

## 원자로 상부 헤드 관통관 TOFD 신호 시뮬레이션

### Simulation of Time of Flight Diffraction Signals for Reactor Vessel Head Penetrations

이태훈\*<sup>†</sup>, 김용식\*, 이정석\*

Tae-Hun Lee\*<sup>†</sup>, Young-Sik Kim\* and Jeong-Seok Lee\*

**초 록** 비파괴검사 분야에 대한 시뮬레이션은 다양한 결함에 대한 신호의 예측과 검사 절차 개발에 사용되어진다. 특히 비파괴검사 전용 시뮬레이션 툴인 CIVA는 정확도가 높고 빠른 계산이 가능하며, 비파괴평가 기술과 동일한 형태의 화면 표시와 시각적으로 개선된 3차원 그래픽 유저 인터페이스를 제공한다. CIVA 소프트웨어 개발자가 내부적으로 타당성 검증을 시행하겠지만, 사용 이전에 소프트웨어의 정확도를 평가하는 독립적인 유효성 검증 연구가 필요하다. 이러한 목적으로 이번 연구에서는 CIVA를 이용하여 원자로 상부 헤드 관통관 검사에 사용되는 보정시험편에 대하여 TOFD 신호를 시뮬레이션하고, 실제 검사 신호와 비교하여 시뮬레이션 신호의 정확도와 적용 범위에 대하여 검증하였다. 종합적으로, A-scan 신호, B-scan 이미지, 깊이 측정 측면에서 CIVA 시뮬레이션 결과와 실험 결과 간에 전반적으로 일치함을 보였다.

**주요용어:** 초음파검사, Time of Flight Diffraction, 원자로 상부 헤드 관통관, 실험적 검증, 시뮬레이션

**Abstract** The simulation of nondestructive testing has been used in the prediction of the signal characteristics of various defects and in the development of the procedures. CIVA, a simulation tool dedicated to nondestructive testing, has good accuracy and speed, and provides a three-dimensional graphical user interface for improved visualization and familiar data displays consistent with an NDE technique. Even though internal validations have been performed by the CIVA software development specialists, an independent validation study is necessary for the assessment of the accuracy of the software prior to practical use. In this study, time of flight diffraction signals of ultrasonic inspection of a calibration block for reactor vessel head penetrations were simulated using CIVA. The results were compared to the experimentally inspected signals. The accuracy of the simulated signals and the possible range for simulation were verified. It was found that, there is a good agreement between the CIVA simulated and experimental results in the A-scan signal, B-scan image, and measurement of depth.

**Keywords:** Ultrasonic Testing, Time of Flight Diffraction (TOFD), Reactor Vessel Head Penetration, Experimental Validation, Simulation

#### 1. 서 론

비파괴검사 분야에 대한 시뮬레이션은 검사 기법 개발 및 신호 평가에 있어 많은 도움을 줄 수 있다. 결함에 따른 신호의 예측 및 신호 품질의 비교가 가능하고, 다양한 시험 조건들에 따른 신호 변동성의 원인을 확인 및 평가하여 성능에 가장 크게 영향을 미치는 변수를 결정할 수 있다.

또한 검사에 적합한 탐촉자 변수들을 최적화 및 사전 검증할 수 있으며, 실험적으로 조절하기 어려운 여러 변수들의 연구가 가능하여 광범위한 테스트에 따른 시간 및 비용을 절감할 수 있다. 이러한 시뮬레이션을 통해 검사 절차 및 기법 개발이나 시제품을 제작함에 있어 신뢰성을 높일 수 있으며[1,2], 검사에서 발견된 지시에 대한 분석을 위해 활용이 가능하다.

[Received: July 21, 2016, Revised: August 8, 2016, Accepted: August 8, 2016] \*한국수력원자력(주) 중앙연구원

<sup>†</sup>Corresponding Author: KHNP Central Research Institute, Daejeon 34101, Republic of Korea (E-mail: taehun.lee@khnp.co.kr)

© 2016, Korean Society for Nondestructive Testing

본 연구에서는 비파괴검사 전용 시뮬레이터인 CIVACEA(CEA) 10.1 소프트웨어의 초음파 모듈을 이용하여 원자로 상부 헤드 관통관(reactor vessel head penetration, RVHP)의 초음파검사 신호 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에 사용된 CIVACEA는 비파괴검사에 특화된 시뮬레이션 툴로서 초음파(UT), 와전류(ET), 방사선검사(RT)에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 초음파 시뮬레이션 모듈은 Kirchhoff 근사법이나 GTD(geometrical theory of diffraction)을 이용하여 프로브와 결함과의 상호관계를 이용하여 응답신호를 계산하며[3,4], 정확도가 높고 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다. 또한 각 비파괴평가 기술과 동일한 형태의 화면 표시와 시각적으로 개선된 3차원 그래픽 유저 인터페이스(GUI)를 제공하기 때문에 사용자가 손쉽게 빠르게 시뮬레이션 활용이 가능하다.

시뮬레이터의 활용에 있어, 소프트웨어 개발자가 내부적으로 타당성 검증을 시행하겠지만[4,5], 정확한 시뮬레이션을 위해 사용 이전에 여러 검사 조건들에서 소프트웨어의 정확도를 평가하는 독립적인 유효성 검증 연구가 필요하다. 이러한 평가를 위해 가장 선호되는 방법은 이미 알고 있는 결함에 대하여 시뮬레이션 결과와 실제 초음파 신호를 비교 분석하는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 원자로 상부 헤드 관통관 초음파검사에 사용되는 보정시험편에 대하여 초음파검사 신호 시뮬레이션을 수행하고, 실제 검사에서 취득된 A-scan 신호, B-scan 이미지와 깊이 측정값을 비교함으로써 그 정확도를 검증하고 해당 시뮬레이터가 적용 가능한 범위에 대해 검토하고자 하였다.

## 2. 원자로 상부 헤드 관통관 초음파 검사

원자력발전소 원자로 상부 헤드 관통관은 원자로 노심에 반응도를 제어하는 제어봉의 이동 통로로 원자력발전 설비 운영을 위한 핵심요소 중 하나이다. 관통관 모재를 Alloy 600, J-groove 용접부의 용접재를 Alloy 82/182를 사용하는 원자로 상부 헤드 관통관은 300°C 이상의 고온에서 PWSCC(primary water stress corrosion cracking) 발생 가능성이 높은 환경으로, 국내외적으로 결함 발생 사례가 보고되고 있으며[6], 국내에서도 PWSCC 발생에 따른 보수 및 교체를 수행한 바 있다[7].

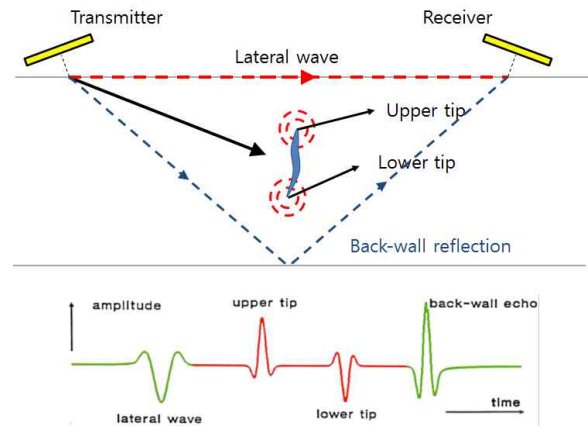


Fig. 1 Basic of TOFD technique

이에 따라 원자로 상부 헤드 관통관 초음파탐상검사의 신뢰성이 중요한 문제로 대두되면서 미국의 규제기관인 NRC는 미국 연방법인 10CFR50.55a에서는 원자로 상부 헤드 관통관 초음파탐상검사의 기량검증을 수록하여 현장 검사 수행 전에 기량검증(performance demonstration)을 시행하도록 규제 요건화 하였다[6]. 보편적으로 원자로 상부 헤드 관통관에는 관통관 내면에서 time of flight diffraction(TOFD) 기법을 이용한 자동초음파검사를 수행하며, 미국 전력연구소(EPRI)에서 관통부 모재에 대해 해당 기법의 기량검증이 입증되었다.

TOFD 검사 기법은 송신 및 수신 두 개로 분리된 한 쌍의 진동자를 사용하여 표면을 흐르는 lateral wave와 저면에서 반사된 저면반사파(back-wall echo) 사이에 수신된 회절파를 분석하여 결함을 검출한다. 초음파 빔 경로상에 결함이 존재할 경우 결함의 선단(tip)에서 회절이 발생하게 된다. Fig. 1은 TOFD 신호의 발생 과정을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 하부 선단에 의한 신호는 lateral wave와 동일 위상을 가지고, 상부 선단에 의한 신호는 lateral wave와 반대 위상을 가진다. 결함의 깊이는 lateral wave와 이 회절신호 사이의 시간차를 이용하여 계산한다.

한국형 원자력발전소의 원자로 상부 헤드 관통관 검사에서는 기량 검증된 IntraSpect™(Westinghouse AMDATA사)를 초음파 및 와전류 데이터 수집 및 평가 소프트웨어로 사용하고 있으며, Fig. 2와 같은 형태의 open housing 탐촉자를 사용한다. 해당 탐촉자는 총 5채널의 초음파 탐촉자와 1채널의 와전류 탐촉자가 포함되어 있으며,

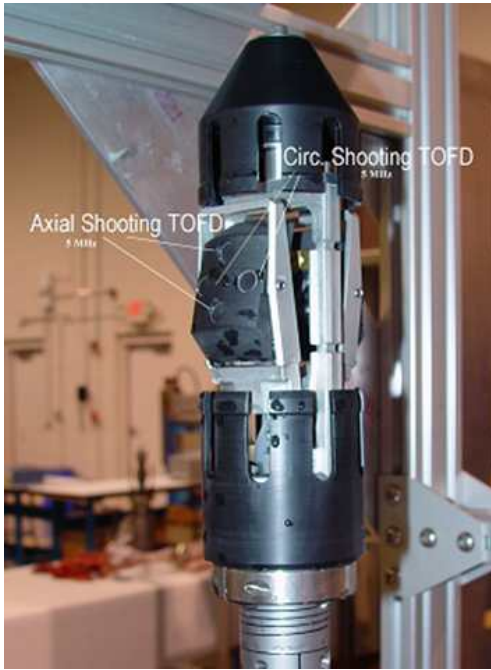
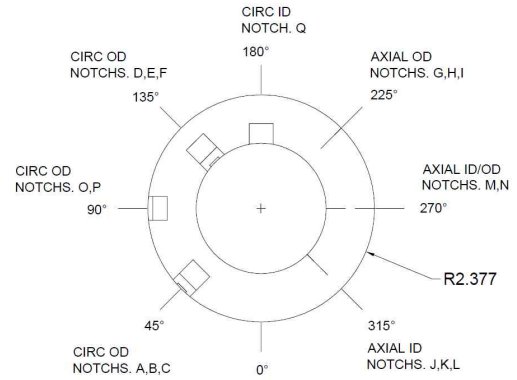


Fig. 2 Open housing TOFD probe

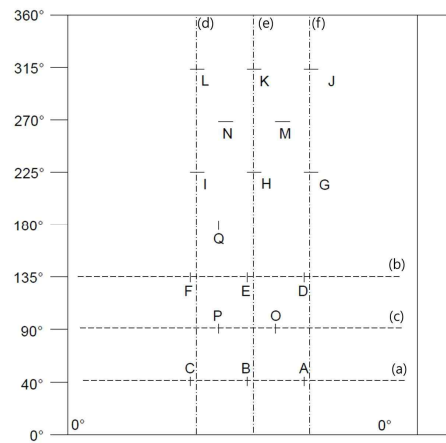
Table 1 Specification of open housing transducers

CH.	Type	Freq. (MHz)	Refracted Angle	Beam Direction
1	TOFD	5	55°	Circ.
2	TOFD	5	40°	Axial
3	TOFD	5	50°	Circ.
4	TOFD	5	35°	Axial
5	0°	2.25	0°	Radial

초음파 채널의 종파 굴절 각도와 사양은 Table 1과 같다. 4개 TOFD 채널은 탐촉자 중심 간격 (probe center separation, PCS)이 24 mm이고 진동자는 직경이 0.25"인 종파 탐촉자를 사용한다[7]. 1번과 3번 TOFD 채널은 원주방향으로 빔이 전파되는 원주방향 검사(circ. shooting) 초음파 채널로 축방향 결함을 검출하며, 2, 4번 TOFD 채널은 축방향 검사(axial shooting) 채널로 원주방향 결함을 검출하기에 적합하다. 5번 0° 채널은 수직 종파를 이용하여 관통관과 용접부 계면, 관통관과 헤드 모재의 경계지역(interface fit zone)의 누설경로(leak path)를 검사하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 총 5개의 초음파검사 채널 중 관통관 외면에서 발생하는 결함을 검사하기에 적합한 3번과 4번의 TOFD 채널에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Configuration of calibration block for RVHP ultrasonic inspection, (a) side view, (b) roll-out view

### 3. 시뮬레이션 모델링 및 방법

시뮬레이션 결과의 유효성 평가를 위해 보정 시험편에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 검사에서 취득된 보정형 신호와 비교를 하였다. 보정 시험편의 형상은 Fig. 3과 같으며, 검사 대상 관통관 노즐과 같은 형상 및 재질로 제작되고, 시험편의 내경은 2.728", 두께는 1.0125"이다. 보정시험편에는 축방향 노치 8개 및 원주방향 노치 9개가 EDM으로 가공되어 있으며, 내면 노치 7개, 외면 노치 10개로 구성되어 있다. 노치 높이는 0.101", 0.04", 0.202", 0.405", 0.607"로 가공되어 있으며, 상세한 제원은 Table 2와 같다. 이와 같은 노치의 제원을 이용하여 시뮬레이션 모델링을 Fig. 4와 같이 수행하였다. 실제 노치는 약간의 폭을 가지고 있고, 노치별로 차이가 있지만 시뮬레이션에서는

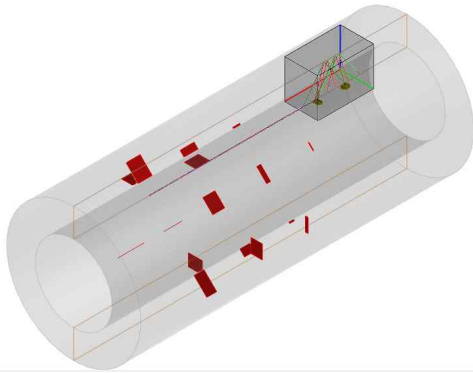


Fig. 4 CIVA modelling of various notches in calibration block for RVHP TOFD inspection

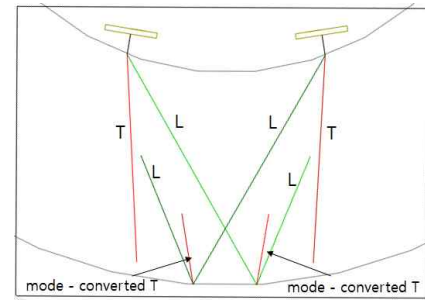
Table 2 Description and dimension of notches

Notch	Description	Height (inch)	Length (inch)	Width (inch)
A	Circ. OD	0.040	0.250	0.006
B	Circ. OD	0.202	0.500	0.014
C	Circ. OD	0.607	0.500	0.018
D	Circ. ID	0.040	0.250	0.006
E	Circ. ID	0.202	0.500	0.014
F	Circ. ID	0.607	0.500	0.018
G	Axial OD	0.040	0.250	0.006
H	Axial OD	0.202	0.500	0.014
I	Axial OD	0.607	0.500	0.018
J	Axial ID	0.040	0.250	0.006
K	Axial ID	0.202	0.500	0.014
L	Axial ID	0.607	0.500	0.018
M	Axial ID	0.405	0.500	0.014
N	Axial OD	0.405	0.500	0.014
O	Circ. OD	0.101	0.500	0.009
P	Circ. OD	0.405	0.500	0.014
Q	Circ. ID	0.405	0.500	0.014

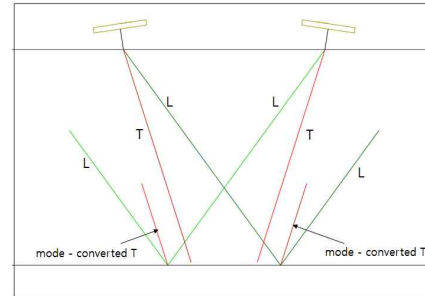
모두 rectangular plane으로 가정하였다.

탐촉자는 3번과 4번 채널에 대해서 Fig. 5와 같이 모델링하였으며 CIVA에서는 모델링된 프로브에 대한 굴절되어 입사되는 종파와 횡파의 빔 선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 송수신 종파의 빔 선은 두께의 약 2/3 위치에서 교차되는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 시뮬레이션을 수행함에 있어 관통관 보정시험편 전체를 스캔하는 시뮬레이션을 실행하기에는 많은 시간과 대량의 메모리가 요구되었기 때문에 이번 연구에서는 주요 주사 라인에 대해서만 시뮬레이션을 수행하였다. 원자로 상부 헤드 관통관 TOFD 검사 평가에는 주로 초음파 검사 방향과 평행한 주사 라인에 대한 B-scan을



(a)



(b)

Fig. 5 CIVA modelling of TOFD probe, (a) circ. shooting channel (ch. 3), (b) axial shooting channel (ch. 4)

이용하므로, Fig. 3(b)와 같이 축방향 검사 방법에 대해서는 (a), (b), (c) 라인, 원주방향 검사 방법에 대해서는 (d), (e), (f) 라인에 따라 주사하는 데이터를 시뮬레이션하였다. 주사 간격은 실제 검사와 동일하게 축방향 주사 간격은 0.04", 원주방향 주사 간격은 2°로 설정하였다. 주사 라인에 포함되지 않는 노치에 대해서는 별도로 해당 위치에서 국부적으로 시뮬레이션을 수행하였다. IntraSpect™에서는 축방향 주사 라인에 대한 검사 단면이미지는 B-scan으로, 원주방향 주사 라인에 대한 검사 단면이미지는 B-prime scan으로 구분하여 명칭하고 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1. B-San/B-Pime Scan 이미지 결과 비교

시뮬레이션 결과로부터 Fig. 6과 같이 notch B에 대한 A-scan 신호를 비교하였을 때 두 신호가 유사한 것을 볼 수 있다. 다만 탐촉자 및 시스템 특성을 모두 시뮬레이션 변수로 반영하기 어렵기 때문에 완전히 동일한 결과는 얻기 어려울 것으로 판단된다.

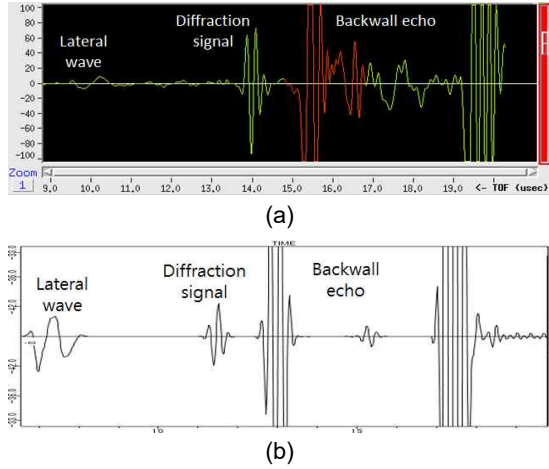


Fig. 6 Comparison of measured and simulated A-scan signal from notch B, (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

Fig. 7~12 는 각 주사 라인에 대해 시뮬레이션 된 B-scan(B-prime scan) 이미지와 실제 검사에서 취득한 데이터를 비교하고 있다. Fig. 7에서 외면 노치에 대해서 노치 선단에서의 쌍곡선(hyperbolic) 신호가 확인이 되고, 높은 노치에 대해서는 저면 신호의 손실(loss of back-wall)과 쌍곡선 신호 아래로 모드 변환된 파에 의한 신호가 확인되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8는 내면 노치에 대한 B-scan 이미지로 높은 노치에 대해선 lateral wave가 PCS 만큼 사라지고(loss of the lateral), 낮은 높이의 노치에 대해서는 lateral wave의 교란(lateral wave perturbation)과 모드 변환된 신호가 확인되었다. 시뮬레이션 결과와 실제 검사데이터와 비교해 보았을 때 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10~12의 원주방향 검사 결과에서도 위와 같이 유사한 형태로 신호가 모사됨을 확인할 수 있었다. 다만 일부 낮은 높이의 노치의 경우에는 시뮬레이션에서 노치 선단에 대한 쌍곡선 신호가 명확하게 나타나지 않거나(notch K), lateral wave가 교란되지 않고 사라지는 것을 확인할 수 있었다(notch J).

4.2. 노치 선단 깊이 측정 결과

내면에서 노치 선단까지의 깊이는 다음과 같은 방법으로 계산한다.

노치 선단의 깊이는 검사 결과에서 쌍곡선의 최상단 지점의 A-scan 신호에서 lateral wave과 회

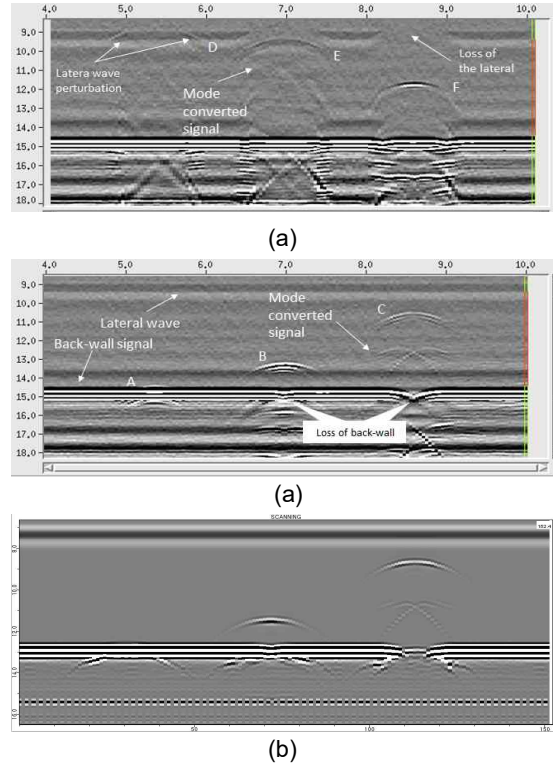


Fig. 7 B-scan image along scan line (a), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

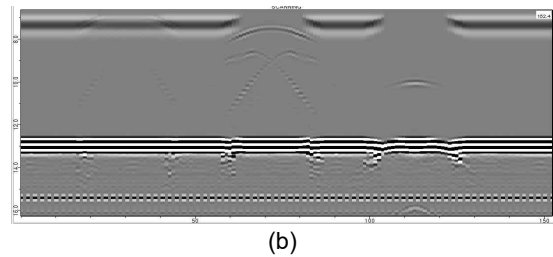


Fig. 8 B-scan image along scan line (b), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

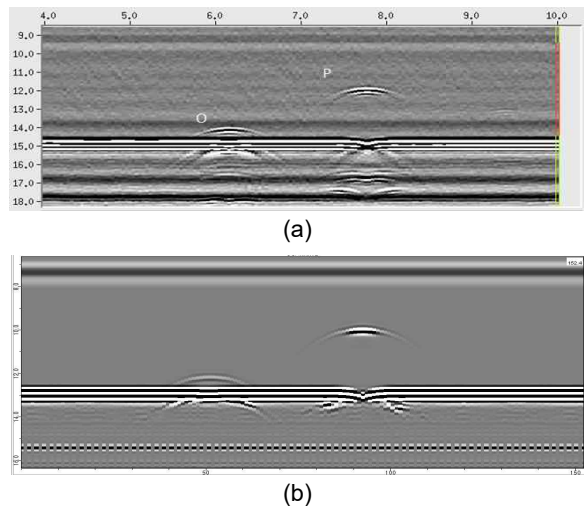


Fig. 9 B-scan image along scan line (c), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

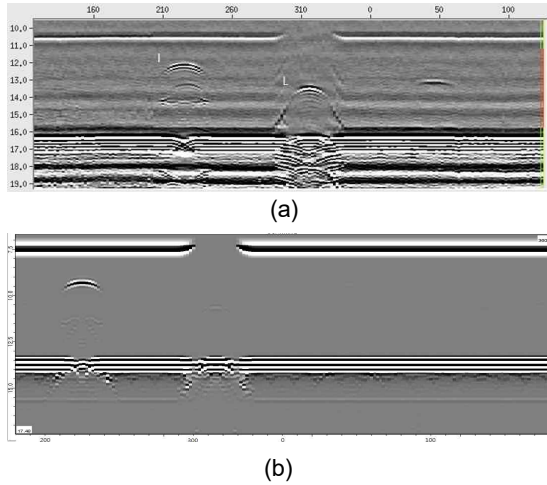


Fig. 10 B-prime scan image along scan line (d), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

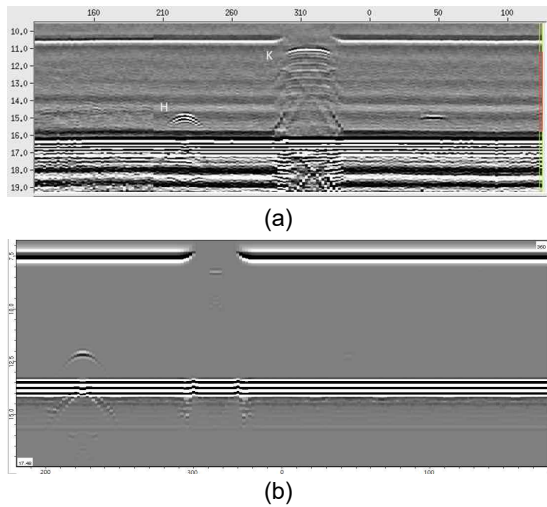


Fig. 11 B-prime scan image along scan line (e), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

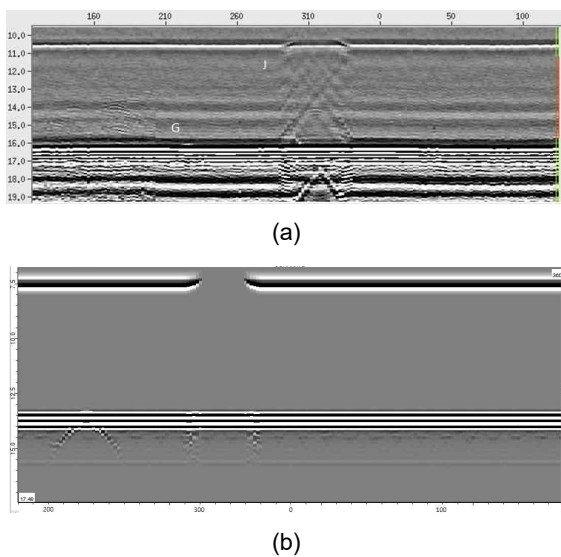


Fig. 12 B-prime scan image along scan line (f), (a) experimental result, (b) CIVA simulation result

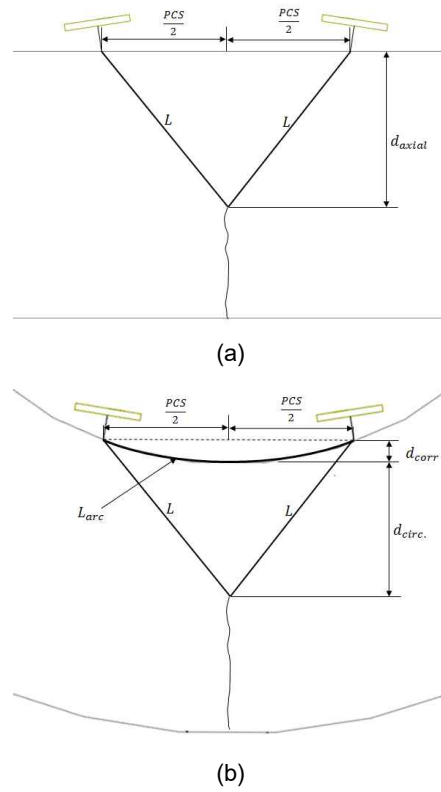


Fig. 13 Calculating depth from TOFD, (a) axial shooting channel, (b) circ. shooting channel

절 신호간의 전파 시간차를 이용하여 깊이를 측정한다. Fig. 13(a)에서 깊이는 식(1)과 같이 계산되고, lateral wave와 회절 신호간의 시간차는 식(2)와 같다.  $C_L$ 은 lateral wave의 속도,  $C_p$ 는 종파의 속도를 나타낸다. lateral wave의 속도는 종파의 속도와 동일하므로[8], 깊이는 식(3)과 같이 계산이 가능하다.

$$d = \sqrt{L^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{2L}{C_p} - \frac{PCS}{C_L} \quad (2)$$

$$d_{axial} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t C_p + PCS}{2}\right)^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} \quad (3)$$

원주방향 검사 방법에 대해서는 Fig. 13(b)과 같이 곡면에 의한 깊이를 보정해 주어야 한다. Lateral wave는 내면의 곡면을 따라 전파하므로, 시간차는 식(4)와 같고 보정 깊이는 식(5)와 같이 계산이 가능하므로, 식(6)과 같이 이를 보정하여 깊이를 측정한다.  $R_i$ 는 내반경을 나타낸다.

$$\Delta t = \frac{2L}{C_p} - \frac{L_{arc}}{C_L} \quad (4)$$

$$d_{corr} = R_i - \sqrt{R_i^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$d_{circ} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t C_p + L_{arc}}{2}\right)^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} - d_{corr} \quad (6)$$

전파시간차를 측정할 때 외면 결함은 lateral wave와 반대 위상을 가지기 때문에 Fig. 14(a)와 같이 회절 신호에서 lateral wave와 반대 위상을 가지는 지점으로 시간차를 측정하고, 내면 결함에 대해서는 Fig. 14(b)와 같이 동일 위상으로 측정한다. 내면 결함에 대해서 lateral wave의 전파시간은 근처의 건전 부위에서 미리 측정한 후 결함 지역에서 회절신호의 전파시간을 측정한다.

식(3)과 식(6)를 이용하여 시뮬레이션 결과에 대하여 깊이를 측정하였고, 깊이 측정 결과는 Table 3와 같다. 외면 결함에 대한 깊이는 두께에서 노치의 높이를 뺀 값에 해당한다. 다만 노치 A, D, G, J는 높이가 낮은 노치로 해당 깊이는 TOFD에 대하여 불감대 영역에 해당하기 때문에 [9] 깊이를 정확하게 산정하기 어려워 측정 대상에서 제외하였다. 시뮬레이션 결과에서 원주방향 검사 결과보다 축방향 검사 결과가 높은 정확도를 보이고 있으며, 대부분 20mils (0.5 mm) 오차 이내로 측정됨을 확인하였다.

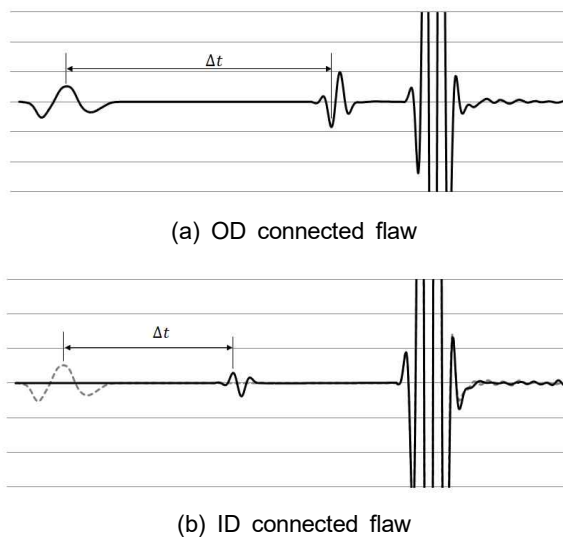


Fig. 14 Depth sizing method, (a) OD connected flaw, (b) ID connected flaw

Table 3 Measurement of depth

Notch	Description	Depth(inch)		Error (mils)
		Actual	Meas.	
A	Circ. OD	0.9725	N/A	N/A
B	Circ. OD	0.8105	0.8102	0.3
C	Circ. OD	0.4055	0.3984	7.1
D	Circ. ID	0.04	N/A	N/A
E	Circ. ID	0.202	0.1334	68.6
F	Circ. ID	0.607	0.6086	-1.6
G	Axial OD	0.9725	N/A	N/A
H	Axial OD	0.8105	0.7955	15.0
I	Axial OD	0.4055	0.4268	-21.3
J	Axial ID	0.04	N/A	N/A
K	Axial ID	0.202	0.1869	15.1
L	Axial ID	0.607	0.5897	17.3
M	Axial ID	0.405	0.3867	18.3
N	Axial OD	0.6075	0.5897	17.8
O	Circ. OD	0.9115	0.9117	-0.2
P	Circ. OD	0.6075	0.6086	-1.1
Q	Circ. ID	0.405	0.3966	8.4

### 5. 결론

본 연구에서는 비파괴 전용 시뮬레이션 툴인 CIVA의 초음파검사 모듈 활용에 앞서 소프트웨어의 정확도를 평가하는 유효성 검증을 수행하였다. 이를 위해 원자로 상부 헤드 관통관 초음파 검사에 사용되는 보정시험편에 대하여 TOFD 신호 시뮬레이션을 수행하고, 실제 검사에서 취득된 데이터의 A-scan 신호 및 B-scan 이미지와 비교 및 깊이를 측정함으로써 그 정확도를 실험적으로 검증하고자 하였다.

A-scan의 경우 검사시스템 특성을 모두 시뮬레이션 변수로 반영하기 어려워 정확한 신호 모사는 어렵지만 비교적 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 된 B-scan 이미지에서도 TOFD 검사에서 나타나는 균열 선단에 대한 쌍곡선 신호와 함께 ID 결함에서 나타날 수 있는 lateral wave의 교란과 손실, OD 결함에 대한 backwall 신호의 손실이 모사되고, 모드 변환된 신호도 관측되었다. 실제 검사에서 취득된 B-scan 이미지와 비교하였을 때 유사한 결과를 보였다. 시뮬레이션 결과로부터 각 결함에 대한 깊이를 측정한 결과 대부분 20mils 이내로 측정되는 것을 확인하였다.

비록 일부 결과에서 실제 검사 결과와는 달리 쌍곡선 신호가 명확하지 않거나, lateral wave의 교란이 정확히 모사되지 않고, 깊이 측정에서도 다소 차이가 나는 결과를 보이기는 하였으나 전반적으로 일치함을 보이고 있다.

따라서 향후 원자로 상부 헤드 관통관 검사 기법의 개발과 검사 시 신호 예측 및 발견된 지시에 대한 분석을 위해 해당 시뮬레이터의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## References

- [1] T.-H. Lee, C.-H. Cho and H.-J. Lee, "Simulation of eddy current testing signals using simulator software dedicated to nondestructive testing," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 10, No. 1, pp. 75-81 (2014)
- [2] T.-H. Lee, C.-H. Cho and H.-J. Lee, "Simulation of eddy current testing signals using CIVA," *Proceeding of 2014 Annual Spring Conference of KSNT*, pp. 393-400 (2014)
- [3] F. Foucher and P. Dubois, "Applications and recent evolutions of the CIVA simulation platform," 18th World Conference on Non-destructive Testing (2012)
- [4] P. Calmon, S. Mahaut, S. Chatillo and R. Raillon, "CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. e975-e979 (2006)
- [5] R. Raillon, G. Toullelan, M. Darmon, P. Calmon and S. Lonne, "Validation of CIVA ultrasonic simulation in canonical configurations," 18th World Conference on Nondestructive Testing (2012)
- [6] Y. Kim, B. Yoon and S. Yang, "Development of reactor vessel head penetration performance demonstration system in Korea," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 10, No. 1, pp. 44-50 (2014)
- [7] J.-S. Lee, T.-H. Lee and Y.-S. Kim, "A feasibility study for flaw detection in J-groove weld of reactor upper head penetration using time of flight diffraction UT technique," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-5 (2015)
- [8] J. P. Charlesworth and J. A. G Temple, "Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction," 2nd Edition, Research Studies Press Ltd., Baldock. Hertfordshire, England, pp. 20-25 (2001)
- [9] E. Ginzler, "Ultrasonic Time of Flight Diffraction," 1st Edition, Eclipse Scientific Products Inc., Waterloo, Ontario, Canada, pp. 85-97 (2013)