

원자로 내부 구조물 초음파검사 현황

심철무, 최하림
한국원자력연구소 시스템구조평가분야

Ultrasonic Inspection of RPV Internal Structures

C. M. Sim and H. L. Choi

System & Structure Evaluation Dept., Korea Atomic Energy Research Institute

요약 원자로는 압력용기 및 내부 구조물로 구분되어 있다. 내부 구조물들의 경년 열화 현상에 따라 결함이 많이 발생하여 이에 대한 초음파검사가 요구되고 있다. 따라서 원자로 내부 구조물에 대한 초음파검사 현황 및 각각 구조물들의 검사 원리를 기술하였다. 특히 원자로 내부 구조물 중 CRDM, core baffle bolt, core barrel bolt, CRGT-support pin 및 fuel alignment pin에 대한 유럽 및 독일을 중심으로 한 검사 현황 및 검사 방법을 간략하게 기술하였다. 이 기술에 대한 지침안(guideline)이 독일, 프랑스, 일본을 중심으로 하여 마련되고 있다.

1. 서론

일반적인 가압 경수로(PWR)는 원자로(reactor pressure vessel)와 내부 구조물(internal structure)로 크게 나눌 수 있다(Fig. 1). 원자로(reactor pressure vessel)는 ASME Code Section XI의 B-A category에 넣어 원주 및 축방향과 그의 head 부위의 자오선 및 원주 방향의 용접부에 대하여 체적검사를 수행하고 있다. 그리고 내부 구조물(internal structure)은 동일 규격의 B-N-1,2,3의 범주로 분류하여 육안검사를 수행하고 있다. 내벽검사(B-N-1)는 첫번째 핵연료 장전시 검사를 수행하고 매 3년마다 접근 가능 부위에 대해 검사 수행하여 내부 및 core 지지구조물(B-N-3)은 육안검사를 수행한다. 원

자로 내부구조물은 핵연료 (fuel)와 제어관련계통(reactor control system)을 제외한 원자로 압력용기 내의 전 구조물이며 크게 다음과 같은 구조물로 구성되어 있다.

- Core support barrel
- Upper guide structure
- Core shroud assembly
- Lower support structure

국내 원전에서는 현재까지 각각 구조물에 대하여 육안검사만 수행할 뿐 체적검사는 아직 수행하지 못하고 있다. 따라서 이 보고서에서는 유럽을 중심으로 하는 원자로 내부 구조물에 대한 체적검사(UT, ECT)에 대한 기술 현황을 논하고자 한다.

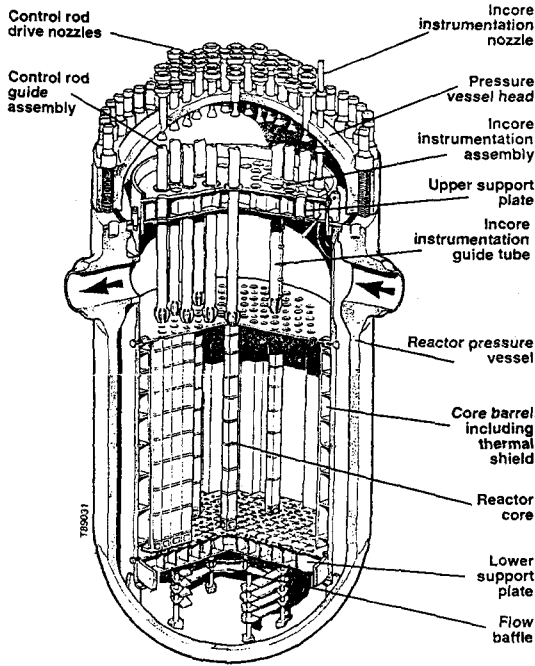


Fig. 1. Structure of RPV.

2. 본론

각각의 구조물이 경년 열화되어 특히 구조물 관통 부위의 용접부, 구조물 연결 및 체결 부위의 bolt, pin 등에서 결함이 발생되고 있다. 따라서 독일 및 유럽을 중심으로 하는 utility는 각각의 구조물들에서 정기적인 검사를 수행하고 있으며 유럽 및 일본을 중심으로 하여 그와 관련된 표준 지침안(standard guide)을 만들고 있다. 아래 Table 1은 ABB-Reactor사가 원자로 내부 구조물에 대한 검사를 수행하고 있는 현황이다.

Table 1. Internal inspections.

No	구 조 명	검사방법	Fig.No	비 고
1	Fuel Alignment Plan	UT		독일
2	Core Baffle Former Bolt	UT		독일,일본
3	Core Barrel Former Bolt	UT		"
4	Control Rod Guide Tube Support Pin	UT		미국,일본,독일,프랑스
5	RPV Head Penetration, CRDM	UT,ECT		"

2. 1. Fuel alignment pin

전형적인 가압 경수로(PWR)형에서 fuel elements는 lower support plate 위에 있는 원자로(reactor pressure vessel)안에 있으며 core baffle plate로 둘러져 있고 위에는 upper grid plate에 의하여 덮혀있다. 운전중에 제어봉(control rod finger)들이 핵 연료 집합체(fuel assembly)의 guide tube안으로 안전하게 삽입되고 예기치 않은 사고중에서 노심(core) 안에서의 fuel assembly의 정확한 alignment를 위해서 fuel alignment pin의 역할이 중요하다. Fuel alignment의 구성도는 Fig. 2와 같다.

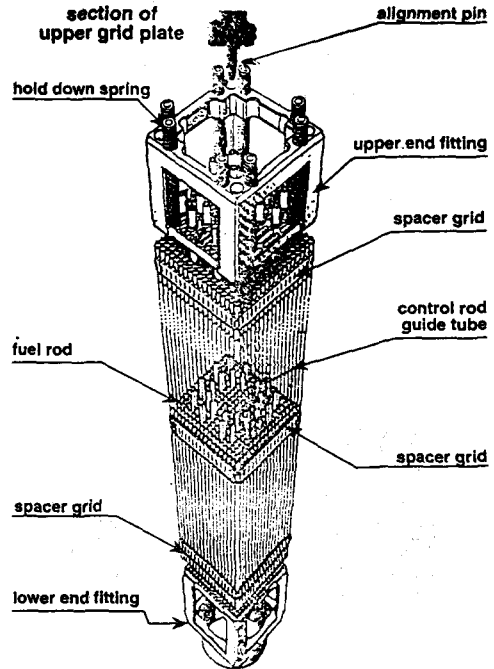


Fig. 2. Structure of fuel element.

Fuel alignment pin의 설계도는 Fig. 3과 같고 재질은 Inconel X750 이며 upper grid plate는 볼트와 너트에 의하여 죄어져 있고 머리(head)부분은 용접되어 있다.

다음 표는 유럽내의 경수로(PWR) 발전소에서 검사가 수행되어 결함을 발견하여 교체되었는데 그에 대한 자세한 내용은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2. Inspection and replacement of alignment pin.

Year	Site	Alignment Pins	
		Inspected	Replaced
1989	Biblis A	386	22
1989	Unterweser	386	34
1989	Biblis B	386	67
1990	Stade	314	-
1990	Grohnde	386	67
1990	Biblis A	22	364
1990	Unterweser	386	17
1991	Biblis B	67	319
1991	Grohnde	386	54
1991	Unterweser	-	336
1992	Biblis A	386	-
1993	Grohnde	386	55
1989-93	Base-Line Inspection	1.510	
Summary:		5.387	1390

검사 방법은 초음파(UT) 방법으로 사람이 접근 불가능하므로 manipulator를 제작하여 검사를 수행하

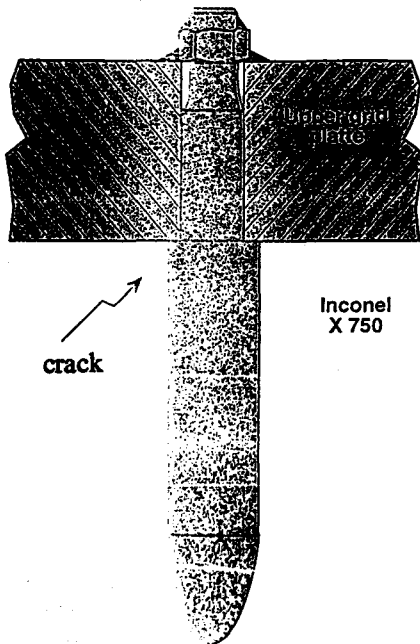


Fig. 3. Design of fuel alignment pins.

고 있다. 결함이 발견되는 부위는 upper grid plate의 하단부분 근처에 있는 pin의 중간 부위로서 Fig. 3에 나타나 있다.

2.2. Core baffle former bolts

Baffle plate는 노심(core)을 통과하여 상향으로 냉각수가 흐르는 동안 외각호름(outer-boundary)을 제공한다. 이 판(plate)은 core baffle의 부분이며 horizontal former plates의 baffle bolt에 의하여 core barrel의 안쪽과 구별되는 스테인레스 수직판(stainless steel vertical sheet)이다. 몇몇의 원전에서 baffle bolt들이 균열 및 파열되는 것이 발견되었다. 이로 인해 loose baffle plate들이 진동을 야기시키거나 fuel element rod 바깥쪽에 damage를 초래한다.

따라서 초음파(UT)방법으로 baffle bolt들을 검사하고 결함이 발견되었을 때 그것을 교체하여야 한다. 다음 Fig. 4는 flexible UT-probe holder을 이용한 baffle bolt 검사 방법을 보여준다.

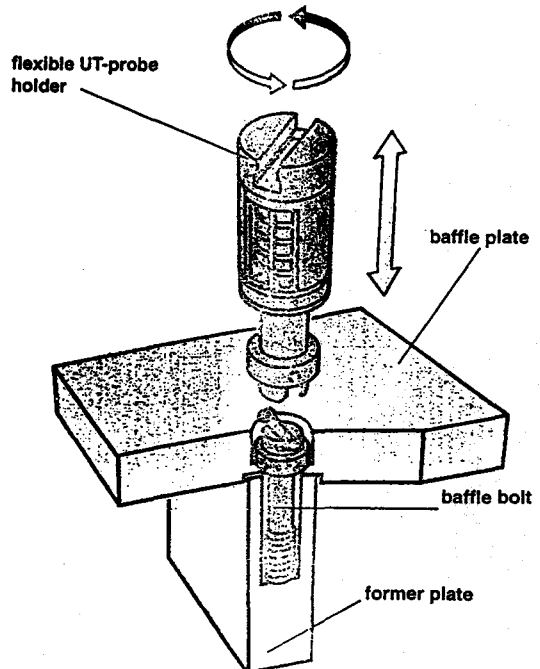


Fig. 4. Projection UT-examination.

이 부분은 고방사능지역으로 remote control manipulator가 필요하며 ABB사가 제작한 manipulator는

아래 Fig. 5와 같다.

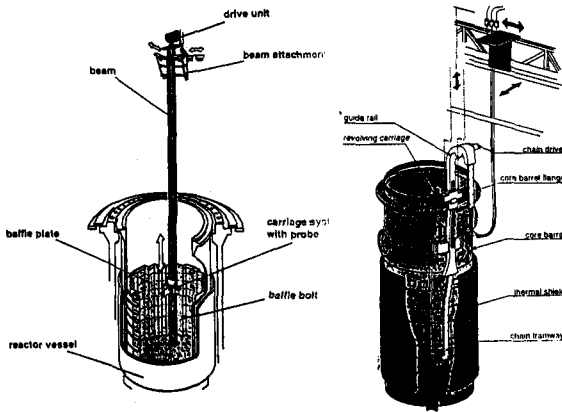


Fig. 5. Manipulator system for core baffle and core barrel.

2. 3. Core barrel former bolt

노심통(core barrel)과 노심 구조물(core internal)은 원통(cylinder)모양의 shell 형태로 구성되었다. 수직 형태의 former plate는 중간 지지판(Intermediate support plate)를 통해서 노심통(core barrel)로 연결되어 있다. 볼트의 연결부위는 지지판(support plate)을 죄어 주도록 되어 있다. Former bolt들의 건전성을 확인하기 위하여 초음파 방법이 적용되고 결함이 발견되는 경우에 교체토록 한다. Former bolt를 효과적으로 검사하기 위하여 UT-probe를 bolt-head에 위치토록 한다. 그러나 노심통(core barrel)의 바깥쪽으로 위치하고 열차폐에 의하여 둘러 쌓여 있기 때문에 볼트 헤드에 접근하기가 무척 어렵다. 또한 고방사능 지역으로 모든 작업이 원격제어 manipulator에 의하여 검사가 수행되어야 한다.

Barrel former bolt들의 검사를 pulse/echo 기법(technique)를 사용하여 자동화 장비(automatic ultrasonic testing)로 수행된다. 검사원리는 Fig. 6에 나타나 있다. UT probe는 초음파를 발생시키고 물과 probe shoe interface를 통과하여 bolt head 및 shaft로 진행한다. 초음파는 직각 방향으로 bolt의 축(shaft)를 통과하여 shaft end의 back wall에 맞고 반사된다. 만약에 결함이 발견되면 초음파는 부분적으로 반사하여 UT-probe에 의하여 감지된다. 결함의 크기에 따라 shaft-end에 도달되는 초음파의 일부분

이 변한다. 반사된 진폭(amplitude)과 도달시간 (the time of flight)를 가지고 bolt결합의 크기를 평가한다.

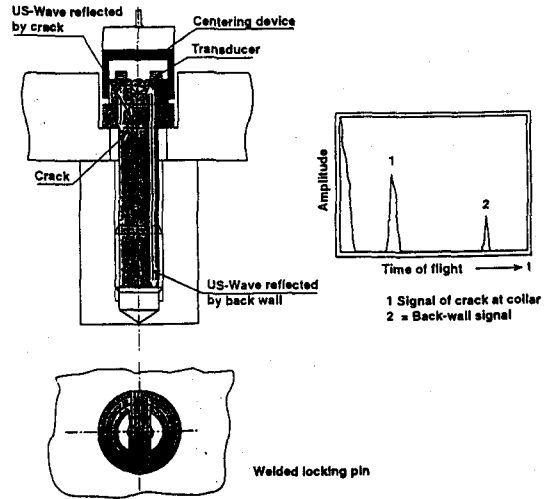


Fig. 6. UT-inspection method for bolts with locking pin.

2. 4. Control rod guide tube support pin inspection

Guide tube support pin은 상부 구조물(upper internal)의 lower guide tube flange안에 체결되어 있다. 이러한 지지핀(Support pin)들은 상부 노심판(upper core plate)의 상부에 있는 guide tube의 수평 이동을 막아주는 데 있다.

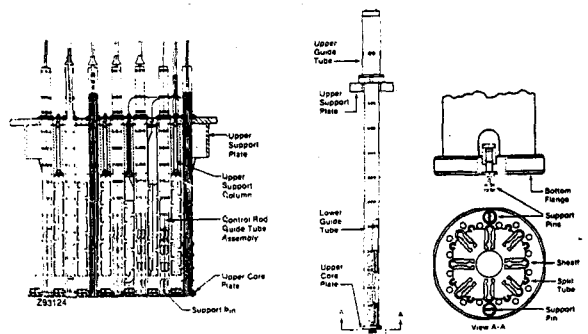


Fig. 7. Positioning of guide tube support pin.

이러한 핀(pin)은 Inconel X-750으로 제작되는데 서로 다른 torque로써 체결된다. 따라서 낮은 온도에서 열처리된 핀들은 체결 절차서 (mouting procedure)에 따라서 high torque를 받으면 stress

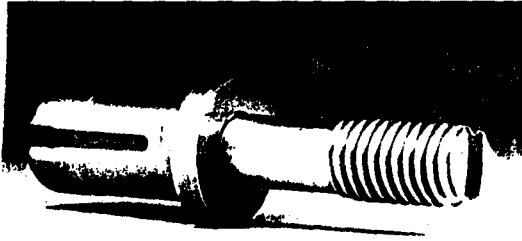
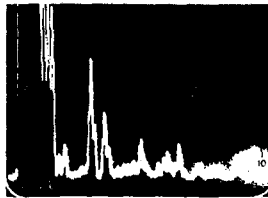


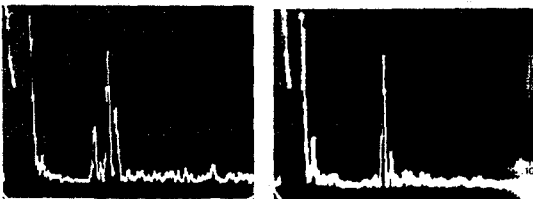
Fig. 8. Reference pin.

corrosion crack이 발생할 위험이 높다. 많은 발전소에서 결함이 발견된 부위는 핀이 collect to shank 부위이며 이따금, 핀의 leaf portion 에서도 결함이 발생된다. 핀들이 완전히 균열되면은 loose-part들이 되는 결과를 초래한다.

초음파검사 기법의 개발과 보정(calibration)을 위해서 보정시험편 (reference)이 사용된다. 이 보정 시험편은 서로 다른 grain size (from ASTM 4.0 to ASTM 13.0)로 구성되어 있다. 인공결함은 leaf portion 부위에 1mm 깊이와 균열이 예상되는 collect to shank 부위에 3mm 깊이에 인공결함을 방전 가공한다. (0°, 45°, 90°)



(a)



(b)

(c)

Fig. 9. (a) Reference pin with defect in the leaf-spring area.
(b) Reference pin without defect.
(c) Reference pin with defect in collect-to-shank area.

탐촉자(probe)배열은 접촉법을 사용할 수 있도록 하며 leaf-portion과 collect-to-shank 부위를 검사하기 위하여 일반적으로 4개의 crystal로 구성된다. 2개는 0°로 leaf-portion을 검사토록 하며, 나머지 2개는 경사 탐촉자(slot-probe)의 사각 crystal로써 collect-to-shank 부위를 검사토록 제작한다. 탐촉자 주파수는 4 MHz를 사용하며 2 MHz는 course grain (ASTM 5 이하) 재료에 사용된다. 다음 Fig. 9는 collect-to-shank 및 leaf-portion 부위에서 취득한 신호이다.

2. 5. RPV head penetration, CRDM-housing

Inconel 600 계열 합금을 사용하는 경수로(PWR) 상부 용기 제어봉 관통부에서 1차 계통 용수 응력 부식 균열로 인한 균열이 발생되었다.

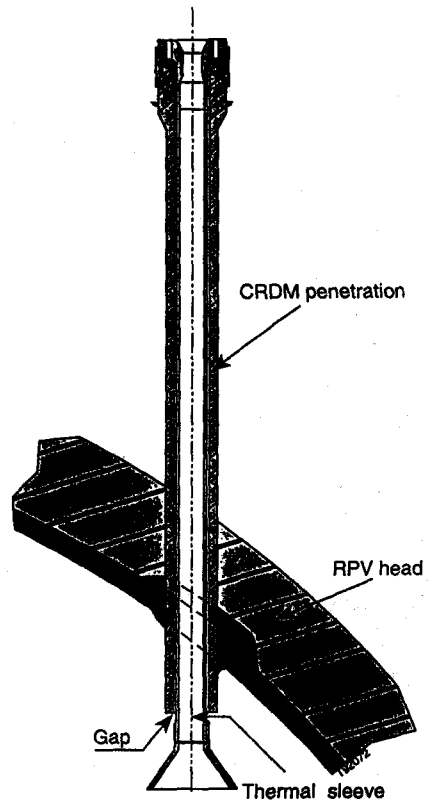


Fig. 10. Typical PWR upper vessel control rod drive penetration configuration.

이 균열들은 대체적으로 길이 방향 균열(axial crack) 이지만 그 예외가 스웨덴의 Ringhals 2호기에서 원주 방향 균열이 발견되었다. 그러나 이 경우는

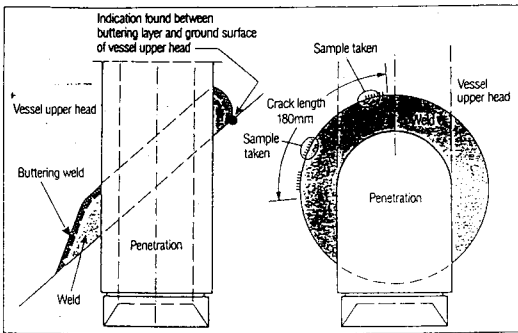
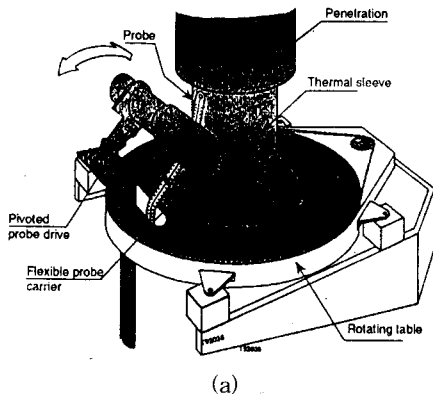
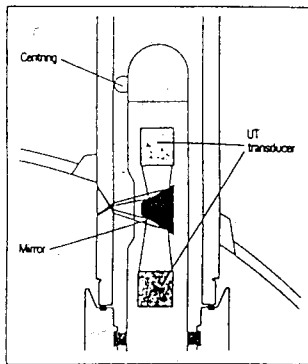


Fig. 11. Circumferential crack found in one of the under vessel penetration welds at Ringhals.



(a)



(b)

Fig. 12. a) UT system of ABB reactor Co.
b) UT system of Intercontrole Co.

관통부 자체에서가 아니라 관통부 헤드에 접합시키는 용기 헤드의 아랫쪽에 있는 용접부에서 발견되었다.

각국에서 이 부위에 대한 누설검사 및 비파괴검사를 수행중이다. NRC SER에 따르면 1993년까지 세계적으로 프랑스, 스웨덴, 스위스, 일본, 벨기에의 37기 발전소에서 CRDM 관통부를 검사하였는데, 1850개의 관통부 중 59개에서 균열 징후가 발견되었다. 특히 축상 균열보다는 원주균열이 발견될 경우에 운전 압력하에서 슬리브의 분출과 격리 불가능한 일차 계통 누출을 일으킬 수 있어 NRC는 사안에 따라 관통부 검사를 준비토록 하였다. Intercontrole사와 ABB reactor 사는 UT 및 ECT 검사를 위한 자동화 시스템을 개발하여 각각의 utility에게 제공하였다.

3. 결론

원자력발전소의 원자로 내부 구조물 즉 fuel alignment pin, core baffle former bolt, core barrel former bolt, control rod guide tube support pin 및 RPV head penetration (CRDM)에 대한 체적검사 특히 초음파검사에 대한 검사 기술 및 현황을 간략하게 서술하였다. 원전 운전 10여년이 지난 이 시점에서 한국 원전에 대한 안전성을 확보하도록 상기에서 언급한 현황 및 기술에 대한 이해가 절실히 필요하다. 현재 원자로 내부 구조물에 대한 육안검사를 수행하고 있는데 좀더 나아가 통계적 sample 개념으로 구조물들의 bolt 및 pin에 대한 검사 계획이 바람직하리라 사료된다.

참고 문헌

- 1) “원자력 안전동향” 한국원자력안전기술원 1993년 11월호 37~40, 99~100
- 2) ABB Reactor GmbH (“Technical Description”) of Internal Inspection and Repair 95.02
- 3) ASME B & PV Code Sec.XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components 1989년 Edition.