

# 자동 초음파 신호평가를 위한 비주얼도구에 관한 연구

유현주<sup>†</sup> · 최성남<sup>\*</sup> · 김형남<sup>\*</sup> · 이희종<sup>\*</sup>

## The Study of Visual Tool for Automated Ultrasonic Examination of the Piping Welds in NPP

Hyun Joo Yoo<sup>†</sup>, Sung Nam Choi<sup>\*</sup>, Hyung Nam Kim<sup>\*</sup> and Hee Jong Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

This paper describes the Visual Tool for automatic ultrasonic examination that is under developing as a part of the project for development of automatic ultrasonic wave acquisition and analysis program. This tool that is supported by various image processing techniques will be adopted to detect the flaws in the component and piping welds in NPP. Visual Tool will enhance the integrity of nuclear power plant. The object of this paper is to address the Visual Tool which is developing for automatic ultrasonic inspection of welds in NPP.

**Key Words :** automated ultrasonic examination(자동 초음파 검사), Fault(결함), Image processing(이미지 처리)

### 1. 서 론

원자력발전소 안전성 확보는 지속적인 원전사업과 국가 산업발전의 원동력일 뿐만 아니라 원자력 발전에 대한 대국민 신뢰성 확보에 필수적인 사항이다. 원자력발전소 안전성 확인을 위해 원자력발전소 주요 기기 및 배관 용접부에 대한 주기적인 비파괴검사를 법제화하여 검사를 수행하고 있으며<sup>1)</sup>, 가동중 원자력발전소 용접부의 비파괴검사 방법<sup>2)</sup>으로는 표면검사와 체적검사가 수행되고 있다. 표면검사는 검사체 표면의 결함을 찾는 방법으로 육안검사, 액체침투탐상검사, 자분탐상검사 등이 있으며, 검사체의 내부 결함을 찾는 체적검사(Volumetric Examination)는 방사선투과 검사와 일반적으로 인체에 무해하고 검사완료 후 결함유무를 확인할 수 있는 초음파탐상검사(Ultrasonic Testing)를 사용하고 있다. 초음파탐상검사는 검사자의 숙련된 기량과 현장

여건에 따라 검사 결과에 영향을 주게 되어, 검사 결과에 대한 신뢰성에 문제점이 제기되어 왔다. 수동 초음파탐상검사는 현장에서 검사수행 중에만 검사 결과의 확인이 가능하므로 객관적인 검사결과를 입증하는데 어려움이 있다. 이러한 문제점들의 대안으로 원자력발전소 초음파탐상검사자는 ASME B&PV Code Sec. XI, "Rules for Inspection of Nuclear Power Plant components" 기술기준<sup>1)</sup>에 따라 기량검증에 합격하여야 현장검사를 수행할 수 있다.

또 다른 대안으로 수동 초음파탐상검사의 단점을 보완하고자 객관적인 검사결과 확보를 위한 자동 초음파탐상검사 시스템을 이용한 자동 초음파탐상검사(Automatic Ultrasonic Testing)를 수행하고 있다.

현재 원자력발전소 기기 및 배관 용접부에 대해 수행하고 있는 자동초음파검사는 외국 검사시스템을 이용하고 있으며, 자동 초음파검사 결과는 언제든지 제 3자의 검토가 가능하므로 검사결과에 대한 신뢰성이 매우 높다. 국내에서는 초음파 신호 취득 및 초음파탐촉자 구동장치에 대한 기술개발 수준은 해외 비파괴 전문 기관과 비슷한 수준에 도달하였다. 하지만, 취득된 데이터로부터 정확한 이미지 처

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국전력연구원

E-mail : yoohi@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5552 FAX : (042)865-5564

<sup>\*</sup> 한국전력연구원

리를 하여 신호분석자에게 정확하고 신뢰성 있는 이미지 자료를 제공하여 신속하게 평가를 지원할 수 있는 시스템은 국내 및 해외 모두 미진한 상태이다.

그러므로 원자력발전소 자동 초음파신호 평가를 위해 본 비주얼 도구를 실행하여 TOFD, Color-Map, Measurement, Histogram, Statistics, Polar-View 등의 신호분석 화면을 보며 평가자는 초음파 신호에 대한 정확하고 신뢰할 수 있는 평가를 수행할 수 있다.

본 논문에서는 비주얼 도구에 관한 연구와 이를 개발하여 정확하고 신뢰할 수 있는 신호분석 평가결과 화면을 평가자에게 제공하는 방법을 기술한다. 또한, 이에 관한 유효성 검사의 일환으로 비주얼도구를 통하여 나온 그래픽분석 결과를 원전 배관용 접부의 자동초음파검사 기량검증 시 평가자에게 제공하고, 이를 이용하여 기량검증을 수행하여 합격기준을 만족한 결과에 대해서도 기술하였다. 평가자가 현장에서 사용 시에 불편한 점 및 기능에 대한 추가 및 수정 등의 현장 테스트 작업을 위해 비주얼 도구를 발전소 현장 비파괴검사에 적용하여 현장검사를 성공적으로 수행하였으며, 여기에서 수집된 정보를 통하여 기능을 보완 및 수정한 내용에 대해서 기술하였다.

## 2. 자동 초음파 비주얼 도구

### 2.1 설계 및 개발

#### 2.1.1 국내의 현황

국내에서 개발된 자동 초음파검사 시스템은 초음파 신호 취득 시스템 및 초음파탐촉자 구동을 위한 Scanner 개발 연구가 주로 수행되었다. 외국 자동 초음파검사 시스템에는 취득된 데이터로부터 정확한 결함평가를 위해 다양한 이미지 처리(Image Processing) 기법을 적용하여 초음파신호의 신호대 잡음비를 향상시키고 수집된 초음파신호를 재구성하여 검사대상의 결함을 정확히 모사함으로써 검사 신뢰도를 향상하는 이미지 처리기술이 미흡한 실정이다.

또한 원자력발전소 배관 초음파탐상검사를 수행하기 위해서는 기량 검증된 이미지 처리 기술이 있는 초음파검사 시스템을 사용하여야 하나, 국내에서 개발된 자동 초음파검사 시스템의 한국형 기량 검증에 인증된 시스템은 없으며, 국내 원자력발전소 자동 초음파검사 시스템은 미국 WesDyne사의

IntraSpect를 이용하고 있다.

자동 초음파탐상검사 시스템은 취득된 검사데이터를 활용하여 검사부위의 결함 유무 및 크기 측정을 위해 다양한 이미지 처리(Image Processing) 기법을 사용한다. 이러한 이미지 처리기법에는 Synthetic Aperture Focusing Technique, Line-Synthetic Aperture focusing Technique, Broadband Holography Technique 및 UT-Amplitude Time-of-Flight Locus-Curve Analysis Technique 등이 있으며, 국내 원자력발전소에 기량검증을 받아서 사용되고 있는 자동 초음파검사 시스템인 Intraspect에는 Synthetic Aperture Focusing Technique를 적용하고 있다.

다음으로는 자동 초음파검사 프로그램을 분석하여 장, 단점을 파악하여 비주얼도구에 반영하고자 해외 상용 프로그램인 IntraSpect와 TomoView를 분석하였다.

#### 가. IntraSpect 프로그램

미국 WesDyne사의 자동 초음파검사 프로그램인 IntraSpect의 특징은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

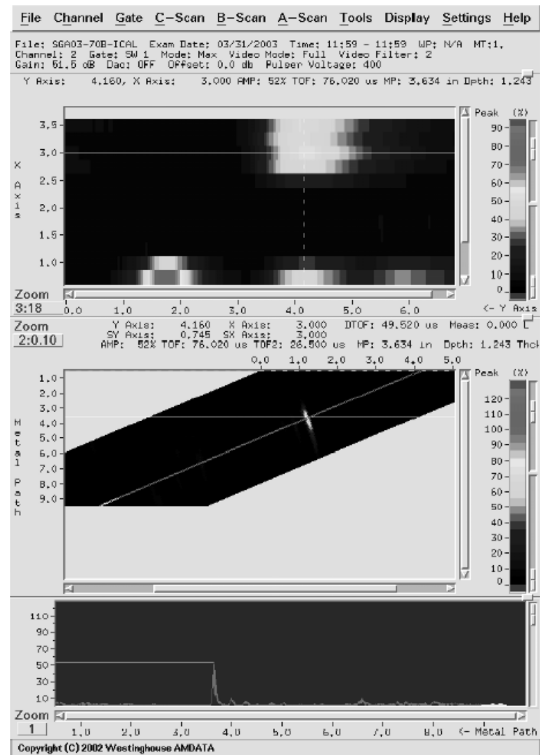


Fig. 1 IntraSpect GUI

- (1) 특징
  - Unix OS의 X-windows환경 프로그램
- (2) 모듈 구조
  - 10개의 Sub Module로 구성
- (3) 사용자 인터페이스
  - 기본 UNIX시 사용하던 SDI (Single Document Interface)화면과 MDI (Multiple DI)를 병용
  - 기본 모듈(UT Analysis 등)은 Icon이 없으며, 생성된 모듈은 icon 있음
  - 보고서는 기본 form(master, html)에 9개의 다른 형식의 보고서 양식을 추가로 삽입해서 보여줌(Print Form 모듈)
- (4) 정보저장 구조
  - intraSpect 고유의 파일 형식(tiff 등)을 가지며, 파일 header정보가 명확해야 해석 가능
  - 하나의 파일에 종속된 여러 개의 파일을 반드시 backup해야 한다.
- (5) 운영체제 및 크기
  - HP UNIX 또는 NT system / iux 113MB, nutcrack 26.8MB
- (6) 3rd Party Software
  - xvision, Vision services, vision protocol, nutcracker : PC
  - ImageMagic : Unix
- (7) 단점
  - UNIX 버전 변경작업으로 생성된 PC 버전은 설치 시 필요 없는 파일들이 생성
  - 사용자 인터페이스 편의성이 부족하다.
- (8) 장점
  - 원전 자동 초음파검사 시스템에 적용하고 있어 프로그램이 익숙하다.
  - 각 모듈별로 기능이 뚜렷하다 즉 간단한 기능과 구조를 가지고 있다.
  - 프로그램이 안정적이다.

나. TomoView 프로그램

캐나다 R&D Tech.사의 자동 초음파검사 프로그램인 TomoView의 특징은 다음과 같다.<sup>4)</sup>

- (1) 특징
  - MS 환경에서 visual studio를 사용하여 만든 프로그램이다.

- 프로그램 구조는 간략하고 단순화되어 있다.
- NT server 이상 버전으로 설치되며,
  - 인터넷정보 서비스관리(IIS)중 FTP 서비스를 실행하여야 한다.
  - Bootp Server 설치 : 관련 하드웨어 IP 정보 송수신
  - 설치시 rdtec dir 생성
- (2) 모듈 구조
  - 한 개의 main 모듈로 구성되어 있다.
  - dir에는 dll, exe(Tomoview-실행 프로그램, unwise-설치제거 프로그램)
  - mdb(rdtprobe : probe관련정보, tvdb-:그외정보 : 데이터베이스 테이블, 보고서 form, 쿼리(query) 등으로 구성
  - rdt(기본구조), rst파일들로 구성
- (3) 사용자 인터페이스
  - MDI 화면과 TAB기능을 적절하게 구성하여 사용자 위주의 화면구현
  - 주로 사용하는 기능을 Icon으로 구성
  - 보고서는 ms-access를 사용하여 새로운 화면 생성 및 보고서 형태 지원
- (4) 정보저장 구조
  - 기본파일 data는 rdtec\data dir 아래 저장되며, mdb는 tomo dir에 저장된다.
  - 기본 파일정보는 헤더정보가 있어야 해석 가능하다.
- (5) 운영체제 및 크기
  - NT system 이상 / Rdtec 1.14GB
- (6) 3rd Party Software
  - 없음
- (7) 단점
  - 한 화면에서 다양한 작업이 수행되므로 모니터 화면이 최소 1024×768 이상
  - IntraSpect에 비해 다소 복잡한 화면 구성
  - 초보자가 프로그램에 익숙하는데 다소 어렵다.
- (8) 장점
  - MS OS하에서 작성된 프로그램이므로 친숙하다.
  - 통합 모듈로 단순화된 프로그램 구조로 설계
  - 주요한 기능은 메뉴로 나타내고, 그 외의 선택 기능은 숨겨서 적절한 시점에서 볼 수 있도록 하여 편의성 및 효율성이 높다.

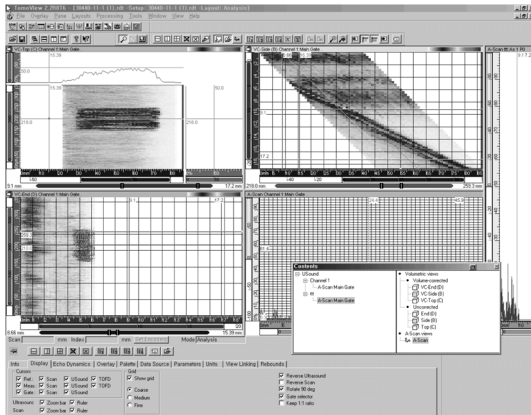


Fig. 2 TomoView GUI

- 설치 및 설치제거 작업이 쉽다.
- mdb의 xls 파일 형식으로 저장 가능함으로 power-point 및 ms-word 등의 보고서 작성이 편리하다.

이상으로 해외의 상용 소프트웨어를 비교분석하여 장, 단점을 도출하여 장점은 반영하고 단점은 배제하여 비주얼도구 개발에 반영하였다.

2.1.2 시스템개발

가. 개요

비주얼도구는 컴퓨터에서 Motion Controller를 통해 스캐너를 제어하며, 초음파 펄서/리시버(Pulser/Receiver)를 제어하여 초음파 탐촉자로부터 초음파를 발생시키고 검사대상체로부터 수신되는 신호를 A/D 변환기(A/D)를 통해 초음파 신호 데이터를 저장하고, 취득된 데이터를 통해 검사위치 및 초음파 신호 진폭에 대한 신호처리 알고리즘을 적용하여 A/B/B'/C/P-Scan 초음파 신호 이미지를 구현하게 된다. 또한 Ethernet제어를 통해 POD와 MDU로부터 시스템이 얻은 자동 초음파 검사신호와 엔코더 신호를 기반으로 하여 다양한 신호/이미지 후처리 기능을 수행함은 물론 필요로 하는 데이터베이스 관리와 보고서 출력 기능을 포함한 포괄적인 검사기능을 수행한다. 개발된 비주얼도구 시스템의 개요는 Fig. 3에서 도식화하였다.

소프트웨어 개발 환경으로는 Windows XP, 개발 언어는 C++, RAID Tool은 C++ Builder 6.0, 3D Graphic 라이브러리는 OpenGL을 사용하였다.

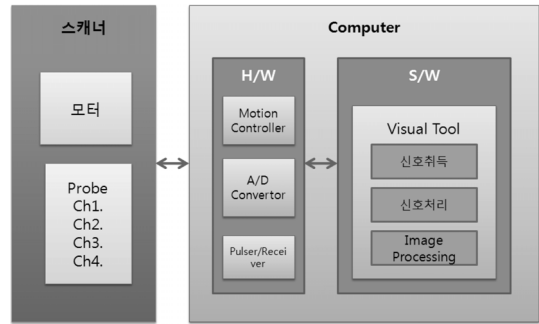


Fig. 3 Block diagram of Visual tool

프로그램은 제어용 PC에서 운용되며, Veritec사의 MicroPlus II 펄서/리시버 유닛과 MDU II 유닛을 제어한다. POD와 MDU는 ethernet을 통해 제어용 PC와 연결되는데, 제어용 PC와 POD의 ethernet연결 프로토콜은 TCP를 사용하였고, POD의 제어 프로토콜은 Veritec사에서 제공한 데이터 송수신 프로토콜을 사용하였다.

나. 주요 기능

비주얼 도구는 자동 초음파검사시스템의 취득된 데이터로부터 정확한 결함평가를 위해 다양한 이미지 처리(Image Processing)기법을 적용하여 초음파 신호의 신호대 잡음비를 향상시키고 수집된 초음파 신호를 재구성하여 검사대상의 결함을 정확히 모사하는 시스템에 관련한 것으로, 검사 결과의 신뢰도를 향상하는 효과를 얻을 수 있다. 다음은 특징적인 주요 기능이다.

(1) Color-Map

장치교정을 위한 절차에서 일차적으로 적정 검사감도를 설정하여 초음파 체적검사신호를 수집하고, 평가단계에서 취득된 초음파 신호데이터에 디지털 진폭값(gain)을 부여하여 선택한 검사단면에 대하여 국부적으로 스캔 영상의 감도를 올리거나 낮추는 방식을 취하는 기능

(2) Weld Overlay

원형 배관 용접부 초음파 검사 시 결함 지시가 나타나는 경우, 배관 또는 용접부의 기하학적 형상에 기인한 것인지 여부를 알 수 있도록 B-Scan 이미지 위에 용접부 형상을 겹쳐 놓아 초음파 신호 평가자가 결함이 발생한 지점을 쉽게 판단할 수 있도록 한 기능

(3) Hysteresis correction

스캐너 유격만큼 어긋난 화면을 보정할 수 있는 기능

(4) Statistics Module

Measurement 모듈에 의해 선택된 C-Scan 상의 사각형 내부 면적 영역에 해당하는 초음파 신호 데이터만을 추출하여 통계정보(Peak amplitude, Depth 길이 및 좌표 위치)들을 계산하여 출력하는 기능

(5) FFT(Fast Fourier transform)

이산 푸리에 변환(Discrete Fourier transform, DFT) 과 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘을 구현한 기능

(6) Histogram

특정 색상의 많고 적음을 막대 바 형태로 표시하여 색 분포 특징이 어떻게 되는지를 알 수 있도록 나타낸 막대그래프 이미지를 형상화하는 기능

(7) BHT(Broad-band Holographic)

일반적으로 2차원으로 표현되는 초음파 Scan 영상을 3차원 가상공간상에 결함의 위치와 진폭의 정보를 이용하여 표현하는 기법인 기능<sup>5)</sup>

(8) Pola-View

취득된 A-Scan 데이터를 평면상에 출력한 B/B'-Scan과는 달리 원형으로 B/B'-Scan을 출력하는 기능

(9) SAFT(Synthetic Aperture Focusing Technique)

초음파 빔 퍼짐에 의해 발생하는 지시결함의 크기 오차를 보정하여 실제와 유사한 크기와 형태의 결함영상을 얻기 위해 주로 사용되는 영상처리 기법<sup>6)</sup>

(10) Measurement

C-Scan상에서 특정 영역(사각형)의 면적 및 수직/수평거리 계산 등의 기능을 수행

(11) TOFD

두 개의 탐촉자를 이용하여 수집한 신호를 하나의 스캔라인으로 구성하여 선형스캔 영역을 평면이미지로 매핑함으로써 균열성 결함을 판정하는 검사기법을 구현한 기능<sup>7,8)</sup>

본 기능을 이용하여 나온 비주얼 화면의 예시는 다음 Fig. 4, 5, 6과 같다.

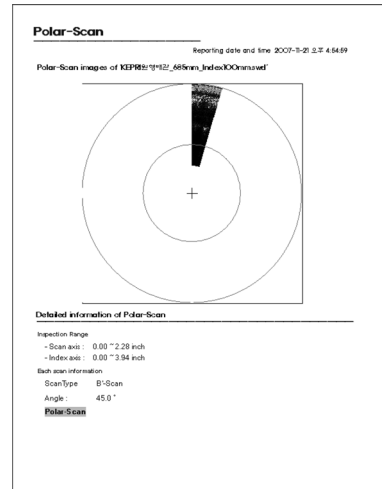


Fig. 4 Polar-View of Visual tool

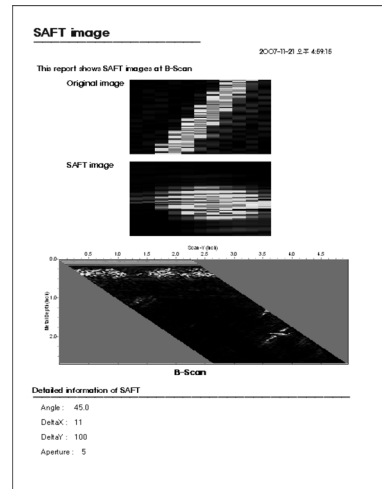


Fig. 5 SAFT of Visual tool

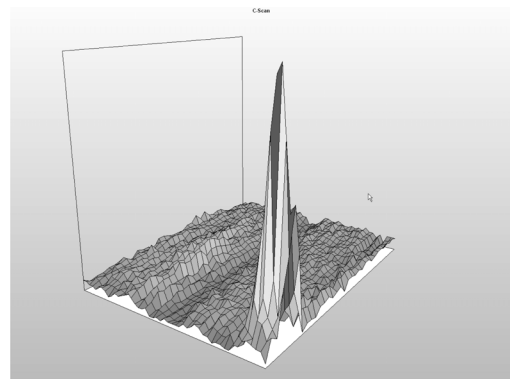


Fig. 6 BHT C-Scan

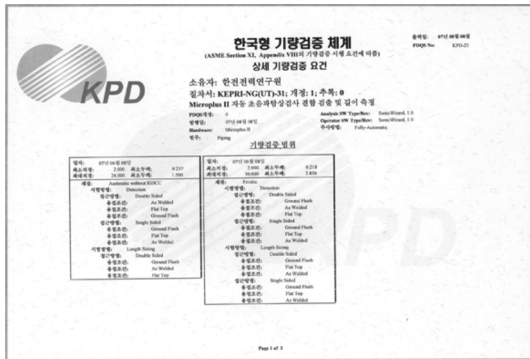


Fig. 7 기량검증 합격

### 2.2 기량검증

원전의 1차 계통 배관 및 원자력압력용기에 대한 자동검사를 수행하기 위해서는 자동 초음파 검사시스템에 대한 기량검증에 합격하여야 한다. 자동 초음파검사 시스템에 대한 기량검증은 검사절차서, 검사장비, 검사자의 순으로 기량검증이 진행된다.

자동 검사 시스템의 기량검증 절차는 응시원서접수, 절차서 검토, 신호 수집 및 평가, KPD에 의한 신호 평가, 검사자 Qualification, 시험 종결 및 PDQS 발행의 순으로 진행된다.

개발된 비주얼 도구에 대한 유효성 검사의 일환으로 이를 통하여 나온 그래픽분석 결과를 원전 배관용접부의 자동초음파검사 기량검증 시 평가자에게 제공하고, 이를 이용하여 기량검증을 수행하여 합격 기준을 만족하였다. 이로써 자동초음파 비주얼 도구의 신뢰성 및 정확성을 검증하였다.

### 2.3 현장적용

비주얼 도구가 개발되어 그 유효성이 검증되었지만 현장에서 사용자의 요구사항을 수렴하기 위해 고리 1호기 주급수 및 주증기 배관의 감육상태 확인을 위한 자동 초음파검사 두께 측정 시 본 도구를 이용하였다.

고리 1호기에서는 주급수 및 주증기 배관의 감육상태 확인을 위해 수동 초음파탐상검사로 두께를 측정하였으나, 배관 감육 상태의 시각화를 위해서는 기록된 검사 데이터에 대해 별도의 이미지 처리 작업을 수행하여야 한다. 그러므로 고리 1호기 주급수(Main Feedwater) 및 주증기(Main Steam) 배관에 대한 자동 두께 측정을 수행하여 비주얼 도구를 통하여 배관 감육상태를 확인하였다. 현장 사용 시 불

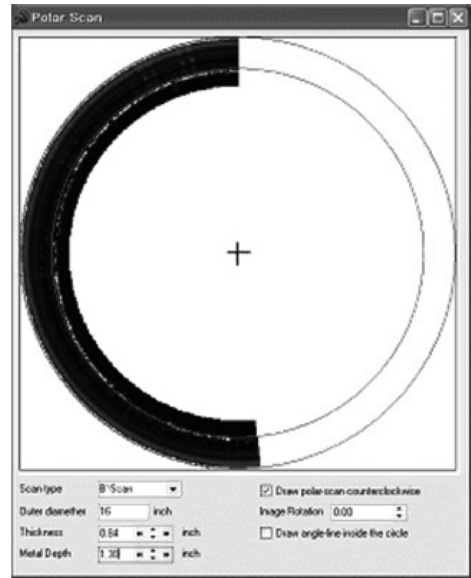


Fig. 8 현장적용

편했던 GUI화면과 Pola-View 기능을 추가하여 비주얼 도구개발을 완료하였다. Fig. 8은 현장 적용 시 용접부 중심에서 1인치 거리 배관 감육 자동 초음파검사 결과를 Polar View모듈을 통해서 나타낸 화면이다.

### 3. 결론

본 논문은 자동 초음파검사 수행 시 평가자에게 결함에 대한 정확한 결함 이미지 정보를 제공하고 자 개발된 도구에 대해 기술하였다. 본 도구를 개발하기 전 국내의 현황 및 해외 관련 소프트웨어에 대한 조사를 하여 이에 대한 장, 단점 분석을 수행하여 본 도구 설계에 반영하였다.

또한, 비주얼 도구를 이용하여 기량검증 시험에 합격하여 유효성을 검증하였고, 현장검사 시에도 결함 이미지 형상을 본 도구를 이용하여 두께를 측정하여 성공리에 현장검사를 수행하였고 사용자 요구사항을 반영하여 좀 더 편리한 GUI 화면과 새로운 이미지처리 모듈을 추가 개발하여 완성도를 높였다.

비주얼 도구는 국내에서는 없던 도구이며, 여러 가지 이미지 처리 기능을 가진 도구는 해외에도 없는 실정이며, 원전 배관 자동 초음파 검사 평가 시 본 도구의 사용으로 결함검출에 대한 신뢰성과 편의성을 제고하였다.

## 참고문헌

1. ASME B&PV Code Sec. XI, "Rules for the Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", 1995
2. ASME B&PV Code Sec. V, "Non-Destructive Examination", 1995
3. "Intraspect Ultrasonic Imaging System", Operations Manual Ver. 6.0, AMDATA, 2003
4. "TomoView 2", Reference Manual, Vol. 1, 2, 2003.6
5. O. Keitmann-Curdes, K. Jense, P. Knoll, H. Ermert, "3D Ultrasonic Imaging and Contour Detection in Sheet Metal Hydroforming", 2004 IEEE Ultrasonics Symposium
6. "Guide to Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction(TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaw", British Standard, BS 7706, 1993
7. M. G. Silk, "The use of diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects", British Journal of NDT, Vol. 26, pp. 208-213, 1984.
8. J. P. Charlesworth and J. A. G. Temple, "Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction", Somerset, England: Research Studies Press, 1989.