

## 소듐냉각고속로 소듐 내부 가시화를 위한 이중회전구동 C-스캔 시스템 및 프로그램 개발

### Development of Double Rotation C-Scanning System and Program for Under-Sodium Viewing of Sodium-Cooled Fast Reactor

주영상\*<sup>†</sup>, 배진호\*, 박창규\*, 이재한\*, 김종범\*

Young-Sang Joo\*<sup>†</sup>, Jin-Ho Bae\*, Chang-Gyu Park\*, Jae-Han Lee\* and Jong-Bum Kim\*

초 록 웨이브가이드 초음파센서를 적용하여 소듐냉각 고속로 KALIMER-600의 원자로 노심과 내부구조물의 소듐내부가시화를 수행하는 이중회전 구동 C-스캔 시스템과 소프트웨어 프로그램 Under-Sodium MultiVIEW를 개발하였다. 이중회전 구동 C-스캔 시스템은 KALIMER-600 원자로 헤드의 이중회전 플러그를 모사하여 설계 제작하였으며 웨이브가이드 초음파센서에 초음파 펄스를 송수신할 수 있는 고효율 초음파 시스템과 스캐너 구동 제어 장치를 구축하였다. Under-Sodium MultiVIEW 프로그램은 이중회전 스캐너의 구동을 제어하면서 웨이브가이드 초음파센서에 초음파 신호를 송수신하여 영상 처리를 수행하는 소듐내부가시화 프로그램으로서 LabVIEW 그래픽 프로그램 언어를 기반으로 개발되었다. 이중회전 구동에 의한 수중 C-스캔 성능시험을 수행하여 Under-Sodium MultiVIEW 프로그램의 가시화 성능을 실험적으로 검증하였다.

주요용어: 소듐냉각고속로, 소듐, 소듐내부가시화, 가동중검사, 웨이브가이드 초음파센서

**Abstract** A double rotation C-scanning system and a software program Under-Sodium MultiVIEW have been developed for the under-sodium viewing of a reactor core and in-vessel structures of a sodium-cooled fast reactor KALIMER-600. Double rotation C-scanning system has been designed and manufactured by the reproduction of double rotation plug of a reactor head in KALIMER-600. Hardware system which consists of a double rotating scanner, ultrasonic waveguide sensors, a high power ultrasonic pulser-receiver, a scanner driving module and a multi channel A/D board have been constructed. The functions of scanner control, image mapping and signal processing of Under-Sodium MultiVIEW program have been implemented by using a LabVIEW graphical programming language. The performance of Under-Sodium MultiVIEW program was verified by a double rotation C-scanning test in water.

**Keywords:** Sodium-Cooled Fast Reactor, Sodium, Under-Sodium Viewing, In-Service Inspection, Ultrasonic Waveguide Sensor

#### 1. 서 론

소듐냉각고속로는 액체금속인 소듐(Na)을 냉각재로 사용하며, 고속중성자에 의한 핵분열 반응을 일

으키는 원자로로서 제4세대 미래형 원자로로 개발되고 있다. 한국원자력연구원은 소듐냉각고속로 기술 자립화를 위하여 600 MWe급 풀형 소듐냉각고속로 KALIMER-600의 개념 설계를 완성하였다[1].

Fig. 1은 개발된 KALIMER-600의 원자로계통 개념 설계도를 보여준다. KALIMER-600 원자로 용기 내부에 소듐이 채워져 있고 소듐 속에 노심, 열교환기, 펌프 및 내부구조물들이 잠겨있다. 소듐냉각 고속로의 가동중검사 코드인 ASME XI, Div. 3에서는 원자로 내부구조물의 주기적 안전성 검증에 대한 기본 요건으로 육안검사를 수행하도록 규정하고 있다[2]. 소듐 냉각재는 금속이므로 광학적 방법으로 육안검사를 수행할 수가 없어 초음파를 이용한 소듐내부가시화(under-sodium viewing: USV) 방법을 적용하여 검사한다[3,4].

소듐내부가시화 초음파센서는 고온 소듐 내에 직접 액침시켜 수행하는 소듐액침 센서와 원자로용기 헤드 외부에 센서를 설치하고 봉 웨이브가이드를 이용하여 원격으로 초음파를 송수신하는 봉 웨이브가이드 센서가 개발되어 왔다[5-8]. 최근에 소듐냉각 고속로의 원자로 노심과 내부구조물을 원격으로 검사할 수 있는 새로운 판(plate) 웨이브가이드 초음파 센서를 개발하였다[9,10]. 개발된 웨이브가이드 센서는 원자로헤드 외부에 위치한 상용 초음파 센서로부터 판(plate) 형상의 웨이브가이드에 A0 모드 판파를 발생시키고 소듐 내부로 누설 중파를 전파시켜 소듐 내부의 반사체로부터 반사되어 오는 초음파 신호를 원격으로 송수신함으로써 고온 고방사능의 소듐 환경에 반영구적으로 적용할 수 있는 초음파 센서이다.

본 연구에서는 웨이브가이드 초음파 센서를 이용하여 KALIMER-600 소듐냉각 고속로의 원자로 노

심과 내부 구조물에 대한 소듐내부 가시화 초음파 검사를 수행할 수 있는 C-스캔 가시화 소프트웨어 프로그램을 개발하고자 한다. 본 프로그램은 LabVIEW 그래픽 언어를 사용하여 개발되었으며 KALIMER-600 소듐냉각 고속로의 원자로 헤드에 설치된 이중회전 플러그를 모사한 이중회전 스캐너를 정밀 구동하면서 고풍력 초음파 시스템 RITEC RAM-5000 3C를 제어하고 웨이브가이드 센서에 초음파신호를 송수신하여 가시화 영상 맵핑 기능을 구현하는 소프트웨어로서 향후 소듐냉각 고속로 원자로 내부구조물 소듐내부 손상검사 시스템의 핵심 프로그램으로 개발될 예정이다.

## 2. 이중회전 C-스캔 시스템

### 2.1. 이중회전 스캐너 설계 및 제작

소듐냉각 고속로 KALIMER-600의 원자로 헤드는 Fig. 2에서와 같이 이중 회전 플러그가 원자로를 중심으로 편심되어 설치되어 있다. 이중 회전 플러그는 서로 편심되어 있는 소형 및 대형 회전 플러그로 구성되어 있으며 이중회전 플러그의 회전 구동과 노내 핵연료 교환기를 이용하여 핵연료 교환 공정을 수행한다. 이중 회전 플러그에 고정 설치된 웨이브가이드 초음파 센서는 회전 플러그를 이송함으로써 원하는 노심 집합체 위치에 접근시킬 수 있다.

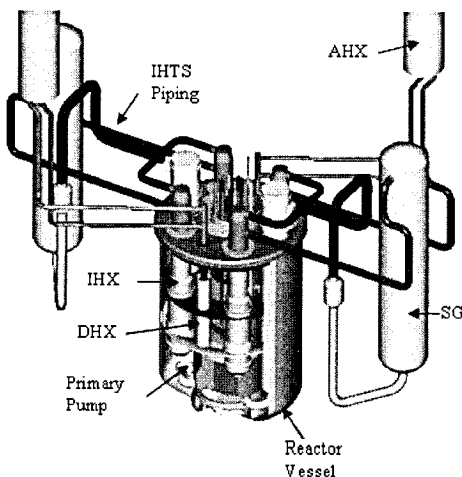


Fig. 1 KALIMER-600 reactor system

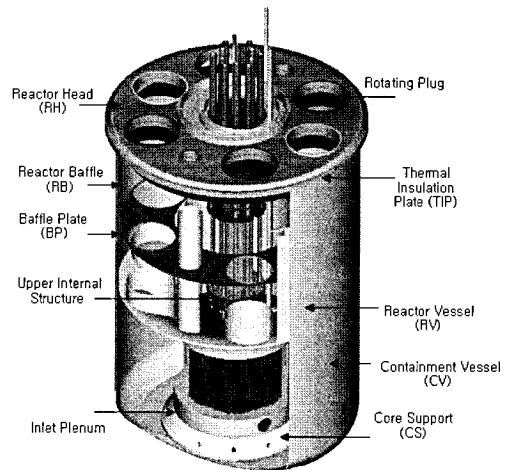


Fig. 2 Reactor and double rotating plug of KALIMER-600 reactor system

본 연구에서 개발한 이중회전 스캐너 장치는 KALIMER-600의 이중회전 플러그를 모사하여 1/6.7 비율로 축소 설계 제작되었다. 이중회전 스캐너는 Fig. 3에서와 같이, 1) 대형 외부 회전 구동부, 2) 소형 내부 회전 구동부, 3) 3채널 웨이브가이드 초음파 센서 지지부, 4) 모터 구동부, 5) 원통형 수조 탱크 및 프레임으로 구성되어 제작되었다. 이중회전 스캐너 장치의 외부 회전 구동부와 내부 회전 구동부는 각각 소듐냉각 고속로의 대형 및 회전 플러그에 해당되는 부분으로 360도 회전이 가능하고 시계방향 (CW) 및 반시계방향 (CCW) 회전구동을 반복적으로 수행할 수 있다. 외부 회전부와 내부 회전부의 직경은 각각 80 cm와 59 cm이며 7.2 cm 편심되어 있다. 재질은 알루미늄이고, 나사부는 헬리칼 기어로 가공되었다. 구동장치는 외부 및 내부 회전부를 구동하는 2개의 스텝핑 모터와 엔코더 및 모터를 구동하는 드라이버로 구성하였으며, 중심축 프레임은 내부 회전 구동부 중심에 설치되며 웨이브가이드 센서를 장착할 수 있는 구조이고 3채널 웨이브가이드 센서 설치부를 지지하는 역할을 한다. 3채널 웨이브가이드 센서 설치부는 중심축 프레임 축선상에서 미세 조정이 가능하며 중심부의 웨이브가이드 센서 설치부가 자전 및 수직이송을 할 수 있는 구동부와 2개의 스텝 모터와 엔코더를 설치하였다. 수조는 시험체를 물속에서 검사할 수 있는 투명한 아크릴 수조로 가공되었으며 수조 프레임은 회전 스캐너를 지지하고 수조를 고정한다.

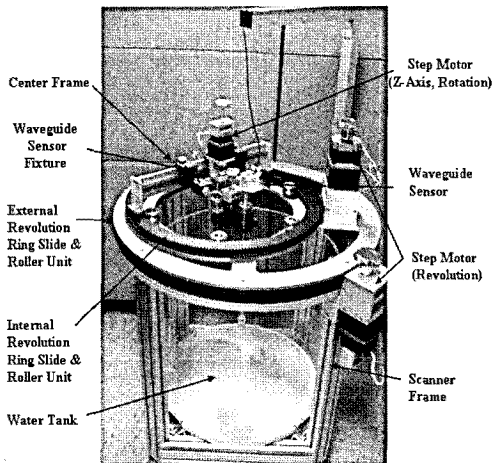


Fig. 3 Double rotation C-scanner

2.2. 이중회전 C-스캔 시스템

이중회전 구동 소듐내부 가시화 C-스캔 시스템은 Fig. 4와 같이 이중회전 스캐너, 웨이브가이드 초음파센서, 고풍력 초음파 송수신 시스템(RITEC RAM-5000 3C), 초음파 신호 수집 AD 보드(NI PCI-5105), 스텝모터 구동 모듈(NI MID-7604), 스캐닝 제어 및 C-스캔 수행 컴퓨터로 구성된다. 스텝 모터와 스캐너 구동 모듈을 통하여 이중회전 스캐너에 설치된 스텝모터에 기전력과 이동펄스를 제공하여 웨이브가이드 센서의 위치를 이송 제어한다. 고풍력 초음파 시스템에서 송출된 톤버스트(tone burst) 신호는 초음파 센서에 보내지고 반사된 신호들을 수신하여 AD 보드를 통하여 초음파를 디지털화하고, 이미지 맵핑을 위해 신호처리를 한다.

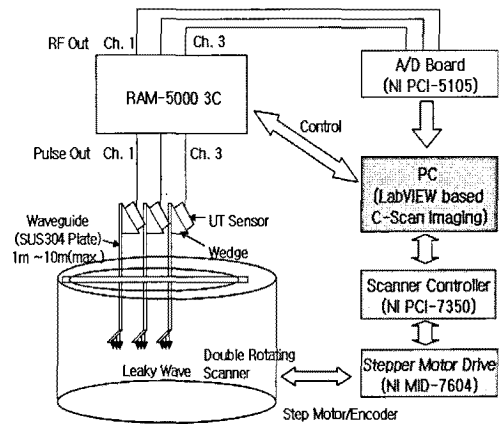


Fig. 4 Double rotation C-scan system

2.3. 이중회전 스캐너 좌표 설정

편심되어 있는 두 회전 플러그의 좌표 위치는 회전운동 관계 행렬식에 의해 구할 수 있다. Fig. 5에서와 같이  $C(x_f, y_f)$  점을 중심으로  $\theta$  만큼 회전을 위한 행렬은 동차좌표로 다음과 같이 표현한다.

$$R(x_f, y_f, \theta) = T(x_f, y_f) \cdot R(\theta) \cdot T(-x_f, -y_f) \tag{1}$$

여기서,

$T(x_f, y_f)$ 와  $T(-x_f, -y_f)$ 는 이동행렬로서 각각

$$T(x_f, y_f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_f \\ 0 & 1 & y_f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T(-x_f, -y_f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_f \\ 0 & 1 & -y_f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

이고,

$R(\theta)$ 는 원점을 중심으로  $\theta$  만큼 회전하는 회전행렬로서

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

이다.

그러므로, 변환 행렬식은

$$R(x_f, y_f, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & x_f - x_f \cos\theta + y_f \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & y_f - y_f \cos\theta - x_f \sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

이 된다.

이중 회전 플러그의  $A(x, y)$  점을 편심된 점  $C(x_f, y_f)$  를 중심으로  $\theta$  만큼 이동했다면  $A'(x', y')$  는 다음 식으로 구해진다.

$$A'(x', y') = R(x_f, y_f, \theta) \cdot A(x, y) \quad (5)$$

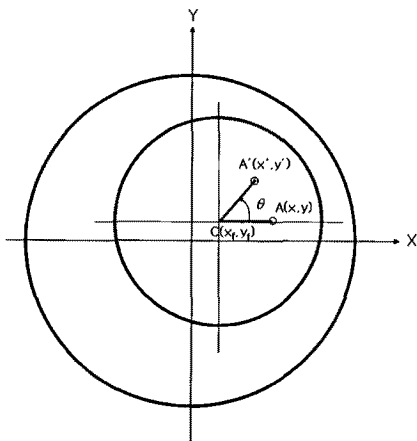


Fig. 5 Coordination of double rotation

### 3. C-스캔 프로그램 개발

#### 3.1. LabVIEW 프로그램

LabVIEW(laboratory virtual instrumentation engineer's workbench)는 C, Pascal, Basic과 같은 고전적인 텍스트 프로그램 언어와는 다른 그래픽 프로그램 언어로서 프로그램을 비교적 쉽게 작성할 수 있다[11]. LabVIEW는 매우 다양한 graphical user interface(GUI)와 광범위한 함수와 서브루틴 라이브러리를 갖고 있으며 데이터의 측정, 분석 및 표현에 적절하도록 특별히 고안되었으므로 자동화, 공정 제어, 모션 컨트롤, 측정 계측 및 데이터 수집 등 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. LabVIEW는 각종 측정 및 제어 장비를 운용할 수 있는 함수와 분석 함수가 내장되어있고 추가적으로 제공되는 광범위한 틀을 이용하면 사용자 어플리케이션의 영역을 무한대로 확장할 수 있으며 이들을 운용하는데 필요한 광범위한 기능과 실제 장비와 유사한 사용자 정의 인터페이스를 작성할 수 있는 기능들이 내장되어 가상 인스트루먼트(virtual instruments: VI) 시스템이라 부른다.

VI 작성은 장비의 컨트롤, 데이터 수집과 처리 분석 및 표시 등으로 이루어진다. VI를 구성하는 요소로는 크게 프론트패널(front panel)과 블록다이아그램(block diagram) 두 요소로 구성 된다. 프론트패널은 다양한 입력 컨트롤(control)과 출력 인디케이터(indicator) 및 그래프 등을 이용하여 실제 계측 장비의 프론트 패널과 유사한 사용자 GUI 환경을 구현한다. 또한 프론트패널은 이에 관계된 블록다이아그램을 갖고 있으며, 이것을 VI 프로그램 또는 소스코드라고 한다. LabVIEW의 블록다이아그램의 구성요소로는 기본적인 for 루프, case 구조, 산술 연산 함수 뿐 만아니라 수학, 모션, 인스트루먼트 IO 등등의 많은 함수 블록들로 구성되어 있다. 이들 구성요소들은 블록다이아그램 내에서 터미널 형태를 가지며 와이어로 연결하여 프로그램 한다. 아이콘/커넥터는 VI를 서브루틴처럼 다른 VI의 블록다이아그램에서 상용할 수 있게 객체(SubVI)로 사용할 수 있다. 커넥터의 터미널들은 아이콘의 입/출력을 어디서 연결하는가를 결정한다. 터미널들은 서브루틴의 변수와 유사하며, VI의 프론트 패널의 컨트롤과 인디케이터에 관계된다.

LabVIEW의 장점은 VI의 계층적 구조에 있다. 생성된 VI는 상위 레벨 VI의 블록다이어그램에서 SubVI로 사용할 수 있다.

3.2. 소듐 내부 가시화 C-스캔 프로그램

소듐냉각 고속로 KALIMER-600의 노심 및 내부 구조물에 대한 초음파 가시화검사를 수행하기 위한 소듐내부 가시화 C-스캔 프로그램을 LabVIEW를 사용하여 개발하였고 Under-Sodium MultiVIEW로 명명하였다. 본 프로그램은 웨이브가이드 초음파센서에 고출력 사각펄스를 송수신하기 위한 고출력 초음파 시스템 RAM-5000 3C 장비의 조정과 이중회전 스캐너의 이송을 제어하면서, 초음파 신호를 수집하여 영상 처리하는 프로그램이다. Fig. 6는 스캐너 컨트롤과 초음파 신호의 수집, C-스캔 이미지들의 맵핑하는 C-scan VI의 데이터 프로우 차트를 보여준다. UT 수집 모듈로부터 초음파 신호 정보와 위치정보 수집 제어 모듈로부터의 센서 위치정보를 이용하여 A/B/C-scan 모듈에서 이미지 맵핑 처리가 수행된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 개발된 Under-Sodium MultiVIEW 프로그램의 프런트 패널과 블록 다이어그램을 보여준다. Fig. 8의 블록다이어그램에서 각 아이콘들은 와이어로 연결되어 있다. 그 와이어들은 하나의 기능블록에서 다른 블록에 이르기까지의 흐름을 묘사하고 있다. Fig. 7의 프런트 패널에는 'A-scan display control' 패널, 'Gate configuration' 패널, 'FFT signal analysis' 패널, 'Motion axis control' 패널, 'RAM-5000 3C setting' 패널, 'B-scan operation' 및 'C-scan operation' 패널 등이 나타나 있어 각 패널에서 설정치를 입력할 수 있도록 하였다. 'C-scan operation' 패널에서는 웨이브가이드 센서의 구동 제어와 스캐닝 범위 설정, 그리고 해상도를 조정할 수 있다. Fig. 9의 'RAM-5000 3C setting' 패널에서 고출력 초음파 시스템의 입사펄스 개수, 주파수, 전압, 계인, 그리고 주파수 필터 등을 입력하여 조정할 수 있다. Fig. 7의 C-scan display 창에 나타난 스캐닝 이미지는 이중회전 스캐너를 구동하면서 모의 노심 시험편의 C-스캔 이미지 맵핑 결과를 보여준다. 개발된 Under-Sodium MultiVIEW 프로그램이 C-스캔 기능이 정상적으로 작동되고 있음을 보여주고 있다.

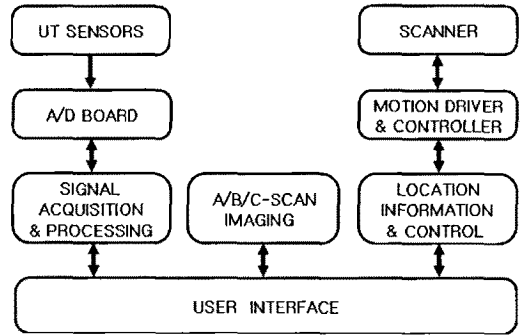


Fig. 6 Flow chart of C-scan VI

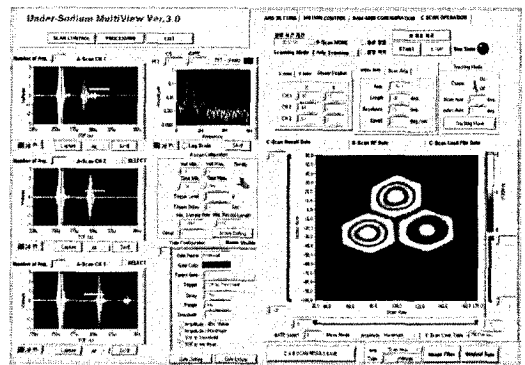


Fig. 7 Front panel of Under-Sodium MultiVIEW

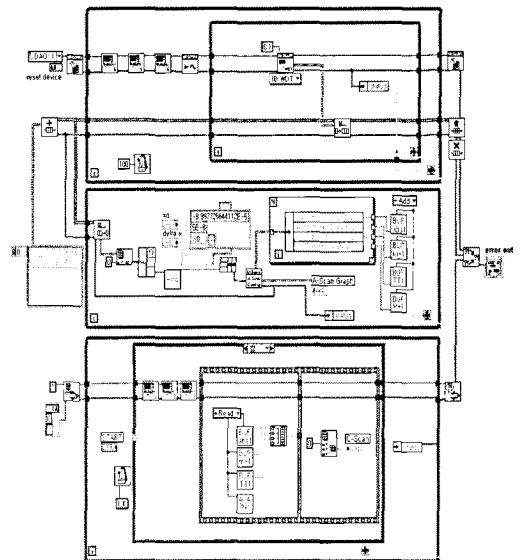


Fig. 8 Block diagram of Under-Sodium MultiVIEW

4. C-스캔 성능 시험

개발된 이중회전 C-스캔 시스템과 Under-Sodium MultiVIEW 프로그램에 대한 초음파 가시화 성능과 손상감지 해상 정밀도를 검증하기 위하여 모의 표면손상 시험편과 모의 노심에 대한 초음파 C-스캔 시험을 수행하였다. 길이 80 cm이고 폭이 15 mm 두께가 1 mm인 SS304 스테인리스강 판으로 제작된 웨이브가이드 센서 모듈에 공진주파수가 1 MHz인 초음파 탐촉자를 테프론 고체 웨지에 장착하여 tone burst 신호를 송수신하면서 이중회전 스캐너를 구동하여 C-스캔 시험을 수행하였다. 이중회전 C-스캔 검사를 수행하기 전에 Fig. 10에서와 같이 이중회전 구동에 의한 센서 궤적 맵핑 프로그램을 수행하여 웨이브가이드 초음파센서가 시험편 전체를 스캐닝할 수 있는 지를 예측한다.

Fig. 11은 폭이 각각 2 mm, 1 mm, 0.8 mm, 0.5 mm 인 슬릿(slit)과 직경이 10 mm 정도인 원형

및 6각형 워셔(washer)와 사각형 금속파편이 부착된 모의 표면손상 검증시험편과 C-스캔 영상을 보여주고 있다. 검증시험 결과 웨이브가이드 센서는 직경 10 mm이상의 사각형 및 원형 돌출부를 감지해 내었으며 폭이 2 mm인 슬릿을 충분히 감지할 수 있고 0.5 mm 슬릿까지도 탐지 가능함을 확인하였다. 또한 소음냉각 고속로 모의 노심에 대한 C-스캔 시험을 수행하였다. Fig. 12(a)는 3개의 핵연료 어셈블리가 장착된 모의 노심을 보여준다. 모의 노심의 핵연료 어셈블리 중에서 하단부 우측 핵연료 어셈블리 상단 원형부를 임의로 변형시켰으며 변형된 모의 노심에 대한 C-스캔 시험을 수행하였다. 어셈블리 상단면과 원형부의 반사 신호에 게이트를 걸어 이 신호의 진폭과 시간 데이터를 스캐너의 위치 값과 함께 저장함으로써 모의 노심에 대한 C-스캔 영상을 Fig. 12(b)와 같이 가시화할 수 있었다. C-스캔 시험 결과 핵연료 어셈블리의 6각 형상을 충분히 알아볼 수 있게 표현되었고, 우측 하단부의 임의 변형 부분은 변형되지 않은 부위보다 반사 신호 레벨이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

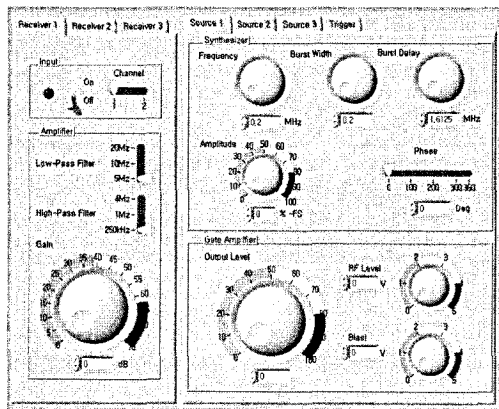


Fig. 9 Front panel of RAM-5000 3C setting

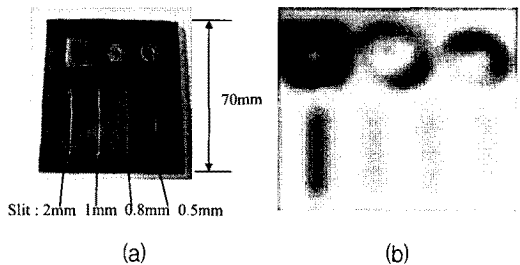


Fig. 11 C-scan test of the test specimen with loose parts and slits; (a) Test specimen (b) C-scan image

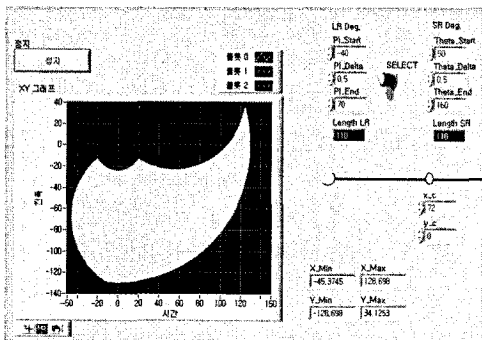


Fig. 10 Sensor positions (x, y) mapping locus of double rotation C-scan system

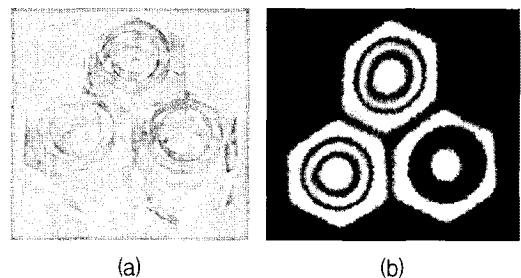


Fig. 12 C-scan test of the test specimen with loose parts and slits; (a) Core mock-up, (b) C-scan image

## 5. 결론

소듐냉각고속로 KALIMER-600의 원자로 노심과 내부구조물의 소듐내부가시화 검사를 수행할 수 있는 이중회전 스캐너 장치와 C-스캔 소프트웨어 프로그램을 개발하였다. KALIMER-600 원자로 헤드의 이중회전 플리그를 모사한 이중회전 스캐너를 설계 제작하였으며 웨이브가이드 센서에 초음파 신호를 장거리 송수신할 수 있는 고풍력 초음파 시스템 RAM-5000 3C와 스캐너 구동 제어 장치를 구축하였다. 이중회전 스캐너의 구동을 제어하며 동시에 3채널 고풍력 초음파 시스템의 초음파 신호를 취득하여 영상 처리를 수행하는 초음파가시화 검사 프로그램을 LabVIEW 그래픽 프로그램 언어를 기반으로 하여 개발하였다. Under-Sodium MultiVIEW로 명명된 본 프로그램은 수중 C-스캔 시험을 통해 그 성능을 확인하였다. 향후 본 프로그램은 소듐냉각고속로 원자로 내부 손상검사 시스템의 핵심 프로그램으로 확장 개발될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 2010년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] D. Hahn, et al., KALIMER-600 Conceptual Design Report, KAERI/TR-3381/2007, p. 363 (2007)
- [2] American Society of Mechanical Engineers, "Rules for in-service inspection of nuclear power plant component," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Division 3, ASME, New York (1992)
- [3] G. Seed, "In-service inspection and monitoring of CDFR," Nucl. Energy, Vol. 25, No. 2, pp. 129-135 (1986)
- [4] N. Lions, H. Buis, J. Baron, C. Fournier, J. Gourdon, A. Lacroix and A. Jeannot, "Utilization and performance of sodium instrumentation during start-up and initial operation of phenix," Int. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, pp. 755-761 (1980)
- [5] J. A. McKnight and P. Fenemore, "Under-sodium ultrasonic technology for LMFBRs," Science and Technology for Fast Reactor Safety, BNES, London, pp. 585-590 (1986)
- [6] N. Lions, R. Berger, A. Bret, H. Buis and J. Barton, "Apparatus for ultrasonic visualization in sodium (VISUS) and acoustic detection in the phenix reactor," ORNL-TR-4136 (1973)
- [7] J. P. Argous, M. Brunet, J. Baron, C. Lhuillier and J. L. Segui, "Immersed acoustical transducers and their potential uses in LMFBR," Int. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, CEA-CONF 5257 (1980)
- [8] J. A. McKnight, E. J. Burton and P. Fenemore, "Recent advanced in the technology of under-sodium inspection in LMFBRs," Liquid Metal Engineering and Technology, Vol. 1, pp. 423-430, BNES, London, England (1984)
- [9] Y. S. Joo and J. H. Lee, "Development of ultrasonic waveguide sensor for under-sodium viewing in liquid metal reactor," J. of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 26, No. 1, pp. 18-24 (2006)
- [10] Y. S. Joo and J. H. Lee, "Beam steering technique of ultrasonic waveguide sensor for under-sodium inspection of sodium fast reactor," 13th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE 13-50340 (2005)
- [11] National Instruments Corporation, LabVIEW Ver. 8.5.1, User Manual (2007)