

# 위상배열 TOFD 기법을 이용한 후판 용접부 결함 검출에 관한 연구

## A Study on Flaw Detection for Thick Weldment using Phased Array TOFD Technique

박희상\*, 정창호\*, 강철식\*, 이영호\*, 윤병식\*\*, 김용식\*\*

\*충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

\*\* 한국전력공사 전력연구원

### 1. 서 론

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 의존하지 않으므로 안정적인 검사 방법으로서 각광받고 있다[1]. 또한 결함의 깊이를 정확하게 측정할 수 있는 특징을 가지고 있다. TOFD 검사기법은 1970년 후반에 Maurice Silk에 의하여 개발이 되었으며, 1980년도에 들어서면서 TOFD 검사기법은 원자력발전소에서 활발하게 적용이 되었으며 이후 석유화학 및 다른 산업분야에 까지 확대되어 적용되기 시작하였다[2]. 그러나 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.

본 연구에서는 최근 산업계에서 각광받고 있으며 다양한 분야에서 적용이 확대되고 있는 위상배열 초음파(Phased Array Ultrasonic) 기법을 이용한 TOFD 검사를 수행함으로써 검사체적 전체를 한번에 모두 검사하여 검사속도를 증가 시키고 내부표면 및 검사표면 인근의 결함에 대한 검출능을 향상시켜 발전설비의 압력용기 용접부등의 검사에 대한 신뢰도를 향상하고자 한다.

### 2. TOFD 검사 이론

TOFD 검사는 송신용 탐촉자와 수신용 탐촉자를 용접부 중심에 대하여 일정한 간격을 유지하고 검사체의 표면에서 검사대상의 결함을 검출하기 위한 검사 방법이다. 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 끝부분에서 회절(diffraction)현상이 발생되고 이 회절된 음파는 lateral wave와 저면반사파 사이에 나타나게 되어 결함을 검출하게 된다. Fig. 1은 TOFD검사에서 결함이 내재할 경우 나타나는 전형적인 신호의 형상을 보여주고 있다.

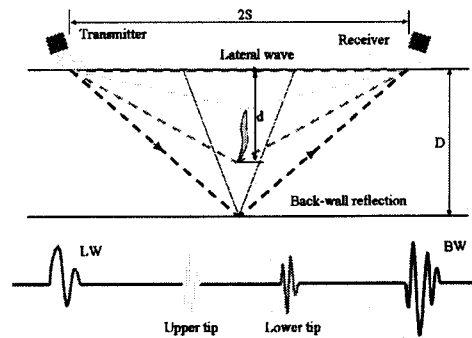


Fig. 1 Conventional probe arrangement for time-of flight diffraction technique

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

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

여기에서  $c_m$ 는 재료의 음속,  $\Delta t$ 는 Lateral wave

와 결함신호와의 시간차,  $s$ 는 송수신 탐촉자 사이의 간격이다.

위상배열 초음파 기법은 하나의 탐촉자 몸체에 다중의 압전소자를 배열하고 탐촉자를 움직이지 않고도 원하는 각도와 깊이에 초음파 빔의 초점을 생성시켜 결함의 존재여부를 검사할 수 있는 기법이다[3]. 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 두 개의 위상배열 탐촉자 간격(2S)을 조절할 수 있는 TOFD 탐촉자 홀더를 제작하고 탐촉자 홀더에 엔코더를 부착하여 탐촉자의 이동 위치를 기록하였다. 구성된 실험장치는 Fig. 2와 같다. 본 실험에서 사용한 위상배열 탐촉자는 32개의 압전소자가 배열된 두개의 5MHz 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.

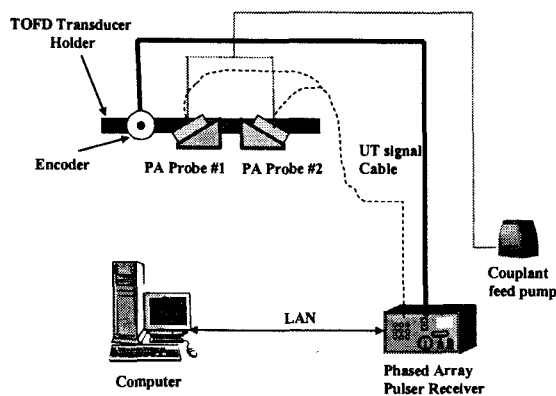


Fig. 2 Schematic diagram of phased array ultrasonic TOFD experiment

Table 1 Phased array probe specification

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

#### 3.2 실험 시편

본 실험에서 사용한 결함 시편의 재질은 원자력발전소 용접부 배관재질중의 하나인 Stainless Steel 304를 사용하였다. 재질의 음속은 5638.8 m/s이며, 시편의 두께와 폭은 각각 35mm, 50mm이다. 시편에는 EDM 노치를 시편 두께의 10%에서 90%까지 10%간격으로 다양하게 가공하였다. EDM 노치는 모두 외부표면으로 개방된 균열이다. Fig. 3은 본 실험에서 사용한 시편의 치수와 EDM 노치의 위치 및 탐촉자의 배치를 나타내었다.

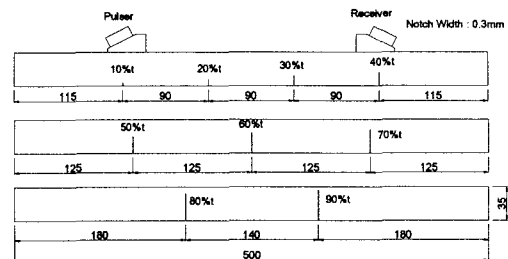


Fig. 3 Dimensions of specimens with EDM notches and location of phased array probes

### 4. 실험결과 및 고찰

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. 4는 본 실험에서 사용한 35mm 두께 시편에 대하여 EDM 노치에 수직방향으로 주사한 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 4의 수평방향은 엔코더 진행방향이며, 수직축은 초음파의 진행방향이다. 실험용 시편에 가

공된 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.

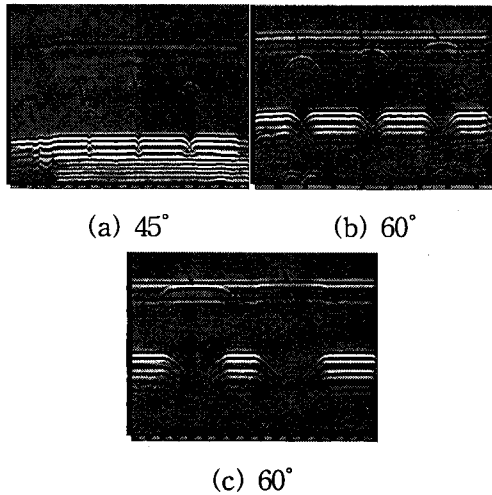


Fig. 4 TOFD signals for the EDM notch from 10% to 90% depth from phased array TOFD technique

검출된 TOFD 신호를 이용하여 EDM 노치의 높이를 측정하였다. 3개의 검사각도에 대하여 각각 측정된 EDM 노치의 깊이에 대하여 실제 깊이와의 오차를 계산하였다. Fig. 5는 노치 깊이에 따른 오차를 검사 각도별로 나타내었다.

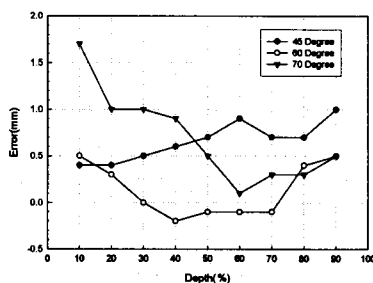


Fig. 5 EDM notch depth measurement error as a function of depth for each incident angles

Fig. 5에 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 TOFD 초음파 기법을 적용하여 후판용접부 결함 검출을 위한 실험을 수행하였으며 실험 결과 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 1) 위상배열 초음파 탐촉자를 이용한 TOFD 검사기법을 적용하여 전체 검사체적을 포함하여 검사할 수 있었으며, 모든 깊이의 결함을 검출 할 수 있었다.
- 2) 실험에서 사용한 3개의 각도에 대한 깊이 측정결과 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 35mm 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. 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)
2. 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)
3. RD-Tech, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications", RD-Tech Inc., pp. 7-18, (2004)