

원자로헤드 관통관 결함의 검출 정확성 연구

정 태 훈(중부대학교), 김한중*(한국수력원자력(주))

A Study I on the Sizing Accuracy of the Characterized Defects of the Reactor Vessel Head Penetrations

Tae-hoon Chung, Han-Jong Kim*

ABSTRACT

The head penetrations for control rod drive mechanism and instrumentation systems are installed at the reactor pressure vessel head of PWRs. Primary coolant water and the operating conditions of PWR plants can cause cracking of these nickel-based alloy through a process called primary water stress corrosion cracking (PWSCC). Inspection of the head penetrations to ensure the integrity of the head penetrations has been interested since reactor coolant leakages were found at U. S. reactors in 2000 and 2001.

The complex geometry of the head penetrations and the very low echo amplitude from the fine, multiple flaws due to the nature of the SCC made it difficult to detect and size the flaws using conventional pulse-echo UT methods. Time-of-flight-diffraction technique, which utilizes the time difference between the flaw tips while pulse-echo does the flaw response amplitude from the flaw, has been selected for this inspection for it's best performance of the detection and sizing of the head penetration SCC flaws.

This study defines the limits of the detectable and accurately sizable minimum flaw size which can be detected by the General TOFD and the Delta TOFD techniques for circumferentially and axially oriented flaws respectively. These results assures the reliability of the inspection techniques to detect and accurately size for various kind of flaws, and will also be utilized for the future development and qualifications of the TOFD techniques to enhance the detecting sensitivity and sizing accuracy of the flaws of the reactor head penetrations in nuclear power plants.

Key Words : Penetrations, PWRs, PWSCC, pulse-echo UT methods, Delta TOFD techniques, TOFD

1. 서론

제1절 배경

현재 운전 중인 우리나라 원자력발전소 중 월성 원자력 4기를 제외한 15기는 가압경수로형(PWR : Pressurized Water Reactor) 발전소로서 원자로 헤드에는 제어봉을 삽입, 인출하는 제어봉구동장치(CRDM : Control Rod Drive Mechanism)와 출력 측정 계측장치(Instrumentation System)의 이동을 위해 관통관이 용접, 설치되어 있다. 이 관통관은 Alloy 600 등 니켈 합금으로 되어 있는데 이 재질

은 용접 잔류응력 및 운전응력 등 인장응력과 원자로 냉각재 수질환경 및 온도 등 복합적인 원인에 의한 1차냉각재용력부식균열 (PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking)에 매우 민감하다.

2000년 11월 미국 Oconee 원전 1호기의 원자로 헤드 관통관 노즐 용접부에서 PWSCC에 의한 원자로냉각재 누설이 발견되었으며 2001년 2월 미국 Arkansas 원전 1호기에서도 유사한 결함이 발견됨으로써 PWSCC 검사에 많은 관심이 제기되었다. 미국 원자력규제위원회(NRC ; Nuclear Regulatory Commission)는 현재까지 원자로 헤드 부

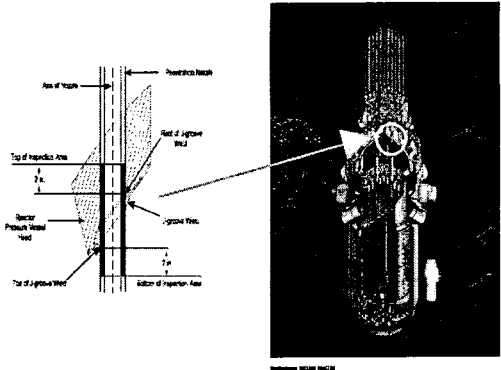
분의 건전성 확인을 위해 적용되어 왔던 ASME Boiler and Pressure Vessel Code에서 요구하고 있는 원자로헤드 외면의 누설여부 육안검사만으로는 원자로헤드 관통부의 건전성을 적절히 확인할 수 없다고 판단, 2003년 2월 PWR 원자로 헤드 검사에 관한 법령, 즉 NRC Order EA-03-009 "Establishing Interim Inspection Requirements for Reactor Pressure Vessel Heads at PWR"을 공표하였다.

이 기술기준은 원자로를 운전 년 수와 원자로 헤드 온도를 기준으로 경년열화의 정도에 따라 High, Moderate, Low 및 Replaced 등 4가지 등급으로 분류하고 각 등급별 기준에 따라 원자로 헤드 관통관에 대한 비파괴검사를 시행할 것을 요구하고 있다.

제2절 국내 검사현황 및 개요

국내 운전 중인 모든 PWR형 원자로 헤드는 NRC가 정한 기준에 따라 4등급으로 분류하고 정해진 기준에 따라 원자로헤드 관통관의 건전성을 비파괴검사법으로 확인하여야 한다. 원자로 운전 연수 및 원자로헤드 운전온도를 기준으로 평가한 결과 고리 1,2호기는 High 등급으로 분류되어 매 계획예방정비 (O/H ; Overhaul)기간마다 원자로헤드 관통관에 대한 비파괴검사를 수행하여야 하며, 나머지 원자로들은 Low 등급으로 분류되어 매 4번째 O/H 또는 7년 중 빠른 주기를 택하여 원자로헤드 관통관에 대한 비파괴검사를 수행하고 있다.

검사할 대상은 원자로 헤드를 관통하는 관통관과 그 주변 용접부로 일반적으로 관통관은 원자로헤드 관통부에 열박음 되며, 원자로 헤드 내면에 J-Groove weld 형태로 부분 용접되는데 원자로헤드 내면 곡률에 의해 타원형의 Saddle 형태의 용접이 이루어진다. 이러한 용접부 특성에 따라 용접 입열량의 차이 등으로 인해 잔류응력이 발생되어 PWSCC가 발생하기 쉬운 환경이 된다.



<Fig.1> 원자로 모형도 및 관통부 상세도

제3절 연구목적

원자로 헤드 관통관 및 인접용접부에서 발생하는 결함은 주로 PWSCC에 기인하고 또 그 기하학적 형태가 매우 복잡하여 일반적인 초음파검사법으로는 이러한 까다로운 조건 하에서는 미세균열의 검출 및 크기 측정이 용이하지 않아 동 부위에 대한 검사 방법으로 초음파 회절파의 진행시간을 이용하여 결함의 검출 및 크기측정을 하는 TOFD(Time Of Flight Diffraction) 검사법을 적용한다.

본 연구에서는 각 위치 및 깊이를 알고 있는 다양한 노치가 가공된 Standard block을 TOFD 기법으로 Scanning하여 취득한 Data에 대한 평가/분석을 하여 초음파 회절파를 이용한 검사방법으로 검출할 수 있는 결함 크기 범위를 확인하여 회절파를 이용한 결함검출의 정확성 및 신뢰성을 검증하고, Standard block에 가공된 Axial 방향 Notch와 Circumferential 방향 Notch 각각에 대하여 원주방향 배열 TOFD 탐촉자와 축방향 배열 TOFD 탐촉자를 이용한 결함 검출 및 크기측정을 하고 그 결과의 비교, 검토를 통하여 불연속부의 방향과 TOFD 탐촉자 초음파 주사 방향과의 상관관계를 정립하여 탐촉자 배열 위치에 따른 결함의 검출 가능성 및 신뢰도 정보를 확보하고자 한다.

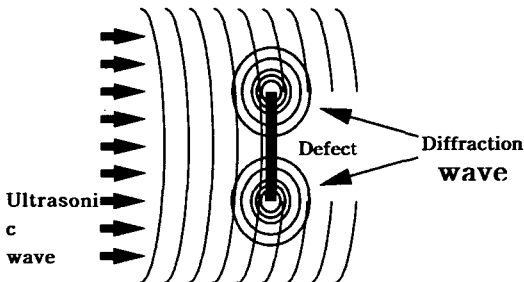
또한 Standard block에 가공된 동일 노치에 대하여 일반적인 General TOFD 탐촉자를 이용한 검사방법과 Delta TOFD 탐촉자를 이용한 검사방법으로 Data를 취득, 평가 및 분석을 하고 그 결과

를 비교하여 General TOFD 방법으로 검사 시 발생하는 검사 제한부위에 대한 보완검사법으로 고려되고 있는 Delta TOFD 검사법의 타당성을 확인하고, 발전소 현장에서 이루어지는 검사에 활용하고자 한다.

2.기본이론

제1절 초음파 회절파

초음파가 피검사체 매질 내를 진행하다가 가늘고 기다란 크랙과 같은 불연속부에 부딪히면 불연속면에 부딪힌 초음파는 대부분 반사되어 나가고, 불연속부의 끝부분(Tip)에 부딪힌 초음파는 호수물에 돌이 떨어졌을 때 퍼져나가는 물결 모양의 형태로 초기 입사된 초음파와 같은 면을 따라서 퍼져 나가는데 이러한 Cylindrical wave를 회절파(Diffraction wave)라 한다.



<Fig.2> 초음파 회절파 발생 개념도

회절파는 같은 강도로 같은 깊이에 입사되었을 경우 코너에서 반사되는 반사파에 비해 초기 음압강도의 약 3% 정도인 약 30dB 낮은, Amplitude의 비교적 매우 낮은 진폭을 가지고 있어 검사에 쉽게 사용하기에는 어려움이 있으나 불연속부의 끝부분에서 전 방향으로 방사되어 나간다는 특징으로 결함의 크기측정에 매우 유용하게 이용된다.

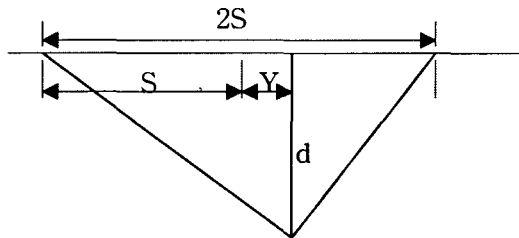
제2절 TOFD Technique

TOFD(Time Of Flight Diffraction) Technique는 초음파와 재료, 형상이나 결함 등 연속성이 끊기는 불연속부(discontinuity) 팁과의 상호 시간적인 연관관계를 이용하여 불연속부의 위치나 크기

를 계산해내는 비파괴 검사법으로 이러한 상호 연관관계는 넓은 각도범위에 걸친 회절파의 발생에 의한 결과이다. 회절파의 검출은 결함의 존재를 찾아 낼 수 있음을 의미한다. 측정된 신호의 진행 시간(Time of Flight)은 해당 매질에서의 음속과 삼각함수를 이용하여 바로 결함의 깊이로 변환할 수 있으며, 이렇게 함으로서 결함의 크기(깊이)측정이 가능해지는 것이다. 다음의 식은 TOFD Technique에서 확인된 지시로부터 깊이측정에 사용되는 일반적인 공식이다.

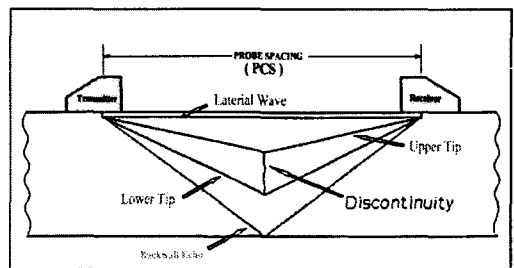
$$CT = \{d^2 + (S-Y)^2\}^{1/2} + \{d^2 + (S+Y)^2\}^{1/2}$$

C = Velocity, T = Time in μs



<Fig.3> TOFD Technique의 기본 원리

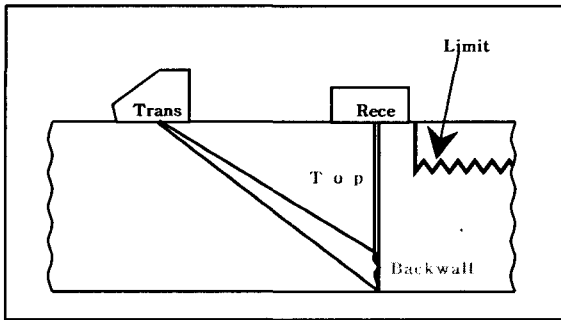
결함의 위치나 크기값은 항상 회절된 신호의 Time of Flight로부터 결정된다. 따라서 신호의 진폭은 크기측정에 사용되지 않는다. TOFD Technique의 기본적인 구성은 Fig. 4에서 보는바와 같이 초음파 송신용 탐촉자와 수신용 탐촉자가 분리되어 있다는 것이다.



<Fig.4> TOFD Technique 기본구성

제3절 Delta TOFD Technique

TOFD Technique는 호수에 돌이 떨어졌을 때 물결이 퍼져나가는 것처럼 초음파 회절파가 모든 방향으로 퍼져나간다는 성질에 기초하여 고안된 방법이다. 일반적인 TOFD 기법의 경우 송신용 탐촉자와 수신용 탐촉자 그리고 검사영역의 기준이 되는 Backwall 부분이 이등변삼각형 형태로 연결되어 있어 검사부위의 제한조건에 의해 수신용 탐촉자가 특정 영역으로 이동할 수 없을 경우 Backwall 기준점과 수신용 탐촉자 사이에 검사 사각지대가 생길 수 있다. Delta형 TOFD 기법은 이러한 검사 제한조건을 해결하기 위한 방법으로 수신용 TOFD Probe를 Backwall 신호의 직상부에 설치하여 Backwall Echo 또는 결함의 Tip으로부터 오는 회절신호를 수신하여 검사하는 방법이다. 이 경우 수신용 탐촉자는 검사 대상부위 직상부에 수직으로 설치되어 표면의 Lateral wave를 수신할 수 없으므로 검출된 지시의 깊이 측정 시 기준점이 되는 Lateral wave를 Backwall echo로부터 피 검사체 두께만큼 역산하여 가상의 Lateral wave를 설정하여야 하는 등의 어려움이 있지만 일반적인 TOFD 기법으로 검사 시 생기는 사각지대를 보완할 수 있다는 면에서 그 활용이 적극적으로 검토되고 있다.



<Fig.5> Delta TOFD Technique 개념도

3. 실험 및 분석

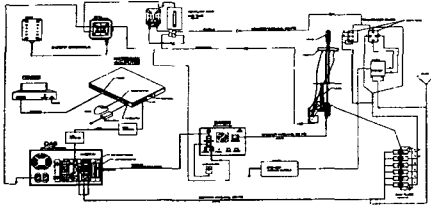
제1절 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치 구성도는 Fig. 6과 같다. 주요 구성품 중 Data 취득 및 평가에 사용

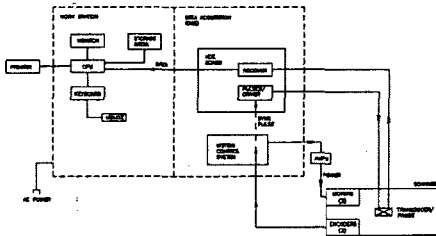
된 3차원 초음파 Imaging System은 미국 Westinghouse- AMDATA 사의 INTRASPECT (초음파 및 와전류의 발진 및 신호수집/분석평가 장비의 상호 명)를 사용하였으며, 탐촉자 구동을 위한 Scanner는 동사의 7010 Robotic Scanning System을 그리고 탐촉자는 수직과 수평 2조의 TOFD Channel을 가지고 있는 Open Housing용 General TOFD Probe와 General TOFD Channel과 반대편에 1조의 수직형 Delta TOFD Channel을 추가로 가지고 있는 Delta TOFD Probe를 사용하였다. 시편 블록은 원자로헤드 관통관과 동일 재질 및 형상에 EDM Notch를 가공한 2개의 Standard block 1과 Standard block 2를 사용하였으며, 그 외에 탐촉자를 주어진 각도와 속도로 이동시켜 주는 GA1002 Motion Controller를 사용하여 실험을 하였다. 각 장비별 세부사양 및 특징은 다음과 같다.

I. INTRASPECT Data Acquisition and Analysis System

본 실험의 Data 취득 및 평가를 위해서 미국 Westinghouse사의 INTRASPECT Version 6.10을 사용하였다. 이 시스템은 Data Acquisition and Analysis workstation, DAS, Motion Control System (MCS) 그리고 Scanner 등 크게 4가지 주요 Subsystem으로 구성되어 있으며, 초음파 Pulser와 Scanner를 구동하기 위한 모든 정보를 Laptop Computer에서 사용자가 지정하므로 사용이 간편하다. 특히 Data Acquisition Laptop은 사용자에게 장비를 구동하기 위한 모든 파라미터에 대한 사용자 그래픽 인터페이스를 제공하고 DAS 시스템과의 통신을 통하여 위치 및 파형을 수신하며, 데이터 평가용 소프트웨어는 A-Scan, B-Scan, B'-Scan 그리고 C-Scan Color Graphic 이미지를 제공하여 신호평가자에게 많은 양의 정보를 제공할 수 있도록 구성되어 있다. 이 시스템은 Pulse-echo, Pitch-catch 및 Through transmission 등 초음파 검사와 관련한 모든 기법에 98dB Gain range로 사용할 수 있으며, 3축 Scanner를 제어할 수 있고, RF waveform을 Digitization화 할 수 있어 모든 검사결과가 디지털로 처리되며, DAS와 Data Acquisition Laptop 간에 LAN cable을 이용하여 모든 파라미터를 Down load 하므로 DAS와 Data Acquisition Laptop 간의 거리제한이 없다.



<Fig.6> 검사시스템 구성도



<Fig.7> INTRASPECT 주요 Subsystem 구성 Block Diagram

Data Acquisition Workstation 은 LAN Cable로 DAS와 연결되어 있으며, DAS는 다시 DC servo motor motion controller(GA-1002)와 연결된다. GA-1002는 Scanner를 구동하기 위한 시스템이므로 Umbilical cable에서 직접 DAS로 연결되어 DAS 시스템내의 Pulser/Receiver로 신호를 송수신 한다. Data Acquisition and Analysis workstation 으로는 사용 편의성을 위하여 Laptop Computer를 사용하였다.



<Fig.8> DAS and Data Acquisition/Analysis Computer

DAS는 Microprocessor와 Static Hard Disc를 장착하고 Scanner의 특정 위치에 해당하는 파형을 취득하기 위한 시스템이다. 모든 검사 파라미터는 INTRASPECT Data Analysis software에 입력되어지며, 입력된 파라미터는 다시 DAS로 다운로드되며, DAS는 이 파라미터를 이용하여 특정지역의 데이터를 취득하기 위한 Pulser와 Scanner를 구동

하는데 사용된다.

본 시스템에는 3개의 UT board가 설치되어 있으며, 각 각의 보드에는 2개의 채널이 설치되어 있다. 또한 각 채널에는 2개의 BNC Connector가 있어 하나의 Connector는 Pulser/Receiver 이며, 다른 하나의 Connector는 Receiver 만을 담당하도록 구성되어있다. 일반적인 Pulse/Echo 검사와 TOFD 검사에 따라 적절한 Connector를 선택하여 검사를 하도록 되어있다.

GA 1002 MCS(Motion Control System)는 INTRASPECT에서 사용되는 여러 가지 종류의 스캐너를 구동하고 제어할 수 있는 시스템이다. Data Acquisition 시스템으로부터 주사영역에 대한 정보(주사 시작점, 주사 종료 점, 속도, 주사간격 등)를 MCS로 다운받아 스캐너를 구동한다. 특정한 면적을 주사하고자 할 경우 X와 Y축의 주사 간격에 의하여 그리드로 나누어지며, 그리드 포인트에 스캐너가 도착하면 Sync Pulse 가 발생되어 그 지점에서 신호가 취득된다. MCS 시스템에는 GA 1002 Servo Amplifier가 포함되어 있으며, GA 1002는 2축의 DC Servo motor를 구동할 수 있는 증폭기가 있다. 이 증폭기가 각각의 서보 모터에 대한 전원을 공급하여준다. 또한 Optical Encoder가 각 축에 설치되어 있어 위치에 대한 정보를 Feedback 하여 Servo motor와 폐회로를 구성하면서 주사위치를 이동한다.

II. 7010 Robotic Scanner System

7010 Robotic scanner system은 DC 서보 모터로 구동되는 2개의 축으로 이루어져 있으며, X축은 원주방향 움직임으로 회전 제한은 없으나 Cable 꼬임방지를 위하여 380°까지만 회전할 수 있도록 회전축 Hardstop을 설치하였다. 최대 회전속도는 초당 90°이며, 정확도는 $\pm 0.25^\circ$ 이고 최소 Scan 증가분은 0.25° 이다. Y축은 상하방향 움직임으로 약 500mm의 Stroke을 가지며, 최대 속도는 초당 6", 위치 정확도는 $\pm 0.01"$, 최소 Scan 증가분은 $0.005"$ 이다. 이 Scanner는 영하 10℃부터 85℃, 상대습도 95%에서도 동작할 수 있



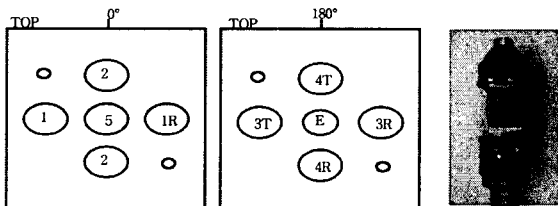
<Fig.9> 7010 Scanner

으며, 원자력발전소 적용을 위해 최고 10R/hr의 방사선 환경 조건에서도 동작할 수 있다.

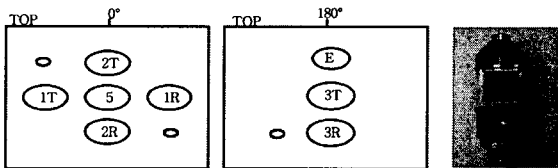
III. TOFD Probe

본 연구를 위해서 미국 Westinghouse 사에서 Thermal Sleeve가 설치되어 있지 않은 원자로 헤드 관통관 검사용으로 제작한 2가지 종류의 탐촉자를 사용하였다.

Standard block에 가공된 Notch 방향과 TOFD 탐촉자 초음파 주사 방향과의 상관관계 정립을 위한 실험Data 수집에 사용한 탐촉자는 수평 주사 TOFD 탐촉자를 Channel 1, 수직주사 TOFD 탐촉자를 Channel 2로 하는 General TOFD 탐촉자를 사용하였으며, Nominal Probe Center Separation은 24mm, 굴절각은 $55 \pm 5^\circ$ 를 사용하였다. 각 Transducer 배열 및 실제 탐촉자 사진은 Fig. 10와 같으며, 각 Transducer와 관련된 세부사양은 표 1과 같다. General TOFD 탐촉자에는 두께가 두꺼운 피검사체의 검사를 위해 Focusing이 조절된 Channel 3, 4 TOFD Transducer와 Leak Path 검사를 위한 0° 종파 탐촉자 그리고 표면검사를 위한 ECT 검사용 센서가 추가로 설치되어 있지만 본 연구목적과 상관없는 Data는 평가분석을 하지 않았다.



<Fig.10> General TOFD 탐촉자



<Fig.11> Delta TOFD 탐촉자

또한 일반적인 수직주사 TOFD 탐촉자 배열을

변화시켜 검사 제한부위에 대한 보완검사를 위해 검토되고 있는 Delta TOFD 검사법의 타당성 확인을 위한 Data 취득을 위해서는 General TOFD 탐촉자에 수직형 Delta TOFD Channel 3을 추가로 설치한 Delta TOFD 탐촉자를 사용하였다. 각 Transducer 배열 및 실제 탐촉자 사진은 Fig. 11과 같으며, 각 Transducer 세부사양은 표 2와 같다

<표 1> General TOFD 탐촉자 세부사양

Channel	Probe Cable	Mode	Orientation	Probe Frequency	Probe Dia.
1	1T	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
	1R	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
2	2T	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
	2R	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
3	3T	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
	3R	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
4	4T	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
	4R	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
5	5	Zero	Radial	2.25 MHz	0.25"
ET	A&B	X-Point	N/A	100/400 KHz	0.125"

<표 2> Delta TOFD 탐촉자 세부사양

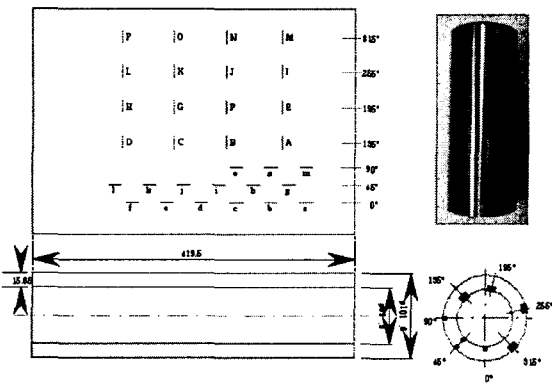
Channel	Probe Cable	Mode	Orientation	Probe Frequency	Probe Dia.
1	1T	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
	1R	TOFD	Circ. Shooting	5 MHz	0.25"
2	2T	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
	2R	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
3	3T	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
	3R	TOFD	Axial Shooting	5 MHz	0.25"
5	5	Zero	Radial	2.25 MHz	0.25"
ET	A&B	X-Point	N/A	100/400 KHz	0.125"

IV. Standard Block

본 연구를 위해서 2가지 종류의 Standard block을 사용하였다. Block의 재질은 현재 세계적으로 원자로 헤드 관통관 재질로 사용 중인 Inconel Alloy 600 (ASME SB-166)을 사용하였으며, Block의 표면은 RMS 125로 처리되었다. 각각

의 시편에는 외면에서 시작된 원주방향(OD, Circumferential) Notch, 외면에서 시작된 축방향(OD, Axial) Notch, 내면에서 시작된 원주방향(ID, Circumferential) Notch, 내면에서 시작된 축방향(ID, Axial) Notch 등 4가지 종류의 Notch가 다양한 깊이로 가공되었다. 시편에 가공된 Notch는 CIP (Cold-Isostatic Processing) 기술을 사용하여 가공되었다. 이 기술은 매우 높은 고압을 사용하여 시편에 가공된 EDM Notch를 가압함으로써 Notch Tip 부분의 Volume을 감소시키고 날카롭게 만드는 것이다. 이렇게 하면 초음파에 대한 반응특성이 PWSCC의 그것과 매우 유사하게 되는 것으로 알려져 있다.

Notch 방향과 TOFD 탐촉자 초음파 주사 방향과의 상관관계 정립을 위한 실험Data 수집에는 Standard block 1을 사용하였으며, Fig. 12에서 보는바와 같이 이 Block에는 축방향으로 깊이 1mm ~ 관통까지 8종류의 ID Notch와 깊이 1mm ~ 14mm 까지 7종류의 OD Notch가, 그리고 원주방향으로는 깊이 1mm ~ 관통까지 각각 8종류의 ID, OD Notch가 가공되어있다.



<Fig.12> Standard Block #1 도면

제2절 실험 방법

TOFD 기법을 활용하여 원자로헤드 관통관에 발생할 수 있는 결함의 검출(Detection) 및 크기측정(Through wall depth sizing)이 가능한 한계를 알아보고 TOFD 탐촉자의 초음파 주사방향과 검출대상 불연속부 방향간의 상관관계 정립과 또 새로이 고안되는 Delta형 TOFD 탐촉자의 결함검출 및 크기측정에 관한 신뢰성을 검토하고자 하는 본

연구목적 달성을 위하여 다음과 같은 실험을 반복하였다.

TOFD 기법의 결함 검출 및 크기측정 한계와 TOFD 탐촉자의 주사방향과 결함의 방향과의 상관성 연구를 위하여 두께 15.85mm, 길이 419.5mm의 Inconel 600재질의 튜브 시편에 깊이 1mm부터 관통까지 8가지 종류의 ID open EDM Notch 및 OD open EDM Notch를 가공하였으며, 원주방향으로 배열된 TOFD 탐촉자(Ch #1)와 축방향으로 배열된 TOFD 탐촉자(Ch #2)로 상기의 시편을 Scanning 하여 취득된 Data를 INTRASPECT Data Analysis System으로 분석 평가하였다. 실험에 사용된 탐촉자의 Nominal Probe Center Separation은 24mm, 굴절각은 55±5°이었으며, Material Velocity는 5.52mm/μs, Scan direction 축방향, Scan interval 0.04", Index direction 원주방향, Index 간격은 1°로 설정하였다. 최적의 실험 결과 도출을 위하여 동일한 Scan을 반복 하였으며, 취득된 Data 중 최상의 Data를 대상으로 평가 및 분석을 하였다. PCS 값은 최적의 평가결과 도출을 위해 Block 두께를 기준으로 적절히 조절하였다. 실험을 통하여 분석 평가된 결과는 Fig.14, Fig.15와 같다.

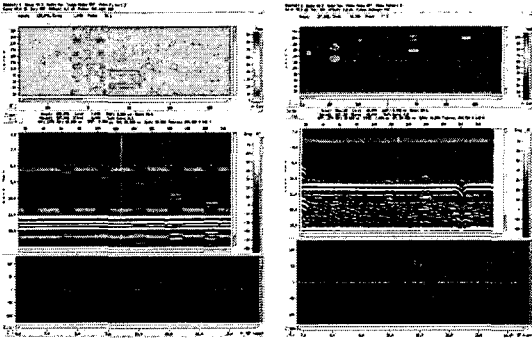
본 실험에서 분석된 Data는 Standard Block 1의 경우 Axial Notch 15개 및 Circumferential Notch 16개 등 모두 31개의 Notch에 대하여 Channel #1, #2 등 모두 62개의 Data를 평가 분석하였다.

제3절 실험 Data 평가 및 분석

실험을 통하여 취득된 Data를 INTRASPECT 3차원 Imaging System의 평가 Software를 활용하여 평가, 분석한 결과는 다음과 같다.

I. 평가 결과의 정확도 확인 및 교정을 위한 시편두께 측정

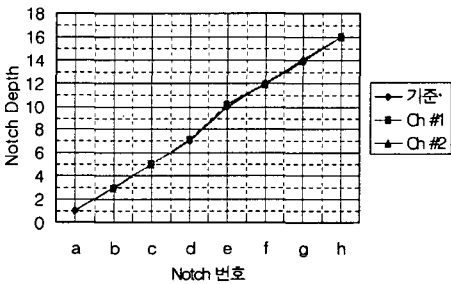
실험을 통하여 취득된 Data의 평가 결과 값에 대한 정확도 확인 및 확보를 위해서 알고 있는 시편 두께에 대한 측정 및 교정을 실시하였다. 교정 완료 후 측정된 결과 Standard Block 1의 두께는 15.85mm, Standard Block 2의 두께는 16.80mm로 본 시험설비의 측정결과 값에 대한 신뢰도를 확인할 수 있었다. 다음의 Fig. 13은 Standard Block 1과 2에 대한 두께측정 실험Data의 평가 화면이다.



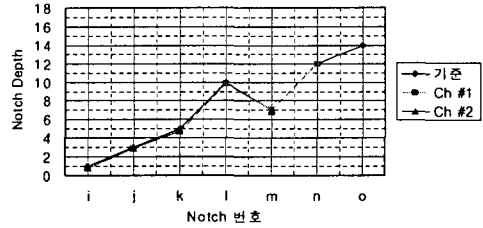
<Fig.13> Standard Block 1 and 2 Depth 측정

II. Axial 방향 Notch와 TOFD 주사방향과의 상관관계 평가/분석

Axial 방향 Notch에 대하여 Notch 방향과 TOFD 탐촉자 주사방향과의 상관관계 분석을 위하여 Block 1 Axial 방향 Notch에 대하여 Notch 방향과 수직인 주사방향을 가지는 TOFD Channel #1을 주 탐촉자로 사용하고, 비교평가를 위하여 Notch 방향과 동일한 주사방향을 가지는 TOFD Channel #2를 보조 탐촉자로 하여 실험을 하였다. 실험 대상은 Standard Block 1에 있는 Axial 방향 Notch로 각 Notch는 내면에서 시작되어 깊이 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 10mm, 12mm, 14mm 및 관통된 총 8가지의 ID Open Notch와 외면에서 시작되어 깊이 1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 7mm, 12mm 그리고 14mm 등 총 7가지의 OD Open Notch에 대하여 실험을 하였다. 실험을 통하여 취득된 Data를 평가, 분석한 결과 값은 다음의 그래프와 같다.



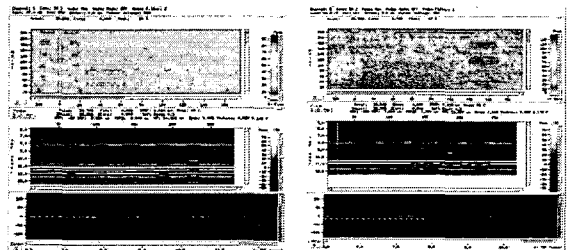
<Fig.14> Standard Block 1 Axial 방향 ID Notch Depth Data 비교



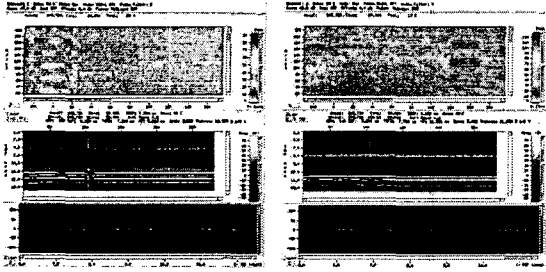
<Fig.15> Standard Block 1 Axial 방향 OD Notch Depth Data 비교

1. Notch 신호 검출

실험을 통해 취득된 Data의 평가결과 주 탐촉자인 Channel #1 TOFD 검사로는 ID 및 OD Notch 구분 없이 모든 Notch의 검출이 가능하였다. 깊이가 큰 Notch는 B-Scan 화면에서 Notch Tip으로부터의 회절신호가 분명하여 불연속부(Notch)의 존재를 분명하게 확인할 수 있었다. 깊이가 낮은 미세 Notch의 경우는 B-Scan에서 Notch Tip으로부터의 회절신호를 확인할 수 없었으나 ID Notch의 경우는 Lateral wave, OD Notch의 경우는 Backwall echo 신호의 Breaking 으로부터 불연속부(Notch)의 존재를 확인할 수 있었다. 그러나 보조탐촉자로 사용한 Channel #2 TOFD 검사에서는 깊이 1mm의 ID Notch는 검출이 불가하였다. 이는 표면의 강한 Lateral wave가 Notch Tip에서 발생한 미세한 회절파를 Masking 한 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 16은 깊이 1mm ID Notch의 주 탐촉자(Ch #1)와 보조 탐촉자(Ch #2) 신호를 보여준다.



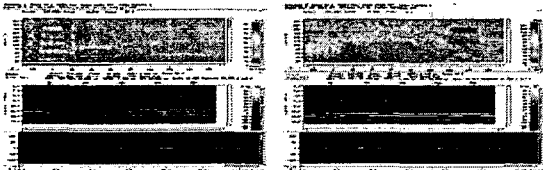
<Fig.16> Block1 ID 1mm Axial Notch a의 Ch #1, Ch #2 신호



<Fig.17> Block1 OD 14mm Axial Notch o 의 Ch #1, Ch #2 신호

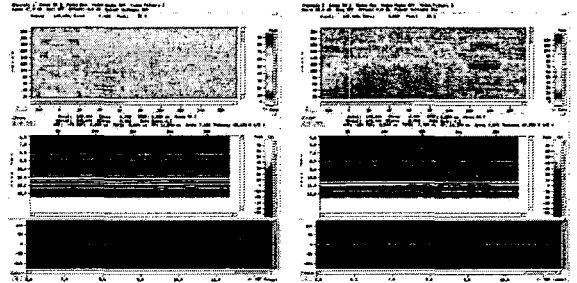
2. 검출된 Axial Notch 의 크기(깊이) 평가

검출된 Notch 신호에 대한 Depth Sizing을 실시한 결과 주 탐촉자인 Channel #1 TOFD 검사에서 검출된 Notch 신호 중 Notch Tip이 내면(탐촉자가 위치한 면)쪽에서 1mm ~ 2mm 이내의 위치에 존재할 경우 Sizing을 할 수 없었다. 즉, 깊이 1mm의 ID Notch와 깊이 14mm의 OD Notch의 경우 검출은 확인할 수 있었으나, 검출된 신호에 대한 Sizing을 할 수 없었다. 깊이 14mm OD Notch는 Standard Block의 두께가 15.85mm 이므로 Notch Tip이 내면으로부터 1.85mm 위치에 존재하게 된다. 그러나 Notch의 Tip이 외면으로부터 1.85mm에 위치하는 ID 14mm Notch와 Notch Tip이 외면으로부터 1mm에 위치하는 OD 1mm Notch의 경우 비교적 정확한 Sizing을 할 수 있었다. 이것은 Notch Tip이 탐촉자 가까이 내면 쪽에 위치하는 경우 강한 Lateral wave의 영향으로 Notch Tip으로부터의 미세한 회절파가 Masking 되는 반면 Notch Tip이 내면에서 멀어지는 경우 매우 미세한 회절파도 검출 및 Sizing 할 수 있었으며, Backwall echo의 영향은 Lateral wave에 비하여 상대적으로 미약하여 외면에 근접한 Notch Tip으로부터의 회절파에 대한 Sizing에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



<Fig.18> Block1 OD 1mm Axial Notch i 의 Ch #1, Ch #2 신호

반면 보조탐촉자로 사용한 Channel #2 TOFD 검사에서는 깊이 7mm까지의 ID Notch와 깊이 10mm 이상 되는 OD Notch에 대한 Sizing이 불가하였다. 깊이 10mm OD Notch는 Notch Tip이 내면으로부터 5.85mm에 위치하게 된다. 이는 Notch의 방향과 TOFD 탐촉자의 주사방향이 일치하는 경우 Notch Tip으로부터의 회절과 신호가 주변 Noise와 구분하기 힘들 정도로 매우 약하여 정확한 Sizing을 할 수 없는 것으로 판단된다. 즉 보조 탐촉자는 Detection에서는 주 탐촉자 못잖은 성능을 가지나 Depth Sizing에서는 큰 도움이 되지 못하는 것으로 판단된다. 다음의 그림은 깊이 7mm의 ID Notch 신호와 깊이 10mm의 OD Notch 신호로 주 탐촉자에서는 신호가 분명하여 정확한 Sizing이 가능하지만 보조 탐촉자에서는 검출은 가능하지만 Sizing은 불가한 신호의 모습이다.

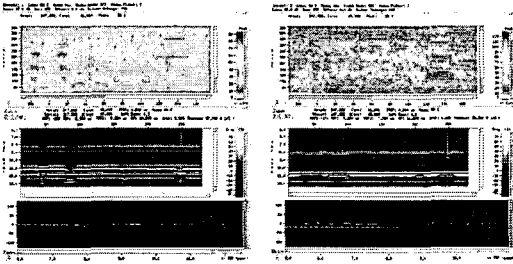


<Fig.19> Block1 ID 7mm Axial Notch d 의 Ch #1, Ch #2 신호

III. Circumferential 방향 Notch와 TOFD

주사방향과의 상관관계 평가/분석

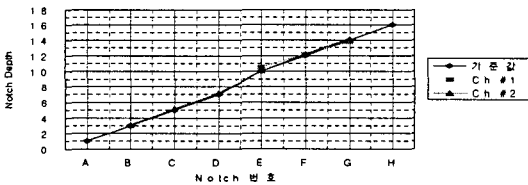
Circumferential 방향 Notch에 대한 Notch 방향과 TOFD 탐촉자 주사방향과의 상관관계 분석을 위하여 Block 1 Circ. 방향 Notch에 대하여 Notch 방향과 수직인 주사방향을 가지는 TOFD Channel #2를 주 탐촉자로 사용하고, 비교평가를 위하여 Notch 방향과 동일한 주사방향을 가지는 TOFD Channel #1을 보조 탐촉자로 하여 실험을 하였다. 실험 대상은 Standard Block 1에 있는 Circumferential 방향 Notch로 각각의 Notch는 내면과 외면에서 시작되어 깊이 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 10mm, 12mm, 14mm 및 관통된 내·외면 각각 8개씩 총 16가지의 ID Open Notch와 OD Open Notch에 대하여 실험을 하였다. 실험을 통하여 취득된 Data를 평가한 결과 다음 Fig.21의 그래프와 같다.



<Fig.20> Block1 OD 10mm Axial Notch 1의 Ch #1, Ch #2 신호

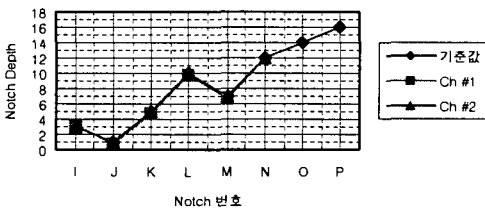
1. Notch 신호 검출

실험을 통해 취득된 Data의 평가결과 주 탐촉자인 Channel #2 TOFD 검사로는 ID 및 OD Notch 구분 없이 모든 Notch의 검출이 가능하였다. 깊이가 큰 Notch는 B-Scan 화면에서 Notch Tip으로부터의 회절신호가 분명하여 불연속부(Notch)의 존재를 분명하게 확인할 수 있었다. 깊이가



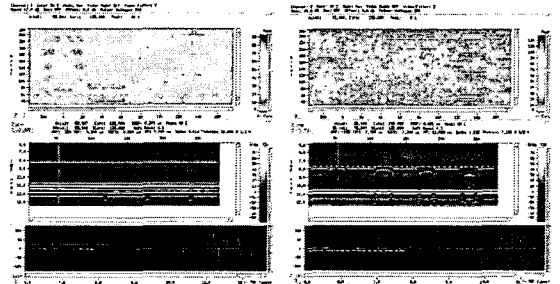
<Fig.21> Standard Block 1 Circumferential ID Notch Depth Data 비교

낮은 미세 Notch의 경우는 B-Scan에서 Notch Tip으로부터의 회절신호를 확인할 수 없었으나 ID Notch의 경우는 Lateral wave, OD Notch의 경우는 Backwall echo 신호의 Breaking으로부터 불연속부(Notch)의 존재를 확인할 수 있었다. 그리고 Axial 방향 Notch에 대한 실험결과와 달리



<Fig.22> Standard Block 1 Circumferential Notch Depth Data 비교

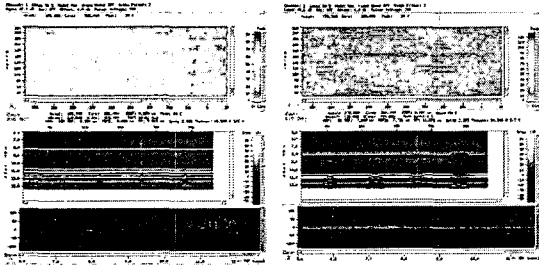
Circumferential Notch에 대해서는 보조탐촉자로 사용한 Channel #2 TOFD 검사에서도 모든 Notch를 검출할 수 있었다. 이는 원주방향 주사 시 회절파의 신호가 축방향 주사에 비하여 좀 더 강해서 Lateral wave와 구분이 가능했던 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 23은 깊이 1mm ID Notch의 보조 탐촉자(Ch #1)와 주 탐촉자(Ch #2) 신호를 보여준다.



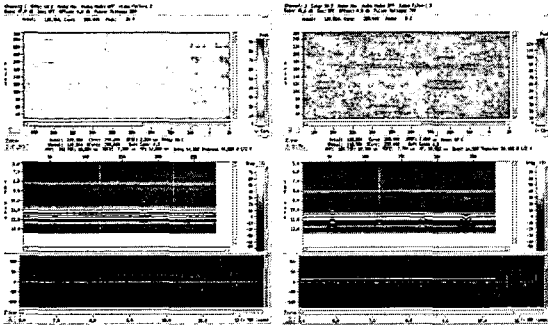
<Fig.23> Block1 ID 1mm Circumferential Notch A의 Ch #1, Ch #2 신호

2. 검출된 Circumferential Notch의 크기(깊이) 평가

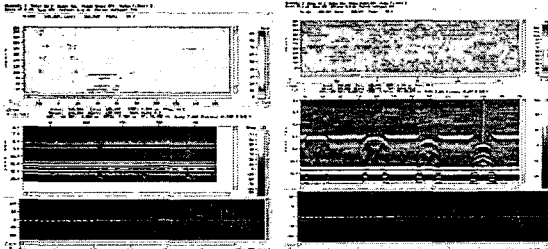
검출된 Notch 신호에 대한 Depth Sizing을 실시한 결과 주 탐촉자인 Channel #2 TOFD 검사에서 검출된 Notch 신호 중 Notch Tip이 내면(탐촉자가 위치한 면)쪽에서 1mm ~ 2mm 이내의 위치에 존재할 경우 Sizing을 할 수 없었다. 즉, 깊이 1mm의 ID Notch와 깊이 14mm의 OD Notch의 경우 검출은 확인할 수 있었으나, 검출된 신호에 대한 Sizing을 할 수 없었다. 깊이 14mm OD Notch는 Standard Block의 두께가 15.85mm 이므로 Notch Tip이 내면으로부터 1.85mm 위치에 존재하게 된다. 그러나 Notch의 Tip이 외면으로부터 1.85mm에 위치하는 ID 14mm Notch와 Notch Tip이 외면으로부터 1mm에 위치하는 OD 1mm Notch의 경우 비교적 정확한 Sizing을 할 수 있었다. 이것은 Notch Tip이 탐촉자 가까이 내면 쪽에 위치하는 경우 강한 Lateral wave의 영향으로 Notch Tip으로부터의 미세한 회절파가 Masking 되는 반면 Notch Tip이 내면에서 멀어지는 경우 매우 미세한 회절파도 검출 및 Sizing 할 수 있었으며, Backwall echo의 영향은 Lateral wave에 비하여 상대적으로 미약하여 외면에 근접한 Notch Tip으로부터의 회절파에



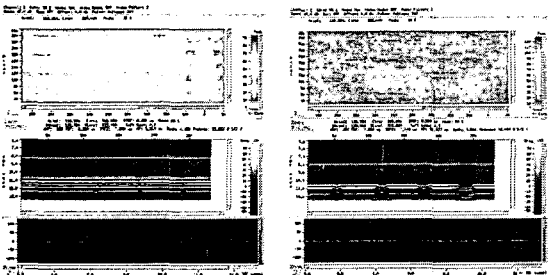
<Fig.24> Block1 OD 14mm Circumferential Notch O의 Ch #1, Ch #2 신호



<Fig.25> Block1 OD 1mm Circumferential Notch J의 Ch #1, Ch #2 신호



<Fig.26> Block1 ID 7mm Circumferential Notch D의 Ch #1, Ch #2 신호



<Fig.27> Block1 OD 12mm Circumferential Notch N의 Ch #1, Ch #2 신호

대한 Sizing에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 반면 보조탐촉자로 사용한 Channel #1 TOFD 검사에서는 깊이 7mm까지의 ID Notch와 깊이 12mm 이상 되는 OD Notch에 대한 Sizing이 불가하였다. 깊이 12mm OD Notch는 Notch Tip이 내면으로부터 3.85mm에 위치하게 된다. 이는 Notch의 방향과 TOFD 탐촉자의 주사방향이 일치하는 경우 Notch Tip으로부터의 회절과 신호가 주변 Noise와 구분하기 힘들 정도로 매우 약하여 정확한 Sizing을 할 수 없는 것으로 판단된다. 즉 보조 탐촉자는 Detection에서는 주 탐촉자 못잖은 성능을 가지나 Depth Sizing에서는 큰 도움이 되지 못하는 것으로 판단된다. 다음의 Fig.26, Fig.27은 깊이 7mm의 ID Notch 신호와 깊이 12mm의 OD Notch 신호로 주 탐촉자에서는 신호가 분명하여 정확한 Sizing이 가능하지만 보조 탐촉자에서는 검출은 가능하지만 Sizing은 불가한 신호의 모습이다.

4.결 론

본 연구를 통해 원자로헤드 관통관의 결함 방향이 초음파 주사방향과 직각인 경우와 같은 방향인 Standard Block 1의 경우 각각에 대해 결함의 존재여부 검출과 깊이측정이 가능한 결함의 최소 크기를 다음과 같이 확인할 수 있었다. 또한 일반적인 TOFD 방법에 비해 Delta TOFD 방법의 결함검출 및 깊이측정 한계를 확인할 수 있었다.

1. 결함의 존재여부 검출에 관해서는 초음파 주사방향과 결함 방향이 직각으로 교차할 경우 깊이 1mm 이상 되는 모든 결함을 검출할 수 있으며, 주사방향과 결함 방향이 같을 경우 3mm 이상 되는 모든 결함은 검출할 수 있었다.
2. 결함의 깊이측정에 관해서는 초음파 주사방향과 결함방향이 직각으로 교차할 경우 3mm 이상 되는 결함은 정확한 깊이측정을 할 수 있었으며, 초음파 주사방향과 결함의 방향이 같은 방향일 경우 9mm 이상의 결함은 모두 정확한 깊이측정이 가능함을 확인하였다. 따라서 결함의 깊이측정값은 결함의 방향과 탐촉자의 초음파

- 주사방향의 상관관계에 따라 밀접한 영향이 있음을 확인하였다.
3. 검출 및 평가된 결함측정값을 분석한 결과 초음파 회절파를 이용하여 측정된 결함의 깊이 값은 대부분 실제 깊이가 값과 최대 0.4mm 이내의 오차를 가지고 있어 매우 높은 신뢰도를 가지고 있음을 알 수 있었다.
 4. Delta TOFD 탐촉자를 사용할 경우 결함 검출에 대해서는 초음파 주사방향과 결함 방향이 직각일 경우 깊이가 1mm 이상 되는 모든 결함을 검출할 수 있었으나, 주사방향과 결함 방향이 같을 경우 깊이에 상관없이 결함을 검출할 수 없었다. 또한 깊이가 측정의 경우 외면에서 시작된 결함의 깊이가 측정값은 일반적인 TOFD 탐촉자와 유사하나 내면에서 시작된 결함에 대해서는 깊이측정을 할 수 없었다. 따라서 Delta TOFD 탐촉자는 초음파 주사방향에 수직인 결함의 검출 및 초음파 주사방향에 수직이고 탐촉자가 접하는 면에 연결되어 있지 않는 결함의 크기측정에 한해서만 제한적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. D. Coaster, "General Time of Flight Diffraction Training Course", Rev 0, TRC, 1994
2. Han-Jong Kim, "Overview of Inservice Inspection Status and Experience of Reactor Vessel Head Penetration Inspection in Korea" WANO, July, 1996
3. "INTRASPECT Ultrasonic and Eddy current Inspection System Operations Manual", Ver. 6.10 Software, Westinghouse Electric Co., 2004
4. J. C. Drury, "Ultrasonic Flaw Detection for Technicians". Ninth Impression, Dinefwr Press, 1997
5. J. G. Bodensteiner, G. A. Mulley Jr., B. C. Dwyer, "NRC's Regulation of Davis-Besse Regarding Damage to the Reactor Vessel Head", US NRC, 2002
6. Joseph L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press, 2000
7. P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook", Second Edition, Vol. 7, ASNT, 1991
8. Russ. Devlin, "INTRASPECT Ultrasonic Procedure for Inspection of Reactor Vessel Head Penetrations", Rev 7, Westinghouse Electric Company, 2003
9. Russ Devlin, "INTRASPECT UT Analysis Guidelines", Rev 5, Westinghouse Electric Company, 2003
10. US NRC Bulletin 2001-01, "Circumferential Cracking of Reactor Pressure Vessel Head Penetration Nozzles", August, 2001
11. US NRC Bulletin 2002-01, "Reactor Pressure Vessel Head Degradation and Reactor Coolant Pressure Boundary Integrity", March, 2002
12. US NRC Bulletin 2002-02, "Reactor Pressure Vessel Head and Vessel Head Penetration Nozzle Inspection Program", August, 2002
13. US NRC Order EA 03-009, " Issuance of First Revised NRC Order (EA-03-009) Establishing Interim Inspection Requirements for Reactor Pressure Vessel Heads at PWR", Feb, 2004