

유도초음파에 대한 이해와 응용

Understanding and Application of Ultrasonic Guided Waves

조 윤 호*
 Younho Cho*

1. 서 론

산업전반에 걸쳐 초음파를 이용한 정밀진단은 산업설비나 기계구조물의 안전성 확보를 위한 비파괴평가로 부터 여러 산업생산품의 품질검사에 이르기까지 매우 폭넓게 응용되는 기반기술이다. 초음파와 음향방출법을 망라한 음향학적 평가기술은 학술적 연구주제로서 뿐 아니라 산업현장의 응용기술로서 비파괴평가 분야의 근간을 이루어왔으며, 와전류, x-ray, 자분탐상 등의 여타 응용기술에 기반을 둔 비파괴시험법과 마찬가지로 산업설비와 생산품의 첨단화에 발맞춰, 음향학적 비파괴평가 기술과 관련 장비 또한 보다 민감하고, 정량적이며, 경제적이어야 한다는 학술적 도전을 받고 있다. 이에 대한 대안으로서 복잡하고 다양한 피검사체의 형상을 따라 원거리를 진행할 수 있는 유도초음파(Ultrasonic Guided Waves)를 활용한 평가법은 학술적 가치와 기존검사법의 한계를 극복할 수 있는 여러 기술적 장점을 갖고 있으며, 이미 비파괴시험 연구분야의 새로운 연구주제로서 뿐만 아니라 상업화된 검사기술로서 국내·외에 큰 반향을 불러 일으키고 있는 실정이다.

이러한 유도초음파를 이용하여 실제 산업설비와 기계구조물의 정밀안전진단과 코팅재료 및 각종 신소재의 품질검사에 적용할 경우, 기존의 종파와 횡파를 사용한 국부(local)검사기법에 비해 유도초음파기법은 두께가 아주 얇은 시험체까지도 검사가 가능하고, 탐촉자의 이동없이 고정된 지점으로부터 대형 설비전체를 한번에

탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거없이 구조물이 설치된 그대로 검사를 수행할 수 있는 경제적으로도 획기적인 장점을 가지고 있다. 그리고 기존의 측정시간보다 단축됨은 물론 현재의 초음파검사법으로는 접근이 어려운 부위에 대해서 원거리 탐상이 가능하며 다양한 모드의 선택을 통한 측정민감도를 향상시킬 수 있다. 무엇보다도, 타 산업분야에 비해 단순 노동 집약형 산업기술로 인정받기 쉬운 국내 비파괴산업의 상황을 고려해 볼 때 비파괴평가 연구분야의 첨단성과 기술집약성을 확인시켜줄 수 있는 적합한 학술주제이며 기술이라고 사료된다.

본 논문은 최근 각종 산업설비 및 생산품에 대한 첨단 비파괴평가기법으로서 그 가치를 인정받고 있는 유도초음파에 대한 학술적, 기술적 이해를 돕고, 이에 대한 연구지면을 확대하기 위한 목적이라 기술되었다. 이에 따라, 유도초음파의 학술적 정의로부터, 물리적 특성, 종류, 관련 연구의 배경 및 추세, 기존 비파괴평가와의 기술적 비교분석 및 응용범위에 이르기까지 유도초음파에 대한 기초적 지식을 필요로 하는 독자를 위해 가능한 범위에서 복잡한 수식을 배제하고, 전체적인 물리적 개념의 이해를 겨냥하여 정리하여 보았다. 아무쪼록 부족한 식견으로나마, 지난 1세기 동안 수많은 선학에 의해 다져진 유도초음파의 연구 역사와 업적이 큰 오류없이 여러 독자 들게 전달되었으면 하는 작은 바람으로 이 글을 시작하고자 한다.

2. 유도초음파의 용어정의, 연구배경 및 연구동향

각종 기계설비 및 구조물에서부터, 전자제품의 마이크로칩에 이르기까지, 모든 산업설비와 생산품들은, 접합, 코팅 등에 의해, 각 부위가 다양한 형태의 도파체(waveguide)로 이루어져 있다. 이들 도파체내로 전파되는 유도초음파를 이용한 비파괴평가연구는 최근 들어 국내 외적으로 많은 관심을 불러일으키고 있으나, 비파괴평가 분야에서의 그 응용잠재성과 상업적 가치에도 불구하고 국내에는 아직 폭 넓은 연구저변과 기반이 확립되지 않은 상태이다[1-7]. 유도초음파는 기존의 누한체내 종파나 횡파와 달리 입사각도, 가진 주파수, 판재의 재질과 두께, 접합층의 두께에 민감하게 반응하는 특성에 기인하여 이론적으로 해석하여 이를 비파괴평가에 응용하기 위해서는 그 다양한 물리적 특성에 관한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

국내의 비파괴평가연구 및 산업분야에서는 오랜 기간 유도초음파가 판파(plate waves) 또는 램파(Lamb waves)의 이름으로 알려져왔다. 일반적으로 국외 비파괴검사분야의 정식학술용어로는 다양한 형상과 음향학적 경계조건하의 피검사체내에서 그 기하학적 형상을 따라 전파하는 모든 종류의 초음파모드를 포괄적으로 일컬어 유도초음파(guided waves)라고 하며, 90년도 중반부터 국내학술용어로 사용되기 시작하였다[2].

유도초음파의 대표적인 한 종류로 불려온 램파는 2차원 탄성학의 평변형률(plane strain)조건하에서 자유표면(traction free) 경계조건을 갖는 등방성 균질판재의 단면을 파동전파방향에 평행하게 정의하였을 때 이 단면내에서 정의되는 유도초음파로서, 19세기말 이 같은 초음파모드의 존재가 가능성을 이론적으로 규명해낸 영국의 수리물리학자 H. Lamb경을 기리기 위해 사용된 표현이다[8]. 이후 Worlton은 원형 평판에 대한실험을 통해 유도초음파의 존재에 관한 Lamb에 의한 이론적 추론이 맞았음을 실험적으로 증명하였다[9]. 이후 60년대말 Viktorov 등에 의해 램파에 국한된 최초의 유도초음파의 학술서적[10]이 발표된 후, Lamb의 단일 판재 모델로부터 발전된, 비균질재료, 이방성재료[11-13], 점탄성재료[14-15], 적층구조[11-15]를 포함한 다양한 판구조형태의 피검사체내에서 정의되는 유도초음파를 판파라고 부르게 되었다.

판재내의 유도초음파인 판파는 일반적으로 판파가 정의된 평면내의 입자변위(particle displacement)만으로 표현하는 2차원 파동을 의미하는데 이와 달리, 판재의 길이

방향으로 전파하면서 그 입자의 변위는 파동전파의 평면에 대해 수직인 성분만을 갖게 되는 유도초음파를 수평횡파형(shear horizontal) 유도초음파로 정의하며 이를 약하여 수평횡파, 또는 SH(Shear Horizontal)파라 한다[16-18]. 수평횡파의 경우는 그 모드특성이 Lamb형 유도초음파에 비해 이론적으로 보다 손쉽게 해석될 수 있으며 그 특성방정식(characteristic equation)의 해가 엄밀해의 형태로 주어지게 된다[16-18]. SH파의 경우, 최근 들어 Emat형 탐촉자를 통한 비접촉식 송·수신의 장점을 살려, 비파괴검사현장에서도 널리 사용되고 있는 유도초음파이며 특히, 피검사체의부로의 에너지유실이 우려되는 경우에도 판파에 비해 감쇄효과를 상대적으로 덜 나타내며 원거리탐상에 사용될 수 있는 것으로 알려져있다. 또한, 유도초음파의 전파방향과 평행하게 위치한 종방향 결합의 탐상에도 우수한 탐상민감도를 갖고 있으며, 비파괴검사시 판파에 비해 상대적으로 단순한 모드변환을 경험하게 되어 수신신호의 해석이 용이한 기술적 장점도 함께 갖고 있다.

산업설비의 여러 피검사체는 크게 판재형 구조와 대구경 파이프(pipe)나 소구경 튜브(tube)와 같은 원통형 구조로 나뉘어질 수 있으며, 원통형 도파체(waveguide)내 유도초음파의 존재와 그 모드해에 대한 해석방법은 판재에 대한 Lamb의 연구 뒤 반세기후, 자유표면경계조건하의 등방성, 균질 단일 원통구조에 대한 Gazis의 연구를 통해 이론적으로 제시되었다[19]. 이 같은 유도초음파를 원통형 유도초음파(cylindrical guided waves) [16,19]로 정의하는 것과 비교하여 파동전파에 대해 수직인 원통형 도파체의 단면상에서 원주방향으로 전파하는 유도초음파를 원주형 유도초음파(circumferential guided waves)로 정의한다[16]. 원통형 구조물은 판형 구조와 달리 두께방향으로 뿐아니라 원주방향으로도 닫혀진 좌표계(closed coordinates)를 갖고 있으며 이에 따라, 유도초음파의 모드해 또한 축대칭형(axi symmetric) 모드그룹과 비축대칭형(non axi-symmetric) 모드그룹으로 나뉘게 되어 판파 보다 더욱 다양하고 복잡한 모드해를 나타내게 된다[16,19]. 원통형 유도초음파의 축대칭형 모드그룹은 다시 영문자 L과 T로 표시되는 종형(longitudinal) 및 비틀림형(Torsional) 유도초음파로 나뉘게 되며, 비축대칭형 모드그룹은 영문자 F로 나타내는 굽힘형(Flexural) 유도초음파로 정의된다[16]. 이상의 원통형 좌표계내에서 발생가능한 축대칭형 유도초음파모드는 원통형 구조의 반경대비 두께의 비가 감소하여 결과적으로 원주방향으로의 곡

를반경에 비해 도파체의 두께가 무시할만 할 경우, 해당 구조물과 재료의 판파모드로 수렴하게 된다. 일반적으로 금속재료의 원통형 구조물의 경우, 반경대비 두께의 비가 0.1이하인 경우는 판형 구조내 유도초음파문제로의 근사적인 해석이 가능한 것으로 알려져있다[16].

3차원 임의 형상 단면을 갖는 도파체(waveguide)내의 유도초음파에 대한 기반연구는 산업현장의 다양한 단면 형상을 갖는 구조물에 대한 비파괴검사를 위해 절실히 요구되어 왔다. 이에 대한 관련 연구는 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치해석적 방법을 통해 그 물리적 특성이 규명되어 가고 있는 실정이나, 아직 국·내외적으로 그 기반연구가 원통형 구조내 유도초음파나 판파에 비해 취약한 상태이다[20-21].

학술적으로는 판재나 원통형 구조와 같이 도파체의 단면이 유한한 두께를 갖는 경우외에 반무한체의 외부경계면이나 접합경계면을 따라 진행하는 Rayleigh형표면파, 스톤리(Stonely)파, 러브(Love)파 등도 피검사체의 기하학적 형상을 따라 파동전파가 유도된다는 관점에서 유도초음파로 분류될 수 있으며[16-18], 복합재료를 포함한 박판형 신소재에 대해 널리 활용되는 음향초음파(acousto-ultrasonic)법이나 최근 국내에 소개된 모드형 음향방출법(modal acoustic emission)법등도 유도초음파 신호를 이용한 비파괴평가법에 해당된다[22-25].

유도초음파가 기존의 종파나 횡파에 비해 상대적으로 재료의 감쇄영향을 덜 받으며 원거리를 전파할 수 있다는 물리적 특성은 고정된 위치로부터 대형 피검사체에 대한 원거리탐상이 가능한 기술적 장점을 제시해준다. 이에 따라, 반무한체의 매질에 접하고 있는 피검사체내로 유도초음파를 발생시킬 경우, 외부 반무한체로의 유도초음파 유실(leakage)에 대한 연구는 원거리 검사법으로서의 유도초음파법의 장점을 살리며 그 탐상거리와 민감도를 개선하기 위해 매우 중요한 연구주제이다[3,16,26,27]. 해당 문제의 경계조건으로부터 유도된 경계치문제의 해를 복소수(complex variable)영역에서 얻음으로써 외부 반무한체로의 각 유도초음파모드의 에너지 유실정도, 즉 감쇄계수를 이론적으로 해석하고 이를 실험적으로 비파괴검사의 시스템개발에 활용하는 연구도 활발히 발표되어왔다[3].

유도초음파법을 포함한 모든 음향학적 비파괴평가법은 피검사체내의 산란(scattering)신호를 분석함으로써 검사를 수행하게 되고 이에 따라, 유도초음파의 산란현상과 그 신호를 물리적으로 예측하는 연구의 중요성을 간과할

수 없다. 특히, 유도초음파의 경우, 종파나 횡파 탐상과 달리, 독립적인 여러 모드를 갖고 있으며, 이는 산란신호들이 다양한 모드로의 변환을 통해 수신된 신호의 해석이 용이하지 않을 수 있음을 의미한다. 나아가, 정량적인 비파괴검사를 수행하기 위해서는 이 같은 유도초음파 산란신호의 모드변환현상을 물리적으로 보다 상세히 규명할 필요가 있다[4,5,7,16,28]. 유도초음파의 다중모드로의 모드변환현상은 기존의 무한체내 종파나 횡파의 산란에 대한 모델보다 학술적인 난이도가 더욱 높다고 알려져 있으며[4,7,16,28], 이에 대한 접근 방법으로는 유한요소법, 유한차분법과 경계요소법등의 수치적인 접근법이 활발히 시도되고 있다[4,7,16,28]. 특히, 유도초음파의 경우는 80년대 이후, 이들 모델링기법에 유도초음파의 이론적 모드해를 중첩시켜 도파체의 경계조건을 만족시키는 혼합형 모델링기법이 널리 쓰이고 있으며, 일반적인 초음파 산란문제에 많이 활용되는 경계요소법을 유도초음파의 산란문제에 적용하는 모델링기법이 최근에 발표된 바 있다[4,7]. 이 분야의 연구는 평면변형률조건이나, 축대칭형태의 유도초음파 산란모델이 제시되고 이를 실험적으로 검증하는데 제한되어왔으며[4,5,7,28], 보다 일반적인 3차원 유도초음파 산란신호에 대한 연구는 전 세계적으로 현재 가장 주목받고 있는 유도초음파 연구주제이다.

이상에 언급한 다양한 형태의 유도초음파기반연구를 토대로 이를 비파괴검사분야에 실제적으로 적용하려는 노력이 70년대 이후 활발히 시도되어, 현재는 많은 응용분야에서 상업적인 검사기법과 시스템으로 제안되고 있다[1,2,6,15,16,28]. 초기 유도초음파 비파괴응용연구의 결과로 Silk 등이 발표한 tube 검사결과[29] 등을 생각해볼 수 있으나, 이들의 연구에서는 사용된 유도초음파모드에 대한 명확한 규명이나, 탐촉자 제작법과 모드선택기준과 같이 물리적 기반데이터에 기초한 비파괴검사연구가 이루어졌다고는 보기어렵다. 이에 비해, 80년대 이후 Rose와 Cawley 등에 의해 주도되어온 연구결과는 세부 응용사례별로 유도초음파의 탐촉자를 제작하고 최적의 모드선택과 신호해석의 기준을 유도초음파의 물리적인 특성에 기초하여 제시함으로써 유도초음파검사법의 실용화를 가능케 하였다는 점에 의미를 둘 수 있다[1,2,6,15,16,28].

최근의 유도초음파연구는 초기 정성적 검사법의 한계를 벗어나 수신된 신호로부터 정량적인 평가가 가능한 수준으로 발전되고 있으며, 선진 각국의 비파괴검사분야에서 집중적인 관심속에 그 지면이 급속히 확대되고 있다[1,4,5,7,28,30]. 특히, 자왜현상이나 레이저여기법과 같

은 비접촉방식의 유도초음파 송·수신법[31,32]이 제안됨으로써 현장에서의 유도초음파신호수집이 자동화되거나 보다 효율적인 시스템으로의 개발이 가능하게 되는 기술적 발전이 기대되고 있다. 나아가, 향후 기존의 종파나 횡파검사법과 같이 유도초음파법에 대해서도 관련 시스템과 신호해석법등을 위한 규격과 규정의 마련이 시급한 단계에 이르고 있으며, 이에 대한 국·내외의 학술적 뒷받침이 절실히 요구된다고 사료된다.

3. 유도초음파의 물리적 정의

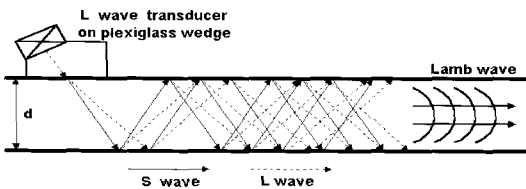


Fig. 1 Oblique incidence method for generating guided waves)

Fig. 1과 같이 피검사체의 내부로 사각입사된 종파나 횡파는 경계면에서의 반사시 모드변환(mode conversion)을 통해 수 많은 종파 및 횡파로의 다중반사를 일으키게 되고 피검사체의 두께에 비해 모드변환된 종파 및 횡파의 파장이 무시될 수 없는 경우 반사된 이들 부분 파동 모드(partial wave modes)들 사이에는 상호 간섭(interference)과 중첩(superposition)이 발생되게 된다. 이 같은 파동의 중첩은 상·하 경계면에서 반사된종파와 횡파, 각 부분 파동 모드의 파동벡터(wave vector)성분중 피검사체의 종방향으로 진행되는 파동벡터성분을 나타내는 k 성분을 제외한 두께방향으로의 파동벡터성분인 p, q로 표시된 파동성분사이의 상쇄간섭(destructive interference)효과를 발생시킨다.

$$p^2 \equiv k_L^2 - k^2 \equiv \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$q^2 \equiv k_T^2 - k^2 \equiv \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2$$

식 (1)에서 p, q는 모드변환에 의해 피검사체내에서 종파와 횡파로 다중반사된 부분 파동 모드의 파동벡터와 길이방향벡터성분 k로부터 피타고라스의 삼각형법을 이용하여 추출해낸 두께방향 파동벡터성분을 나타낸다. 이와 함께, 피검사체 길이방향으로의 보강간섭(constructive

interference)효과를 통해 Fig. 1과 같이 두께방향이 아닌 종방향으로 전파하게 되는 새로운 형태의 초음파가 합성되게 되는데 이를 유도초음파(guided waves)라고 부른다.

4. 유도초음파의 물리적 특성

4.1. 유도초음파의 파형구조와 분산성

유도초음파는 위에서 언급한 바와 같은 파동간섭조건이 가능한 특성의 재료상수(종파, 횡파속도 및 밀도), 두께, 주파수하에서만 발생이 가능하며 이들 조건의 변화에 따라 길이방향으로의 파동벡터성분이 각기 다른, 다시 말해 파동의 위상속도가 다른, 다양한 모드가 발생되게 된다. 기존의 종파 및 횡파와 달리, 파동 전파시 유도초음파 각 모드의 입자변위(particle displacement)는 파의 진행방향에 평행한 성분과 수직인 성분을 모두 갖게 되며, 이들은 파형구조(wave structure)라고 불리는 피검사체의 두께방향에 대한 특성의 분포를 나타냄으로서 특정 유도초음파모드의 검사민감도와 송·수신민감도를 결정짓는 인자가 된다. 이 같은 물리적특성 때문에, 유도초음파를 파동의 간섭을 통해 종파와 횡파로부터 합성된 새로운 형태의 제3의 초음파 모드로서 이해하는 것도 가능하리라 사료된다.

유도초음파의 대표적 물리적 특성중 하나는 균질 등방성 무한매질내의 종파나 횡파와 달리, 각 파동모드의 속도가 주파수에 따라 변화하는 분산적(dispersive) 특성을 갖고 있다는 점이다. 이는 주파수 변화시 위에서 언급한 피검사체내의 간섭조건이 바뀌게 되고 이에 따라 유도초음파의 전파방향으로 새로운 파동벡터가 얻어짐에 기인한다. 이에 따라, 유도초음파신호는 매질내로 전파하면서 신호지속시간(pulse duration time)이 길어지는 분산적 양상을 띄게되며, 이 같은 분산성은 비파괴검사시 유도초음파모드를 확인하거나 탐상결과를 유추하는 또 하나의 측정인자로 활용되기도 한다.

유도초음파신호를 정확하게 발생시키고 이를 수신하여 판독하기 위해서는 피검사체의 형상, 두께, 재질, 입사각 및 주파수등의 탐상조건에 따라 가능한 해당 유도초음파모드를 예측하고 이에 따라 신호를 해석하는 것이 가능하여야한다. 이는 분산곡선(dispersion curves)이라고 하는 주파수와 해당 유도초음파모드의 속도사이의 함수관계를 나타내는 이론적 데이터선도를 이용하여 가능하게 되며 이에 대한 해석방법은 여러참고문헌에 상세히 기술되어 있다

[16-18]. 분산곡선은 피검사체의 재질과 형상에 따라 다양하게 변화하며, 유도초음파연구시 가장 어렵고도 핵심적인 부분은 해당 피검사체의 재질과 형상하에서 발생가능한 유도초음파모드를 그 분산곡선으로 부터 정확히 예측할 수 있는가 하는 점이다. 지난 20여년간의 집중적인 연구노력 [1,11-19,26,27]은 여러 유도초음파모드의 물리적 특성을 이론적으로 규명하는 것을 가능하게 하여, 현재는 비균질성, 이방성, 적층구조, 임의형상단면등을 포함한 여러 실제적인 구조물에 대한 유도초음파 비파괴검사신호를 물리적으로 해석할 수 있게 되었다. Fig. 2는 각종 피검사체의 형상변화에 따른 분산곡선상의 유도초음파모드변화를 나타내고 있으며 Fig. 3은 유도초음파모드특성에 대한 이론적 해석이 가능한 다양한 적층구조물을 제시하고 있다.

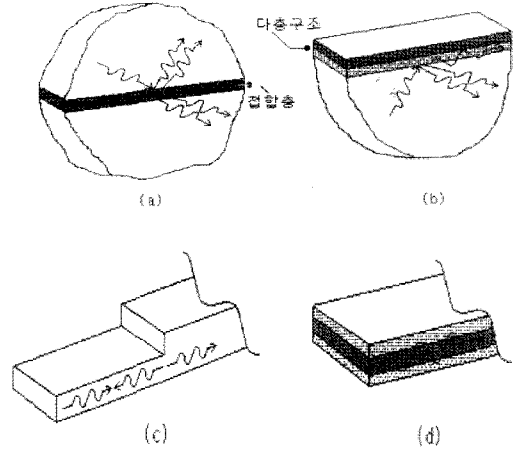


Fig. 3 유도초음파 모드특성에 대한 이론적 해석이 가능한 다양한 적층구조

- (a) 두 반무한체내에 결합된 박판구조
- (b) 반무한체상의 적층구조
- (c) 두께변화를 갖고 있는 적층 구조
- (d) 비균질 및 이방성 적층구조

4.2. 위상속도 분산곡선

유도초음파의 발생은 피검사체가 되는 도파체 (waveguide)의 두께에 비해 주파수와 재료상수(종파 및 횡파속도)로부터 계산된 중, 횡파형 부분 파동 모드의 파장이 무시될 수 없거나 더 크게되는 경우에 가능하게 되며, 이는 주파수와 구조물의 곱인 fd (f ; 주파수[MHz] d ; 두께

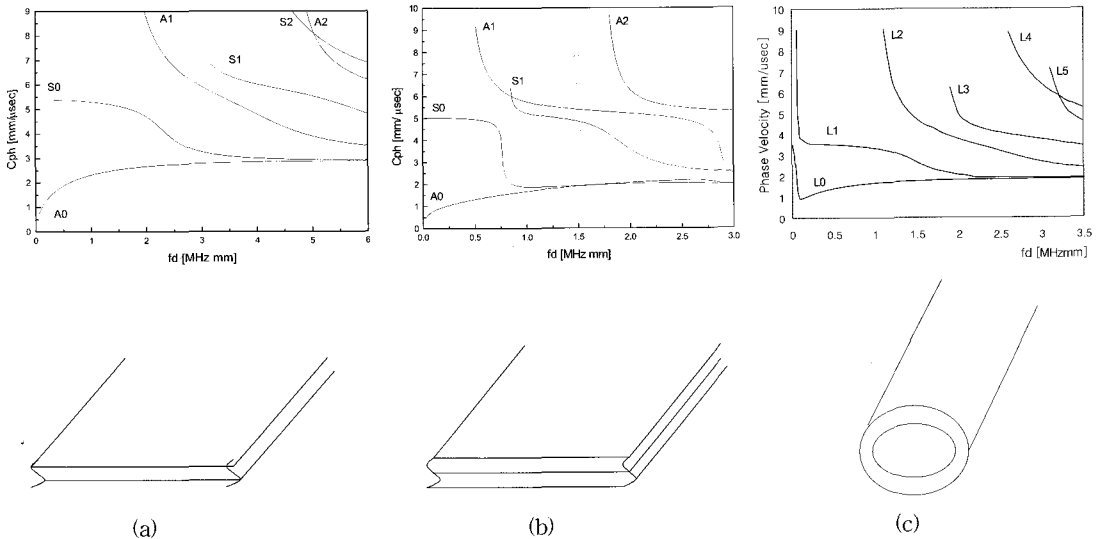


Fig. 2 구조물의 형상에 따른 위상속도 분산곡선(Dispersion Curve)의 변화

- (a) 자유표면 경계조건을 갖는 단일판재
- (b) 자유표면 경계조건을 갖는 비균질 적층(이층) 구조
- (c) 자유표면 경계조건을 갖는 단일 원통형구조

[mm]의 범위로 결정된다. 일반적으로 금속재질 피검사체의 경우는 fd값의 범위가 0.1 에서 10.0 MHz mm 내외인 탐상조건하에서 유도초음파를 발생시켜 비파괴검사를 수행하게 된다. 이는 통상적으로 알려진 유도초음파검사법의 적용대상이 얇은 두께를 갖는 박형구조물이라는 막연한 개념이 피검사체의 해당 두께에 대해 적당한 주파수를 사용해야 한다는 구체적 개념으로 전환되어야 함을 뜻한다. 또한 두께변화에 따라 주파수를 조절하여 동일 fd값의 탐상조건을 만족시키게 되면 동일 유도초음파에 의한 검사가 수행될 수 있음을 의미한다. Fig. 4는 자유표면경계조건하의 단일판재내에서 발생가능한 유도초음파의 위상속도 분산곡선을 나타낸다. Fig. 4에 제시된 유도초음파모드중, 영문자 A는 비대칭형(Anti-symmetric)모드를 의미하며 이는 파동전파시 판재내의 입자변위중 두께방향의 변위성분의 분포가 파동전파면상의 판재내 중심축에 대해 대칭이 되어 판재의 변형이 이 중심축에 대해 비대칭형을 이루게되어 굽힘형(bending)변형이 전파됨을 의미한다. 영문자 S는 판재의 중심축에 대해 대칭형(Symmetric)변형을 나타내는 유도초음파모드를 나타내며 이에 따라 두께방향의 입자변위분포는 두께방향으로 크기는 대칭이나 부호가 반대가 되는 skew-대칭형분포를 갖게된다.

fd값이 극단적으로 커지는 경우는 피검사체내 다중반사된 종·횡파형 부분 파동 모드의 파장이 두께에 비해 무시될 수 있음을 의미하며 이는 물리적으로 파동에너지가 반무한체의 표면에 집중되는 표면파의 경우에 해당되고, 표면파의 발생조건을 넘어서는 fd값의 범위에서는, 상호간섭없이 지그재그(zig-zag)로 진행되는 사각탐상(oblique incidence inspection)시에 모드변환된 종파 또는 횡파를 나타낸다. 이에 따라, 분산곡선상의 각 유도초음파모드의 위상속도는 fd값의 증가에 따라 피검사체의 종파속도 및 표면파속도로 수렴하는 양상을 띄게된다.

반대로 fd값이 아주 작아져 입사파의 파장에 비해 피검사체의 두께가 무시될 수 있거나, 사각입사시 입사각이 0°에 가까워 거의 수직입사에 해당되면 유도초음파와 같이 피검사체의 길이방향으로 전파되는 파동현상대신 도파체의 전체에 진동현상이 야기되는 구조진동모드가 발생된다. 이를 파동역학의 관점에서는 파동전파의 방향성을 정의할 수 없는 정지된 파동상태, 정지파(standing wave)라고 부르며 이 경우는 Fig. 4에 제시된 바와 같이 해당 유도초음파모드의 위상속도가 무한대로 발산하게된다. 유도초음파의 파장은 기존의 종파나 횡파의 경우와 마찬가지로 위상속도를 해당 주파수로 나누어준 값이 되

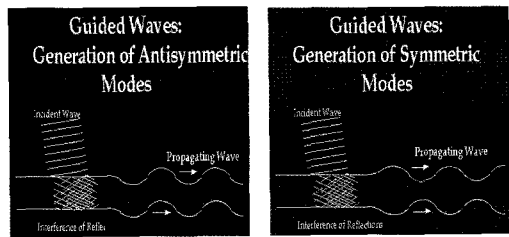
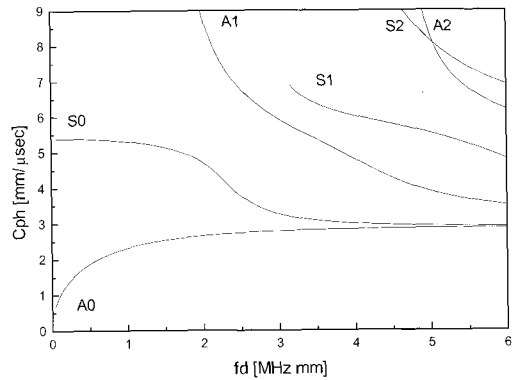


Fig. 4 자유표면경계조건하의 단일판재내 유도초음파의 위상속도 분산곡선과 모드형상비교; 비대칭형(Antisymmetric)과 대칭형(Symmetric) 모드

며, 이로부터 이 값이 구조진동모드에 가까운 유도 초음파 모드의 경우에는 파장이 무한대에 가까운, 즉 동시에 구조물의 넓은 범위에 파동현상이 발생할을 알 수 있다. 이 같은 모드를 단절모드(cut-off mode)라고 하며 이에 해당되는 주파수를 단절주파수(cut-off frequency)라고 한다. 이는, 이 같은 주파수의 fd값보다 작은 가진(excitation)조건하에서는 해당 유도초음파의 전파현상이 단절되어 나타나지 않는다는 의미를 띄고 있다. 일반적으로 고정된 도파체의 두께에 대해 상대적으로 저주파 영역의 fd값을 벗어난 경우는 fd값의 증가에 따라 모두 이와 같이 구조진동형 파동모드인 단절모드로부터 파동전파가 도파체를 따라 유도되는 유도 초음파모드로 발전하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, 유도 초음파의 각 모드는 해당 fd범위에 따라 차이는 있으나 일반적으로 위상속도가 주파수에 따라 변화하는 분산성을 갖고 있으며, 단절모드의 경우는 그 분산적 특성이 주파수나 피검사체의 두께에 대해 매우 민감하게 변화하게 된다.

4.3. 군속도 분산곡선

유도초음파의 분산성은, 기존의 무한체내 종파나 횡파와

달리, 유도초음파의 전파속도가 재료상수로서 고정된 값이 아닌 검사시 교정과 선택이 필요한 변수임을 나타낸다. 아울러 시간영역상에서 수신된 초음파신호는 여러 주파수성분에 해당되는 시간조화(time harmonic)신호의 합으로 이루어진 군집형(group-type) 신호이며 이들 개별 시간조화신호가 진행되는 속도인 위상속도가 주파수별로 각기 다르다는 점을 고려할 때, 오실로스코프상의 시간영역에서 수신된 군집형 신호의 전파속도를 위상속도와 물리적으로 다르게 정의할 필요가 생기게 된다. 이를 유도초음파연구시에 군속도(group velocity)라 정의하며 실제 비파괴검사시 수신된 다중 주파수성분의 유도초음파신호의 에너지가 피검사체내로 전파되는 속도를 의미한다는 뜻에서 에너지속도(energy velocity)라고 하기도 한다. Fig. 5는 자유표면경계조건하의 단일 원통형 구조내로 전파되는 유도초음파의 위상속도와 군속도 분산곡선을 나타낸다. 분산곡선상의 영문자 L(Longitudinal)은 원통형 도파체내의 종방향으로 전파되는 축대칭형 유도초음파모드를 나타내며 관제내의 유도초음파모드인 S0와는 달리, L1모드 역시 단절모드를 갖고 있음을 알 수 있다.

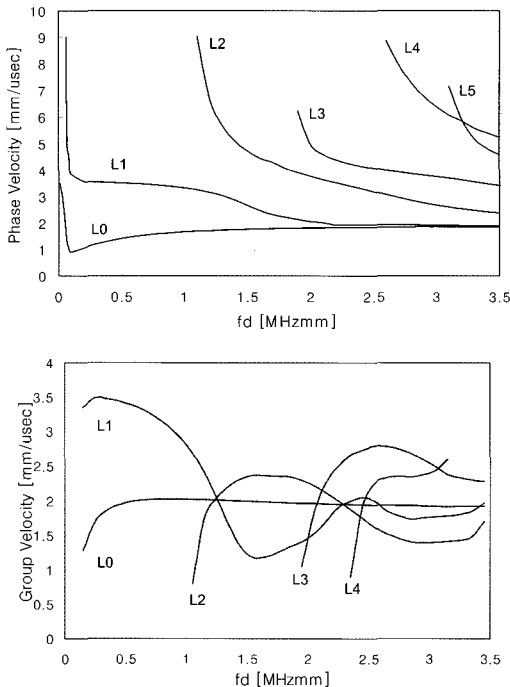


Fig. 5 Phase and group velocity dispersion curves for a brass tube(inner radius = 7.0mm, outer radius = 8.0 mm)

이에 반해, 무한체내에서 정의되는 종파와 횡파의 경우는 비분산적 특성에 의해 단일 주파수성분을 갖는 개별 시간조화신호의 전파속도와 다중 주파수성분의 실제 군집형 수신신호의 전파속도가 같게 되어 물리적으로 위상속도와 군속도는 동일 값을 나타내게 된다.

이론적으로 군속도는 해당 위상속도 분산곡선을 수치적으로 미분하여 결정하게 되며[16,18]. 이 과정에서 특정 fd값에서의 유도초음파모드의 군속도는 그 해당지점의 위상속도값과 위상속도의 변화율(기울기)로부터 계산되게 되며 각각의 유도초음파문제를 완벽히 해석하기 위해서는 이와 같이 위상속도와 군속도 한쌍으로 이루어진 분산곡선을 필요로 한다.

어떠한 유도초음파문제의 경우에도 군속도의 최대값은 피검사체의 종파속도를 넘을 수 없으며, 이는 파동역학적 관점에서 볼 때, 종파와 같이 파동의 전파방향과 입자의 진동방향이 평행할 경우 가장 효율적으로 파동현상이 공간상에서 이동하게 되고 이는 가장 빠른 파동전파속도로 나타남을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 위상속도상의 분산성이 무시될 수 있을만큼 작은 경우의 군속도 값은 해당 위상속도에 가까워지며 단절모드의 군속도는 0로 수렴하게 된다. 이는 단절모드의 경우 실제 파동에너지가 전파되지 않고 이에 따라 그 전파속도 역시 0에 가까워짐을 의미한다.

4.4. 유도초음파의 감쇄특성

Fig. 6은 알루미늄 관제내 유도초음파가 외부에 접촉하고 있는 유체(물)로 에너지가 유실되면서 감쇄될 때 그 감쇄계수를 나타내고 있다. 이 같은 데이터는 유도초음파의 전파특성을 해석하기 위한 경계치문제를 복소수 영역에서 수치적으로 해석함으로써 이론적으로 얻을 수 있게 된다[1,16]. 이를 통해, 유도초음파의 각 모드는 코팅이나 기타 외부 매질에 접촉된 피검사체내에서 주파수 변화에 따라, 그 전파거리가 현저하게 달라질 수 있으며, 최적의 모드선택기준이 유도초음파의 침투성(penetration)에도 크게 좌우됨이 확인된다.

물리적으로는 유도초음파의 이 같은 감쇄특성은 앞서 언급한 파형특성에 지배적인 영향을 받음이 밝혀졌다 [1,16]. 예를 들어, 특정의 모드가 지니고 전파하는 단위 에너지당 피검사체 표면에서 발생가능한 수직성분의 입자변위가 커질수록 외부 유체로의 에너지유실은 커지게 된다. 이 같은 추론은, 외부로 유실되는 파동이 종파형태의 유체내 음향파임을 고려한다면 물리적으로 매우

타당한 결론이라 판단되며 외부 접촉매질의 점도(viscosity)가 무시될 수 없는 경우는 수직방향 입자변위 뿐만 아니라, 표면에서의 수평방향 입자변위도 함께 고려되어야 한다.

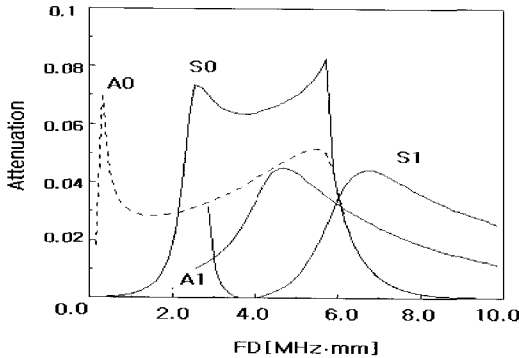


Fig. 6 The variation of guided wave attenuation in an aluminum plate subjected to a water loading

4.5. 기타 유도초음파평가법의 최적화를 위해 고려해야 할 물리적 특성

이상에 언급한, 비파괴검사시 숙지해야할 기본적인 유도초음파의 다양한 물리적 특성외에 보다 정량화된 검사를 위해 추가로 고려해야할 전문적인 사항들을 요약하면 다음과 같다.

- 각 모드 및 주파수에 따른 민감도, 가진성(excitability), 수신성, 해상도의 정규화(normalization)
- 신호해석의 용이성과 단일 모드 송·수신을 고려한 분산곡선상의 최적 탐상 위치 선정
- 탐촉자의 형상과 수신신호와의 연관관계: 유도초음파 빔특성, skew 각도등
- 유도초음파 산란시의 다중 모드변환에 따른 신호해석 정규화
- 정량적 평가를 위한 유도초음파 신호해석의 신뢰성 확보(자가교정기법, 결합종류 및 형상구분 가능성, 비접촉식 탐상법의 접목)

5. 유도초음파연구의 접근방법

5.1. 유도초음파 전파 및 산란특성에 대한 접근방법

각종 재료나 구조물의 초음파 비파괴평가는 피시험체 내로 전파되는 탄성파의 산란신호를 분석하는데 기초함으로써 정량적인 비파괴 평가기법의 확립을 위해서는 고체 매질내 탄성파의 전파 및 산란현상에 관한 물리적 이해가 필수적으로 선행되어야 한다. 특히 입사되는 초음파의 파장이 피시험체의 두께에 비해 무시할 수 없을 경우에는 탄성파의 전파 및 산란특성이 매질내 산란체 뿐만 아니라 피시험체의 외부 경계면에서의 경계조건에도 크게 영향을 받게 되어 수신되는 초음파 신호는 더욱 복잡 다양하게 나타난다[4,7,28]. 최근 대형 구조물에 대한 광범위 평가법으로 많은 관심을 불러일으키고 있는 유도초음파(Ultrasonic guided wave) 탐상법이나 표면과 탐상법등이 이에 해당되며 이는 피시험체의 외부 경계면으로부터 다중반사된 초음파의 모드변환과 이들 산란파가 피시험체 내에서 중첩되는 과정에서, 입사된 초음파 음향파 매질내 산란체로 부터의 산란음장에 많은 영향을 주게되기 때문이다. 따라서 이 경우에는 실제 탐상조건에 맞는 초음파 신호를 예측하기 위해 피시험체를 유한체로 정의하여 초음파의 전파 및 산란에 관한 모델링을 수행하여야 한다.

일반적으로 유도초음파 전파에 관한 모델링 기법은 등방성재료와 이방성재료의 경우로 나누어 생각할 수 있으며, 주어진 모델의 표면 경계조건과 함께 전자의 경우는 지배방정식에 헬름홀츠 분리법(Helmholts Decomposition) [1,16-19]으로부터 유도된 파동 Potential을 이용하거나, 후자의 경우는 부분 파동 모드(partial wave mode) 중첩법 [12,13,16-18]을 적용하여 경계치 문제의 해를 구함으로써 각 모드의 전파속도와 입사신호를 얻게 된다.

유도초음파는 그 특성상 피시험체의 표면이 유체와 닿아 있을 경우 감쇄가 일어난다. 최근에는 감쇄가 없는 경우의 위상속도를 초기치로 하여 복소수 영역에서의 파수를 계산함으로써 유도초음파의 각 모드에 대해 주파수에 따른 감쇄의 크기를 계산하는 모델링 기법이 발표된 바 있다[1,27].

유도초음파의 전파에 관한 모델링과 달리 유한 두께의 피시험체 내에 존재하는 각종 결함과 같은 산란체를 포함한 초음파 산란 모델링은 다중모드 변환과 수치모델의 기하학적 복잡성에 기인하여 그 해석이 이론적인 방법으로는 어렵게 된다. 이를 극복하기 위해서는 임의의 산란

주기 및 피시험체 형상을 요소분할에 의한 수치적분의 도움으로 모델링 할수 있는 유한요소법(Finite Element Method)이나 경계요소법(Boundary Element Method)의 적용이 필수적이며 특히 파동문제와 같이 구하는 수치해가 모델의 경계면에서 중요시되는 경계치 문제의 경우에는 경계면에서의 수치해의 정확도와 모델링의 효율성을 고려하여 경계요소법이 널리 활용되고 있다[4,7]. 파동문제의 경계요소법은 무한체 내의 산란체에 대한 산란 모델링에 사용되는 외부영역 경계요소법(Exterior BEM)과 유한체내의 파동 산란 모델링을 위한 내부영역 경계요소법(Interior BEM)으로 나누어진다. 전자의 경우는 무한체 내에 고립된 산란체의 경계면을 분할하여 경계면의 경계 조건과 입사파동의 음향으로부터 산란체 표면의 산란음장을 얻게되며 후자의 경우는 산란체 표면뿐만 아니라 매질의 외부경계면을 모두 고려하여 전체 모델링 영역이 해석하려는 유한체의 내부영역으로 정의된다.

유도초음파의 산란문제를 해석하는 접근법으로는 유도초음파의 모드해를 내부영역 경계요소법과 결합한 혼합형 경계요소법(Hybrid BEM)[4,7]이 제시된 바 있다. 특히 기존 파동산란 문제의 수치 연구를 살펴볼 때 무한체 내의 산란문제에 경계요소법이 적용된 사례는 많이 보고된 바 있으나[33-35], 유도초음파의 산란과 같이 산란체와 외부경계면 모두로부터의 산란장을 고려해야 하는 것과 같은 수치해석의 어려움을 포함하는 산란 모델링에 대한 적용 예는 Cho 등의 연구[4,7]를 제외하고는 그 사례를 찾기 어려운 것으로 사료된다. 유도초음파의 전파 및 산란에 관한 수치모델은 시간조화(Time harmonic) 파동의 입사하에 있는 문제로 가정하는 경우가 많다. 시간조화 입사파동에 의한 주파수 영역의 신호로부터 시간영역 산란신호를 얻기 위해서 역 Fourier변환이 사용되며, 최근에는 3차원 초음파 모델 해석용 경계요소법 프로그램에 의한, 임의 형상 도파체내의 유도초음파의 전파특성이나 산란특성을 해석하는 연구가 시도되는 추세이다.

5.2. 실험적 유도초음파 송·수신방법

비파괴검사시, 유도초음파는 피검사체 표면에 기존의 종파또는 횡파형 초음파탐촉자와 웨지(wedge)를 사용하여 Fig. 7과 같이 특정의 입사각으로 초음파를 검사 입사시켜줌으로써 발생시킬 수 있으며, 이때 피검사체의 재질, 두께, 단면형상 및 주파수에 따라 해당 입사각도는 식(2)의 Snell의 법칙을 통해 계산된다[16].

Snell' Law

$$\frac{Vm1}{\sin \alpha} = \frac{Vm2}{\sin \beta} ; \frac{\text{아크릴초음파전파속도}}{\sin(\text{입사각})} = \frac{\text{유도초음파모드전파속도}}{\sin 90} \dots\dots\dots(2)$$

식(2)는 웨지재료를 아크릴로 선택하였을 경우에 해당되며 굴절각β가 90도인 것은 피검사체내에서 다중 반사된, 여러 종파 및 횡파형 초음파의 상호간섭에 의해 특정의 유도초음파모드가 발생되고, 이는 도파체가 되는 피검사체의 경계면에 평행하게 길이방향으로 전파하기 때문이다. 따라서 특정 유도초음파의 가진(excitation)을 위해서는 피검사체에 대한 위상속도 분산곡선으로부터 사용 주파수에 해당하는 특정의 위상속도를 정확히 결정하는 것이 선행되어야 한다. 특정 유도초음파를 수신하는 경우에도 동일 방법이 적용된다.

이상의 사각입사(oblique incidence)에 의한 유도초음파 송·수신법은 기존의 초음파 탐촉자를 활용할 수 있고, 웨지형상에 따라 다양한 유도초음파 탐촉자설계가 가능

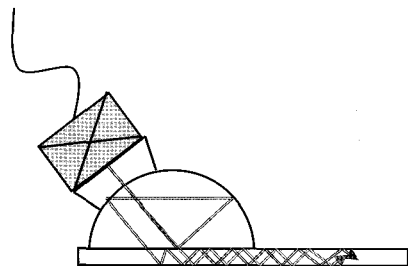
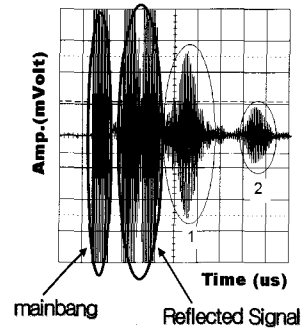


Fig. 7 사각입사에 의한 유도초음파발생 및 웨지내 다중 반사(multi-reflection)에 의한 모드중첩신호(main bang 신호)

하며, 유도초음파의 모드선택과 전파방향을 효율적으로 결정할 수 있다는 기술적 장점을 가지고 있다. 이와 함께, 사각입사방식은 Fig. 8과 같이 초음파 변환기와 구조물 사이의 초음파 입사각을 조절하는 보조적 중간매질인 웨지(Wedge) 재료의 음속보다 위상속도가 낮은 모드를 발생시키는데 많은 어려움이 있을 뿐 아니라, 초음파가 통과하는 웨지 재료내에서 생길수 있는 에너지 감쇄와 다중 반사에 의해 초음파모드의 정량적 신호분석이 용이하지 않거나 탐상민감도가 저하되는 등의 문제점도 함께 가지고 있다.

기존의 사각입사입사형 유도초음파 신호의 문제점을 실험적으로 개선하기 위해 최근 예는 Fig. 9에 제시된 바와 같은 다중 압전요소(multi piezo-electric element)를 이용한 배열형(array type) 변환기의 설계 및 유도초음파 송·수신에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[6].

이 같이 배열형탐촉자에 의한 유도초음파 가진방식은 Emat나 자왜형(magneto-striction type) 유도초음파에도 사용되는 특정 모드의 파장에 송·수신 조건을 일치시키는 방법[6,31]으로서 대구경 파이프와 같이 단일 압전재료로 대형화된 유도초음파 탐촉자를 제작하기 어려운 경우나 위상속도가 사각탐상의 웨지재료보다 낮은 모드를 송·수신하는데 사용된다. 특히 배열형탐촉자내 각 요소의 간격만을 조

절하여 모드선택을 할 수 있으므로 자동화된 유도초음파 탐상시스템 개발에 용이한 방식이며, 사각입사방식과 달리 주파수를 변화시켜 새로운 모드를 사용하고자 하는 경우에도 일정한 파장이 유지되어 파장대미 결함크기에 따른 민감도의 변화를 교정할 필요가 없는 기술적 장점을 갖고 있다. 배열형 탐촉자에 의한 입사방식은 전체요소를 동시에 가진하는 동일위상(in-phase) 가진방식과 요소간의 시간지연(time delay)을 이용하는 위상차(out of phase) 가진방식으로 나누어 진다[6,31]. 전자의 경우는 단순한 설계방식이 장점이나 모드변화를 위해 요소간격을 변화시켜야하며, 유도초음파신호가 탐촉자의 양방향으로 동시에 전파되어 수신된 신호가 복잡해지는 단점을 지니고 있다. 이에 반해, 후자의 경우는 고정된 요소간격을 유지하며, 단지 원하는 모드의 위상속도와 그 요소간격으로부터 계산된 시간지연을 배열형 탐촉자내 각 요소의 가진에 적용하여 특정의 모드를 선택하는 방식으로서 다중채널의 탐촉자 운용 및 신호수집 시스템개발을 위한 개발비용이 필요하게 된다. 또한, 최근의 연구 결과는 배열형 탐촉자내 요소크기, 갯수, 주파수 및 해당 유도초음파 모드에 따른 송·수신 신호를 이론적으로 정확히 예측하여 설계할 수 있는 기술적 방법을 제시해주고 있다[6].

사각입사시 유도초음파 발생가능 영역:

$$C_{ph} > C_{wedge}$$

사각입사시 유도초음파 발생 불가능 영역:

$$C_{ph} < C_{wedge}$$

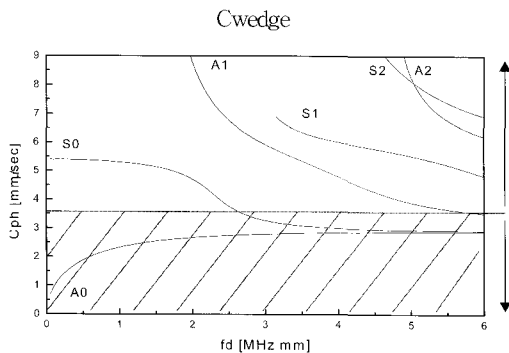
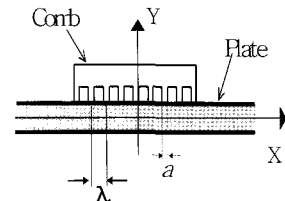
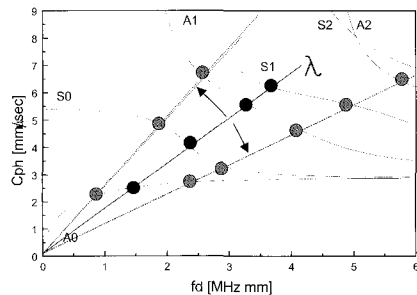


Fig. 8 사각입사방식에서 유도초음파의 발생 불가능영역 (위상속도가 웨지속도보다 낮은 경우: 빗금친 영역)



(a)



$$\lambda = \frac{C_{ph}}{f} = \text{constant}$$

(b)

Fig. 9 배열형 변환기에 의한 유도초음파 송·수신

(a) 배열형 변환기의 형상

(b) 분산선도의 적용

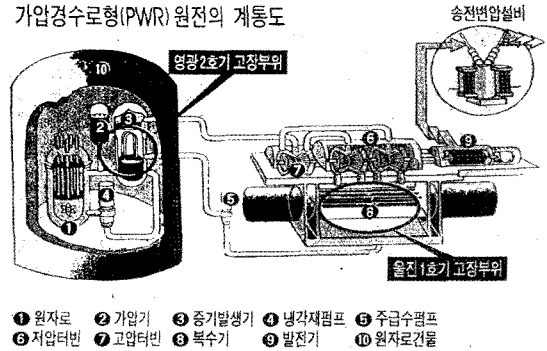
6. 유도초음파에 의한 최신 비파괴평가사례

유도초음파는 비파괴평가의 거의 전 응용분야에 적용이 가능하다고 사료되며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 배관(대구경 파이프, 소구경 튜브)
- 재료물성측정
- 복합재료 및 신소재
- 항공기
- 수송기계
- 생산공정 모니터링
- 기타 (케이블, 대형장치설비검사등)

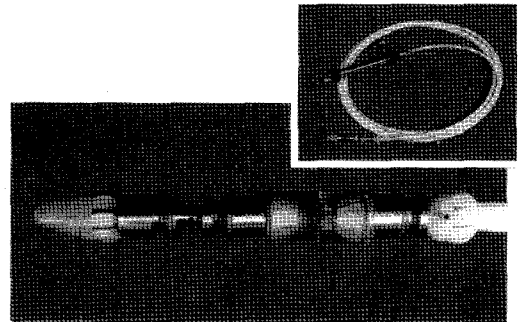
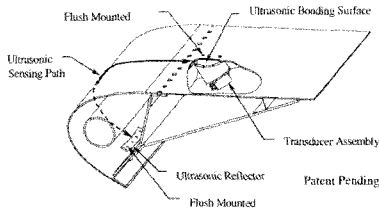
Figs. 10-15는 비파괴검사분야에서 응용된 유도초음파법의 최신사례를 제시해 주고 있다.

가압경수로형(PWR) 원전의 계통도



Introduction

- Leading edge ice detection
 - Apply guided waves
- Non-intrusive reflector is optimized for energy reflection



Dual Element Bore Probe For Tube Inspection With Guided Waves.

Fig. 11 원자력발전소 증기발생기 비파괴검사를 위해 개발된 유도초음파 탐촉자(미국 EPRI, Penn State Univ., Krautkramer Branson Co.)

Ultrasonic Ice Detection

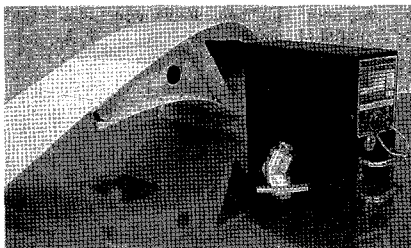
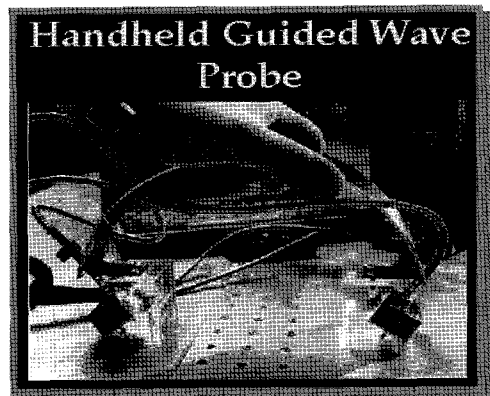


Fig. 10 항공기 동체표면의 결빙상태 진단을 위해 개발된 유도초음파 시스템 개요(미국 BF Goodrich Aerospace Co.)



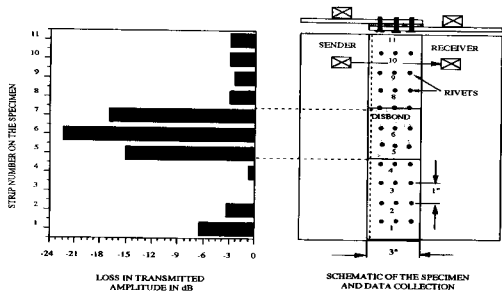


Fig. 12 항공기 동체의 부식결함과 박리를 진단키 위해 개발된 유도초음파 탐촉자(미국 FAA, Penn State Univ., BF Goodrich Aerospace Co.)

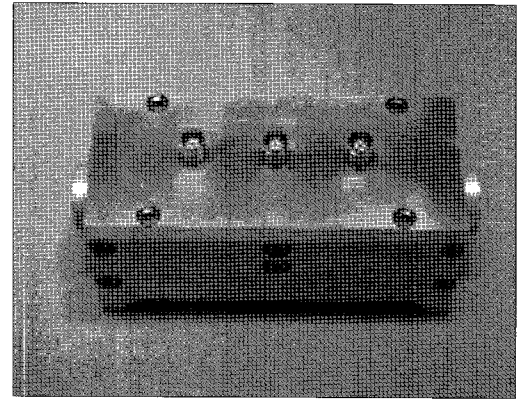
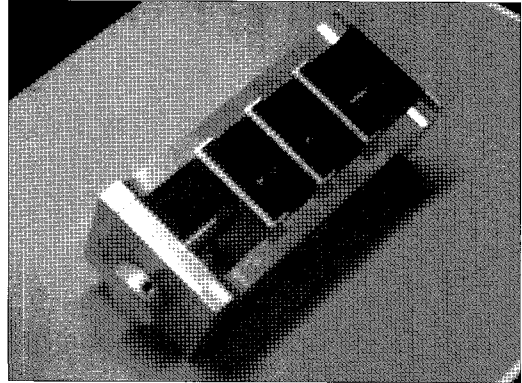


Fig. 14 판구조(Plate-Type Structure) 검사용 배열형 유도초음파 탐촉자(인제대학교, 디지털에코(주), 산업기술평가원, 과학기술평가원)

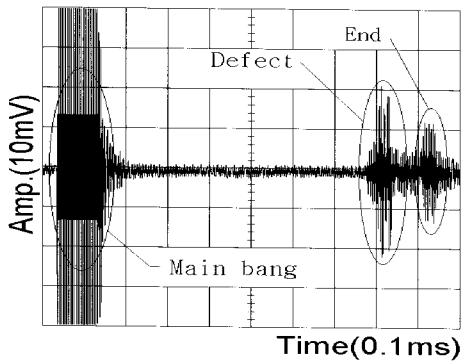
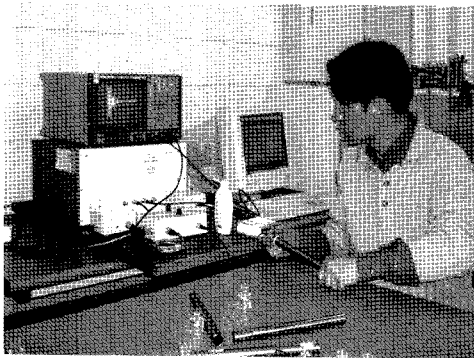
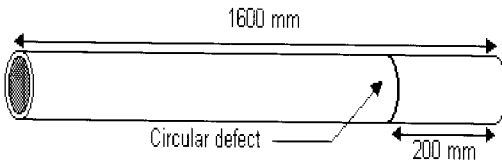
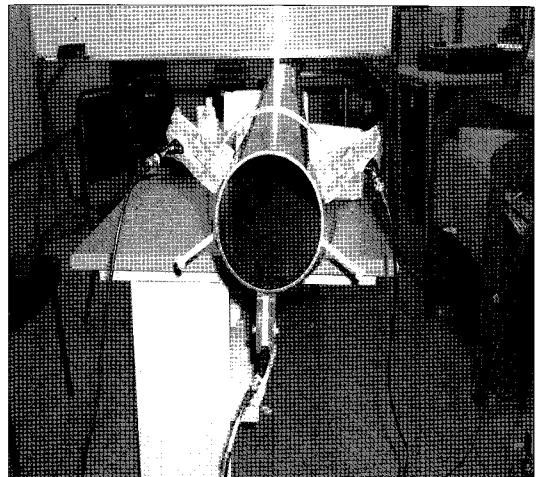


Fig. 13 증기발생기 인코넬 세관에서의 유도초음파 결함검출 신호(인제대학교, 원자력연구소, 과학기술평가원)



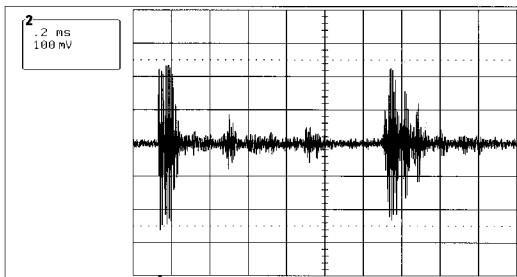
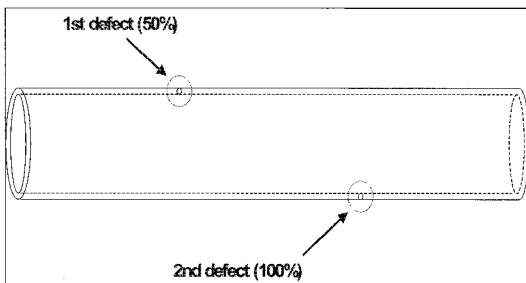
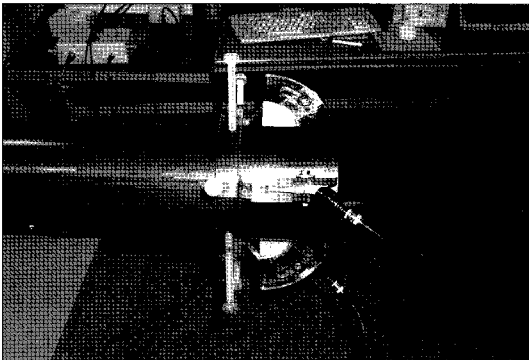


Fig. 15 배열형 유도초음파 변환기에 대한 대구경 배관 검사(인제대학교, (주)QCS, 산업기술평가원)

7. 맺음말

최적화된 유도초음파 검사기법을 통해 기존의 국부탐상법에 비해 탐촉자의 이동없이 고정된 탐상 위치에서 유도초음파신호에 대한 송·수신만을 제어함으로써 넓은 검사부위와 막대한 탐상시간 및 경비문제를 대해 효율적인 검사가 가능할 것이다. 이와함께 탐상시스템의 교체없이 경제적으로 주파수와 탐상방식의 변화만을 통해 여러 가지 모드선택이 가능하여 기존의 초음파탐상법 보다 측정민감도를 향상 시킬수 있을 것으로 기대된다. 이에 따

라 기존의 국부검사법과 달리, 고정된 탐촉자의 위치로부터 접근이 용이하지 않은 여러 피검사체에 대한 원거리 검사를 수행할 수 있게 된다. 특히, 유도초음파법은 고비용의 새로운 검사시스템에 대한 개발 없이 단순히 주파수와 입사각등의 탐상조건의 조절만으로도 탐상민감도를 개선할 수 있는 고부가가치의 지식기반형 기술로서의 장점을 지니고 있다. 또한 그 응용분야에 있어서도 금속, 콘크리트, 비금속 첨단소재를 망라하여, 대형장치설비의 진단에서 점차 소형화 되고 있는 각종 미세 산업부품의 건전성평가에 이르기까지 폭 넓은 산업현장의 시장성을 인정받고 있다[36-43]. 따라서, 비파괴평가분야의 선진 여러국에서는 이미 20-30여년전부터 유도초음파에 대한 연구와 응용기술개발에 박차를 가하여 현재는 여러 상업화된 기술과 검사시스템이 국내로 소개되고 있는 실정이며 선진 여러국가들은 이미 상당한 수준의 유도초음파 응용전문기술과 경험을 축적하고 있는 상태이다. 이에 따라, 비파괴평가산업분야의 대외 기술의존도를 개선하고 나아가 국내 기술의 첨단화와 국제경쟁력확보를 위해서는 유도초음파기술과 같이 세계적 추세에 발맞춘 연구에 대한 저변을 확충하는 것이 시급한 실정이다. 본 학술지의 지면을 통해 산·학·연을 망라한 국내 비파괴평가분야의 전문가들께 유도초음파 기술발전의 과거, 현재, 미래를 정리해 볼 수 있었던 점을 뜻 깊게 생각하며 이 글을 맺고자 한다.

감사의 글

본 해설에서 인용된 논문의 연구결과는 원자력중장기개발사업의 위탁연구과제로서 원자력연구소로부터 인제대학교에 지원된(1999-2002) 연구비의 지원하에 얻어졌으며, 이에 원자력연구소의 김승호박사와 정현규박사께 감사사를 드리는 바이다.

8. 참고문헌

- [1] J. L. Rose and Y. Cho, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential in The Power Generation Field," Safety and NDT' 95(International Workshop on Application of NDT Technology for Failure Prevention and Safety Assurance of Structures), pp. 101-115, (1995)

- [2] 조윤호, J. L. Rose, "대형 구조물의 비파괴검사를 위한 유도초음파 모드특성에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 93-101, (1996)
- [3] Y. Cho and J. L. Rose, "Guided Waves in a Water Loaded Hollow Cylinder," *The Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 12, pp. 323-339, (1996)
- [4] Y. Cho and J. L. Rose, "A Boundary Element Solution for a Mode Conversion Study on the Edge Reflection of Lamb Waves," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 4, pp. 2097-2109, (1996)
- [5] Y. Cho and J. L. Rose, "The Investigation of Lamb Wave Potential for Defect Characterization," 4th Far East Conference on NDT, pp. 357-367, (1997)
- [6] S. Pelts, J. L. Rose and Y. Cho, "A Comb Transducer for Guided Wave Mode Control," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 18, pp. 1029-1036, (1998)
- [7] Y. Cho and J. L. Rose, "An Elastodynamic Hybrid Boundary Element Study for Elastic Guided Wave Interactions with a Surface Breaking Defect," *The International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, pp. 4103-4124, (2000)
- [8] H. Lamb, "The Flexure of an Elastic Plate," *Proceedings of London Mathematical Society*, pp. 85-90, (1889)
- [9] D. C. Worlton, "Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies," *The American Institute of Physics*, Vol. 32, No. 6, pp. 967-971, (1916)
- [10] I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves : Physical Theory and Applications*, Plenum Press, New York, (1967)
- [11] M. J. S. Lowe, "Matrix Techniques for Modeling Ultrasonic Waves in Multilayered Media," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42, No. 4, pp.525-542, (1995)
- [12] A. K. Mal, "Wave Propagation in Layered Composite Laminates Under Periodical Surface Loads," *Wave Motion*, Vol. 10, pp. 257-266, (1988)
- [13] J. J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of Guided Waves in Generally Anisotropic Layers Using Finite Sources," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 61, pp. 330-338, (1994)
- [14] S. I. Rokhlin, D. K. Lewis, K. F. Graff and L. Adler, "Real-time Study of Frequency Dependence of Attenuation and Velocity of Ultrasonic Waves During The Curing Reaction of Epoxy Resin," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 79, pp. 1786-1793, (1986)
- [15] J. E. Eder and J. L. Rose, "Composite Cure Evaluation Using Obliquely Incident Ultrasonic Waves," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 14, pp. 1279, (1995)
- [16] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge, (1999)
- [17] J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland, (1984)
- [18] B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, 2nd Ed., Vols. 1 and 2, Malabar, (1990)
- [19] D. C. Gazis, "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)
- [20] W. B. Fraser, "Stress Wave Propagation in Rectangular Bars," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 5, pp. 379-397, (1969)
- [21] B. Aalami, "Waves in Prismatic Guides of Arbitrary Cross-section," *J. Appl. Mech.*, Vol. 40, pp. 1067-1072, (1973)
- [22] Hiraio, M, Fukuoka, H, Hori, K, "Acoustoelastic Effect of Rayleigh Surface Wave in Isotropic Material," *Journal of Applied of Mechanics*, Vol. 48, pp. 119-124, (1981)
- [23] D. Husson and G. S. Kino, "A Perturbation Theory for Acoustoelastic Effects," *J. Appl. Mech.*, Vol 53, No. 11, pp. 7250-7258, (1982)
- [24] Y. H. Pao, R. R. Gajewski and A. N. Ceranoglu, "Acoustic Emission and Transient Waves in an Elastic Plate," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 65, No. 1, pp. 96-105, (1979)
- [25] W. H. Prosser, K. E. Jackson, S. Kellas, B. T. Smith, J. McKoon and A. Friedman, "Advanced

- Waveform-based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites," *Materials Evaluation*, pp. 1052-1058, (1995)
- [26] D. E. Chimenti and S. I. Rokhlin, "Relationship between Leaky Lamb Modes and Reflection Coefficient Zeroes for a Fluid-coupled Elastic Layer," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 88, No. 3, pp. 1603-1611, (1990)
- [27] T. J. Plona, M. Baharavesh and W. G. Mayer, "Rayleigh and Lamb Waves at Liquid-solid Boundaries," *Ultrasonics*, Vol. 13, No. 4, pp. 171-174, (1975)
- [28] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The interaction of Lamb waves with defects," *IEEE Trans. Ultrason., Ferro. Freq. Cont.*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, (1992)
- [29] M. G. Silk and K. P. Bainton, "The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves," *Ultrasonics*, Vol. Vol. 17, pp. 11-19, (1979)
- [30] J. L. Rose, S. Pelts and Y. Cho, "Modeling for Flaw Sizing Potential with Guided Waves," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 19, No. 2, pp. 55-66, (2000)
- [31] H. Kwun and K. A. Bartels, "Magnetostrictive Sensor (M_S) Technology and Its Application," Ultrasonic Intl' 97 Conference, (1997)
- [32] A. K. Kromine, et. al., "Laser Ultrasonic Detection of Surface Breaking Discontinuities: Scanning Laser Source Technique," *Materials Evaluation*, Vol. 58, No. 2, pp. 173-177, (2000).
- [33] Banerjee, P. K., "Integral Equation Methods for Analysis of Piece-wise Non-homogeneous Three-Dimensional Elastic Solids of Arbitrary Shape," *Int. J. Mechanical Science*, Vol. 18, 1976, pp. 293-303.
- [34] F. J. Rizzo, D. J. Shippy and M. Rezayat, "A Boundary Integral Equation Method for Radiation and Scattering of Elastic Waves in Three Dimensions," *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 21, pp. 115-129, (1985)
- [35] J. Dominguez, "Application of Boundary Element Methods in Elastodynamics," Proceedings of the 1st Boundary Element Technology Conference, pp. 105-127, (1985)
- [36] Rose, J. L., Rajana, K. M., Barshinger, J. N., "Guided Wave for Composite Patch Repair of Aging Aircraft," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 1291-1298, (1996)
- [37] J. L. Rose, K. M. Rajana, and F. T. Carr, "Ultrasonic guided wave inspection concepts for steam generator tubing," *Materials Evaluation*, Vol. 52 No. 2, pp. 307-311, (1994)
- [38] Mal, A. K., Xu, P. C., and Yoseph, B. C., "Leaky Lamb Wave for the Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Adhesive Bonds." *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 112, July, pp. 255-259, (1990)
- [39] D. N. Alleyne, B. Pavlakovic, M. J. S. Lowe and P. Cawley, "Rapid Long-range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves", *The Journal of The British Institute of Non-destructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 93-101, (2001)
- [40] P. J. Mudge, "Field Application of The Teletest Long-range Ultrasonic Testing Technique", *The Journal of The British Institute of Non-destructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 74-77, (2001)
- [41] M. Sheard and A. McNulty, "Field Experience of Using Long-range Ultrasonic Testing," *The Journal of The British Institute of Non-destructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 78-82, (2001)
- [42] C. H. P. Wassink, M. A. Roberts, J. A. de Raad and T. Bouma, "Condition Monitoring of Inaccessible Piping," *The Journal of The British Institute of Non-destructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 83-92, (2001)
- [43] L. Liu, M. J. Avioli and J. L. Rose, "Incident Angle Selection for The Guided Wave Inspection of Pipe Defects," *The Journal of The British Institute of Non-destructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 89-92, (2001)