

액체금속로 소듐내부 가시화를 위한 초음파 웨이브가이드 센서 개발

Development of Ultrasonic Waveguide Sensor for Under-Sodium Viewing in Liquid Metal Reactor

주영상*†, 이재한*

Young-Sang Joo*† and Jae-Han Lee*

초 록 액체금속로 원자로 노심과 내부구조물 들은 불투명한 소듐 내에 잠겨 있어 육안검사를 수행할 수 없다. 액체금속로 내부구조물의 육안검사를 수행하기 위해서는 초음파를 이용한 소듐내부 가시화가 적용되어야 한다. 본 연구에서는 소듐내부 가시화에 적용하기 위한 판형 초음파 웨이브가이드 센서를 개발하였다. 웨이브가이드 센서에 서의 판파 전파특성을 분석하고 판파 적용모드로 제0차 반대칭 A_0 모드를 선정하였다. 웨이브가이드 센서에 액체 웨지를 적용하여 A_0 모드의 저주파수 분산 영역에서 판파가 발진되도록 하였으며 입사펄스의 주파수 변조에 의하여 초음파 빔 방사각을 변환시킬 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 본 방법은 웨이브가이드 센서를 기계적으로 구동하지 않고 빔 방사각을 조절할 수 있어 기존 웨이브가이드 센서의 구동 제한성을 극복할 수 있게 해 준다. 웨이브가이드 센서의 빔 방사각 변환 특성을 실험적으로 검증하였으며, 수중 C-스캔 시험을 수행하여 웨이브가이드 센서의 소듐내부 가시화 적용 가능성을 확인하였다.

주요용어: 액체금속로, 가동중검사, 소듐내부가시화, 웨이브가이드센서, 누설 판파

Abstract Reactor core and internal structures of a liquid metal reactor (LMR) can not be visually examined due to an opaque liquid sodium. The under-sodium viewing technique by using an ultrasonic wave should be applied for the visual inspection of reactor internals. In this study, an ultrasonic waveguide sensor with a strip plate has been developed for an application to the under-sodium viewing technique. The Lamb wave propagation of a waveguide sensor has been analyzed and the zero-order antisymmetric A_0 plate wave was selected as the application mode of the sensor. The A_0 plate wave can be propagated in the dispersive low frequency range by using a liquid wedge clamped to the waveguide. A new technique is presented which is capable of steering the radiation beam angle of a waveguide sensor without a mechanical movement of the sensor assembly. The steering function of the ultrasonic radiation beam can be achieved by a frequency tuning method of the excitation pulse in the dispersive range of the A_0 mode. The technique provides an opportunity to overcome the scanning limitation of a waveguide sensor. The beam steering function has been evaluated by an experimental verification. The ultrasonic C-scanning experiments are performed in water and the feasibility of the ultrasonic waveguide sensor has been verified.

Keywords: liquid metal reactor, in-service inspection, under sodium viewing, waveguide sensor, leaky Lamb wave

1. 서 론

액체금속로는 소듐을 냉각재로 사용하며 고속중

성자를 이용하여 핵분열 반응을 일으키는 제4세대 원자로로서 우리나라에서도 2030년 이후 상용화를 목표로 소듐냉각 풀형 액체금속로 KALIMER-600을

개발하고 있다[1]. 액체금속로는 500℃ 이상의 고온 소듐 환경에서 운전되므로 원자로 용기와 원자로 내부 부품 및 구조물 들은 고온 열변형 및 구조손상이 발생할 수 있다. 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME XI, Div. 3에서는 원자로 계통의 주요 부품에 대한 주기적 안전성 검증의 기본 요건을 제시하고 있다[2]. KALIMER-600의 안전성과 구조 건전성을 확보하기 위하여 원자로와 주요 구조물에 대한 가동중검사 및 보수 개념을 설정하여 기계계통 개념설계에 반영하고 있다[3]. 액체금속로는 대기압 정도의 저압에서 운전되므로 150기압 이상의 고압에서 운전되는 경수로와는 달리 체적검사와 표면검사가 아닌 육안검사와 연속감시가 주요 가동중검사 방법으로 채택 적용되고 있다[2]. 액체금속로의 소듐 냉각재는 금속이기 때문에 빛을 투과시킬 수가 없어 원자로 내부구조물의 가동중검사에서는 광학적 방법의 육안검사를 수행할 수가 없다. 소듐내부 가시화(Under-Sodium Viewing: USV)를 위해서는 초음파에 의한 역학적 파동만이 불투명한 액체금속 소듐내부를 투시할 수 있는 유일한 방법이다[4,5].

액체금속로 개발 초기인 1960년대부터 프랑스, 미국 및 영국 등은 소듐의 불투명성을 극복하기 위한 연구를 수행하여 소듐내부 가시화의 기본 기술과 가시화 장치 및 센서 등을 개발하고 핵연료 교환공정에서 핵연료 어셈블리 위치 확인과 핵연료 이송경로상의 장애물 존재여부 탐지, 노심변형 관찰 그리고 원자로 내부구조물의 가동중검사 등에 적용하였다[4-11]. 소듐내부 가시화를 위한 초음파 센서는 크게 두 가지 방식으로 개발되어 왔다. 초음파 센서를 고온 소듐 내에 직접 액침시켜 수행하는 소듐액침 센서 방식과 원자로용기 헤드 외부에 센서를 설치하고 웨이브가이드를 이용하여 원격으로 초음파를 송수신하는 웨이브가이드 센서 방식이다. 프랑스는 핵연료 교환시 노심 상부의 장애물 존재 여부를 감시할 목적으로 NaK가 충전된 봉(rod)형 웨이브가이드 센서를 개발하여 Phenix에 성공적으로 적용하였으며[6,7] 영국과 미국은 노심상부 핵연료 집합체의 영상 가시화를 위해 액침 센서를 개발하여 액체금속로에 시험적으로 적용하였다[8-10]. 일본에서도 소듐에 직접 침지시키는 고온 액침센서를 개발하여 핵연료 교환공정시 노심 상부 관찰에 적용하고 있다[11]. 한편, 영국에서는 얇고 긴 판(strip plate)에 빛(comb)형 센서를 적용한 판형 웨이브가이드 센서에 대한 아이디어를 제안하였고 국내에서도 웨이브가이드

센서의 적용 가능성을 위한 기초 연구가 시도된 바가 있다[12-14]. 이와 같이 액체금속로 개발선진국들은 소듐내부 가시화를 위한 많은 연구를 수행하여 왔지만 소듐내부 가시화의 액체금속로 실제 적용을 위해서는 아직까지 해결하지 못한 많은 기술적 문제점이 남아 있다. 소듐액침 센서는 영상 가시화 감도가 양호하지만 고온 환경에서 작동 수명의 제한과 성능 유지의 불확실성이 있으며, 웨이브가이드 센서는 고온 소듐에 직접 접촉하지 않기 때문에 센서를 장시간 사용할 수 있는 장점이 있으나 초음파 빔 주사 및 스캐닝 등 웨이브가이드 센서의 기계적 구동에 대한 제한이 있다[8-14].

본 연구에서는 기존 판형 웨이브가이드 센서의 기술적 문제점을 개선한 새로운 웨이브가이드 센서를 개발하고 액체금속로 소듐내부 가시화에 적용성을 향상시킬 수 있는 새로운 개념을 제시한다. 기존 웨이브가이드 센서에서 사용하였던 빔(comb)형 초음파 센서 대신 가변각 액체 웨지를 사용한 초음파 센서에 두께가 얇고 긴 판으로 구성된 판형 웨이브가이드 센서를 개발한다. 제0차 반대칭 판파(A_0)의 분산 특성과 tone burst 입사펄스의 주파수 변조방식을 이용하여 빔 방사각을 조정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 웨이브가이드 센서의 빔 방사각 변환 특성을 실험적으로 검증한다. 또한 수중 C-스캔 시험을 수행하여 웨이브가이드 센서를 이용한 소듐내부 가시화의 적용 가능성을 확인한다.

2. 웨이브가이드 센서의 판파 전파특성

본 연구에서 제작된 웨이브가이드 센서는 Fig. 1과 같다. 길이가 0.6 m, 폭은 13 mm, 두께는 1 mm 인 스테인리스 SS304강 재질의 판형 웨이브가이드의 한쪽 끝단에 액체로 충전된 가변각 사각 웨지와 초음파 탐촉자를 결합하여 웨이브가이드 센서를 구성하였다. 스테인리스강은 고온 소듐에서도 변형이 적으며 소듐과의 적침성(wettability)도 양호하여 초음파의 전파효율이 좋은 특성을 갖는다. 웨이브가이드에 사각입사된 초음파는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)로 전파한다. 판파는 전파모드가 다양하며 각 모드마다 전파속도가 주파수에 따라 변화하는 분산(dispersive) 특성이 있다[15]. 판파는 대칭형(symmetric)과 반대칭형(antisymmetric)이 있다. 대칭모드(S mode)는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 대칭인 분포를 가지며 판 두께에 대한

입자의 평균 변위는 주로 축 방향으로 존재하므로 종파(extensional) 모드라고도 한다. 반면에 반대칭 모드(A mode)는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 반대칭인 분포를 가지며 입자의 평균 변위가 주로 두께 방향으로 존재하므로 굽힘(flexural) 모드라고도 한다. 판의 평면경계에서 응력이 0이어야 한다는 경계조건으로부터 대칭모드와 반대칭 모드에 대한 판파의 위상속도를 구할 수 있는 Rayleigh-Lamb 특성 방정식을 얻을 수 있다. 대칭모드의 경우

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (1)$$

반대칭모드의 경우

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

여기서, $p = \sqrt{k_L^2 - k^2}$ 이고 $q = \sqrt{k_T^2 - k^2}$ 이며 k 는 파수(wave number), 아래첨자 L 와 T 는 각각 종파와 횡파를 의미하며 h 는 판 두께의 반이다.

위의 식들로부터 판파는 그 위상속도가 주파수의 함수로 주어지는 분산 특성을 가짐을 알 수 있다. Rayleigh-Lamb 특성 방정식을 수치해석법에 의하여 주파수를 연속적으로 변화시키면서 계산하면 위상속도와 군속도의 분산곡선을 구할 수 있으며 Fig. 2 와 같이 여러 모드의 판파가 나타난다.

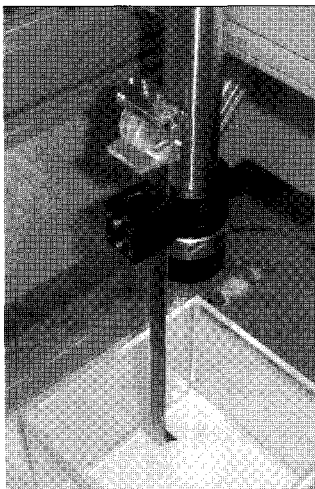


Fig. 1 Waveguide sensor

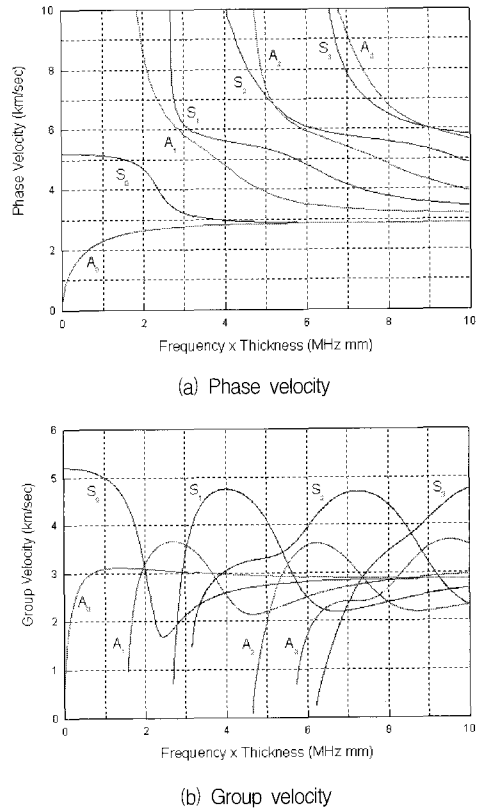


Fig. 2 Dispersion curves for the stainless steel plate

3. 웨이브가이드 센서의 누설 판파 빔 방출 및 빔 방사각 변환 방법

3.1. 누설 판파 빔 방출

웨이브가이드 센서에서는 판파의 여러 전파 모드 중에서 제0차 반대칭(A_0) 판파 모드를 선택하여 사용한다. A_0 모드는 입자변위가 판의 두께방향인 굽힘모드로서 입자변위의 두께방향 수직성분이 커서 판이 유체와 접촉할 경우 종파모드로 변환되는 효율이 좋은 누설 판파 모드이다. Fig. 3은 웨이브가이드 센서에서 전파되는 누설 판파(leaky Lamb wave)의 빔 방출 개념도를 보여준다. 웨이브가이드가 액체 내에 잠기면 웨이브가이드 내를 전파하던 판파가 모드변환에 의하여 액체내의 종파로 방출되며 이때의 종파 빔은 Snell의 법칙을 따라 다음의 방사각으로 전파한다.

$$\sin \theta = \frac{V_L}{C_p} \quad (3)$$

여기서 V_L 은 액체내의 종파속도(물인 경우 상온에서 1480 m/s, 소듐인 경우 200°C에서 2474 m/s)이고 C_p 는 웨이브가이드에서 전파되는 판파의 위상속도이다. 액체 내로 전파된 종파가 반사체에 반사되어 다시 돌아와 방사각도로 다시 입사하게 되면 판파가 웨이브가이드에서 발생하게 되고 초음파 탐촉자가 이 판파를 탐지하여 반사 신호를 감지하게 된다. 이러한 모드의 변환과정을 거쳐 웨이브가이드 센서의 송수신이 가능해 진다.

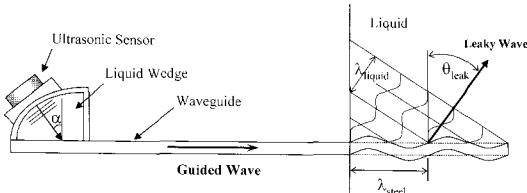


Fig. 3 Leaky Lamb wave propagation in the waveguide sensor by a mode conversion

3.2. 빔 방사각 변환 방법

웨이브가이드 초음파 센서는 고온 소듐에 직접 접촉하지 않기 때문에 센서를 장시간 사용할 수 있는 장점이 있으나 초음파 빔의 방사각 조정 및 스캐닝 제한 등 그 적용의 한계가 있다. 이러한 문제점은 A_0 모드의 분산성을 이용하여 극복할 수 있다. A_0 모드는 Fig. 4에서와 같이 판의 두께와 입사주파수의 곱 fd 가 3.5 이하인 저주파수 영역에서 위상속도가 주파수 변화에 따라 서서히 변화하는 특성을 가지고 있다. 즉, fd 가 3.5 이하인 분산 영역에서는 위상속도가 주파수의 함수 $C_p = C_p(f)$ 가 되므로 주파수의 변화에 따라 빔 방사각(θ)이 다음 식 (4)와 같이 주파수의 함수로 변화한다.

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \left(\frac{V_L}{C_p(f)} \right) \quad (4)$$

따라서 fd 가 3.5 이하 영역의 주파수 범위에서 입사 펄스의 주파수를 조정하면 A_0 판파의 위상속도 C_p 가 변화하게 되고 초음파 빔 방사각도(θ)가 변화하게 되며 초음파 빔의 방향을 주파수 튜닝으로 변환

조정할 수 있다. 초음파 발진 펄스는 tone burst 신호를 사용함으로써 협대역 주파수 밴드에서 A_0 모드의 특정 위상속도를 선택적으로 선정하여 판파를 발진시킬 수 있다. 통상적으로 초음파 웨지 재료로 사용되는 acrylic resin 또는 methyl methacrylate와 같은 폴리머 재료의 종파 속도(V_L)는 2700 m/s 이므로 A_0 판파의 위상속도가 2700 m/s 이하인 fd 가 2.4 이하의 분산 영역에서는 기존의 고체 웨지로는 A_0 판파를 발생시킬 수가 없다. 이러한 문제점은 일반적인 고체웨지 대신에 액체 웨지를 사용하면 해결할 수 있다. fd 가 2.4이하인 영역에서는 물($V_L = 1480$ m/s)이나 글리세린($V_L = 1920$ m/s)과 같은 액체 웨지를 사용함으로써 A_0 판파를 발생시킬 수 있다. 입사펄스 주파수 변조에 따른 물과 소듐 내에서 A_0 모드의 빔 방사각은 Table 1과 같이 물에서는 약 32도에서 53도까지 변화시킬 수 있고 소듐에서는 62도에 82도까지 변화시킬 수 있다.

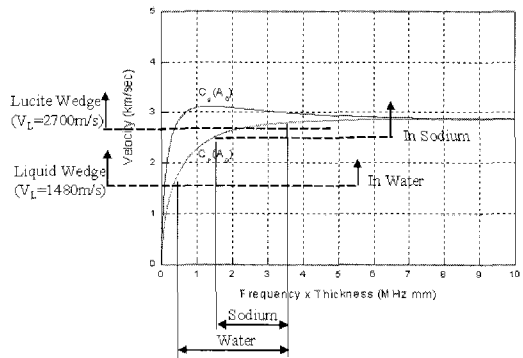


Fig. 4 Dispersion curve of the phase and group velocity for the A_0 mode and the frequency range of the radiation beam in sodium and water

Table 1 Radiation beam angle of the waveguide sensor in sodium and water

fd	Cp (A0) [m/s]	Radiation Angle (θ) [degree]		Remark
		Sodium ($V_L=2474$ m/s)	Water ($V_L=1480$ m/s)	
0.5	1846	-	53,3	Liquid Wedge
1.0	2290	-	40,3	
1.5	2511	80,2	36,1	
2.0	2640	69,6	34,1	
2.5	2715	65,7	33,0	Lucite Wedge
3.5	2803	62,0	31,9	

3.3. 빔 방사각 변환 특성시험

빔 방사각 변환 특성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 웨이브가이드 초음파 센서는 중심주파수가 1 MHz이고 직경이 0.5인치인 원형 초음파 탐촉자와 가변각 액체웨이브 그리고 두께가 1 mm 인 스테인리스 강 재질의 판으로 구성하였다. 실험 장치는 웨이브가이드 초음파 센서와 tone burst 초음파 신호를 송수신시키고 입사 주파수를 튜닝시킬 수 있는 RITEC RAM-10000 펄스발생기와 컴퓨터 및 오실로스코프로 구성하였다. 입사 tone burst의 pulse는 10개로 하여 입사주파수를 조정하였다. Fig. 5는 입사주파수 변화에 따른 초음파 빔 방사각이 변화되는 실험 결과로서 이론적 계산 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 입사주파수 조정만으로 초음파 빔의 방사각을 기계적 구동 없이 조정할 수 있음을 보여 주는 결과로서 전자적 방식의 빔 조향(steering) 기능을 구현할 수 있음을 나타낸다. Fig. 6은 경사진 시험편(38도, 40도 및 42도)의 방사빔의 반사신호를 측정하는 시험 결과이다. 입사펄스 주파수를 0.7 MHz에서 1.3 MHz까지 연속적으로 변화시킬 때 경사진 시험편에서 반사된 초음파 신호에 대한 주파수-진폭 분포도를 보여 준다. 시험체의 경사도에 따라 진폭 분포도의 중심 주파수가 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 진폭분포도의 중심 주파수와 웨이브가이드 판 두께의 곱에 해당하는 A_0 판파의 위상속도 C_p 로부터 초음파 빔 방사각을 알게 되고 이로부터 시험체의 경사도를 측정할 수 있음을 보여주는 결과이다.

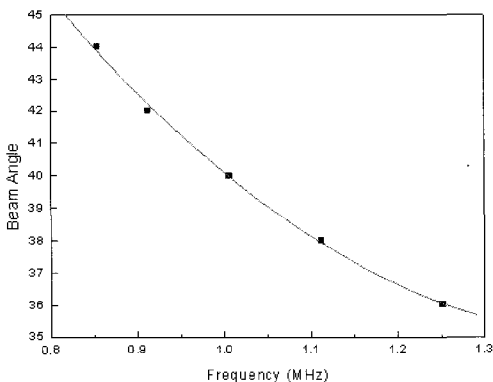


Fig. 5 Theoretical calculation curve and the experimental results of the radiation beam angle by tuning the excitation frequency

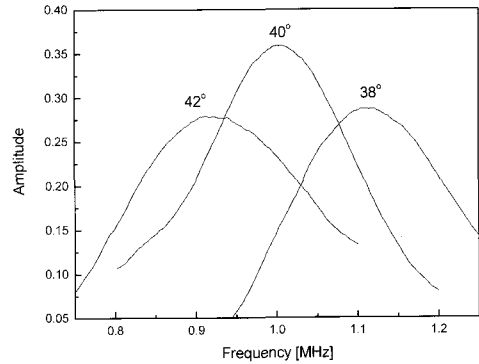


Fig. 6 Amplitude-frequency curves of the reflected signal for the specimens inclined with 38, 40 and 42 degrees by a continuous-frequency sweep.

4. 수중가시화 C-스캔 시험

웨이브가이드 센서의 스캐닝을 통하여 수신된 반사신호를 이용하면 소듬내의 구조물의 형상을 가시화할 수 있고 구조물 내부로 침투하여 반사된 신호를 이용하면 구조물의 내부 결함과 변형 등을 탐지할 수 있다. Fig. 7은 Panametric Multiscan System을 사용한 C-스캔 시험 장치와 실험 block diagram을 보여준다. C-스캔 실험에서는 fd 가 3.5인 분산성이 적은 주파수영역을 선정하였다. 공진주파수가 3.5 MHz인 초음파 탐촉자를 사용하였으며 가변각 웨이브를 이용하여 입사각을 조절할 수 있게 하였다. 입사주파수는 3.5 MHz로 설정하고 펄스가 5개인 tone burst 신호를 발진시켜 펄스에코 방법으로 신호를 송수신하였다. 입사주파수 3.5 MHz에서 A_0 판파의 위상속도는 2800 m/s이고 물에서의 종파속도는 1480 m/s이므로 방출각은 약 32° 정도가 된다. 수중에 침지되는 웨이브가이드 센서의 끝단은 수중 방사 효율을 높이기 위하여 한쪽 면이 물에 직접 접촉하지 않게 처리하여 그 반대 면으로만 초음파가 방출되도록 하였으며 방출각도 만큼 구부려 누설 종파가 시험체에 수직으로 입사되도록 하였다. Fig. 7에서와 같이 제작된 웨이브가이드 센서를 초음파 C-스캔 장비의 스캐너에 장착하였고 수조 탱크에 'LMR' 글자가 각인된 길이가 100 mm이고 폭이 40 mm이며 높이가 15 mm인 사각형 시험체를 수조 내에 설치한 후, 웨이브가이드 센서를 시험체로부터 30mm 상단에 위치시키고 C-스캔 실험을 수행하였다. Fig. 8은 수중에서 웨이브가이드 센서의 끝단에

서 반사되는 A_0 판파 신호와 시험체의 상단면에서 반사되어 되돌아온 초음파신호를 보여준다. 시험체 상단면 반사 신호에 게이트를 걸어 이 신호의 진폭과 시간 데이터를 스캐너의 X, Y 위치 값과 함께 저장하면 시험체 평면에 대한 C-스캔 화상을 Fig. 9와 같이 얻을 수가 있다. 웨이브가이드 센서의 스캐닝을 통하여 수신된 초음파 반사 신호를 이용하면 수중 구조물의 영상을 가시화할 수 있음을 실증함으로써 웨이브가이드 센서를 이용한 소듐내부 가시화의 적용성을 확인하였다.

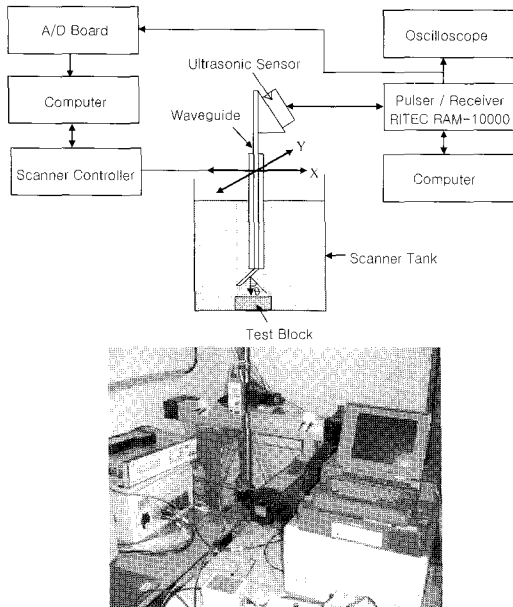


Fig. 7 Experimental setup and block diagram for the C-Scan using the waveguide sensor

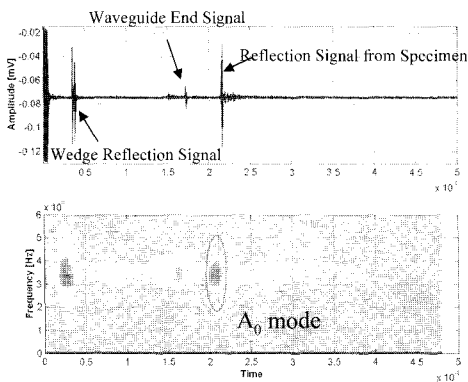
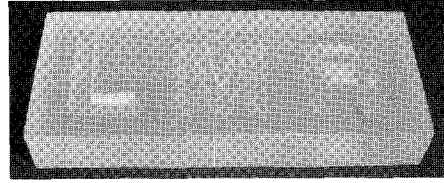
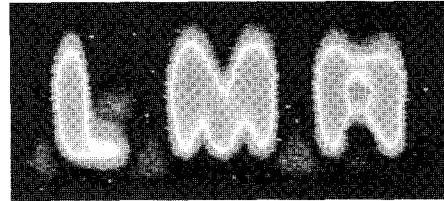


Fig. 8 Excitation pulse and the received reflection signals from the end of the waveguide plate and the specimen in water



(a) Test block with 'LMR' letter



(b) C-Scanning image

Fig. 9 Test block engraved with the 'LMR' letters and the C-Scan image by using the waveguide sensor

5. 결 론

본 연구에서는 액체금속로의 소듐내부 가시화에 적용하기 위한 액체 사각웨이브 입사 방식의 새로운 판형 웨이브가이드 센서를 개발하고 초음파 빔 방사 각도를 변환시킬 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 판형 웨이브가이드 센서에서의 판파 전파 특성을 분석하고, 웨이브가이드 센서에서 사용하는 판파 모드로 종파 모드변환 효율이 좋은 제0차 반대칭 A_0 모드를 선정하였다. A_0 판파 모드의 저주파수 분산 영역에서 초음파를 발진시키기 위해서 액체 웨지를 사용하였으며, tone burst 입사펄스의 주파수 변조에 의하여 웨이브가이드 센서의 초음파 빔 방사 각을 변환시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였고 실험적으로 검증하였다. 이 방법은 기계적인 구동 없이 전자적 방식에 의한 빔 방사각 변환을 가능하게 할 뿐만 아니라 입사 주파수의 연속적 sweep에 의한 주파수 진폭 분포도의 중심 주파수를 측정함으로써 반사 시험체의 경사도를 측정할 수 있게 해준다. 웨이브가이드 센서를 이용한 수중 C-스캔 시험을 수행하여 높은 해상도를 가진 수중 영상을 얻으므로써 웨이브가이드 센서의 소듐 내부가시화 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 새로운 기술은 액체금속로 소듐내부 가시화와 내부구조물 변형 감시 및 가동중검사 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2005년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D. H. Han *et al.*, "KALIMER Conceptual Design Report," KAERI/TR-2204/2002, (2002)
- [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] 주영상, 김석훈, 이재한, "액체금속로 KALIMER의 가동중검사 및 보수 개념설계," 비파괴검사학회지, 제24권, 제2호, pp. 171-179, (2004)
- [4] G. Seed, "In-Service Inspection and Monitoring of CDFR," Nucl. Energy, Vol. 25, No. 2, pp. 129-135, (1986)
- [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, *et al.*, "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)
- [7] N. Lions, *et al.*, "Apparatus for Ultrasonic Visualization in Sodium (VISUS) and Acoustic Detection in the Phenix Reactor," ORNL-TR-4136, (1973)
- [8] J. P. Argous, *et al.*, "Immersed Acoustical Transducers and Their Potential Uses in LMFBR," Int. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, CEA-CONF 5257, (1980)
- [9] C. C. Scott, *et al.*, "Potential Application for an Under Sodium Ultrasonic Scanning Device," APDA-205, Atomic Power Development Associates, Inc., (1967)
- [10] 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)
- [11] T. Susuki, *et al.*, "Development of FBR Visual Inspection Technique in Sodium," Proceedings of ICONE 3, S212-2, pp. 905-910, (1995)
- [12] 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, Vol. 20, No. 1, pp. 7-12, (1982)
- [13] 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, pp. 85-89, (1988)
- [14] 최명선, 이종포, 정태인, "도파편를 이용한 고온 액침 초음파센서의 가능성 연구", 비파괴검사학회지, 제14권, 제3호, pp 151-156, (1994)
- [15] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, New York, (1999)