

초음파센서를 이용한 냉중성자원 수직공 형상측정

박국남* · 심철무** · 최창웅**

(1999년 6월 24일 접수)

Measurement of the Shape of the Cold Neutron Source Vertical Hole by Ultrasonic Wave Sensor

Kook Nam Park, Chuel Muu Sim and Chang Oong Choi

Key Words : Cold Neutron Vertical Hole(냉중성자원 수직공), Ultrasonic Immersion Method(초음파 수침법), 4-Axis Manipulator(4축 형상측정장치), HANARO(하나로)

Abstract

The HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor) has operated since 1995. The Cold Neutron(CN) hole was implanted in the reflector tank from the design stage. Before a vacuum chamber and a moderator cell for the cold neutron source are installed into the CN hole, it is necessary to measure the exact size of the inside diameter and thickness of the CN hole to prevent the interference problem. Due to inaccessibility and high radiation field in the CN hole, a mechanical measurement method is not permitted. The immersion ultrasonic technique is considered as the best method to measure the thickness and the diameter. The 4 axis manipulator of the 2 channel of a sensor module was fabricated. The transducer of 10 MHz results in 0.03 mm of resolution. The inside diameter and thickness for 550 points of the CN hole were measured using 2 channel ultrasonic sensors. The results showed that the thickness is in the range of 3.3~6.7 mm and inside diameter is in the range of ϕ 156~165. These data will be a good reference in the design of a cold neutron source facility.

1. 서론

하나로는 30MW의 고효율 다목적연구로로서 방사성동위원소생산, 중성자빔이용연구 등에 사용되는 국가대형연구시설이다. 중성자빔 중에서 냉중성자는 X선이나 열중성자에 비해 장파장, 저에너지를 가지고 있기 때문에 단백질, 바이러스와 같은 거대분자의 연구, 재료내부조사연구, 물질의 계면이나 표면특성연구를 하는 수단으로 신소재개발, 복합소재연구에 필수적인 도구로 이용되고 있다.

이 냉중성자는 연구로에서 발생하는 열중성자를 액체수소 등의 감속재를 통과시킴으로써 생성

되는데 이러한 감속재, 감속재용기, 진공용기 등을 포함한 시스템을 냉중성자원이라 한다.

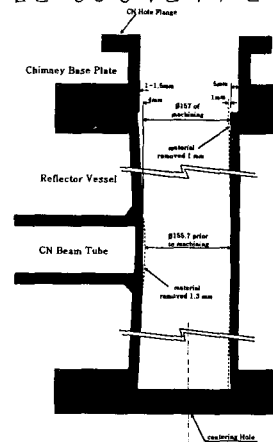


Fig. 1 The vertical hole of CNS before initial criticality of HANARO

* 회원, 한국원자력연구소 하나로이용연구단

E-mail : knpark@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2275 FAX : (042)868-8610

** 한국원자력연구소 하나로이용연구단

냉중성자원 설계와 관련하여 하나로 냉중성자원 감속재에 관한 열부하(heat load)계산 및 제열(heat removal)계통설계 연구⁽¹⁾와 냉중성자원 수직공에서의 열부하측정 및 분석 등이 있었다.⁽²⁾

냉중성자원을 통과한 냉중성자의 이득(gain)을 최대화하고 진공용기를 포함한 냉중성자원을 용이하게 유지하려면 Fig. 1에 있는 CN 공과 진공용기 사이의 경수층(water film)을 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 진공용기 설계요건을 확립하고자 초음파측정법을 이용하여 CN 공의 안지름 및 벽 두께를 측정하였다.^(3,4)

2. 초음파 측정법

2.1 측정법의 선택

CN 공 형상측정을 위해서는 다음사항이 만족되어야 한다. 첫째, CN 공이 수심 12 m 물 아래에 위치하므로 수중에서의 측정이 가능하여야 한다. 둘째, 방사선 조건에서의 측정이 가능하여야 한다.

측정법으로 검토된 것들은 Table 1과 같이 길이 측정용 리니어게이지(linear gage) 또는 삼점식 내측마이크로미터(three-point internal micro-meter)를 이용한 방식,⁽⁵⁾ 초음파센서를 이용한 방식, 여러 개의 모의 진공용기를 제작하여 CN 공에 삽입하는 방식 등이 있다. 이들 중 초음파를 이용한 측정법이 경제성, 정밀성, 방사선조건에서의 작업면에서도 가장 타당한 방법으로 판단되었다.

초음파법은 구조물의 결합, 온도 및 길이 등의 물성측정, 세정, 용접, 동력장치 등에 폭 넓게 사용되고 있다. 특히 수침법(immersion)은 미시적 영역인 반도체 제작 등 정밀진단에 사용되고 있다.

2.2 실험이론^(6,7) 및 모의 실험

원통형구조물에서의 수침법은 실린더의 내부결함 즉 기공, 포유물(包有物, inclusion) 뿐만 아니라 구조물 변형에 의한 지름 확장 및 감소, 표면의 침식, 부식에 의한 두께 변화를 동시에 측정할 수 있는 기법이다.

수침법에서는 Fig. 2와 같이 초음파신호가 나타난다. S1 및 S2 신호는 센서에서 CN 공의 내부표면에서 반사되는 신호로 이 시간차이는 안지름 측정에 사용되고, B1 및 B2 신호는 CN 공의 외부표면에서 반사되는 신호로 두께 측정에 사용된다. 센서 1, 센서 2는 동시에 원통형 구조물의 지름을 정확히 측정하기 위하여 중심을 잡을 수 있도록 하여준다.

CN 공 내부표면에서 반사되는 S1 신호의 진폭은

물의 음향 임피던스와 원통형구조물인 금속의 음향 임피던스에 의하여 식 (1)과 같이 나타내며,⁽⁷⁾ 음향 임피던스(Z)는 밀도(ρ)와 음향 속도(V)의 곱으로써 식 (4)와 같이 나타낸다. 여기서 식 (3)은 초음파가 원통형 구조물로 입사된 진폭이다.⁽⁸⁾

$$R = \frac{Z_w - Z_s}{Z_w + Z_s} \quad (1)$$

Table 1 Comparison of measuring method

Measuring method	Consideration			
	Availability	Precision	Cost benefit	Accessibility in the Radiation zone
Linear gauge	O	O	X	X
Three-point inside micrometer	O	O	X	X
Mock containment	O	O	O	X
Ultrasonic sensor	O	O	O	O

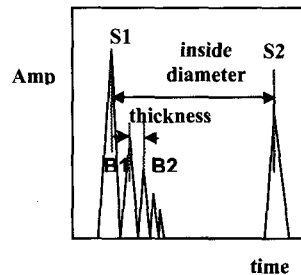
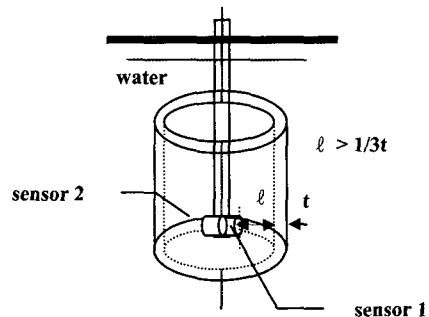


Fig. 2 The concept of measurement by the ultrasonic sensor(upper) and the characteristic of ltrasonic signals for the measurement(lower)

$$T = 1 - R \quad (2)$$

$$T = \frac{2Z_w}{Z_w + Z_s} \quad (3)$$

$$Z = \rho \cdot V \quad (4)$$

여기서

- Z_w : 물에서의 음향 임피던스(입사경계면)
- Z_s : 금속에서의 음향 임피던스(출구경계면)
- R : 반사된 진폭/ 발생된 진폭
- T : 전달된 진폭/ 발생된 진폭
- ρ : 매질 밀도
- V : 음향 속도

그러므로 시험편 두께(t)의 앞면에서 반사된 신호 S1 과 뒷면에서 반사된 신호 B1 의 진폭비는 식 (5)와 같이 나타난다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} \frac{\text{Amplitude of } S1}{\text{Amplitude of } B1} &= (1 - R^2) \cdot e^{2\alpha} \\ &= \left(1 - \frac{(Z_w - Z_s)^2}{(Z_w + Z_s)^2} \right) \cdot e^{2\alpha} \\ &= \left(\frac{4Z_w Z_s}{(Z_w + Z_s)^2} \right) \cdot e^{2\alpha} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서

- α : 감쇠율
- t: 시험편 두께일 때

이 실험에서 식 (1)과 식 (5)에 의하여 S1 과 B1 신호의 진폭비는 0.94 : 0.12로 계산되어진다. 그리고 물에서의 음향 임피던스는 $1.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \times 10^6$ 이고 금속에서의 음향 임피던스는 $45.4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \times 10^6$ 로 나타난다.⁽⁶⁾

위의 식으로부터 S1, S2 와 B1, B2 진폭신호의 차이 및 빔의 진행거리의 차이로 CN 공의 안지름 및 두께측정을 동시에 할 수 있다. 지름과 두께를 정확하게 측정하고자 입사파의 빔 발산을 고려하였다. 두께신호 앞으로 안지름신호가 앞서는 것을 피하기 위해서 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 초음파 센서는 벽 표면으로부터 벽 두께의 1/3 이상에 위치시켜야 한다.⁽⁷⁾

실제 측정 전에 초음파센서를 이용한 측정용 모형(mock-up)을 설계·제작하여 측정 가능성을 확인하였다. 그리고 CN 공의 두께 및 지름측정을

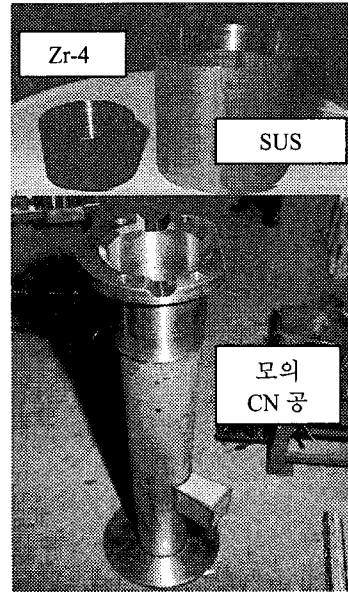


Fig. 3 Mock-up

위한 형상측정장치를 개발하여 센서조립체널에 2 개의 초음파센서를 조립하고, 초음파 측정장비를 이용하여 모형실험 및 측정실험을 수행하였다.

Fig. 3 의 3 개의 모형중 $\phi 100$ Zr-4 와 $\phi 155$ SUS 모형은 CN 공 측정신호의 보정(calibration)에 사용되었고 모의 CN 공은 측정절차의 확립, 4 축 형상 측정장치(4-axis manipulator)의 동작시험을 위하여 사용되었다.

보정방법은 Zr-4 모형을 사용하여 S1 신호의 진폭을 총화면 높이(Full Screen Height)의 80%에 오도록 조정하고 시간 축에서는 B1, B2 의 신호들의 시간측정 값은 최소 1 눈금(division)이상이 나타나도록 조정하였다.

측정정밀도는 식 (6)인 Bragg 의 법칙에 따라 결정되며 사용한 탐촉자 주파수 파장의 1/2 까지 측정 정밀도를 얻을 수 있고 10MHz 의 초음파센서를 사용하여 약 0.03 mm 정도까지 측정 가능하였다.⁽⁷⁾

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (6)$$

여기서

- λ : 파장
- d: 측정정도
- θ : 입사각이다.

디지털 버어니어캘리퍼스를 이용하여 확인한

초음파센서의 측정오차는 Table 2 와 같다.

종파는 액체와 고체에서 잘 전파하며 초음파 입사빔이 CN 공의 안쪽 표면에 접근했을 때 Snell의 법칙인 식 (7)에 따라 종파와 횡파로 바뀌면서 굴절되어 입사한다.

$$\frac{\sin \theta}{V_w} = \frac{\sin \alpha}{V_L} = \frac{\sin \beta}{V_S} \quad (7)$$

여기서

- θ : 입사각
- α : 종파굴절각
- β : 횡파 굴절각
- V_w : 액체에서의 입사파 속도(m/s)
- V_L : 고체에서의 종파 속도(m/s)
- V_S : 고체에서의 횡파 속도(m/s)

초음파 빔의 발산은 식 (8)에 의해서 얻어지며

CN 공의 곡률로 인하여 발산각은 입사각으로 종파, 횡파 및 표면파가 원통형구조물에 전달되어 반사된다.⁽⁶⁾

$$\sin \theta = 0.51 \frac{\lambda}{D} \quad (8)$$

여기서

- λ : 초음파 파장(m)
- D : 초음파센서 지름(m)이다.

안지름과 두께를 나타내는 빔 노정거리(Metal Path) MP 는 식 (9)와 같이 나타낸다.⁽⁶⁾

$$MP = \frac{V \times S}{2} \quad (9)$$

여기서

- MP : 빔 노정거리(mm)
- V : 초음파속도(m/s)
- S : time of flight

Table 2 A measuring error of ultrasonic sensor

Ultrasonic sensor	Vernier caliper	Measuring error
1.132	1.17	0.038
2.360	2.24	0.02
3.228	3.20	0.028
4.230	4.21	0.02

본 실험에서 빔 산란은 주파수 10 MHz 이고 지름 12 mm 초음파센서의 물에서의 산란각은 4° 이다. 종탄성파의 속도는 주로 물에서는 1,490 m/s 이고, Zr-4 에서는 4,720 m/s 이다. 전단탄성파의 속도는 일반적으로 종파의 반이다. 결국, 식 (7)에 의해서 6°의 횡파와 12°의 종파가 굴절되고 반사된다.

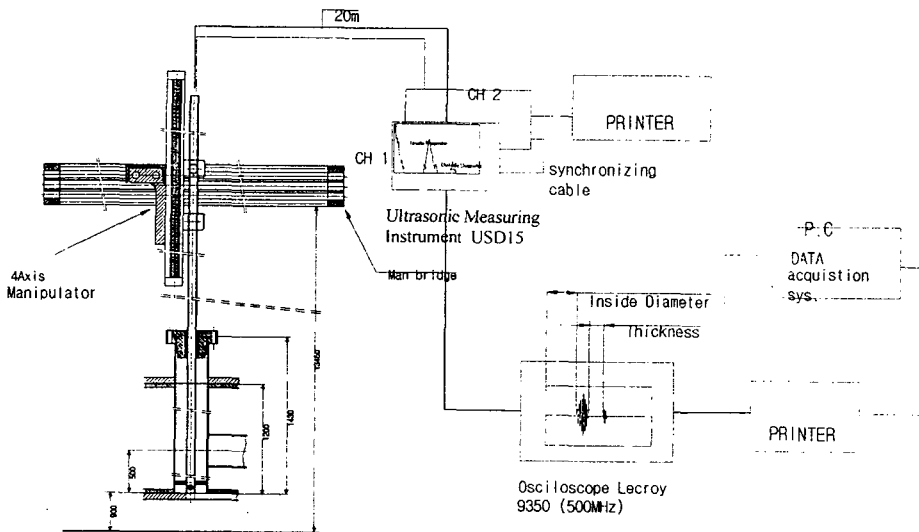


Fig. 4 The diagram of ultrasonic measurement system

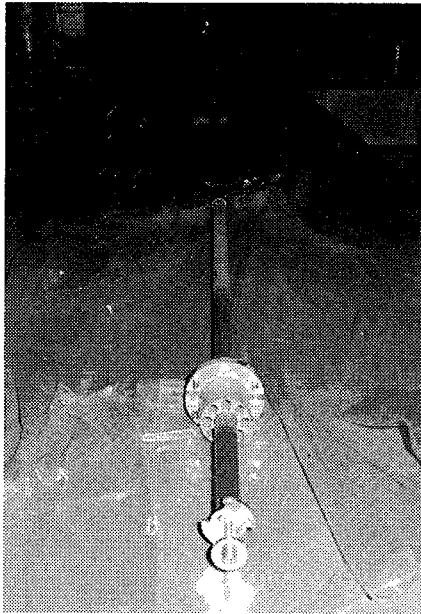


Fig. 5 Measuring channel

2.3 측정장치

본 실험에 사용된 형상측정장치는 방사선 조건에서의 작업성, 안전성, 정밀성, 경제성 등을 고려하여 개발되었다.

측정계통은 Fig. 4 와 같으며 기계적으로는 받침대, 4축 형상측정장치(4-axis manipulator), 측정용채널로 이루어진 형상측정시스템과 USD15 초음파측정장비 2대, 오실로스코프(Lecroy 9400 oscilloscope) 2대, 컴퓨터의 자료수집계통(data acquisition system) 및 프린터 등으로 이루어졌다.

초음파센서 모듈의 위치를 제어하기 위하여 스텐레스강으로 제작된 4축 형상측정장치(4-axis manipulator)를 설계·제작하였다. 특히 작업성을 고려하여 이 형상측정장치는 받침대 위에 올려져 고정되고 스텐레스 강재로 구성된 받침대는 원자로 맨브리지(man-bridge)에 설치되어 체결되도록 하였다.

형상측정장치는 120 cm×100 cm×150 cm(가로 × 세로 × 높이) 크기로서 X-Y-Z 축에 핸들이 연결된 특수강의 정밀 볼스크류, 부시 그리고 베벨기어에 의해서 스텐레스강으로 제작된 ㄷ자형 앵글에 조립된 정밀 가이드축을 따라서 4축 방향으로 부드럽게 이동이 가능하도록 하였다.

4축 형상측정장치는 측정용채널을 360° 회전 가능하면서도 필요할 때 장탈·착이 용이하도록 설계되었다. 측정용채널의 Z축 방향 이동상태를 알

수 있도록 철(steel)자가 부착되었고 측정용채널의 회전각도를 정확히 동작할 수 있도록 인덱스가 부착되었다.

Fig. 5 와 같은 측정용채널은 조립용 슬리브가 용접된 길이 3 m(단 회전채널은 1.2 m)의 5개 알루미늄 파이프를 길이방향으로 끼우고 볼트체결하여 길이가 약 13 m가 되었다.

외측채널 안쪽으로 케이블을 삽입하여 센서와 초음파측정 장비를 연결하였다. 측정용채널 안쪽 내부채널에 조립된 하부지지구(하강제한판)가 원자로구조물에 조립되어 기준점 역할을 하면서, 알루미늄으로 표면이 정밀하게 제작된 안내슬리브는 침니(chimney)의 CN 공 플랜지에 맞대면서 4개의 고정핀이 조립되어, 측정 정밀도를 유지하도록 하였다. 특히 초음파센서 모듈조립체는 180° 방향으로 2개의 초음파센서가 조립되면서도 바깥쪽채널 하부 끝단에 용이하게 조립이 되도록 제작하였다.

3. 측정실험 및 결과분석

3.1 원자로에서의 측정실험

맨브리지에 설치된 CN 공 형상측정장치는 수동으로 제어되며 2대의 USD15 초음파장비에 채널 1, 2 센서가 연결되고, 센서조립채널의 내부채널 하강제한판이 그리드 플레이트공(centering hole)에 삽입되어 CN 공 중심을 지지하도록 하였다.

안지름 및 두께 측정을 위해서 내측채널 하강제한판이 그리드 플레이트에 완전히 삽입된 후 센서모듈의 위치를 종축의 영점으로 하였으며 하나로 중심을 하여 남쪽을 회전축 0°로 횡축기준 영점을 잡았다. 냉중성자원 수직공의 두께측정은 측정용채널의 남쪽을 0°로 하여 기준을 잡고서, 채널 1 센서를 하향(looking down) 시계방향으로 38° 위치하였다.

센서조립체에 180° 간격으로 양쪽에 2개의 초음파센서가 조립되어 있으므로 채널의 회전각도를 20° 간격으로 160° 까지 회전시키면 18 point에 대한 두께 측정값을 얻어냈다. 그리고 CN 공 수직방향으로는 센서조립높이 45 mm와 측정용채널의 원활한 회전을 위하여 CN 공 바닥에서 20 mm를 높여 CN 공 바닥 65 mm에서부터 40 mm 간격으로 32 point를 측정하여 총 576 point를 측정하였다.

수심 12 m 아래 위치에 있는 CN 공 형상을 측정하는데 케이블 길이는 20 m 이고 증폭기 없이 신호를 증폭하는데 문제가 없었으며 Fig. 6 과 같이 정상적인 두께 신호를 얻을 수 있었다.

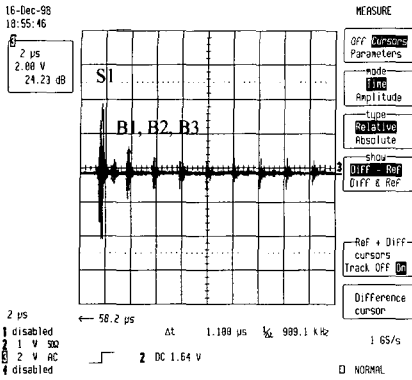


Fig. 6 Ultrasonic signals pattern from CN-holes's regular surface

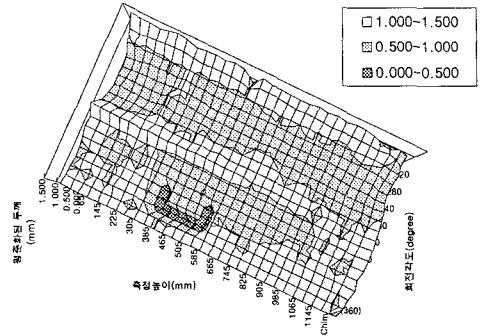


Fig. 8 3D-Image of CN hole's thickness

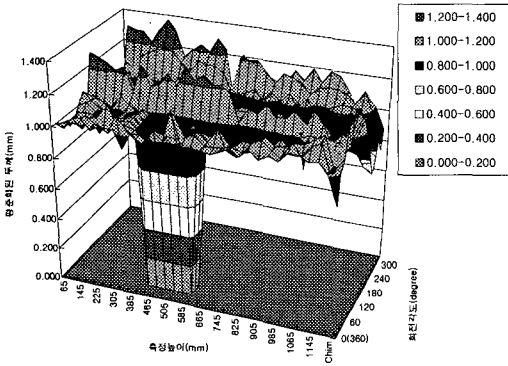


Fig. 7 3D-Image of CN hole's thickness

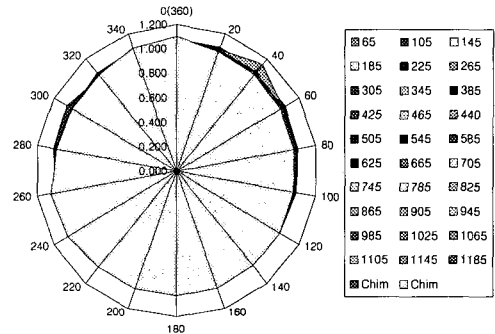


Fig. 9 2D-Image of CN hole's Inside radius

3.2 실험결과 및 분석

두께측정 결과를 Fig. 7 에 3 차원으로 나타내었다. CN 공 측정두께의 대부분이 4~6 mm 범위에 있으면서 불규칙하게 나타내고 있으며, CN 공에 수평 빔튜브가 용접된 부분은 사각기둥 형태로 나타났다.

두께측정 결과는 Fig. 8 에서 보다 자세히 나타났다. 대부분이 4~6 mm 임을 알 수 있다. CN 공의 상·하부의 220~280° 근처에서 4 mm 미만의 두께를 나타내고 있는데 이것은 CN 수직공에 수평 빔튜브가 용접된 후 변형에 의한 굽힘을 보완하기 위해서 보링(boring) 가공된 부위이며, CN 공 하단에서 550 mm 까지 160° 와 340° 부분에서 두께가 6 mm 이상으로 나타났는데 이것은 가공되지 않은 모재 자체 부분이다.

그리고 수평 빔튜브는 ㄷ자 형태로 나타났는데 이것은 수평 빔튜브 철판두께가 5 mm 인데 측정 간격이 40 mm 로 크기 때문에 한쪽은 측정이 되

지 않고 그냥 스쳐 지나갔기 때문이다.

결국, 두께측정에서 최소값은 3.3 mm 로 나타났는데 안전성분석보고서에는 최소값을 3.1 mm 이상으로 요구하고 있으므로 안전상의 문제는 없는 것으로 나타났다.

초음파센서를 이용한 실험에서 CN 공의 지름측정은 두께측정과 동시에 이루어졌으며, Fig. 9 에서와 같이 반지름 값이 최소 72.2 mm 에서 최대 87.0 mm 로 제작 및 설치에 지나치게 큰 편심 오차를 지니고 있다. 특히 160° ~240° 범위에는 최소 72.2 mm 까지 되는 부분까지 있어 진공 용기의 삽입 설치시에 지름이 ϕ 144.0 를 넘지 못할 것으로 생각된다.

원자료를 설치할 때 수평 빔튜브 용접과정에서 CN 수직공이 ϕ 155.7 로 변형되었는데 향후 CN 공에 냉증성자원을 설치할 때에 어려움을 줄이고자 안지름을 ϕ 157.0 로 보링 가공되었다.

CN 공은 최소 ϕ 155.8 에서 최대 ϕ 165.0 까지 측정 되었다. 따라서 CN 공 플랜지의 핀 위치에 대한 정확한 측정이 선행된다면 진공용기 바깥지름

을 $\phi 155$ 로 제작하여 조립이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

측정 대상이 수심 12 m 물 아래에 위치한다는 것과 방사선 조건이라는 여건을 고려하여 수침초음파법으로 하나로 원자로 용기 내에 잇는 CN 공의 지름과 두께를 측정하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) $\phi 144.0$ 이하의 진공용기가 조립 가능하지만 CN 공 플랜지의 핀 위치에 대한 정확한 측정이 선행된다면 $\phi 155.0$ 에 가까운 진공용기의 설치도 가능하다.

(2) CN 공의 두께측정 최소값은 3.3 mm 로 나타났는데 안전성분석보고서에서 요구하는 최소값보다 큰 것을 확인하였다.

(3) 초음파센서를 이용하여 두께와 지름을 측정할 수 있는 4 축 형상측정장치를 개발하였고, 이 장치를 이용한 두께와 지름 동시측정 기술을 개발하였다.

(4) 본 실험을 통해서 개발된 형상측정장치는 하나로의 가동중 검사(IAEA working ID35-G7 에 따라 수행됨.)에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 실험은 과학기술부의 원자력중장기과제인 연구로이용기술과제에 의해서 수행되었으며, 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 박국남, 박중학, 조만순, 최창용, 유성연, 1999, "하나로 냉중성자원 감속재 냉각에 관한 연구," 한국초전도·저온공학회, 제 1 회 학술대회논문집, pp. 177~181.
- (2) 조만순, 박국남, 이병철, 손재민, 박상준, 심철무, 최창용, 1999, "Heat Load Measurement in the Vertical Hole for Installation of Hanaro CNS," *Proceeding of The 6th Asian Symposium on Research Reactor*, JAERI-Conf 99-006, pp. 385~391.
- (3) 박국남, 심철무, 최영현, 구길모, 이용섭, 최창용, 1999, "냉중성자원 수직공 초음파 형상측정 및 표면검사," KAERI/TR-1261/99.
- (4) 최창용, 조만순, 박국남, 손재민, 심철무, 최영현, 이무웅, 1999, "냉중성자원 개발," KAERI/RR-1916/98, pp. 117~215.
- (5) 권경우, 강형모, "측정공학," p. 73, pp.158~165
- (6) Albert S. Birks, Robert E. Green Jr, Paul McIntire, 1991, "Nondestructive Testing Handbook" - Vol. 7 Ultrasonic Testing, *American Society for Non-destructive Testing*, p. 198, p. 259, pp. 369~373.
- (7) Stefan Kocis, Zdenko Figura, 1996, *Ultrasonic Measurements and Technologies*, Chapman & Hall, pp. 15~16.
- (8) 임종환, 조동우, 1992, "확률지도를 이용한 자율 이동로봇의 경로계획," 대한기계학회논문집 제 16 권 제 4 호, pp. 675~683.