

도파편을 이용한 고온 액침 초음파센서의 가능성 연구

최명선, 이종포, 정태인
한국원자력연구소 비파괴평가사업부

요 약 액체나트륨 내부에서의 가시화, 온도 혹은 칫수 측정, 용접부의 비파괴검사 등을 위한 고온(약 250~650°C) 액침 초음파센서의 개발이 시도되어 왔다. 본 연구에서는 도파편을 이용한 고온 액침 초음파센서의 가능성을 수조에서 실험으로 확인하였다. 가장 낮은 차수의 반대칭 판파가 분산이 거의 없는 주파수 영역에서 이용되었다. 이 판파는 주파수가 2.3MHz인 빗살구조 탐촉자에 의해 두께가 1mm이고 폭이 13mm인 스테인리스강 도파편 내에 여기되었다. 이 판파의 감쇠상수는 공기중에서 1.2dB/m이었고, 물속에서는 380dB/m이었다. 13mm×39mm 크기의 빔방사부위로부터 270mm 떨어진 평면 반사체에 대해 25dB의 신호 대 잡음 비를 얻었다.

1. 서 론

고속증식로(일명 액체금속로)에서 냉각재로 사용되는 액체 나트륨은 여러가지 장비문제들을 야기시키고 있다. 이것은 가압수형 원자로에서 냉각재로 사용되는 물과는 현저히 다른 액체나트륨의 물리화학적 성질에 기인한다. 예를들면, 액체나트륨은 약 98°C에서 고체로 되므로 모든 나트륨 배관과 기기에 히터나 단열재를 설치해야 하고, 또한 액체나트륨은 공기중의 산소나 수증기와 매우 급격히 반응하므로 액체나트륨을 포함하는 모든 기기 내부에 불활성 보호가스가 필요하다.

더우기, 이 액체나트륨은 전기전도도가 높아서 불투명하기 때문에 광학적인 검사가 불가능하다. 이 문제의 해결책으로 초음파법이 오래동안 고려되어 왔으며, 액체나트륨 내에서의 가시화, 온도 혹은 칫수 측정, 그리고 용접부의 비파괴검사 등을 위한 초음파기술은 많은 연구들의 주제이었다.^{1)~7)}

아마도, 액체나트륨 내에서의 가시화에 대한 가장

중요한 초기연구는 미국의 Hanford 팀에 의한 일련의 실증작업들일 것이다.¹⁾ 이들은 각인된 숫자 정도로부터 모의 노심 상부의 단면에 이르는 초음파영상을 고온의 액체나트륨 내부에서 얻을 수 있다는 것을 보였다. 이 연구가 고속증식로에 대한 ASME 코드에 액체나트륨 내부의 가시화가 포함되도록 하는 동기가 되었다.²⁾ 그러나, 운전로에 대한 적용은 쉽게 실증되지 않았다. 원자로 계통에 의해 부가되는 공학적 제약들이 초음파 영상장치에 요구되는 운동의 유연성과 상치되었기 때문이었다. 그래서, 원자로의 액체나트륨 내부에서 초음파 가시화의 적용은 보다 단순하면서도 중요한 운전작업을 지향하는 경향이 있었다.³⁾ Phenix 원자로의 핵연료 장전과 정에서 집합체를 볼 수 있도록 하기 위한 가시화장치의 개발은 매우 성공적이었다.⁴⁾ 이 장치는 Superphenix 1 원자로에 확장되었다. 유사한 초음파 영상 실험들이 Risley Nuclear Power Development Laboratory 팀에 의해 영국의 Dounreay 실증로에서도 수행되었다.⁵⁾ 이들은 원자로심에서 연료의 변형을 관

찰하고자 하였다. 그리고, 이같은 가시화장치는 SNR300 원자로의 장치판(instrument plate)을 시험하기 위해 Interatom에서도 개발되어 왔다.⁶⁾

이같은 모든 개발작업들은 방사능을 띤 고온(약 250~650°C)의 액체 나트륨속에서 사용가능한 초음파센서들의 성공적인 개발에 의존한다. 이 초음파센서들은 두가지 방향으로 개발되어 왔다. 즉, 큐리 온도가 높은 PZT나 리튬 나이오베이트 같은 압전소자를 이용하는 방법⁶⁾과 고체 띠나 봉과 같은 도파체(solid waveguide)를 이용하는 방법^{34,7)}이다. 전자는 사용 온도의 제한과 수명의 불확실성이 있는 반면에, 후자는 이동에 제한이 있다. 최근, 국내에서도 고속증식로의 개발을 위한 증장기 프로그램의 일환으로 도파띠(strip waveguide)를 이용한 고온 액침 초음파센서의 개발이 시도되어 왔다. 본 논문에서는 이 초음파센서의 개념설계, 시작품 제작 및 물속에 서의 성능시험 등의 내용이 보고된다.

2. 센서 설계 및 제작

2.1. 판파의 분산

도파띠와 같은 고체 판에서는 “Lamb Waves” 혹은 판파로 불리우는 탄성파들이 전파될 수 있다. 이들은 판의 표면에 나란하게 진행되는 평면 변형 파동들로, 입자의 변위가 판의 두께에 대해 대칭인 모우드들과 반대칭인 모우드들로 나누어 진다. 전자는 입자의 평균변위가 판에 나란하기 때문에 종(longitudinal) 모우드로, 후자는 입자의 평균변위가 판에 수직하므로 횡(transverse or flexural) 모우드로 불리우기도 한다. 이들은 전파속도가 주파수에 의존하는 분산파들이며, 그 분산곡선들은 Rayleigh-Lamb 특성 방정식으로부터 수치해석적 방법에 의해 얻어질 수 있다.⁸⁾

Fig. 1은 스테인레스강 판에서 가장 낮은 차수의 대칭 모우드(S_0)와 반대칭 모우드(A_0)에 대한 위상 속도, V_p 와 군속도, V_g 의 분산곡선들을 보여준다. 주파수 f 는 다음과 같이 정의되는 무차원 매개변수 S 에 포함된다;

$$S = \pi f D / C_s \dots\dots\dots (1)$$

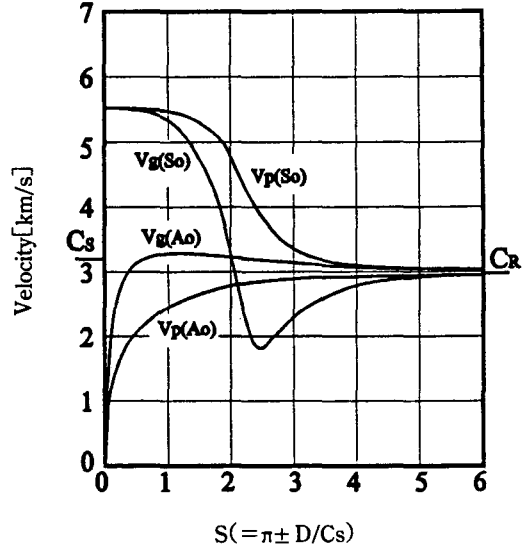


Fig. 1. Velocity dispersion of the zero-order Lamb waves in stainless steels plates.

여기서 D 는 판의 두께이고, C_s 와 C_R 는 각각 횡파와 Rayleigh 표면파의 속도로 3210m/s와 2990m/s이다. 이 계산에 사용된 종파속도와 포와송 비는 각각 6240m/s와 0.32이었다. 주파수 혹은 판의 두께가 커짐에 따라 이 모우드들이 Rayleigh 표면파로 변화됨을 볼 수 있다.

2.2. 판파의 여기

판파를 여기시키는 방법은 다양하다. 여기서는, Fig. 2에 보여진 것 같이, 빗살 구조의 판(comb-structure plate)을 이용한 공명법이 채택된다. 여기서 압전소자는 후면재나 전면재 없이 빗살구조의 판 위에 직접 위치되어 두께 모우드로 운영된다. 빗살의

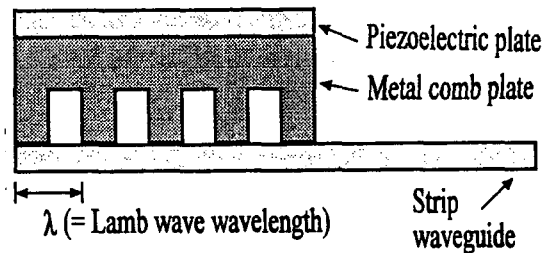


Fig. 2. Schematic diagram of the ultrasonic comb-structure transducer.

폭과 공간의 비는 1이다. 이 빗살구조 탐촉자는 도파띠 위에 위치된다. 압전소자, 빗살구조판 그리고 도파띠 사이에는 접촉매질이 필요하다. 그리고, 전기 펄스를 압전소자에 가하면, 빗살의 주기와 같은 파장을 갖는 판파가 도파띠 내에 여기된다. 역으로, 빗살의 주기를 적절히 가공함으로써, 판파들중 원하는 모우드의 선택적인 여기가 가능하다. 판파의 분산특성에 기인한 초음파펄스의 찌그러짐을 피하고 감도를 높이기 위해, 속도 분산이 거의 없는 주파수 영역의 좁은 대역폭을 갖는 전기 펄스가 사용된다.

2.3. 모우드 변환

도파띠의 일부가 액체 내에 담기게 되면, 판파에 의한 입자변위의 수직성분이 액체 내에서의 입자변위를 유발시키므로, 도파띠 내의 판파로부터 액체 내의 종파로의 모우드 변환이 발생하게 된다. 이때, 액체 내의 종파는 다음과 같은 임계각으로 전파된다.

$$\sin\phi = C_L / V_p \dots\dots\dots (2)$$

여기서, C_L 은 액체내에서의 종파의 속도(물 : 1480m/s, 액체나트륨 : 2450m/s 정도)이고 V_p 는 판파의 위상속도이다. 이 모우드 변환으로 인한 판파의 에너지 손실율은 모우드의 종류와 매개변수 S에 의존한다.

위의 역과정도 또한 가능하다. 즉, 액체 내부에서의 종파가 도파띠를 향해 각도 ϕ 로 입사하게 되면 판파가 도파띠 내부에 발생된다. 결국, 이 두 모우드 변환과정을 통한 초음파 펄스의 송수신이 가능해진다. 이같은 도파띠 형태의 초음파 센서에 이용될 수 있는 판파로는 입자변위의 수직성분이 커서 모우드 변환 효율이 큰 반대칭 모우드가 대칭 모우드보다 유리할 것이다.

2.4. 센서 제작

Fig. 3은 물속에서의 가능성시험을 위해 제작된 도파띠형 초음파센서의 도식도이다. 여기서 도파띠는 길이 0.6m, 폭 13mm, 두께 1.0mm의 스테인레스강이다. 이 재료에서의 종파 및 횡파 속도와 포와송 비는 각각 6240m/s, 3210m/s, 0.32이다. 도파띠의

재질로 스테인레스강을 선정된 것은 액체나트륨과의 적습성(wettability)이 좋고 650°C의 고온에서도 내부구조의 변화가 작은 것으로 알려져 왔기 때문이다.⁷⁾ 도파띠가 물속에 들어 가자마자 즉각적으로 발생하는 모우드 변환을 제한하기 위해서, 이 도파띠는 빔방출지점에 도달할 때까지 아크릴 튜브내에 밀폐된다. 물이 튜브내로 유입되지 않도록 하면서 도파띠가 물과 접촉되는 길이, l 을 쉽게 변화시킬 수 있도록 튜브 끝부분은 중심에 도파띠의 단면보다 약간 작은 창을 갖는 유연한 플라스틱으로 방수처리되었다. 실제 액체나트륨 내부에서의 적용을 위해서는 금속튜브와 방수판(seal plate)이 사용되어야 할 것이다. 이때는 도파띠와 금속 튜브 및 방수판의 접합기술이 중요해진다.

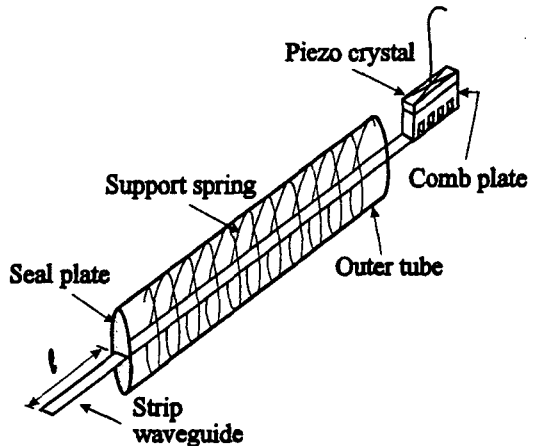


Fig. 3. Schematic diagram of the ultrasonic immersion sensor with a strip waveguide.

그리고, 튜브 내의 스프링은 접촉면을 최소화하면서 도파띠를 고정시키는 역할을 한다. 도파띠의 반대편 끝에는 13mm×26mm 크기의 빗살구조 탐촉자가 부착된다. 공진주파수가 2.3MHz인 리튬 메타나오베이트 압전소자가 이용되었다. 그러므로, 이때의 S값은 $2.25(\approx \pi \times 2.3 \times 1/3.21)$ 이며, 대응되는 반대칭 판파의 위상속도 V_p 는 2780m/s이다(Fig. 1 참조). 그래서, 빗살구조의 주기는 이 판파의 파장 ($\lambda = V_p/f$)인 1.2mm가 되어야 한다. 이 빗살구조 판은 두께 5mm의 스테인레스강 판을 방전가공하여 제작되었다. 빗살의 갯수는 총 22개이었고, 각각의 깊이는 2.5mm이었다.

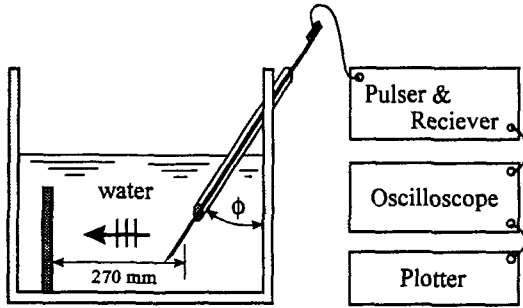


Fig. 4. Schematic of the experimental setup.

3. 실험 및 논의

Fig. 4는 사용된 실험장치를 보여준다. 전기 펄스의 송수신을 위해, 펄스 변조 기능을 갖춘 MATEC 7700 시스템이 펄스-에코 모우드로 사용되었다. 평면 반사체가 수조내에 수직으로 위치되었고, 초음파빔이 수평방향으로 진행하도록 도파피 센서는 수직선으로부터 임계각 $\phi = \sin^{-1}(1480/2780) \approx 32^\circ$ 만큼 기울어져 설치되었다. 반사체와 빔방사지점 사이의 거리는 270mm 정도이었다. 이 거리는 물과 도파피가 접촉되는 빔방사부위의 길이 l 에 따라 어느정도 변하지만, 본 실험의 경우 l 이 도파피의 길이에 비해 그리 크지 않았기 때문에 (50mm이하) 그 변화는 중요치 않았다. 그리고, 빔살구조 탐촉자는 접촉매질로 글리세린을 사용하여 도파피 끝에 부착되었으며, 주파수가 2.3MHz이고 폭이 1.5 μ s인 tone burst 신호들에 의해 여기되었다. 수신된 신호는 Lecroy 9400 오실로스코프와 Hewlett Packard 7475 플로터로 관찰되고 기록되었다.

먼저, Fig. 5는 이 초음파센서를 물속에 담그기 전에 관찰되는 도파피 끝으로부터 반사된 신호들을 보여준다. 첫번째 신호는 main bang 신호이다. 이후의 연속된 두 신호의 시간지연(372 μ s)으로부터 판파의 군속도가 측정될 수 있다: $2 \times 600\text{mm} / 372\mu\text{s} = 3226\text{m/s}$. 이 값은 Fig. 1에 보여진 A. 모우드의 판파에 대한 이론적 계산값과 잘 일치한다. 그리고, 이 판파는 도파피를 따라 진행할 때 액체와 접촉하지 않아도 그 진폭이 감쇠됨을 볼 수 있다. 연속된 두 신호의 진폭비로부터 얻어진 감쇠 값은 10dB정도이다. 여기에는 도파피의 재질 자체에 의한 초음파

의 흡수와 더불어 도파피와 빔살구조 탐촉자 사이의 접촉매질(글리세린)에 기인된 감쇠가 포함된다. 후자가 전자보다 훨씬 클 것으로 생각된다. 이것은, 다음 절에서 명확해 지듯이, 도파피가 유체와 접촉하게 되면 판파의 에너지가 급격히 감쇠되기 때문이다. 그러므로, 공기와 접촉한 도파피에서의 판파의 감쇠상수는 접촉매질 부분을 통과하는 횟수가 같은 초음파 신호들로부터 측정되어야 한다. 예로써, 길이가 다른 두 도파피의 끝으로부터의 첫번째 신호들이나, 빔살구조 탐촉자를 도파피의 1/3 위치에 두고 탐지한 도파피 양쪽 끝신호들을 이용할 수 있다. 측정결과, 이 감쇠상수는 1.2dB/m이었다.

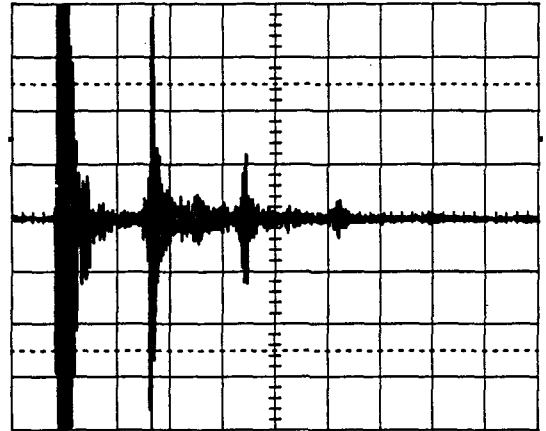


Fig. 5. Echoes from the end of the waveguide in air ($x=200\mu\text{s}/\text{div}$, $y=100\text{mV}/\text{div}$).

도파피를 물속에 담그게 되면, 물과의 접촉부분에서 즉각적인 모우드 변환이 발생하여 물속으로 일부의 에너지가 방출된다. 그래서, 이 접촉부분의 길이 l 이 증가할수록 도파피 끝 신호의 진폭이 작아지게 된다. 이것으로부터 물과의 접촉에 기인된 판파의 감쇠상수가 측정될 수 있다. 이때 주의할 점은 도파피 끝신호는 물과의 접촉부분을 두번 통과하였다는 사실이다. 측정결과, 이 감쇠상수는 380dB/m이었다. 이것은 공기중의 감쇠상수에 비해 300배 이상 큰 값이다. Fig. 6은 $l=39\text{mm}$ 인 경우 관찰된 초음파 신호이다. 도파피의 끝 신호는 더이상 관측되지 않고 반사체 신호만이 보인다. 이 신호(530mV) 대 잡음(28mV)의 비는 25dB이상이다. 물과의 접촉면

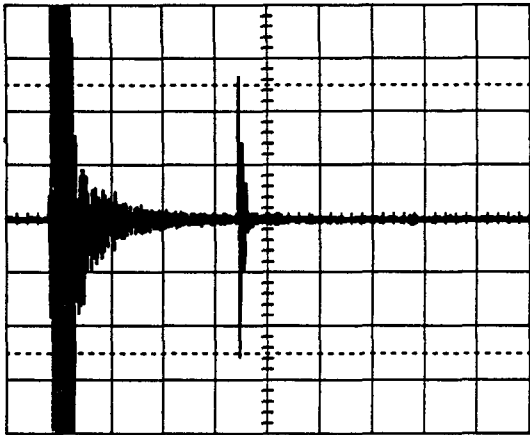


Fig. 6. Echo from a planar target 270 mm away from the waveguide in water.

($x=200\mu\text{s}/\text{div}$, $y=100\text{mV}/\text{div}$)

을 한 면으로 제한시키면, 감쇠상수는 반으로 감소될 것이고 신호 대 잡음 비는 두배로 증가될 것이다. 또한, 도파피 센서의 폭을 증가시킴으로써 감도를 향상시킬 수도 있을 것이다.

4. 결 론

도파피를 이용한 고온 액침 초음파센서의 가능성을 확인하였다. 분산이 거의 없는 주파수 영역의 가장 낮은 차수의 반대칭 판파가 빗살구조의 탐촉자를 이용한 공명법으로 스테인레스강 도파피(두께 1 mm, 폭 13mm)내에 여기되었다($S=2.25$). 이 판파의 감쇠상수는 공기중에서 1.2dB/m이었고, 물속에서는 380dB/m이었다. 13mm×39mm 크기의 빔방사부위로부터 물속에서 270mm 떨어진 평면 반사체에 대해 25dB의 신호대 잡음 비를 얻었다. 이 감도는 도파피와 물과의 접촉면을 한 면으로 제한시키거나 도파피 센서의 폭을 증가시킴으로써 크게 향상될 수 있다.

액체 나트륨 내에서의 적용을 위해서는 이 센서

에 의한 초음파빔의 특성해석 및 도파피와 금속 튜브의 접합기술에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 금번 연구에서는 차수가 가장 낮은 모우드만이 발생되도록 고주파수 영역은 제외되었다. 보다 높은 주파수에서도 만족스럽게 작동될 수 있는 도파피 초음파센서 또한 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) C. K. Day and R. W. Smith, "Under-Sodium Viewing", IEEE Trans., SU-21 No. 3 (July 1974)
- 2) American Society of Mechanical Engineers, "Rules for In-Service Inspection and Testing of Components of Inquid Metal Cooled Plants", ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Division 3, ASME, New York (July 1983)
- 3) J. R. Fothergill and I. D. macleod, "Ultrasonic Inspection Systems for Sodium Cooled Reactors", UK Atomic Energy Authority, Risley, 1973, TRG Report (1981)
- 4) N. Lions et al, "Special Instrumentation of Phoenix", Fast Reactor Power Stations, Thomas Telford, London, England (1974) pp. 525-535
- 5) J. A. McKnight et al, "The Technology of Under-Sodium Inspection in LMFBRs with Particular Reference to Experimental Measurements of The PER core", ND-R-1197(R), UK Atomic Energy Authority (May 1985)
- 6) R. Hans et al, "Under-Sodium Viewing: A Method to Identify Objects in an Opaque Medium", Liquid Metal Engineering and Technology, BNES, Londo, No. 1(1984), pp. 419-422
- 7) R. Watkins et al, "An Ultrasonic Waveguide for Nuclear Power Plant", IAEA-SM-265/23, (oct. 1982)
- 8) I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York (1967), pp. 72

Study on the Feasibility of High-Temperature Immersion Ultrasonic Sensor with a Strip Waveguide

M. S. Choi, J. P. Lee and T. E. Jung

NDT Division, Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract Exertion has been made to develop high-temperature (about 250~650°C) immersion ultrasonic sensor for the visualization of objects, temperature measurement, dimensional check, or nondestructive testing of welds under liquid sodium. In this study, the feasibility of the ultrasonic sensor taking advantage of a strip waveguide was confirmed by water-experiment. The lowest order of antisymmetric Lamb wave was used in the frequency range with negligible dispersion. This plate wave was excited in the stainless steel strip waveguide of 1.0mm thickness and 13mm width by the comb-structure transducer of 2.3MHz frequency. Its attenuation coefficient was 1.2dB/m in air and 380dB/m in water. The signal to noise ratio of 25dB was obtained from a planar reflector 270mm away from the beam aperture of 13mm×39mm size.

(Received : May 9, 1994)