종류 및 개수는 다음의 기준에 따라 결정되었다.

- 오스테나이트 배관과 페라이트 배관 시험편으로 각각 구성
- 페라이트의 경우 내부에 클래딩된 배관이 포함되도록 시험 선정
- 시험 세트에 사용될 시험편의 수는 응시자 15명까지를 기준으로 선정
- 기량 검증용 시험편은 8개의 검출 시험편 세트와 6개의 길이 평가 시험편 세트가 되도록 구성(조합하여 사용시 더 많은 세트 구성 가능)
- 연습용 시험편은 3개의 검출 시험편과 길이 평가 시험편 세트로 구성

• 연습용 시험편은 기량 검증용으로도 사용 가능하도록 동일한 제작 기준으로 제작

기량 검증에 사용되는 시험편은 최대·최소 직경/두께를 포함할 것과 최소 4개 이상의 서로 다른 배관 시험편으로 구성되어야 한다.

KPD에서는 이와 같은 조건을 만족하기 위해 오스테나이트 배관의 경우 최소 두께 0.237", 최대 두께 1.531" 와 최소 직경 2", 최대 직경 24" 의 시험편을 구성하였다. 또한 직경과 두께가 다른 시험 6 종류를 선정하였다.

또한 페라이트 시험편의 경우 최소 두께 0.339", 최대 두께 4.125" 및 최소 직경 4", 최대 직경 50" 로 구성하였으며 4 가지의 서로 다른 배관을 시험편으로 선정하였다.

한편 시험편의 개수 및 결함 분포에 대한 설명은 기량 검증 시험편에 대한

Survey Results for Ferritic Piping Welds

보안을 위하여 본 논문에서 제외하였다.

품질 보증 절차서 개발

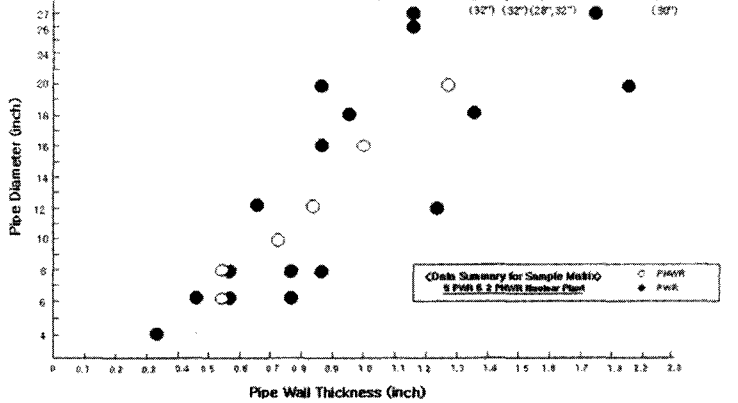
기량 검증 시스템의 품질 보증 프로그램은 미국 EPRI의 PDI 시스템을 모델로 하여 한국형 기량 검증 시스템에 적합하게 보완 개발하였다.

본 품질 보증 프로그램은 시험편 제작 및 운영 품질 보증 프로그램으로 구성되며 10 CFR 50 App. B 및 ASME NQA-1의 18개 품질 보증 기준 요건을 반영하였다.

기량 검증 시험편 관련 품질 보증 절차서로는 시험편 제작 관리 절차서 등 18종의 절차서로 구성하였으며, 기량 검증 시스템 운영 관련 시험편의 보안 관리 절차서 등 20종의 절차서로 구성하였다.

또한 기량 검증시 응시자들이 비파괴 검사 절차서를 준비하는 경우 절차서의 기술성 입증 및 현장 검사시 검사자들마다 사용 절차서가 상이함에 따른 문제 등을 해결하기 위하여 개발한 주요 절차서는 다음과 같다.

- A. KPD-UT-1(탄소강 배관 용접부 결함의 검출 및 크기 측정)
- B. KPD-UT-2(오스테나이트 배관 용접부 결함의 검출 및 크기 측정)
- C. KPD-UT-3(배관 용접부의 결함 깊이 크기 측정)



〈그림 1〉 PWR 및 PHWR 발전소 탄소강 배관의 직경 대 두께 분포

- D. KPD-UT-4(구멍이 있는 스테드와 볼트 검사)
- E. KPD-UT-5(스테드와 볼트의 수직빔 검사)
- F. KPD-UT-6(원자로 용접부 수동 초음파 검사)
- G. KPD-UT-7(원자로 용접부의 결함 깊이 및 크기 측정)

시험 관리 및 채점 프로그램 개발

1. 시험 관리

KPDI 프로그램의 목적은 ASME Code Section XI Appendix VIII에 명시된 요건에 따라 기량 검증 시험을 준비하고 시행하는 데 있어, 각 시험의 결함 정보를 관리하고, 시험을 수행하기 위한 시험 세트 구성과 검사 결과의 채점 및 응시자의 자격을 관리하는 데 있다.

모든 시험들은 다양한 채점 단위로 분류되고 각 채점 단위는 결함

길이 · 형태 · 깊이 등의 결함 정보를 제공한다.

이러한 각 시험 세트는 ASME Code Section XI Appendix VIII, Supplement 2,3 및 12 요건을 만족한다.

2. 채점

KPD 채점 프로그램은 결함의 검출 및 크기 평가로 구성되었다. 이 프로그램은 독립적으로 운영되며, PD 응시자의 채점은 실수를 피하기 위하여 자동으로 이루어진다. 또한 채점은 코드 요건에 따라 결함 검출 능력을 평가하고, 결함의 길이 및 깊이의 RMS 값을 계산한다.

PD 시험에 합격한 응시자의 자격 부여 내용은 KPD website에 게재된다. KPD 시스템 사용권이 있으며 이 site를 이용할 수 있으나 내용을 수정할 수는 없다.

### 특수 용접부에 대한 기량 검증 계획

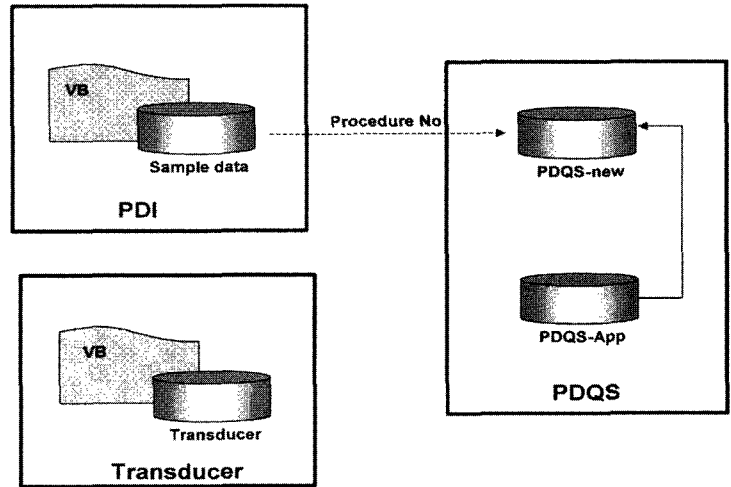
금번에 구축중인 기량 검증 시스템은 ASME Sec. XI의 요건에 따라 PWR 및 PHWR 배관 및 스택트/볼트에 동시에 적용 가능하도록 준비하였으며, 고려된 재질은 단조 오스테나이트강 및 탄소강이다. 금번 준비에 반영되지 못한 기기·재료·결함 및 그에 따른 대책은 다음과 같다.

① IGSCC : 국내에는 비등형경수로(BWR)가 없고, IGSCC(Inter Granular Stress Corrosion Crack)는 BWR에만 나타나는 본 시스템에서 제외하였다.

② 원자로 : 한수원은 미국 기량 검증 (PDI : Performance Demonstration Initiative)에 회원으로 가입하였으므로 미국 시편의 사용에 지장이 없으므로 시편은 미국 PDI 시편을 사용하고, 원자로 기량 검증에 필요한 모든 운영 및 관리는 금번에 개발된 절차서 및 프로그램을 이용할 예정이다.

③ 이중 금속 접합 : ASME 및 NRC에 의해 승인된 기술을 적용할 예정이며, 동 부위에 대한 기량 검증은 2006. 01부터 시행을 목표로 준비 예정이다.

④ 주조 오스테나이트강 및 오버레이(Overlay) : 주조 오스테나이트강 및 오버레이의 경우 재료의 특성상 정확한 기량 검증이 어려운 실



〈그림 2〉 시편 관리

정이므로 주조 오스테나이트강에 사용한 검사 방법 및 절차서를 그대로 준용할 예정이다.

### 결론

한수원(주)는 ASME Sec. XI App. VIII의 기량 검증을 시행하기 위하여 한국형 기량 검증 시스템을 준비하였다. 이를 위하여 아래 사항에 대하여 분석/기술 개발이 이루어졌으며, 개발된 기술 및 절차서에 대하여는 코드의 요건을 만족하고 있음을 확인하였다.

- A. 코드 요건 분석 및 현장 실사
- B. 시편의 종류와 수량 결정
- C. 시편 설계 및 제작
- D. 품질 보증(시편 제작 품질 보증, 시스템 운영 품질 보증) 프로그램 개발
- E. 운영/관리 전산 프로그램 개발
- F. KPD와 코드의 일치성 평가
- G. 기량 검증용 표준 비파괴 검사 절차서 개발

한편 시편 시험 결과 및 응시자 관리 프로그램은 설계가 완료되어 프로그래밍중에 있어, 시편은 현재 제작중에 있으며 2003년. 4월까지 준비를 완료할 예정이다.

모든 시스템의 준비가 완료되면 2004년 1월의 기량 검증 시행에 대비하여 2003년 7월부터 기량 검증 교육 및 시험을 시행할 예정이다.

이와 같은 한국형 기량 검증 시스템이 완성되어 2004년 1월부터 기량 검증이 시행되면 다음과 같은 효과가 있을 것으로 기대된다.

- ① 가동중 검사 결과의 신뢰성 향상
- ② 표준 비파괴 검사 절차서 사용으로 인한 검사 표준화
- ③ 국내에서 기량 검증 교육 및 시험을 시행함에 따라 안정적으로 유자격 검사원 확보 가능
- ④ 국내 비파괴 검사 기술 수준 향상
- ⑤ 현장 실정이 반영된 시편을 이용한 훈련으로 검사의 신속성 향상