

국내 원자로 상부헤드관통관 기량검증 기술개발

김용식[†] · 윤병식* · 양승한**

Development of Reactor Vessel Head Penetration Performance Demonstration System in Korea

Yongsik Kim[†], Byungsik Yoon* and Seunghan Yang**

(Received 21 May 2014, Revised 12 June 2014, Accepted 8 July 2014)

ABSTRACT

There were many flaw issues of reactor vessel head penetration in USA fleets. USNRC issued 10CFR50.55a to implement reactor vessel head penetration ultrasonic examination performance demonstration(PD) in US for enhancement of inspection reliability. After September 2009, all US utilities inspected their RVHP with PD qualified system. Korea Hydro and Nuclear Power Company(KHNP) have developed reactor vessel head penetration performance demonstration system for ultrasonic test to apply for pressurized light-water reactor power plants in accordance with 10CFR50.55a since September 2011. RVHP configuration surveying and analysis, code requirement analysis, and performance demonstration specimen design were performed up to this day. Fingerprinting of manufactured specimen, development of test data management program, development of operation procedure, input of flawed data, and development of final report will be performed for the next step. This paper describes the development status of the performance demonstration system for reactor vessel head penetration ultrasonic examination in Korea.

Key Words : Reactor Vessel Head Penetration(원자로 상부헤드 관통관), Performance Demonstration(기량검증), Specimen(시험편), Flaw(결점)

1. 서론

1991년도 프랑스 Bugey 발전소의 원자로 상부헤드 관통관 부위에서 결함이 발견된 이래, 2001년초 Oconee 3호기, 2002년 3월초 David-Besse 발전소등 많은 원전의 원자로 상부헤드 관통관 부위에서 결함이 발견 되었다. 이에 따라 원자로 상부헤드 관통관 초음파 탐상검사의 신뢰성이 중요한 문제로 대두되면서 미국의 규제기관인 NRC는 미국 연방법인

10CFR50.55a에 원자로 상부헤드 관통관 초음파탐상검사의 기량검증을 수록하여 2009년 9월부터 미국 내 전 원전의 원자로 상부헤드 관통관 초음파탐상검사에 대해 현장검사 수행 전 기량검증을 시행하도록 규제 요건화 하였다. 미국 전력연구소(EPRI)는 1992년부터 기량검증을 위한 연구를 시작하여 2009년에 완료하였으며, 2009년 말부터 미국내 기량검증을 시행하고 있다.

국내에서는 원자로 상부헤드관통관 기량검증에 대한 연구가 전무하였으나, 국내 원전에 대한 기량검증 시행의 시급성으로 인해 2009년도부터 EPRI 시스템을 준용하기 시작하였다. 그러나, EPRI 시스템의 일부 요건이 국내 형상 요건을 만족하지 못하고 있다. 이에 따라 국내 형상을 반영한 시스템 개발

[†] 책임저자, 회원, 한수원 중앙연구원

E-mail: chosim@khnp.co.kr

TEL: (042)870-5551 FAX: (042)870-5549

* 한수원 중앙연구원

** 한수원 중앙연구원

을 위해 2011년 9월부터 기량검증 기술개발을 위한 연구에 착수하여 수행 중에 있다.

2. 기량검증 요건분석

2.1 10CFR50.55a 요건

원자로 상부헤드 기량검증에 관한 요건은 기존의 기량검증 요건과는 달리 ASME Code Section XI Appendix VIII이 아닌 10CFR50.55a에 명시되어 있으며, 주요 내용은 다음과 같다.

1) 시험편 세트는 공칭 관통벽 두께 깊이에 대해 +25% ~ -40% 적용가능한 두께 검증범위를 가져야 한다. 시험편 세트는 PWSCC 결합으로부터 구별이 요구되는 기하학적 및 재질 조건을 포함해야 한다.

2) 시험편 세트는 PWSCC 지시와 유사한 음향 반응을 제공하는 최소 10개의 결합을 포함해야 한다. 모든 결합은 공칭 배관 벽두께의 10%보다 더 커야 한다. 전체 결합의 최소 20%는 내부 표면으로부터 시작되어야 하고 20%는 외부표면으로부터 시작되어야 한다. 결합의 적어도 20%는 관통 벽두께의 10~30% 깊이 범위에 있어야 하고, 적어도 20%는 관통 벽두께의 31~50%내에 있어야 한다. 결합의 적어도 20% 그리고 40%보다 적은 수가 축 방향으로 위치해야 한다.

3) 검사절차서는 검증에 사용되는 필수 변수와 설정값 및 장비를 명시해야 하며, Section XI, Appendix VIII의 subarticle VIII-2100과 일치해야 한다. 검사절차서는 필수변수가 Section XI, Appendix VIII의 VIII-4100, VIII-4200 및 VIII-4300에 의해 허용되는 Section XI, Appendix VIII의 VIII-3130에 명시된 기량검증 범위를 초과하였을 때 재검증되어야 한다. 절차서 검증은 적어도 3명의 검사자 검증 시험세트와 동등한 것이 포함되어야 한다. 절차서 검증은 적어도 하나의 성공적인 검사자 기량검증이 요구된다.

4) 검사자 기량검증 시험편세트의 허용기준은 Section XI, Appendix VIII, Supplement 10의 Table VIII-S10-1의 검사자 기량검증 검출시험 허용기준을 만족하여야 한다. 검사절차, 장비 및 검사자는 Section XI, Appendix VIII의 VIII-3120에 명시된 RMS error가 실제 결합 깊이와 비교해서 1/8 inch (3mm)를 초과하지 않고, 실제 결합 깊이와 비교해서 3/8 inch (10mm)를 초과하지 않으면 검증된다.

Table 1 ASME section XI, table-VIII-S10-1

Acceptance Criteria	
No. of Flawed Grading Units	No. of Detection Criteria
10	8
11	9
12	9
13	10
14	10
15	11
16	12
17	12
18	13
19	13
20	14

2.2 EPRI 기량검증 요건

EPRI의 원자로 상부헤드 관통관 기량검증 운영 절차서인 EPRI QPI-305 Appendix D "RPV Upper Head Penetration Qualifications"에서는 Final Rule을 만족시키면서, MRP 요건을 만족시킬 수 있는 요건을 기술하고 있다.

2.2.1 시험편 세트 요건

검사 절차서 범위에 기술된 특정 제한 사항(예 : 크기, 용접 조인트 형상, 접근 제한)을 수용하기 위해 시험편 세트가 구성되지 않는 한, 기본 시험편 세트는 다음의 요건을 충족시켜야 한다. 동일한 시험편으로 검출과 크기 측정 인정에 사용될 수 있다.

1) 검사원 인정 시험편 세트는 튜브 재질에 최소 10개 결점을 포함해야 한다. 인정시험은 ASME Section XI(2004년판), Appendix VIII, Supplement 10의 Table VIII-S10-1의 인정 기준을 만족해야 한다.

2) 인정 시험편 세트는 결점영역의 최소 1.5배수의 무결점 영역을 포함해야 한다. 무결점 영역은 크랙 시작에 민감한 검사 체적안의 전체 표면 면적에서 모든 인정 결점과 이에 따른 위치 허용 한계의 조합 면적을 제외한 것이다.

3) 위치 허용 한계는 각 결점에서 축 방향으로 0.5", 그리고 원주 방향으로 ± 25°의 위치 허용 한계를 가진다. 예를 들어, 0.75" 길이의 축 방향 결점은 축 방향으로 1.75", 원주 방향으로 50°의 위치 허용 한계 면적을 가진다. 30° 길이의 원주 방향 결점은 축 방향으로 1.0", 양쪽 원주 방향으로 각각 25°의 위치 허용 한계 면적을 가진다.

4) 위치 허용한계는 검출을 결정하기 위한 것으로

결점지시의 한부분이라도 실제 결점의 위치 허용한
계 안에 드는 경우, 결점은 검출된 것으로 간주한다.

5) 시험편은 판독 과정에서 방해 요인이 될 수 있는
의사 반사를 최소화하기에 충분한 크기를 가져야
한다. 방해 조건을 가지는 결점은 방해 영향을 결정
하기 위해 평가되어야 하며, 기량검증감독관은 채점
시에 이와 같은 영향을 고려해야 한다.

6) 시험편 세트는 절차서가 적용 가능한 최소, 최
대의 하우징 직경과 두께를 포함해야 한다. 두께 범
위를 검사할 때, 두께 공차는 -40%~+25% 이다.

7) 시험편 세트는 다음 제작 상태 예시를 가지고
있어야 한다.

- 가) 통상적으로 결점과 구분해야 하는 기하학
적, 재료적 상태(예 : 용접 수축, 제한된 주
사 영역, chamfer, 튜브 끝단 형상)

8) 결점 위치

- 가) 결점 중 최소 20%는 내부 표면에서 시작
- 나) 결점 중 최소 20%는 외부 표면에서 시작
- 다) 결점의 최소 20% 그리고 최대 60%는 축 방
향으로 배치

2.2.2 결점 형태

기본 하우징 인정에 포함된 모든 결점은 HIP(Hot
Isostatic Pressing) 또는 CIP(Cold Isostatic Pressing)을
사용하여 압축된 노치이어야 한다. 아울러, 누설 경
로 시험편은 발전소에서 관찰된 것과 유사한 누설
경로 조건을 모사하도록 설계된 누설 경로 영역을
가져야 한다.

2.2.3 결점 깊이

모든 결점 깊이는 공칭 하우징 벽 두께의 10% 이
상이어야 한다. 시험편 세트 내의 결점은 다음과 같
이 분포해야 한다.

Table 2 Depth distribution of flaw

% Wall Thickness	Number of Flaw
10 ~ 30%	20%
31 ~ 50%	20%

2.2.4 길이 및 깊이 평가시험 합격기준

1) 길이평가 기량검증에 합격하기 위해서는 결점
깊이에 대한 초음파 측정값들의 RMS 오차가 실제
결점깊이와 비교하여 0.375"(10mm)보다 작거나 같

아야 한다.

2) 깊이평가 기량검증에 합격하기 위해서는 결점
깊이에 대한 초음파 측정값들의 RMS 오차가 실제
결점깊이와 비교하여 0.125" (3 mm)보다 작거나 같아
야 한다. RMS 오차는 다음 식에 의해 계산한다.

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

m_i = 측정된 결점의 길이/깊이

t_i = 실제 결점의 길이/깊이

n = 측정된 결점의 수

3. 관통관 형상조사 및 분석

3.1 관통관 형상조사

원자로 상부헤드 관통관 기량검증에 대한 기술기
준인 10CFR50.55a 및 ASME Code Case N-729-1의
요건을 만족하는 기량검증 체계를 구축하기 위해
는 국내에 설치된 원자로 관통관의 형상 및 재질에
관련된 정확한 자료 조사가 필요하며, 이를 근거로
국내 원자로 상부헤드 관통관의 형상을 대표하는 시
험편을 설계하고 제작하여야 한다. 현재 국내에서
운전 및 건설 중인 가압경수로형 원자력발전소 22기 중
에는 OPR을 포함하여 웨스팅하우스 및 Framatom형 원
전이 있으며, 이들의 상부헤드관통관 및 CRDM(Control
Rod Drive Mechanism)/CEDM (Control Element
Drive Mechanism)은 발전소 제작사에 따라 다양한
형태로 구성되어 있다. 원자로 상부헤드관통관 시험
편 설계를 위한 기초자료 수집을 위하여 각 발전소
별로 관통관 형상 자료를 조사하였으며, 현장 조사
에서 조사한 자료는 다음과 같다.

- 제작 및 설계 도면
- 헤드 반경 및 두께
- 관통관 수량, 재질, 외경, 두께
- J-groove 형상
- Thermal Sleeve 유무, 형상 및 치수
- 기타

3.2 형상조사 결과분석

국내에서 운영 중이거나 건설 중인 경수로형 원자
력발전소 22개호기에 대하여 조사를 수행하였다. 조
사결과 국내 원전의 관통관 형상은 크게 두가지 중

Table 3 RVHP tube configuration range

Reactor type	RVHP dimension			Materials
	OD (inch)	ID (inch)	Thick-ness (inch)	
Westing-house	4.000	2.750	0.6250	SB-167
Framatome	4.000	2.750	0.6250	M4102 (NC15Fe)
OPR1000 /APR1400	4.753	2.728	1.0125	SB-166

Table 4 PD range of RVHP tube dimension

Range	Minimum (inch)	Maximum (inch)
Thickness	0.625	1.0125
Outside diameter	4	4.753

류로 분류를 할 수 있었다. 웨스팅하우스형과 프라마톰형이 유사한 형상과 재질로 제작이 되었으며, 국내 표준형 원전인 OPR 1000과 APR 1400 노형이 동일한 형상과 재질로 제작이 되었다. Table 3은 국내 원전의 원자로 형에 따른 상부헤드관통관의 형상 제원을 나타낸다.

원자로상부헤드 기량검증 시험편 설계를 위해서는 최소 및 최대 두께와 최소 및 최대 직경이 가장 중요하다. 현장조사 결과 두께와 직경에 대한 최소, 최대 값은 Table 4와 같다. 국내 원자로 상부헤드관통관의 최소 두께는 0.625"이며 최대 두께는 1.0125"이다.

4. 기량검증 시험편 설계

4.1 시험편 구성

10CFR50.55a 요건에 따른 시험편 세트를 구성하기 위하여 국내의 관통관 형상을 조사하여 형상 및 재질 별로 분류하였다. 조사된 재질과 치수를 고려하였을 때 관통관 기량검증 시험편은 모두 4가지 종류로 분류할 수 있다. 시험편 고유 번호는 4자리로 구성되며 첫 번째 자리는 관통관 시험편을 나타내는 것으로 "8"로 시작하고 두 번째 자리는 두께와 재질별로 분류하였다. 시험편 번호 81XX은 관통관 두께 0.6250"에 Alloy 82/182 계열로서 한빛 1,2호기를 기반으로 설계되었다. 시험편 번호 82XX은 관통관 두께 0.6250"에 Alloy 52/152 계열로서 고리 1호기 교체 헤드를 기반으로 설계되었다. 고리 2호기의 경우 현재는 81XX에 해당하나, 추후에 교체되는 경우 82XX에 해당한다. 시험편 번호 83XX는 관통관 두께 1.0125"에 Alloy 82/182 계열로서 한빛 5, 6호기를 기반으로 설계되었으며, 시험편 84XX는 관통관 두께 1.0110"에 Alloy 52/152 계열로서 신고리 3, 4호기를 기반으로 설계되었다. 시험편 고유 번호 4자리 중 세 번째 자리는 반구형으로 제작된 헤드에서 관통관 위치에 따라 용접부의 형상이 달라지는 것을 반영하기 위하여 상부헤드의 중심부, 중심부와 최외각열의 중간 영역, 최외각 열에 대하여 1, 2, 3번을 지정하였다. 마지막 자리는 시험편 일련번호를 나타낸다. Table 5는 이를 나타낸 것으로 국내 관통관 기량검증 시험편은 총 12개의 종류로 구분할 수 있다.

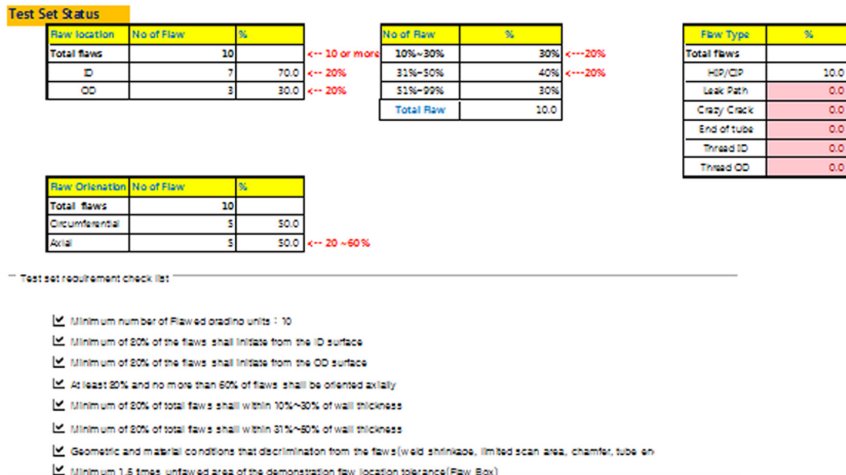


Fig. 1 Verifying specimen set requirements

Table 5 KPD RPVH sample matrix

Thickness	Center	Middle	Outer
0.625"	811X	812X	813X
	821X	822X	823X
1.0125"	831X	832X	833X
1.0110"	841X	842X	843X

시험편 세트는 위 그림의 총 12개 형상에서 재질과 치수를 고려한 81XX, 82XX, 83XX, 84XX 시험편 각각의 일부분을 조합하여 구성되며, 각각의 시험편은 요건에 따른 시험편 결점과 절차서 검증용 결점을 포함한다. 구성된 시험편 세트에 대한 요건 부합은 설계 단계에서 Fig. 1과 같이 확인하였다.

4.2 기량검증 시험편 기본형상 설계

4.2.1 용접부 위치에 따른 대상 선정

원자로 상부헤드 관통관은 설치 위치에 따라 반구형인 원자로 용기와 용접되는 부분이 달라지게 된다. 이에 따라 관통관과 원자로 용기와의 용접부의 대표적인 특징을 선택하기 위해 상부헤드의 중심부와 최외각 열에 대한 지정을 하였으며 발전소 설계 도면에 따라 위치를 선정하였다. 중심부와 최외각열의 중간 영역에 대한 위치 선정은 다음과 같이 2가지 방식으로 선정 하였다. 812X 시험편(두께 0.625", Alloy 82/182)과 832X 시험편(두께 1.0125", Alloy 82/182) 상부헤드에서의 관통관 수량을 고려하여, 관통관 수량을 1/2로 구분할 수 있는 위치의 관통관을 기준으로 선정하였다. 822X 시험편(두께 0.625", Alloy 52/152)과 842X 시험편(두께 1.011", Alloy 52/152)은 상부헤드에서의 관통관 수량을 고려하지 않고, 최외각열 반지름의 1/2에 제일 가까운 관통관을 지정하였다. 이런 2가지의

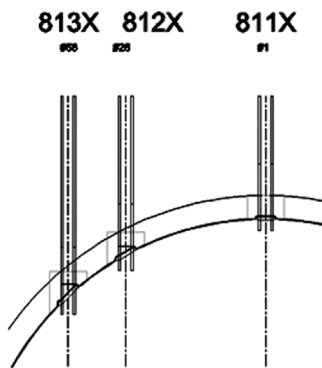


Fig. 2 81XX specimens(Hanbit 1,2)

다른 방식으로 선정함에 따라 관통관과 상부헤드가 이루는 각도의 다양성을 취할 수 있다. Fig. 2는 81XX 시험편의 형상을 나타낸다. 선정된 총 12개 관통관 위치에 대해 원자로 상부헤드와 관통관 도면을 연결하여 오토 캐드로 구현한 다음에, 이를 바탕으로 시험편 상세 형상을 결정하였다. 시험편의 설계는 크게 원자로 상부헤드(vessel) 부분과 관통관(튜브) 부분으로 구분된다.

4.2.2 원자로 용기부 시험편 형상 결정

시험편의 상부헤드 부분 형상은 사각형 또는 원형으로 설계할 수 있으나, 가운데의 관통관이 원형 형상이므로 이에 따라 동일하게 원형으로 결정하였다. 원형으로 설계할 경우, 사각형에 비해 재질이 적게 들어가게 됨에 따라 무게가 가볍게 되어 취급에도 용이한 장점이 있다. 시험편의 상부헤드 부분은 J-groove 용접부가 실제 시험편에 포함되어 구성되게 되므로, 용접에 따른 열 영향을 고려하여 전체 12개 형상에 알맞은 외경 10"로 동일하게 결정하였다.

4.2.3 관통관 시험편 형상 결정

시험편의 관통관(튜브) 부분은 형상은 원자로 상부헤드에 해당하는 시험편 부분 위로 어느 정도 노출될 수 있는 길이를 고려하여 모두 동일하게 18"로 설계하였다. Fig. 3는 기량검증 시험편의 외형을 나

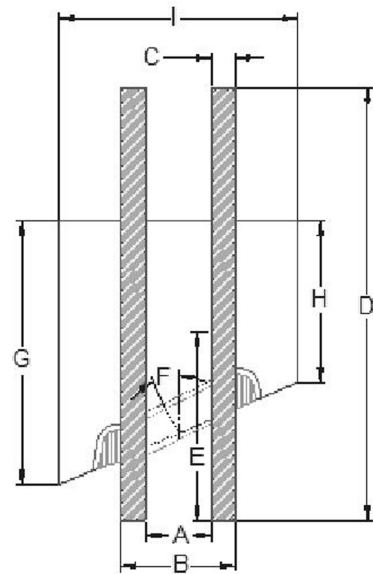


Fig. 3 Specimen configuration and dimension

KPD SAMPLE CONFIGURATION

ID	Type	Tube dimension										Vessel Plate Dimension				Material			
		ID		OD		Wall		Length		Inspectable		F	Thickness		Diameter				
		A	B	C	D	E	G	H	I										
811X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	5.290	134.4	0	6.5	165	6.5	165	10	254	Alloy 600
812X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	7.282	185	32	9.0	229	3.5	88.9	10	254	
813X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	8.872	225.3	46	11.5	292	2.3	58.4	10	254	
821X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	6.254	158.9	0	6.0	152	6.0	152	10	254	Alloy 690
822X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	7.283	185	15	6.9	175	4.4	112	10	254	
823X	Generic/CRDM	2.750	69.9	4000	1016	0.6250	15.9	18	457	9.154	232.5	46	11.1	282	1.5	38.1	10	254	
831X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4753	120.726	1.0125	25.7	18	457	5.955	151.3	0	8.1	206	8.1	206	10	254	Alloy 600
832X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4753	120.726	1.0125	25.7	18	457	10.072	255.8	41	12.1	307	4.5	114	10	254	
833X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4753	120.726	1.0125	25.7	18	457	12.237	310.8	56	16.4	417	3.4	86.4	10	254	
841X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4753	120.726	1.0125	25.7	18	457	5.228	132.8	0	9.1	231	9.1	231	10	254	Alloy 690
842X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4750	120.65	1.0110	25.7	18	457	7.580	192.5	26	11.0	279	6.7	170	10	254	
843X	Generic/CRDM	2.728	69.3	4750	120.65	1.0110	25.7	18	457	12.483	317.1	56	18.1	460	4.9	124	10	254	

Fig. 4 Dimension of specimen

타낸다. 실제 관통관은 원자로 상부헤드를 관통하여 상부로 길게 연장되어 있다. 그러나 시험편은 초음파탐상검사 부분만 제작되면 되므로 길게 연장되어 있을 필요가 없다. 이에 따라 시험편으로 제작되는 부분은 그림에서와 같이 관통관 시험편 부분과 원자로 상부헤드용기 시험편 부분으로 나뉜다.

기량검증 시험편의 관통관 길이는 18", 관통관에 용접되는 용기부의 외경은 10"로 모두 동일하게 설계하였다. 기본적인 형상에 각 시험편 번호에 적당한 사양들(관통관 내경, 관통관 외경, 관통관 두께, 관통관 용접부 각도 등)을 결정하였다. 이에 대한 내용은 Fig. 4와 같다. 이를 통해 시험편 보관 프레임 또는 시험편 보관 장소 고려 시에 각각 다른 치수가 아닌 동일 치수로 고려할 수 있도록 하였다.

4.3 시험편 도면 설계

결점을 가지는 시험편의 설계 도면은 시험편 형상도, 원주방향 펼침도, 관통관 단면도를 기본으로 구성되며, 이에 추가적으로 누설 경로 결점 배치도가 있다.

4.3.1 시험편 형상도

시험편 형상도는 시험편의 재질과 치수를 표현한 도면으로 원주방향 기준점을 명시한다. 관통관 시험편에서 가장 중요한 치수는 관통관의 외면 치수와 원자로 상부헤드의 내면 치수로써 가공 공차와 함께 주어지며 interference fit의 값이 0.002" ~ 0.0045" 사이가 되도록 명시하고 있다. 아래 Fig. 5는 시험편 형상도의 예시를 나타내었다.

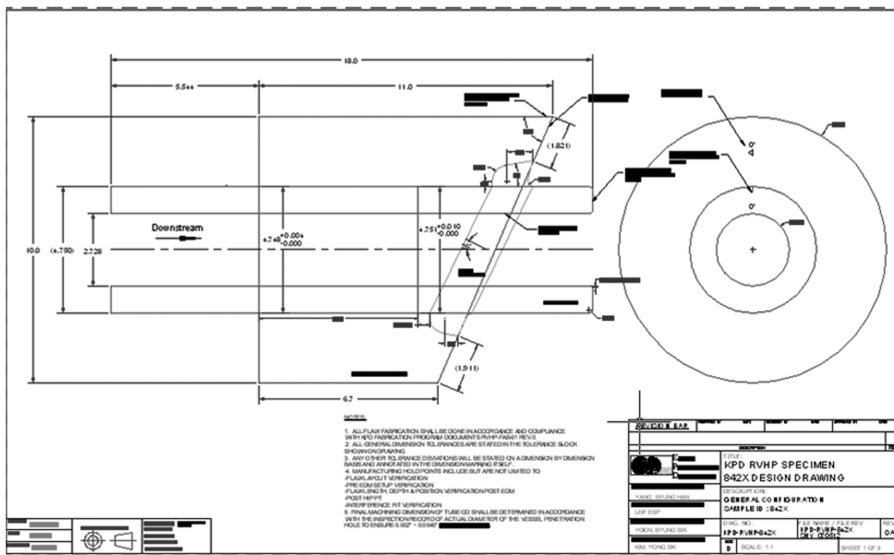


Fig. 5 Design drawing of RVHP specimen(example)

4.3.2 원주방향 펼침도

원주방향 펼침도는 결점의 원주방향 위치를 나타내는 도면으로, 관통관의 외면과 내면에 대하여 각각 설계하게 되며, J-groove 용접부도 같이 표현한다. 외면 결점은 외면 펼침도에, 내면 결점은 내면 펼침도에 각각 설계되며, 설계 시에 결점과 함께 위치 허용 한계를 표기하게 된다. 위치 허용 한계는 각 결점에서 축 방향으로 0.5", 그리고 원주 방향으로 $\pm 25^\circ$ 의 위치 허용 한계를 가지는 영역으로 결점 검출의 판단 영역으로 사용된다. 또한 관통관 외면 결점과 내면 결점은 축방향 위치와 원주 방향 위치를 조절하여 서로 겹치지 않도록 한다. Fig. 6의 왼쪽은 관통관 외면의 원주방향 펼침도를, 오른쪽은 관통관 내면의 원주방향 펼침도의 예시를 나타내었다.

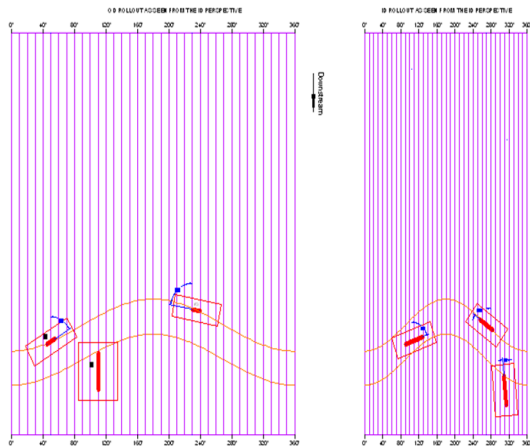


Fig. 6 Open drawing of circumferential direction (Left: OD, Right: ID)

4.3.3 관통관 단면도

관통관 단면도는 결점의 축방향 위치와 결점의 형상, 결점 제작용 전극의 형상을 나타낸다. Fig. 7는 관통관 내면 축방향 결점을, Fig. 8은 관통관 외면 원주방향 결점을 예시로 나타내었다.

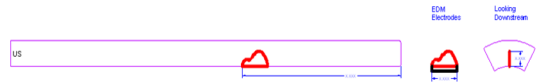


Fig. 7 Cross section of RVHP(ID axial flaw)

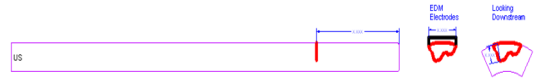


Fig. 8 Cross section of RVHP(OD circ. flaw)

5. 결론

본 연구는 국내 원전의 원자로 상부헤드관통관 형상에 최적화된 기량검증 시스템을 구축하고자 2011년 9월에 착수되었다. 관통관 형상조사, 기량검증 시험편 설계를 완료하였으며 현재 기량검증 시험편을 제작 중이다. 향후 기량검증 시험편에 대한 인수검사 및 Fingerprint, 시험편 자료관리 프로그램 개발, 운영 절차서 개발, 프로그램설치 및 결함 자료 입력, 프로그램 보고서 개발 등을 통해 상부헤드관통관 기량검증 시스템을 개발 완료할 예정이다.

참고문헌

1. B.Rassler, 2010. 3, Reactor Pressure Vessel Head Qualification and Inspection Summary, EPRI-IR-2010-400
2. USNRC, 10CFR50.55a Code and Standards
3. W.H.Cullen, Jr., and T.S.Mintz, 2004.3, A Survey of Worldwide Experience with the Cracking Susceptibility of Alloy 600 and Associated Welds, Office of Nuclear Regulatory Research
4. EPRI, 2011, "Material Reliability Program: Qualification Protocol for Pressurized Water Reactor Upper Head Penetration Ultrasonic Examination-2011 update (MRP-311)", Report No-1022856
5. Y.S.Kim, B.S.Yoon, S.Hyang, 2013. 2, "Current Status of Ultrasonic Examination Performance Demonstration in Korea", Japan Society of Maintenology