2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 소듐내부가시화를 위한 웨이브가이드 초음파 C-Scanning

Ultrasonic Waveguide C-Scanning for Under Sodium Viewing of LMR

주영상, 김석훈, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로의 소듐 냉각재는 불투명하기 때문에 소듐내에 잠겨있는 노심과 노내구조물은 육안 관측이 불가능하다. 핵연료 교환시 핵연료 어셈블리 위치를 확인하고 중성자 조사에 의한 노심 변형을 탐지하며 노내구조물에 대한 가동중검사를 수행하기 위해서는 불투명한 소듐의 내부를 가시화하는 기술이 개발되어야 하나 고온소듐 환경으로 인해 초음파기술의 적용에 한계가 있어 왔다. 본 연구에서는 고온소듐 환경에서의 소듐내부가시화 기술 적용을 위하여 웨이브가이드 초음파센서 개발을 시도하였다. 웨이브가이드에서의 판파 전파 특성을 분석하여 스테인리스 강 재질의 웨이브가이드 센서를 설계 제작하였다. 방사효율이 좋은 A_0 반대칭 판파를 이용하여 수중 반사시험체에 대한 초음파 C-Scanning 실험을 수행하고 그 가능성을 확인하였다.

Abstract

LMR reactor core and internal structures submerged in sodium could not be visually examined due to the opaque liquid metal sodium. The under sodium viewing technique using ultrasonic wave should be developed and applied for the identification of fuel assembly location, the detection of core deformation due to fast neutron irradiation and the in-service inspection of reactor internals. The under sodium viewing technique has a limitation for the application of LMR due to the high temperature and irradiation environment. In this study, the development of ultrasonic waveguide sensor has been tried for the application of under sodium viewing 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 A_0 plate wave, the ultrasonic C-scanning experiments are performed in water and the feasibility of the ultrasonic waveguide sensor has been evaluated.

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 물을 냉각재로 사용하는 일반 경수로 원전과는 달리 극복해야 할 기술적인 문제점을 가지고 있다. 소듐은 98℃ 이하에서 고화 되므로 가동정지 시에도 용기와 배관내의 소듐은 항상 약 200℃ 정도를 유지하고 있어야 한다. 또한 소듐 냉각재는 불투명하기 때문에 광학적인 검사가 불가능하다. 역학적인 파동을 발생시키는 초음파는 불투명한 소듐내부의 물체를 투시할 수 있게 해준다. 소듐 내에서의 초음파 기술은 일반적으로 산업계의

초음파검사에서 사용되는 펄스-에코(Pulse Echo) 방식이 사용된다. 펄스-에코 법에서는 펄스와 에코 사이의 시간차와 에코신호의 크기를 측정함으로써 반사체까지의 거리와 크기에 대한 반사체의 정보를 알 수 있다. 스캐닝 과정에서 얻어진 센서 위치 정보와 함께 에코 도달 시간차와 신호 크기를 이용하여 컴퓨터에서 반사체에 대한 형상을 영상으로 그려낼 수 있게 된다.

액체금속로 개발선진국들은 액체금속로 개발 초기부터 소듐의 불투명성을 극복하기 위한 기술개발을 수행하여 소듐내부가시화(Under-Sodium Viewing: USV)의 기본 기술과 가시화장치 및 센서 등을 개발하고 노심상부 관찰과 소듐내부 가동중검사법에 적용하기 위하여 연구개발을 수행하여 왔다[1]. 초음파를 이용하여 소듐 내부를 가시화하는 검사 기술은 고속중성자에 의한 노심 변형 탐지, 액체금속로의 노내 구조물과 기기 들에 대한 가동중검사와 핵연료 교체시의 핵연료 어셈블리 위치 파악 및 핵연료 이송경로상의 장애물 존재여부 탐지 등을 가능하게 해준다.

소듐내부 초음파가시화 기술개발 연구에 있어서 고방사능 및 고온소듐 환경하에서 사용 가능한 초음파센서의 성공적인 개발이 필수적이다. 초음파센서는 크게 두 가지 방향으로 개발되어 왔다. 큐리 온도가 높은 압전소자(Lithium Niobate 또는 Lead Zirconate)를 사용하여 제작된 고온 내구성이 뛰어난 소듐 액침 초음파센서를 이용하는 방법과 고체 봉이나 판 또는 튜브와 같은 도파체(waveguide)를 적용한 웨이브가이드 센서를 이용하는 방법이다. 고온 센서는 사용 온도와 작동 수명의 제한과 성능 유지의 불확실성이 있으며 웨이브가이드 센서를 이용하는 방법은 스캐닝에 제한이 있다. 본 연구에서는 액체금속로 소듐내부가시화 기술개발을 위한 기본연구로서 웨이브가이드 초음파센서의 적용가능성 연구를 수행한다. 웨이브가이드 초음파센서의 판파 발생 및 전파 특성을 분석하고 웨이브가이드 센서를 설계 제작하며 초음파신호 원격 송수신 특성시험과 수중 C-scanning 을 수행하여 그 유효성을 검증한다.

2. 소듐내부가시화 기술개발 현황

액체금속로 노심의 핵연료가 고속중성자에 조사되면 ‘Voidage’라는 현상에 의하여 핵연료 집합체의 금속구조가 팽창 변형이 발생한다. 소듐내부가시화기술을 적용하여 핵연료집합체 상단면의 기울어진 방향과 경사각을 측정함으로써 중성자 조사에 의한 연료봉 길이 성장을 검증할 수 있다. 또한 핵연료 교환을 위해서는 핵연료 이송경로상의 장애물 존재여부 탐지 및 핵연료 어셈블리 위치 파악이 필수적으로 요구되고 있으며 액체금속로의 노심과 노내구조물 들에 대한 ASME XI Div.3 의 액체금속로 가동중검사 요건[2]을 만족하기 위해서는 초음파를 이용한 소듐내부가시화 기술의 적용이 필요하다.

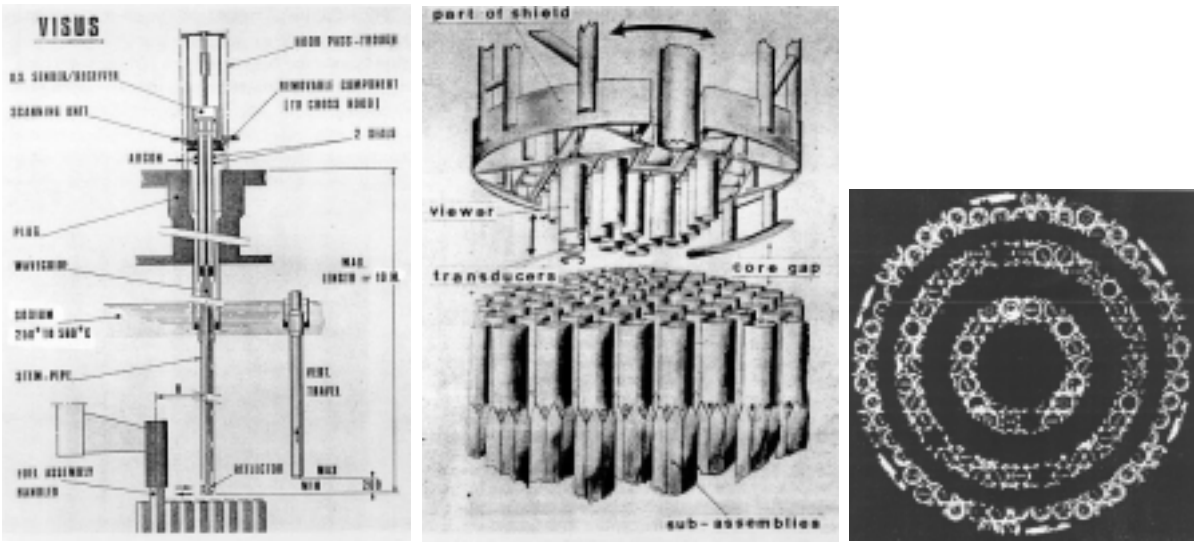
표 1 은 액체금속로 개발선진국들이 수행한 소듐내부가시화 기술개발 현황을 보여준다. 액체금속로에 초음파를 적용하고자 하는 아이디어는 1963 년도에 처음으로 제안되었으며 그 후 액체금속로 개발 선진국들은 본격적인 연구를 수행하였다[4~20]. 소듐내부가시화는 그림 1 과 같이 초음파 센서를 고온 소듐내에 직접 액침시켜 수행하는 방법과 원자로용기 헤드의 외부에 초음파 센서를 설치하고 웨이브가이드를 이용하여 원격으로 초음파를 송수신하는 방법이 적용되었다. 웨이브가이드 센서와 소듐 액침센서는 각각 노심 상부의 장애물 탐지 목적으로 노심 상부 위에서 수평방향으로 초음파를 주사하는 원격 Ranging 주사 방식과 노심 상부에서 수직으로 직접 초음파를 주사하여 노심을 가시화하는 근접 주사방식이 적용되었다. 프랑스는 웨이브가이드 센서의 수평 Ranging 주사 방식의 VISUS 장치를 개발하여 Phenix 에 성공적으로 적용하였으며 영국에서는 얇고 긴 판(strip plate)을 이용한 웨이브가이드 센서를 개발하고 실험실에서 실증시험을 실시하였지만 액체금속로에는 실제로 적용되지 못하였다. 일본에서는 웨이브가이드 센서의 구동

제한을 극복하기 위하여 소듐에 직접 침지시키는 센서를 개발하여 수평 Ranging 주사 방식으로 노심 상부의 장애물 존재 여부를 감시하는데 적용하였다. 영국, 미국, 독일 및 인도 등의 여러 나라는 보다 선명한 영상 가시화를 위해 액침 센서를 이용한 근접주사 방식을 개발하여 액체금속로에 시험적인 적용을 시도하였다.

각국은 액침용 고온 초음파센서 개발에 관한 연구를 집중하여 많은 개선을 이루었지만 아직까지 고온에서의 수명이 그리 길지 않고 송수신 감도가 쉽게 열화되는 문제점을 가지고 있다. 또한 가시화하려는 대상 목표물에의 접근방법 및 스캐닝 방식 그리고 고 정밀도의 화상처리 개발에 대한 중점적인 연구개발의 필요성이 대두되고 있으며 액체금속로 상용화를 위한 주요 핵심 연구개발 과제로 제안되고 있다.

표 1. 액체금속로 소듐내부가시화 기술개발 현황

개발국	연구기관	개발 년도	적용 원자로	주요 연구개발 실적
프랑스	CEA	1963~	Phenix	VISUS 개발 적용 - 웨이브가이드 방식 USV 장비
미국	APDA	1963~	FFTF	소듐내부 Scanner 및 고온센서 개발 실증시험 수행 FFTF 적용
영국	UKAEA NNC	1973~	PFR	UKAEA : USV 기술 및 센서 개발 NNC : LSAS(Link type Scanner)개발
독일	Interatom	1974~	SNR-300	미국과 공동연구수행 소듐 Mockup 실증시험, 고온센서 개발
인도	Indira Gandhi	1988~	FBTR	Scanner 및 고온센서 개발 1995 년 적용
일본	JAPCO Toshiba Mitsubishi	1975~ 1990~ 1990~	Monju	수평식 USV 개발 Monju 설치 Multi-Transducer Phased Array UT 센서 개발, SAFT 기법 적용



(a) 웨이브가이드 방식 (프랑스 SPX)　　(b) 소듐 액침 방식 (영국 PFR)

그림 1. 액체금속로 소듐내부가시화 기술 적용방식

3. 고온소듐 적용 초음파 센서

액체금속로의 소듐내부가시화 기술은 방사능을 띤 200℃ 이상의 고온의 소듐에서 안정적인 성능으로 오랜 시간 사용이 가능한 초음파센서의 성공적인 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 소듐내부 가시화에 적용되는 초음파센서는 두 가지 방향으로 개발되어 왔다. 첫번째는 큐리온도가 높은 PZT(Lead Zirconate Titanate) 또는 고온용 압전소자인 리튬 나이오베이트(Lithium Niobate)를 이용하여 소듐내에 직접 침지하여 사용하는 액침형 고온 초음파센서를 이용하는 방법이고 두번째는 소듐레벨 외부에 초음파 센서를 설치하고 고체 봉이나 판과 같은 웨이브가이드를 이용하여 원격으로 소듐 내부에 초음파를 전파시키는 방법이다. 액체금속로의 고온소듐 환경하에서 초음파의 송수신 문제는 고온 초음파센서 개발과 웨이브가이드를 이용하여 저온 환경에서 발진된 초음파를 고온 소듐 속으로 전파시키는 방법의 개발로 해결할 수 있으나 아직까지 두 방법 모두 기술적인 제약이 따르고 있다.

3.1 소듐 액침형 초음파센서

일반 산업계와 의료계에서 사용되는 초음파 센서는 특별한 경우를 제외하고는 거의 상온에서 사용된다. 상온 센서는 고온 환경하에서는 고온에서 압전현상이 사라질 뿐만 아니라 접합재의 접합성능이 현격히 떨어져 송수신 기능을 발휘할 수 없게 된다. 고온소듐 내에서 사용될 초음파센서 소자는 고온 열변형이 적은 견고한 케이스 속에 넣어서 고온환경으로부터 보호되어야 한다. 압전소자는 큐리온도가 1200℃에 달하는 리튬 나이오베이트가 좋지만 실제 검사는 액체금속로의 가동정지 기간 동안에 이루어지고 가동정지시에는 소듐 온도가 약 200℃에서 250℃ 정도이므로 초음파 송수신 효율 측면에서 PZT 를 사용하는 것이 보다 유리할 수 있다. 고온 초음파센서 제작시 고려해야 할 주요 문제점은 접합재의 접합성능과 소듐 중에서의 음향학적 결합성이다. 센서는 크게 압전재와 후면재(Backing Material), 전극 및 전면재 및 케이스로 구성되며 이들 재료를 접합하여 제작된다. 고온에서는 압전재의 압전성능이 나빠질 뿐만 아니라 접합재 용해에 의한 접합기능 상실로 인해 초음파 전달성능이 떨어지게 된다. 고온 접합성능을 향상시키기 위해서는 고온용 접합제를 사용하여 특수한 공정으로 제작되어야 한다. 소듐내에서의 초음파기술 적용시 소듐에 대한 음향학적 결합성 (음향학적 ‘wetting’ 현상)이 발생할 수 있다. 소듐에 대한 음향학적 결합은 초음파가 방출되는 센서 방사면의 재질과 조건에 따라 크게 달라지며 또한 시간에 따라 달라지기도 한다. 스테인리스강이나 유사한 합금 재질의 경우 소듐 온도 400℃ 이하에서 안정된 음향 결합을 얻기 위해서는 오랜 시간의 복잡한 화학공정이 필요하다. 니켈의 경우에는 스테인리스 강보다 소듐과의 음향결합성이 좋기 때문에 센서의 방사면 재료로서 니켈이 자주 선택된다. 소듐내부 초음파기술의 적용을 위해서는 소듐내에서의 음향학적 결합성을 향상시키는 연구가 필수적으로 수행되어야 할 필요성이 있다.

3.2 웨이브가이드 초음파센서

소듐 액침용 초음파 센서는 고온에서의 사용 수명 단축과 감도 저하 등으로 그 신뢰성에 문제가 있기 때문에 아직까지는 이상적인 적용에는 한계가 있다. 소듐 가시화 장치 개발 초기에는 고온 센서의 제작 운용 기술이 확립되어 있지 않아 웨이브가이드 센서가 대안으로 채택되어 적용되었다[11,12]. 웨이브가이드 센서는 액침용 초음파 센서 보다는 상대적으로 단순하며 어느 정도 신뢰성이 있는 것으로 평가되었다. 그러나 센서 구동에 의한 스캐닝 등의 근본적인 제약이 있다. 웨이브가이드 센서는 액체가 충진된 원통 튜브 웨이브가이드 센서, 고체 봉 형상의 웨이브가이드

센서 그리고 판 형상의 웨이브가이드 센서가 있다. 액체 충진 원통 튜브 웨이브가이드 센서는 종파가 발진 송수신 되고 고체 봉 웨이브가이드 센서에서는 종파 및 횡파가 전파 송수신되며 판 웨이브가이드 센서에서는 판파가 전파되어 소둠 내에서 종파로 모드변환과정을 거쳐 초음파 신호가 송수신된다.

Phenix 실험로에 적용된 VISUS 가시화 장비는 NaK 이 채워져 있는 웨이브가이드가 적용되었으며 고체 봉을 이용한 웨이브가이드 센서에 대한 적용성 평가 연구가 수행되기도 하였다. 판 형상의 웨이브가이드 센서는 영국 UKAEA Harwell Laboratory 에서 1980 년대에 이론적이 연구와 더불어 성공적인 시험 실증을 통해 그 적용성을 검증하였으나 액체금속로에 실제로 적용되지는 못하고 추가적인 연구가 진행되지 못하였으나 액체금속로에의 적용 가능성은 매우 높은 것으로 평가 된다.

판 형태의 웨이브가이드에서는 판을 따라 전파하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)가 존재한다. 판파는 전파모드가 다양하며 각 모드마다 전파속도가 주파수에 따라 변화하는 분산(dispersive) 특성이 있다[21]. 판파는 대칭형(symmetric)과 반대칭형(antisymmetric)이 있다. 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

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

반대칭모드의 경우

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

여기서 $p = \sqrt{k_L{}^2 - k^2}$ 이고 $q = \sqrt{k_T{}^2 - k^2}$ 이며 k 는 파수(wave number), h 는 두께이다.

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. 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.

$$C_g = \frac{C_p}{1 - \frac{fd}{C_p}\frac{\partial C_p}{\partial (fd)}} \tag{3}$$

여기서 f 는 주파수 d 는 판 두께이다.

그림 2 는 스테인리스 강 재질의 판에서의 판파의 위상속도와 군속도의 분산곡선을 보여준다.

판파는 사각쐐기를 이용하여 발생시킬 수 있다. 사각쐐기를 이용하는 방법에는 일반 초음파 펄스 송수신장치에 의한 스파이크 펄스를 이용하는 방법이 있고 특정 모드의 신호를 발진시키기

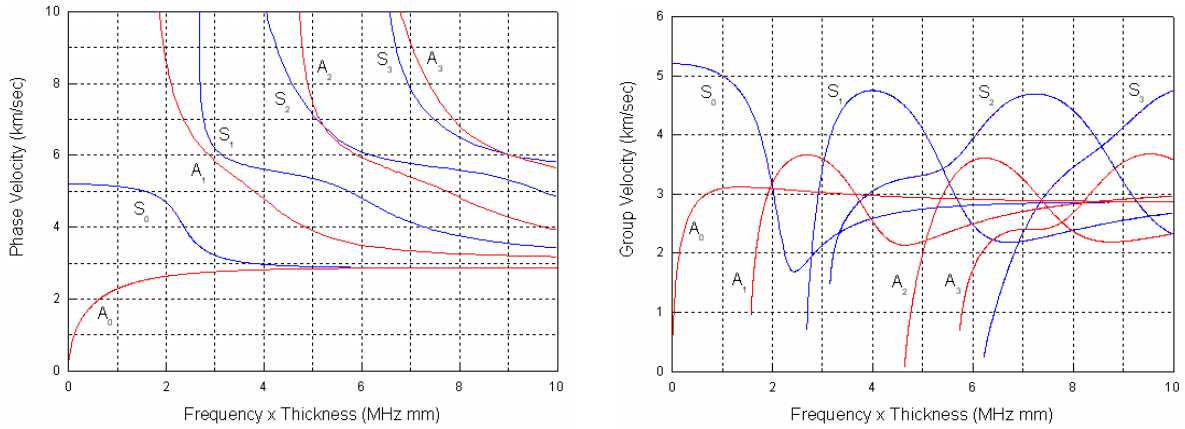
위하여 특정 주파수의 Tone Burst 신호를 발진시키는 방법이 있다. 스파이크 펄스를 이용하는 방법은 입사주파수가 일정 밴드폭을 가지므로 여러 가지 모드가 복합적으로 나타날 가능성이 크며 Tone Burst 신호 발진법은 협대역 주파수 밴드폭을 가지므로 특정 모드를 선택적으로 선정할 수 있다. 분산곡선에 계산된 바와 같이 fd 가 2 이상이 되면 높은 모드의 판파가 여기되어 송수신 신호가 복잡해 질 수 있으므로 가능한 fd 를 2 이하로 선정한다. A_0 모드는 반대칭모드로 입자변위의 두께방향 수직성분이 커서 모우드 변환효율이 좋다. 저차 모드인 A_0 판파가 여기될 수 있도록 입사주파수와 판 두께를 선정한다.

웨이브가이드가 그림 3 과 같이 액체 내에 잠기면 웨이브가이드 내를 전파하던 판파가 액체내의 종파로 모드변환이 발생하며 액체내의 종파는 다음 식의 임계각으로 전파한다.

$$\sin q = \frac{C_L}{C_p} \tag{4}$$

여기서 C_L 은 액체내의 종파속도(물인 경우 상온에서 1480m/s 이고 소듐인 경우 200 에서 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.

웨이브가이드 센서에서 방출된 초음파는 액체 속에 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 있다.



(a) 위상속도 분산곡선 (b) 군속도 분산곡선

그림 2. 스테인리스 강 재질의 판에 대한 판파의 분산곡선

4. 웨이브가이드 초음파 센서 설계 제작 및 수중 C-scanning 시험

스테인리스 강 재질의 웨이브가이드 초음파센서는 길이가 0.6m, 폭은 25mm, 두께는 1mm 인 얇은 판으로 제작되었다. 스테인리스 강은 고온 소듐에서도 변형이 적으며 소듐과의 적심성(wettability)도 양호하여 초음파의 전파효율이 좋은 특성을 갖는다. 그림 3 은 초음파신호 송수신

특성과 웨이브가이드 센서의 적용가능성을 평가하기 위한 실험 block diagram 을 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.. 웨이브가이드 센서를 물속에 담그게 되면 모드 변환에 의해 물속으로 종파가 방출된다. 이때의 방출각은 식 (4)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. 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 있다. 그림 3 에서와 같이 제작된 웨이브가이드 센서를 초음파 C-Scan 장비인 Panametric Multiscan System 의 스캐너에 장착하였고 수조 탱크에 길이가 60mm 이고 폭이 30mm 이며 높이가 10mm 인 사각형 시험체를 수조에 설치한 후, 웨이브가이드 센서를 시험체로부터 30mm 상단에 위치하고 C-Scan 실험을 수행하였다. 그림 4(a)는 수중에서 웨이브가이드 센서의 끝단과 수조 바닥면에서 반사되는 A_0 판파 신호를 보여준다. 그림 4(b)는 웨이브가이드 센서의 끝단과 사각형 시험체의 상단면에서 반사되어 되돌아온 초음파신호를 보여준다. 시험체 상단면위 반사 신호에 게이트를 걸어 이 신호의 진폭과 시간 데이터를 스캐너의 X, Y 위치 값과 함께 저장하면 시험체 평면에 대한 C-Scan 화상을 그림 5 와 같이 얻을 수가 있다. 본 실험을 통하여 웨이브가이드 센서를 이용한 수중 구조물의 영상을 가시화할 수 있는 가능성을 입증할 수 있었다.

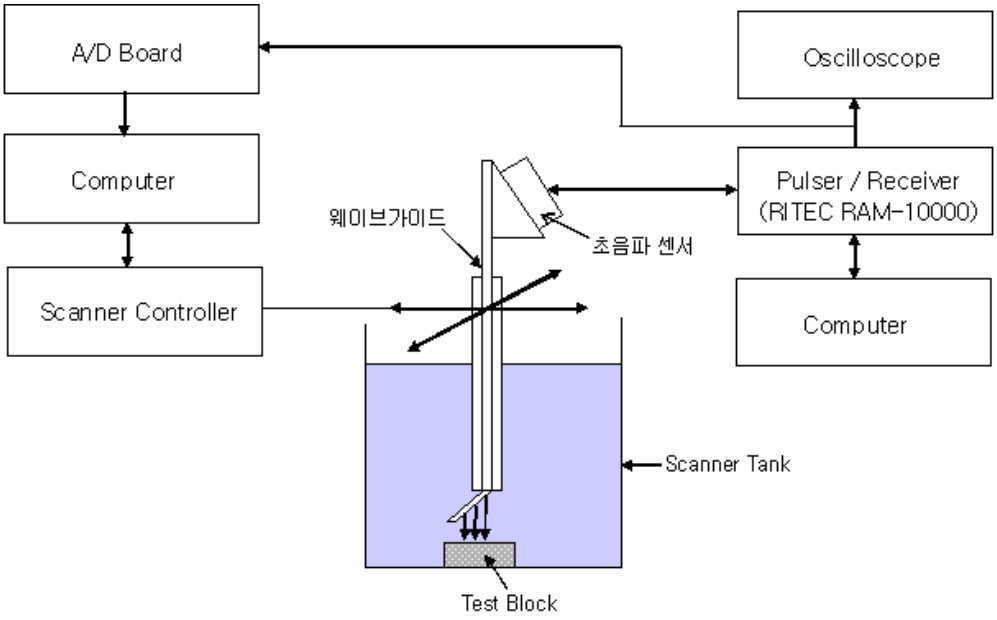
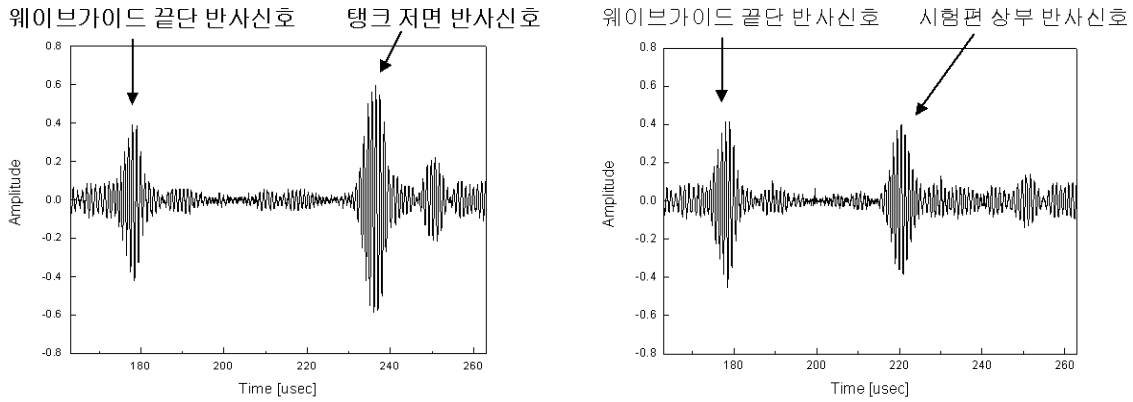
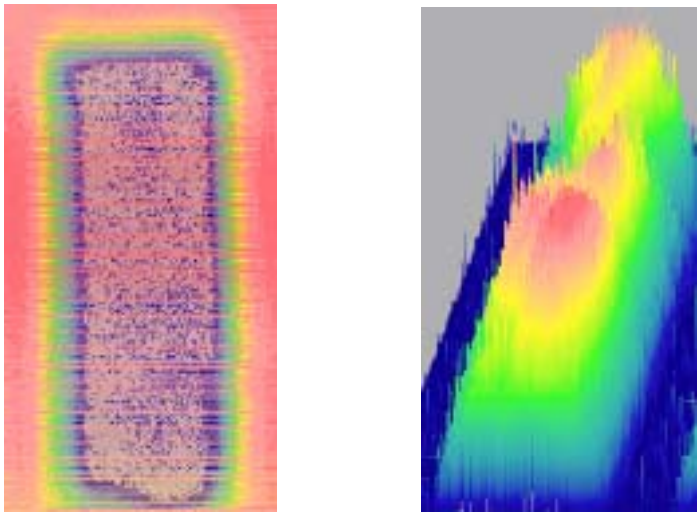


그림 3. 웨이브가이드 초음파센서를 이용한 수중 C-scanning 시험 Block Diagram



(a) 탱크 저면 반사신호 (b) 시험 block 상부 반사신호

그림 4. 웨이브가이드 초음파센서를 이용한 수중 C-scanning 시험시 초음파 반사 신호



(a) C-Scanning 영상 (b) Projection View

그림 5. 웨이브가이드 센서에 의한 사각형 block 의 C-scanning 시험 결과

4. 결 론

액체금속로 노심 및 노내구조물은 불투명한 고온소듐에 잠겨 있어 핵연료 교환시 핵연료 어셈블리 위치 육안관측이 불가능하며 노심과 노내구조물의 변형 및 구조손상 등을 감지할 수 없다. 또한 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME Sec XI, Div. 3 의 검사 요건에서 요구하고 있는 노내구조물의 원격 육안검사를 수행하기 위해서는 불투명한 소듐내부를 가시화하는 기술의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 액체금속로 개발선진국들은 액체금속로 개발 초기부터 불투명한 소듐의 내부를 가시화하기 위한 초음파검사 기법 적용에 대한 연구 개발을 시작하여 일부 액체금속로에 적용하였으나 고온 고방사능 문제로 인해 그 적용의 한계와 기술적인 제약이 있어 왔다. 액체금속로의 상용화를 위해서 소듐내부 가시화 기술의 실용화 및 검사신뢰성 향상 등이 필수적으로 보완 개선되어야 한다. 소듐내부 가시화 기술을 액체금속로에 적용하기 위해서는 가시화 장치의 접근성 확보와 거리 측정을 위한 반사체 및 게이지 설치 등이 설계단계에서부터 고려되어야 하며 소듐내부 초음파 계측 기술개발과 검사장치 개발이 병행되어야 한다. 소듐

내에서의 초음파 가시화 및 측정기술은 액체금속로 노내구조물의 가동중검사 및 안전성과 관련된 건전성 연속감시의 핵심 기술로서 액체금속로의 개발선진국에서 관련 기술개발과 적용에 많은 노력을 기울였지만 아직까지는 소듐 내에서의 초음파 기술에 여러 가지 제한점이 있다. 액체금속로 노내구조물의 구조손상 감지와 가동중 원격육안검사를 위해서는 고온소듐 환경을 극복할 수 있는 초음파센서 기술개발이 필수적이다. 본 연구는 웨이브가이드 센서를 이용한 소듐 내부가시화 기술의 적용 가능성을 평가하기 위해 수행되었다. 초음파펄스를 장거리 송수신할 수 있는 웨이브가이드 초음파 센서를 설계 제작하고 송수신 변환 효율이 좋은 A_0 반대칭 모드를 이용하여 수중 C-Scanning 시험을 실시하여 높은 해상도를 가진 수중 영상을 얻을 수가 있었으며 웨이브가이드 센서의 적용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

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

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

[3] 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.

[4] 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.

[5] N. Lions, et al., “Apparatus for Ultrasonic Visualization in Sodium (VISUS) and Acoustic Detection in the Phenix Reactor,” ORNL-TR-4136, 1973.

[6] 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

[7] C.C. Scott, et al., “Potential Application for an Under Sodium Ultrasonic Scanning Device,” APDA-205, Atomic Power Development Associates, Inc., 1967.

[8] J.C. Spanner, “Preliminary Development of ISI Method for LMFBRs,” HEDL-SA-1092, Hanford Engineering Development Laboratory, 1976.

[9] R.N. Ord and R.W. Smith, “Development of an Under-Sodium Ultrasonic Scanner in Reactor Surveillance,” HEDL-TME 72-91, Hanford Engineering Development Laboratory, 1972.

[10] J.A. McKnight, et al., “Recent Advanced in the Technology of Under-Sodium Inspection in LMFBRs,” Liquid Metal Engineering and Technology, BNES, London, pp. 423~430, 1984.

[11] 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.

[12] 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.

[13] J.A. McKnight, et al., “Use of Ultrasound for Monitoring the Internal Structure of LMFBR,” Remote Technique for Inspection and Refurbishment of Nuclear Plant, BNES, London, pp. 175~180, 1988.

[14] R. Hans, et al., “Under-Sodium Viewing – A Method to Identify Objects in an Opaque Medium,” Liquid

Metal Engineering and Technology, BNES, London, pp. 419~423, 1984.

[15] H.A. Rohrbacher and R. Bartholomay, “Ultrasonic Measuring Technique in Sodium Systems,” BNWL-TR-157, 1975.

[16] H.A. Rohrbacher and R. Bartholomay, “An Ultrasonic Sweep Arm for Use in Sodium-Cooled Reactors,” EURFNR-1273, 1975.

[17] A. Rajendran, et al., “Development of an Ultrasonic Under-Sodium Scanner for the Fast Breeder Test Reactor,” 14th World Conf. on Non Destructive Testing, New Delhi, India, pp. 349-352, 1996.

[18] R.D. Kale and S.B. Bhoje, “Engineering Component and Systems Development for Prototype Fast Breeder Reactor,” Proceedings of ICONE 5, ICONE5-2603, 1997.

[19] H. Karasawa, et al., “Development of Under Sodium Inspection Techniques for FBR(2),” Proceedings of ICONE 5, ICONE5-2335, 1997.

[20] T. Susuki, et al., “Development of FBR Visual Inspection Technique in Sodium,” Proceedings of ICONE 3, S212-2, pp. 905-910, 1995.

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