

이종금속 용접부 축방향 결함 검출을 위한 초음파 탐촉자 설계

Ultrasonic Transducer Design for the Axial Flaw Detection of Dissimilar Metal Weld

윤병식*[†], 김용식*, 양승한*

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

초 록 원자력발전소의 이종금속 용접부는 PWSCC 결함에 민감한 것으로 알려져 있으며 기량검증된 검사자가 기량검증된 절차서를 사용하여 가동중검사 기간 중에 주기적인 검사를 수행하고 있다. 국내 원자력발전소 이종금속 용접부의 형상 조사 결과에 따르면 대부분의 이종금속 용접부가 경사진 노즐부나 인접부에 위치하는 것으로 나타났다. 일반적인 초음파 탐촉자를 사용하여 경사부위에 위치한 이종금속 용접부의 검사를 수행할 경우 초음파 탐촉자의 접근성이 제한되어 검사체적을 모두 검사하기가 어렵다. 특히 축방향 결함 검출을 위한 원주방향 주사에서는 초음파 탐촉자가 경사면에 위치하게 되면 반사체로부터 결함 신호를 얻기가 어려우며 이에 따라 결함 검출이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 경사면을 고려하여 비틀림 각도를 적용한 초음파 탐촉자를 사용하는 것이 필요하다. 모델링을 통하여 비틀림 굴절 종파탐촉자를 설계하고 축방향 결함 검사용 비틀림 굴절 종파탐촉자를 제작하여 실험을 통하여 결함으로부터 신호를 취득하였다. 일반 탐촉자와 비틀림 각도가 적용된 탐촉자의 초음파 응답신호를 비교한 결과 비틀림 각도가 적용된 탐촉자의 초음파 응답신호가 훨씬 뛰어난 것으로 나타났다.

주요용어: 기량검증, 이종금속 용접부, 초음파 탐촉자, PWSCC

Abstract Dissimilar metal welds in nuclear power plant are known as very susceptible to PWSCC flaws, and periodically inspected by the qualified inspector and qualified procedure during in-service inspection period. According to field survey data, the majority of their DMWs are located on tapered nozzle or adjacent to a tapered component. These types of configurations restrict examination access and also limit examination volume coverage. Additionally, circumferential scan for axially oriented flaw is very difficult to detect located on tapered surface because the transducer can't receive flow response from reflector for miss-orientation. To overcome this miss-orientation, it is necessary adapt skewed ultrasonic transducer accomodate tapered surface. The skewed refracted longitudinal ultrasonic transducer designed by modeling and manufactured from the modelling result for axial flow detection. Experimental results showed that the skewed refracted longitudinal ultrasonic transducer get higher flow response than non-skewed refracted longitudinal ultrasonic transducer.

Keywords: Performance Demonstration, Dissimilar Metal Weld, Ultrasonic Transducer, PWSCC

1. 서 론

원자력발전소의 주요 용접부는 ASME Code Section XI[1]에 따라 비파괴검사를 통하여 주기

적으로 건전성을 확인하고 있다. ASME Code Section XI은 원자력발전소의 가동중검사에 관한 요건을 명시하고 있으며 고시에 의하여 원전 사업자가 준수해야 하는 기술기준이다. 특히 상기

기술기준은 검사요건뿐만 아니라 해당 설비를 검사하는 검사자에 대한 자격부여 및 기량검증 기준을 제시하고 있어 원전 검사자는 해당 요건에 따라 자격부여 및 기량검증되어야 한다. 원전 검사자에 대한 기량검증 요건은 해당 기술기준의 Appendix VIII 요건에 따르고 있으며, 국내에서는 2004년부터 보완요건 2와 3에 해당되는 동종금속 배관 용접부에 대한 기량검증을 시행중에 있으며, 최근에는 보완요건 10에서 요구하는 이종금속 용접부(dissimilar metal weld)에 대한 기량검증 체계 구축을 완료하고 검사자 기량검증을 시행하고 있다[2].

이종금속 용접부 기량검증 체도를 구축하기 위하여 국내에 운영중인 가압경수로(PWR) 및 가압중수로(PHWR)형 원전에 설치된 이종금속 용접부의 형상을 조사하였으며, 현장 조사결과를 직경과 두께별로 분류를 하고 노즐의 경사도에 따라 형상을 고려하여 시험편 설계를 위한 기초자료를 작성하였다. 현장 조사 결과 국내 이종금속 용접부의 대다수가 노즐부위에 위치하고 있어서 시험편 설계시에 경사면을 고려하여야 하는 것으로 나타났다[3]. 결과적으로 경사면에 위치하고 있는 이종금속 용접부는 검사 체적 확보 및 검사 각도 선정 등과 같이 평면에 존재하는 이종금속 용접부에 비하여 고려하여야 할 사항들이 많다.

특히 이종금속 용접부에서 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있는 축방향 결함을 검출하기 위한 원주방향 검사를 노즐부의 경사면에서 수행하게 될 경우 축방향 결함의 결함면과 표면에 수직으로 입사되는 초음파의 진행방향이 3차원 공간상에서 비틀어져 결함에 초음파가 입사되어도 초음파 탐촉자에서 수신할 수 없는 방향으로 반사되는 경우가 발생되게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 원주방향 주사에 사용되는 초음파 탐촉자에 굴절각도와 비틀림 각도(skew angle)를 동시에 적용하여 결함과 초음파의 진행방향이 수직이 되도록 조절하여야 유효한 초음파 응답신호를 얻을 수 있다[4,5].

현재까지 이종금속 용접부에 발생되고 있는 결함의 유형은 주로 PWSCC(primary water stress corrosion cracking)로 알려져 있으며, 이는 인코넬 82/182 합금 용접금속에서 입자간이 아닌 수직상정간에서 발생한다는 측면에서 기존의 IGSCC

(intergranular stress corrosion cracking)와는 결합발생 기구적 측면에서 상이하다. 이러한 PWSCC 결함은 냉각방향으로 발달된 수직상정 조직을 이루고 있어서 결정 조직의 방향성에 따라서 초음파의 진행속도가 다른 불균일한(inhomogeneous) 조직을 가지고 있다. 이러한 불균일성으로 인하여 초음파 에너지가 용접부를 투과할 때 방향이 틀어지고 산란이 발생하므로 이종금속 용접부 검사를 위해서는 투과력이 상대적으로 뛰어난 집속형 송수신(focused pitch-catch) 종파탐촉자를 적용하는 것이 효과적이다[6].

본 연구에서는 원자력발전소 압력용기 및 배관 연결부의 경사면에 위치한 이종금속 용접부의 축방향 결함을 적절하게 검출할 수 있는 굴절종파 초음파 탐촉자를 설계하기 위하여 모델링을 통하여 비틀림 각도와 굴절 각도를 동시에 고려한 복합 굴절각 종파탐촉자를 설계하고 제작하였다. 모델링을 통하여 제작된 탐촉자를 사용하여 축방향 결함이 내재된 시험편에서 일반 종파탐촉자와 비교하여 축방향 결함이 유효하게 검출되는지를 상호비교 분석하여 이종금속 용접부 축방향 결함 검출에 대한 신뢰성 제고에 기여하고자 하였다.

2. 시험편 및 모델링

2.1. 시험편

본 연구에서는 기울어진 노즐부 이종금속 용접부의 축방향 결함검출을 위한 초음파 탐촉자를 설계하기 위하여 표준형 원전의 가압기 살수노즐(spray nozzle)을 선정하였다. 살수노즐은 가압기 상부에 위치하고 있으며, 배관에서 가압기로 연결되는 노즐부에 18°의 기울기가 있는 테이퍼 형상을 가지고 있다. 시험편의 개략적인 치수와 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

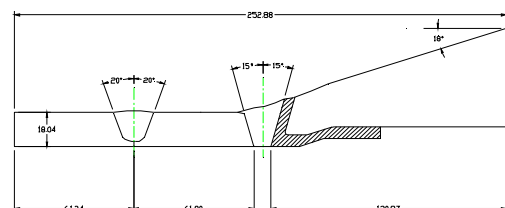


Fig. 1 Detail drawing of pressurizer spray nozzle

가압기 살수노즐 용접부는 노즐부의 탄소강과 세이프엔드를 연결하기 위하여 인코넬 82/182로 용접이 되어 있으며 부위별 재질은 Table 1과 같다.

Table 1 Material specification of spray nozzle

Parts	Material Specification
Nozzle	SA 541 Cl.3
Safe-end	S/S 316
Pipe	S/S 316
Nozzle to Safe-end Weld	ERNiCr-3(Inconel 82)
Safe-end to Pipe Weld	S/S 308
Cladding	ERNiCr-3(Inconel 82)



Fig. 2 Photograph of pressurizer spray nozzle test specimen

모델링과 실험을 위하여 가압기 살수노즐의 형상과 재질이 동일하고 축방향 결함이 가공되어 있는 이중금속 용접부 결함 시험편을 제작하였다. 축방향 결함의 높이는 두께의 27.4%이며 EDM (electro discharge machining) 가공후에 HIP (hot isostatic pressing) 공정을 거쳐 결함면을 밀착시켰다. 가공된 결함의 상세 사상은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Dimensions of the axial flaw embedded in spray nozzle

Length(mm)	Height(mm)	Height(%)	Flaw type
10.05	5.84	27.4%	EDM(HIP)

2.2. 모델링

축방향 결함에 대한 초음파의 입사각도와 비틀림각도를 결정하기 위하여 초음파 모델링 프로그램인 CIVA[7]를 사용하였다. 가압기 살수노즐과 동일한 치수와 형상의 3차원 모델을 제작하고 축

방향 결함을 삽입하였다. Fig. 3은 초음파모델링을 위하여 제작한 가압기 살수 노즐의 형상을 3차원적으로 구현한 모델을 나타내었다.

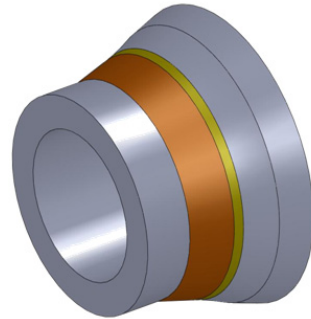


Fig. 3 The 3D model for ultrasonic defect response modelling

결함으로부터 초음파 반사신호에 대한 응답신호를 얻기 위하여 CIVA 프로그램의 defect response module을 사용하였으며, defect response에서 사용한 모델링 근사해는 Kirchhoff 근사식을 적용하였으며 재질의 이방성 및 비균일성은 고려되지 않았다. 초음파 모델링에서는 일반 굴절종파 탐촉자를 사용하였을 때의 초음파 진폭을 계산하고 비틀림 각도를 변경하면서 최대의 진폭을 얻을 수 있는 조건을 찾아가 하였다.

일반적으로 원주방향 검사를 위한 탐촉자의 굴절각도는 배관의 내경에서부터 성장하는 균열을 검출하기 위하여 Fig. 4와 같이 초음파 빔이 배관의 내경에 접하는 각도보다 작은 굴절각을 가지도록 한다. 일반 굴절 종파 탐촉자일 경우 탐촉자가 위치한 곳에서 2차원적으로 초음파 빔이 내경에 접촉하는 각도는 39°이며 이보다 작은 각도인 37°를 굴절각으로 설정하고 탐촉자가 접촉하는 외경의 곡률을 고려하여 탐촉자의 접촉면 곡률을 840 mm로 하여 모델링을 하였다.

비틀림 각도를 고려하기 위하여 굴절 각도를 고정하고 비틀림 각도를 변경하면서 축방향 결함으로부터 반사된 신호의 최대 진폭 크기를 측정하였다. 계산 결과 굴절각도가 37°이고 비틀림 각도가 15°일 때 초음파 신호의 진폭이 가장 높게 나타났다. 모델링 프로그램에서는 응답신호의 크기를 실제 초음파탐상에서 사용하는 dB 또는 전체화면크기(full screen height)와는 다른 임의 단위 pt를 사용한다. 비틀림 각도가 없는 일반 초음파

탐촉자의 경우 1.208 pt였으며, 비틀림 각도 15° 일때는 3.608 pt로 비틀림 각도가 적용된 경우가 일반 초음파 탐촉자에 비하여 2.98배 높은 진폭 신호를 나타내었다. Fig. 5는 비틀림 각도가 적용되지 않았을 경우와 15°의 비틀림 각도가 적용되었을 때의 모델링 결과를 C-scan 신호로 나타내었다. 두 개의 C-scan 결과는 최대값을 적색, 최소값을 청색으로 하여 맵핑을 하였기 때문에 동일한 진폭크기로 표시 되었다.

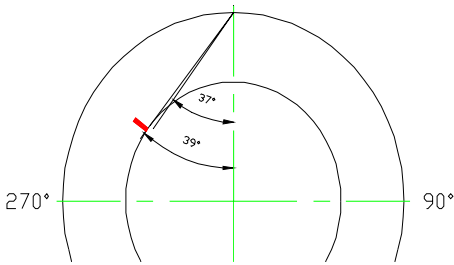
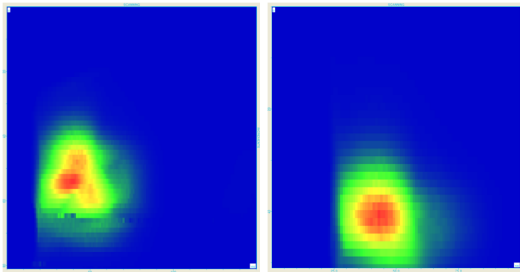


Fig. 4 Incident angle for the pressurizer spray nozzle



(a) Non-skew angle (b) Skew angle

Fig. 5 C-scan image of modelling result with and without skew angle

3. 실험 방법

3.1. 탐촉자 설계

모델링에 의하여 결정된 탐촉자의 굴절각과 비틀림 각도를 이용하여 실험에 사용될 탐촉자를 선정하였다. 탐촉자의 주파수는 1.5 MHz이며, 압전소자는 composite로 제작되었다. 굴절각도 37°와 비틀림 각도 15°를 얻기 위하여 종파탐촉자의 송신과 수신 압전소자의 roof angle은 각각 다른 각도가 적용되어야 한다. Table 3에는 사용된 탐촉자의 상세 규격을 나타내었다. 일반적으로 원주방향 검사를 수행하기 위해서는 배관에 대하여

Table 3 Detail specification of the longitudinal transducer for compound skew angle

Parameter		Specification	
Material		Benchmark Composite	
Element size		18.0 mm × 10 mm	
Housing		22.0 mm × 15.0 mm	
Frequency		1.5 Mhz	
Bandwidth		>70%(-6dB)	
Contour		840 mm(XZ-Plain)	
Wedge Material		2.34 mm/μs	
Wedge Angle	Direction	CW	CCW
	Left	14.7°	13.9°
Roof Angle	Right	13.9°	14.7°
	Left	-0.7°	8.1°
	Right	8.1°	-0.7°
	Acoustic Barrier		1.5 mm

시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)에 대하여 검사를 하여야 한다. 따라서 비틀림 각도가 적용된 초음파 탐촉자를 제작할 경우에는 시계방향과 반시계방향의 탐촉자가 각각 필요하게 된다. 비틀림 각도가 적용되지 않은 일반 탐촉자는 동일한 사양을 가지고 있으며, 굴절각도가 37°인 종파탐촉자를 사용하였다.

3.2. 실험 장치 구성

제작된 초음파 탐촉자를 이용하여 시험편으로부터 신호를 취득하기 위하여 Fig. 6과 같은 실험 장치를 구성하였다. 본 실험에 사용된 초음파 장치는 Zetec사의 다채널 초음파 펄스-리시버인 Dynaray를 사용하였으며, MCDU(motor control drive unit)을 이용하여 2축 스캐너를 구동하여 신호를 취득하고 SonicStation 1.0을 이용하여 신호를 평가하였다.

일반 굴절종파 탐촉자를 사용하여 용접부의 시계방향과 반시계 방향에 대하여 신호를 취득하고 동일한 조건에서 비틀림 각도가 적용된 탐촉자를 사용하여 신호를 취득하였다. Table 4는 본 실험에 적용된 실험조건을 나타내었다.

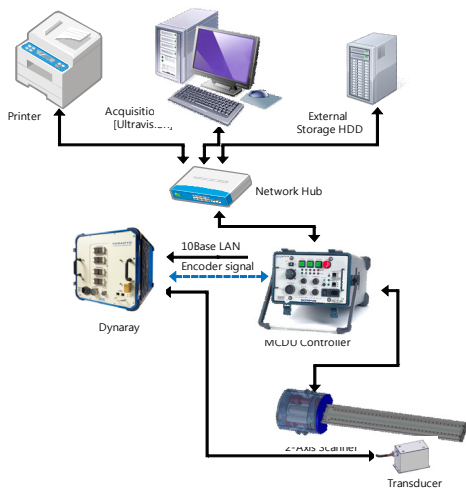


Fig. 6 The schematic diagram of experimental system

Table 4 Experimental parameter for data acquisition

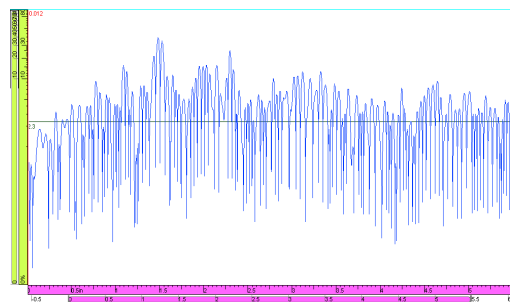
Setting		Value	
Gain		25 dB	
Time Base		0~ 76 mm	
Digitizing frequency		50 MHz	
Voltage		300 V	
Pulse width		333 ns	
Angle		37 °	
Skew angel	Direction	CW	CCW
	without	0°	0°
	with	-15°	+15°
Scan	Scan	1°	1°
Resolution	Index	0.05"	0.05"
	Scan	10°/s	10°/s
Speed	Index	1"/s	1"/s

4. 결과 및 고찰

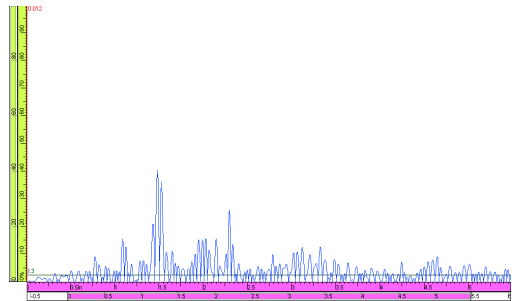
가압기 살수노즐의 축방향 결함을 검출하기 위하여 구성된 실험 장치를 이용하여 일반 굴절 종파 초음파 탐촉자로 신호를 취득하고 비틀림 각도가 적용된 굴절 종파 초음파 탐촉자로 신호를 취득하였다. 신호취득 단계에서 비교적 낮은 게인인 25 dB로 신호를 취득하고 신호 평가단계에서 소프트 게인으로 적절한 초음파 응답신호를 표현하기 위하여 초음파 진폭값을 log scale로 설정하였다. Log scale로 취득된 신호를 linear scale로 변환하면 초음파 신호를 취득한 다음에 이득값을 동적으로 변경할 수 있으므로 결함신호의

진폭이 포화되지 않은 상태로 신호평가를 수행할 수 있다[8]. Fig. 7은 log scale 단계의 신호와 linear scale로 변환한 A-scan 신호를 나타내었다.

가압기 살수노즐의 이중금속용접부에서 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)에 대하여 신호를 취득하였다. Fig. 8은 시계방향에 대하여 취득한 결과를 나타내었다. (a)는 굴절각이 37°이고 비틀림 각도가 0°인 굴절종파 초음파 탐촉자이며, (b)는 굴절각이 37°이고 비틀림 각도가 -15°인 굴절 종파탐촉자를 이용하여 시험편에 가공된 축방향 결함에 대한 B-scan 신호이다.

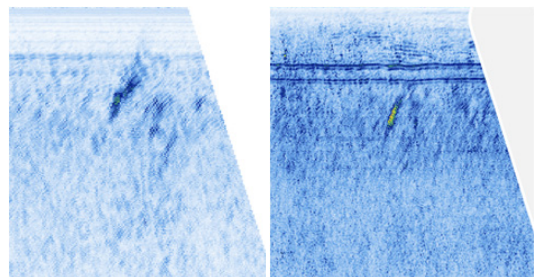


(a) Original log scale A-scan signal



(b) Converted linear A-scan signal

Fig. 7 Original log scale and linear converted A-scan signal from axial flow



(a) Non-skew

(b) 15° skew

Fig. 8 B-scan signal image from non-skew and 15° skew for CW direction scan

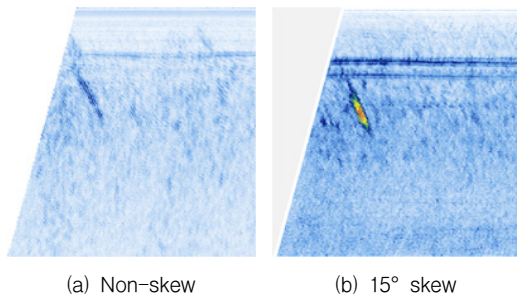


Fig. 9 B-scan signal image from non-skew and 15° skew for CCW direction scan

시계방향 주사 결과에 대하여 A-scan, B-scan 및 C-scan 신호를 평가하고 검출된 축방향 신호에 대하여 최대 진폭을 측정하였다. 일반 굴절 종파탐촉자를 적용한 경우의 최대 진폭은 전체 화면 크기(FSH : full screen height)의 48.6%로 측정이 되었고 비틀림 각도가 15°로 적용된 검사 결과에서는 69.6% FSH의 크기로 측정이 되어 비틀림 각도를 적용했을 경우 더욱 높은 진폭으로 결함이 검출되었다. 비틀림 각도가 적용되었을 경우와 비틀림 각도가 없는 경우의 신호크기 비는 1.43으로 모델링에 의한 신호 비인 2.98배에 비하여 다소 낮게 측정이 되었다.

Fig. 9는 반시계방향으로 주사하여 취득한 신호를 나타내었다.

반시계 방향에 사용된 비틀림 각도 초음파 탐촉자의 비틀림 각도는 시계방향의 반대방향으로 가공이 되었다. (a)는 굴절각이 37°이고 비틀림 각도가 0°인 굴절 종파탐촉자이며, (b)는 굴절각이 37°이고 비틀림 각도가 +15°인 굴절 종파탐촉자를 이용하여 축방향 결함을 검출한 B-scan 신호이다. 취득된 신호의 진폭 크기를 평가한 결과 일반 굴절종파의 경우에는 30.4% FSH이며 +15° 비틀림 각도가 적용된 굴절종파 탐촉자의 경우에는 83.5%로 신호진폭 크기 비가 2.74로 나타나 모델링 결과인 2.98과 유사한 진폭 크기비를 나타내었다.

5. 결론

원자력발전소의 가압기 살수노즐의 경사면에 위치한 이종금속 용접부의 축방향 결함 검출을 위하여 초음파 모델링으로 초음파 탐촉자의 비틀

림 각도와 설계 인자를 결정하였다. 결정된 설계 인자로 굴절종파탐촉자를 제작하였으며, 축방향 결함이 가공된 시험편에서 실증 실험을 수행하고 설계된 탐촉자의 유효성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 모델링을 통하여 축방향 결함 검출을 위한 굴절종파탐촉자의 굴절각도와 비틀림 각도를 결정하였다.
- 2) 모델링 결과 비틀림 각도의 적용 유무에 따라 초음파신호의 진폭 크기가 약 3배 증가하는 것으로 평가 되었다.
- 3) 모델링을 통하여 결정한 비틀림 각도를 가진 탐촉자를 제작하고 축방향 결함이 삽입된 시험편에 초음파신호를 취득하고 비교한 결과 최대 진폭차이는 2.7배로 모델링 결과와 유사하게 나타났다.
- 4) 이종금속 용접부가 노즐과 같은 경사면에 위치할 경우에 더 정확한 축방향 결함의 검출을 위해서는 경사면의 각도를 고려하여 탐촉자 내부의 압전소자에 의한 초음파 빔이 입사시 비틀림 각도를 가지도록 제작하고 검사하는 것이 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Division 1, Appendix VIII, "Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems," American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 333-342 (1995)
- [2] 김용식, 윤병식, 양승환, "원전 이종금속 용접부 초음파탐상검사 기량검증 기술개발", 2010 Spring Conference of KSNT, pp. 29-340 (2010)
- [3] 양승환, 김용식, 윤병식, 권기일, "원전 이종금속 용접부 초음파검사 일반 절차서 개발", *Transactions of KPVP*, 제6권, 제01호, pp. 23-28 (2010)
- [4] D. E. MacDonald and M. A. Dennis, "3D computer model for tapered dissimilar metal welded examination," *Proceedings of the Sixth*

- International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressure Components*, pp. 267-277 (2007)
- [5] EPRI, "Ultrasonic Examination of Nozzle Inner Radius Regions" TR-107493, Palo Alto, (1997)
- [6] 김경조, 강성식, 송명호, 정구갑, 정해동, "국제공동연구 PINC(Program for the Inspection of Nickel Alloy Components) 현황 및 고찰", 제29권 제2호, pp. 153-161 (2009)
- [7] CIVA: Simulation Software for Non Destructive Testing, www-civa.cea.fr
- [8] T. Sasahara and H. Inoue, "Application of logarithmic amplifier to ultrasonic imaging," 17th World Conference on Nondestructive Testing, pp. 254-362 (2008)