

원자력발전소 배관 용접부 위상배열 초음파검사 절차서 개발 및 기량검증

Procedure Development and Qualification of the Phased Array Ultrasonic Testing for the Nuclear Power Plant Piping Weld

윤병식*[†], 양승한*, 김용식*, 이희종*

Byung-Sik Yoon*[†], Seung-Han Yang*, Yong-Sik Kim* and Hee-Jong Lee*

초 록 원자력발전소 배관 용접부에 대한 수동 초음파검사는 KPD(Korean Performance Demonstration)의 일반 절차서를 사용하여 기량 검증을 인정받고 있으나, 자동 초음파검사의 경우에는 일반 절차서가 없으며 해당 자동 검사 장비를 이용하여 절차서 기량 검증을 받아야 한다. 현재까지 국내에서 수행되고 있는 자동 초음파검사에 대한 절차서 기량검증은 대부분 펄스-반사기법을 적용한 절차서이나, 최근에 각광받고 있는 위상배열 초음파검사 기법을 이용한 절차서 기량검증은 국내에서 시행된 사례가 전무하다. 본 연구에서는 원자력발전소 가동중검사에 위상배열 초음파검사 기법을 적용하기 위하여 위상배열 초음파 신호취득 및 평가 소프트웨어를 개발하고 위상배열 초음파 탐촉자 및 웨지를 설계 하였다. 개발된 절차서에 대하여 결함 검출, 길이 및 크기 측정에 대한 기량검증을 수행하였으며, 검증된 위상배열 초음파탐상검사 절차서는 향후 원자력발전소 배관 용접부 검사에 적용할 예정이다.

주요용어: 원자력발전소, 비파괴검사, 초음파검사, 위상배열 초음파검사, 기량검증

Abstract The manual ultrasonic examination for the nuclear power plant piping welds has been demonstrated by using KPD(Korean Performance Demonstration) generic procedure. For automated ultrasonic examination, there is no generic procedure and it should be qualified by using applicable automated equipment. Until now, most of qualified procedures used pulse-echo technique and there is no qualified procedure using phased array technique. In this study, data acquisition and analysis software were developed and phased-array transducer and wedge were designed to implement phased array technique for nuclear power plant in-service inspection. The developed procedure are qualified for performance demonstration for the flaw detection, length sizing and depth sizing. The qualified procedure will be applied for the field examination in the nuclear power plant piping weld inspection.

Keywords: Nuclear Power Plant, Nondestructive Examination, Ultrasonic Examination, Phased Array Ultrasonic Examination, Performance Demonstration

1. 서론

국내 운영중인 원자력발전소의 가동중검사는 KEPIC(전력기술기준) MI 또는 미국 ASME Code Section XI 기술기준 요건에 따라 수행되고 있다.

특히 원자력발전소 원자로 및 원자로 냉각재계통의 주요 배관과 기기에 대한 검사 기준은 검사 신뢰성 확보를 위해 기량검증을 요구하고 있다. 이에 따라 국내에서는 2004년부터 원전의 주요 배관 및 원자로에 대해 ASME Code Sec.XI Appendix VIII 요

건에 따라 기량검증된 검사자가 검사를 수행하고 있다. 기량검증 (performance demonstration) 제도를 시행하게 된 배경은 1983년도에 미국의 BWR 배관 계통의 입계 응력 부식균열(intergranular stress corrosion cracking: IGSCC)결함에 대한 round robin test 결과와 1974년부터 시작된 PISC (program for inspection of steel components) 결과 등을 보완하기 위하여 초음파탐상검사 시스템 자격 인증 체계가 제안되었으며, ASME Section XI 1989년 winter addenda에서 처음으로 원전 가동중 검사를 수행하는 초음파탐상 검사 시스템에 대하여 기량검증을 요구하게 되었다[1]. 기량검증이란 원자력발전소의 주요설비 용접부에서 발생되는 실제 결함과 유사한 결함을 내포한 시험편을 검사부위, 재질, 두께 및 형상별로 제작하여 초음파탐상 검사자로 하여금 정해진 절차서 및 장비를 사용하여 결함을 검출하고 평가하는 시험을 통해서 일정 수준 이상의 검사능력을 입증하고 자격을 인정하는 제도이다. 미국에서는 2000년부터 EPRI(Electric Power Research Institute)가 기량검증을 주관하여 시행하고 있으며, 국내 원자력발전소에 대해서는 2004년 7월 1일부터 교육과학기술부 고시 2004-13 '원자로 시설에 대한 가동중검사 및 시험에 관한 요건'에 의하여 모든 원자력발전소 초음파탐상 검사자에 대한 기량검증이 수행되고 있다. 또한 자동검사에 대하여도 다수의 절차서 기량검증을 통하여 다양한 절차서가 기량검증이 완료되어 원자력발전소 배관 용접부에 적용을 할 수 있는 기반이 마련되어 있다.

최근 들어 많은 관심을 끌고 있는 위상배열 초음파탐상 검사 기법은 원전 적용을 위한 기술개발이 다양한 분야에 걸쳐 진행되고 있으나[2,3] 원전 배관 용접부 검사를 위한 절차서 기량검증은 현재까지 국내에서 수행된 사례가 없다.

따라서 본 연구에서는 위상배열 초음파 펄스-리시버로부터 위상배열 초음파 신호를 취득하고 평가할 수 있는 소프트웨어를 개발하고, 다양한 형상을 가진 배관에 적합한 탐촉자와 웨지 개발을 수행하였으며, 전체 검사 시스템을 구성하여 현장에 적용이 가능한 위상배열 초음파탐상 검사 절차서를 개발하였다. 또한 개발이 완료된 절차서에 대하여 절차서 기량검증을 수행함으로써 최신 기술인 위상배

열 초음파 탐상검사 기법을 국내 원전에도 적용할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 위상배열 초음파

위상배열 초음파탐상 검사의 기본 원리는 배열된 압전소자에 시간지연을 적용함으로써 호이겐스(Huygens)의 원리[4]에 의하여 초음파의 진행방향을 적절하게 조절하는 것이다. 위상배열 초음파기법을 적용한 검사에서는 검사 대상 또는 목적에 적합한 탐촉자를 선정하는 것이 선행되어야 한다. 위상배열 탐촉자는 탐촉자의 여러 가지 변수에 따라 특성 및 성능이 결정되므로 각 변수에 대한 특성이 명확하게 정의 되어야 한다[5]. 위상배열 초음파 탐촉자 설계 변수는 아래 Fig. 1에서와 같다[6].

일반적으로 위상배열 초음파를 이용한 빔의 집속은 근거리음장영역(near-field) 이내에서 이루어지며, 위상배열 초음파 탐촉자의 근거리음장은 식(1)과 같이 탐촉자의 aperture와 파장(λ)에 의하여 결정된다. 따라서 aperture가 클수록, 또는 압전소자의 수가 많을수록 근거리음장은 커지게 되며 집속할 수 있는 집속능력이 증가하게 된다.

$$N = \frac{A^2}{4\lambda} \quad (1)$$

그리고 주어진 탐촉자의 크기(aperture)와 주파수로부터 얻을 수 있는 굴절각의 범위는 근거리음장 식의 반대로서 크기가 작고 파장이 클수록 넓어지게 된다. 초음파 탐촉자의 굴절 각도는 식(2)와 같이 계산된다[7].

$$\sin\theta = 0.5 \frac{\lambda}{A} \quad (2)$$

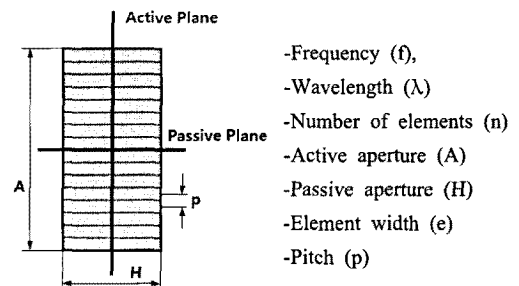


Fig. 1 Phased array probe parameters

그리고 특정 깊이 z에서의 위상배열 초음파의 빔 직경 d는 식(3)에서와 같이 파장에 비례하고 크기에 반비례하여 나타난다. 따라서 주파수가 클수록 집중 빔의 크기는 작아지게 된다.

$$d = \frac{\lambda z}{A} \quad (3)$$

3. 위상배열 초음파탐상검사 시스템 개발

자동 위상배열 초음파탐상검사 시스템은 위상배열 초음파 펄스 발생장치와 펄스를 제어하고 신호를 수집 및 평가할 수 있는 위상배열 초음파 소프트웨어 및 스캐너, 그리고 스캐너를 제어할 수 있는 모터제어기 및 탐촉자와 현장작업을 위한 절차서로 구성된다. 일반적인 위상배열 초음파탐상검사 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 원자력발전소 검사 적용을 위하여 위상배열 초음파 펄스 발생장치를 제외한 시스템 구성요소를 개발하였다.

3.1. 위상배열 초음파검사 소프트웨어 개발

위상배열 초음파 장비를 제어하고 신호를 취득하기 위한 위상배열 신호 취득 및 평가 프로그램은 일반적인 자동 초음파 프로그램과 달리 다양한 각도에 대한 신호를 동시에 처리하여야 하므로 소프

트웨어가 최적화되어야 하며 신호 처리에 있어서도 손실이 발생하지 않아야 한다. 위상배열 초음파 펄스-리시버는 Zetec사의 Dynaray를 사용하였으며, 소프트웨어의 개발은 장비 제작사에서 제공한 API(application programming interface)를 기본으로 사용하였다. 개발된 소프트웨어의 명칭은 "SonicStation"이며 개발 환경은 Microsoft Visual C++.Net이다. 소프트웨어에서 취급이 가능한 최대 파일 크기는 약 20G 바이트이며, 일반적인 자동 초음파 소프트웨어에서 나타낼 수 있는 신호 표시방식을 모두 채택하였다. 개발된 소프트웨어 시작화면은 아래 Fig. 3과 같다.

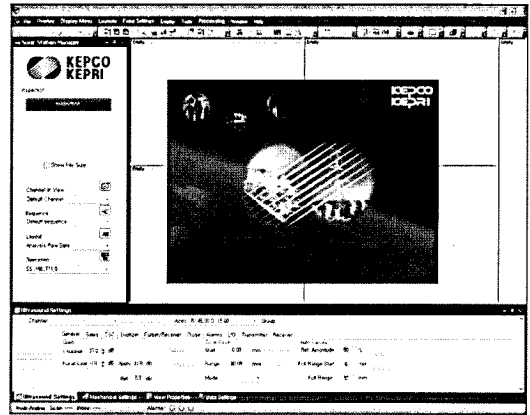


Fig. 3 The splash window and main screen of SonicStation 1.0 software

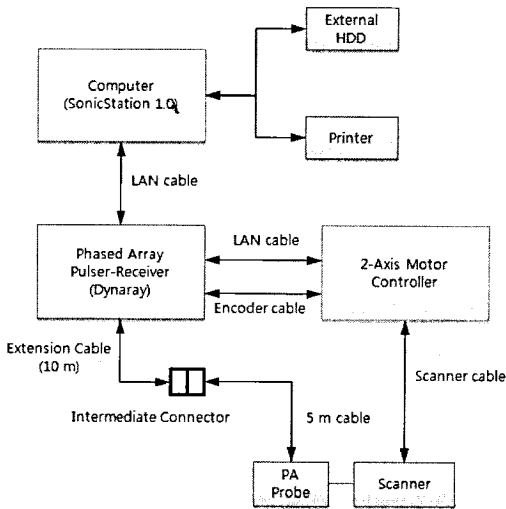


Fig. 2 Schematic diagram of phased array inspection system

3.2. 탐촉자 설계 및 제작

국내 원전 원자로 냉각재계에 설치된 동종급속 배관은 오스테나이트 스테인레스 강과 페라이트 탄소강의 재질로 구성되어 있으며 직경이 최소 2" (50.8 mm)에서부터 최대 50" (1,270 mm)까지이다. 그러나 위상배열 초음파탐상검사의 특성상 4" (10 mm)이하의 직경은 스캐너 부착 및 위상배열 초음파 탐촉자의 크기로 인하여 자동검사가 적합하지 않으므로 현장검사 및 기량검증을 위하여 4" (101 mm)이상의 배관에 대해서만 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하였다. 크기와 두께가 다른 다양한 배관 검사를 위하여 배관 형상을 고려한 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하였다. 설계된 탐촉자 사양은 Table 1과 같다. 위상배열 초음파 탐촉자는 압전 소자의 크기와 수량 및 압전소자간의 피치에

따라서 초음파 발생 특성이 다르게 나타나므로 이를 고려하여 설계를 하였다[8].

Table 1 Detail specification of phased array probe

Probe size	S	M	L
Pipe OD	4" ~ 6" (101 ~ 152 mm)	12" ~ 24" (304 ~ 609 mm)	>24" (609.6 mm)
Frequency (MHz)	3.5	1.5	1.5
Primary Element number	5	5	8
Secondary Element number	3	3	4
Primary Pitch (mm)	1.5	3.5	3.5
Secondary Pitch (mm)	1.5	3.0	4.0

설계된 위상배열 초음파 탐촉자를 사용하여 실제 배관검사를 수행하기 위해서는 시험편의 곡률을 고려하여 탐촉자 접촉면이 곡률 가공되어야 하며 검사 굴절각도 범위 이내에서 사이드 로브(side lobe)와 같은 음향 간섭이 발생하지 않아야 한다. 따라서 검사대상과 탐촉자 사이에 웨지(wedge)를 가공함으로써 굴절각도 범위 전체에서 부차적인 음향효과를 감소할 뿐만 아니라 시험편 외경에 적합하도록 표면 곡률 가공도 가능하다. Fig 4는 4" 직경의 배관검사를 위하여 설계된 축방향 주사용 횡파 웨지와 원주방향 주사용 웨지이다.

탐촉자와 웨지를 설계하고 실제 검사에 적용하였을 경우의 초음파 음파특성을 평가하기 위하여 시험편에 대한 빔 모델링을 수행하였다. 빔 모델링의 목적은 배관검사시 적용하는 굴절각도인 40°와 70° 범위의 굴절각도에서 초음파 빔이 유효하게 진행되며 부차적인 음향간섭 효과가 나타나는지를 확인하는 것이다. Fig. 5는 빔 모델링 결과를 나타낸다. 초음파 빔의 굴절각이 40°와 64° 사이에는 사이드 로브가 발생되지 않았으나 초음파 빔이 65° 굴절각 일 때 주 빔 하단에 미세한 크기의 사이드 로브가 나타나기 시작하여 70°까지 존재하였으며, 주 빔에 대한 강도는 상대적으로 미세하여 실제 검사에 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

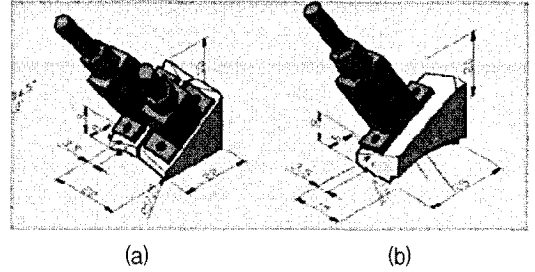


Fig. 4 Wedge design for 4" diameter piping weld inspection; (a) Axial scan (b) Circumferential scan

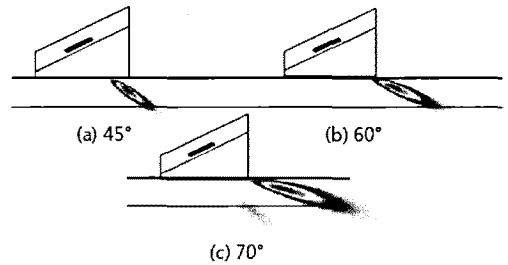


Fig. 5 Ultrasonic beam modelling for the 4" diameter piping sample

3.3. 절차서 개발

절차서 기량검증 및 현장검사를 위하여 앞서 구성된 위상배열 초음파탐상검사 시스템을 이용하여 절차서를 개발하였다. 절차서는 ASME Code Section XI Appendix VIII, Article VII-2000의 모든 요건을 고려하여 개발하였다. 기본적인 검사 기법은 두 개의 위상배열 초음파 탐촉자를 이용하여 pitch-catch 모드로 검사를 하였으며 축방향 결함검출을 위한 주사에는 펄스-에코(pulse-echo) 모드로 검사를 하였다. 원주방향 결함검출을 위한 검사각도와 축방향 결함 검출을 위한 주사각도를 결정하였다. 축방향 주사시에는 40°~70° 범위의 굴절각으로 검사를 하면서 탐촉자 주사방향에 대하여 ±15°로 비틀림 각(skew angle)을 적용하여 한번 주사시에 93개의 굴절각도로 검사를 하도록 하였으며, 원주방향 주사 시에는 35°~65° 각도로 2.5° 간격으로 주사하면서 비틀림 각을 용접부 중심부로 향하여 ±22.5°~52.5°까지 7.5° 단위로 주사를 하여 48개의 굴절각도로 주사를 하도록 하였다.

Fig. 6에서 축방향 검사에 대한 초음파 빔의 굴절각 발생을 개략적으로 나타내었다.

검사 준비단계에서 초음파검사의 시간축 범위 결정은 데이터 파일의 크기 및 시스템의 속도와의 밀접한 관계를 가지므로 유효한 검사를 수행하면서 가장 적합한 빔 거리를 설정하는 것이 중요하다. 본 절차서에서는 Table 2와 같이 초음파 빔 진행거리를 설정하였다.

결합 검출 및 크기평가를 위한 검사감도는 비틀림 각이 0° 일 때, 굴절각이 40°인 빔이 배관의 내경면에서 반사된 ID roll 신호의 진폭이 5%~20% FSH(full screen height)가 되도록 게인을 조절하여 검사감도로 설정을 하였다. 길이 평가 시 기준은 full dB drop 방법을 적용하였으며 깊이 평가는 AATT(absolute time arrival technique)를 기준으로 하였다. 위상배열 초음파 검사신호는 각도와 비틀림 각도를 적용하여 한번 주사시에 다수의 각도에 대한 신호가 취득되므로 모든 각도에 대하여 평가하는 데는 많은 시간이 소요된다. 따라서 신호 취득 및 평가 소프트웨어인 SonicStation에 여러개의 각도를 병합하여 하나의 신호로 표현할 수 있는 "volumetric merge" 기능을 추가하여 개발하였다. volumetric merge를 적용함으로써 신호평가시에

소요되는 시간을 줄일 수 있으며, 신호평가자가 원하는 검사각도 범위에 대하여 병합을 수행함으로써 각도범위별로 신호를 평가할 수 있도록 하였다.

4. 절차서 기량검증 수행 및 결과

ASME Code Section XI Appendix VIII 요건에 따른 기량검증은 기계적 피로균열과 열피로 균열 결합이 삽입된 배관 용접부에 대하여 절차서의 모든 요건을 반영하여 신호를 취득하고 평가를 하였다. 기량검증 범위는 Table 3과 같다.

각각의 시험편에 대하여 자동 스캐너로 용접부에 대하여 상부에서 원주방향 결합 검출을 위한 축방향 주사를 실시하고 축방향 결합 검출을 위한 원주방향 주사를 시계방향과 반시계방향으로 실시하였다. 동일한 주사를 용접부의 하부에서도 실시하였다. 결과적으로 하나의 용접부에 대하여 6회의 주사를 실시하였다. 이는 일반적인 자동검사에서 10회 주사를 실시하는 횟수에 대하여 위상배열을 적용함으로써 4회의 주사 횟수를 감소할 수 있으므로 약 2/5에 해당하는 검사 시간을 줄일 수 있는 효과가 있다. Fig. 7은 절차서 기량검증을 위하여 시험편의 용접부에서 자동스캐너를 사용하여 신호를 취득하는 장면을 나타내었다.

절차서 기량검증에 대한 합부 판단은 ASME Code에 결합 검출 및 크기평가에 대한 명확한 기준을 제시하고 있으므로 이 기준에 의하여 평가자가 평가한 결과를 분석하여 판정하게 된다. 절차서

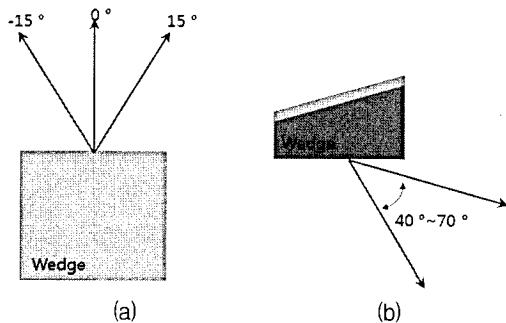


Fig. 6 Beam steering angle display for the axial scanning; (a) Top view (b) Side view

Table 2 Ultrasonic time base setting for diameter

Pipe thickness	Min. Time base	Max. Time base
T<0.5" (T<12.7mm)	$\frac{2.5 T}{\cos(70)}$	1.25×(Min. Time base)
0.5"≤T<1.0" (12.7mm≤T<25.4mm)	$\frac{2.0 T}{\cos(70)}$	
1.0"≤T (25.4mm≤T)	$\frac{2.0 T}{\cos(60)}$	

Table 3 Performance demonstration range

Material	Ferrite	Austenite	
Method	Detection Sizing (Leng.&Dep.)	Detection Sizing (Leng.&Dep.)	
Dia.	KPD PD range	4"~50" (101~1,270 mm)	4"~24" (101~610 mm)
	Field Inspection range	4" over (101 mm over)	4" over (101 mm over)
Thk.	KPD PD range	0.337"~3.85" (8.6~97.8 mm)	0.237"~1.50" (6.0~38.1 mm)
	Field Inspection range	0.237"~4.85" (6.0~121.2mm)	0.137"~2.0" (3.4~50.8 mm)

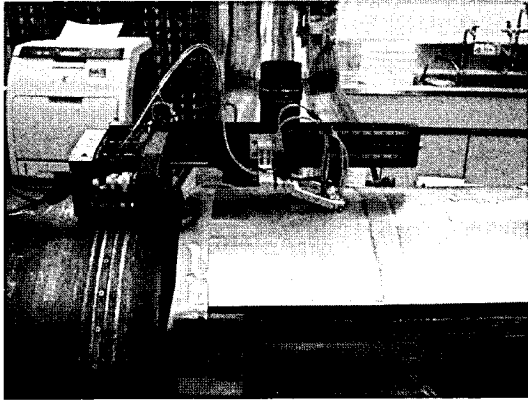


Fig. 7 Phased array data acquisition for procedure qualification

기량검증은 시스템을 구성하고 해당 절차서를 이용하여 결함을 100% 검출이 되어야 하므로 절차서 전반에 걸쳐 결함 검출에 대한 기준과 기법이 명확하게 정의되어야 한다. 검출된 결함에 대한 길이 및 깊이 평가 기준은 신호 평가자가 제출한 크기 평가 결과를 분석한다. 합격기준은 제출한 결함들에 대한 RMS(root mean square)를 계산하여, 길이 측정은 RMS 0.75 inch 이내이며, 깊이 측정은 RMS 0.125 inch 이내이어야 한다. RMS 값은 아래의 식으로부터 산출된다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n}} \quad (4)$$

여기서 m_i = 평가자가 측정된 결함의 길이/깊이 값
 t_i = 실제 결함의 길이 또는 깊이 값
 n = 측정된 결함의 수

결함 검출과 깊이 측정에 대한 기량검증은 약 70여개의 시험편에 대하여 신호를 취득하고 평가한 결과 주어진 결함에 대하여 100% 검출이 되었다. 검출된 결함 각각에 대하여 길이 측정을 수행하였으며 길이 측정 결과는 0.42 inch RMS이며 깊이 측정은 0.095 inch RMS로 나타났다. 결과적으로 결함의 검출, 길이 및 깊이 측정 결과가 ASME Code에서 요구하는 RMS 합격기준 이내로 평가되어 길이 및 깊이평가에 대한 절차서 기량검증이 성공적으로 이루어 졌다. Fig. 8은 검출된 결함에 대한 길이 측정을 C-scan으로 측정된 결과를 나타내었다.

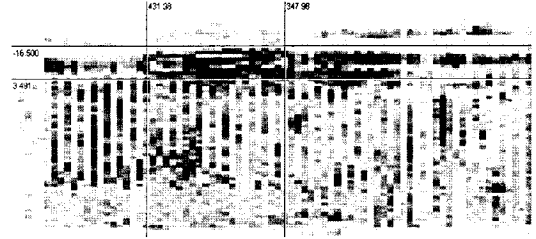


Fig. 8 Flaw signal length measurement from C-scan display

5. 결론

국내 원전 원자로 냉각재계통 배관 용접부 검사에 위상배열 초음파탐상검사 기법을 적용하기 위하여 위상배열 초음파탐상검사 소프트웨어, 위상배열 초음파 탐촉자와 검사 절차서를 개발하였다. 현장 적용검사를 위하여 개발된 검사 절차서를 대상으로 ASME Code 기량검증 요건에 의거하여 결함검출 및 크기평가에 대한 절차서 기량검증을 실시하였으며 검출, 길이측정 및 깊이측정 분야에 대하여 기량검증 요건을 만족하여 절차서 기량검증을 완료하였다. 본 연구에서 개발된 절차서가 기량검증을 통과함에 따라 본 절차서는 원전 원자로 냉각재계통의 동중급속 배관 용접부 검사에 적용이 가능하여 급년 내에 현장 시험적용을 수행할 예정이며, 본 연구결과로 위상배열 초음파탐상검사 기술의 적용을 더욱 활성화하여 타 산업분야에 적용 확대와 원전 초음파탐상검사 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 윤병식, 양승환, 김용식, "초음파탐상검사자 기량검증 체제를 위한 다자비교 시험", 비파괴검사학회지, 24권, 4호, pp. 378-383 (2004)
- [2] Joon-Hyun Lee and Sang-Woo Choi, "Ultrasonic phased array techniques for detection of flaws of stud bolts in nuclear power plants," Journal of The Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 26, No. 6, pp. 440-446 (2006)
- [3] 양승환, 윤병식, 김용식 "위상 배열 초음파 기법을 이용한 Straddle Mount형 저압 터빈 디스크

- 결합 평가에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 26권, 4호, pp 231-238 (2006)
- [4] R. S. Longhurst, Geometrical and Physical Optics, 2nd Edition, Longmans, pp. 25-30 (1968)
- [5] H. J. Shin, and S. J. Song, "Nondestructive inspection of steel structures using phased array ultrasonic technique," Journal of The Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 6, pp. 538-544 (2000)
- [6] RD-Tech, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, pp 37-39 (2006)
- [7] Shi-Chang Wooh and Yijun Shi, "Influence of phased array element size on beam steering behavior," Ultrasonics, Vol. 36, pp 737-749 (1998)
- [8] Joon-Hyun Lee and San-Woo Choi, "Optimum design of linear phased array transducer for NDE," Key Engineering Materials, Vol. 183, pp. 619-624 (2000)