

위상배열 초음파 기법을 이용한 TOFD 검사에 관한 연구

A Study on TOFD Inspection Using Phased Array Ultrasonic Technique

윤병식*[†], 김용식*, 이희종*, 이영호**

Byung-Sik Yoon*[†], Yong-Sik Kim*, Hee-Jong Lee* and Young-Ho Lee**

초 록 용접부 및 구조물에 발생한 결함의 깊이를 정밀하게 측정하기 위한 노력은 현재까지 계속되어 왔으며 앞으로도 계속되어야 할 연구분야중의 하나이다. TOFD 검사기법은 현재까지 결함의 깊이를 측정하기 위한 여러 가지 검사 방법중에 가장 정밀한 것으로 알려져 있다. 그러나 사용하는 초음파 굴절각에 따른 빔의 도달범위에 의하여 결함을 놓칠 우려가 있다. 본 연구에서는 일반적인 TOFD 기법대신 위상배열 초음파 기법을 이용한 TOFD 검사를 적용하여 두께가 두꺼운 검사대상에 대하여 결함의 검출능 및 깊이 측정결과를 비교하였다. 위상배열 초음파를 이용한 TOFD 검사를 사용함으로써 다양한 결함에 대하여 검출능 및 정확한 깊이측정이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 개발된 위상배열 TOFD 기법은 발전설비의 압력용기와 같은 두꺼운 검사대상에 적용될 경우 검사 신뢰도 향상에 기여할 것으로 판단된다.

주요용어: 초음파 검사, 위상배열 초음파 기법, TOFD, 결함 평가

Abstract The techniques in order to measure the depth of defect in weldment and structure accurately have been developed. Many researchers have made efforts to develop the methods for the accurate depth sizing of defect. TOFD is known as the most accurate method of various methods for measuring depth sizing. However, there is a possibility to miss defects because of the limitation of beam coverage for the ultrasound incident angle. In this study, the results for detectability and depth sizing using phased array ultrasonic technique for thick body were compared with those of conventional TOFD technique. It was experimentally confirmed that the phased array ultrasonic TOFD technique gives good detectability and accurate depth measurement for the various types of defects. The phased array ultrasonic TOFD technique developed in this study will contribute to increase the inspection reliability in thick components such as the pressure vessel of power generation industry.

Keywords: ultrasonic testing, phased array ultrasonic technique, TOFD, defect sizing

1. 서 론

배관 용접부에 대한 비파괴검사는 현재까지도 조금 더 효과적이고 정확하게 용접부내의 결함을 검출하고 평가하는 기술에 대한 도전으로 이어지고

있다[1]. TOFD(Time-Of-Flight-Diffraction) 검사법은 음파의 회절현상을 이용한 초음파 탐상검사의 한 방법으로서 기존의 펄스-에코 검사법에 비하여 검사 수행 속도가 10배 이상 빠르며, 신호평가자가 쉽게 결함을 검출할 수 있으며 결함의 방향성에 의

존하지 않으므로 안정적인 검사 방법으로서 각광받고 있다[2]. 또한 결함의 깊이를 정확하게 측정할 수 있는 특징을 가지고 있다. TOFD 검사기법은 1970년 후반에 Maurice Silk에 의하여 개발이 되었으며, 이후 Zipsan이라는 자동 검사시스템이 제작되어 자동검사 분야에 활용되기 시작하였다[3]. 이 검사기법은 PISC II(Program for the Inspection of Steel Components)와 DDT(Defect Detection Trials)를 거치면서 결함 검출 및 깊이 측정에 대한 탁월한 능력이 입증되었으며[4], 방사선 투과검사의 장점을 취할 수 있다는 평가를 받아왔다. 1980년도에 들어서면서 TOFD 검사기법은 원자력발전소에서 활발하게 적용이 되었으며 이후 석유화학 및 다른 산업분야에 까지 확대되어 적용되기 시작하였다. 특히 TOFD가 최초로 개발되고 적용된 영국에서는 BS 규격에 TOFD에 관한 규격이 제정되어 표준화되었다[5]. 국내에서는 TOFD에서 근거리 분해능 향상에 대한 연구가 진행됨과 함께 있다[6]. 그러나 펄스에코 탐촉자를 사용하는 일반적인 TOFD 검사기법은 검사대상의 두께와 검출하고자 하는 결함의 높이에 따라 검사 각도를 고려해야하고 초음파 탐촉자의 입사각을 고정된 상태로 검사를 수행하여야 하므로 두께가 변하는 검사 대상 및 결함의 깊이가 다양하게 생성될 수 있는 용접부등에 대한 검사에서는 결함을 놓치거나 잘못된 결과를 도출할 수 있는 여지가 상존하게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 동일한 검사부위에 대하여 다양한 검사각도로 여러번 검사를 수행하는 방법을 선택하여 왔다. 따라서 동일한 부위를 수회에 걸쳐 검사를 수행함으로써 검사에 많은 시간이 소요되게 된다.

본 연구에서는 최근 산업계에서 각광받고 있으며 다양한 분야에서 적용이 확대되고 있는 위상배열초음파(Phased Array Ultrasonic) 탐촉자를 이용하여 TOFD 검사를 수행함으로써 검사체적(examination volume) 전체를 한번에 모두 검사하여 검사속도를 증가시키고 내부표면 및 검사표면 인근의 결함에 대한 검출능을 향상시켜 발전설비 등의 압력용기 용접부 등의 검사에 대한 신뢰도를 향상하고자 한다.

2. TOFD 검사 이론

2.1. 일반적인 TOFD(Conventional TOFD) 검사이론

TOFD 검사는 송신용 탐촉자와 수신용 탐촉자를

사용하여 용접부 중심에 대하여 일정한 간격을 유지하고 검사체의 표면에서 검사대상의 결함을 검출하기 위한 검사 방법이다. 일반적인 용접부 검사의 경우 내부에 음파를 경사지게 입사시켜 검사재질 내에서 횡파(Shear wave)를 사용하나 TOFD 검사의 경우 굴절각 45°~70°사이의 종파(longitudinal wave)를 사용한다. 검사체 내부에 결함이 없는 경우 송신 탐촉자로부터 발생된 초음파는 검사체의 표면을 따라 전파된 lateral wave와 저면에서 반사된 저면파(backwall wave)만이 수신된다. 그러나 검사체 내부에 결함이 존재할 경우 검사체 내부로 입사된 초음파는 크랙의 양쪽 끝 부분에서 회절(diffraction)현상이 발생되고 이 회절된 음파는 lateral wave와 저면반사와 사이에 나타나게 되어 결함을 검출하게 된다. Fig. 1은 TOFD검사서 결함이 내재할 경우 나타나는 전형적인 신호의 형태를 나타내고 있다.

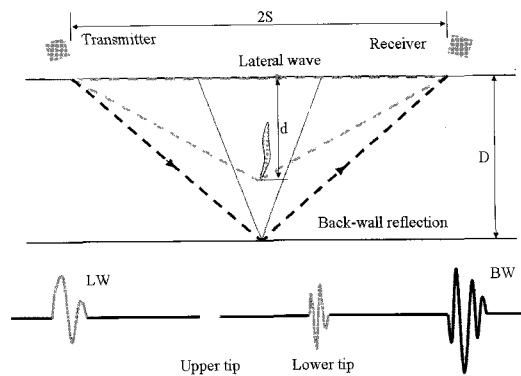


Fig. 1 Conventional probe arrangement for time-of flight diffraction technique

Fig. 1과 같이 두개의 탐촉자가 2S의 간격으로 위치하고 있을 때 결함의 깊이 d는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$d = \sqrt{\left(\frac{c_m \Delta t}{2} + S\right)^2 - s^2} \quad (1)$$

여기에서 c_m 는 재료의 음속, Δt 는 Lateral wave와 결함신호와의 시간차, s 는 송신용 탐촉자 사이의 간격이다.

2.2. 위상배열 초음파 원리

위상배열 초음파는 하나의 탐촉자 몸체에 다중의 압전소자를 배열하고 탐촉자를 움직이지 않고도 원하는 각도와 깊이에 초음파 빔의 초점을 생성시켜 결함의 존재여부 및 결함의 크기 평가 등의 작업이 가능하다. 위상배열을 이용한 초음파 검사 결과에 대한 신호평가는 sectorial scan 표현을 이용함으로써 다양한 각도를 하나의 화면에서 모두 관찰 할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 위상배열 초음파 기술은 이미 의료 분야에서는 태아의 상태를 확인하는 의료기기로 활용되어 왔다. 발전설비 비파괴분야에서는 재료 및 구조의 복잡성등으로 인하여 적용이 제한되어 왔으나 최근 이러한 문제점을 극복함으로써 그 활용성이 확대되어 터빈 블레이드 등과 같은 복잡한 형상의 구조물 및 원자력발전소의 압력용기 검사등에 적용되고 있다. 위상배열 초음파 검사 기법은 Fig. 2와 같이 압전소자를 배열하고 각 소자의 가진 시간을 전자기적으로 제어함으로써 초음파빔을 조향 또는 집속할 수 있는 검사기법이다[7].

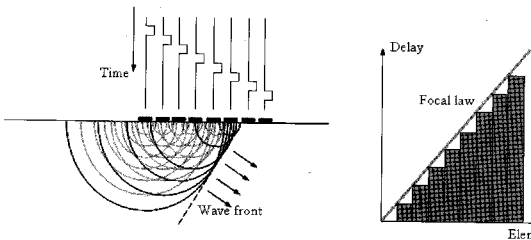


Fig. 2 Beam forming principle of phased array ultrasonic inspection technique

위상배열 검사기법은 하나의 탐촉자를 이용하여 종파와 횡파의 발생이 가능하고 하나의 탐촉자로 다양한 굴절각을 생성할 수 있기 때문에 검사 신뢰도 향상 및 검사시간을 혁신적으로 감소할 수 있다는 장점이 있다. 위상배열 검사기법을 TOFD에 적용함으로써 하나의 탐촉자를 사용하는 기존의 일반적인 TOFD 검사기법에서 발생하는 빔 유효도달 범위로 인한 검사 불감대에 대한 문제점을 극복할 수 있다는 장점이 있다.

3. 실험장치 구성

3.1. 실험장치

본 연구에 사용된 위상배열 초음파 발생장치는 RD-Tech사의 Tomoscan III를 사용하였으며 두개의 위상배열 탐촉자 간격(25)을 조절할 수 있는 TOFD 탐촉자 홀더를 제작하고 탐촉자 홀더에 엔코더를 부착하여 탐촉자의 이동 위치를 기록하였다. 구성된 실험장치는 Fig. 3과 같다.

Phased array pulser-receiver 장치는 LAN으로 연결되어 호스트 컴퓨터에 의하여 빔 생성에 필요한 모든 focal law를 계산하고 제어하며, 수신된 초음파 신호는 컴퓨터에서 저장 및 평가하도록 하였다. 두개의 위상배열 초음파 탐촉자에 대한 집속매질은 물을 사용하였으며 펌프를 이용하여 공급하였다.

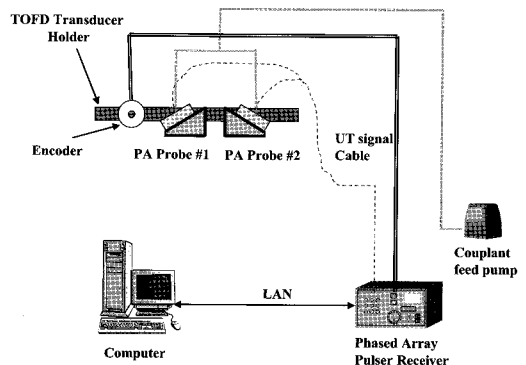


Fig. 3 Schematic diagram of phased array ultrasonic TOFD experiment

3.2 위상배열 초음파 탐촉자

본 실험에서 사용한 위상배열 탐촉자는 32개의 압전소자가 배열된 두개의 5 MHz 위상배열 탐촉자를 송수신용 탐촉자로 각각 사용하였다. Table 1은 사용된 탐촉자의 사양을 나타내고 있다. 그리고 위상배열 초음파 탐촉자의 전면에는 빔의 조향을 용이하게 하도록 하기 위하여 36° 웨지를 부착하였으며 웨지의 음속은 2330 m/s이다.

Table 1 Phased array probe specification

Element Gap	Element Pitch	Element size	Element width
0.01mm	1.0mm	0.95mm	10.0mm

3.3. 실험 시편

본 실험에서 사용한 결함 시편의 재질은 원자력 발전소 용접부 배관재질중의 하나인 Stainless Steel 304를 사용하였다. 재질의 음속은 5638.8 m/s이며, 시편의 두께와 폭은 각각 35 mm, 50 mm이다. 시편에는 EDM 노치를 시편 두께의 10%에서 90%까지 10%간격으로 다양하게 가공하였다 EDM 노치는 모두 외부표면으로 개방된 균열이다. Fig. 4는 본 실험에서 사용한 시편의 치수와 EDM 노치의 위치 및 탐촉자의 배치를 나타내었다.

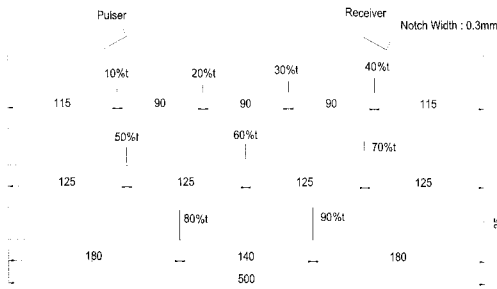


Fig. 4 Dimensions of specimens with EDM notches and location of phased array probes

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. TOFD 유효 도달 범위 평가

일반적으로 하나의 탐촉자를 사용하는 TOFD 방법은 탐촉자의 크기, 탐촉자 사이의 간격 및 굴절각 그리고 주파수에 의하여 검사대상내의 검사영역 (beam coverage)이 결정된다[8-9]. 초음파의 빔 분산각은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[10].

$$\sin \gamma_a = k_a \left(\frac{\lambda}{D} \right) \tag{2}$$

여기서, γ_a 는 빔 분산각, k_a 는 free field에서의 빔 분산각에 대한 factor, λ 는 탐촉자 파장, D는 탐촉자의 직경이다. 식(2)로 부터 구한 빔 분산각을 이용하여 재질 내에서의 초음파의 진행방향으로의 중심선은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$T_c = p_w \frac{c_w}{c_m} \cos \theta_r - \left(\frac{s \cdot x}{\tan \theta_r} \right) \tag{3}$$

여기에서 p_w 는 초음파 윌지 내에서의 빔 경로, c_w 와 c_m 은 각각 윌지와 시편의 음속, θ_r 은 굴절각, s 는 송수신 탐촉자 사이의 거리, x 는 시편의 수평방향 표면 거리이다. 초음파 진행방향의 중심선에서 $\pm 6\text{dB}$ 방향으로의 선도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_{\pm} = p_w \frac{c_w}{c_m} \cos \theta_r - \left(\frac{s \cdot x}{\tan(\theta_r \pm \gamma_a)} \right) \tag{4}$$

본 연구에서는 직경이 6mm이며, 주파수가 5MHz, 굴절각이 60°인 두개의 탐촉자를 60mm 간격을 두고 실험하였을때 초음파 빔의 도달 범위를 계산하였다. 이때 두 탐촉자의 빔퍼짐은 6dB까지 고려를 하였다. Fig. 5는 3개의 각도에 대하여 계산된 빔의 도달범위를 나타내었다.

Fig. 5 (a)는 두개의 45° 탐촉자를 60mm 간격을 두고 배치하였을 때 실험 대상의 내부에서 초음파 빔의 도달범위를 나타내었다. 두개의 탐촉자로 부터 입사된 초음파의 중심점은 시편 표면에서 29.8mm 깊이에서 교차하였으며 +방향 6dB 선은 표면에서 19.5mm 깊이에서 교차되었다.

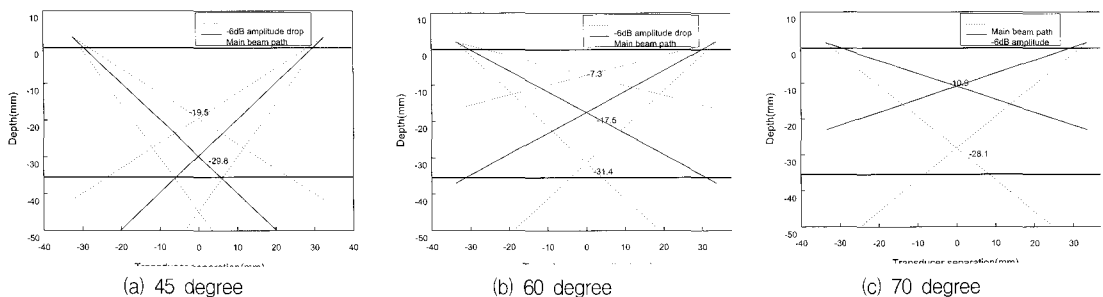


Fig. 5 Ultrasound beam coverage calculation between two probes at 60mm probe separation for various refracted angle

Fig. 5 (b)는 두개의 60° 탐촉자를 60 mm 간격을 두고 배치하였을 때 실험 대상의 내부에서 초음파 빔의 도달범위를 나타내었다.

두개의 탐촉자로부터 입사된 빔의 중심점은 시편 표면에서 17.5 mm에서 교차하였으며 6dB 감쇠를 고려한 교차점은 +방향으로 7.3 mm, -방향으로 31.4 mm 깊이에서 교차되었다. 70° 탐촉자를 사용한 Fig. 5 (c)에서는 10.9 mm 깊이에서 중심점이 교차하였고 -방향 6dB 선은 28.1 mm 깊이에서 교차되었다. Fig. 5 (a)에서 Fig. 5 (c)까지의 결과를 고려하면 35 mm 두께 시편에 대하여 3개의 검사 각도를 모두 활용하여야만 전체 검사체적을 포함할 수 있다는 것을 알 수 있다.

일반적인 TOFD 검사에서의 beam coverage와 비교하기 위하여 동일한 각도에 대하여 위상배열 초음파 탐촉자를 사용한 beam simulation을 통하여 초음파빔의 유효도달범위를 확인하고자 하였다. 각각의 focal law는 실험에서 사용된 동일한 탐촉자와 웨지 변수를 사용하였다. 3개의 각도에 대한 위상배열 초음파의 음장을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 위상배열 기법을 적용하여 3개의 초음파를 동시에 송신함으로써 검사 면적을 넓게 할 수 있으며 특정 관심영역에 대하여는 빔을 집중함으로써 관심영역에 대한 검사 신뢰도 또한 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

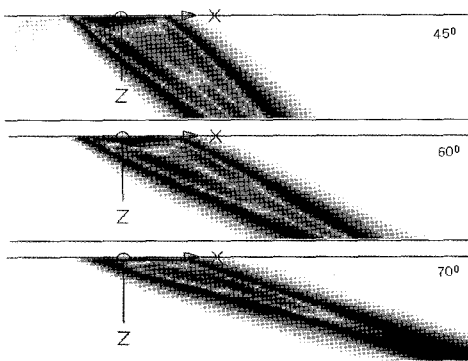
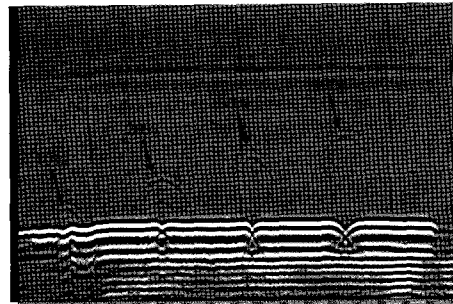


Fig. 6 Phased array simulation for sound field verification with different angles

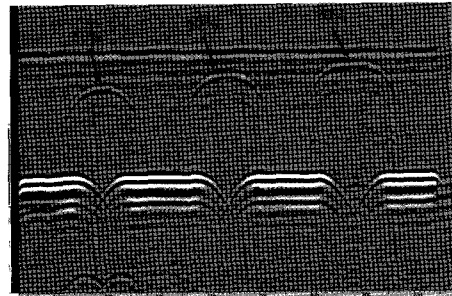
4.2. 결함 검출

본 실험에서는 위상배열 초음파검사 기법을 적용하여 펄스 발생장치에서 3개의 각도를 사용하기 위하여 각각 3개의 독립적인 focal law를 생성하여

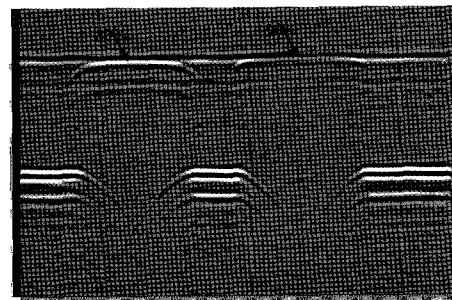
종파모드로 초음파를 발생하여 한번에 10%에서 90%까지 모든 EDM 노치를 검출하고자 하였다. 실험 결과 35mm 두께의 스테인레스 스틸에 가공된 10%에서 90%까지의 모든 EDM 노치가 검출이 되었다. Fig. 7은 본 실험에서 사용한 35mm 두께 시편에 대하여 EDM 노치의 수직방향으로 주사한 결과를 나타낸 그림이다.



(a) 10%~40% EDM notch signal from 45° phased array angle



(b) 50%~70% EDM notch signal from 60° phased array angle



(c) 80%~90% EDM notch signal from 60° phased array angle

Fig. 7 TOFD signals for the EDM notch from 10% to 90% depth from phased array TOFD technique

Fig. 7의 수평방향은 엔코더 진행방향이며, 수직 축은 초음파의 진행방향이다. 실험용 시편에 가공된 9개의 EDM 노치는 3개의 검사각도에 대하여 모두 검출이 되었으나 45°에서는 노치의 높이가 클 때 진폭이 작게 나타났으며 가장 높은 검사각도인 70°에서는 외부 표면쪽의 노치신호가 미세하게 나타났다. 이러한 결과로부터 각 영역에 적합한 검사각도를 사용함으로써 향상된 S/N를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4.3. 결함 깊이 측정

검출된 TOFD 신호를 이용하여 EDM 노치의 높이를 측정하였다. Fig. 8은 여러 가지 깊이의 EDM 노치 중 60% 깊이에 대한 깊이 측정 결과를 나타내었다.

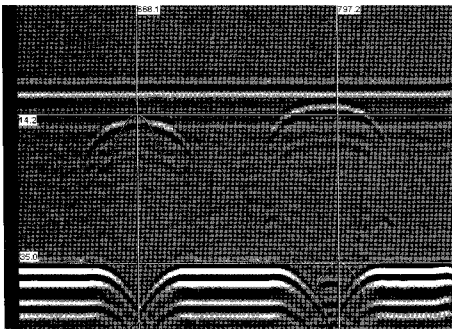


Fig. 8 TOFD signal for depth measurement for 60% EDM notch

3개의 검사각도에 대하여 각각 측정된 EDM 노치의 깊이에 대하여 실제 깊이와의 오차를 계산하였다. Fig. 9은 노치 깊이에 따른 오차를 검사 각도별로 나타내었다.

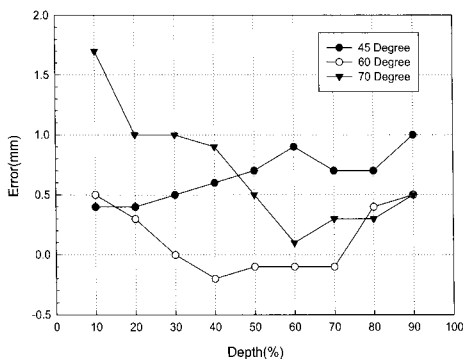


Fig. 9 EDM notch depth measurement error as a function of depth for each incident angles

Fig. 9에 나타난 것과 같이 45° 검사 각도에서는 검사표면에서 멀리 떨어진 반대 표면쪽의 노치신호가 검사 표면쪽 보다 측정 오차가 적었으며, 60°에서는 중간부분의 오차가 적은 것으로 나타났다. 70°에서는 반대쪽 표면 인근 영역에서 오차가 많이 발생하고 검사표면 근처에서는 오차가 감소하는 경향을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 위상배열 초음파 기법을 적용하여 기존의 일반적인 TOFD 검사에서 발생하는 Beam coverage로 인한 제한을 극복 하고자 하였으며 실험 결과 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 1) 위상배열 초음파 탐촉자를 이용한 TOFD 검사기법을 적용하여 전체 검사체적을 다양한 검사각도를 사용하여 검사함으로써 검사 체적의 누락 없이 검사에 소요되는 시간을 단축할 수 있었다.
- 2) 실험에서 사용한 3개의 각도에 대한 깊이 측정 결과 45°는 검사 반대면의 표면쪽에서 조금 더 정확한 값을 나타내었으며, 60°는 중간부위에서, 그리고 70°는 내부표면보다 검사표면으로 갈수록 오차가 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 본 실험에서 사용한 35 mm 두께의 후판 스테인레스 스틸에 깊이별로 가공된 결함에 대하여 위상배열 초음파 탐촉자를 이용한 TOFD 검사기법을 적용함으로써 초음파 빔의 유효 도달 범위가 향상되어 결점의 깊이에 관계없이 모든 결함을 검출하고 깊이를 정밀하게 측정 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Larry Bernard, "Time-of-Flight Diffraction Technology for Ultrasonic Inspection of Piping and Pressure-Retaining Components," Material Evaluation, Vol. 45, pp 506-507, (1987)
- [2] M. G. Silk, "The Interpretation of TOFD data in the light of ASME XI and similar rules," British journal of NDT, pp. 242-243, (1989)
- [3] J. P. Charlesworth and J. A. G. Temple, "Engineering Applications of Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction," Research Studies Press LTD, pp. 1-11, (2001)

- [4] P. Carter, "Experience with the Time-of-Flight Diffraction Technique and an Accompanying Portable and Versatile Ultrasonic Digital Recording System," *British Journal of NDT*, Vol. 26, pp. 354-361, (1984)
- [5] BSI, "Guided to calibration and setting-up of the ultrasonic time-of-flight diffraction(TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws," pp. 3-13, BS 7706, (1993)
- [6] 이순흠, 김선형, 공용해, 이원흠, "TOFD 법에서의 근거리 분해능 향상에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 19, No. 6, pp 420-425, (1999)
- [7] RD-Tech, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications," RD-Tech Inc., pp. 7-18, (2004)
- [8] M. G. Silk, "Defect Sizing using Ultrasonic Diffraction," *British Journal of NDT*, pp. 12, (1979)
- [9] M. R. Kirby & B. W. Kenzie, "Interpretation of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction Data-A Guide," TWI, CRP Programme 9402-5, pp. 14, (1998)
- [10] J. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials," 4th Ed., Springer-Verlag press, pp. 70-76, (1990)