

웨이브가이드 센서의 초음파 빔 방사각 변환 방법

주영상, 김석훈, 이재한

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150, ysjo@kaeri.re.kr

1. 서론

액체금속로의 냉각재인 소듐은 불투명하기 때문에 핵연료 교환시 핵연료 어셈블리 위치의 육안관측이 불가능하고 ASME Sec XI, Div. 3의 검사 요건[1]에 의한 노내구조물의 가동중검사를 수행하는데 있어서 근본적인 문제점이 있다. 액체금속로의 노심 관측과 노내구조물의 육안 검사를 수행하기 위해서는 불투명한 소듐내부를 가시화할 수 있어야 한다[2]. 소듐내부가시화(Under-Sodium Viewing: USV)는 초음파검사 기법이 적용되고 있으나 고온 고방사능 문제를 인해 그 적용의 한계와 기술적인 제약이 있어 왔다[3]. 소듐 내부의 구조물 형상을 초음파 영상으로 구현하는 방법에는 초음파 센서를 직접 소듐에 액침시켜 반사된 초음파신호를 영상으로 가시화하는 방법과 초음파 센서를 원자로 헤드 상단 외부에 두고 두께가 얇고 길이가 긴 웨이브가이드를 이용하여 초음파 신호를 원격으로 송수신함으로써 소듐내부를 가시화하는 방법이 있다. 소듐액침 방식은 소듐내 시험체의 근거리 초음파 센서를 접근시켜 고해상의 초음파영상을 얻을 수 있으나 고온 고방사능 환경으로 인해 센서를 오랜 시간 동안 사용할 수가 없는 단점이 있고, 웨이브가이드 센서 방식은 센서가 고온 환경에 접촉하지 않기 때문에 센서를 장시간 사용할 수 있는 장점이 있으나 초음파 빔 주사각 조정 및 스캐닝에 제한이 있다[3,4]. 본 논문에서는 액체금속로 노심과 노내구조물의 가동중검사를 수행하기 위한 웨이브가이드 초음파 센서 기술개발의 일환으로 웨이브가이드 센서의 스캐닝 제한을 극복할 수 있는 방법에 대한 아이디어를 제시하고 실험으로 검증하여 그 적용가능성을 확인한다.

2. 웨이브가이드 센서의 A₀ 판파의 분산성

판 형태의 구조물에서는 판을 따라 전파하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)가 존재한다. 판파는 전파 모드가 다양하며 각 모드마다 전파속도가 주파수에 따라 변화하는 분산(dispersive) 특성이 있다[5]. Figure 1은 제 0차 대칭(S₀) 및 반대칭(A₀) 판파의 위상속도 분산곡선을 보여주고 있다. Figure 1에서와 같이

판파의 전파속도는 판의 두께와 입사주파수에 따라 변화한다.

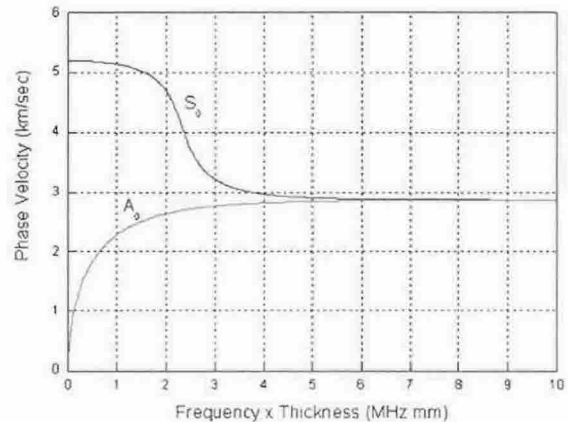


Figure 1. Dispersion curve of A₀ mode plate waves.

제 0차 반대칭 판파 A₀ 모드는 두께방향 입자 변위성분이 커서 액체와 접하면 종파로 전파되는 모드변환 효율이 좋은 특성을 가지고 있다. Figure 2와 같이 웨이브가이드가 액체에 잠기면 웨이브가이드 내를 전파하던 A₀ 판파가 액체내의 종파모드로 변환되어 전파한다. 이때의 초음파 빔 방사각(θ)은 소듐 중 종파속도 V_L 과 판파의 위상속도 C_p 에 따라 다음 식에 의해 결정된다.

$$\sin \theta = V_L / C_p \quad (1)$$

판의 두께와 입사주파수의 곱 fd 가 3 이하인 분산 영역에서는 위상속도가 주파수의 함수가 되므로 주파수의 변화에 따라 빔 방사각이 변하는 물리적 특성이 있다. 이러한 특성을 이용하면 웨이브가이드 센서의 초음파 빔 방사각을 변화시킬 수 있게 된다. 이 영역의 적당한 주파수 범위에서 입사펄스의 주파수를 변화시키면 A₀ 판파의 위상속도 C_p 가 변화하게 되고 초음파 빔 방사각(θ)이 변화하게 되며 초음파 빔의 방향을 주파수 튜닝으로 변환 조정할 수 있다. 스테인리스 강 재질의 판인 경우 이 영역의 A₀ 판파의 위상속도가 2700m/s 이하이므로 일반적으로 사용하는 웨지로는 A₀ 모드를 발진시킬 수 없다. Acrylic resin 또는 methyl methacrylate와 같은 폴리머 재질로 제작되는 초음파 웨지는 종파 속도가

보통 2700m/s 정도로서 A_0 판파를 발생시킬 수가 없다. 분산성이 큰 영역($fd < 3$)의 A_0 판파를 발생시키기 위해서는 종파속도가 2000m/s 이하인 물($V_L=1480\text{m/s}$)이나 글리세린($V_L=1920\text{m/s}$)과 같은 액체 웨지를 사용하면 가능하다.

3. 실험 및 결과

입사펄스 주파수 변조에 따른 A_0 판파 모드의 빔 방사각 변환 특성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 장치는 Figure 2 와 같이 웨이브가이드 초음파 센서와 초음파 신호를 송수신시키고 입사 주파수를 연속적으로 튜닝시킬 수 있는 신시사이저 펄스발생기와 컴퓨터 및 오실로스코프로 구성하였다. 웨이브가이드 초음파 센서는 중심주파수가 1MHz 이고 직경이 0.5 인치인 원형 초음파 탐촉자와 가변각 액체웨지 그리고 두께가 1mm 인 스테인리스 강 재질의 판으로 구성되어 있다. Figure 3 은 주파수변조에 따라 초음파 빔 방사각이 변환되는 영상으로서 입사주파수 변화에 따라 초음파 방사빔이 조향(steering)되는 특성을 보여주는 결과이다. Figure 4 는 입사펄스 주파수를 0.8MHz 에서 1.2MHz 까지 연속적으로 스위치하면서 수평 평판 시험편과 $\pm 2^\circ$ 도 경사진 시험편에서 수신된 초음파의 진폭분포를 보여 준다. 시험체의 경사도에 따라 진폭분포도의 중심주파수가 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 진폭분포도의 중심 주파수와 웨이브가이드 판 두께의 곱에 해당하는 A_0 판파의 위상속도 C_p 로부터 식 (1)에 의하여 초음파 빔 방사각(θ)을 알게 되고 이로부터 시험체의 경사각을 측정할 수 있는 새로운 방법을 제시해 준다.

4. 결론

본 연구에서는 A_0 판파 모드의 분산 특성과 입사펄스의 주파수 연속 변조방식을 이용하여 웨이브가이드 센서의 초음파 빔 방사각을 변환시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 본 방법은 기계적인 구동 없이 전자적 방식에 의해 웨이브가이드 센서의 빔 스캐닝을 가능하게 할 뿐만 아니라 입사 주파수의 연속적 스위치에 의한 수신파의 진폭 분포 중심주파수로부터 시험체의 경사각을 측정할 수 있게 해주며 또한 여러 개의 센서로 구동되는 위상배열 초음파 기능을 단일 센서로 구현함으로써 단면 B-Scan 가시화가 가능하다.

감사의 글

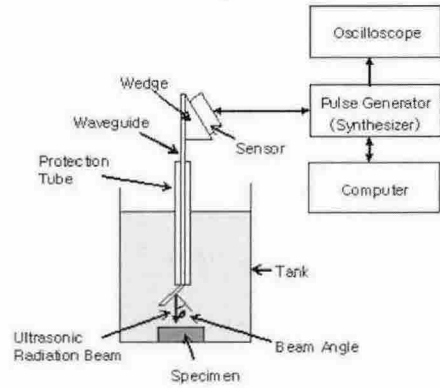


Figure 2. Waveguide sensor and experimental setup.

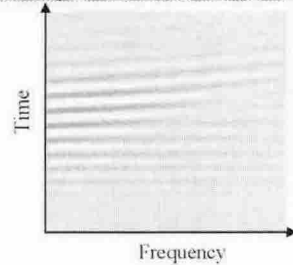


Figure 3. Image of ultrasonic beam angle transform by frequency sweep.

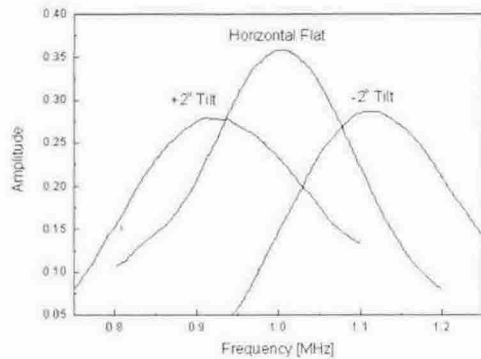


Figure 4. Amplitude distributions of reflected signal for horizontal flat and $\pm 2^\circ$ tilted specimens by frequency sweep.

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004 년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

REFERENCES

- [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, et al., "Recent Advanced in the Technology of Under-Sodium Inspection in LMFBRs," Liquid Metal Engineering and Technology, BNES, London, pp. 423-430, 1984.
- [4] 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.
- I.A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York, 1967.