

웨이브가이드 초음파센서의 누설판파
빔방사 특성 분석

Analysis of Radiation Beam of a Leaky Lamb
Wave in Ultrasonic Waveguide Sensor

KAERI



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 "기계핵심기반기술개발 과제"의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 웨이브가이드 초음파센서의 누설관파 빔 방사 특성 분석

2010. 2.

KAERI

주 저 자 : 주 영 상

공 저 자 : 배 진 호

박 창 규

이 재 한

요약문

판형 웨이브가이드 초음파센서에서의 A_0 모드 누설 판파의 전파 특성과 수중 방사 특성에 대한 이론적 연구와 실험적 연구를 수행하였다. A_0 모드 누설 판파는 단일 모드만 발생 가능하여 신호 간섭이 발생하지 않고 10 m 이상의 장거리 전파가 가능하며 유체로 에너지가 방출되는 방사효율이 매우 좋은 특성을 가진다. 판형 웨이브가이드 초음파센서는 판 웨이브가이드와 액체 웨지 또는 테플론 웨지 그리고 초음파 탐촉자 및 음향 차폐 보호관으로 구성된다. 본 연구에서는 길이 10 m이고 두께가 1 mm와 1.5 mm인 얇고 긴 스테인리스 판에서 전파하는 A_0 모드의 전파 특성을 분석하였으며 A_0 모드 판파의 분산성이 적은 주파수 영역에서 고풍력 사각 펄스의 입사주파수 튜닝을 통하여, 기계적 구동 없이 누설 초음파의 방사빔의 방출 각을 조정할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 웨이브가이드 초음파센서의 방사빔 특성은 판의 두께, 방사면의 길이, 펄스 사이클의 수, 및 가진 주파수의 변화 등에 영향을 받는다. 이러한 특성을 분석 평가하여 웨이브가이드 초음파센서의 설계 변수들을 최적화하였다. 또한 최적조건을 적용한 웨이브가이드 초음파센서의 성능 검증을 위해 수중 C-scan 가시화 실험을 수행하여 웨이브가이드 초음파센서의 가시화 성능을 검증 확인하였다.

KAERI

Abstract

The theoretical and experimental study of the propagation and radiation of an A_0 leaky Lamb wave in a plate waveguide sensor has been carried out. In the plate waveguide sensor, the A_0 leaky Lamb wave is utilized for the single mode generation and the effective radiation capability in a fluid. The plate waveguide sensor which consists of a plate waveguide, a teflon wedge and an ultrasonic sensor has been designed and manufactured. The tone-burst excitation of high power long pulse should be applied to minimize the dispersion effect in spers long distance propagation of the A_0 Lamb waveng novel technique which is capable of steering a radiation beam of a waveguide sensor without a mechanical movement can be achieved by a frequency tuning method of the excitation pulse in the dispersive low frequency range of the A_0 Lamb waveng The characteristics of radiation beam of ultrasonic waveguide sensors has been investigated by the beam profile measurements according to the plate thickness, the radiation aperture length, the pulse cycles and the excitation frequency. The design parameters of the plate waveguide sensor has been optimized. The C-scanning experiments in water have been carried out for the performance of the optimized ultrasonic waveguide sensor. The possibility of C-scan visualization using the plate waveguide sensor has been verified.

목 차

I. 서 론	1
II. 웨이브가이드 초음파 센서에서의 판파 전파 이론 및 해석	3
1. 초음파의 발생과 전파	3
2. 판파 전파 이론	9
3. 판파의 분산곡선 수치해석	14
4. 누설 판파의 분산곡선	18
III. 웨이브가이드 초음파 센서의 누설 방사빔 특성	21
1. 누설 판파의 방사빔 방출	21
2. 누설 방사빔의 음장 및 방사각 특성	22
3. 웨이브가이드 초음파센서의 빔 방사각 변환 방법	26
IV. 실험 및 결과	29
1. 실험장치의 구성	29
2. 빔 프로파일의 측정	32
3. Tone-burst pulse 사이클 수에 따른 빔 프로파일	34
4. 방사면적 변화에 따른 빔 프로파일	41
5. 주파수에 변화에 따른 빔 프로파일	45
6. 웨이브가이드센서를 이용한 C-Scan 실험	48
VI. 결 론	51
참고문헌	52

표 목차

표 1. 물과 소듐에서의 A_0 모드의 방사각 변환 범위	28
표 2. SS304 판 웨이브가이드센서의 제원	31
표 3. 사이드 빔의 갯수 (계산 및 측정)	44

그림 목차

그림 1. 웨이브가이드 초음파센서를 이용한 원자로 내부손상검사 적용 개념도 및 웨이브가이드 초음파센서 설계 제작도	2
그림 2. 근거리 음장과 원거리 음장	5
그림 3. 초음파 탐촉자의 빔 퍼짐	6
그림 4. 수침용 초음파 탐촉자의 근거리 음장과 원거리 음장	6
그림 5. 모드 변환	8
그림 6. SS304 판의 분산곡선	17
그림 7. 수중에서의 SS304 판의 분산곡선	19
그림 8. 웨이브가이드 센서에서의 누설판과 전파 및 수중에서 모드변환에 의한 빔 방사	21
그림 9. 원거리 P 점에서의 초음파 빔 방사 (median plane)	23
그림 10. A_0 모드 위상속도의 분산 영역과 비분산 영역	26
그림 11. A_0 모드의 위상속도(C_p)와 군속도(C_g)분산곡선 및 물과 소듐에서의 방사각 변환 주파수대역	27
그림 12. 물과 소듐에서의 A_0 모드의 방사각 변환 범위	28
그림 13. 초음파 시스템의 block diagram과 사진	30
그림 14. 판 웨이브가이드 센서의 방사면에 대한 median plane과 lateral plane	31
그림 15. 빔 프로파일 측정	32
그림 16. 웨이브가이드 센서에서 전파하는 A_0 판과로부터 방출하는 빔 프로파일	33
그림 17. 전파 거리에 따른 분산 특성 평가 시험	35

그림 18. 2 cycles 톤 버스트 펄스 가진시 전파거리 (a) 1 m, (b) 3 m, (c) 5 m, (d) 10 m에서의 RF 수신신호	36
그림 19. 그림 18에서의 RF 수신신호의 STFT 결과	36
그림 20. 12 cycles 톤 버스트 펄스 가진시 전파거리 (a) 1 m, (b) 3 m, (c) 5 m, (d) 10 m에서의 RF 수신신호	37
그림 21. 그림 20에서의 RF 수신신호의 STFT 결과	37
그림 22. 두께 1.0 mm 웨이브가이드 센서에서의 펄스 cycles 수 변화에 따른 빔 프로파일	39
그림 23. 두께 1.5 mm 웨이브가이드 센서에서의 펄스 cycles 수 변화에 따른 빔 프로파일	40
그림 24. 두께 1.0 mm 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이 변화에 따른 빔 프로파일	42
그림 25. 두께 1.5 mm 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이 변화에 따른 빔 프로파일	43
그림 26. 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이와 파장	44
그림 27. SS304 판에서의 A0 모드 위상속도 분산곡선과 가진 주파수	45
그림 28. 가진 주파수 변화에 따른 빔 프로파일 측정	46
그림 29. 두께 1.0 mm 와 1.5 mm 인 웨이브가이드 센서의 가진 주파수 변화에 따른 빔 프로파일 측정	47
그림 30. C-스캔 시험편과 가시화 영상	49
그림 31. 웨이브가이드 센서와 시험편과의 거리가 10 mm인 경우 두께 1.0 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 C-스캔 시험 비교결과	50
그림 32. 웨이브가이드 센서와 시험편과의 거리가 50 mm인 경우 두께 1.0 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 C-스캔 시험 비교결과	50

I. 서론

소듐냉각 고속로(Sodium-cooled Fast Reactor ; SFR)의 냉각제로 사용되는 소듐은 금속이기 때문에 빛이 투과되지 않아 광학적인 방법의 육안검사를 수행할 수가 없다. 불투명한 액체금속인 소듐 내부를 가시화하기 위해서는 역학적 파동을 발생시키는 초음파만이 소듐 내부를 투시할 수 있는 유일한 방법이다. 이러한 소듐의 불투명성 문제를 극복하기 위하여 소듐냉각 고속로 개발 초기부터 소듐내부 가시화(Under-Sodium Viewing: USV) 초음파센서 개발 및 가시화 기법 개발에 대한 연구를 수행하여 왔다[1]. 소듐내부 가시화 기술은 소듐냉각 고속로의 핵연료 교환공정에서 핵연료 어셈블리 위치 확인, 핵연료 이송경로상의 장애물 존재여부 탐지, 노심변형 관찰 그리고 원자로 내부구조물의 가동중검사 등에 적용되며, 소듐냉각 고속로의 안전성 확보를 위하여 필수적으로 개발되어야 할 핵심 요소기술이다. 소듐내부 가시화를 위한 초음파검사에 사용되는 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 봉형(rod-type) 웨이브가이드 센서 방식이다[2-4]. 소듐내부 가시화 검사를 위한 많은 연구에도 불구하고 소듐냉각 고속로에의 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, 봉형 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.

최근에 소듐냉각 고속로의 고온 고방사능 소듐 환경에서 사용 수명에 제약 없이 원자로 노심과 내부구조물의 손상을 검사할 수 있는 새로운 판형 (plate-type) 웨이브가이드 초음파센서를 개발하였다[5]. 그림 1은 판형 웨이브가이드 초음파센서를 적용하여 소듐냉각 고속로인 KALIMER-600 원자로 내부구조물의 소듐내부가시화를 수행하는 개념도와 웨이브가이드 초음파센서 설계 제작도를 보여준다. 새로 개발된 판형 웨이브가이드 초음파센서는 상용 초음파센서를 원자로 외부에 설치하고 판(plate) 형상의 웨이브가이드를 이용하여 고온 고방사능의 소듐 환경에 반영구적으로 적용할 수 있다. 판 웨이브가이드 초음파센서는 초음파 센서를 원자로 외부에 두고 얇고 긴 스테인리스 강 판을 따라 전파하고 인접 액체 소듐으로 전파하는 누설 판파를 이용하여 소듐 내부 가시화검사를 수행하는 초음파센서로서 10 m 길이

의 웨이브가이드 센서를 설계 제작하고 수중 실증 시험을 통하여 그 적용가능성을 검증하였다[5]. 본 연구는 웨이브가이드 초음파센서에서 전파하는 누설관파의 전파 특성과 인접 액체로 모드 변환되어 빠져나가는 누설 종파의 방사 특성을 이해하기 위한 기본 연구로서 웨이브가이드 초음파센서의 스테인리스 강 관을 따라 전파하는 관파의 이론적 연구와 함께 실험적 연구를 수행하여 웨이브가이드 센서의 방사빔 성능 개선을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

본 보고서에서는 먼저 관파의 파동 전파 이론식을 유도 정리하고 관파와 누설 관파의 분산 특성의 수치해석 결과를 분석하며, 누설종파의 빔 방사각 변환 방법 신기술을 소개하고 관파의 장거리 전파에 따른 분산 특성을 평가한다. 웨이브가이드 초음파센서의 누설 관파 빔 방출 특성에 대한 이론적 연구를 수행하고 방사빔 측정 시험 장치를 구성하여 웨이브가이드 센서의 방사빔 특성 평가 실험을 수행한다. 누설 방사빔에 대한 음장 및 방사각 특성을 분석하여 웨이브가이드 초음파센서의 최적 특성을 평가한다.

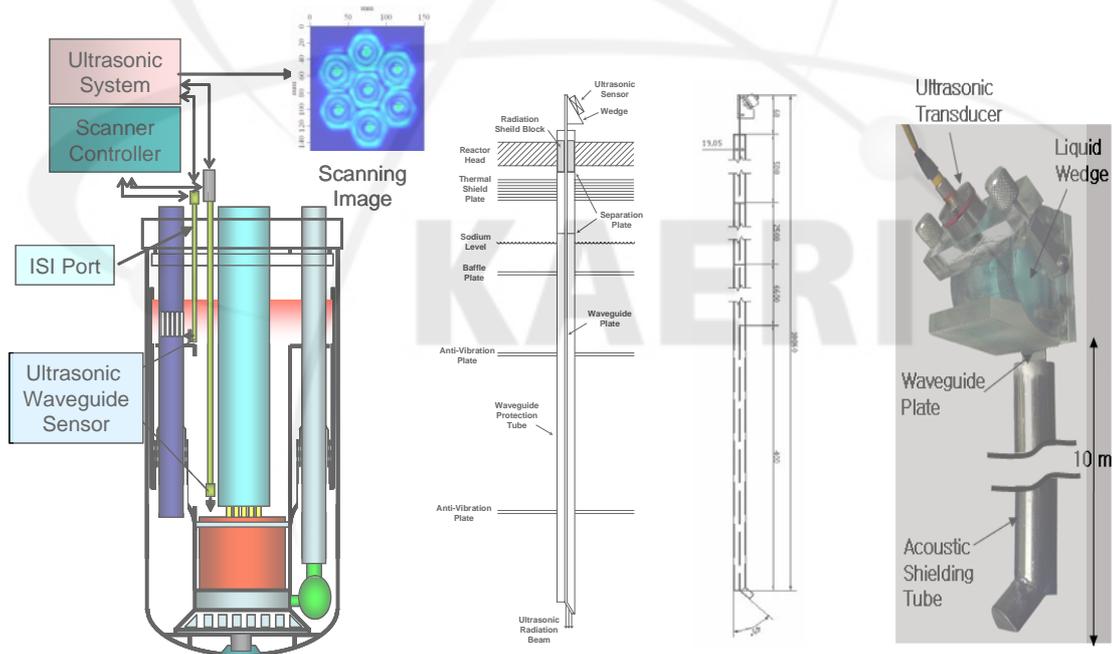


그림 1. 웨이브가이드 초음파센서를 이용한 원자로 내부손상검사 적용 개념도 및 웨이브가이드 초음파센서 설계 제작도

II. 웨이브가이드 초음파센서에서의 판파 전파 이론 및 해석

1. 초음파의 발생과 전파

초음파는 사람의 귀로 들을 수 있는 가청음(20 Hz ~ 20 kHz) 이상의 음파 또는 탄성파로 정의된다. 초음파의 모드는 종파(longitudinal wave), 횡파(shear or transverse wave), 표면파(surface or Rayleigh wave), 판파(plate or Lamb wave)로 분류된다. 무한 매질 내에서는 종파와 횡파가 존재한다. 종파는 파를 전달하는 입자의 진동방향이 파의 진행 방향과 평행한 파동이다. 횡파는 입자가 파의 진행 방향에 대해 수직으로 진동한다. 횡파는 동일한 재질에 대해 종파 속도의 약 1/2 정도로 진행한다. 횡파의 속도가 작기 때문에 일정 주파수에서 종파에 비해 짧은 파장을 갖게 된다. 파장이 짧아지면, 작은 반사체에 대해 더 민감하고 재질 내에서 보다 쉽게 산란된다. 횡파는 직접 탐촉자에서 발생 시킬 수도 있으나 대부분 탐촉자에 플라스틱 웨지를 부착하여 발생시킨다. 경계를 갖는 매질에서는 표면파와 판파가 존재한다. 표면파(Rayleigh wave)는 재료의 표면을 따라 타원 궤적의 입자진동을 가지며 전파하는 파동으로 횡파속도의 0.9 배 정도의 전파속도를 갖는다. 에너지가 표면에 집중되어 있어 표면결함 탐지 등에 적용된다. 판파(Lamb wave)는 판의 두께가 파장보다 작은 경우 복잡한 진동모드로 판을 따라 전파하는 파동으로 파의 전파속도는 주파수와 판 두께에 따라 변화한다.

판파는 20세기 초에 영국의 H. Lamb 에 의해서 단일 평판 내에 자유 표면 조건(traction free boundary condition)에서 판파 특성방정식을 이론적으로 유도하여 그 존재가 알려졌으며, Lamb파 또는 판파(plate wave)라고 불려진다[6, 7]. 1920년대 초에 미국의 Worton 등은 판파가 물리적으로 존재함을 입증하였고 이후 1950년대 이후 Gazis 등에 의해서 tube형 구조물에 대한 기본적인 판파의 전파 해석을 수행하여 확장된 해를 구한 바 있다[8]. 판파가 판, 튜브 및 배관 등의 구조물에서 전파할 때 이들 구조물의 기하학적 형상의 축 방향을 따라 유도되어 전파하므로 유도초음파(guided wave)라고 명명하고 1980년대에 활발한 연구가 진행되었다[9, 10]. 최근에는 비균질 다층 구조물 및 이방성 구조물과 같이 보다 복잡한 적층 구조물(layered structure) 내의 판파에 대한 문제까지 활발한 연구가 진행되고 있다[11]. 현재 유도초음파의 적용 연구 분야는 석유화학 배관 설비와 교량 구조물 및 철도 레일 검사 등의 대형 설비 진단 분야 및 항공기 구조물의 구조건전성 감시 진단 분야 등에 다양하게 응용되고 있고 일부 기술은 상용화된 단계에 있다[12-15]. 판파

또는 유도초음파가 전파하는 판 또는 튜브 등의 구조물이 액체와 접하게 되면 모드 변환(mode conversion)에 의하여 종파모드로 변환되어 구조물을 따라 초음파의 에너지가 인접 유체로 빠져나가게 되는데 이때의 판파를 누설판파(Leaky Lamb wave)라고 하고 이에 관한 이론 및 실험 연구가 많이 진행되었다[16].

1) 초음파 센서

초음파는 수정, 티탄산바륨, 지르콘티탄산납 등과 같은 압전 물질의 압전효과에 의해 발생된다. 압전효과(Piezo-electric effect)는 압전 물질에 전압을 가하면 변형이 발생하고 변형을 가하면 전하가 발생하는 효과로서 기계적 에너지와 전기적 에너지가 서로 변환되는 물리 현상이다. 이러한 압전현상은 압전 결정체에 압력이 가해지면 결정격자의 하전입자 자리가 이동하여 분극화함으로써 발생된다. 압전재의 공진에 의한 수축팽창으로 교류전압이 발생한다. 압전 물질은 수정(Quartz, SiO_2), 황산 리튬(Lithium Sulfate, Li_2SO_4), 지르콘 티탄산납(Lead Zirconate Titanate : PZT, $\text{PbZrO}_3+\text{PbTiO}_3$), 티탄산 바륨(Barium Titanate, BaTiO_3) 및 니오비움산 납(Lead Matanibate, PbNb_2O_6) 등이 있다. 보통 압전재는 온도가 올라가면 압전효과가 사라지는 특성이 있는데 압전효과가 없어지는 온도를 curie point라고 하며 보통 350도 정도이다. 실제로 고온에서는 압전재의 고온 저항성능 뿐만 아니라 센서 임피던스 매칭재 및 접합재의 고온 성능이 좋아야 하지만 고온에서 장시간 연속적으로 사용할 수 있는 초음파센서 제작기술은 아직까지 상용화되어 있지 않다.

초음파 펄스 발생에는 spike 펄스, tone-burst 펄스 및 chirp 펄스가 사용된다. Spike 펄스법은 압전재에 수백볼트의 spike 펄스를 걸어주어 압전재 자유 진동을 유발시켜 초음파를 발생시키는 방법이다. 이 방법은 초음파 발생이 용이하여 상용 초음파 장비에서는 일반적으로 사용된다. 초음파 탐촉자의 충진재에 따라 초음파 신호의 주파수 대역이 협대역 또는 광대역이 된다. Tone-burst 펄스는 유한한 폭을 갖는 sine파 펄스를 가진하는 방식으로 전자적으로 초음파 발진이 어려운 편이지만 압전재를 강제 진동시켜 원하는 가진주파수를 발생시킬 수 있다. 이 방법은 초음파 에너지를 크게 발생 시킬 수 있고 주파수 밴드 폭을 좁게 할 수 있다. chirp 펄스는 tone-burst 펄스의 펄스 폭이 가변된 펄스로서 tone-burst에 의한 주파수 밴드폭을 보다 크게 발진시킬 수 있다.

2) 초음파 음장의 특성

초음파 탐촉자의 진동면은 단일면으로서 같은 위상으로 균일하게 진동하는 것이

아니라 진동면의 각 점은 구형파를 발생시키는 점원(point source)으로 작용한다. 이러한 구형파는 인접 점원의 구형파와 간섭을 일으켜 평면파를 형성하는데, 그림 2에서와 같이 파의 간섭현상으로 인해 진동면으로부터 일정거리 내에서는 거리에 따라 초음파 음압의 강도가 불규칙하게 변화하는 영역을 발생시킨다. 음압이 불규칙하게 변화하는 영역의 거리를 근거리 음장(near field 또는 Fresnel zone)이라 하며 실제로 초음파 검사 시 근거리 음장 내에서는 불규칙한 음압 분포로 인해 정확한 검사가 이루어 질 수 없기 때문에 다음의 식 (2.1)으로 표현되는 근거리음장의 거리는 매우 중요하게 고려되어야 한다.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V} \quad (2.1)$$

여기서 D 는 초음파 탐촉자의 직경이고, λ 는 파장, f 는 공진주파수, V 는 매질내의 음파속도이다.

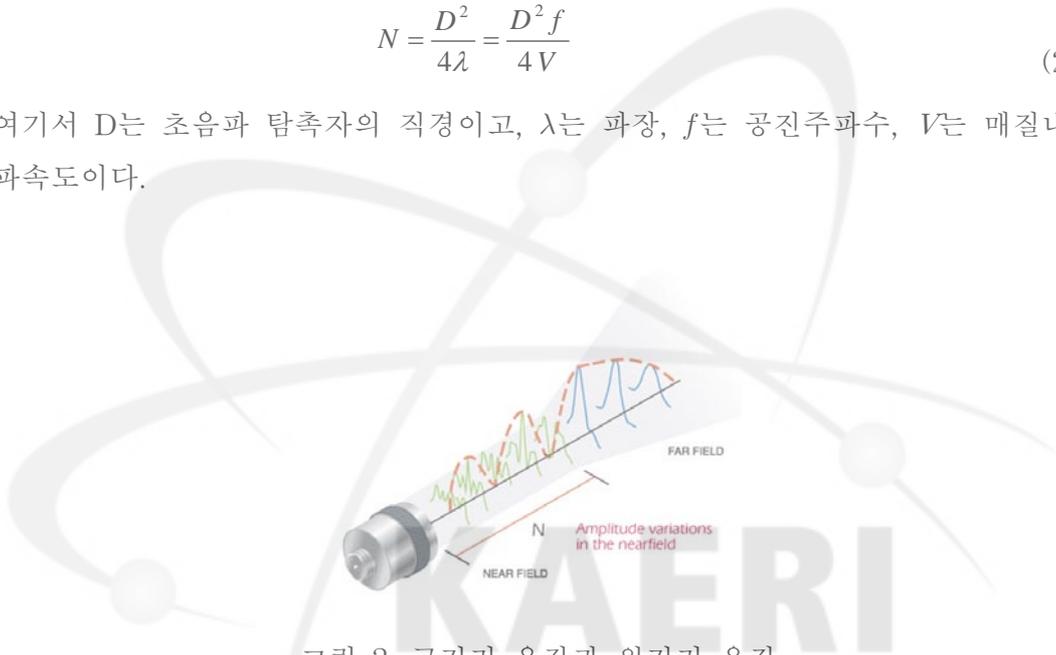


그림 2. 근거리 음장과 원거리 음장

근거리 음장을 벗어난 영역을 원거리 음장(far field 또는 Fraunhofer zone)이라 하며 더 이상의 파의 간섭효과는 나타나지 않고 진동면으로 거리가 멀어질수록 음압은 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다. 원거리 음장에서 초음파의 음압강도가 감소하는 것은 초음파 빔의 퍼짐(beam spread) 현상과 감쇠(attenuation) 때문이다.

그림 3과 4는 초음파 빔의 퍼짐과 근거리 및 원거리 음장의 현상을 보여준다. 초음파 빔의 퍼짐은 탐촉자 직경과 주파수에 따라 달라지는데 빔의 퍼짐각은 일반적으로 빔 중심의 최대 음압강도로부터 음압강도가 -3dB 이 되는 부분을 빔의 가장자리로 정한다. 원형탐촉자인 경우 빔의 퍼짐각(α)은 다음과 같다.

$$\sin \alpha \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \frac{V}{Df} \quad (2.2)$$

탐촉자 직경이 크고 높은 주파수를 사용하면 퍼짐각은 작아진다. 반면에 근거리 음장은 길어진다.

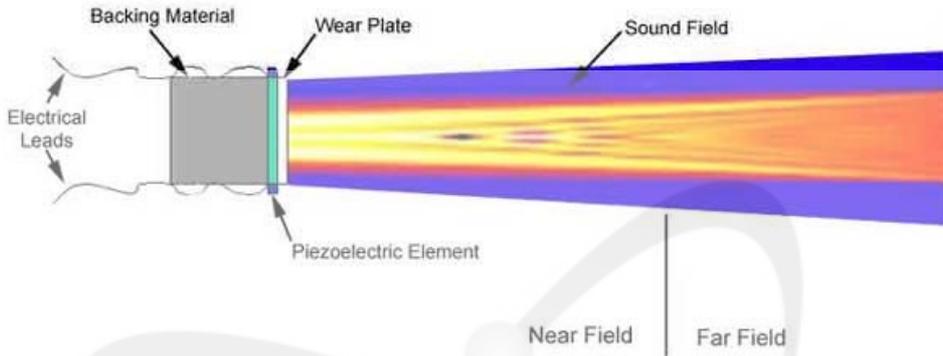


그림 3. 초음파 탐촉자의 빔 퍼짐

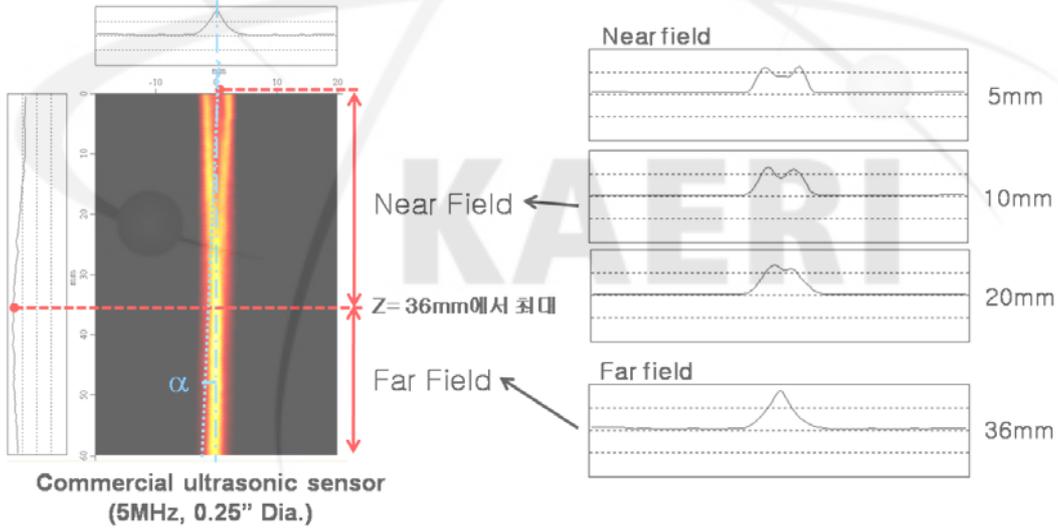


그림 4. 수침용 초음파 탐촉자의 근거리 음장과 원거리 음장

초음파가 매질을 통해 전파되면 진행에 따른 감쇠가 발생한다. 초음파 감쇠는 산란과 흡수, 경계면에서의 음향 임피던스 차이에 의한 영향 등으로 발생한다. 초음파 감쇠는 다음 식으로 나타내어진다.

$$P = P_0 e^{-\alpha x} \quad (2.3)$$

여기서 P_0 는 초기음압, P 는 거리 x 에서의 음압, α 는 감쇠계수이다.

감쇠계수는 재질과 주파수에 따라 달라지며 주파수가 높으면 감쇠계수가 커진다. 시험체가 클 경우 감쇠를 고려하여 낮은 주파수를 사용하는 것이 유리하다. 매질이 불균질하거나 유체내의 불순물 또는 기포 등이 있는 경우 각 입자들의 음향 임피던스 차이로 인해 산란이 발생한다. 흡수는 음파가 매질 내를 진행하면서 진동에너지가 열에너지로 변환되어 발생한다. 시험체의 표면상태 및 거칠기에 의해 초음파에 너지의 손실이 발생하기도 한다.

3) 초음파의 진행 특성

초음파가 매질의 경계면을 통과하여 진행 할 때 두 재질의 음향 임피던스($Z = \rho c$) 차이 및 파의 종류별 특성에 의해 다양한 진행 특성을 나타낸다.

초음파가 경계면에 수직으로 입사할 때 경계면에서 반사와 투과가 발생하고 반사 음압과 투과 음압은 음향 임피던스에 따라 달라진다. 반사계수(R)와 투과계수(T)는 다음 식으로 나타내어진다.

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.4, 2.5)$$

초음파가 경계면에 사각으로 입사할 때에는 수직입사와는 달리 복잡한 진행 특성을 나타낸다. 투과파는 입사방향에 대하여 그 방향을 바꾸어 굴절이 되는 현상이 발생하고 입사각에 따라 파의 형태가 바뀌는 파형변환(mode conversion) 현상이 발생한다. 그림 5에서와 같이 매질 I에 종파가 입사하면 매질 II에서는 굴절 종파뿐만 아니라 굴절 횡파 또는 굴절 표면파가 발생할 수 있다. 반사파의 경우 파형 변환으로 입사각과 다른 각도로 반사되는 파형이 발생하기도 한다. 초음파가 두 매질의 경계면을 입사할 때 입사각에 따른 굴절각과 반사각은 Snell's Law에 의하여 다음 식으로부터 구해진다[17].

$$\frac{\sin \alpha}{V_1} = \frac{\sin \beta}{V_2} \quad (2.6)$$

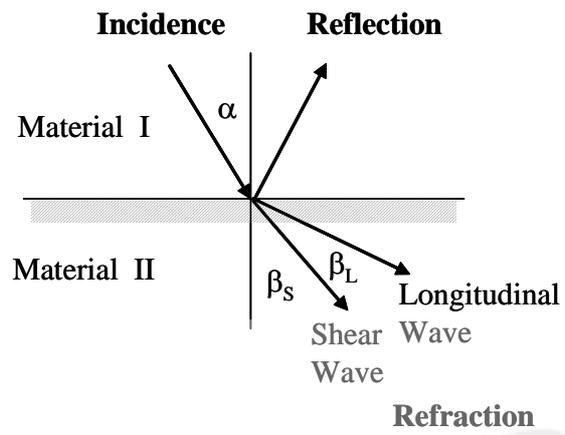


그림 5. 모드 변환

KAERI

2. 판파 전파 이론

Lamb 파의 전파에 대한 해를 구하는 데는 흔히 두 가지 방법이 있는 데 하나는 포텐셜 이론을 사용하는 것이고 다른 하나는 중첩 이론을 사용하는 것이다. 여기서는 보다 전통적인 포텐셜 이론을 적용하여 유도한다[17]. 등방성 탄성체의 운동을 지배하는 방정식은 운동방정식(stress equation of motion), 변형률-변위 방정식(strain-displacement equation), 구성방정식(constitutive equation)으로 구성된다.

운동방정식은

$$\tau_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.7)$$

이고, 변형률-변위의 방정식은

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.8)$$

또는

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2.9)$$

이며, 구성방정식은

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \\ &= \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

이다.

여기서 ρ 는 매질의 밀도이며, f_i 는 외부에서 작용하는 체적력, δ_{ij} 는 Dirac delta function이다. strain tensor를 u_{ij} 라 할 때 변형된 등방체의 자유 에너지는

$$F = f_0 + \frac{1}{2} \lambda u_{ii}^2 + \mu u_{ik}^2 \quad (2.11)$$

인데 2번째 항은 strain tensor가 diagonal성분으로 체적의 변화와 관련된 항이며 이것이 0이면 체적이 변화하지 않고 형상만 변화한 것이므로 이를 pure shear라 칭하고 3번째 항은 그 밖의 다른 모든 성분이며 각각의 앞에 계수를 붙여서 λ 와 μ 는 Lamé elastic constant라 부른다.

식 (2.10)를 j 로 미분하면

$$\begin{aligned}
\tau_{ij,j} &= \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} (\epsilon_{kk}) \delta_{ij} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\
&= \lambda \frac{\partial}{\partial x_i} \epsilon_{kk} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} \right) \\
&= \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u
\end{aligned} \tag{2.12}$$

(2.12)식을 운동방정식 (2.7)에 대입하면 (body force 무시) 다음과 같이 Navier-Stokes 방정식이 유도 된다.

$$\rho \ddot{u}_i = \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u$$

$$\text{또는} \quad \mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \tag{2.13}$$

(2.13)식을 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\rho \ddot{u}_1 &= \mu \nabla^2 u_1 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
\rho \ddot{u}_2 &= \mu \nabla^2 u_2 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
\rho \ddot{u}_3 &= \mu \nabla^2 u_3 + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Navier-Stokes 방정식 (2.13)의 해를 구하기 위해서 다음 식과 같은 scalar potential Φ 와 vector potential Ψ 를 도입한다.

$$u = \nabla \Phi(x_1, x_2, x_3, t) + \nabla \times \Psi(x_1, x_2, x_3, t) \tag{2.15}$$

식 (2.15)를 식 (2.13)에 대입하면

$$\mu \nabla^2 (\nabla \Phi + \nabla \times \Psi) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot (\nabla \Phi + \nabla \times \Psi) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla \Phi + \nabla \times \Psi) \tag{2.16}$$

이 되고, 이를 정리하면

$$\nabla [(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi] + \nabla [\mu \nabla^2 \Psi - \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}] = 0 \tag{2.17}$$

이 된다.

식 (2.17)의 방정식에서 $\Psi=0$ 이면 종파의 성분이 남게 되고 $\Phi=0$ 이면 횡파의 성분이 남는다. 즉, Navier-Stokes 방정식은 물리적으로 동일 재질 내를 전파하는 종파와 횡파를 동시에 표현하고 있다. Navier-Stokes 방정식을 종파와 횡파의 지배방정식으로 나누어 표현하면 아래와 같다.

종파의 지배방정식은

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

이 되고, 횡파의 지배방정식은

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

이 된다.

여기서 C_L 은 종파 속도이고, C_T 는 횡파 속도로서 각각 다음과 같다.

$$C_L = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \quad (2.20)$$

$$C_T = \sqrt{\mu/\rho} \quad (2.21)$$

판에서는 x_3 방향으로의 변형이 없어 $u_3 = \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + \left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial x_1} \frac{\partial \Psi_1}{\partial x_2} \right) = 0$ 이 되고, $\Psi_2 = \Psi_1 = 0$

이므로 $\Psi_3 = \Psi$ 를 사용한다. 즉, plain strain이므로 $\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} = 0$ 이 되어

$u = \nabla \Phi + (\nabla \times \Psi)$ 에서

변위는

$$u_1 = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \Psi}{\partial x_2} \quad (2.22)$$

$$u_2 = \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} + \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} \quad (2.23)$$

이 되고,

Stress는

$$\tau_{21} = \mu \left[\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right] \quad (2.24)$$

$$= \mu \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_2^2} \right]$$

$$= \mu \left[\frac{2\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_2^2} \right]$$

$$\tau_{22} = \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) \quad (2.25)$$

$$= \lambda \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1 \partial x_2} \right)$$

이 된다.

식 (2.18)와 (2.19)의 미분방정식을 만족하는 해는 다음 식으로 가정할 수 있다.

$$\Phi = \Phi(x_2) \exp\{i(kx_1 - \omega t)\} \quad (2.26)$$

$$\Psi = \Psi(x_2) \exp\{i(kx_1 - \omega t)\} \quad (2.27)$$

여기서, $\Phi(x_2)$ 와 $\Psi(x_2)$ 는 x_2 방향에 대한 미지의 함수이고, $\exp i(kx_1 - \omega t)$ 는 x_1 방향의 파의 전파를 나타내는 항이며 k 는 파수, ω 는 각주파수이다.

식 (2.26)에 종파의 지배방정식에 대입하면

$$-k^2\Phi(x_2) + \frac{d^2\Phi(x_2)}{dx_2^2} = \frac{\omega^2}{c_L^2}\Phi(x_2) \quad (2.28)$$

이 되고 이를 정리하면

$$\frac{d^2\Phi(x_2)}{dx_2^2} + \left(\frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2\right)\Phi(x_2) = 0 \quad (2.29)$$

이 되어 단순화하면

$$\frac{d^2\Phi(x_2)}{dx_2^2} + p^2\Phi(x_2) = 0 \quad (2.30)$$

이 된다. 여기서

$$p^2 = \left(\frac{\omega^2}{c_L^2}\right) - k^2 \quad (2.31)$$

이다.

Ψ 를 횡파의 지배방정식에 대입하여 유사하게 구할 수 있으며 p^2 대신에 q^2 을 적용한다.

$$q^2 = \left(\frac{\omega^2}{c_T^2}\right) - k^2 \quad (2.32)$$

이에 대한 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$\Phi = [A \sin(px_2) + B \cos(px_2)] e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (2.33)$$

$$\Psi = [C \sin(qx_2) + D \cos(qx_2)] e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (2.34)$$

여기서 포텐셜에 대한 식을 구했으므로 변형량과 응력도 Φ , Ψ 의항으로 표현할 수 있다.

$$u_1 = ik\Phi + \frac{d\Psi}{dx_2} \quad (2.35)$$

$$u_2 = \frac{d\Phi}{dx_2} - ik\Psi \quad (2.36)$$

$$\tau_{22} = \lambda(-k^2\Phi + \frac{d^2\Phi}{dx_2^2}) + 2\mu(\frac{d^2\Phi}{dx_2^2} - ik\frac{d\Psi}{dx_2}) \quad (2.37)$$

$$\tau_{21} = \mu(2ki\frac{d\Phi}{dx_2} + \frac{d^2\Phi}{dx_2^2} + k^2\Psi) \quad (2.38)$$

변수는 x_2 에 대해서 sine과 cosine항을 포함하고 있으므로 $x_2=0$ 되는 경우를 각각 홀수 함수와 짝수 함수로 구분할 수 있다.

x_1 방향으로 변형할 경우 u_1 이 cosine항을 포함하면, $x_2=0$ 에 대해서 대칭인 모드가 된다.

대칭 모드에 대한 관계는

$$\begin{aligned} \Phi &= B\cos(px_2) \\ \Psi &= C\sin(qx_2) \\ u_1 &= ikB\cos(px_2) + qC\cos(qx_2) \\ u_2 &= -pB\sin(px_2) - ikC\sin(qx_2) \\ \tau_{21} &= \mu[-2ikpB\sin(px_2) + (k^2 - q^2)C\sin(qx_2)] \\ \tau_{22} &= -\lambda(k^2 + p^2)B\cos(px_2) - 2\mu[p^2B\cos(px_2) + ikqC\cos(qx_2)] \end{aligned} \quad (2.39)$$

이 고, 반대칭 모드에 대한 관계는

$$\begin{aligned} \Phi &= A\cos(px_2) \\ \Psi &= D\sin(qx_2) \\ u_1 &= ikA\sin(px_2) - qD\sin(qx_2) \\ u_2 &= -pA\cos(px_2) - ikD\cos(qx_2) \\ \tau_{21} &= \mu[-2ikpA\cos(px_2) + (k^2 - q^2)D\cos(qx_2)] \\ \tau_{22} &= -\lambda(k^2 + p^2)A\sin(px_2) - 2\mu[p^2A\sin(px_2) - ikqD\sin(qx_2)] \end{aligned} \quad (2.40)$$

이다.

응력에 대한 표현을 구했으므로 이제 자유평판의 경계조건을 도입하면

$$\tau_{21} = \tau_{22} = 0 \quad (2.41)$$

대칭 모드의 표현에는 상수 B 와 C 가 들어있으므로 시스템은 homogeneous 하고 그 determinant는 0이 되어야 한다.

$$\frac{(k^2 - q^2)\sin(qh)}{2\mu ikp(\sin(ph))} = \frac{-2\mu ikq(\cos(qh))}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)\cos(ph)} \quad (2.42)$$

다시 쓰면

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 qp\mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)} \quad (2.43)$$

우항의 분모는 파수 p , q 와 파의 속도로 간단히 하여 정리하면 방정식의 최종 결과는 다음과 같다.

$$\text{대칭 모드 :} \quad \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (2.44)$$

$$\text{반대칭 모드 :} \quad \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (2.45)$$

식 (2.44)과 식 (2.45)는 19세기 말에 처음으로 유도한 사람의 이름을 따서 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식이라고 부른다[6, 7].

3. 판파의 분산곡선 수치해석

Rayleigh-Lamb 주파수 방정식으로부터 위상속도 분산선도(dispersion curves)를 구할 수 있다. 이 식을 풀어보면 같은 주파수에서도 서로 다른 여러 모드의 위상속도(phase velocity)를 가질 수 있으며 주파수를 연속적으로 변화시키면서 위 식을 풀면 위상속도 분산선도를 구할 수 있다. 즉, 파수 k 는 수치적으로 ω/C_p (C_p 는 판파의 위상속도이고 ω 는 각주파수임)와 같다. 위상속도는 $C_p = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)\lambda$ 이다.

Rayleigh-Lamb 주파수 방정식은 판파 모드의 주파수 ω 와 파수 k 를 연관 지어서 주파수 스펙트럼을 만들거나 위상속도 C_p 와 주파수 ω 를 연관 지어서 분산곡선을 만들 수 있다. 어떠한 주어진 주파수에도 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 만족하는 무한대 개수의 파수가 존재하며 무한대 개수의 복소수가 가능한 반면에 유한한 개수의 실수 또는 순수한 허수가 존재한다. 분산곡선을 그릴 때, 판의 진행 모드를 나타내는 방정식의 실제적인 해를 구한다.

이 방정식의 수치적인 해는 비교적 간단하며 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 주파수 X 두께 $(\omega d)_0$ 를 정한다.
- 2) 위상속도 $(C_p)_0$ 의 초기 추정치를 정한다.

- 3) 각 우향의 부호를 0이 아니라는 가정 하에 평가한다.
- 4) $(C_p)_1 > (C_p)_0$ 인 다른 위상 속도를 정하고 그 부호를 평가한다.
- 5) 부호가 바뀔 때까지 3), 4) 항을 계속한다. 함수는 연속이기 때문에 부호의 변화는 0을 통과해야 한다. 따라서 부호가 변화하는 구간에서 해 m 이 존재한다. 이러한 과정이 위상속도 $(C_p)_n$ 과 $(C_p)_{n+1}$ 간에 일어날 것을 가정한다.
- 6) 해를 구하는 반복 알고리즘(Newton-Raphson, Bisection 등)을 사용하여 위 식의 우향이 충분히 0에 근접하는 구간 $(C_p)_n < C_p < (C_p)_{n+1}$ 구간에서 정확한 위상속도를 구한다.
- 7) 해를 구한 뒤, 이 ωd 에서 다른 해를 과정 2) - 6) 에 따라 계속적으로 찾아낸다.
- 8) 다른 (ωd) 값에 대해서 과정 2) - 7)을 반복한다.

음향 에너지의 전파 속도인 군속도는 위상속도에 미분을 취하여 계산한다. 즉, 군속도 C_g 는 다음의 공식에 의해서 $C_p(=\omega/k)$ 로 부터 구한다.

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.46)$$

$k = \frac{\omega}{C_p}$ 를 대입하면

$$\begin{aligned} C_g &= \frac{d\omega}{d(\omega/C_p)} \\ &= \frac{d\omega}{\frac{d\omega}{C_p} - \omega \frac{dC_p}{C_p^2}} \\ &= \frac{C_p^2}{C_p - \omega \frac{dC_p}{d\omega}} \end{aligned} \quad (2.47)$$

이 식은 $\omega = 2\pi f$ 를 적용하면

$$C_g = \frac{C_p^2}{C_p - (fd) \frac{dC_p}{d(fd)}} \quad (2.48)$$

위식에서 fd 는 주파수와 두께의 곱으로 $C_g = C_p$ 일 때, $\frac{dC_p}{d(fd)} = 0$ 이며 $C_g \rightarrow 0$ 일

때, $\frac{dC_p}{d(fd)} \rightarrow \infty$ (즉, cut-off 주파수)가 된다.

균속도는 실제 검사 시에 시간 영역에서 유도초음파 모드 확인과 반사파로 거리를 측정함에 있어서 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구의 대상인 웨이브가이드 센서에서 사용하는 스테인리스 SS304 판에서의 판파의 분산곡선 계산에는 수치 계산의 정밀도와 신뢰성을 위하여 국제적으로 공인된 상용 프로그램인 DISPERSE를 이용하여 계산하였다[18]. 그림 6은 SS304 판에서의 대칭형 판파와 반대칭형 판파의 각 모드별 위상속도 분산선도와 균속도 분산선도를 보여준다.



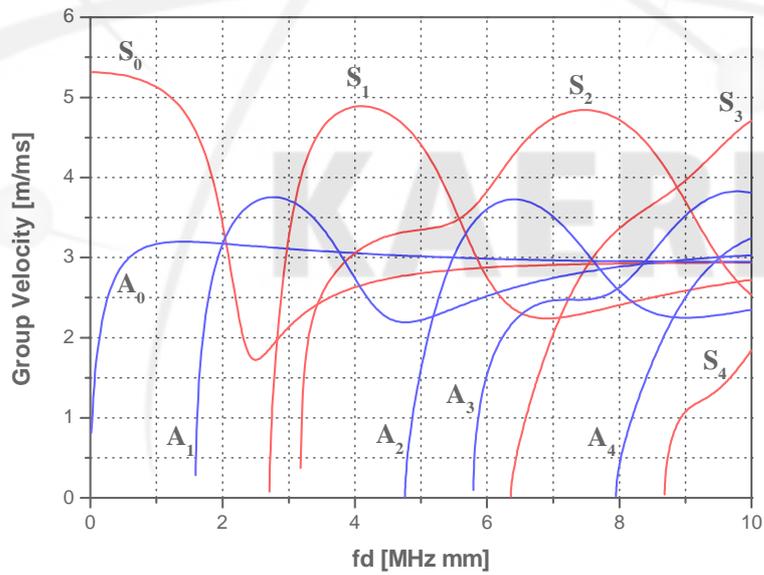
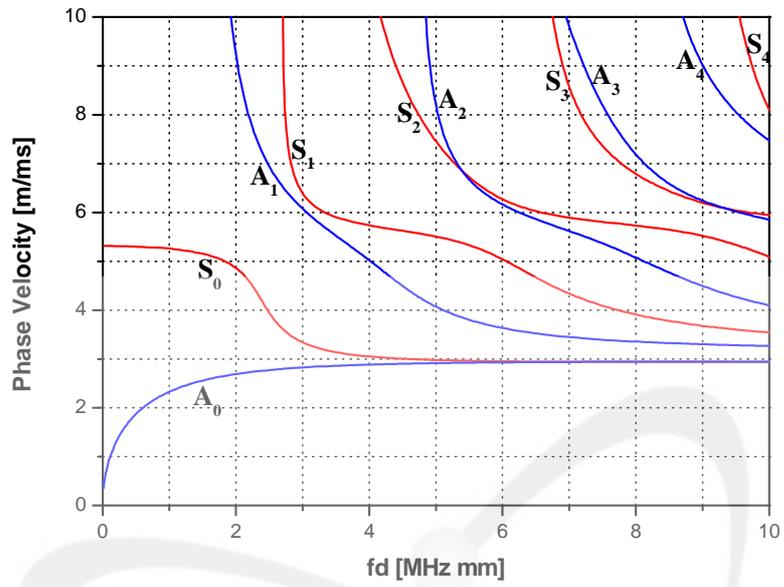


그림 6. SS304 판의 분산곡선

4. 누설 판파의 분산곡선

탄성체의 표면이 액체와 접하고 있으면 판에서의 위상 속도가 액체보다 큰 경우, 에너지는 액체 속으로 누설되며 이때의 판파를 누설판파(Leaky Lamb wave)라고 한다[17]. 파수 벡터 k 는 다음과 같이 복소수이다.

$$k = k_r + ik_i \quad (2.49)$$

변위는

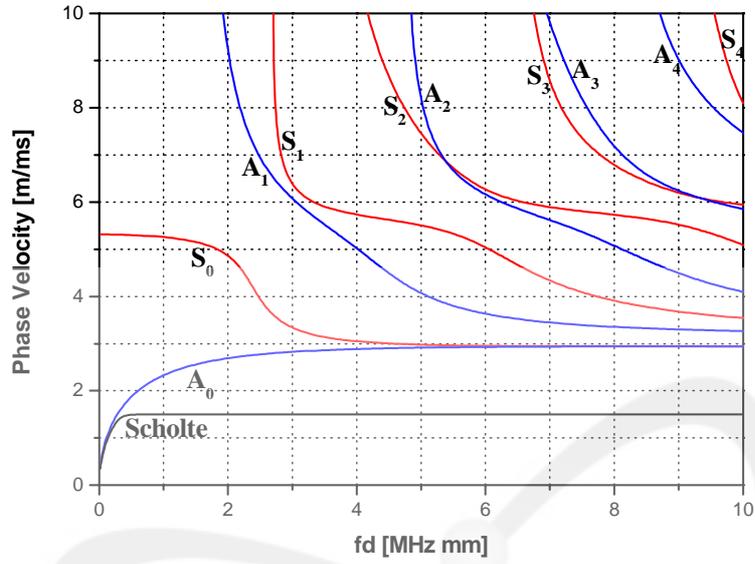
$$u = Ae^{i(k_r x - \omega t)} \quad (2.50)$$

이고, 복소수 파수를 대입하면

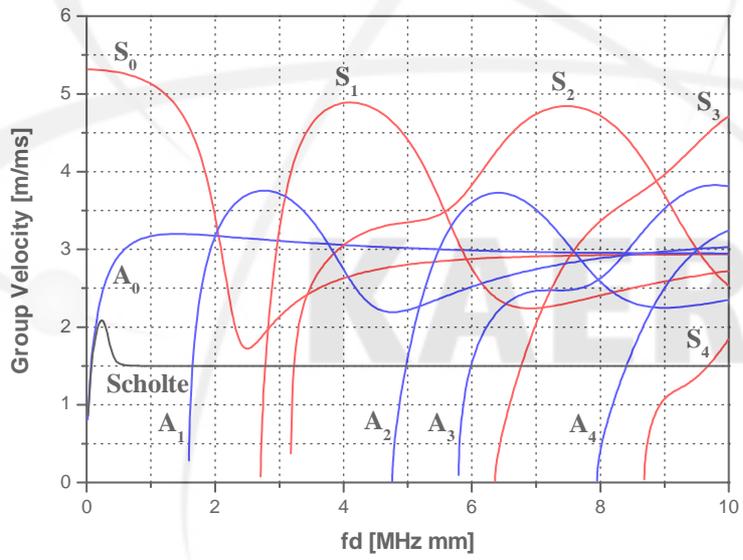
$$u = Ae^{i(k_r x - \omega t)} e^{-\alpha x} \quad (2.51)$$

와 같은 식이 되며 $e^{-\alpha x}$ 는 거리에 따라 감쇠하는 항이 된다.

물속에 있는 SS304 판의 경우 액체 내부로의 전파 에너지 누설로 감쇠분산 곡선을 구할 수 있다. DISPERSE 프로그램을 이용하여 물속에 있는 SS304 판의 위상 속도와 군속도 및 감쇠의 분산선도를 계산하여 그 결과를 그림 7에 나타 내었다. 계산 결과 물속에 있는 SS304 판에서의 판파의 위상속도와 군속도는 공기 중에 있는 경우와 비교하여 볼 때 거의 차이가 없이 나타났으며, 단지 판에 인접한 물속에서 물의 종파속도로 전파하는 Scholte wave가 나타난다. 그림 7(c)의 감쇠 분산곡선에서 보는 바와 같이 fd 가 2 이하인 저주파수 영역에서 판파의 여러 모드 중에 제0차 반대칭(A_0) 모드가 가장 감쇠가 많이 발생하는 것을 알 수 있는데 이는 A_0 모드의 입자변위가 판의 두께방향인 굽힘 모드로서 두께방향 입자변위 성분이 커서 판이 유체와 접촉할 경우 종파모드로 변환되는 효율이 좋기 때문이며 A_0 모드가 대표적인 누설판파로 활용될 수 있다.

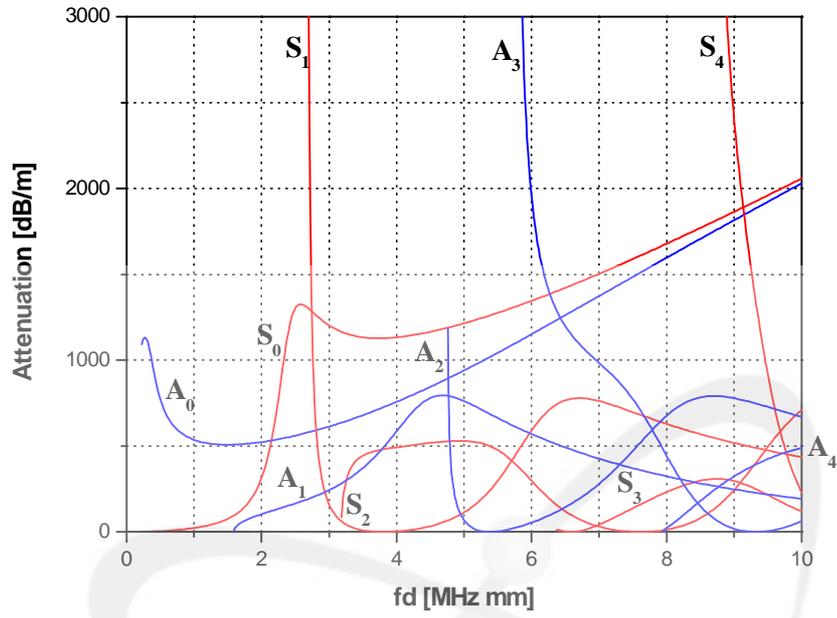


(a) Phase velocity



(b) Group velocity

그림 7. 수중에서의 SS304 판의 분산곡선



(c) Attenuation

그림 7. 수중에서의 SS304 판의 분산곡선 (continued)

KAERI

III. 웨이브가이드 초음파센서의 누설 방사빔 특성

1. 누설 판파의 방사빔 방출

웨이브가이드 초음파센서에서 사용되는 누설 판파는 판파의 여러 모드 중에서 제 0차 반대칭(A_0) 모드를 선택하여 사용한다. A_0 모드는 입자변위가 판의 두께방향인 굽힘모드로서 입자변위의 두께방향 수직성분이 커서 판이 유체와 접촉할 경우 종파 모드로 변환되는 효율이 좋은 누설 판파 모드이다. 그림 8은 웨이브가이드센서에서 전파되는 누설 판파(leaky Lamb wave)의 빔 방출 개념도를 보여준다. 초음파센서에서 초음파 신호가 판에 입사하여 판파로 변환되고 이 판파가 유도초음파로 웨이브가이드를 따라 전파하며 유체와 접한 웨이브가이드 끝단에서 누설 종파로 모드 변환되어 전파되는데, 이때의 종파 빔은 Snell의 법칙을 따라 식 (3.1)의 방사각으로 전파한다.

$$\sin\theta = \frac{V_L}{C_p} \quad (3.1)$$

여기서 V_L 은 액체내의 종파속도(물인 경우 상온에서 1480 m/s, 소듐인 경우 200℃에서 2450 m/s)이고 C_p 는 웨이브가이드에서 전파되는 판파의 위상속도이다. 액체내로 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[19].

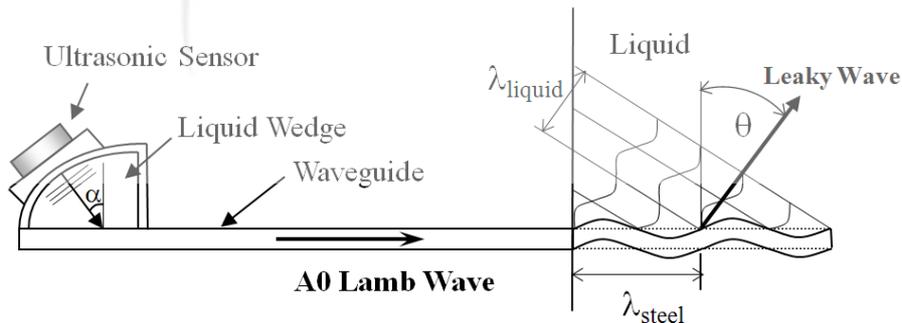


그림 8. 웨이브가이드 센서에서의 누설판파 전파 및 수중에서 모드변환에 의한 빔 방사

2. 누설 방사빔의 음장 및 방사각 특성

Deighton 등은 누설 표면파 및 판파 방사빔의 음장 및 방사 특성에 관한 기초적 이론 연구를 수행하였다[19]. 이전 연구의 이론식들은 누설 표면파에 기초로 하여 유도되었으며 판파의 주파수 의존 분산성으로 아직까지 그 이론적 연구결과가 완성되어 있지 못하다. 본 연구에서는 선행 연구 결과를 바탕으로 누설파의 방사 음장에 관한 이론식들을 유도 정리하였다.

고체 표면의 경계면을 따라 전파하는 표면파의 수직 변위를 다음 식과 같이 가정할 수 있다.

$$V_0 = \hat{V} \cos(k_b x - \omega t) \quad (3.2)$$

여기서 $k_b = \frac{\omega}{C_p}$ 이다.

그림 9에서와 같이 고체 경계면과 접하고 있는 유체에서 모드변환에 의해 누설 종파가 다음 식의 각도로 방출되며

$$\sin \theta_m = \frac{\lambda_L}{\lambda_b} = \frac{V_L}{c_p} \quad (3.3)$$

유체에서의 수평 및 수직 방향 변위는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \hat{V} \cos(k_b x + k_n y - \omega t) \quad (3.4)$$

$$U = \frac{k_L}{k_n} \hat{V} \cos(k_b x + k_n y - \omega t) \quad (3.5)$$

수직방향의 음압은

$$P = u Z_a = \frac{\hat{V} Z_a \omega}{\cos \theta_m} \sin(k_b x + k_n y - \omega t) \quad (3.6)$$

이고, 여기서 Z_a 는 유체의 acoustic impedance이다.

그리고 표면에서 액체로 빠져나가는 실직적인 에너지를 나타내는 \bar{P} 는 다음과 같다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \hat{u}_{y_0}^2 \frac{Z_a}{\cos \theta_m}, \quad [\bar{W}/m^2] \quad (3.7)$$

여기서 $\hat{u}_{y_0}^2$ 는 수직방향의 최고 속도이다.

방사 표면 근처에서의 방사빔의 음압분포는 유체 내부로의 에너지 손실로 인한

감쇠항을 고려하여 식 (3.8)과 같이 유도할 수 있다.

$$P_0 = \hat{P}e^{-\alpha x} \cos(k_b x - \omega t) \quad (3.8)$$

$$dp = \frac{Ab dx}{r} P_\omega(x, t - \frac{\overline{LP}}{V_L}), \quad (\overline{LP} \approx r)$$

$$t_0 + \frac{\overline{OM}}{V_L} = t_0 + \frac{x \sin \theta}{V_L}$$

여기서 A는 상수이고, b는 금속 판의 폭, $\frac{\overline{LP}}{C_L}$ 는 시간지연(time delay), \hat{P}_0 는 O 점에서의 진폭, α 는 감쇠계수이다.

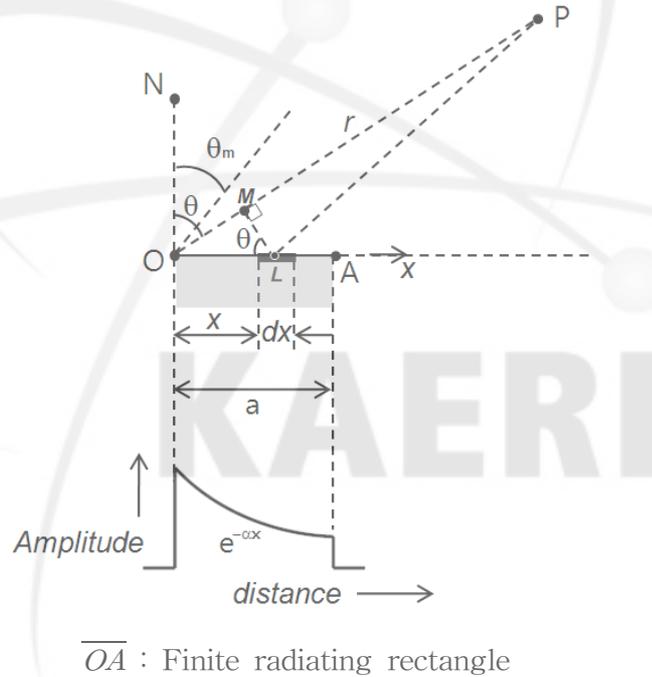


그림 9. 원거리 P 점에서의 초음파 빔 방사 (median plane)

점 P에서 작용하는 압력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(r, \theta, t) = \int_0^a dP = \int_0^a \frac{Ab}{r} P_0(x, t - \frac{\overline{LP}}{V_L}) dx \quad (3.9)$$

$$= \int_0^a \frac{Ab}{r} \hat{P}_0 e^{-\alpha x} \cos[k_b x - \omega(t - \frac{\overline{LP}}{V_L})] dx$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{Ab\hat{P}_0}{r} \int_0^a e^{-\alpha x} \cos \left[k_\theta x - \omega \left(t_0 + \frac{x \sin \theta}{V_L} \right) \right] dx \\
I(\theta, t_0) &= \int_0^a e^{-\alpha x} \cos(k_\theta x - \omega t_0) dx \quad (3.10) \\
&= \frac{1}{\alpha^2 + k_\theta^2} e^{-\alpha a} [k_\theta \sin(k_\theta a - \omega t_0) \\
&\quad - \alpha \cos(k_\theta a - \omega t_0) + k_\theta \sin \omega t_0 + \alpha \cos \omega t_0]
\end{aligned}$$

점 P 에서의 압력진폭 \hat{P} 제곱항은 식 (3.11)로 계산되는데, θ_m 에서는 k_θ 값이 0이 되므로 식 (3.11)은 식 (3.12)과 같이 정리가 된다.

$$\hat{P}^2 = \left(\frac{Ab\hat{P}_0}{r} \right)^2 \frac{1 - 2\cos(k_\theta a) e^{-\alpha a} + e^{-2\alpha a}}{\alpha^2 + k_\theta^2} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned}
\hat{P}_{\max}^2 &= \left(\frac{Ab\hat{P}_0}{r} \right)^2 \frac{1 - 2e^{-\alpha a} + e^{-2\alpha a}}{\alpha^2} \quad (3.12) \\
&= \left(\frac{Ab\hat{P}_0}{r} \right)^2 \frac{(1 - e^{-\alpha a})^2}{\alpha^2}
\end{aligned}$$

그리고, 식 (3.11)를 식 (3.12)으로 나눈 값에 제곱을 취하게 되면 빔 프로파일의 강도의 세기를 나타내는 식 (3.13)을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\hat{P}}{\hat{P}_{\max}} \right)^2 = \frac{1 - 2\cos(k_\theta a) e^{-\alpha a} + e^{-2\alpha a}}{(1 - e^{-\alpha a})^2} \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + k_\theta^2} \quad (3.13)$$

유도된 식을 응용하기 쉽게 사용하기 위해 방사 길이(radiation length, $n\lambda_b$), 방향 변수(direction variable, X), 방사면 매개변수(aperture parameter, m) 3개의 새로운 요소들을 사용하면 식 (3.13)을 단순하게 만들 수 있다. 거리에 따른 진폭의 감쇠비를 나타내는 $e^{-\alpha a}$ 은 e^{-m} 로 바뀌고, $n\lambda_b = \frac{1}{\alpha}$, $X = \frac{k_\theta}{\alpha}$ 로 치환시켜 대입한다. 여기서 n 값은 표면파에서는 주파수에 영향을 받지 않지만 판파에서는 주파수에 따라 변화하는 변수이다.

이와 과정을 거쳐 식 (3.13)은 다음과 같이 간략하게 정리할 수 있다.

$$\left(\frac{\hat{P}}{\hat{P}_{\max}} \right)^2 = \frac{1 - 2e^{-m} \cos(mx) + e^{-2m}}{(1 - e^{-m})^2} \frac{1}{1 + X^2} \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{\hat{P}}{\hat{P}_{\max}} \right)^2 = \left[1 + \frac{2\sin^2(mX/2)}{\cos h m - 1} \right] \frac{1}{1 + X^2} \quad (3.15)$$

여기서 다시 유한한 방사면을 가지고 감쇠가 없는, 다시 말하면 감쇠계수 α 가 0을 극한값으로 가진다는 가정을 하면, 식 (3.15)는

$$\left(\frac{\hat{P}}{\hat{P}_{\max}}\right)^2 = \frac{2-2\cos(k_\theta a)}{k_\theta^2 a^2} \quad (3.16)$$

가 되고 이 식은 다시

$$\frac{\hat{P}}{\hat{P}_{\max}} = \left| \frac{\sin(\phi/2)}{\phi/2} \right| \quad (3.17)$$

로 쓸 수 있다. 여기서

$$\phi = \frac{1}{2} k_L \sin \psi \quad (3.18)$$

이다. 그리고 최대 음압강도로부터 -3 dB 지점에서 $\frac{\phi}{2}$ 는 $\frac{4}{9}\pi$ 의 값을 가지게 되는데, 이 값을 식 (3.17)에 대입하여 다시 쓰면 Lateral beam의 폭을 나타내는 식 (3.19)을 얻을 수 있다.

$$(\Delta\psi)_{-3dB} = \frac{8\lambda_L}{9b} \quad (3.19)$$

그리고 m 의 값을 2로 가정하여, 위에서와 같은 방법으로 계산하면, Median beam의 폭을 나타내는 아래의 식이 구해진다.

$$(\Delta\theta)_{-3dB} = \frac{1.55}{\pi n} \tan\theta_m = \frac{3.1\lambda_b}{\pi a} \tan\theta_m \quad (3.20)$$

그리고 식 (3.19)과 식 (3.20)의 방사빔 폭을 같아지게 놓으면,

$$\frac{a}{b} = 1.11 \frac{1}{\cos\theta} \quad (3.21)$$

또는

$$a = \frac{1.11}{\cos\theta_m} b \quad (3.22)$$

이 된다.

여기서 a 는 방사면의 길이이고 b 는 방사면의 폭이다. 수직 및 수평방향 방사빔 폭을 유지하기 위한 방사면의 길이와 폭의 상관관계를 보여주고 있다.

3. 웨이브가이드 초음파센서의 빔 방사각 변환 방법

웨이브가이드 초음파 센서는 고온 소동에 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 그림 10에서와 같이 판의 두께와 입사주파수의 곱 fd 이 3.5 이상 영역은 위상 속도가 일정한 비분산 영역이고 3.5 이하는 분산 영역으로 위상속도가 주파수 변화에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. fd 가 3.5 이하인 분산 영역에서는 위상속도가 주파수의 함수가 되므로 주파수의 변화에 따라 빔 방사각(θ)이 다음 식과 같이 주파수의 함수로 변화한다.

$$\theta = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{V_L}{C_p(f)}\right) \quad (3.23)$$

fd 가 3.5 이하인 분산 영역에서는 위상속도가 주파수의 함수 $C_p = C_p(f)$ 가 되므로 주파수의 변화에 따라 빔 방사각(θ)이 주파수의 함수 $\theta = \theta(f)$ 로 변화 하게 되며 초음파 빔의 방향을 주파수 튜닝으로 변환 조정할 수 있다[5].

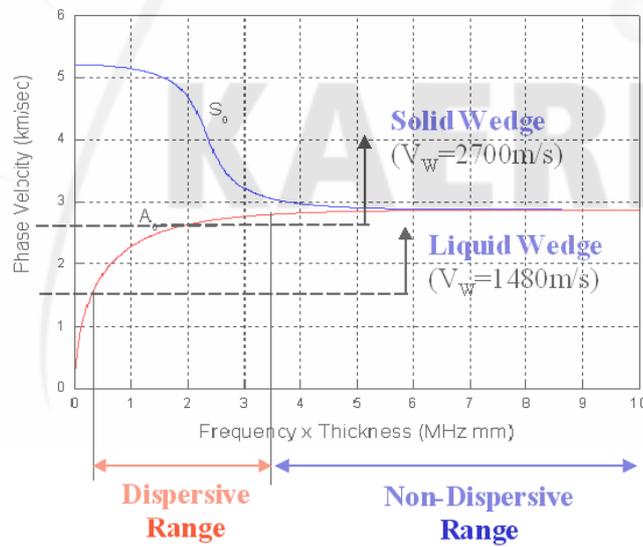


그림 10. A_0 모드 위상속도의 분산 및 비분산 영역

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 폴

리머 재료의 종파 속도(V_L)는 2700m/s 이므로 A_0 판파의 위상속도가 2700m/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. 그림 11에서와 같이 방사각 변환 주파수대역은 물에서는 fd 가 0.5에서 3.5이고 소듐에서는 fd 가 1.5에서 3.5 정도이다. 방사각 변환 주파수대역에서 입사펄스 주파수 변조에 따른 물과 소듐 내에서 A_0 모드의 빔 방사각은 그림 12 및 표 1과 같이 물에서는 약 32도에서 53도까지 변화시킬 수 있고 소듐에서는 62도에 82도까지 변화시킬 수 있다.

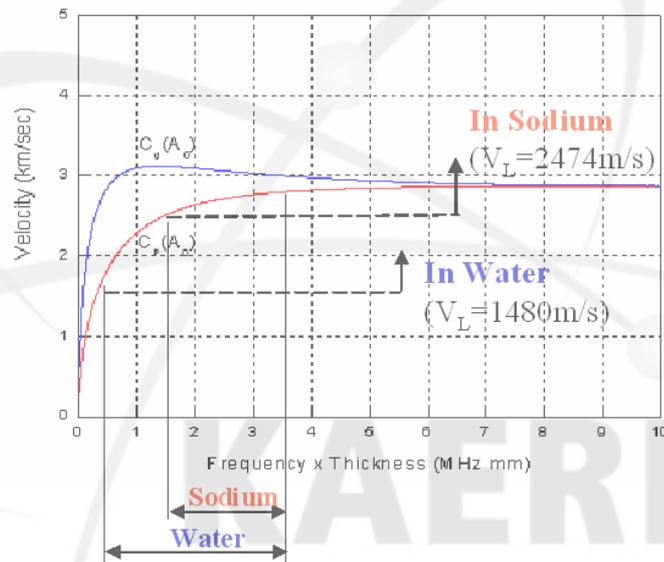


그림 11. A_0 모드의 위상속도(C_p)와 군속도(C_g)분산곡선 및 물과 소듐에서의 방사각 변환 주파수대역

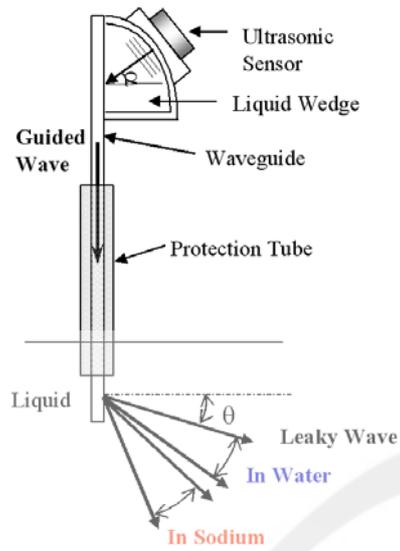


그림 12. 물과 소듐에서의 A_0 모드의 방사각 변환 범위

표 1. 물과 소듐에서의 A_0 모드의 방사각 변환 범위

$f d$	$C_P (A_0)$ [m/s]	Radiation Angle (θ) [degree]		Remark
		Sodium ($V_L=2474\text{m/s}$)	Water ($V_L=1480\text{ m/s}$)	
0.5	1846	-	53.3	Liquid Wedge
0.8	2150	-	43.3	
1.0	2296	-	40.1	
1.2	2395	-	38.1	
1.5	2517	80.2	36.1	
2.0	2641	69.6	34.1	
2.5	2715	65.7	33.0	Lucite Wedge
3.5	2803	62.0	31.9	

IV. 실험 및 결과

1. 실험장치의 구성

웨이브가이드 초음파센서에서의 A_0 모드의 전파 특성과 액체 내부로 방출되는 누설 종파의 빔 방사 특성을 분석하기 위하여 3축 제어 초음파 스캐닝 시험장치(Ultrasonic Scanning System)를 구축하였다. 그림 13은 구축된 시험 장치의 block diagram과 실제 장비 사진을 보여준다. 실험에 사용된 3축 스캐너장치는 미국 Panametrics사의 MULTISCAN이며 C-스캔 소프트웨어는 캐나다 UTEX사의 Winspect 프로그램을 사용하였으며 3축 스캐너 장치를 구동하면서 초음파 C-스캔 가시화 영상을 구현한다. 초음파센서에 신호를 송수신하기 위한 초음파 펄서/리시버는 RITEC사의 RAM-10000을 사용하였다. RAM-10000은 톤버스트 입사펄스의 사이클 수와 가진 주파수 등을 조절 할 수 있는 고풍력 초음파 송수신기로서 웨이브가이드 초음파센서의 입사펄스의 주파수와 펄스폭 변화에 따른 특성 평가 분석에 사용된다. 수신된 초음파 신호는 STR-81G 디지털이저 보드를 통하여 디지털 신호로 변환되어 신호 처리되며 디지털 오실로스코프(Lecroy, wavesurfer 424)를 통하여 신호를 확인한다.

웨이브가이드 초음파센서의 C-스캔 가시화 성능은 MULTISCAN 스캐너의 X-Y 스캔을 통하여 이루어지며 웨이브가이드 초음파센서의 방사 빔 전파 특성은 그림 13에서 보는 바와 같이 MULTISCAN 스캐너의 X-Z 스캔 또는 Y-Z 스캔에 의한 빔 프로파일 측정 실험을 통하여 이루어진다.

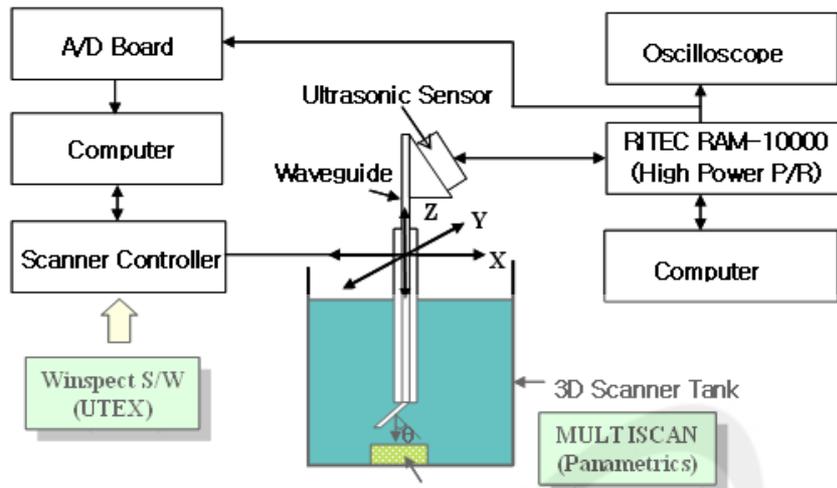


그림 13. 초음파 시스템의 block diagram과 사진

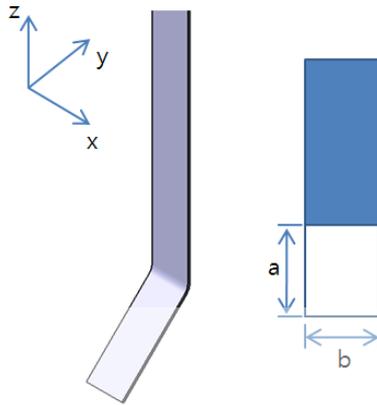


그림 14. 판 웨이브가이드 센서의 방사면에 대한 median plane과 lateral plane

그림 14는 실험에 사용된 웨이브가이드 센서 끝단 방사면에서의 좌표와 스캔 평면 좌표를 보여준다. 본 실험에서는 X 방향에서 바라보는 Y-Z 평면을 Median plane, Y 방향에서 바라보는 X-Z 평면을 Lateral plane으로 정의하고, 초음파가 누설되는 방사면에서 센서 길이 방향의 변위를 Aperture length(a), 폭방향 변위를 Aperture width(b)로 정의하여 사용한다.

본 연구에서는 사용된 웨이브가이드 초음파 센서는 초음파 탐촉자, SS304 스테인리스 강, Teflon 재질의 wedge로 구성되어 있고, 다음의 표 2와 같다.

표 2. SS304 판 웨이브가이드 센서의 제원

Transducer	SS304 plate			Angle of Teflon wedge
	Length	Width	Thickness	
1 MHz, 0.5 inch	400 mm	15 mm	1.0 mm	38°
			1.5 mm	34°

2. 빔 프로파일 측정

웨이브가이드 초음파센서에서 발생하는 누설종파는 물 속에서 약 45도 각도의 사각으로 방출되는데 이 방사빔을 3축 스캐너의 수직축(Z 축) 방향으로 입사시키기 위하여 웨이브가이드 초음파센서의 방사면 끝단을 약 45도로 굽혀서 제작하였다. 또한, 웨이브가이드 초음파센서의 판이 액체와 접하게 되면 A_0 판파의 에너지가 액체내로 빠져나가는 것을 방지하기 위하여 방사면을 제외한 다른 부위는 모두 종이와 테이프를 이용하여 음향학적 차단이 이루어지도록 조치하였다. 웨이브가이드 센서에서 방사되는 빔 프로파일은 그림 15와 같이 웨이브가이드 초음파 센서를 3축 스캐너의 수직축(Z 축)에 고정 설치하고 X-Z 평면 또는 Y-Z 평면으로 스캐닝하면서 직경 2 mm의 스테인리스 스틸 봉 반사체에서 반사되는 초음파 신호의 진폭을 수신하여 C-Scan 영상화함으로써 측정할 수 있다. 빔 프로파일 측정 실험은 스테인리스 봉 반사체를 기준으로 스캐닝 영역의 영점을 잡은 후, Scan 축(Y-축)의 스캐닝 영역을 -20 mm에서 +20 mm 까지로 설정하고 Index 축(Z-축)의 스캐닝 영역을 0 mm 부터 60 mm까지로 설정하여 0.3 mm 정밀도로 Y-Z 스캐닝을 수행하여 이루어진다.

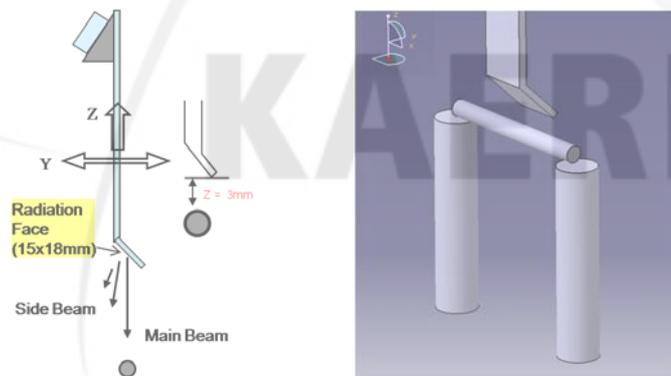
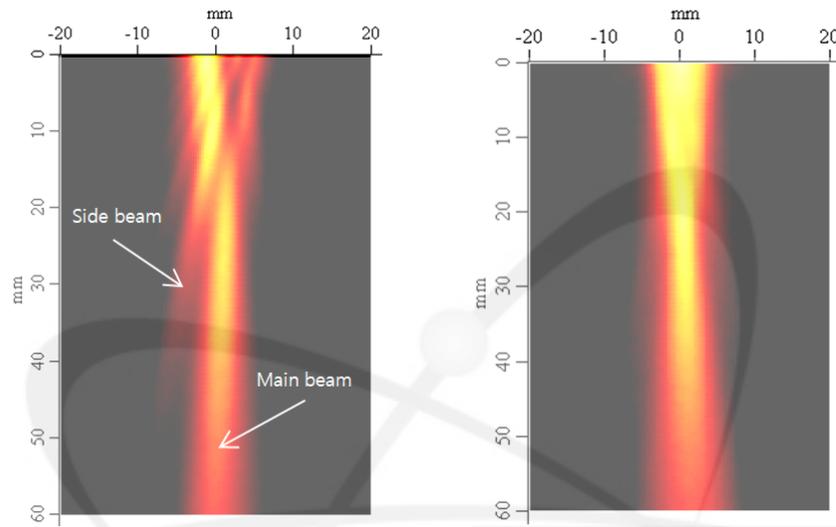


그림 15. 빔 프로파일 측정

그림 16은 웨이브가이드 초음파센서에서 방출되는 방사빔 프로파일을 보여주고 있는데, 메인 빔(main beam)과 사이드 빔(side beam)으로 나누어져 누설파가 진행되는 것을 알 수 있다. 일반적인 초음파 센서에서의 방사빔 패턴은 메인 빔과 사이드 빔이 센서 중심축을 기점으로 대칭을 이루는 반면 웨이브가이드 초음파센서에서는 A_0 누설판파의 방사빔이 사각으로 방출되면서 A_0 모드의 에너지 감쇠가 일어나기 때문에 먼저 방출되는 부분에서만 사이드 빔이 나타나서 방사빔 프로파일의 대

칭성을 나타내지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 웨이브가이드 초음파센서에서 방출되는 누설종파 빔의 방사 특성을 정밀 분석하기 위해 웨이브가이드 초음파센서의 방사면의 면적과 tone burst 입사펄스의 주파수 및 펄스 사이클 수 등을 변화시켜 가면서 빔 프로파일을 측정하였고 그 결과를 고찰하였다.



(a) Beam profile in median plane (b) Beam profile in lateral plane

그림 16. 웨이브가이드 센서에서 전파하는 A_0 판파로부터 방출하는 빔 프로파일

KAERI

3. Tone-burst pulse 사이클 수에 따른 빔 프로파일

판 웨이브가이드 센서에서 전파하는 A_0 모드 판파는 그 전파속도가 일정하지 않고 입사 주파수와 판의 두께에 따라 변화한다. 이러한 분산성은 웨이브가이드 센서의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 분산성이 있는 주파수 영역에서 A_0 모드 판파는 전파 거리가 증가함에 따라 군속도의 차이로 인해 입사 펄스의 폭과 주파수 밴드폭이 증가하는데, 협대역 주파수 밴드폭을 갖는 롱펄스 입사펄스를 사용함으로써 이러한 신호의 분산성을 줄일 수 있다. 판 웨이브가이드에서 전파하는 A_0 모드의 거리에 따른 분산성과 펄스 사이클 수에 따른 분산성을 분석 평가하기 위해서는 Short Time Fourier Transform (*STFT*) 기법을 이용하여 반사 신호의 분산 정도를 분석할 수 있다.

특정한 주파수를 가지는 신호는 초기에 시간에 따라 주파수가 변화하는 과도기적 상태(transient)를 지나 특정 주파수를 가지는 정상상태(steady status)에 도달한다. *STFT*는 과도기적 상태에서 시간에 따른 주파수가 변화를 관찰하기 위해 개발되었다.

시간 정보와 주파수 정보는 서로 독립적으로 확인이 가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 시간 축 상에 창문함수를 씌워 시간-주파수 영역을 동시에 표현할 수 있다. 창문함수 h 에 대한 *STFT*은 다음 식으로 정의된다.

$$STFT(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

여기서 $f(t)h(t-\tau)$ 는 신호 $f(t)$ 의 시간 τ 근처에서의 정보를 내포하고 있으며, $f(t)h(t-\tau)$ 의 Fourier Transform인 $STFT(\omega, \tau)$ 는 결국 신호 $f(t)$ 에 대한 시간 τ , 주파수 ω 근처에서의 정보를 제공한다. 이러한 시간 주파수 대역에서 국소화된 정보를 조합하여 식 (4.2)과 같이 원신호 $f(t)$ 를 다시 복원할 수 있다.

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} STFT(\omega, \tau)\phi(t-\tau)e^{i\omega t} d\omega du \quad (4.2)$$

*STFT*를 이용하여 얻은 시간-주파수영역에서의 신호를 보면 진동수에 따른 도착 시간의 정보가 함께 나타나있을 뿐 아니라, 각 모드의 분산 양상이 또한 명확히 나타나있다. 물론 *STFT*에 의해 얻어지는 분산양상은 유도초음파의 전파거리에 따라 분산의 정도는 달라지나 분산의 경향은 그대로 유지된다. 이러한 분산 양상을 군속도 분산선도와 비교함으로써 모드를 확인할 수가 있다.

그림 17과 같이 길이가 10 m이고 두께가 1 mm이며 폭이 15 mm 인 얇고 긴

SS304 판에서 초음파 탐촉자를 각각 1 m, 3 m, 5 m, 10 m 위치에 고정하고 펄스 사이클 수가 2 개인 경우와 12 개인 경우에 대하여 판의 끝단에서 반사되어오는 RF 신호를 수신하는 실험을 수행하여 반사 신호의 퍼짐 정도를 관찰하였고 *STFT* 기법을 이용하여 반사 신호의 분산 정도를 분석하였다. 그 실험 결과는 그림 18에서 그림 21에 나타내었다.

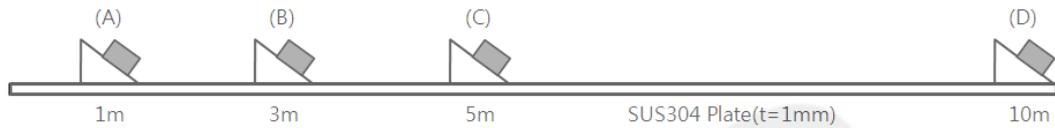


그림 17. 전파 거리에 따른 분산 특성 평가 시험

KAERI

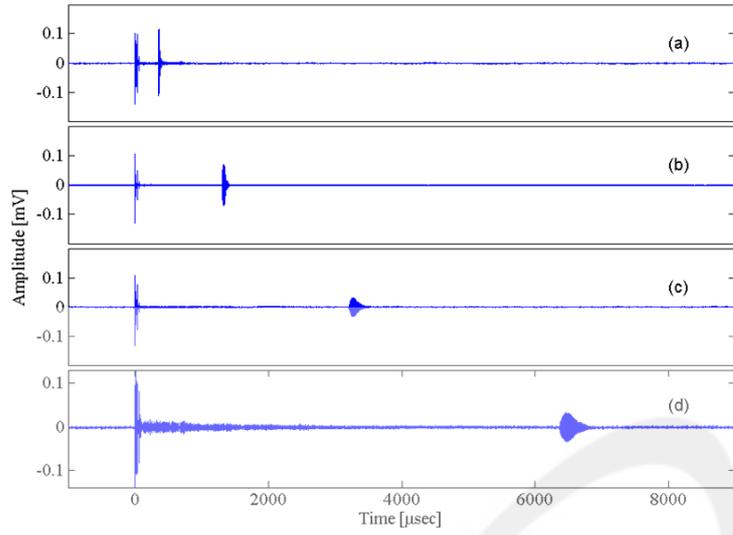


그림 18. 2 cycles 톤 버스트 펄스 가진시 전파거리 (a) 1 m, (b) 3 m, (c) 5 m, (d) 10 m에서의 RF 수신신호

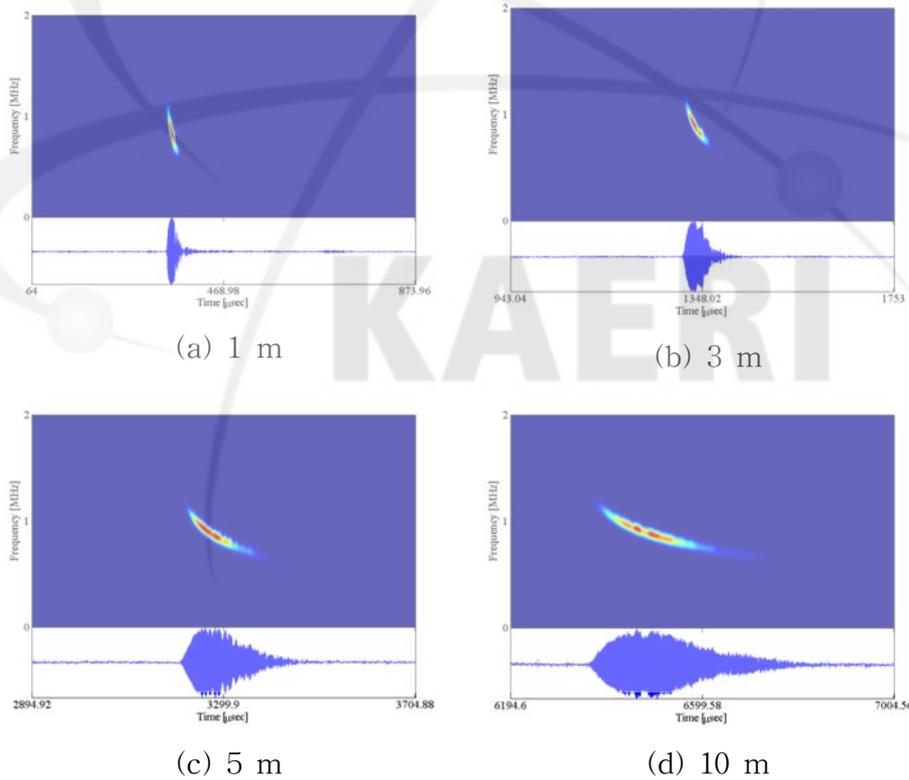


그림 19. 그림 18에서의 RF 수신신호의 STFT 결과

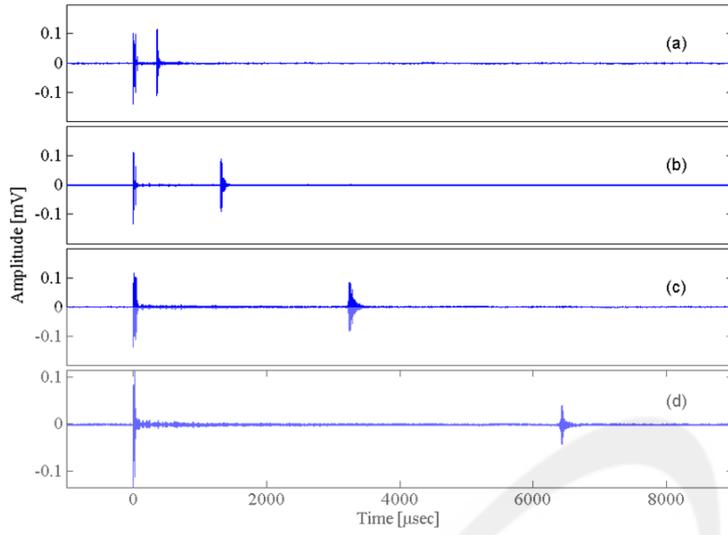


그림 20. 12 cycles 톤 버스트 펄스 가진시 전파거리 (a) 1 m, (b) 3 m, (c) 5 m, (d) 10 m에서의 RF 수신신호

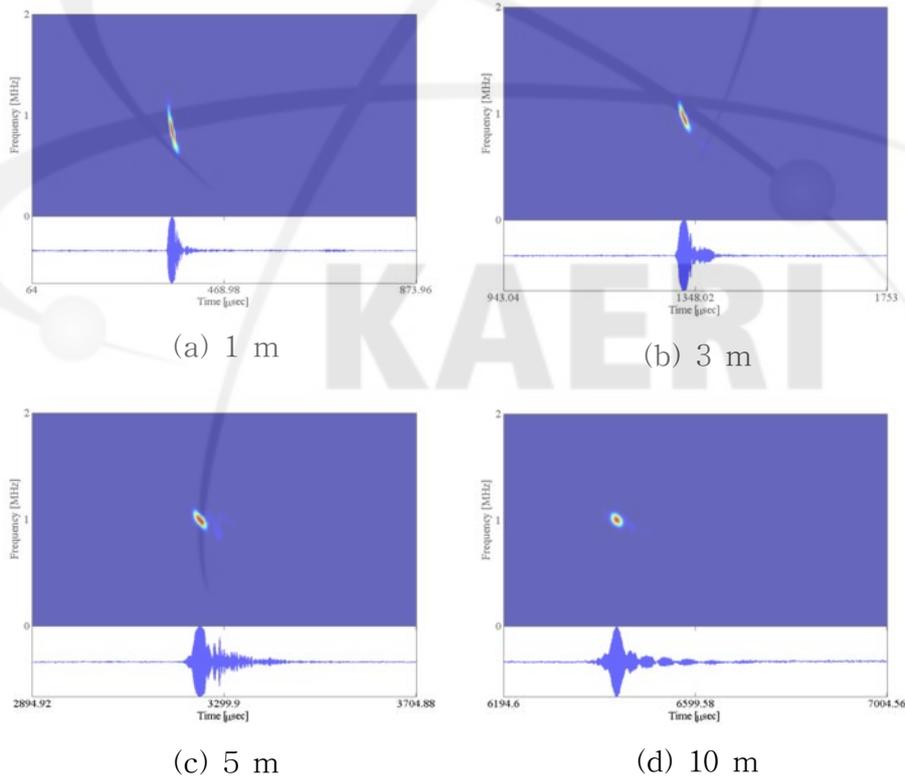
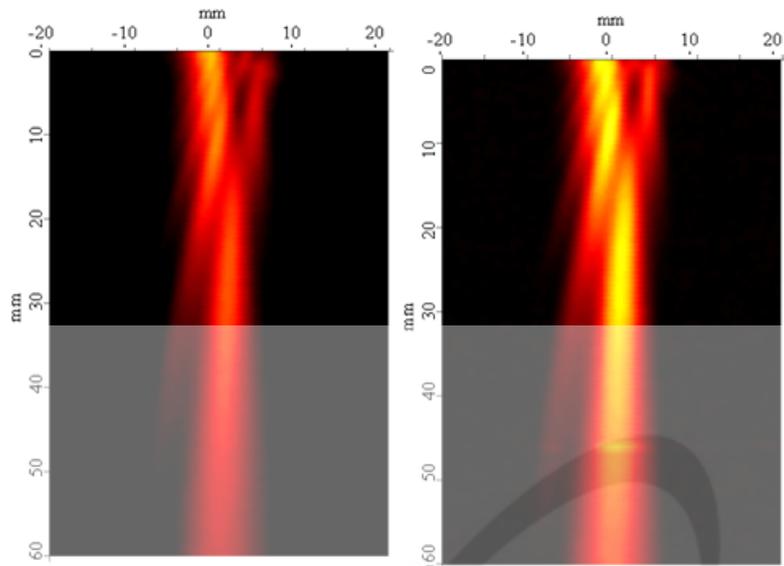


그림 21. 그림 20에서의 RF 수신신호의 STFT 결과

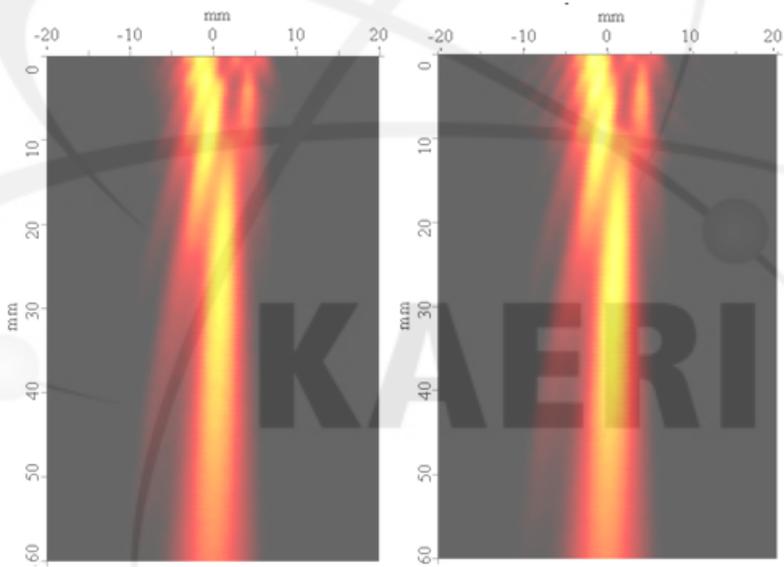
그림 18은 입사파의 펄스 사이클 수가 2개인 경우의 1 m, 3 m, 5 m 및 10 m 거리에서의 반사파 RF 수신신호를 보여주고 그림 19는 이들 RF 신호의 STFT 결과를 보여준다. 그림 19의 실험 데이터를 보면 전파 거리가 멀어짐에 따라 파형의 폭이 증가하는데 이는 A_0 모드의 분산성으로 인하여 전파거리 증가에 따라 파형 폭이 넓어짐을 알 수 있다. 그림 20은 입사파의 펄스 사이클 수가 12개인 경우의 1 m, 3 m, 5 m 및 10 m 거리에서의 반사파 RF 수신신호를 보여주고 그림 21은 이들 RF 신호의 STFT 결과를 보여준다. 같은 조건에서 펄스 사이클의 수를 12 개로 증가시키면 그림 21에서 보이는 것처럼 RF 반사 신호의 늘어짐이 확연히 줄어들게 된다. 이는 룬 펄스를 사용하면 주파수의 밴드 폭이 줄어들기 때문이다. 이와 같은 실험결과는 룬 펄스가 장거리 전파에 유리하다는 사실을 입증하여 준다.

이러한 결과를 가지고 다시 빔 프로파일 측정 실험을 수행하였다. 빔 프로파일 실험에는 사용한 펄스의 수는 4, 8, 12, 20이다. 그림 22와 그림 23은 위에서 언급한 펄스 수를 두께가 각각 1 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서에 적용시켜 얻은 실험결과이다. 그림에서와 같이 펄스 수의 증가는 빔 프로파일의 형상이나, 사이드 빔의 수에는 큰 영향을 주지 않았다. 단지 펄스 사이클의 수가 증가할수록 빔 프로파일의 강도가 점점 커진다. 실험결과 강도의 세기에만 영향을 줄 뿐 다른 특성에는 영향을 주지 않았다. 웨이브 가이드 센서가 장거리를 전파하기 위해서는 룬 펄스를 사용하여야 한다. 펄스의 수가 12개가 될 때 까지 신호의 세기는 펄스의 증가에 따라 커졌지만, 12개를 넘어서게 되면 포화상태에 이르러 신호의 세기는 변화하지 않고, 신호의 폭만 점점 더 늘어났다.



(a) 4 cycles pulse

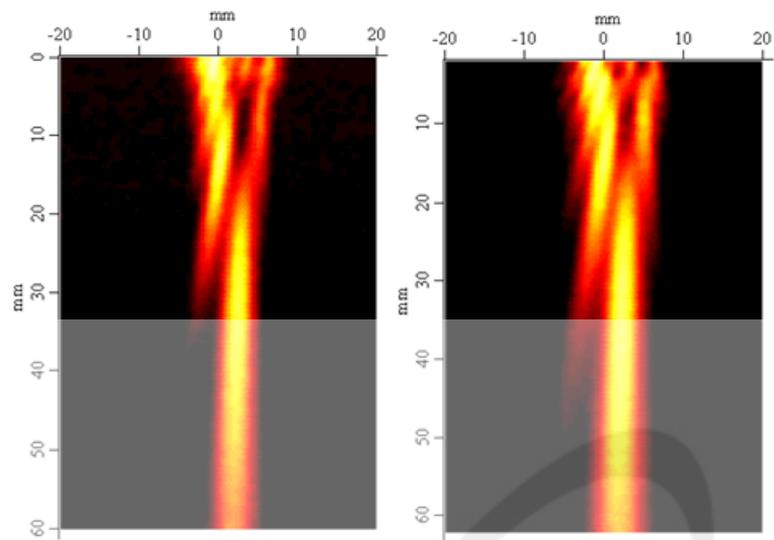
(b) 8 cycles pulse



(c) 12 cycles pulse

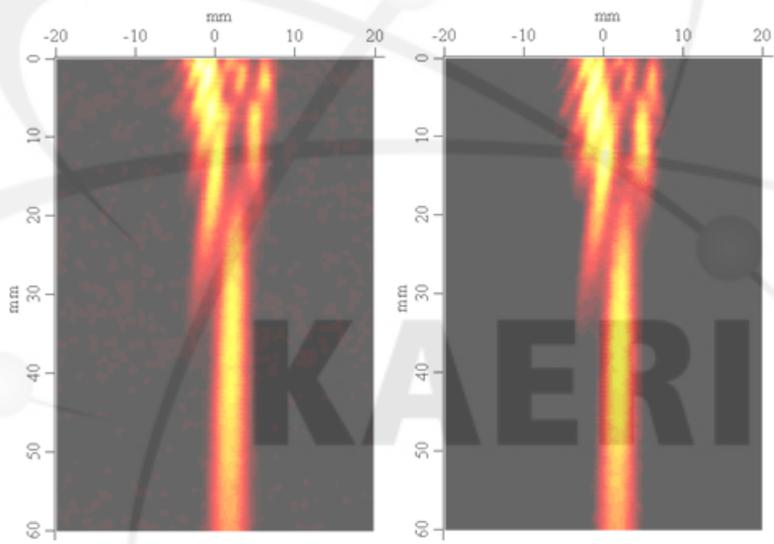
(d) 20 cycles pulse

그림 22. 두께 1.0 mm 웨이브가이드 센서에서의 펄스 cycles 수 변화에 따른 빔 프로파일



(a) 4 cycles pulse

(b) 8 cycles pulse



(c) 12 cycles pulse

(d) 20 cycles pulse

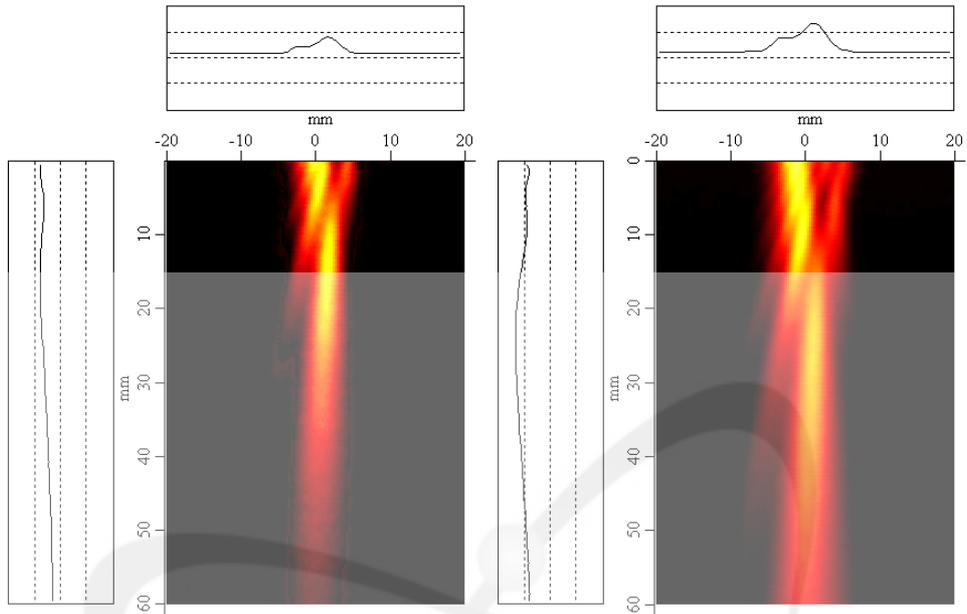
그림 23. 두께 1.5 mm 웨이브가이드 센서에서의 펄스 cycles 수 변화에 따른 빔 프로파일

4. 방사면적 변화에 따른 빔 프로파일

본 보고서의 (2.1)식은 근거리음장 영역은 탐촉자 직경의 제곱과 주파수에 비례하는 것을 보여준다. 실험 결과, 웨이브가이드센서의 방사면이 길이방향으로 길어짐에 따라 근거리 음장의 길이가 6 mm, 15 mm, 27 mm, 35 mm, 55 mm로 각각 측정되었다. 웨이브가이드 센서의 끝단이 굽어져 있어 방사면의 중심을 기준으로 하면 Z축의 거리를 약 8 mm 정도 보정하면 실제 근거리 음장의 길이는 14 mm, 23 mm, 35 mm, 43 mm, 62 mm이다. 그리고 이론식 (2.1)과 같이 방사면 길이방향으로 증가함에 따라 근거리 음장의 길이가 길어지는 경향을 보여주고 있다.

그림 24와 그림 25를 보면 방사면의 aperture length가 길어질수록 사이드 빔의 수가 늘어나는 것을 알 수 있다. 그림 26은 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이와 파장을 나타내어 보여주고 있다. 그림 24와 그림 25에서와 같이 측정된 사이드 빔의 수는 각각 10 mm에서는 2개, 15 mm에서는 3개, 18 mm에서는 4개, 20 mm에서는 5개이었다. 이 결과와 aperture length에서 생길 수 있는 사이드 빔 프로파일의 갯수를 측정하여 표 3에 나타내었다. 사이드 빔의 수는 방사면에 생길 수 있는 파장의 수의 절반 정도인 것을 알 수 있다. 이는 판파가 액체로 누설될 때의 메인 빔에서 빠져나가는 에너지로 인하여 방사면의 끝단까지 완전히 파가 전달되지 못하기 때문이다.

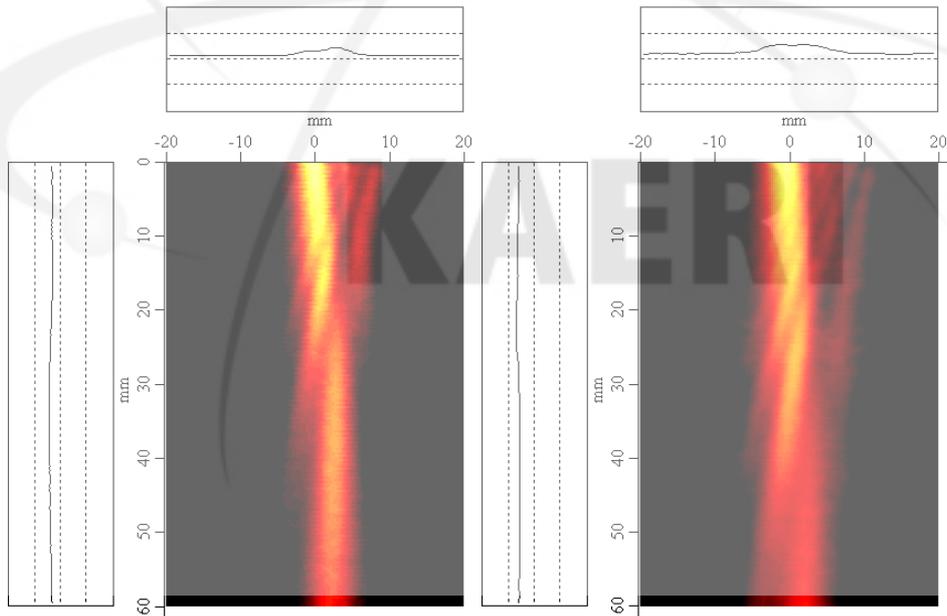
KAERI



(b) $a = 15 \text{ mm}$

(c) $a = 18 \text{ mm}$

a : aperture length

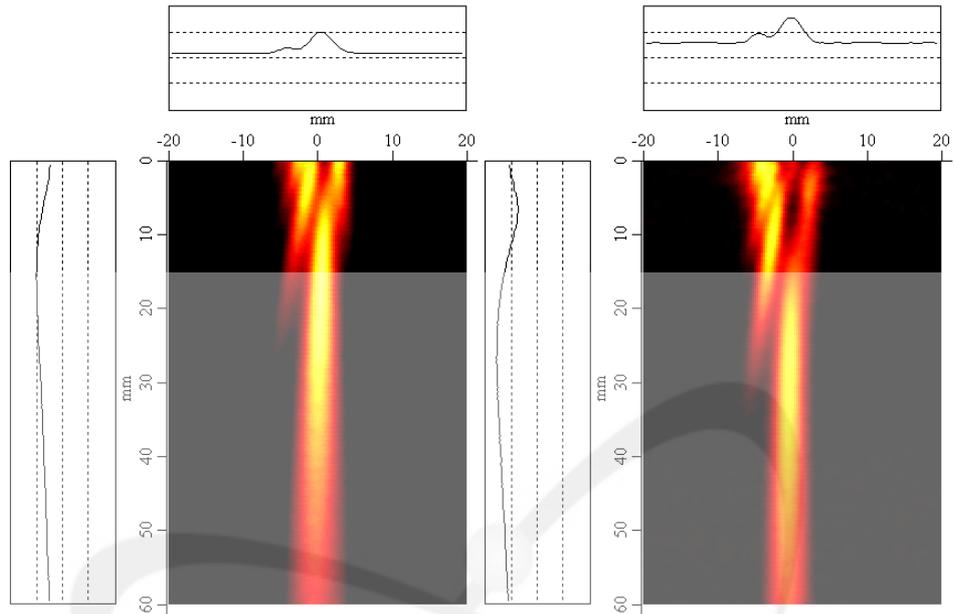


(d) $a = 20 \text{ mm}$

(e) $a = 25 \text{ mm}$

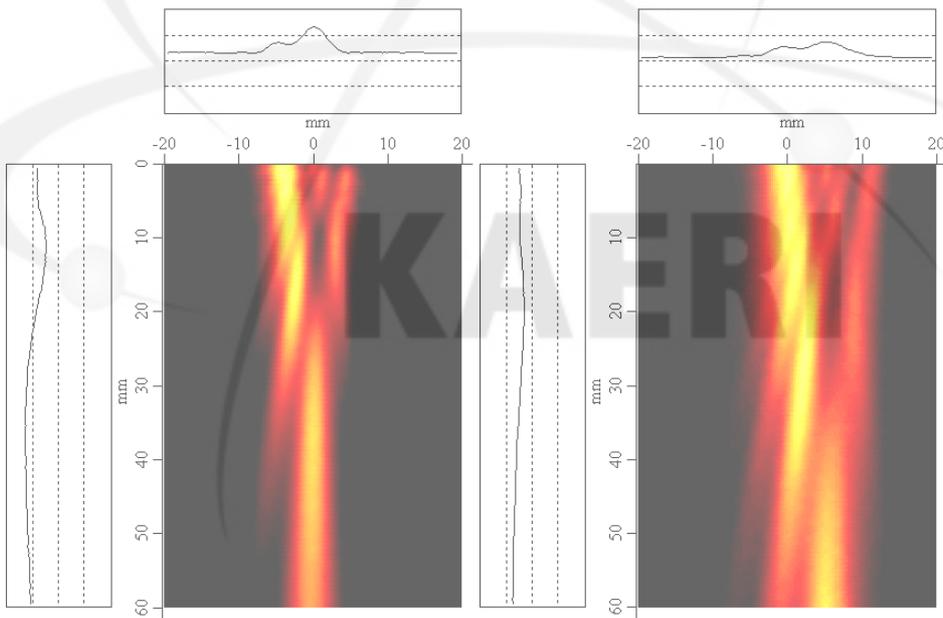
a : aperture length

그림 24. 두께 1.0 mm 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이 변화에 따른 빔 프로파일



(b) $a = 15$ mm

(c) $a = 18$ mm



(d) $a = 20$ mm

(e) $a = 25$ mm

그림 25. 두께 1.5 mm 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이 변화에 따른 빔 프로파일

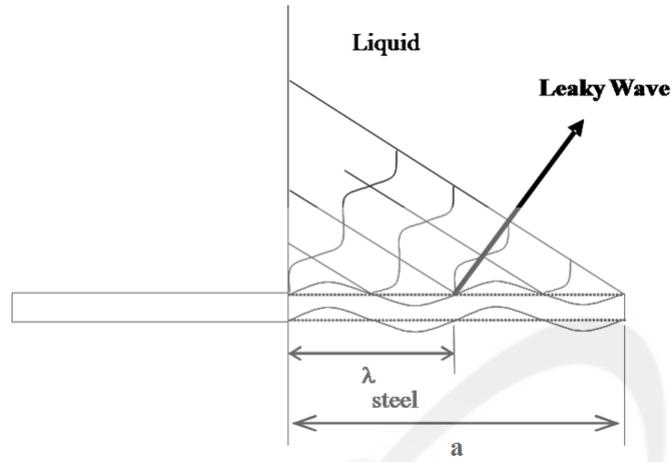


그림 26. 웨이브가이드 센서에서의 aperture 길이와 파장

표 3. 사이드 빔의 갯수 (계산 및 측정)

Aperture 길이 (a)	λ_{steel}	a/λ	side-beam 개수	
			계산 [$a/(2\lambda)$]	측정 (ea)
10 mm	2.29 mm (at 1 MHz)	4.3	2.15	2
15 mm		6.55	3.27	3
18 mm		7.8	3.90	4
20 mm		8.7	4.35	5
25 mm		10.9	5.45	-

5. 주파수에 변화에 따른 빔 프로파일

그림 27에서와 같이 입사파 주파수를 각각 0.8 MHz, 1 MHz, 1.2 MHz로 증가시키면서 빔 프로파일을 측정하였다. 본 보고서의 (2.1)식에서 초음파의 근거리 음장은 주파수에 비례하다는 것을 보여주고 있다. 그림 28(a)에서 보여주는 본 실험결과에서도 주파수가 증가 할수록 근거리 음장의 길이가 18 mm, 28 mm, 34 mm로 길어졌다. 그리고 그림 28(b)는 주파수가 증가하면 빔 퍼짐각(α)이 줄어드는 것을 보여준다. 이는 식 (2.2)와 잘 일치한다. 여기서 식 (2.2)는 빔 중심의 최대 음압강도로부터 음압강도가 -3dB가 되는 지점의 각도를 나타내는데, 이때의 각도(α)는 빔의 폭이라 할 수 있다.

판파의 위상속도 C_p 는 주파수의 함수임을 보였다. 주파수의 변화에 따라 위상속도가 바뀌고 위상속도의 변화는 다시 방사각을 변화시킨다. 그림 28(c)는 주파수 변화에 따른 방사각을 보여준다. 그림 28(c)에서 주파수 변화에 따른 방사패턴을 살펴보면 주파수가 0.8 MHz에서 1.2 MHz로 증가할 때 방사각 θ 는 감소하는 것을 알 수 있다.

웨이브가이드 센서에서 입사 주파수를 증가시키면 방사빔의 근거리 음장 영역이 증가되었고, 빔 퍼짐각과 방사각이 감소하였다. 이러한 실험적 측정 결과는 이론식의 결과와 잘 일치하였다. 이와 같은 현상은 두께 1.5 mm에도 동일하게 발견할 수 있었다. 그림 29는 두께 1 mm 웨이브가이드 센서와 1.5 mm 센서를 비교한 결과를 보여준다.

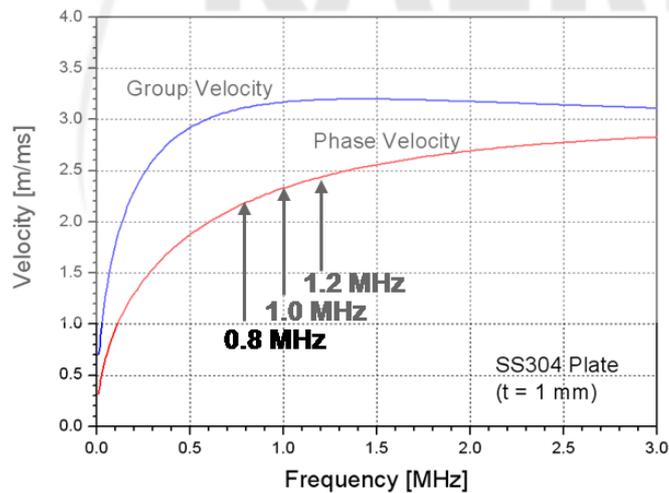
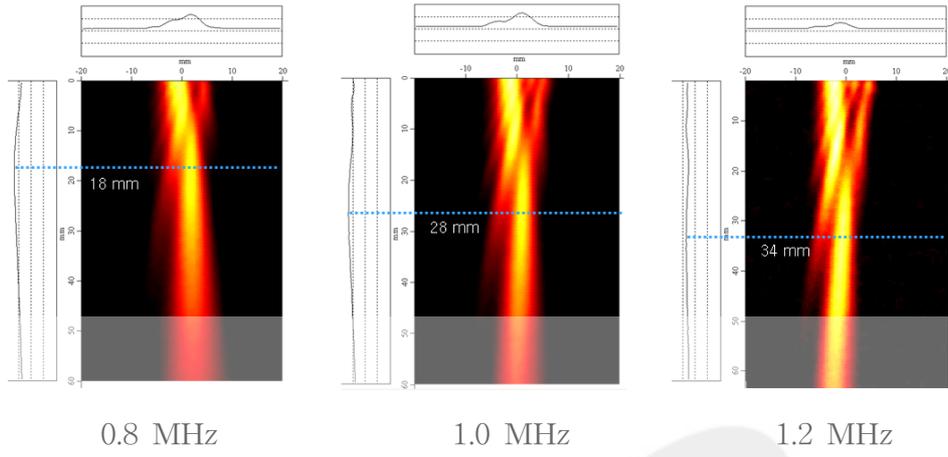
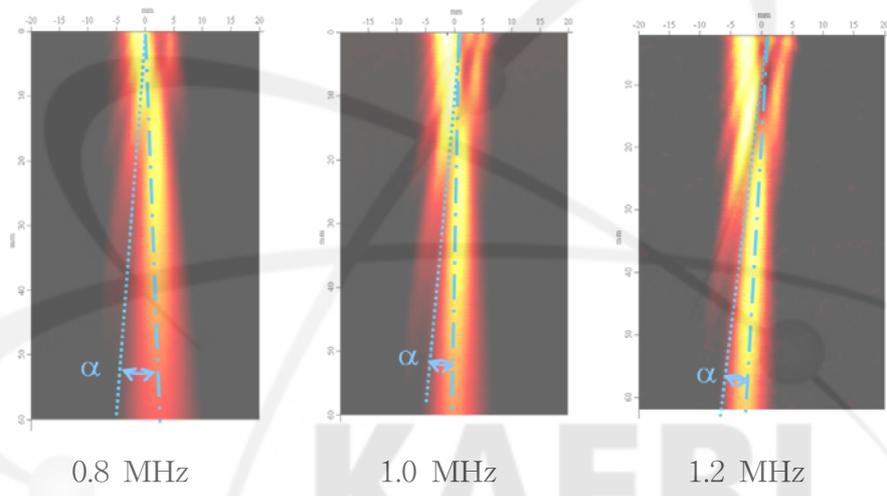


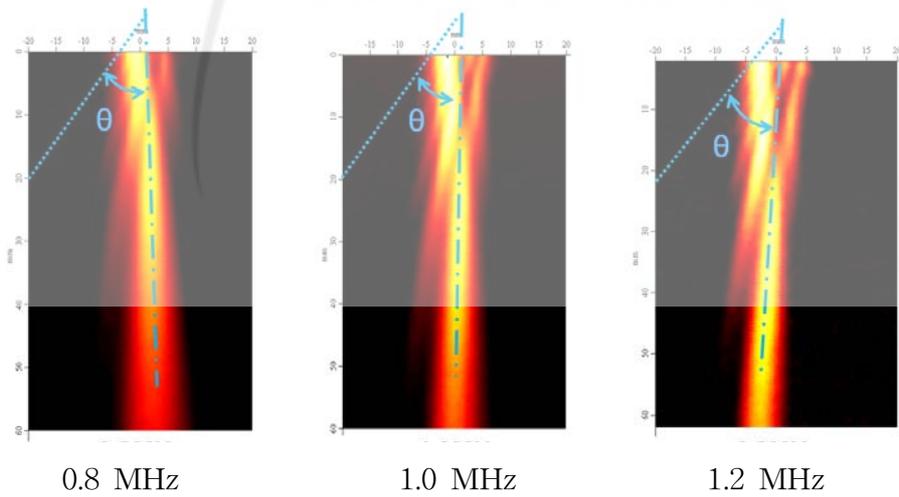
그림 27. SS304 판에서의 A0 모드 위상속도 분산곡선과 가진 주파수



(a) 근거리 음장 거리

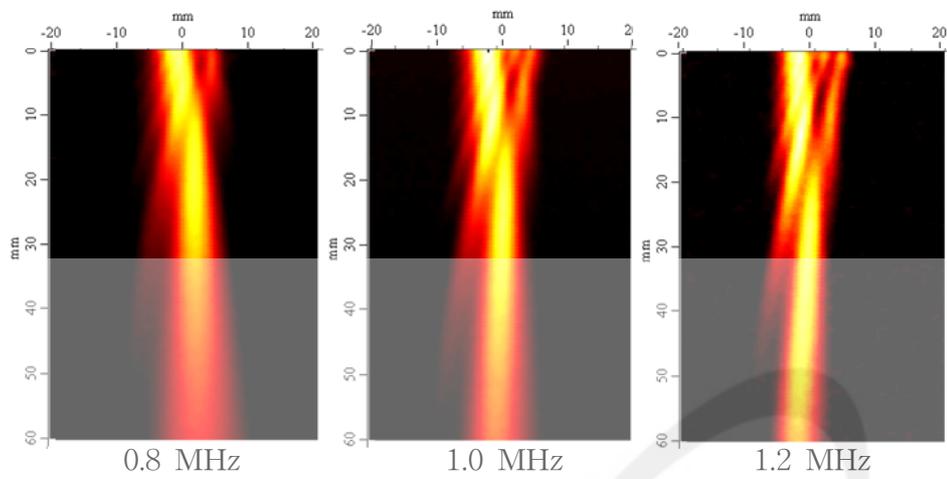


(b) 빔 퍼짐각

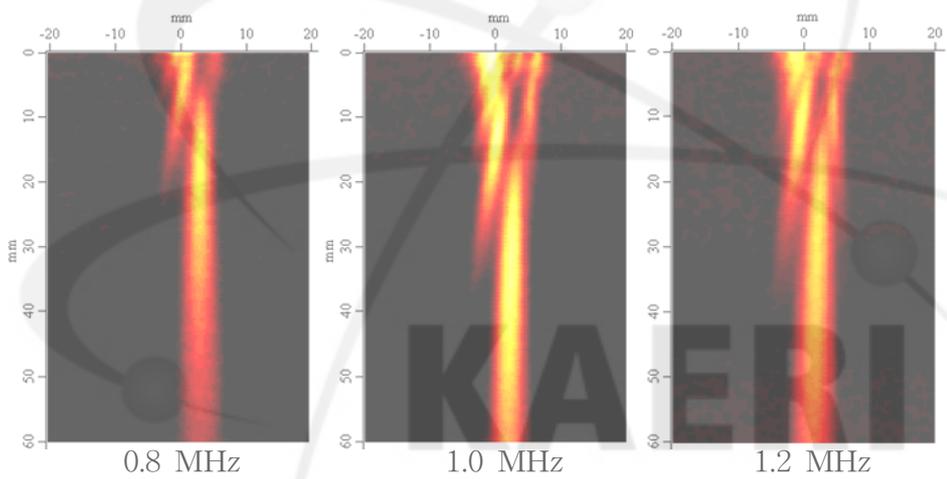


(c) 방사각

그림 28. 가진 주파수 변화에 따른 빔 프로파일 측정



(a) 1.0 mm 두께 웨이브가이드 센서



(b) 1.5 mm 두께 웨이브가이드 센서

그림 29. 두께 1.0 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 가진 주파수 변화에 따른 빔 프로파일 측정

6. 웨이브가이드센서를 이용한 C-Scan 실험

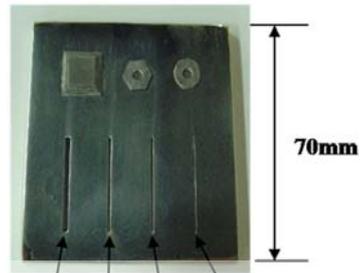
앞서 실험 결과를 근거로 선정된 웨이브가이드 초음파센서의 최적 조건은 다음과 같다. 두께 1 mm 웨이브가이드 센서의 경우 방사면의 길이가 18 mm, 펄스 사이클 수는 12개, 입사주파수는 1.2 MHz에서 최적의 방사패턴을 보였으며, 두께 1.5mm의 웨이브가이드 센서의 경우 방사면의 길이가 18 mm, 펄스 사이클의 수는 12개, 입사주파수는 1.0 MHz에서 최적의 방사패턴을 보였다. 선정된 최적조건을 적용하여 표면 결함이 있는 손상 시험편과 모의 노심을 이용하여 초음파 C-스캔 시험을 수행하였다.

그림 30 (a)는 소듐냉각 고속로 노심을 모의한 시험편을 보여준다. 총 7개의 핵연료 어셈블리 중에서 중앙 핵연료 어셈블리를 임의로 변형시켰으며 변형된 모의 노심에 대한 C-스캔 시험을 수행하였다. 그림 30 (c)는 C-스캔 실험 결과를 보여 준다. C-스캔 실험 결과 변형 노심을 탐지할 수 있음을 확인하였다. 그리고 그림 34 (b)와 (c)는 슬릿(slit)과 사각형 및 원형 금속 파편이 있는 모의 시험편과 C-스캔 영상을 보여준다. 실험 결과 웨이브가이드 센서는 사각형 및 원형 금속 파편의 형상을 인식할 수 있었으며 폭이 0.5 mm인 슬릿까지 충분히 감지할 수 있음을 확인하였다.

아래의 그림 31과 그림 32는 두께가 각각 1 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 C-스캔 시험 성능을 웨이브가이드 센서와 시험편 거리 변화에 따라 비교한 실험결과를 보여준다. 웨이브가이드 센서와 시험편 거리가 10 mm 일 때 그림 31(a)의 C-스캔 결과를 보면 슬릿의 이미지가 분리되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 센서와 시험편 사이의 거리가 10 mm에서는 웨이브가이드 센서에서 방출하는 사이드빔으로 인하여 나타나는 결과로 판단된다. 웨이브가이드 센서와 시험편 거리가 50 mm 인 경우에는 그림 36(a)에서와 같이 슬릿이 선명하게 나타났으며 0.5 mm 슬릿까지 잘 탐지할 수 있음을 알 수 있다. 이는 50 mm 거리에서는 사이드빔의 영향이 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 웨이브가이드 센서의 판 두께에 따른 C-스캔 가시화 성능을 비교하여 보면 1.5 mm 웨이브가이드 센서의 C-스캔 가시화 분해능이 두께 1.0 mm의 웨이브가이드 센서보다 좋은 결과를 보임을 알았다.

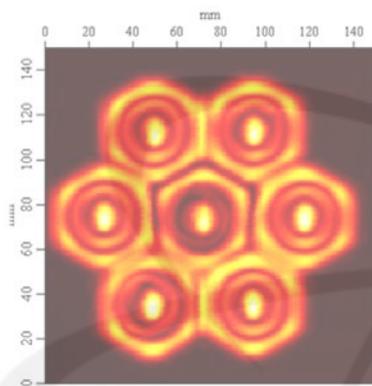


(a) 원자로 노심 mock-up

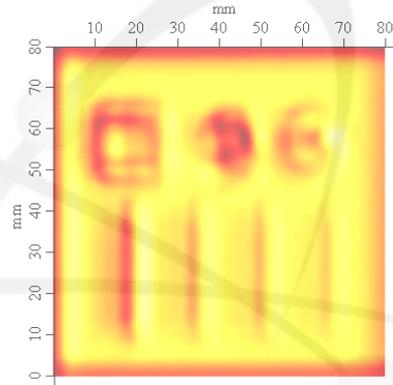


Slit: 2mm 1mm 0.8mm 0.5mm

(b) 금속과편과 슬릿이 있는
분해능 측정 시험편



(c) 노심 mock-up의 C-스캔 영상



(d) 분해능 측정 시험편의 C-스캔
영상

그림 30. C-스캔 시험편과 가시화 영상

KAERI

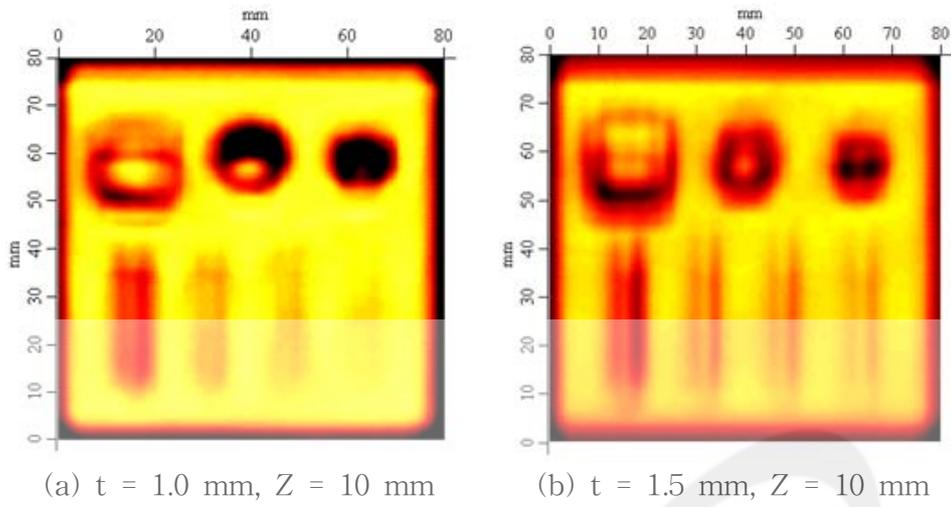


그림 31. 웨이브가이드 센서와 시험편과의 거리가 10 mm인 경우 두께 1.0 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 C-스캔 시험 비교결과

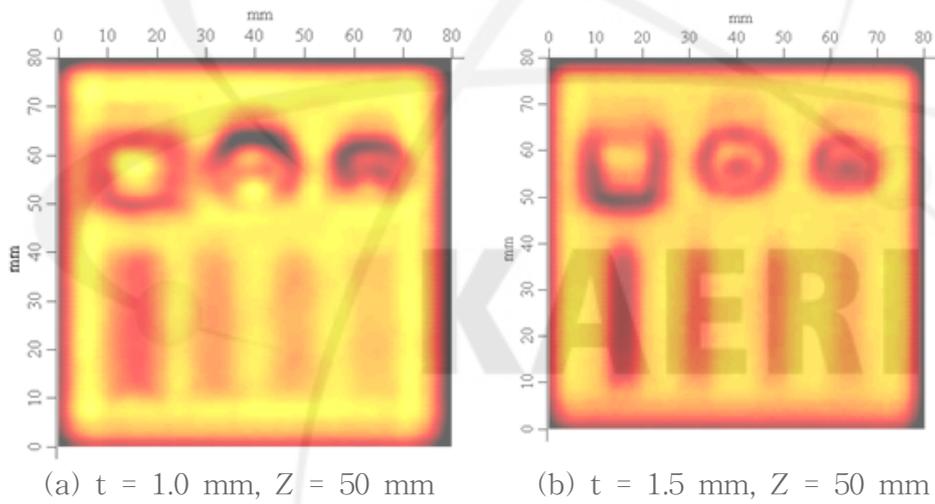


그림 32. 웨이브가이드 센서와 시험편과의 거리가 50 mm인 경우 두께 1.0 mm와 1.5 mm인 웨이브가이드 센서의 C-스캔 시험 비교결과

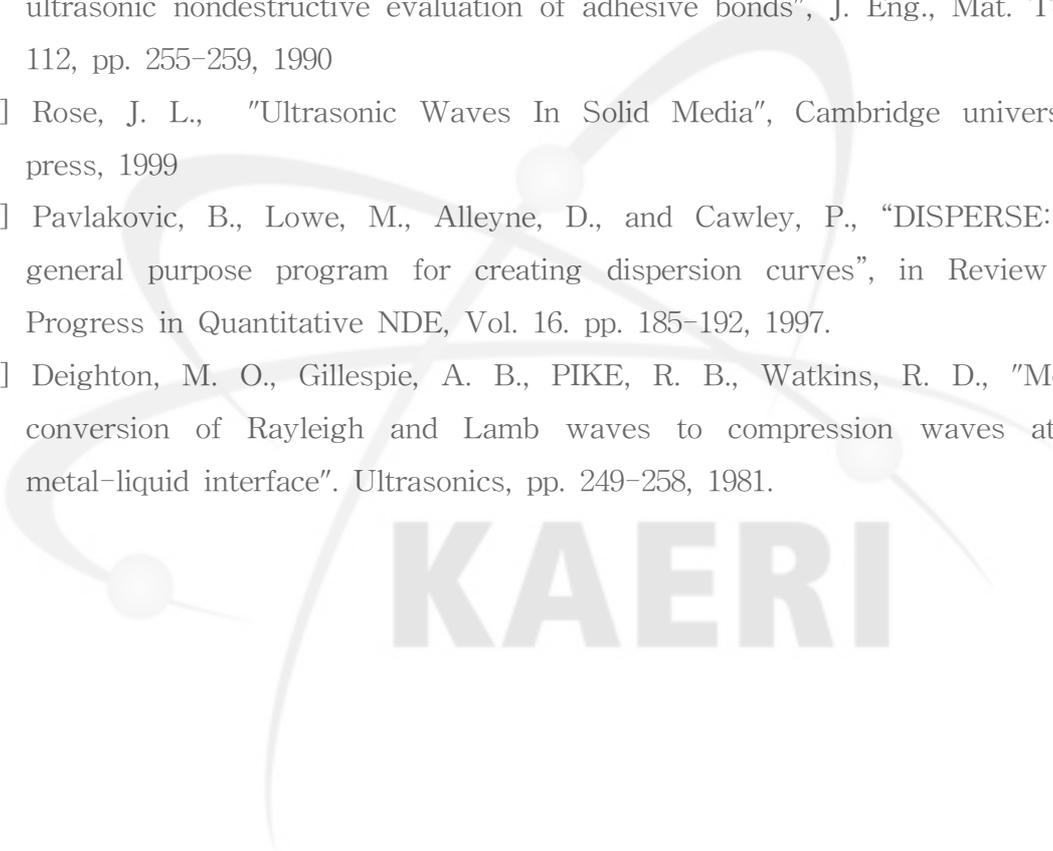
VI. 결 론

본 연구에서는 웨이브가이드 초음파센서에서 전파하는 A_0 모드 누설판파의 전파 특성과 인접 액체로 모드 변환되어 방출되는 누설 종파의 방사 특성을 분석하고 실험을 통하여 웨이브가이드 초음파센서의 전파 및 방사 성능을 평가하였으며 빔 프로파일 측정 시험과 C-Scan 시험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 웨이브가이드 센서에서 입사 주파수 변화에 따라 방사 빔의 방출각도를 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 이론적 연구 결과와 같이 웨이브가이드 센서에서 입사 주파수 증가에 따라 방사 빔의 근거리 음장이 증가되었고, 빔 퍼짐각이 감소하였다. 웨이브가이드 센서의 방사면이 증가하면 누설 종파 빔의 근거리 음장이 증가하고, 빔 퍼짐각이 감소하였으며 사이드 빔의 갯수가 증가하였다. 길이 10 m 이상인 웨이브가이드 센서에서는 롱 펄스를 사용함으로써 장거리 전파에 따른 분산성을 최소화 할 수 있었으며, 펄스 사이클 수의 증가는 누설종파 빔 프로파일의 특성을 변형시키지 않음을 확인하였다. 웨이브가이드 초음파센서의 최적 조건으로서, 두께 1 mm 웨이브가이드 센서의 경우 방사면의 길이가 18 mm, 펄스 사이클 수는 12개, 입사주파수는 1.2 MHz 이었으며, 두께 1.5mm의 웨이브가이드 센서의 경우 방사면의 길이가 18 mm, 펄스 사이클의 수는 12개, 입사주파수는 1.0 MHz 이었다. 선정된 최적 조건의 웨이브가이드 초음파 센서를 이용하여 표면 결함이 있는 손상 시험편과 모의 노심에 대한 C-스캔 시험 결과, 사각형 및 원형 금속 파편과 모의 노심의 형상을 인식할 수 있었으며 폭이 0.5 mm인 슬릿까지 충분히 감지할 수 있음을 확인하였다. 1.5 mm 웨이브가이드 센서의 C-스캔 가지화 분해능이 두께 1.0 mm의 웨이브가이드 센서보다 좋은 결과를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] Seed, G., "In-Service Inspection and Monitoring of CDFR", Nucl. Energy, Vol 35, No. 2, pp. 129-135, 1986.
- [2] McKnight, J. A., Fenemore, P., "Under-Sodium Ultrasonic Technology for LMFBRs," Science and Technology for Fast Reactor Safety, BNES, London, pp. 585~590, 1986.
- [3] Lions, N., 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.
- [4] Lions, N., et al, "Apparatus for Ultrasonic Visualization in Sodium(VISUS) and Acoustic Detection in the Phenix Reactor," ORNL-TR-4136, 1973.
- [5] 주영상 외, "소듐냉각 고속로 원자로 내부구조물의 소듐내부 가시화를 위한 웨이브가이드 초음파센서의 적용 가능성 연구", 비파괴검사학회지, 제28권, 제4호, pp. 364-371, 2008.
- [6] Lamb, H., "On waves in a elastic plate", Proceedings of Royal Society, London, Series A, Vol. 93, pp. 114-128, 1917. .
- [7] Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb waves", Physical Theory and Applications, New York, 1967.
- [8] Gazis, D. C., "Three-dimensional Investigation of The Propagation of waves in Hollow Circular Cylinders", I. Analytical Foundation, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 31, No.5, pp. 568-573, 1959.
- [9] Chimenti, D. E., "Guided Waves in Plates and Their Use in Materials Characterization," Appl. Mech. Rev., 50, pp. 247-284, 1997.
- [10] Rose, J. L., "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, pp. 273-282, 2002.
- [11] Mal, A. K., "Wave Propagation in Layered Composite Laminates Under Periodical Surface Loads" Wave Motion, 10, pp. 257 - 266, 1988.
- [12] Datta, S. K., Al-Nassar, Y., and Shah, A. K., "Lamb Wave Scattering by a Surface Breaking Crack in a Plate," Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval., eds. D. O. Thompson and D. Chementi, 10, pp. 97-104, 1991.

- [13] Alleyne, D. N., and Cawley, P., "Long Range Propagation of Lamb Wave in Chemical Plant Pipework" *Mater. Eval.*, 45, pp. 504-508, 1997..
- [14] Rose, J. L., "Guided Wave Nuances for Ultrasonic Nondestructive Evaluation" *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 47, pp. 575-583, 2000.
- [15] Kwun, H, and Teller, "Detection of Fractured Wires in Steel Cables Using Magnetostrictive Sensors" *Mater. Eval.*, 52, pp. 503 - 507, 1994.
- [16] Mal, A. K., Mu, P. C., and Bar-Cohen, "Leaky Lamb waves for the ultrasonic nondestructive evaluation of adhesive bonds", *J. Eng., Mat. Tech* 112, pp. 255-259, 1990
- [17] Rose, J. L., "Ultrasonic Waves In Solid Media", Cambridge university press, 1999
- [18] Pavlakovic, B., Lowe, M., Alleyne, D., and Cawley, P., "DISPERSE: A general purpose program for creating dispersion curves", in *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 16. pp. 185-192, 1997.
- [19] Deighton, M. O., Gillespie, A. B., PIKE, R. B., Watkins, R. D., "Mode conversion of Rayleigh and Lamb waves to compression waves at a metal-liquid interface". *Ultrasonics*, pp. 249-258, 1981.

A large, faint watermark of the KAERI logo is centered on the page. The logo consists of a stylized circular path with three spheres, and the word "KAERI" is written in large, bold, capital letters across the middle of the path.

KAERI

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-4020/2010					
제목 / 부제	웨이브가이드 초음파센서의 누설판파 빔 방사 특성 분석				
주저자 및 부서명	주 영 상 (고속로기술개발부)				
연구자 및 부서명	배 진 호, 박 창 규, 이 재 한 (고속로기술개발부)				
출판지		발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010. 2
페이지	53 p.	도표	있음(o), 없음()	크기	A4
참고사항					
비밀여부	공개(o), 대외비(), — 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관		계약 번호			
초록 (15-20줄내외)	<p>판형 웨이브가이드 초음파센서에서의 A_0 모드 누설 판파의 전파 및 방사 특성에 대한 이론적 연구와 실험적 연구를 수행하였다. A_0 모드 누설 판파는 단일 모드만 발생 가능하여 신호 간섭이 발생하지 않고 10 m 이상의 장거리 전파가 가능하며 유체로 에너지가 방출되는 방사효율이 매우 좋은 특성을 가진다. 판형 웨이브가이드 초음파센서는 판 웨이브가이드와 액체 웨지 또는 테플론 웨지 그리고 초음파 탐촉자 및 음향 차폐 보호관으로 구성된다. 본 연구에서는 길이 10 m이고 두께가 1 mm ~ 1.5 mm인 얇고 긴 스테인리스 판에서 전파하는 A_0 모드의 전파 특성을 분석하였으며 A_0 모드 판파의 분산성이 적은 주파수 영역에서 고출력 사각 펄스의 입사주파수 튜닝을 통하여, 기계적 장치의 구동 없이 누설 초음파의 방사빔의 방출각을 조정할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 웨이브가이드 초음파센서의 방사빔 특성은 판의 두께, 방사면의 길이, 펄스 사이클의 수, 그리고 가진 주파수의 변화 등을 분석 평가하여 웨이브가이드 초음파센서의 설계 변수들을 최적화 하였다. 또한 최적조건을 적용한 웨이브가이드 초음파센서의 성능 검증을 위해 수중 C-scan 가시화 실험을 수행하여 웨이브가이드 초음파센서를 이용한 소뚫내부 가시화 성능을 검증 확인하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	웨이브가이드 센서, 소뚫내부가시화, 가동중검사, 소뚫냉각 고속로, 칼리머-600, 누설판파, A_0 모드 판파				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-4020/2010					
Title / Subtitle		Analysis of Radiation Beam of a Leaky Lamb Wave in Ultrasonic Waveguide Sensor			
Project Manager and Department		Y. S. Joo (SFR Technology Development)			
Researcher and Department		J. H. Bae, C. G. Park, J. H. Lee (SFR Technology Development)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010. 2
Page	p. 53	Ill.&Tab.	Yes (o), No ()	Size	A4
Note					
Classified	Open(o), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)					
<p>The theoretical and experimental study of the propagation and radiation of an A_0 leaky Lamb wave in a plate waveguide sensor has been carried out. In the plate waveguide sensor, the A_0 leaky Lamb wave is utilized for the single mode generation and the effective radiation capability in a fluid. The plate waveguide sensor which consists of a plate waveguide, a teflon wedge and an ultrasonic sensor has been designed and manufactured. The tone-burst excitation of high power long pulse should be applied to minimize the dispersion effect in 10 m long distance propagation of the A_0 Lamb wave. A novel technique which is capable of steering a radiation beam of a waveguide sensor without a mechanical movement can be achieved by a frequency tuning method of the excitation pulse in the dispersive low frequency range of the A_0 Lamb wave. The characteristics of radiation beam of ultrasonic waveguide sensors has been investigated by the beam profile measurements according to the plate thickness, the radiation aperture length, the pulse cycles and the excitation frequency. The design parameters of the plate waveguide sensor has been optimized. The C-scanning experiments in water have been carried out for the performance of the optimized ultrasonic waveguide sensor. The possibility of C-scan visualization using the plate waveguide sensor has been verified.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Waveguide Sensor, Under-Sodium Visual Inspection, In-Service Inspection, Sodium-cooled Fast Reactor, KALIMER-600, Leaky Lamb wave, A_0 mode, Beam profile			