한국압력기기공학회 논문집
제6권 제2호 2010년 12월 pp. 9－15

원자로 헤드 관통관 노즐 가동전 검사 수행

이동진† · 노익준* · 신건철* · 김해석* · 홍주열* · 최정권**

Pre-Service Inspection for Reactor Vessel Penetration Nozzle

Dong Jin Lee†, Ik Jun Noh*, Kun Chul Shin*, Hae Suck Kim*,
Joo Youl Hong* and Jung Kwan Choi**

ABSTRACT

US NRC issued rulemaking of 10CFR50.55a to perform the Perservice and Inservice inspection for Reactor Vessel Head Penetration Nozzle of US Nuclaer plant. The rulemaking was required the EPRI Demonstration to verify the NDE technique performing special Ultrasonic examination. In order to meet this requirement, the UT and ECT procedures was demonstrated and the NDE personnel were qualified by EPRI. In this paper, the NDE technique and analysis method are described the Preservice inspection for the Palo Verde #1/2/3 Replacement Reactor Vessel Head Penetration Nozzle using the qualified procedures and personnel.

Key Words : PreService Inspection (가동전검사), Reactor Vessel Head Penetration Nozzle(원자로 관통관 노즐), NRC Rulemaking(NRC 규제요건), Procedure(절차서), Ultrasonic Examination(초음파탐상검사), Eddy Current Examination(와전류탐상검사)

1. 서 론

미국 APS사로부터 수주한 Palo Verde #1/2/3의 Replacement Reactor Vessel Closure Head (교체형원자로 헤드 - RVCH)는 ASME Sec. III 1998년판 및 2000년 추록이 적용되어 제작하였다. Palo Verde#1/2/3 교체형 원자로 헤드는 두산중에서 APS와 원자로 헤드, CEDM (Control Element Drive Mechanism) 제작 및 조립과 가동전 검사(Pre-Service Inspection; PSI) 수행을 계약 범위에 포함하여 2006년 4월 Kick-off Meeting을 시작으로 제작하였으며 최종 #1 출하를 2010년 5월 30일에 수행하면서 약 4년여간 제작 및 검사를 수행하며 제작하였다. 특히 원자로 헤드와 관통관 노즐의 J-Groove 용접부는 자동 용접기를 최초 적용하여 용접을 수행하였으며 층간 PT(Liquid Penetrant Test)를 최소 7회 수행하면서 PT의 관련지시를 모두 제거하였으며 최종 및 수압 후 용접부에는 PT White(No Indication)의 합격 기준을 적용하여 최상의 용접 품질을 확보하였다.

수압시험 후 CEDM 용접 전 Penetration J-Groove weld 영역 및 관통관 Nozzle 내/외면의 요구된 검사부위에 대해 ASME(America Society of Mechanical Engineer) Section XI 2001년판 및 2003추록, ASME Code case N-729-1, EPRI(Electric Power Research Institude) Letter 2003- 013의 권고사항, 미국 NRC (Nuclear Regulatory Commit) Order EA-03-009 및 NRC Final Rulemaking 10CFR50.55a에 따라 Shop 내에서 가동전검사(PSI)를 수행하였다. NRC Final Rulemaking은 2008년 9월10일 공표되면서 2009년 9월 1일 이후 수행되는 모든 가동전/중 검사(PSI/IS: Inservice InspectionI)에 적용토록 요구함에 따라 2009년 9월 이후 수행된 #2 및 #1는 NRC Final Rulemaking에 따라 PSI 검사가 수행되었다. EPRI Letter -2003-013 권고사항은 RVCH Nozzle에 대한 PSI 검사를

† 책임저자, 회원, 두산중공업(주) 비파괴검사부
E-mail : dongjin.lee@doosan.com
TEL : (055)278-3355 FAX : (055)278-8411
* 두산중공업(주) 비파괴검사부
** 엔스코

공급자가 수행하도록 언급되어 있으며, NRC Final Rule Making 10CFR50.55a은 PSI 검사 요건인 ASME Code Case N-729의 요건을 승인 및 반영되었고 Code Case N-729의 요건에 UT 평가자에 대한 Personnel Qualification(자격 검증)을 추가함으로써 검사원 요건을 강화하였다. 검사영역 및 검사방법은 MRP Letter 2003-013의 권고사항 및 ASME Code Case N-729에 따라 RVCH Penetration의 가동전검사(PSI)를 수행하였다.

두산중공업(주)는 Palo Verde #1/2/3 RRVCH Shop PSI 검사 수행을 위해 미국의 Wesdyne으로부터 원자로 헤드 관통관 검사 수행을 위한 검사 장비(7010 Open Housing Scanner)를 구매 및 교육을 이수한 후 유사 Project인 Entergy 교체형 원자로 헤드 PSI에 공동 참여하여 경험을 축적하고 지속적인 Practice와 Training을 통해 자체 검사 수행 가능토록 검사기술을 확립하였다.

두산중공업(주)는 고객(APS)의 요건인 EPRI 검증 및 NRC Final Rulemaking 요건을 만족시키기 위해 EPRI와 관련 절차서를 지속적으로 Calibration하여 UT 및 ECT(Eddy Current Test) 수집/평가 절차서를 Set-up하였으며, 보유중인 검사 장비를 EPRI로 옮겨 PSI 검사 요건과 동일한 검사기법을 적용하여 UT/ECT Data 수집 및 평가를 통해 관련 절차서 검증 및 Personnel Qualification을 검증받았다.

2. 원자로 헤드 관통관 가동전검사

2.1 원자로 헤드 관통관 가동전 검사 요건

RVCH Penetration Nozzle의 가동전 검사는 고객과의 계약요건 및 제작 기간 중 규제요건의 변경에 따른 추가 요건을 기준하여 검사를 수행하였다. 제작 중 적용된 관련 코드는 ASME Sec. III, V 및 XI 1998년판 및 2000년 추록을 기준하였다. 특히 원자로 헤드와 관통관 노즐의 J-Groove 용접부에 대해서는 Fig. 1과 같이 용접 중 수차례의 PT를 수행하였다. 각 PT공정 마다 Code 합격기준보다 엄격한 No Indication의 기준으로 검사가 수행되었으며 최종 용접 후 최종면 및 수압 완료 후 가동전 검사전 실시된 PT는 PT White-PT 현상액 적용 후 흰색을 제외한 나머지는 없어야 함-의 합격기준을 적용, 만족하는 품질을 확보하였다.

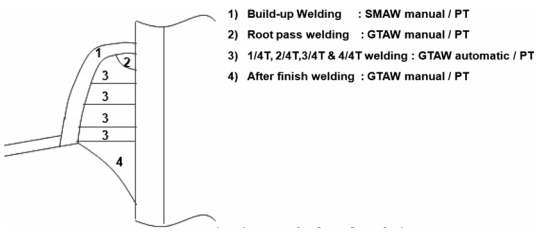
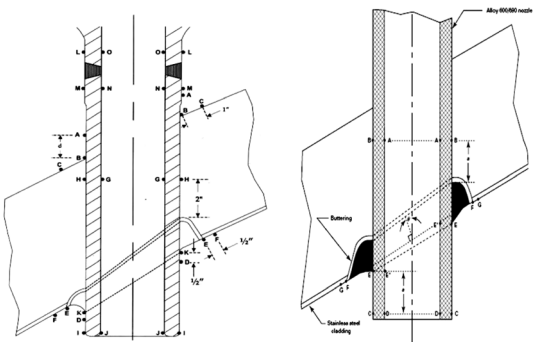


Fig. 1 J-Groove 용접부 형상 및 적용 NDE

원자로 헤드 제작 및 수압시험이 완료된 후 CEDM 용접 전 관통관 노즐에 대해 가동전 검사를 수행하는데 호기별 검사 시기에 따라 미국 NRC 규제 요건이 달리 적용되었다. 2009년 9월 1일 기준으로 이전에 수행된 3호기는 ASME Code case N-729-1, EPRI Letter 및 NRC Order EA03-009가 적용되었으며 각 요건별 요구되는 검사부위는 Fig. 2와 같다. 가동전 검사 수행은 MRP Letter 및 ASME Code case의 요건에 따라 EPRI에서 검사 절차서를 검증 후 검증된 절차서로 검사를 수행하였다. 팔로버디 #2 및 #1는 NRC Final Rulemaking의 요건에 따라 검사가 적용되었다.



NRC EA-03-009 Code case N-729-1

Fig. 2 검사범위 요건

2.2 NRC Rulemaking의 요건 만족

Palo Verde #1/2 교체형원자로 헤드 관통관 노즐의 PSI는 NRC Rulemaking적용이 계약적으로 요구되지 않지만 미국에 설치 운영될 발전소의 기자재로 규제요건이 추가로 적용되어야 함에 따라 고객(APS)의 추가요구로 적용되었다. NRC Rulemaking의 주요 요건은 절차서 검증 및 UT 검사원에 인증을 요구하고 있다. 그러나, 헤드 노즐 관통관의 체적검사를 면제 할 수 있는 요건도 함께 허용함에 따라 검

사 상황에 따라 적용가능하다. Nozzle 내/외면에 검사가 요구되는 전표면 검사부위를 표면검사(PT 또는 ECT)로 수행할 시 체적검사가 수행되지 않아도 된다는 면제조건이 있기에 두중이 수행한 PSI수행 내용(Nozzle 내면 wetted surface, Nozzle 외면 및 J-Groove 용접부 전표면 ECT-If a surface examination is being substituted for a volumetric examination on a portion of a penetration nozzle that is below the toe of the J-groove weld [Point E on Fig. 2 of ASME Code Case N–729–1], the surface examination shall be of the inside and outside wetted surface of the penetration nozzle not examined volumetrically)에 따르면 헤드 관통관 노즐의 초음파 탐상검사를 수행하지 않아도 NRC Final Rulemaking 요건을 만족할수 있으나 향후 고객(APS)이 수행할 가동중검사(ISI)의 Baseline Data 확보를 위해 Volumetric Examination(UT)를 수행하였다

NRC Final Rulemaking에 따라 수행 시 추가된 사항은 다음과 같다.

첫째, NRC Order EA-03-009는 2008년 12월 31일 이후 적용되지 않는다.

둘째, 2009년 9월1일 이후부터는 초음파 탐상검사 수행은 ASME Code case N-729-1 Para.2500을 적용하는 대신 NRC 10CFR50.55a(g)(6)(ii)(D)(3)(i)에서 NRC 10CFR50.55a(g)(6)(ii)(D)(3)(iv)의 요건에 따른 mockup을 이용하여 blind demonstration에 의해 검증된 검사원, 절차서 및 장비를 이용하여 수행되어야 함.

셋째, 검사절차서는 최소 10개의 결함을 있는 mock-up을 활용하여 100% 검출할 수 있도록 구성되어야 하고 최소 3명의 검사원이 평가를 수행하여 검증해야 한다.

넷째, 위 요건의 추가로 Personnel Qualification을 ASME Sec. XI Appendix VIII Supplementary 10의 요건에 준하는 검증을 실시하는데 결함 검출은 ASME Sec. XI Appendix VIII-S10-1의 Mock-up에서 최소 80%의 검출력을 가져야하고 결함 길이측정의 RMS (Root Means Square)는 10mm, 깊이측정의 RMS는 3mm의 요건을 만족해야 한다.

두산중공업은 UT 및 ECT 절차서 검증과 Personnel Qualification을 만족하기 위해 UT장비(7010 Open Housing Scanner Assembly) 및 ECT 장비(Groovemen Assembly)를 미국 EPRI로 운송하여 총 10명으로 구성된 검증팀과 함께 검증에 참여하였다. 검증에 적용된 절차서는 UT 수집 및 평가 절차서 2종과 ECT 수집 및 평가 절차서 3종으로 구성되었으며, Personnel Qualification에 참여한 10명 모두 PASS하였다.

2.3 초음파탐상검사 적용 기법

2.3.1 가동전검사에 적용된 TOFD UT

어떤 매질에서 입사파가 Fig. 3과 같이 Crack 또는 평면결함 등과 부딪치면 입사파는 반사파와 함께 Crack의 양쪽 Tip에서 회절파를 생성시킨다. 이 회절파는 원형파로서 모든 방향으로 전파되어 어느 위치에서도 검출할 수 있다. 회절파의 에너지는 반사파에 비해 상당히 약하므로 Pulse Pre-Amplifier로 증폭하여 A-Scan에 나타낸다.

TOFD 검사 기법에서 한 쌍의 송·수신 종파사각 탐촉자는 같은 탐상 면에 마주보고 놓여있지만, 결

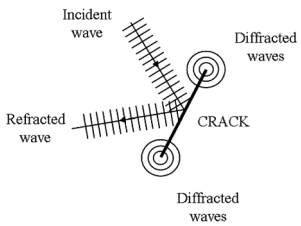
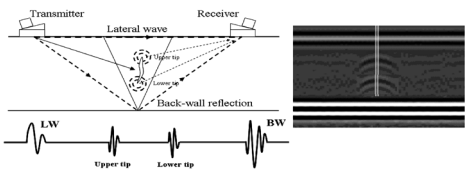
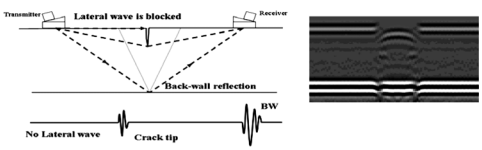


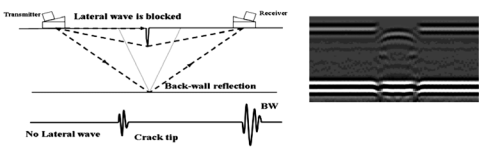
Fig. 3 TOFD 신호의 발생 원리



(a) 내부 Crack 신호



(b) 저면 Opening Crack 신호



(c) 표면 Opening Crack 신호

Fig. 4 TOFD 탐상 배치 및 초음파 신호

함과는 반대편에 배치된다. Lateral Wave(LW)는 종파와 같은 음속으로 시험편 표면을 따라 바로 전달되며, Backwall Wave(BW)는 저면에서 반사된 파이다. 만약 Crack이 존재한다면 Crack의 Tip에서 발생된 회절파 신호가 보이게 된다. Fig. 4는 TOFD 탐상을 위한 탐촉자 배치와 TOFD 탐상에서 발생되는 주요 신호들을 보여 주고 있다.

만약 크랙이 Fig. 4 (a)와 같이 내부에 존재한다면 회절신호는 Upper & Lower Tip 2개가 동시에 검출되고, 크랙이 OD와 연결되어있다면 Fig. 4 (b)와 같이 BW가 단절된 상태에서 Upper Tip 신호만 검출된다. 또한 크랙이 탐촉자가 놓여있는 표면 즉, ID에 연결되어있다면 Fig. 4 (c)와 같이 Lower Tip 신호만 검출되고 LW는 단절될 것이다.

TOFD 결함의 정확한 위치 확인 및 크기 측정은 탐촉자의 구조 및 배치와 검출된 각종 신호들의 TOF에 의해서 산출할 수 있다. 송·수신 종파사각탐촉자가 Fig. 5와 같이 배치되어있을 경우 결함에서 발생된 회절파 신호의 TOF(t)는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 결함의 깊이(d) 및 높이(h)는 식(2) 및 식(3)과 같이 나타내 수 있다. Fig. 6은 PCS(탐촉자 중심간 거리-Probe Center Spacing)거리 2S을 보여주고 있다.

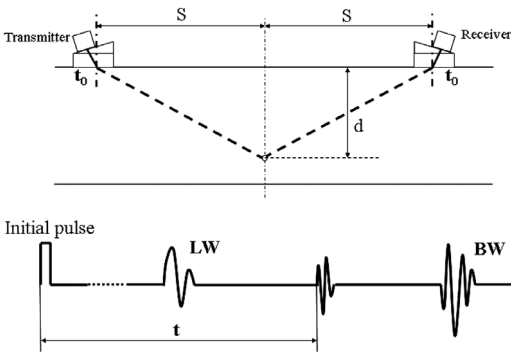


Fig. 5 A-Scan Signal의 전송 시간

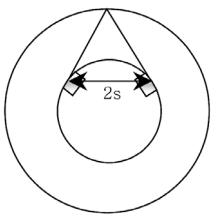


Fig. 6 Nozze 내면에 있는 TOFD Probe의 2S

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{(S+d^2)}}{c} + 2 \cdot t_0 \qquad \text{식(1)}$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 \cdot (t-2t_0)^2 - S^2} \qquad \text{식(2)}$$

$$h = d_2 - d_1 \qquad \text{식(3)}$$

2.3.2 초음파 탐상 검사

RVCH Penetration Nozzle Mock-Up 시험에 사용된 NDE Inspection 시스템의 주요 장치(Fig. 7)는 Computer, Workstation, DAS(Data Acquisition System), MCS(Motion Control System), Scanner 그리고 UT Probe 등으로 구성되어있으며, Open Housing CEDM UT Probe는 Penetration Nozzle을 내면에서 탐상할 수 있는 구조로 되어있고, 탐촉자 모듈은 다양한 기법의 UT검사를 동시에 수행할 수 있도록 수직탐촉자, 와전류탐상을 위한 탐촉자 그리고 TOFD 탐촉자를 적절히 배치할 수 있는 구조로 되어있다. 수직 및 TOFD탐촉자는 관통관 노즐 내면을 주사하기 위해 7010 Open Housing Scanner(OHS)에 연결 설치되어 노즐의 상,하로 주사하면서 Nozzle 원주 전 부위를 일정 각도로 움직이며 UT Data를 수집하였다.

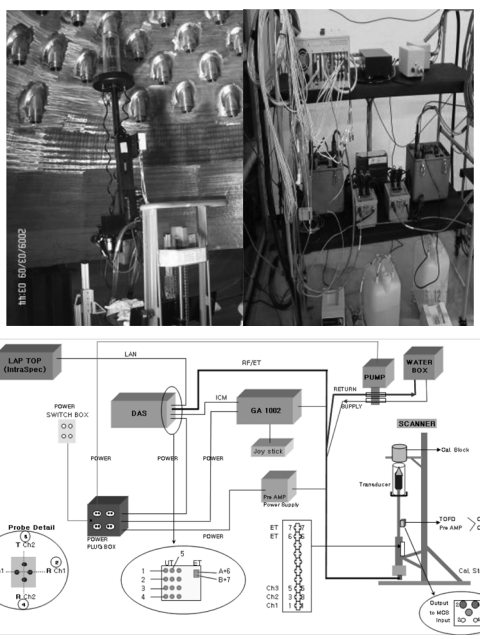


Fig. 7 RVCH Penetration UT System Set-Up

원자로 가동 중 발생된 RVCH Penetration Nozzle의 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Crack) 검출 및 그 크기의 측정 기법은 Nozzle의 기하학적 구조와 접근성의 한계 때문에 TOFD UT 기법이 가장 적합한 검사기법으로 알려져 왔다.

Penetration Nozzle 용접부의 건전성 확인 및 용접에 의한 Nozzle 치수 변화 등이 UT 검사에 미치는 영향의 확인 그리고 신규로 도입한 UT 검사시스템 성능 검증을 위한 Mock-Up 시험에 TOFD 탐상 및 수직탐상 UT 검사기법을 적용하였다.

2.4 와전류탐상검사 적용 기법

와전류탐상검사는 원자로 헤드 관통관 노즐 내면의 wetted surface, 관통관 노즐 외면 및 J-Groove 용접부 전표면을 수행하였다. 탐촉자를 관통관 노즐 내면의 wetted surface를 검사하기 위해 초음파 탐상 탐촉자와 함께 설치되어 7010 OHS를 이용하였으며, Nozzle외면 및 J-Groove용접부는 Grooveman을 이용하여 ECT Data를 수집하였다. ECT Data 수집 및 평가 절차서는 미국 EPRI로부터 검증된 절차서를 적용하였다. ECT 탐촉자는 Driver Pickup X- Type으로 직경 3mm의 원형 코일이다. 사용 주파수는 400KHz 및 200KHz를 사용하였으며 400KHz의 Average pick-to-pick는 300~600 ECU, 200KHz는 200 ~300ECU로 설정하였다. 교정시편은 깊이가 0.04인치 EDM 노치가 가공된 시편을 이용하였으며, 원주방향의 표준노치로 부터의 신호를 15도 또는 195도로 설정하여 장비를 교정하였다.

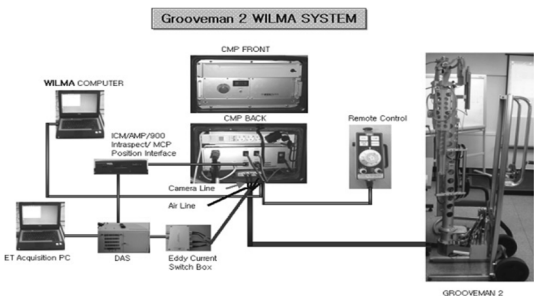


Fig. 8 RVH ECT System Set-up

3. 가동전검사(PSI) 수행 및 결과

3.1 Palo Verde #1/2/3 RRVCH PSI 수행

원자로 헤드 가동전 검사 수행은 Table 1의 내용과 같이 CEDM 및 Vent Pipe에 UT와 ECT를 각각 수행하였다.

Table 1 가동전 검사 수행 내용

검사부위		고객 요건	PSI 수행사항
97CEDM 노즐	CEDM 노즐	UT(TOFD)	UT(TOFD) & ECT
	J-Groove 용접부	ECT	ECT
1 Vent Pipe	CEDM 노즐	ECT &두께측정	ECT, 두께측정 & 45도
	J-Groove 용접부	ECT	ECT

UT 교정 Block은 원주방향 및 축방향에 1/2t 및 1/4t 깊이의 내/외면 EDM 가공으로 Notch를 제작하였다. 원주방향 EDM Notch는 축방향으로 배열된 TOFD 탐촉자 신호 교정용이고, 축방향 EDM Notch는 원주방향으로 배열된 TOFD 탐촉자의 초음파 신호 교정용으로 사용되었다.

3.2 Palo Verde #1/2/3 RRVCH PSI 수행 결과

원자로 헤드 관통관 노즐의 UT검사 대상 부위인 Nozzle Wetted Surface 범위의 Base Material에는 No Indication이며 관통관 노즐의 Leak Path를 검출하기 위해 수직빔의 수집된 Data를 활용하여 평가를 수행하였으며 Leak Path로 의심되는 지시는 없었다. 그러나, 검사 대상 부위에는 포함되지 않지만 추가 정보 제공을 위해 관통관 노즐과 J-Groove 용접부 경계부위에 대해 추가로 평가를 수행하였다. J-Groove 용접부와 관통관 노즐 경계부의 형성된 Weld Volumetric Indication(WVI)이 최초 제작된 3호기에서는 다량의 지시가 검출되었으나, 검사결과에 대한 Feedback 및 용접방법 및 속도 조절을 통해 후속호기(#2 및 #1)에는 지시의 수가 현저하게 줄었다. 용접부 지시인 WVI의 평가 기준은 미국 원전 ISI에 적용되는 기준

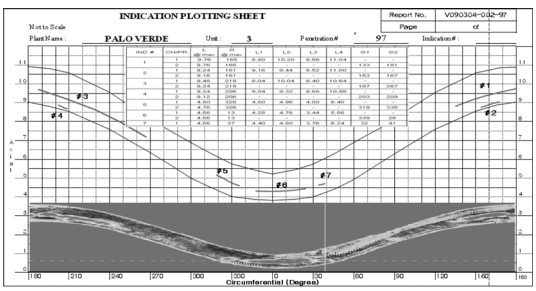


Fig. 9 Nozzle 관통관 용접부의 지시 형상

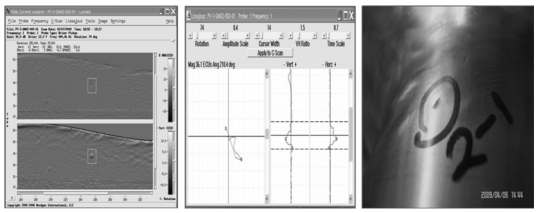


Fig. 10 와전류탐상 검사 지시(Surface Indication)

을 반영하여 용접폭의 50% 이상의 지시를 기준으로 기록하였다(Fig. 9 참조).

WVI 지시외 UT검사 결과 추가로 발견된 지시로는 노즐 내면에 미세한 지시로 Lateral wave에 미미한 변화를 나타내는 Shallow Surface Signal(SSS), Penetration Tube Indication(PTI) 및 Back-Wall Perturabtion(BWP) 지시가 일부 검출되었으며 최종 평가 결과 아주 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

가동전 와전류탐상 검사 결과 원자로 헤드 3개 호기 모두에서 관통관 노즐 내면의 Wetted Surface에는 발견된 지시가 없었으며, Tube 외면에 제작 중 발생된 미세한 찍힘 등 Surface Geometry Indication이 발견되어 관련 사진과 함께 보고서에 기록되었으며 J-Groove에 인접한 클래딩 부위에서 표면의 상태에 따라 Geometry Indication, Permeability Variation Indication(PVI) 등이 발견되어 또한 보고서에 기록되었다(Fig. 10 참조).

3.3 Nozzle내면 Distortion 발생에 따른 조치

J-Groove 용접부에 용접 시 용접열에 의한 수축 현상을 방지하기 위해 각각의 Nozzle 내면에 Mandrel을 설치하여 J-Groove 용접으로 인한 Nozzle 내면의 Distortion을 방지하였다. Mandrel을 적용하여 용접한 결과 헤드 중심부에 있는 Nozzle의 용접부는 수축이 발생하지 않았으며 헤드 외곽방향으로 위치한 노즐에 용접량이 과다해짐에 따라 용접열에 의한 Distortion이 발생하였으나 Fig. 11과 같이 신호를 평가하는데는 아무런 영향을 끼치지 않았다.

그러나, Mandrel을 사용했음에도 불구하고 용접열에 의한 노즐 내면의 Distortion으로 인해 UT Data 수집이 불가한 한 개의 노즐(No.75)이 1호기에서 발견되었다. 노즐 내면 용접 변형으로 노즐의 0도 부위에 Distortion이 발생되었으며 UT Data 수집 시 탐촉자 Housing 접촉의 문제로 인해 노즐의 280도에

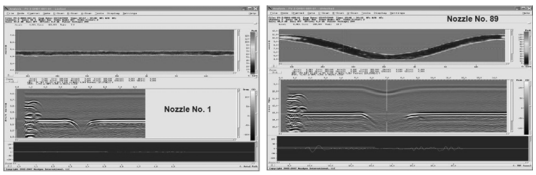


Fig. 11 노즐 위치에 따른 UT 신호 형상

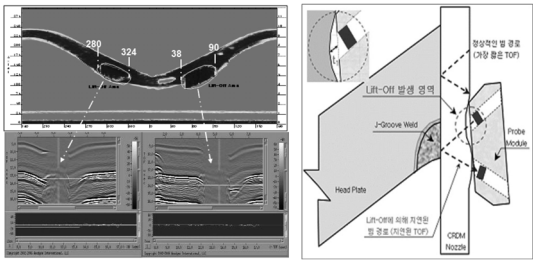


Fig. 12 용접변형에 따른 UT 신호 수집 불가

서 324도 및 38도에서 90도 사이에 UT Data 수집이 불가하였다(Fig. 12).

용접 변형이 발생된 부위는 Nozzle 끝단에서 100 mm에서 150mm까지 분포되어 있었다. Nominal Nozzle 내경이 69.2mm이나 변형이 발생된 부위는 65.6mm로 3.6mm의 내경이 감소되어 있었다(Fig. 13). 가동전 UT검사 Data는 모든 Nozzle에서 수집이 되어야 한다는 고객 요건에 따라 변형된 부위를 Baby Grinding을 탑재한 특별한 Jig를 개발하여 제거하였다. 원자로 헤드 설계 시 CEDM의 최소 설계두께는 5.6mm로 제작 중 설치된 19.7mm에 비해 두께에 많은 여유값을 확보하고 있었다. 그러나, CEDM의 두께 감육을 최소화하도록 고객이 요구하였으며 이에 Baby Grinder를 이용하여 0.5mm 단계로 제거 후 UT Data를 수집하였다. 단계별 Grinding 및 UT 재수집을 반복한 결과 최종 2.5mm 제거 후 UT Data 수집에 성공하였으며(Fig. 14), 최종 결과에 대한 고객 승인으로 종결하였다.

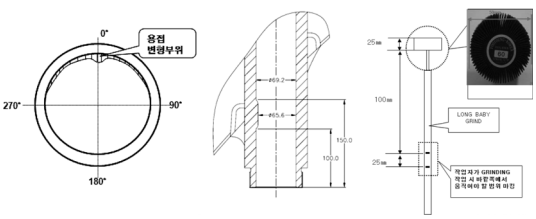


Fig. 13 Nozzle 내면 Distortion 부위 및 제거 Tool

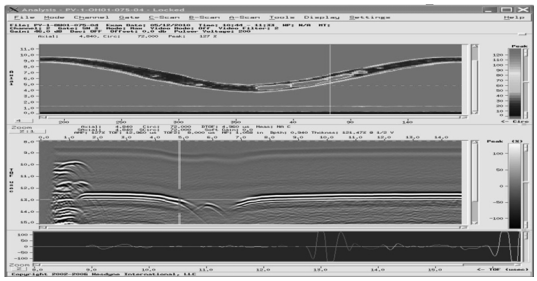


Fig. 14 용접부 Distortion 제거 후 UT Data

4. 결 론

검사 결과 CEDM 관통관 노즐에는 UT 및 ECT의 기록될 관련 지시가 없었으나, 1호기 원자로 헤드의 노즐 1개에서 J-Groove용접으로 인한 Nozzle 내면 굴곡 발생으로 Distortion signal이 발견되어 국부 수정을 통해 재수집에 성공하였다. 해외 교체형 원자로 헤드 관통관 검사를 주계약자로써 독립적으로 자체 개발된 기술을 이용하여 미국 EPRI에 검증을 받고 가동전 검사에 직접 적용하여 고객에게 최적의 검사 및 최상의 검사 Data를 제공할 수 있었다. 이를 바탕으로 원자로 헤드 관통관 UT검사 Data 수집 방법 표준과 평가 Guide를 설정하였으며 현재까지 국내에 경험이 없었던 J-Groove 용접부 ECT Data 수집에 대한 절자 확립 및 평가 표준화를 확보할 수 있었다. 이에 유사한 원자로 헤드 관통관 노즐의 요구된 검사에 대해 본 Project에 적용된 기술을 활용하여 지속적으로 적용가능 할것이라 예상된다. 향후 EPRI에 검증 시 시기적으로 준비가 미비했던 Leak path 부분을 추가로 검증을 추진하여 NRC Rulemaking 10CFR50.55a에 따른 Personnel Qualification을 확보할 예정이다.

참고문헌

1. K. Kietzman: Guidance on TOFD Inspection of CRDM Penetrations, EPRI
2. D. C. Adamonis, F. D 'Annucci, R. S. Devlin, M. W. Kirby, J. P. Lareau, P. Sjoberg, R. P. Vestovich, F. G. Whytsell: Advanced NDE Techno logoes for Alloy 600 Components
3. R. S Devlin: IntraSpect UT Analysis Gui-deine
4. R. S Devlin: IntraSpect Ultrasonic Pro-cedure for Inspection of RVCH Penetra-tion
5. 2010년 압력공학회 발표논문집