

원전 소구경 배관 소켓용접부 위상배열 초음파검사 기술 개발

Development of the Phased Array Ultrasonic Testing Technique for Nuclear Power Plant's Small Bore Piping Socket Weld

윤병식*[†], 김용식*, 이정석*

Byung-Sik Yoon*[†], Yong-Sik Kim* and Jeong-Seok Lee*

초 록 소구경 배관 용접부 손상은 원자력발전소에서 빈번하게 발생되고 있는 문제이며, 이러한 손상은 보수를 위한 불시정지를 야기하고 결과적으로 발전소에 경제적인 손실을 초래한다. 따라서 소켓용접부의 제작결합 검출과 초기 성장 결함의 검출은 매우 중요하다고 할 수 있다. 지금까지 해당부위에 대한 검사는 ASME Code Section XI 요건에 의하여 표면검사를 적용하여 왔으나 강화검사로 체적검사기법인 초음파검사를 병행하여 수행하고 있다. 그러나 가동중에 발생하는 피로균열을 검출하기 위하여 적용되고 있는 일반 수동 초음파검사는 소켓용접부의 접근성과 초음파 탐촉자의 접촉 문제 등으로 인하여 검사 결과의 신뢰성에 문제가 있어 왔다. 본 연구에서는 위상배열 초음파검사 기술을 적용하여 소구경 배관 소켓용접부의 검사 신뢰성과 속도를 향상하고자 하였다. 이를 위하여 소구경 배관 소켓용접부 검사를 위한 3.5 MHz 위상배열 초음파 탐촉자를 제작하고 탐촉자의 접촉 조건과 일정한 신호 품질을 유지하기 위하여 수동 엔코더 스캐너를 개발하였다. 또한 검사 시스템을 구성하고 현장 검사를 위한 절차서도 개발하였다.

주요용어: 초음파탐상검사, 위상배열 초음파, 초음파 모델링, 소구경, 소켓용접부

Abstract Failure of small bore piping welds is a recurring problem at nuclear power plants. And the socket weld cracking in small bore piping has caused unplanned plant shutdowns for repair and high economic impact on the plants. Consequently, early crack detection, including the detection of manufacturing defects, is of the utmost importance. Until now, the surface inspection methods has been applied according to ASME Section XI requirements. But the ultrasonic inspection as a volumetric method is also applying to enforce the inspection requirement. However, the conventional manual ultrasonic inspection techniques are used to detect service induced fatigue cracks. And there was uncertainty on manual ultrasonic inspection because of limited access to the welds and difficulties with contact between the ultrasonic probe and the OD(outer diameter) surface of small bore piping. In this study, phased array ultrasonic inspection technique is applied to increase inspection speed and reliability. To achieve this object, the 3.5 MHz phased array ultrasonic transducer are designed and fabricated. The manually encoded scanner was also developed to enhance contact conditions and maintain constant signal quality. Additionally inspection system is configured and inspection procedure is developed.

Keywords: Ultrasonic Testing, Phased Array Ultrasonic, Ultrasonic Modelling, Small Bore, Socket Weld

1. 서 론

원자력발전소에 설치되어 사용중인 차단불능 소구경 배관 소켓용접부는 손상시 안전성에 영향을 미치지지는 않지만 손상 발생시 불시정지로 인한 경제적 손실과 전력수급 불안 등 원전 운전

에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 해외 원전의 경우 소구경 배관 소켓용접부에 대한 손상이 다수 발생한 것으로 보고되고 있으며, 90년대 미국 원전의 배관 관련 손상 450건 중 80%가 소구경 배관에서 발생하는 것으로 나타나 원전 운영에 있어서 중요한 관리 대상으로 인식되고 있다. 국내에

(접수일: 2013. 5. 13, 수정일: 2013. 7. 31, 심사완료일: 2013. 8. 6) *한수원 중앙연구원, [†]Corresponding Author: KHNP Central Research Institute (E-mail: bsyoon@khnp.co.kr)

서는 2008년 고리 3호기 증기발생기 배수배관 소켓용접부에 누설이 발생되어 발전소 중지후 보수한 사례가 있었다. 이를 계기로 국내 원전에 존재하는 소구경 배관 소켓용접부에 대한 전반적인 관리방안을 수립하고 ASME Section XI에서 요구하는 표면검사 방법 이외에 체적검사 방법을 사용하여 주기적으로 건전성을 확인하고 있다. 체적검사 기법중 방사선투과검사는 검사 소요시간이 길고 검사자의 피폭이 많이 발생할 뿐만 아니라 초음파검사에 비하여 결함 검출능력이 떨어지는 것으로 나타나 초음파검사 방법이 가장 적합한 대안으로 인식되어 왔다[1,2]. 그러나 초음파검사 기법 적용시에도 소구경 배관이 설치된 공간이 협소하고 검사자의 접근이 제한될 뿐만 아니라 배관의 직경이 작아 초음파 탐촉자를 균일하게 접촉하기가 어렵고 주사거리 및 주변 구조물과의 간섭으로 검사 여건이 적합하지 않아 검사 수행시 검사 신뢰성이 떨어지는 등의 문제점이 상존하여 왔다. Lee와 Park[3,4] 등은 일반 자동초음파 검사 기법을 적용하기 위하여 평가 소프트웨어와 자동검사 스캐너를 개발하였으며, 미국 전력연구소(EPRI)는 위상배열 초음파검사 기법을 개발하기 위하여 방사선투과검사 기법과 상호 비교하고 각각의 방법에 대한 결함 검출능에 대하여 평가를 하였다. 본 연구에서는 위상배열 초음파검사 기술을 적용하여 소구경 배관 소켓용접부를 검사하기 위한 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하고 제작하였으며, 현장검사에 적용할 수 있는 수동엔코더 스캐너를 개발하고 결함이 내재된 시험편을 이용하여 검사기술을 개발하였다.

2. 검사 기술 개발

2.1. 위상배열 초음파 탐촉자 설계

일반적인 초음파탐상검사는 하나의 진동자를 사용하여 정해진 굴절각도로 검사를 수행하지만 위상배열초음파검사는 하나의 탐촉자 내부에 다수의 압전소자를 배열하고 탐촉자를 움직이지 않고 각 압전소자들의 시간지연을 제어하는 값을 포함하는 focal law를 적용함으로써 검사 재질내에서 초음파의 굴절각도, 집속깊이(focused depth), 집속점에서의 빔의 반경(focal spot size)과 같은 다양한 변수들을 제어 할 수 있는 초음파검사 기

술이다.

소켓용접부 검사를 위한 위상배열 초음파 탐촉자는 검사대상의 외경과 주사거리를 고려하여 탐촉자의 크기를 최소화하고 높은 굴절각도까지 유효하게 초음파 빔이 발생하여야 하므로 압전소자의 수와 간격이 적절하게 설계되어야 한다. 또한 탐촉자 진단에 부착되는 웨지 또한 접근성을 개선하기 위하여 전단길이(front index)가 최소화 되어야 한다.

본 연구에서는 스테인리스강 소구경 배관 소켓용접부 검사를 위하여 16개의 압전소자를 배열한 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하고자 하였다. 그리고 주파수는 일반적인 스테인리스강 검사에 적합한 것으로 알려진 3.5 MHz로 결정을 하였다. 압전소자 개수와 주파수가 결정되었으나 위상배열 초음파 탐촉자의 특성을 결정하는 가장 주요한 변수는 압전소자 사이의 간격인 피치(pitch)이며, 피치값에 따라서 압전소자 별로 발생하는 파의 간섭 효과로 side lobe 또는 grating lobe 등이 발생할 수 있으므로 탐촉자 개발시 설계단계에서 이를 고려하여야 한다.

Fig. 1은 정해진 주파수와 압전소자에서 45°로 빔을 발생할 때 피치값의 변화에 따른 지향성 분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 피치값에 따라 빔의 폭이 넓게 나타나거나 0°에서 빔이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 1의 결과로부터 최적의 피치값을 0.4 mm로 선정을 하였다. Fig. 2는 피치가 0.4 mm이고 40 mm 깊이에 빔을 집속할 때 각도에 따른 초음파 빔의 지향성 계산 결과를 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 계산 결과에서와 같이 main beam에 대한 지향성이 뚜렷하고, main beam 주위

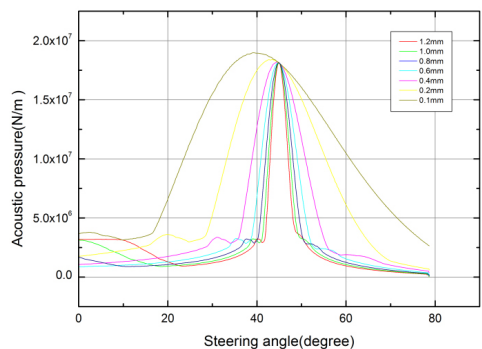


Fig. 1 Directivity plot at 45° steering angle for phased array probe pitch

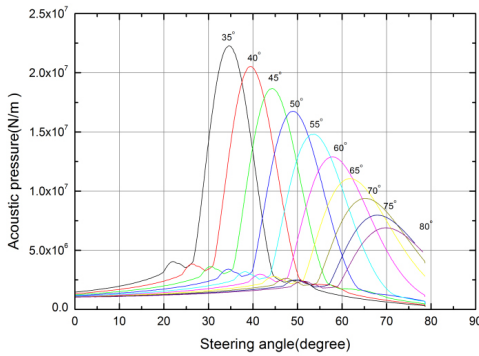


Fig. 2 Directivity plot for steering angles at 0.4 mm pitch and 40 mm depth focus from front of elements

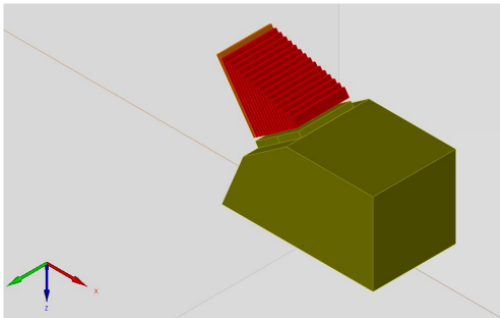


Fig. 3 The 3D modelling of probe and wedge for phased array ultrasonic beam field computation

에 side lobe가 발생되지 않았다. 또한 35°에서부터 80°까지 전체 굴절각도에 대하여 빔이 유효하게 발생되었다. 그러나 60° 이상의 각도에서는 계산된 굴절각과 입력된 굴절각도 사이에 오차가 발생하였다. 실제적으로 위상배열 초음파 탐촉자를 제작하기 위해서는 탐촉자의 폭과 탐촉자에 적합한 웨지를 설계하여야 한다[5]. 지향성 계산으로부터 결정된 압전소자의 피치값을 확인하고 웨지의 크기를 결정하기 위한 초음파 모델링을 위하여 모델링 소프트웨어 CIVIA[6]를 사용하여 Fig. 3과 같이 초음파 탐촉자와 35° 경사각을 가진 웨지를 설계하였다.

Fig. 3과 같이 구성된 탐촉자와 웨지를 이용하여 소켓용접부와 동일한 스테인리스강 재질에서 초음파 빔의 음장을 계산하였다. Fig. 4는 35°에서부터 80°까지 계산한 초음파 빔의 음장을 나타내었다. 계산 결과에서 나타난 것과 같이 빔의 형상이 적절하며 선정된 압전소자들의 피치값 및 웨지의 형상이 적합함을 확인할 수 있었다.

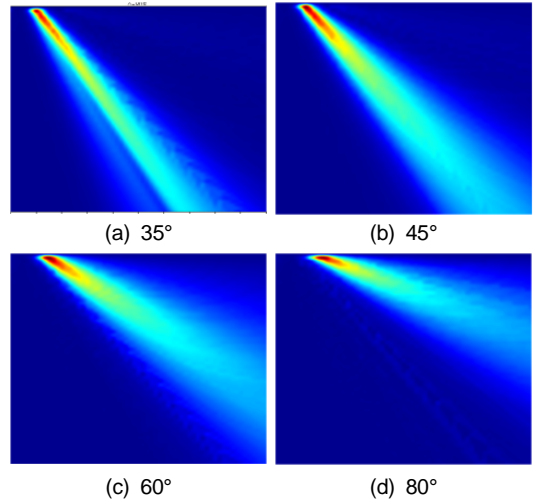


Fig. 4 The beam computation results from designed phased array probe and wedge

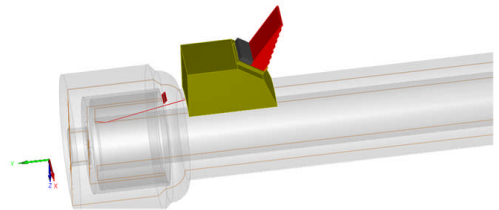


Fig. 5 The 3D modelling for phased array ultrasonic flaw response computation

빔 모델링에서 사용된 탐촉자와 웨지의 파라미터를 이용하여 실제 제작에 앞서 결함이 내재된 소켓용접부에서 결함으로부터 반사된 신호를 확인하기 위한 계산을 하였다. 직경이 25.4 mm인 소켓용접부 형상에서 배관과 커플링 그리고 용접부가 만나는 triple point에 길이 2 mm와 높이 1 mm 결함을 삽입하고 계산을 하였으며, triple point는 결함이 가장 빈번하게 발생하는 위치이다. Fig. 5는 설계된 탐촉자와 웨지가 25.4 mm 직경의 소켓용접부 외경에 위치한 형상을 나타내었다.

Fig. 6은 탐촉자가 결함의 중심점에 위치하였을 때 35°에서부터 80°까지 생성된 빔을 표시한 sectorial scan 신호와 47° 각도에서 탐촉자가 원주방향으로 회전을 하였을 때 나타난 C-scan 신호를 표시하였다. sectorial scan 신호에서 나타난 것과 같이 결함은 42°에서부터 53° 각도에서 나타났다.

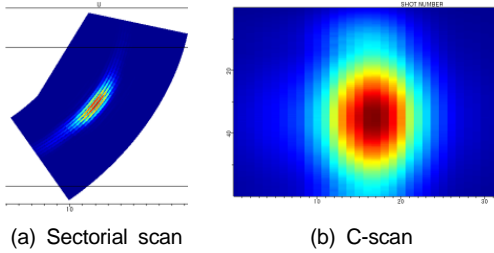


Fig. 6 The flaw response modelling result for 25.4 mm OD socket weld pipe

Table 1 Specification of phased array ultrasonic transducer

Parameter	Design Value
Frequency	3.5 MHz
No. of elements in primary axis	16
Primary axis pitch	0.4 mm
Inter element spacing	0.05 mm
Width of element	7.0 mm
Total active length	9.5 mm

Table 2 Specification of wedge for phased array ultrasonic transducer

Parameter	Design Value
Wedge angle	35°
Wedge length	18 mm
Roof angle	0°
Wedge width	11 mm
Wedge sound velocity	2,337 m/s
Contour	12.7 mm

모델링에서 사용한 초음파 탐촉자와 웨지의 설계값은 Table 1과 Table 2와 같으며, 이를 이용하여 탐촉자 제작을 위한 파라미터를 결정하였다.

2.2. 반자동 스캐너 개발

소구경 배관 소켓용접부는 두께가 얇고 배관쪽 용접 다리 길이로 인하여 탐촉자 입사점과 검사 영역이 멀기 때문에 1 스킵 빔 거리가 아닌 2~3 스킵 거리로 초음파 빔이 triple point 부위에 도달한다. 그리고 다중반사로 인하여 복잡한 신호가 나타나 A-scan 신호만으로는 결함의 유무를



Fig. 7 Hand driving manual encoded scanner for small bore socket weld piping

명확하게 평가하기가 어렵다. 또한 검사 공간이 협소한 지역에서 소형 위상배열 초음파 탐촉자를 소구경 배관에 일정한 접촉상태를 유지하면서 원주방향으로 주사를 하고 이와 동시에 탐상기의 신호를 확인하여야 하므로 검사자가 평가에 집중하기가 어려워 결과적으로 검사의 신뢰성이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 탐촉자를 고정하고 소구경 배관의 외경에 체결할 수 있는 링형 스캐너를 개발하였다. 스캐너는 180° 반원이 두 개 연결된 형태로 배관에 체결이 되도록 하였으며, 탐촉자의 접촉력을 조절할 수 있고 스캐너가 원주방향으로 회전함에 따라 탐촉자의 원주방향 위치를 위상배열 초음파탐상기에 전달할 수 있는 극소형 엔코더가 부착되어 있다. Fig. 7은 본 연구에서 개발한 수동 스캐너의 3D 설계 형상과 제작된 스캐너의 모양을 나타내었다.

3. 시험편 및 실험방법

3.1. 시험편

본 연구에서는 실험을 위하여 2종류의 시험편을 사용하였다. 하나는 개발된 검사 시스템의 성능평가를 위하여 1인치 304 스테인리스 봉에 깊이가 서로 다른 4개의 EDM(electric discharge machining) 결함을 90° 간격으로 가공된 커플러를 배관에 체결한 시험편이며, 또 하나의 시험편은 원전 1차 계통의 일반적인 소켓용접부 형상과 결함 유형을 고려한 결함시험편을 설계하고 제작하였다. Fig. 8은 EDM 결함시험편의 결함 정보와 시험편의 형상을 나타내었다.

피로균열 시험편의 재질은 304 스테인리스강이며 배관과 커플링이 소켓으로 용접된 공칭직경 3/4인치와 2인치 배관을 각각 설계하고 제작하였다. Fig. 9는 3/4" 직경 결합시험편의 설계도면이며, Fig. 10은 제작된 시험편을 나타내었다.

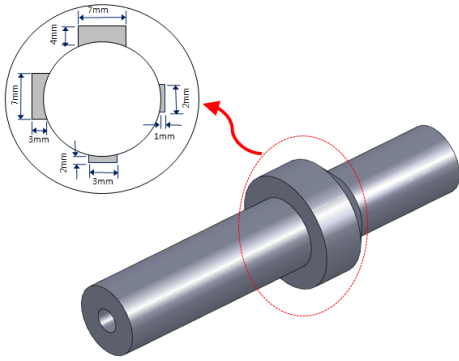


Fig. 8 Detail information of EDM flawed specimen

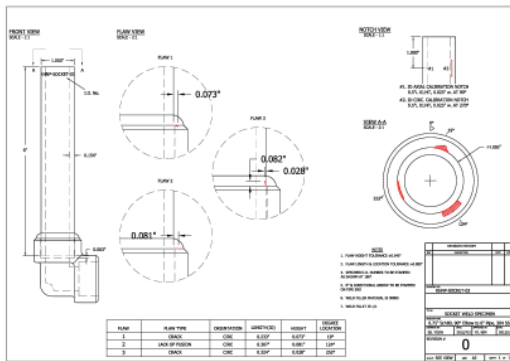


Fig. 9 Design drawing of 3/4" flawed socket weld specimen



Fig. 10 Photo of manufactured flawed socket weld specimens

Table 3 Detail information of the flaws contained flawed specimens

No	Orient.	Flaw Type	Flaw Size(mm)		
			Length	Depth	% Depth
1	Circ.	Crack	5.91	1.85	47
2	Circ.	VLOF	7.79	2.05	53
3	Circ.	Crack	8.22	0.71	18
4	Circ.	VLOF	16.84	2.00	36
5	Circ.	Crack	10.54	2.31	42
6	Circ.	HLOF	14.73	3.81	69

결합시험편에는 소켓용접부에서 발생할 수 있는 결합 유형을 분석하여 하나의 시험편에 3개의 결함이 포함되도록 설계하여 모두 6개의 결함을 삽입하였다. 삽입된 결함의 유형은 triple point에서 진전되는 피로균열 결함과 배관과 용접재질 경계에 발생한 수평용착불량(horizontal lack of fusion, HLOF) 및 커플링과 용접재질 경계에 발생한 수직용착불량(vertical lack of fusion, VLOF)들이다. 삽입된 결함의 상세 사상은 Table 3과 같다.

실험에 사용할 검사 시스템의 교정과 기준감도 설정을 위하여 결합시험편과 동일한 재질을 이용하여 외경과 내경에 깊이 25%의 EDM 노치를 가공한 교정시험편을 제작하였다.

3.2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 위상배열 초음파장치는 16 채널 구동이 가능하고 현장 검사시 휴대가 가능한 ZETEC사의 Omniscan 장비를 사용하였다. Omniscan에서 취득한 신호는 TCP/IP 통신으로 연결된 노트북에 저장되고 신호평가용 소프트웨어인 Ultravison 1.1Q6 버전을 사용하였다. 실험을 위하여 구성된 실험 시스템의 구성은 Fig. 11과 같다.

결합시험편에 가공된 결함을 검출하기 위하여 시험편에 스캐너를 체결한 다음 기준점을 설정하고 스캐너를 시험편의 원주방향으로 360° 회전을 하여 신호를 취득하였다. 실험에 사용된 위상배열 초음파탐상장치의 설정값은 Table 4와 같다.

제작된 위상배열 초음파 탐촉자의 중심주파수는 3.4 MHz이며, 대역폭은 60%이다. Fig. 12에 제작된 초음파 탐촉자의 실물을 나타내었다.

Table 4 Experimental parameters

Parameter	Setting
Gain	40 dB
Digitizing frequency	50 MHz
Inspection mode	Pulse-echo
Steering angle	35°~80°
Angle resolution	1°
Voltage	80 V

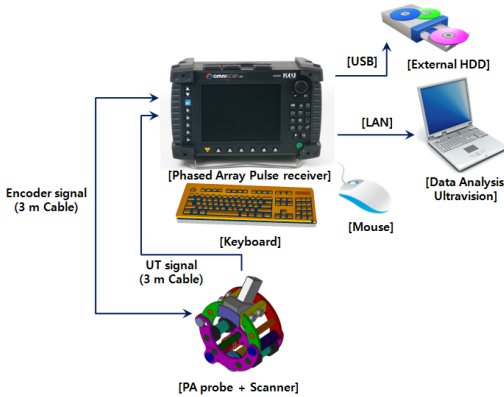


Fig. 11 The experimental setup of phased array ultrasonic system



Fig. 12 Manufactured phased array ultrasonic transducer and wedge

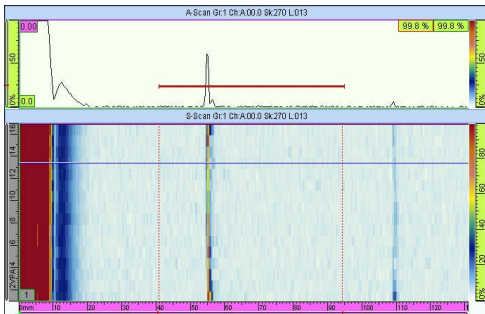


Fig. 13 The active elements check for phased array transducer

탐촉자내의 16개 압전소자가 건전하고 압전소자간의 성능이 동일한지를 확인하기 위하여 탐촉자에 웨지를 체결하지 않고 두께가 일정한 평판 시험편에 수직으로 빔을 발생하여 저면에서의 반사된 파형을 측정하였다. 측정 결과 모든 압전소자가 작동을 하였으며, 최대진폭을 전체화면의 80% 높이로 설정하였을 때 50% 미만인 압전소자가 없으므로 위상배열 초음파 탐촉자의 성능은 양호하게 나타나는 것으로 확인되었다. Fig. 13은 압전소자 점검 결과를 표시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

소켓용접부 검사 시스템의 성능을 확인하기 위하여 EDM 결함시험편의 커플러 상부쪽에 스캐너를 체결하고 스캐너를 원주방향으로 360° 회전하여 신호를 취득하였다. 취득한 신호를 평가한 결과 Fig. 14와 같이 90° 간격으로 가공된 4개의 EDM 노치가 모두 검출이 되었다.

Fig. 14에서 나타난 것과 같이 EDM 결함시험편 검사 결과는 전체 검사 각도인 35°에서 80°까지의 각도별 신호가 검사 결과의 오른쪽 하단에 sectorial scan 신호로 나타나며, 각각의 각도에 대하여 B-scan과 C-scan을 확인하였다. 또한 B-scan과 C-scan의 모든 위치에 대하여 A-scan 신호를 확인하면서 평가 하였다.

깊이 평가는 B-scan 신호에서 결함신호의 진폭이 시작되는 곳과 신호의 진폭이 끝나는 곳의 원주방향 거리를 측정한 full dB drop 방법을 적용하였다. 그리고 결함의 높이는 결함의 tip으로부터 반사한 신호를 이용한 AATT(absolute arrival time technique)을 이용하여 측정을 하였다[7]. 배관 쪽에서 검사를 할 경우에는 배관 내경과 외경

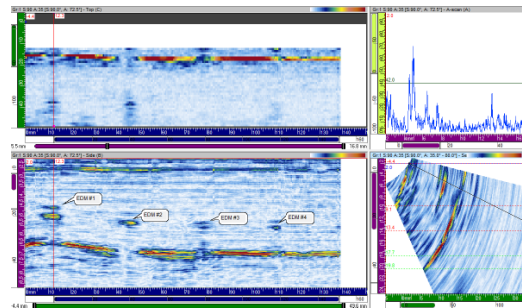


Fig. 14 Experimental results for EDM flawed specimen

Table 5 EDM notch depth sizing evaluation results (unit: mm)

No	Circ. Position	Actual(mm)		Measured(mm)	
		Length	Depth	Length	Depth
1	0°	7.0	3.81	7.4	3.6
2	90°	7.0	3.05	7.0	3.1
3	180°	3.0	2.03	3.5	1.9
4	270°	2.0	1.75	3.0	1.6

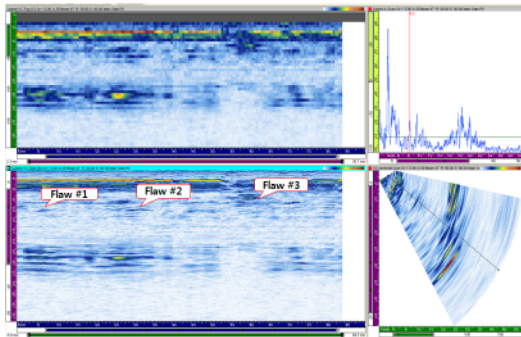


Fig. 15 Signal analysis result of 3/4" socket weld flawed specimen

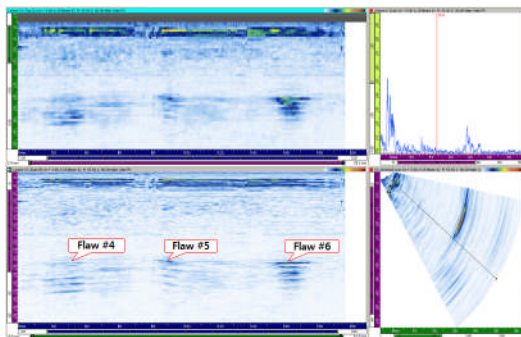


Fig. 16 Signal analysis result of 2" socket weld flawed specimen

Table 6 Thermal fatigue crack length sizing evaluation results(unit : mm)

No	Type	Actual	Measured	Error
#1	Crack	5.91	5.5	0.41
#2	VLOF	7.79	6.7	1.09
#3	Crack	8.22	6.0	2.22
#4	VLOF	16.84	17.0	-0.16
#5	Crack	10.54	12.0	-1.46
#6	HLOF	14.73	14.0	0.73

의 경계면 사이의 다중반사로 인하여 결함의 tip 신호를 확인할 수 없으나, 커플러 상부에서 검사를 할 경우에는 0.5 skip 거리에서 반사파를 얻을 수 있으므로 결함의 선단으로부터의 신호를 확인할 수 있게 된다. EDM 결함시험편은 커플러 상부쪽에서 직접 신호를 취득하여 결함의 coner trap 신호와 결함의 선단에서 반사된 신호가 함께 검출이 되었으며, 이를 이용하여 결함의 깊이를 측정하였다. Table 5에 EDM 결함시험편에 길이와 깊이 측정 결과를 나타내었다.

피로균열과 LOF(lack of fusion) 결함이 삽입된 소켓용접부 결함시험편을 이용하여 실험한 결과에 대하여 신호를 평가하였다. 피로균열 시험편은 배관에 용접된 커플러의 형상이 엘보우 형상이며, 주조로 제작이 되어 커플러 쪽에서의 검사는 불가능하므로 배관에 스캐너를 체결하고 신호를 취득하였다. 공칭직경 3/4" (19.05 mm)인 결함 시험편에 대한 평가 결과는 Fig. 15와 같이 나타났다. 그림에서와 같이 LOF와 피로균열 결함 3개가 35°에서부터 80°까지의 굴절각중 47° 전후 각도에서 검출이 되었으며, B-scan 신호에서 결함의 길이를 측정하였다. 길이 측정 결과 피로균열과 LOF 결함의 길이가 실제보다 조금 길게 측정되었다. 취득한 신호에서 균열 tip 신호는 확인이 되지 않아 깊이는 측정할 수 없었다.

3/4" 직경 시험편에 가공된 1번 결함은 triple point에서 시작되어 커플링 쪽으로 성장한 피로균열 결함으로 균열의 방향이 초음파 진행 방향과 동일한 방향이므로 결함의 진폭이 상대적으로 작게 나타났다.

공칭직경 2.0"(50.8 mm)인 결함시험편에 대한 실험결과는 Fig. 16과 같이 나타났다. 그림에서와 같이 LOF 결함 2개와 피로균열 1개가 모두 검출이 되었으며, B-scan 신호에서부터 결함의 길이를 측정하였다.

2.0" 결함시험편에서는 HLOF 결함이 가장 큰 진폭으로 명확하게 나타났으며 이는 초음파 탐촉자와 가장 근접하고 결함면의 면적이 넓기 때문인 것으로 분석되었다.

결함시험편에 삽입된 6개의 결함에 대한 크기 평가 결과를 Table 6에 나타내었다.

길이 측정 결과의 최대 오차는 2.22 mm이며, 전체 결함에 대한 RMSE(root mean square error)는 1.22 mm로 계산되어 결함의 길이 측정의 정

밀도가 높은 것을 확인할 수 있다. RMSE는 아래의 식으로부터 산출하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n}} \quad (1)$$

여기서 m_i = 측정된 결함의 길이
 t_i = 실제 결함의 길이
 n = 측정한 결함의 수

5. 결론

원자력발전소 1차 계통에 설치된 차단불가 소구경 배관 소켓용접부 검사를 위한 위상배열 초음파탐상검사 기술에 관한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 소구경 배관 소켓용접부 검사에 적합하도록 검사 재질 내에서 35°에서 80°까지 초음파 빔을 생성할 수 있는 16개의 압전소자가 배열된 3.5 MHz 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하고 개발하였으며, 모델링 결과 전체 검사 각도에서 검사에 영향을 미칠 수 있는 음향간섭 효과 등은 발생하지 않았다.
- 2) 위상배열 초음파 탐촉자가 소구경 배관에 일정한 접촉을 유지하면서 원주방향 회전에 따른 위치를 인코딩 할 수 있는 반자동 스캐너를 개발하였다.
- 3) 본 연구에서 개발된 검사 시스템을 이용하여 피로균열과 용접결함이 삽입된 시험편에 대하여 실험한 결과 가공된 모든 결함을 검출할 수 있었으며, RMSE 1.22 mm로 검출이 되어

신뢰성 있는 검사가 가능하였다.

- 4) 본 연구에서 개발한 검사 기술을 적용하여 검사절차서를 개발하였으며, 원전 소구경 배관 소켓용접부에 적용함으로써 검사 소요시간이 감소되어 검사자 피로저감에도 기여할 수 있을 뿐만 아니라 소켓용접부 검사 신뢰성을 향상할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] EPRI TR-1016671 "Nondestructive Evaluation: Volumetric Examination of Small-Bore Piping Welds," (2008)
- [2] EPRI TR-107455, "Vibration Fatigue of Small Bore Socket-Weld Pipe Joints," (1997)
- [3] J. K. Lee, M. H. Park and K. S. Park, "Development of the automated ultrasonic testing system for inspection of the flaw in the socket weldment," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 3, pp. 275-281 (2004)
- [4] D. M. Lee, M. S. Park and K. S. Kim, "Development of the ultrasonic inspection system for socket weld," *Proceeding of the KSNT Spring Conference*, pp. 135-139 (2007)
- [5] RD-Tech, "Introduction of Phased Array Ultrasonic Technology Applications," pp. 37-39 (2006)
- [6] CIVA: "Simulation Software for Non Destructive Testing," www-civa.cea.fr
- [7] Davis Mark, "Advanced Ultrasonic Flaw Sizing Handbook," Davis Nde, Inc, ISBN 1-884285-06-6, (2001)