2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 노내구조물 구조손상 감지를 위한 웨이브가이드 초음파센서

Ultrasonic Waveguide Sensor for Structural Damage Detection of LMR Internal Structures

주영상, 김석훈, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 노내구조물은 고온소듐에 잠겨져 있어 크립 및 열라체팅과 같은 고온 구조손상이 발생할 수 있다. 가동중검사시 원격 육안검사에 의해 노내구조물의 건전성을 주기적으로 점검하여야 하지만 소듐의 불투명성으로 인해 구조손상을 감지해 내기가 매우 어렵다. 불투명한 소듐의 내부를 가시화하기 위한 초음파검사 기법의 적용이 필수적으로 요구되고 있으나 고온 환경으로 인해 초음파검사 적용에 한계가 있어 왔다. 본 연구에서는 고온소듐 환경에서 노내구조물 구조손상 감지 기술 적용을 위한 웨이브가이드 초음파센서 개발을 시도하였다. 웨이브가이드에서의 판파 전파 특성을 분석하고 스테인레스 강 재질의 웨이브가이드 센서를 설계 제작하였다. 방사효율이 좋은 A_0 반대칭 판파가 발생할 수 있는 주파수범위에서 초음파신호 원격 송수신 실험을 수행하고 그 적용가능성을 확인하였다.

Abstract

LMR reactor internal structures might undergo structural damages such as creep and ratchetting due to the high temperature sodium environment. The reactor internal structures should be examined by remote visual testing in the inservice inspection but it is very difficult to confirm the structural integrity because of the opacity of sodium. The ultrasonic technique should be applied to the visualization of the internal structures submerged in sodium. However the ultrasonic technique has a limitation due to the high temperature environment. In this study, the development of ultrasonic waveguide sensor has been tried for the application of damage detection technique for reactor internal structures in high temperature sodium environment. The plate wave propagation has been analyzed for the characterization of design parameters and the stainless steel waveguide sensors are designed and manufactured. Using the zero-order antisymmetric plate wave, the feasibility of the ultrasonic waveguide sensor has been confirmed by experiments in air and water.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로 및 주요 부품 들의 구조적 건전성과 안전성은 수명기간 동안에

주기적인 가동중검사(In-Service Inspection)를 통하여 검증된다. 가동중검사를 수행하는 목적은 구조물의 결함과 손상을 조기에 감지함으로써 사고 발생을 방지하고 발전소의 운전 정지와 보수 비용을 최소화하기 위함이다. 소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 5 기압 이하의 저압에서 운전되어 원자로계통 구조물들이 급속한 파단으로 사고가 발생하지는 않지만 500℃ 이상의 고온소듐 환경하에서 운전 되기 때문에 원자로 용기 및 노심을 비롯한 노내구조물 들은 고온 열변형 및 열손상이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 소듐냉각 액체금속로는 경수로 원전과는 달리 육안검사와 연속감시 위주의 가동중검사가 수행되어야 함을 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME XI, Division 3 에서 규정하고 있다.[1,2] 그러나 소듐 냉각재의 불투명성으로 인해 원자로용기 노내 구조물과 기기 들에 대한 육안검사와 핵연료 교체시의 핵연료 어셈블리 위치 파악 및 핵연료 이송경로상의 장애물 존재여부 탐지 등을 수행하는데 어려움이 있다. 노심과 노내구조물 들은 초음파를 이용하여 소듐 내부의 영상을 가시화할 수 있는 기술의 적용이 필수적으로 요구되고 있다. 그림 1 은 초음파를 이용한 소듐내부주사 (Under-Sodium Viewing: USV) 검사기술을 적용하여 액체금속로의 원자로 노내구조물에 대하여 가동중검사를 수행하는 개념도를 보여준다. 액체금속로 선진개발국 들은 소듐내부주사 장치와 기술을 개발하여 노심 핵연료 채널의 위치 확인 및 노심변형 관찰 등에 적용한 사례가 있으며 노내구조물과 부품에 대한 소듐내부 가동중검사법으로 적용하기 위한 연구 개발을 수행하고 있다.[3,4] 소듐내부주사는 그림 1 과 같이 초음파 센서를 고온 소듐내에 직접 액침시켜 수행하는 방법과 원자로용기 헤드의 외부에 초음파 센서를 설치하고 길이가 긴 얇은 판으로 이루어진 웨이브가이드를 이용하여 원격으로 초음파를 송수신하는 방법이 적용되고 있다.[4,5,6] 본 연구에서는 액체금속로 노내구조물의 구조손상 감지기술개발의 일환으로 웨이브가이드 초음파 센서 적용성에 대한 연구를 수행한다. 웨이브가이드 초음파 센서에서의 판파 발생 및 전파 특성을 해석하고 초음파 웨이브가이드 센서를 제작하여 초음파신호 원격 송수신 특성시험을 수행함으로써 그 적용가능성을 확인한다.

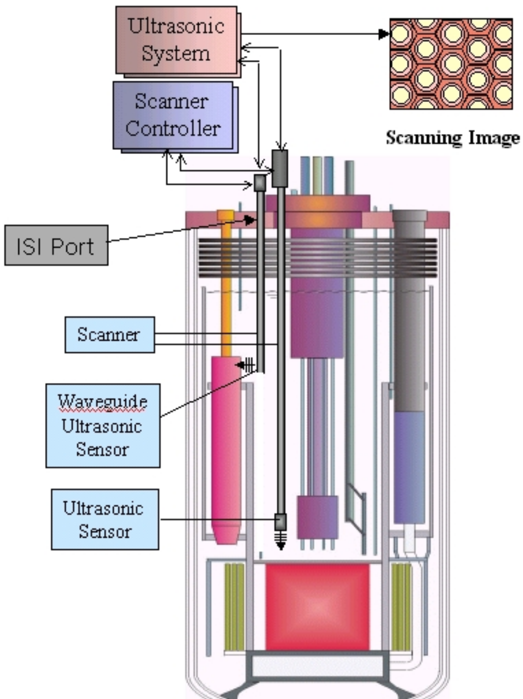


그림 1. 액체금속로 노내구조물 구조손상감지 및 가동중검사 개념도

2. 판파 발생 및 분산선도

경계가 없는 고체에는 종파와 횡파만 존재한다. 경계면이 있는 경우에는 표면파와 판파가 발생한다. 표면파는 경계 표면을 따라 전파되는 탄성파이고 판 형태의 구조물에서는 판을 따라 전파하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)가 존재한다. 판파는 전파모드가 다양하며 각 모드마다 전파속도가 주파수에 따라 변화하는 분산(dispersive) 특성이 있다. 판파의 분산 특성은 이론적으로 다음과 같이 구해진다.[7]

고체 매질 내에서 파동의 진행은 다음의 Navier's 방정식에 의하여 지배된다.

$$\mu\nabla^2\mathbf{u}+(\lambda+\mu)\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u})=\rho\frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2} \tag{1}$$

여기서 λ와 μ는 Lame 상수이고 ρ는 매질의 밀도이다. 윗 식의 해는 다음과 같은 변위포텐셜을 정의하면 구할 수 있다.

$$\mathbf{u}=\nabla\Phi+\nabla\times\Psi \tag{2}$$

여기서 Φ는 종파 성분을 나타내는 스칼라 포텐셜이고 Ψ는 횡파 성분을 나타내는 벡터 포텐셜이며 각각 변위의 비회전 및 회전 성분에 해당된다. 식 (1)은 다음의 두개의 스칼라 및 벡터 파동방정식으로 표시할 수 있다.

$$\nabla^2\Phi=\frac{1}{C_L{}^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2},\quad \nabla^2\Psi=\frac{1}{C_T{}^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} \tag{3,4}$$

여기서 $C_L{}^2=(\lambda+2\mu)/\rho$ 이고 $C_T{}^2=\mu/\rho$ 이며 각각 종파와 횡파의 속도를 의미한다.

두께가 d 인 고체 판에서 길이 방향이 x 이고 두께방향의 축이 z 일 때 x 축 방향으로 진행하는 plain strain wave 는 다음의 변위 포텐셜에 의해 기술될 수 있다.

$$\Phi=\Phi(z)e^{i(kx-\omega t)},\quad \Psi=\Psi(z)e^{i(kx-\omega t)} \tag{5, 6}$$

여기서 $\Phi(z)$ 와 $\Psi(z)$ 는 z 방향의 미지의 함수이고 $e^{i(kx-\omega t)}$ 는 x 방향의 파의 전파를 나타내는 항이고 k 는 파수(wave number)이며 ω 는 각주파수이다.

이 변위 포텐셜을 파동방정식에 대입하면 미지의 함수 $\Phi(z)$ 와 $\Psi(z)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi(z)=A_1\sin(pz)+A_2\cos(pz) \tag{7}$$

$$\Psi(z)=B_1\sin(qz)+B_2\cos(qz) \tag{8}$$

여기서 $p=\sqrt{k_L{}^2-k^2}$ 이고 $q=\sqrt{k_T{}^2-k^2}$ 이며 A_1, A_2, B_1, B_2 는 임의의 상수이다.

$\Phi(z)$ 와 $\Psi(z)$ 는 x 축에 대해 대칭이거나 반대칭인 삼각함수의 합이므로 판파는 대칭형(symmetric)과 반대칭형(antisymmetric) 모드의 합으로 나타난다.

그림 2 와 같이 판에서의 대칭모드는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 대칭인 분포를 가지며 판 두께에 대한 입자의 평균 변위는 x 축 방향만 존재하므로 extensional mode 라고도 한다. 반면에 반대칭모드는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 반대칭인 분포를 가지며 입자의 평균 변위가 z 축 방향이므로 flexural mode 또는 transverse mode 라고도 한다.

판의 평면경계에서 응력이 0 이어야 한다는 경계조건으로부터 대칭모드와 반대칭모드에 대한 판파의 위상속도를 구할 수 있는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 얻을 수 있다.

대칭모드의 경우

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)}=-\frac{4k^2pq}{(q^2-k^2)^2} \tag{9}$$

반대칭모드의 경우

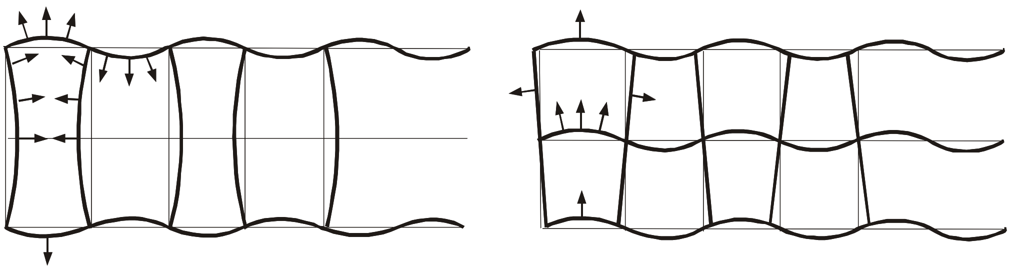
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2-k^2)^2}{4k^2pq} \tag{10}$$

위의 식들로부터 판파는 그 위상속도가 주파수의 함수로 주어지는 분산(dispersive) 특성을 가짐을 알 수 있다.

Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 수치해석법으로 주파수를 연속적으로 변화시켜가면서 계산하면 위상속도의 분산곡선을 구할 수 있으며 같은 주파수에서 서로 다른 모드가 나타남을 알 수 있다. 그림 3 (a)는 스테인레스 강에서의 판파의 위상속도 분산을 보여준다. 초음파 에너지의 전파속도는 위상속도(C_p)와는 다른 군속도(C_g)로 나타내어 진다. 군속도는 실제검사에서 시간영역의 초음파 모드 확인과 반사파 거리 측정 등에 유용하게 사용된다. 군속도는 위상속도의 주파수에 대한 미분으로 다음 식과 같이 구해진다.

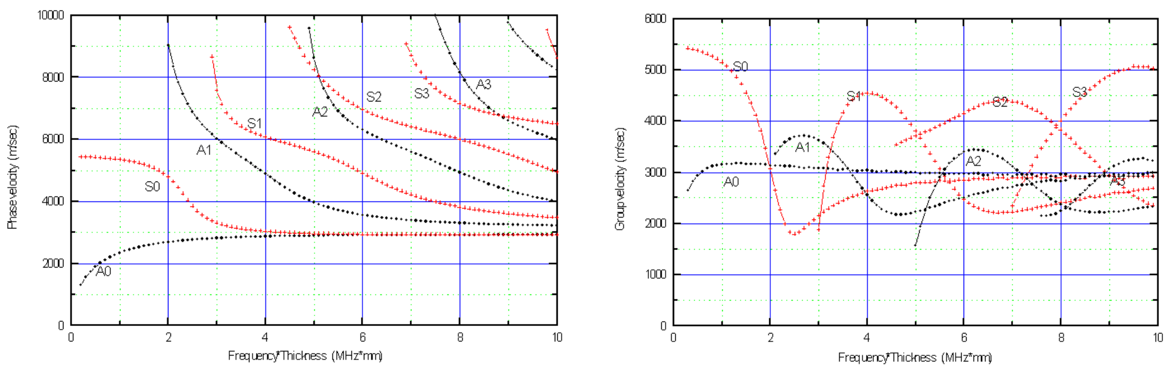
$$C_g = \frac{C_p}{1-\frac{fd}{C_p}\frac{\partial C_p}{\partial(fd)}} \tag{11}$$

이 식으로부터 구해진 스테인레스 강에서의 판파의 군속도는 그림 3 (b)와 같다.



(a) S_0 대칭 판파 (b) A_0 반대칭 판파

그림 2 영차모드 대칭 및 반대칭 판파의 변위 분포



(a) 위상속도 분산곡선 (b) 군속도 분산곡선

그림 3. 스테인레스강에 대한 판파의 분산곡선

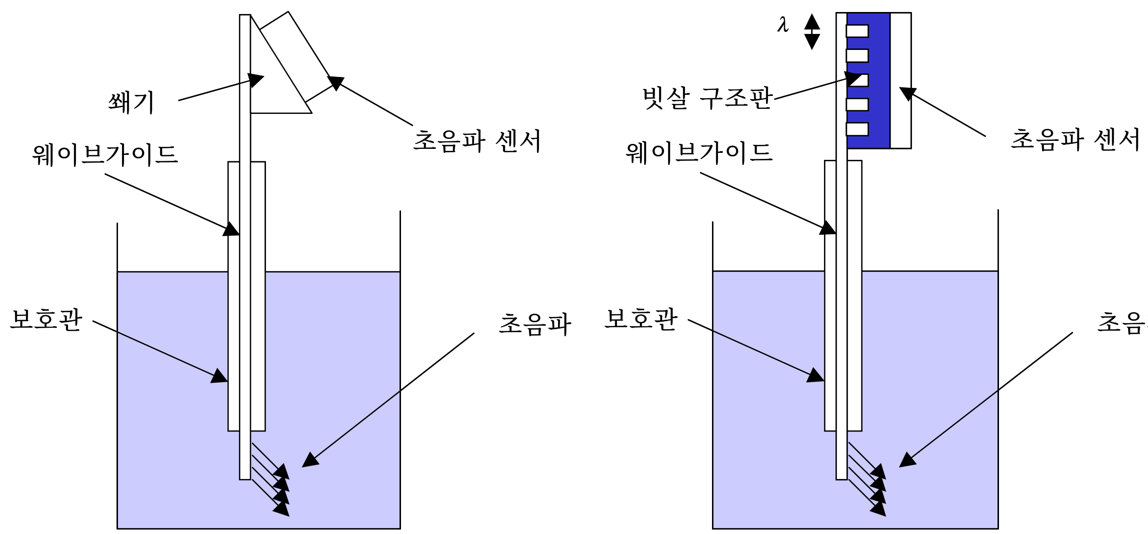
3. 웨이브가이드 초음파 센서 설계 제작 및 적용성 시험

판파를 발생시키는 방법은 그림 4 와 같이 사각 쐐기를 이용하는 방법과 빗살구조 판을 이용하는 방법이 있다. 사각 쐐기를 이용하는 방법에는 일반 초음파 펄스 송수신장치에 의한 스파이크 펄스를 이용하는 방법이 있고 특정 모드의 신호를 발진시키기 위하여 특정 주파수의 Tone Burst 신호를 발진시키는 방법이 있다. 스파이크 펄스를 이용하는 방법은 입사주파수가 일정 밴드폭을 가지므로 여러 가지 모드가 복합적으로 나타날 가능성이 크며 Tone Burst 신호 발진법은 협대역 주파수 밴드폭을 가지므로 특정 모드를 선택적으로 선정할 수 있다. 분산곡선에 계산된 바와 같이 *fd* 가 2 이상이 되면 높은 모드의 판파가 여기되어 송수신 신호가 복잡해 질 수 있으므로 가능한 *fd* 를 2 이하로 선정한다. A_0 모드는 반대칭모드로 입자변위의 두께방향 수직성분이 커서 모우드 변환효율이 좋다. 저차 모드인 A_0 판파가 여기될 수 있도록 입사주파수와 판 두께를 선정한다. 빗살구조 탐촉자의 압전재에 스파이크 펄스를 가해주면 빗살의 주기와 같은 파장을 갖는 판파가 발생되어 웨이브가이드에 전파된다. 입사주파수는 압전재의 공진주파수가 아닌 빗살의 주기에 해당하는 주파수로 결정되므로 이 방식은 빗살의 주기를 적절히 가공함으로써 원하는 모드의 판파를 선택할 수 있다.

웨이브가이드가 그림 4 와 같이 액체 내에 잠기면 웨이브가이드 내를 전파하던 판파가 액체내의 종파로 모드변환이 발생하며 액체내의 종파는 다음 식의 임계각으로 전파한다.

$$\sin\theta = \frac{C_L}{C_p} \tag{12}$$

여기서 C_L 은 액체내의 종파속도(물인 경우 1480 m/s 이고 소듐인 경우 2450m/s)이고 C_p 는 웨이브가이드에서 전파되는 판파의 위상속도이다. 액체내로 전파된 종파가 반사체에 반사되어 다시 돌아와 각도 θ로 입사하게 되면 판파가 웨이브가이드에서 발생하게 되고 초음파 탐촉자가 이 판파를 탐지하여 반사신호를 감지하게 된다. 이러한 모우드의 변환과정을 거쳐 웨이브가이드 센서의 송수신이 가능해 진다.



(a) 사각 쐐기 방식 (b) 빗살구조 방식

그림 4. 웨이브가이드 초음파센서

그림 5 는 제작된 웨이브가이드 초음파센서의 실물 형상을 보여준다. 스테인레스 강 재질로 제작된 웨이브가이드는 길이가 0.6m, 폭은 13mm, 두께는 1mm 인 얇은 판으로 이루어져 있고 스테인레스 보호관내에 삽입되어 있으며 보호관과의 접촉면을 최소화하기 위하여 보호관 내부에 스프링으로 고정하였다. 스테인레스 강은 고온 소듐에서도 변형이 적으며 소듐과의 적심성(wettability)도 양호하여 초음파의 전파효율이 좋은 특성을 갖는다. 그림 6 은 초음파신호 송수신 특성과 웨이브가이드 센서의 적용가능성을 평가하기 위한 실험장치를 보여준다. 초음파 송수신 장비는 주파수 변조가 가능한 Tone Burst 신호를 발생시킬 수 있는 RITEC RAM-10000 장비를 사용하였고 오실로스코프에서 초음파신호를 관찰하였다. 초음파 탐촉자는 공진주파수가 1MHz 인 1/2 ” X1 ” SWRI 탐촉자를 사용하였으며 가변각 웨지를 이용하여 입사각을 조절할 수 있게 하였다. RAM-10000 장비에서 입사주파수가 1MHz 이고 펄스가 5 개인 Tone Burst 신호를 발진시키고 펄스에코 방법으로 신호를 송수신하였다. 그림 7(a)는 공기 중에서 웨이브가이드 센서의 끝단에서 반사되는 A_0 판파 신호를 보여준다. 웨이브가이드 센서를 물속에 담그게 되면 모드 변환에 의해 물속으로 종파가 방출된다. 이때의 방출각은 식 (12)에 의해 결정된다. A_0 판파의 위상속도 C_p 는 2500m/s 이고 C_L 은 1480 m/s 이므로 방출각은 약 36°정도가 된다. 그림 7(b)는 수중에서 웨이브가이드 센서의 끝단에서 방출된 신호가 수중에서 7cm 떨어진 반사체에서 반사되어 되돌아온 초음파신호를 보여준다. 웨이브가이드 센서에서 수중으로 방출된 초음파는 물속에 반사체가 존재하게 되면 이 반사체로부터 초음파신호가 반사하게 된다. 웨이브가이드센서의 스캐닝을 통하여 수신된 반사신호를 이용하면 구조물의 형상을 가시화할 수 있고 구조물의 변형을 감지할 수 있으며 구조물 내면으로 침투하여 반사된 신호로부터 내부 결함을 탐지할 수 있을 것이다.


(a) 초음파 빔 방사면


(b) 초음파 센서 접합부

그림 5. 웨이브가이드 초음파 센서 형상

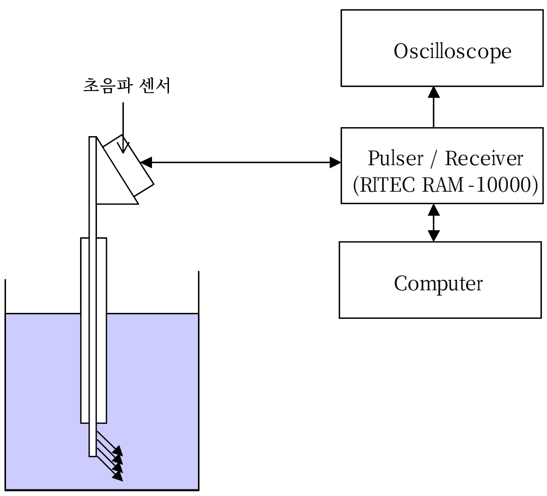
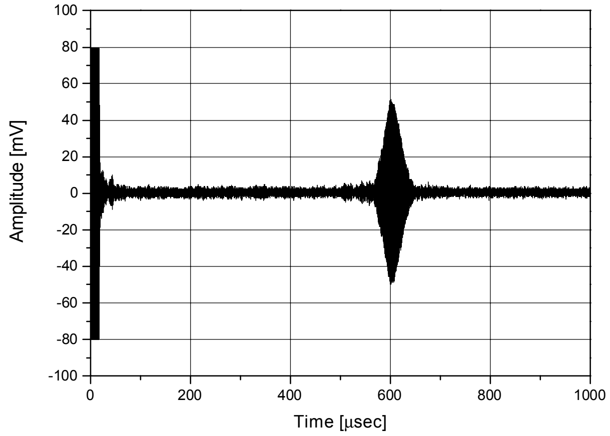
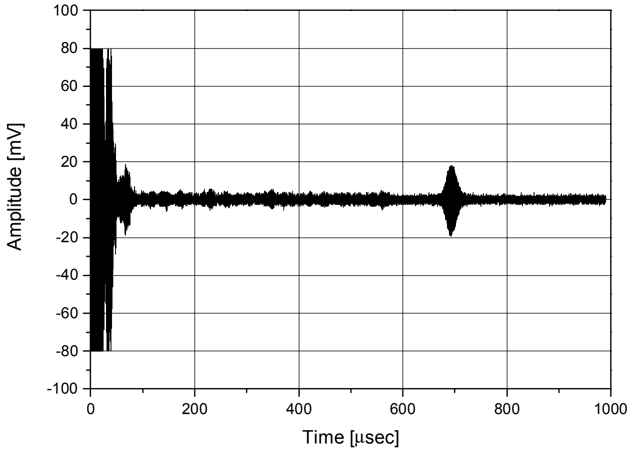


그림 6. 웨이브가이드 초음파센서의 초음파펄스 송수신 시험 Block Diagram



(a) 공기중 웨이브가이드 끝단의 반사신호



(b) 수중에서 반사체에 의한 반사신호 (반사체와의 물거리 7cm)

그림 7. 웨이브가이드 센서에서의 A_0 판파 송수신 신호

4. 결 론

액체금속로 노내구조물의 구조손상 감지와 가동중 원격육안검사를 위해서는 고온소듐 환경을 극복할 수 있는 초음파센서 기술개발이 필수적이다. 본 연구에서는 초음파센서를 원자로헤드 외부에 설치하고 판 형상의 웨이브가이드를 이용하여 초음파 펄스를 원격으로 장거리 송수신할 수 있는 웨이브가이드 초음파 센서 개발을 시도하였다. 판파 분산 특성에 대한 이론식을 전개하고 수치해석법으로 스테인레스 강 재질의 판에서의 분산 곡선을 구하였으며 송수신 변환 효율이 좋은 A_0 반대칭 모드를 설정하여 초음파센서를 설계하고 두께 1mm 폭 13mm 길이 0.6m 인 웨이브가이드 센서를 스테인레스 강으로 제작하였다. 공기중과 수중에서 웨이브가이드 센서의 A_0 판파 발생과 송수신 특성을 시험하였으며 적용가능성을 평가하였다. 향후 웨이브가이드 센서에서의 초음파 빔 송수신 특성에 대한 상세해석과 스캐닝에 대한 제한을 극복할 수 있는 기술개발 및 고온소듐 내에서의 실증연구가 추진되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] ASME B&PV Code, Section XI, Division 3, "Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Component," 1992.

[2] 주영상 외, "KALIMER 가동중검사와 보수 개념설계 및 평가," 한국원자력연구소, KAERI/TR-2197/2002, 2002

[3] G. Seed, "In-Service Inspection and Monitoring of CDFR," Nucl. Energy, Vol. 25, No.2 Apr., pp. 129-135, 1986.

[4] 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.

[5] R.D. Watkins, L.M. Barrett and J.A. McKnight, "Ultrasonic Waveguide for Use of the Sodium Coolant of Fast Reactors," Nucl. Energy, Vol. 27, No.2 Apr., pp. 85-89, 1988.

[6] R.D. Watkins, M.O. Deighton, A.B. Gillespie and R.B. Pike, "A Proposed Method for Generating and Receiving Narrow Beams of Ultrasound in the Fast Reactor Liquid Sodium Environment," Ultrasonics, January, pp.7-12, 1982.

[7] I.A. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York, 1967.