

## 횡파 위상배열 초음파 탐촉자 설계 및 성능 평가

### Design and Performance Evaluation of Shear Wave Phased Array Ultrasonic Transducer

윤병식\*<sup>†</sup>, 이희종\*, Dominique Braconnier\*\*

Byung-Sik Yoon\*<sup>†</sup>, Hee-Jong Lee\* and Dominique Braconnier\*\*

**초 록** 일반적으로 위상배열 초음파검사 기법을 이용한 배관 용접부검사에서는 높은 검사 각도를 효과적으로 발생하기 위하여 웨지를 사용하게 된다. 그러나 용접부 또는 접근이 제한된 부위에 대한 검사는 위상배열 초음파 탐촉자에 웨지를 부착하게 되면 웨지의 전단 길이로 인하여 검사체적을 포함하지 못하는 등의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 웨지를 사용하지 않고 높은 검사 각도를 발생할 수 있는 횡파 위상배열 초음파 탐촉자를 적용해야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 굴절각도가 높은 횡파를 발생할 수 있는 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하고 제작하여 다양한 깊이의 EDM 노치가 가공된 시험편에서 결함이 정확하게 검출되고 평가될 수 있는 지를 확인하였다. 결과적으로 본 연구에서 설계된 횡파 위상배열 초음파 탐촉자는 다양한 깊이의 결함을 검출하고 신뢰성 있는 정밀도를 나타내었으므로 향후 접근제한이 예상되는 발전설비 구조물의 검사에 적용된다면 효과적인 검사 결과를 보여줄 것으로 기대된다.

**주요용어:** 초음파탐상검사, 위상배열 초음파, 초음파 모델링, 초음파 탐촉자, 횡파

**Abstract** Typically, a wedge is involved to generate effectively high inspection angle in pipe weld inspection using phased array ultrasonic technique. But the usage of this wedge for weld or access limited area can cause coverage limitation for the examination volume because of the wedge front length. Therefore, the shear wave phased array probe which can generate high inspection angle without wedge is essentially necessary. In this paper, the shear wave phased array ultrasonic probe which can generate high inspection angle designed by modeling and manufactured from the modelling result. And this shear wave probe tested whether it can detect and sizing for EDM test block that contains various depth. As results, the experimental results show that the designed shear wave phased array probe can detect and size with reliable accuracy. Therefore if this phased array probe apply in field inspection, it is expected that it show more reliable inspection result for plant structure having access limitation.

**Keywords:** Ultrasonic Testing, Phased Array Ultrasonic, Ultrasonic Modelling, Ultrasonic Transducer, Shear Wave

#### 1. 서 론

원자력발전소를 포함한 대형 플랜트산업의 구조물들은 설비의 안전성을 주기적으로 평가하기 위하여 가동전 또는 가동중검사를 수행하고 있으며, 설비의 가동년수가 증가할수록 이러한 설비에

대한 가동중검사의 중요성은 더욱 증가되고 있다 [1]. 특히 원자력발전소의 안전성은 공공의 안녕과 관련되므로 가동중검사의 신뢰성 확보는 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 현재 국내에는 다수의 원자력발전소가 건설중에 있고 추가 건설이 계획되어 있으므로 원자력발전의 비중은 지속적

으로 높아질 것으로 예상된다. 따라서 원자력발전소의 안전성을 유지하고 검사 신뢰성을 높이기 위한 검사 기술의 신뢰도 향상을 위한 투자와 연구는 지속되어야 한다[2].

원자력발전소의 압력용기 및 배관 용접부를 검사하기 위한 방법으로는 초음파탐상검사가 광범위하게 사용되고 있으며, 최근에는 압전소자를 배열하여 초음파빔을 전자적으로 제어할 수 있는 위상배열 초음파검사 기법(phased array ultrasonic testing technique)을 적용하여 검사 시간과 검사 신뢰성을 향상하고자 하는 노력이 경주되고 있다[3]. 그러나 위상배열 초음파 탐촉자를 사용하여 검사에 필요한 다수의 횡파 각도를 생성하여 배관 용접부 검사를 수행하기 위해서는 위상배열 초음파 탐촉자의 전면에 웨지를 부착하여야 하며, 웨지의 기하학적 형상 및 크기로 인하여 초음파빔의 접근성에 제한을 받게 되므로 용접부 검사체적을 충분히 포함할 수 없게 된다. 이를 극복하기 위하여 웨지의 설계를 최적화하여 웨지 전단길이를 최소화하여도 최소화할 수 있는 길이는 매우 제한적이다.

위상배열 초음파검사기법의 원리에 따라 웨지를 부착하지 않고 횡파를 생성할 수 있으나 일반적으로 높은 각도가 발생되면 그레이팅 로브(grating lobe)가 발생되어 복잡한 신호들이 수신되어 결과적으로 초음파신호의 해석이 어렵게 된다[4].

일반적인 위상배열 초음파 탐촉자에서 나타나는 이러한 문제를 해결하기 위하여 Wooh와 Shi는 선형 위상배열 초음파 탐촉자의 빔 특성으로부터 side lobe와 grating lobe의 위치를 예측하기 위한 연구와 압전소자의 크기에 따른 빔의 조향 특성에 관한 연구를 수행하였다[5,6], Song과 Kim은 시뮬레이션을 통하여 웨지가 고려된 상태에서 위상배열 초음파 탐촉자의 음장을 계산하여 설계에 따른 grating lobe와 side lobe의 영향을 연구하였다[7].

본 연구에서는 위상배열 초음파 탐촉자를 이용한 검사에서 웨지를 부착하지 않고 횡파를 효과적으로 발생하기 위하여 모델링을 통하여 grating lobe가 최소인 탐촉자를 설계하였으며, 모델링 결과를 토대로 위상배열 탐촉자를 제작하였다. 또한 제작된 탐촉자를 이용하여 다양한 깊이로 가공된 시험편에서 결함의 검출 정밀도를 평가하여 횡파의 장점을 살리면서 높은 각도의 검사가 가능할 뿐만 아니라 배관 용접부 검사를 위한 접근

성이 높은 위상배열 초음파 탐촉자를 연구하고자 하였다.

## 2. 탐촉자 설계

### 2.1. 탐촉자 설계 파라미터

초음파탐상검사서 횡파는 종파에 비하여 파장이 짧아 재질내에서 입자의 크기 또는 조직 특성에 기인한 다양한 형태의 속성에 민감하게 영향을 받지만 재질내에서의 투과력은 상대적으로 낮다. 그러나 탄소강이나 스테인리스강에서는 투과력 상쇄에 비하여 결함에 대한 감도가 좋아 일반 초음파탐상검사에서는 횡파 모드를 발생시켜 검사에 적용하고 있다. 그러나 일반 초음파검사는 물론 최근에 각광받고 있는 위상배열 초음파 검사에서도 검사 대상에 횡파를 발생시키기 위해서는 Snell's law를 고려하여 제작된 웨지를 탐촉자에 부착하여 횡파를 발생하였다. 위상배열 초음파검사 기법은 웨지를 사용하지 않고도 높은 각도의 굴절각을 발생시킬 수 있으나 특정각도에서 발생하는 grating lobe에 의하여 결함으로부터 얻어지는 신호의 평가가 어렵게 된다. 또한 용접부 검사에서는 이러한 웨지의 사용으로 인하여 접근성이 제한되어 검사 체적을 충분히 포함하지 못하는 경우가 발생함에 따라 웨지가 하나의 장애물로 작용하는 경우가 있다. Fig. 1은 일반적인 원자력발전소 배관 용접부검사에서 웨지를 사용함으로써 나타날 수 있는 접근 제한 거리를 나타내었다.

위상배열 초음파 탐촉자에서는 웨지를 사용하지 않고도 빔을 특정각도로 입사할 수 있는 특성이 있으므로 위상배열 초음파 탐촉자 설계 파라

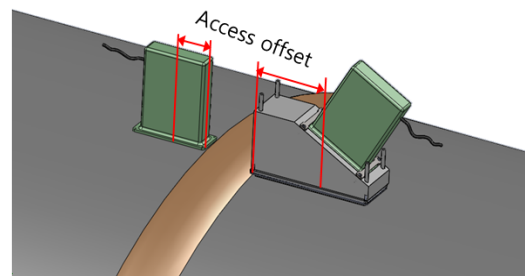


Fig. 1 Access limitation caused by phased array probe wedge

미터를 고려하여 전체 굴절각도 범위에서 유효한 회파가 발생할 수 있는 회파초음파 탐촉자를 설계하였다.

본 연구에서는 회파 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하기 위하여 탐촉자 설계 파라미터를 하나씩 고려하였다. 먼저 주파수는 일반적인 구조물 검사에 적용되는 5 MHz로 선정하였다. 탐촉자의 피치는 가공성을 고려하여 0.5 mm로 하고 탐촉자의 진동자를 따라 전파되는 lateral mode를 최소화하고자 하였다. 결과적으로 각각의 압전소자들이 진동할 때 주위 소자와 독립적이 될 수 있다. 따라서 압전소자의 모서리에서 강력한 회파가 발생할 수 있도록 하였고 압전소자가 파장보다 작게 설계함으로써 하나의 포인트 소스와 같이 진동하도록 하였다.

선정된 회파 위상배열 초음파 탐촉자의 파라미터는 아래 Table 1과 같다.

선정된 파라미터를 이용하여 탐촉자가 제작되었을 때 사용되는 검사 각도에서 side lobe 또는 grating lobe가 없거나 최소화되어야 한다.

위상배열 초음파 탐촉자에서 발생하는 grating lobe는 시간지연이 각각 다르고 동일한 위상을 가진 인접하는 압전소자들이 보강간섭(constructive interference)에 의하여 발생하게 된다. 즉 어떠한 굴절각도에서 신호가 in phase되고 delay가 주기적으로 일치되는 각도에서 나타나게 된다. 특히 grating lobe는 빔이 넓고 감도가 높은 특징을 가지고 있으므로 위상배열 초음파 탐촉자 설계에서 우선적으로 고려하여야 할 인자이다. 위상배열 초음파 탐촉자가 각도별로 발생하는 초음파빔의 특성을 분석하기 위하여 fast nearfield method[7]에 의하여 음장을 계산하였다.

Table 1 Specification of phased array ultrasonic transducer for shear wave

Parameter	Design Value
Frequency	5 MHz
No. of elements in primary axis	32
Primary axis pitch	0.3 mm
Inter element spacing	0.1 mm
Width of element	7.0 mm
Total active length	9.5 mm
Pulse duration	< 700 ns
Bandwidth(-6dB)	55%

Fig. 2는 Table 1의 파라미터를 이용하여 계산한 각도별 지향성(directivity)을 나타내었다. Fig. 2에서 부터 굴절 각도별로 main beam과 간섭되거나 인접한 음향빔이 나타나지 않았으며, 상대적으로 크기가 작은 side lobe가 main beam의 양쪽에 나타났으나 크기가 작아 검사 신호에 영향을 미치지 않을 것으로 예상되었다. 지향성 그림에서 알 수 있는 것과 같이 각도가 증가함에 따라 main beam의 크기가 감소하고 main beam이 발생하는 각도가 넓게 나타남을 알 수 있다. Fig. 2에 나타낸 지향성 그림은 탐촉자 표면으로부터 25 mm 위치에서 계산한 결과이다.

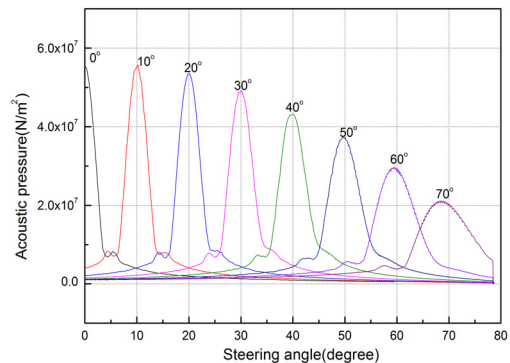


Fig. 2 Directivity plot for steering angle at 25 mm front of elements

### 2.2. 모델링

선정된 위상배열 초음파 탐촉자의 파라미터로 지향성을 검토하고 간섭 음향이 존재하지 않는 것으로 계산되어 선정된 탐촉자 설계 파라미터 값이 유효한 것으로 나타났다. 따라서 이를 이용하여 실제 1차원 선형배열 탐촉자에 대하여 공간 상에서 음장 분포를 검토하기 위하여 3차원 모델링을 수행하였다.

모델링은 프랑스 CEA사에서 개발한 비파괴평가 전용 모델링 프로그램인 CIVA[9]를 사용하였으며, 초음파 모델링 해는 Kirchhoff 근사해를 적용하였다. 먼저 설계된 회파 위상배열 초음파 탐촉자가 스테인리스강에 직접 접촉한 상태에서 재질에서 회파를 0°에서 80°까지 발생하여 main beam이외에 주변에서 발생할 수 있는 음향파를 확인하였다. Fig. 3은 10°, 45°, 60° 및 70°에서 계산한 초음파 음장 모델링 결과를 나타내었다.

Main beam 주위에 side lobe가 발생하지 않았으며, grating lobe도 관찰되지 않아 Fig. 2에서 계산하였던 지향성 계산과 Fig. 3의 음장 모델링 결과가 타당한 것임을 알 수 있다.

결과적으로 횡파 발생을 위한 위상배열 초음파 탐촉자의 설계 파라미터가 유효한 것으로 판단된다. 설계된 탐촉자가 다양한 깊이의 결함에 대하여 적합한 반사 신호를 나타내는지를 확인하기 위하여 10% 깊이에서부터 80% 깊이의 EDM (electric discharge machining) 노치가 가공된 탄소강 시험편에 대하여 defect response 모델링을 실시하였다.

Fig. 4는 EDM notch 시험편에 대하여 0°에서 70°까지 빔을 고려한 모델링 결과중 60° 신호의 B-scan 신호를 나타내었다. 모델링 결과에서 10% 깊이에서부터 80% 깊이의 EDM notch가 모두 검출이 되었으며, 각각의 노치 tip 신호와 corner 신호가 분명하게 분리되었다.

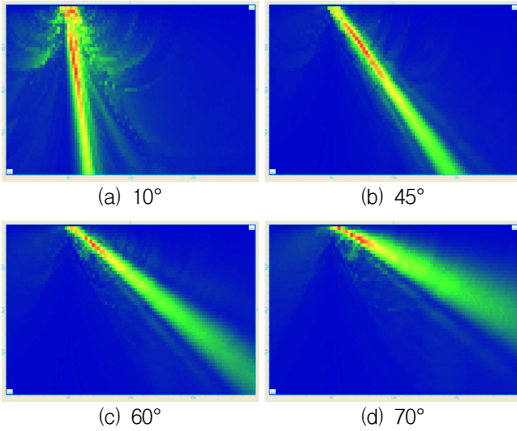


Fig. 3 The beam computation result for designed shear wave phased array probe

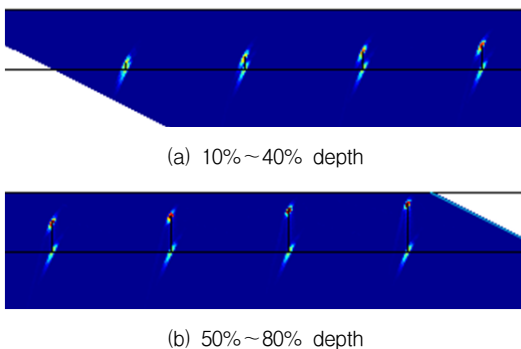


Fig. 4 CIVA modelling results for EDM notches

Fig. 4의 그림에서 각각의 노치 tip 신호의 진폭을 측정하고 echo dynamic 신호를 계산하였다. Fig. 5에는 모든 노치 결함으로부터 반사된 신호의 echo dynamic 신호를 나타내었다. 높이가 가장 작은 10% 노치의 진폭은 -10.4 dB이며, 80% 노치의 진폭은 -1.1 dB로 계산이 되었다.

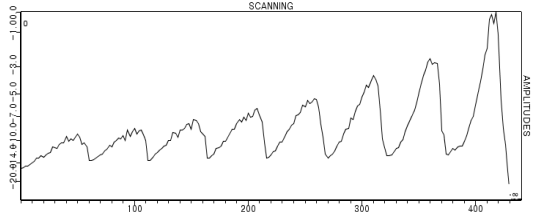


Fig. 5 Echo dynamic curve for EDM notch block

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험장치

모델링을 통하여 검증된 설계 파라미터를 이용하여 실험을 수행하기 위하여 초음파 탐촉자를 제작하였다. Fig. 6은 본 연구에서 제작한 횡파 위상배열 초음파 탐촉자를 나타내었다. 제작된 탐촉자를 이용하여 최초 설계 의도와 같이 다양한 각도에 대하여 횡파가 생성되고 모델링 결과와 같이 결함으로부터 초음파 응답신호를 얻을 수 있는지를 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 모델링에서 사용하였던 것과 동일한 형상의 시험편을 제작하였다. Fig. 7은 본 실험에 사용한 EDM notch 시험편을 나타내었다.



Fig. 6 Shear wave phased array ultrasonic probe



Fig. 7 Stainless steel EDM notch block

Table 2 Detail Dimension of the EDM notches

No	Depth (mm)	Depth (%)	No	Depth (mm)	Depth (%)
1	2.5	10	5	12.5	50
2	5.0	20	6	15	60
3	7.5	30	7	17.5	70
4	10.0	40	8	20	80

실험에 사용된 시험편은 치수가 470 mm × 20.5 mm × 32 mm 인 스테인리스 재질로 제작이 되었으며, EDM 노치가 두께의 10% 깊이에서 80% 깊이까지 가공되어 있다. Table 2에는 가공된 EDM 노치의 깊이 치수와 두께에 대한 %를 나타내었다.

본 실험에 사용된 위상배열 초음파장치는 128 채널 구동이 가능한 ZETEC사의 Dynaray를 사용하였다. Dynaray를 제어하고 신호를 수집하기 위하여 컴퓨터와 TCP/IP 통신으로 연결하여 위상배열 초음파장치를 제어하고 신호를 취득하였다.

### 3.2. 실험 방법

스테인리스 시험편에 깊이별로 가공된 EDM 노치를 검출하고 노치의 깊이를 측정하기 위하여 제작된 횡과형 위상배열 초음파 탐촉자를 연결하였다. 탐촉자를 구동하기 위한 설정값을 입력한 후에 초음파 빔을 0°에서 80°까지 생성하였다. 실험에 사용된 장비의 설정값은 Table 3과 같다.

## 4. 결과 및 고찰

제작된 횡과 위상배열 초음파 탐촉자가 grating lobe가 발생하지 않는 것을 확인하기 위하여 -90°에서 +90° 까지 180° 범위로 빔이 생성되도록

Table 3 Experimental parameters

Parameter	Setting
Gain	40 dB
Digitizing frequency	50 MHz
Inspection mode	Pulse-echo
Steering angle	0°~70°
Angle resolution	1°
Voltage	40 V
Focusing	Dynamic Depth Focusing

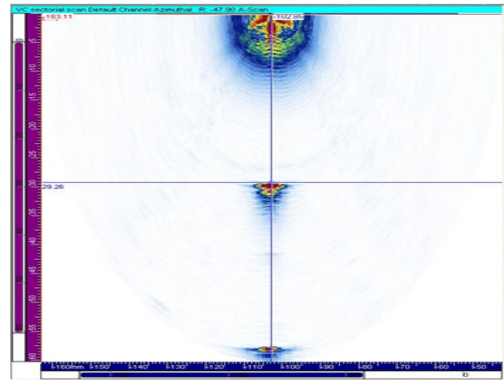


Fig. 8 Acoustical performance test results for shear wave phased array probe

focal law를 설정하고 결함이 존재하지 않는 시험편에서 반사파를 관찰하였다. Fig. 8은 시험편에서 취득한 sectorial scan의 신호를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 0° 부근에서 나타나는 저면반사파를 제외한 grating lobe 신호는 나타나지 않았다.

시험편에 가공된 EDM 노치의 깊이를 측정하기 위하여 위상배열 초음파 탐촉자를 움직여서 노치의 선단으로부터 반사되는 신호의 진폭이 최대가 되는 위치에 탐촉자를 정지하고 노치의 tip 신호에 대하여 깊이를 측정하였다. 모든 실험은 동일한 조건에서 이루어졌으며, 횡과 위상배열 초음파 탐촉자를 이용하여 10% 깊이의 EDM 노치에서부터 80% 깊이의 노치까지 모두 검출이 되었으며 또한 깊이평가가 가능하였다.

Fig. 9는 10%와 20% 깊이의 EDM 노치를 검출한 결과이다. 왼쪽 상부를 중심으로 반시계방향으로 0°에서부터 70°까지 굴절각이 증가하면서 빔이 발생되었다.

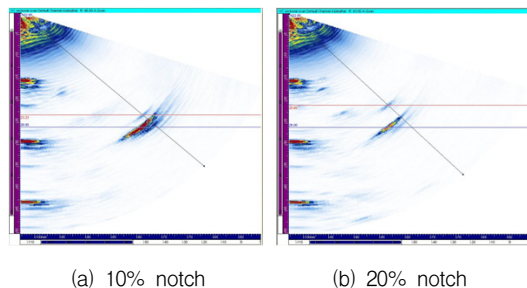


Fig. 9 Sectorial scan signal of 10% and 20% depth EDM notch

중심부에 위치한 노치 신호는 tip에서 반사된 신호와 노치의 아래쪽 코너에서 반사된 신호가 분리되어 나타났다. 취득된 신호에서 노치의 선단으로부터 반사된 tip 신호를 측정하여 깊이를 평가하였다. 평가 결과 10% 깊이의 노치는 2.77 mm로 측정이 되었으며 깊이가 20%인 노치는 5.05 mm로 측정이 되었다. Fig. 9의 (a)와 (b)의 왼쪽에 나타난 0° 신호에서는 시험편의 저면으로부터 반사되어 나타나는 다중신호(multiple signal)를 관찰할 수 있는데 이것은 0°에서 발생된 파가 재질내에서 종파로 전파되어 횡파보다 빠르게 전달되어 나타난 신호이다. 또한 굴절각이 20° 근처에서는 노치에 횡파로 전달되어 모드 변환후 종파로 전파된 신호가 나타나고 있다.

Fig. 10은 30%와 40% 깊이의 EDM 노치에 대한 취득 신호이다. 신호의 중간부에는 노치의 선단으로부터 반사된 tip 신호와 저면신호가 나타나 있으며, 좌측에 종파로부터 반사된 저면신호가 나타나 있다. 그림에 나타난 신호는 굴절각이 각각 45°와 55°에서 취득한 신호이다. 굴절각이 10°와 20°에서는 횡파로 전파되어 노치의 팁과 코너에서 모드 변환된 신호에 의하여 나타나는 신호가 관찰이 되었다. 취득된 신호를 이용하여 깊이를 평가한 결과 30% 깊이 노치는 7.33 mm이며, 40% 깊이 노치는 9.54 mm로 측정되었다.

Fig. 11은 50%와 60% 깊이의 EDM 노치로부터 취득된 신호를 나타내고 있다. 50%와 60% 노치의 tip 신호도 45° 굴절각에서 가장 양호한 신호 응답을 얻을 수 있었다.

50%와 60% 노치에 대한 깊이 측정 결과는 각각 12.68 mm와 14.71 mm로 측정이 되어 실제 깊이에 비하여 약 2% 이내의 오차로 측정되었

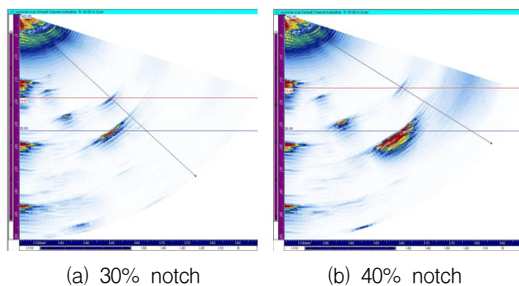


Fig. 10 Sectorial scan signal of 30% and 40% depth EDM notch

다. 50%와 60% 깊이의 신호에서도 동일하게 낮은 각도에서 모드 변환된 신호가 관찰되었다.

Fig. 12는 70%와 80% 깊이의 노치로부터 취득한 신호를 나타내었다. 70%와 80% 노치의 선단으로부터 반사된 신호가 굴절각이 55°와 62°에 나타나도록 탐촉자를 이동하여 신호를 취득하였다. 70%와 80%에서 취득된 신호의 깊이는 각각 17.31 mm와 20.02 mm이다. 실제 깊이와의 오차는 1.0%와 0.1%로 평가되었다.

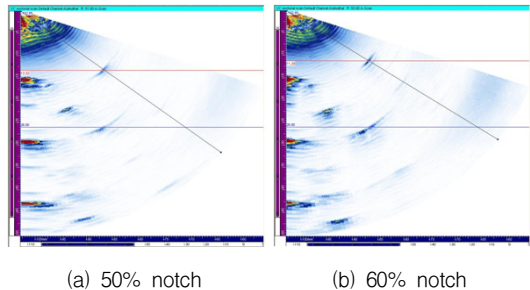


Fig. 11 Sectorial scan signal of 50% and 60% depth EDM notch

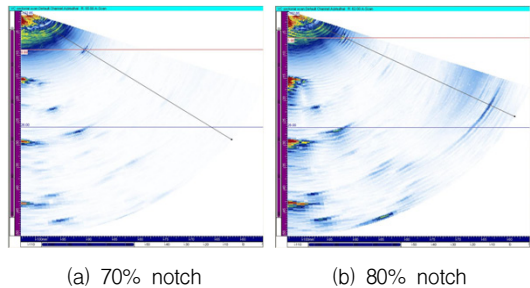


Fig. 12 Sectorial scan signal of 70% and 80% depth EDM notch

Table 4 EDM notch depth sizing evaluation results (unit: mm)

No	Actual	Measured	Error	% Error
#1	2.50	2.77	-0.27	10.8
#2	5.00	5.05	-0.05	1.0
#3	7.50	7.33	0.17	2.2
#4	10.00	9.54	0.46	4.6
#5	12.50	12.68	-0.18	1.44
#6	15.00	14.71	0.29	1.9
#7	17.50	17.31	0.19	1.0
#8	20.00	20.02	-0.02	0.1

시험편 내에 가공된 EDM 노치에서 취득된 신호에 대한 측정 결과를 Table 4에 요약하여 나타내었다. 측정 결과 실제 깊이와의 차이는 최대 0.46 mm였으며, 실제 결함과 측정 오차와의 %는 최대 10%로 나타났으나 깊이가 얇은 결함에서 동일한 차수의 오차로 측정되어 결과적으로 % 오차가 크게 계산이 되었기 때문이다.

## 5. 결 론

원자력발전소 또는 산업구조물 배관 용접부 검사를 위한 위상배열 초음파탐상기법에서 접근성을 높이기 위하여 웨지를 사용하지 않고 원하는 검사 각도를 모두 검사할 수 있는 횡파 위상배열 초음파 탐촉자 개발에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 용접부 검사에서 접근성 및 감도 향상을 위해 웨지를 부착하지 않고 검사대상의 표면에 직접 위상배열 초음파 탐촉자를 부착하여 높은 각도까지 유효한 횡파를 발생할 수 있는 횡파형 위상배열 초음파 탐촉자를 모델링을 통하여 설계하였다.
- 2) 설계 파라미터로부터 횡파 위상배열 초음파 탐촉자의 지향성을 분석하고 초음파 모델링을 통하여 굴절각도별 음장 계산으로 빔의 유효성을 확인하였으며, 다양한 깊이의 반사신호로부터 응답신호를 얻어 설계의 적합성을 검증하였다.
- 3) 모델링 결과를 이용하여 횡파 위상배열 초음파 탐촉자를 제작하고 -90°에서 90°까지 넓은 영역에 걸쳐 생성하였으나 검사에 영향을 미칠 수 있는 grating lobe는 관찰되지 않았다.
- 4) 다양한 깊이의 EDM 노치가 가공된 시험편에 대하여 신호를 취득하고 평가한 결과 최대 0.46 mm의 오차로 평가되어 결함의 측정 정밀도가 높은 것으로 나타났다.
- 5) 웨지를 부착하지 않고도 높은 검사각도를 발생시킬 수 있으므로 향후 용접부 크라운이 존재하는 용접부 검사 및 접근제한이 존재하는 대상의 적용시 검사 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [1] S. S. Lee and K. B. Kim, "Recent research trend for nondestructive testing technology," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 1, pp. 64-85 (2004)
- [2] B. S. Yoon, S. H. Yang and Y. S. Kim, "Procedure development and qualification of the phased array ultrasonic testing for the nuclear power plant piping weld," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 4, pp. 317-328 (2010)
- [3] Y. S. Cho, G. Y. Jung and S. K. Park, "A study on a crack evaluation technique for turbine blade root using phased array ultrasonics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 2, pp. 151-157 (2004)
- [4] S. W. Choi and J. H. Lee, "Analysis of the ultrasonic beam profile due to variation of the inter-element spacing for the phased array transducer," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 972-981 (2000)
- [5] Shi-Chang Wooh and Yijun Shi, "Optimum beam steering of linear phased arrays," *Wave Motion*, Vol. 29, pp. 245-265 (1999)
- [6] Shi-Chang Wooh and Yijun Shi, "Influence of phased array element size on beam steering behavior," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 737-749 (1998)
- [7] Sung-Jin Song and Chang-Hwan Kim, "Simulation of 3-D radiation beam patterns propagated through a planar interface from ultrasonic phased array transducers," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 519-524 (2002)
- [8] Robert J. McGough, "Rapid calculations of time-harmonic nearfield pressures produced by rectangular pistons," *Acoustical Society of America*, pp. 1934-1941 (2004)
- [9] CIVA: Simulation Software for Non Destructive Testing, [www-civa.cea.fr](http://www-civa.cea.fr)