

# 한국표준형 원전 증기발생기 Stay 용접부 자동검사시스템 및 현장 검증

임사회<sup>†</sup> · 박치승\* · 박철훈\* · 주금종\* · 노희충\* · 윤광식\*

## Field Application of Ultrasonic Inspection System for Stay Welds at Steam Generator of KSNP

Sa Hoe Lim<sup>†</sup>, Chi Seung Park\*, Chul Hoon Park\*,  
Keum Chong Joo\*, Hee Chung Noh\* and Kwang Sik Yoon\*

### ABSTRACT

The stay cylinder weld at the steam generator of Korean Standard Nuclear Power Plants is safety class I component and is subjected to be inspected by the volumetric examination such as ultrasonic method. As accessibility of this area is limited due to the narrow space and high radiation, the existing manual inspection method involves various difficulties. Moreover operators may be exposed to internal contamination by contaminated dust during the surface buffing process to improve the inspection reliability of this area.

Recently the new automatic inspection system for stay cylinder welds has been developed. The inspection system basically consists of a driving assembly, data acquisition device and signal processing units. The driving assembly is classified by 1) the scanner for inspecting and buffing the weld, 2) pillars for guiding the scanner and 3) the base frame for loading and supporting pillars. The scanner has 4 sensor modules to inspect in 4 refracted angles and 4 incident directions. These components can be inserted into the skirt of the stay cylinder through the manway hole and assembled easily by one-touch in the skirt. Data acquisition device and signal processing units developed in previous works are also newly upgraded for better processing of data analysis and evaluation. The system has been successfully demonstrated not only in the mock-up but also in the field.

In this paper, newly developed inspection system for the stay cylinder weld of the steam generator is introduced and their field applications are discussed.

**Key Words** : Automated ultrasonic inspection(자동 초음파 검사), Korea standard nuclear power plant(한국표준형 원전), Stay cylinder(스테인 실린더), Steam generator(증기발생기)

## 1. 서론

한국 표준형 원전의 증기발생기(steam generator) 하단에 위치하고 있는 스테이 실린더(stay cylinder)는 안전등급 1등급으로 분류되어 적용 규격인 ASME Sec. XI에 의해 체적 검사가 요구되고 있는 주요 구

조 설비 중 하나이다<sup>1</sup>.

검사가 요구되는 용접 부위는 고방사능 지역이며 매우 협소한 공간에 위치해 있어 검사자의 접근이 제한적이다. 또한 검사의 정확도를 위한 실린더 내부의 버핑과정(buffing process) 중 오염 먼지가 비산되어 작업자의 내부 피폭을 유발할 수 있다. 이러한 이유로 인해 스테이 실린더 용접부에 대한 건전성 검사는 작업자의 안전 및 수동검사의 신뢰성을 향상시키기 위해 자동검사시스템에 의한 진보된 검사기술이 요구되어 왔다. 최근 스테이 실린더 내부

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, (주) UMI 부설연구소  
E-mail : shlim@umi.co.kr  
TEL : (042)610-7110 FAX : (042)478-9600  
\* (주) UMI

의 비평 및 검사를 동시에 수행할 수 있는 원격검사시스템, SAMIS(Stay cylinder Automated Manipulator Inspection System)가 개발되었다<sup>2,3</sup>. SAMIS의 기계구동부는 용접부의 비평 및 검사를 담당하는 스캐너(scanner), 스캐너의 이동 가이드 역할을 하는 다수의 필러(pillar), 각각의 필러를 장착하고 지지하는 베이스 프레임(base frame)으로 구성되어 있으며, 각각의 구성 요소들은 스테이 실린더 하부의 스테이 스커트(stay skirt) 내부에서 원터치 방식으로 조립 가능하다. 스테이 실린더 제작 도면을 바탕으로 스테이 실린더 목업(mock-up)을 제작하여 구동 성능을 시험하고 설치 조건 및 운전 조건을 확인하였다<sup>4</sup>.

장치 시작품에 대한 현장 검증과정이 진행되었다. 현재 건설 중인 국내 원전의 증기발생기 스테이 실린더에 대한 점등시험을 수행하고 그 적용 가능성을 확인하였다.

본 논문에서는 최근 새롭게 개발된 스테이 실린더 용접부 자동검사 시스템에 대한 소개와 함께 현장 구동 성능 시험 과정에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 검사 대상

### 2.1 Stay cylinder 구조

Fig. 1과 같이, 한국 표준형 원전은 원자로를 중심으로 두 개의 증기발생기와 네 개의 순환펌프로 구성되어 있다. 스테이 실린더는 증기발생기 하부 헤드(bottom head)의 중앙에 튜브 시트(tube sheet)와 용접되어 있는 구조물로서, 본 용접부위는 초음파검사와 같은 체적검사가 요구되는 Class I으로 지정되어 있다.

Fig. 2와 같이, 검사 부위로 이동할 수 있는 입구는 고방사선 지역에 위치해 있으며 그 폭은 약 300 mm에 불과하다. 또한 검사부위가 존재하는 실린더의 내경은 약 594 mm 정도이기 때문에 검사자의 접근이 매우 어렵다<sup>5</sup>. 이러한 검사 환경에서 수동검사로 진행되는 현재의 검사 조건에서는 신뢰성 높은 검사 결과를 기대하기 힘들다.

실린더의 내부를 검사하기 전 검사의 정확성을 높이기 위해 비평 과정이 선행되어야만 한다. 비평 과정 중 비산되는 오염 먼지는 작업자의 내부 피폭을 유발시킬 수 있다. 이러한 총체적인 문제점을 해결하기 위해 원격으로 운전되는 자동초음파검사시스

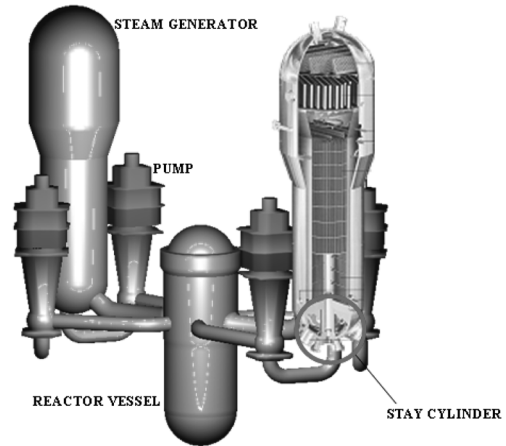


Fig. 1 Korea standard nuclear power plant and stay cylinder

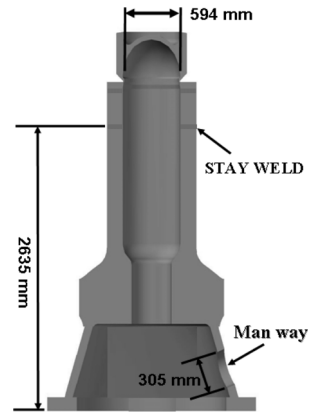


Fig. 2 Geometry of the stay cylinder

템이 개발되었다. 본 시스템은 검사자의 안전을 확보할 수 있을 뿐 아니라 검사 데이터를 영구적으로 보존할 수 있어 검사 대상 부위에 대한 장기적인 모니터링이 가능하다.

### 2.2 Mock-up 제작

개발된 자동 검사 시스템에 대한 구동 성능 평가를 위해 실제 크기와 동일한 스테이 실린더의 목업이 설계/제작되었다. 실린더 하부에 장착되는 스테이 스커트와 상단에 장착되는 캡은 각각 투명 아크릴 소재로 제작하여 내부의 스캐너 구동 상황을 상시 모니터링 할 수 있도록 설계하였다. 실린더의 외부는 증기발생기 하부 헤드와 유사한 형태를 갖는 프레임이 지지하는 구조를 이룬다.

### 3. Stay weld 자동 검사 시스템

검사 시스템은 검사 영역에 위치한 “기계구동부”와 시스템의 구동 및 데이터 수집이 이루어지는 “시스템 제어부”로 구성된다. 고방사능 지역에 위치하게 될 기계구동부는 제어부에서 원격으로 운전이 가능하기 때문에 검사자의 방사선 피폭을 방지할 수 있게 된다.

#### 3.1 기계구동부

외부에서 검사 부위로 이동할 수 있는 유일한 통로인 스테이 실린더 하단의 스커트 입구는 그 크기가 매우 협소하여 일체형 검사 시스템으로는 접근이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 원터치 방식으로 분리와 합체가 가능한 검사 시스템을 개발하였다. 검사 시스템은 부분적으로 분리되어 스커트의 좁은 입구를 통해 내부로 이동하게 되며 스커트 내부에서 최종 합체된다. 기계구동부는 초음파 센서모듈(ultrasonic sensor module)이 장착되어 실제 검사를 수행하는 ‘검사장치부’와 스테이 실린더 입구에서부터 검사영역까지 검사장치부를 이동시키는 ‘장치이송부’로 구성된다. 장치이송부는 베이스 프레임과 여러 개의 유니트 필러(unit pillar)로 이루어져 있으며, 최상부의 탑 필러(top pillar)는 근접 센싱 모듈(approach sensing module)을 포함하고 있다. 검사장치부는 4개의 검사 모듈(inspection module)과 2개의 버핑 툴(buffing tool)로 구성된 스캐너와 모터 구동 유닛(motor-driven unit)이 포함된 구동 어셈블리(running gear assembly)로 구성된다.

##### 3.1.1 장치이송부

초음파 검사장치부를 검사부위까지 이동시키는 역할을 담당하는 장치이송부는 베이스 프레임과 유니트 필러로 구성된다. 베이스 프레임 하단에 위치한 3개의 베이스 프레임 레그(base frame leg)는 탈부착이 가능하여 스테이 실린더 스커트 내부에서 원터치 방식으로 부착되며, 축의 길이는 스커트 내부의 직경이 고려되어 베이스 프레임이 실린더의 중앙에 위치할 수 있도록 구성된다. Fig. 3은 기계구동부의 구조를 보여주고 있다.

베이스 프레임의 상판과 하판은 피스톤으로 연결되어 확장/축소가 가능하며 스커트 내 진입과 설치

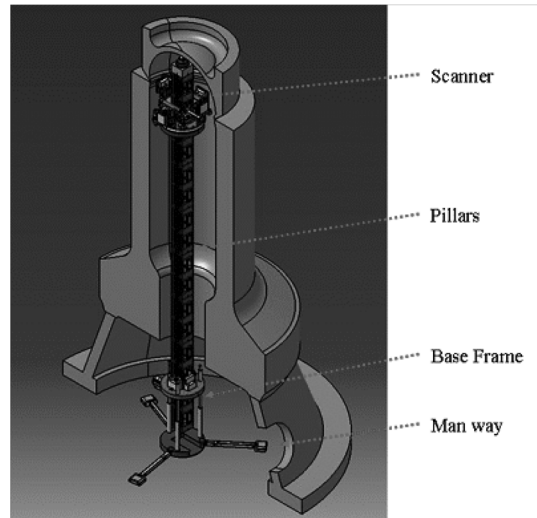


Fig. 3 Geometry of driving assembly for SAMIS

를 원활하게 해준다. 필러 로딩 서포트(pillar loading support)는 외부에서 진입한 필러가 베이스 프레임의 중심으로 장착될 수 있도록 가이드 역할을 한다. 또한 베이스 프레임 상부의 상판 어셈블리는 스캐너의 관통부와 필러 로딩 서포트의 어드레스(address)를 일치시켜 필러의 이동을 원활하게 해주는 역할을 한다. 베이스 프레임의 상판에는 필러 로딩 모터가 장착되어 필러의 상승과 하강 동작을 구동한다.

최상부에 위치하게 되는 탑 필러(top pillar)는 가이드 볼(guide ball)이 장착되어 있어 스테이 실린더의 캡(cap)에 도달 시 중심으로 미끄러지듯이 이동하여 가이드 필러의 중심축을 고정할 수 있도록 해주며 동시에 일정 압력이 가해지면 적색 LED를 점등시켜 캡의 손상을 방지해 준다. 점등된 LED는 비전 장치를 통해 검사자가 실시간으로 확인 가능하다. 탑 필러 다음으로 여러 개의 중간 필러들이 차례대로 장착되며 최하부에는 바텀 필러(bottom pillar)가 장착된다. 바텀 필러와 베이스 프레임 사이에는 가이드 필러를 견고하게 고정시켜주는 스크류 잭(screw jack)이 장착되어 있어 베이스 프레임의 모터 구동 유닛에 이상이 발생하더라도 가이드 필러의 낙하를 방지해 주도록 구성되어 있다. 유니트 필러의 한 쪽 면에는 선형 기어가 정밀하게 가공되어 있어 필러의 설치와 해체 시 베이스 프레임의 모터 구동 유닛과 연결됨과 동시에 초음파 검사장치의 상하운동을 가능케 한다. 또한 각각의 유니트 상/하단에는 완충볼

고정 장치를 두어 완벽하게 체결될 수 있도록 하였다.

### 3.1.2 검사장치부

장치이송부가 스테이 실린더 내부에 배치되면 초음파 검사장치부는 가이드 필러의 축을 따라 검사 부위로 이동하게 된다. 검사 부위로 이동하게 되면 독립적인 상하 운동과 회전운동이 가능하게 되어 실린더 내부 용접 부위 검사를 수행한다.

검사장치부는 구동어셈블리와 스캐너로 구성된다. 구동 어셈블리는 스캐너의 하단에 원터치 방식으로 장착되어 스캐너의 회전운동과 상하운동을 구동한다.

스캐너는 버핑(buffing)과 스캐닝(scanning)을 일괄적으로 처리할 수 있도록 설계되었다. 장착된 두 개의 버핑 톨은 공압 실린더(air cylinder)와 회전 브러쉬(rotary brush)로 구성된다. 브러쉬는 공압 실린더를 통해 장치의 이동과 버핑 작업 시 수축과 신장이 가능하게 된다. 초음파 모듈(ultrasonic module)은 90° 간격으로 4개가 장착되며 신장/수축이 가능한 공압 실린더를 포함하고 있다. 검사 시에 4개의 초음파 모듈이 동시에 신장되는 구조를 갖는다.

원격 검사를 수행하기 위한 비전 장치가 포함되어 있다. 수직 카메라는 탑 필러의 근접 센싱 LED를 모니터링하게 되며 수평 카메라는 버핑과 스캐닝 시 표면 상태와 구동 상태를 모니터링하게 된다. 또한 별도의 외부 카메라를 스테이 실린더 내벽에 부착하여 기계구동부의 설치 및 구동 상태를 모니터링 하게 된다.

초음파 검사 기술은 특성상 검사하고자 하는 용접부 내부 결함의 형태에 따라 빔의 주사 방식을 달리 해야 한다. 즉, 라미네이션과 같이 검사체 표면에 평행한 결함의 검출에는 수직빔 검사법이 용이하며, 검사체 표면에 대해 수직 방향으로 진행되는 결함을 검출하기 위해서는 여러 각도의 사각빔 검사법이 용이하다. 현재 적용 중인 수동 검사에서는 초음파 빔의 굴절각에 따라 수직빔(0°)과 사각빔(45°, 60°, 70°)이 병행되고 있어 검사자 이외에 보조자 1인이 skirt 내부에 위치해 적용되는 검사법에 따라 왓치를 교환해 주어야만 한다. 굴절각에 따라 다방향 검사가 가능한 4개의 일체형초음파 모듈이 개발되었다. 하나의 초음파 모듈에는 특정 굴절각으로 4 방향 주사가 가능한 4개의 초음파 센서가 장착되어 있어, 한

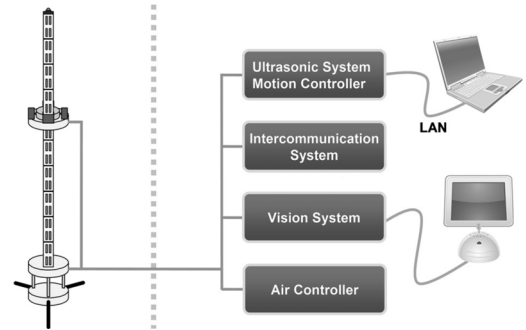


Fig. 4 Driving assembly and control system of SAMIS

번의 스캐닝으로 상방향(upward), 하방향(downward), 시계방향(clockwise), 반시계방향(counterclockwise) 검사가 동시에 이루어질 수 있다. 각각의 초음파 모듈에 포함되는 센서들의 중심주파수는 ASME 코드에 근거한 수동검사 절차서 기준에 따라 2.25MHz로 설계/제작되었다.

### 3.2 시스템 제어부

제어부는 Fig. 4와 같이, 초음파 시스템(ultrasonic system), 모션 제어기(motion controller), 상호통신시스템(intercommunication system), 비전 시스템(vision system), 공압 컨트롤러(air controller) 등으로 구성된다. 주제어 컴퓨터에 탑재되는 초음파 장치는 4채널 신호 수집이 가능하며 스캐너의 구동을 담당하는 모션 컨트롤러와 연동되어 초음파 신호의 위치 정보를 검사자에게 제공함으로써 자체 신호 평가 프로그램에 의한 완벽한 검사가 가능하게 해준다<sup>6,7</sup>.

비전 시스템은 기계구동부에 장착된 3개의 카메라를 통한 화상정보를 검사자에게 제공함으로써 스캐너의 운전상태를 비롯한 검사영역의 상황을 실시간으로 감시할 수 있도록 구성되어 있다.

## 4. 성능 시험 및 현장 검증

1차적으로 실험실 내에서 기계구동부에 대한 성능 시험이 선행되었다. 필러의 로딩 상태, 구동 어셈블리의 선형/회전 운동 상태, 버핑 톨과 검사 모듈의 신장/수축 운동 상태 등을 중심으로 시험이 진행되었으며, 시험 결과를 바탕으로 1차 수정 과정이 진행되었다.

검사 시스템은 스캐닝(scanning) 방향에 따라 두 개

의 검사 모드, 즉 원주방향 스캔 모드(circumferential scan mode)와 축방향 스캔 모드(axial scan mode)를 제공한다. 각각의 검사모드에서 얻어지는 초음파 데이터는 센서모듈의 위치 정보와 연계되어 A-scan, B-scan, C-scan 결과를 제공해 준다. 따라서 스캐너는 검사자가 입력한 위치값으로 정확하게 이동해야만 한다. 본 스캐너는 축방향에 대해 1 mm, 원주방향에 대해 0.1° 단위로 제어가 가능하도록 설계되었다. 정밀도 시험 결과, 축방향은  $\pm 1\text{mm/m}$  이내, 원주방향은  $\pm 0.1^\circ/\text{rev}$  이내의 오차 허용 범위 하에서 안정적으로 구동하고 있음을 확인하였다.

국내 한국표준형 원전 증기발생기 제작 도면을 바탕으로 제작된 스테이 실린더 목업을 통해 장치 시작품에 대한 2차 성능 시험이 선행되었다. 스테이 스커트 내 베이스 프레임의 고정부터 스캐너 진입, 필터 로딩, 스캐너 동작 상태를 단계적으로 시험하였다. 스테이 스커트와 캡은 투명 아크릴 재질로 제작되었기 때문에 스커트 내 장비의 조립과정 및 실린더 내부에서의 스캐너 동작 상태를 다각적으로 점검할 수 있다.

목업 시험 결과를 바탕으로 세부적인 수정 과정이 진행되었으며, 정상 구동 상태를 확인한 후 현장 실증 시험이 진행되었다. 현재 건설 중인 발전소의 증기발생기 스테이 실린더에 직접 적용하는 방법으로 실증 시험이 진행되었다. 검사 시스템의 장치이송부, 검사장치부, 비전시스템에 대해 독립적인 상태 점검을 비롯해 실제 검사 상황과 동일한 조건 하에서 버핑 및 검사 동작에 대한 원격 구동 상태를 확인하였다. Fig. 5는 증기발생기 스테이 실린더 내부에서 구동 중인 SAMIS의 기계구동부 일부를 보여 주고

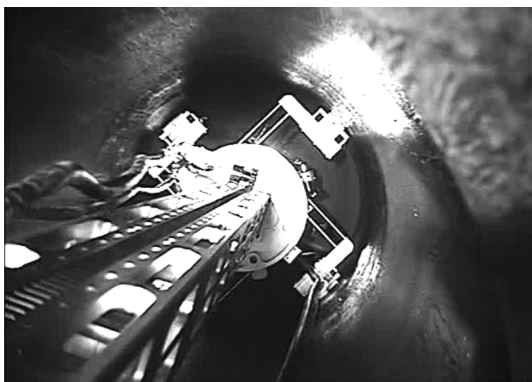


Fig. 5 Field verification of SAMIS

있다. 스테이 실린더 용접부위는 그라인딩이 이루어지기 때문에 표면상으로 확인이 불가능하다. 따라서 검사 범위를 설정하기 위해서는 기준점을 설정해야만 한다. 스테이 실린더 내벽에는 원주방향으로 300 mm 간격의 RT 마크가 존재한다. 스캐너의 수평축 카메라를 통해 마크의 위치를 확인한 후 검사 영역을 설정하였다. 실증 시험은 발전소 내 두 개의 증기발생기 스테이 실린더에 대해 독립적으로 수행되었으며, 각각 안정적인 구동 상태를 보여주었다.

## 5. 결론

한국 표준형 원전의 스테이 실린더는 고방사선 지역으로 접근이 어렵고 검사 공간이 협소하여 기존의 수동검사의 신뢰성 문제가 제기 되었으며, 또한 실린더 내면의 표면 버핑 처리 과정은 오염된 먼지의 비산으로 인한 검사자의 내부 피폭 가능성을 배제할 수 없었다. 검사자의 안전과 더불어 검사의 신뢰성을 향상시키기 위해 원격 자동 초음파 검사 시스템이 개발되었다. 검사 부위에 설치되는 기계구동부는 원거리에 위치한 검사자에 의해 실시간으로 모든 동작과 검사를 제어하게 된다. 협소한 이동통로와 검사 공간을 고려해 분해/합체가 원터치 방식으로 이루어지는 기계구동부를 개발하였고 일체형 센서 모듈을 장착해 모든 검사 조건을 만족할 수 있도록 하였으며, 검사장치가 검사 부위로 이동하기 위해서 내경이 다른 두 가지 실린더를 통과해야 하는 구조적 특성을 고려해 신장/축소가 원격으로 제어 가능한 다채널 센서 모듈 어셈블리를 개발하였다. 또한 검사 장치에 버핑 툴을 장착함으로써 버핑과 검사를 동시에 수행할 수 있도록 하였다. 기계구동부의 전 구동 상태와 검사 상황을 3개의 카메라로 구성된 비전시스템을 통해 검사자에게 실시간 화상 정보를 제공함으로써 기기의 안전성을 한층 강화시켰다. 완성된 검사시스템은 실험실과 목업에서 반복적인 시험 과정을 거쳤으며, 발전소 건설 현장에 직접 방문해 기 설치된 증기 발생기 스테이 실린더에 대한 실증시험을 수행하였다. 실제 검사 상황과 동일한 조건하에 시험이 진행되었으며, 장비의 설치 및 버핑과 검사 과정에서 만족한 결과를 보여주었다. 또한 장비의 정밀도 시험 결과, 원주방향과 축방향에 대해 오차범위 이내에서 안정적으로 구동하고 있음을 확인하였다.

신개념의 스테이 실린더 용접부 검사 시스템 및 적용 기술의 개발은 원전의 안전성 확보 및 신뢰성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다. 또한 원전 해외 수출의 막을 올린 현 시점에서 본 시스템의 개발은 선진 외국은 물론 원전 후발국에 대한 경쟁력 향상으로 인해 순수 국내 기술 기반의 해외 시장 공략에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구 개발 과제는 한국수력원자력(주) 중소기업지원 협력연구개발사업에 의해 수행되었다.

## 참고문헌

1. 1998, ASME Section XI, Division 1, "Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Component".
2. Lim, S. H., Park, C. S., Park, C. H., Joo, K. C., Noh, H. C., Yoon, K. S., 2010, "Automatic Inspection System for the Stay Cylinder Weld of the Steam Generator", Proceedings of 2010 Spring Conference on the Korean Nuclear Society
3. Automated ultrasonic weld inspection, International Institute Welding Document, VC 460
4. Lim, S. H., Park, C. S., Park, C. H., Joo, K. C., Noh, H. C., Yoon, K. S., 2010, "Field Verification of Ultrasonic Inspection System for Stay Welds at Steam Generator of KSNP", Proceedings of 2010 Spring Conference on the Korean Society of Pressure Vessel and Piping
5. 2002, Design Table, KHNP
6. J.G Proakis and D.G. Mannolakis, "Digital signal Processing: Principles, Algorithms and Applications", Third Edition, Prentice Hall, 1996
7. C. K. Kim, C. H. Park, J. H. Kim and J. M. Lee, Development Of Ultrasonic Inspection Technology for Inside Lining of NPP ESW Pipe, Sixth International Conference of NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2007