

소듐냉각고속로 소듐가시화를 위한 웨이브가이드 초음파센서 개발

Ultrasonic Waveguide Sensor for Under-Sodium Visualization of Sodium-cooled Fast Reactor

주영상† · 배진호* · 김종범*

Young-Sang Joo, Jin-Ho Bae and Jong-Bum Kim

1. 서 론

소듐냉각고속로는 액체금속인 소듐(Na)을 냉각재로 사용하며, 고속중성자에 의한 핵분열 반응을 일으켜 한정된 우라늄 자원을 획기적으로 활용할 수 있어 제4세대 원자로로 개발되고 있다. 소듐냉각고속로의 소듐 냉각재는 광학적으로 불투명하여 원자로 내부의 노심과 내부구조물을 가시화하기 위해서는 초음파검사 기법을 적용하여야 한다. 이를 위해 소듐냉각고속로 개발 초기부터 소듐가시화 초음파센서를 개발하여 왔으나 고온 고방사능 환경으로 인해 아직까지 완전 상용화가 이루어지지 않고 있다. 최근에 소듐냉각고속로의 원자로 노심과 내부구조물을 원격으로 검사할 수 있는 새로운 판(plate) 웨이브가이드 초음파센서가 개발되었다. 개발된 웨이브가이드 센서는 원자로헤드 외부에 위치한 상용 초음파 탐촉자로 부터 판 형상의 웨이브가이드에 제0차 반대칭 판파(A₀ 모드 판파)를 발생시켜 전파시키고 소듐 내부로 누설 종파를 전파시켜 소듐 내부에서 반사되어 오는 초음파 신호를 원격으로 송수신하는 초음파센서로서 고온 고방사능의 소듐 환경에 반영구적으로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 소듐냉각고속로의 고온 액체 소듐 환경에 실제 적용할 수 있는 소듐중 웨이브가이드 초음파센서를 개발하며 소듐중 실증시험 장치를 설계 제작하고 소듐중 웨이브가이드 초음파센서의 소듐중 초음파 전파 특성 시험과 C-스캔 시험을 수행하여 그 성능을 검증한다.

2. 웨이브가이드 초음파센서

판형 웨이브가이드 초음파센서가 액체와 접하는 방사면 끝단에서는 모드 변환에 의해 액체 내부로 방출되는 종파 초음파 빔의 방사각도(α)는 다음과 같다.

$$\alpha(f) = \sin^{-1} [V_L / C_{ph}(f)] \quad (1)$$

여기서, V_L 은 액체의 종파속도이고 C_{ph} 는 A₀ 모드의 위상속도이며 f 는 입사 주파수이다.

A₀ 모드 판파를 이용한 판형 웨이브가이드 초음파센서를 소듐 중에 적용하는데 있어서 두께가 1.5mm인 304 스테인리스 강(304SS) 재질의 판 웨이브가이드에서 전파하는 A₀ 모드 판파의 위상속도는 소듐의 종파속도($V_L=2.474\text{m/ms}$)와 거의 같거나 약간 높아서 소듐 중에서 누설종파가 발생하지 않거나 방사각이 70°~80° 정도로 커서 빔 퍼짐 현상이 크게 발생하는 문제가 있고, 소듐의 낮은 윌팅(wetting) 성능으로 인해 소듐 중으로 초음파가 잘 전파되지 못하는 문제가 있다. 이러한 A₀ 모드 판파 전파 및 소듐중 방사 특성상의 문제점을 극복하기 위해서 새로운 형태나 재질을 갖는 혁신적인 웨이브가이드 초음파센서가 개발되어야 한다. 본 연구에서는 웨이브가이드 초음파센서에서 스테인리스 강 판의 외면에 일정 두께(약 0.125mm에서 0.25mm정도)의 베릴륨(Be)을 코팅함으로써 A₀ 모드 판파의 소듐중 빔 방사 성능을 개선시킬 수 있는 새로운 방안을 제시하였다. 베릴륨은 자연에 존재하는 재료 중에서 가장 초음파 속도가 빠른 물질로서 종파 속도가 12.89m/ms로 종파속도가 5.79m/ms인 304SS 보다 두 배나 빠르다. 304SS 판에 베릴륨을 코팅하면 위상속도가 현저하게 증가하는 특성이 나타난다. 또한, 소듐중 윌팅 성능을 개선시키기 위해서는 초음파센서 방사면에 니켈을 코팅하고 표면 조도(Ra)를

† 교신저자: 한국원자력연구원
E-mail : ysjoo@kaeri.re.kr
Tel : 042-868-8239, Fax : 042-868-2857
* 한국원자력연구원, 고속로실증연구부

가능한 $0.02\mu\text{m}$ 이하가 되도록 정밀 연삭하는 방안을 제시하였다.

3. 소듐중 실증시험

Fig. 1은 새롭게 제시된 소듐중 웨이브가이드 초음파센서의 설계 개념도와 제작 사진을 보여준다. 웨이브가이드 초음파센서 구성품의 재질은 코팅재를 제외하고 모두 304SS이고 튜브 직경은 19.05mm이고, 판 두께는 1.5mm, 폭은 15mm, 길이는 1.7m이다.

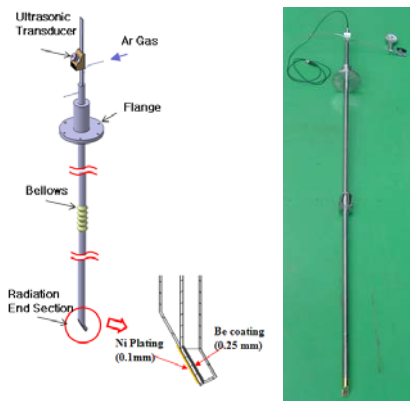


Fig. 1 Under-sodium ultrasonic waveguide sensor

개발된 소듐중 웨이브가이드 초음파센서의 소듐중 초음파 전파 특성과 빔 방사 성능을 분석하고 C-스캔 가시화 분해능 측정 실험을 수행하기 위하여 소듐중 실증시험 장치를 설계 및 제작하였다. 본 시험 장치는 글로브 박스, Ar 가스 순환정화기, 소듐 시험용기 및 저장용기, 히터 조절기, 압력, 산소 및 습도 측정기 등으로 구성되어 있다. 3축 스캐너가 글로브 박스 내에 설치되고 분해능 측정 시험편이 스캐너에 장착 설치되며, 소듐중 웨이브가이드 초음파센서는 200°C 의 용융 소듐에 잠입된다.

Fig. 2는 소듐중 웨이브가이드 초음파센서에 중심 주파수가 1MHz인 초음파 탐촉자를 테프론 고체 웨지에 장착하여 tone burst 신호를 송수신하면서 수집된 소듐중 초음파 송수신 신호를 보여주는데, 소듐중 시험편 반사신호의 신호대 잡음비는 12dB 이상으로 측정되었다. 소듐중 C-스캔 가시화 성능과 탐지 분해능을 검증하기 위하여 4각형 스텝 블록, 원

형 워셔, 직경이 6mm이고 길이가 13mm인 소형 금속편과 폭이 각각 2mm, 1mm, 0.8mm, 0.5mm인 돌출형 결함이 있는 모의 시험편에 대한 초음파 C-스캔 시험을 수행하였다. C-스캔 시험 수행 결과 Fig. 3과 같이 금속편의 형상과 돌출형 결함을 충분히 인식할 수 있음을 검증하였다.

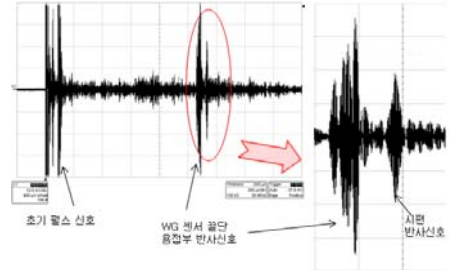


Fig. 2 Ultrasonic propagation signal in sodium

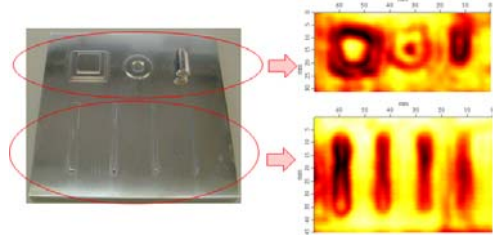


Fig. 3 C-scan resolution test in sodium

4. 결 론

소듐냉각고속로의 고온 액체소듐 환경에 실제 적용할 수 있는 소듐중 웨이브가이드 초음파센서를 개발하였다. 소듐중 웨이브가이드 초음파센서의 스테인리스 강 판의 표면에 일정 두께의 베릴륨을 코팅함으로써 A_0 모드 판파의 위상속도를 증가시켜 누설종파의 빔 방사각 변화 성능을 개선하였으며 방사면에는 니켈을 코팅하고 초정밀 연삭을 하여 소듐젯팅 특성을 개선시켰다. 소듐중 실증시험 장치를 설계 제작하고 소듐중 웨이브가이드 초음파센서의 실증시험을 수행하여 소듐중 전파 성능과 C-스캔 가시화 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 2011년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.