

자가교정기법에 의한 유도초음파 모드전이에 관한 연구 A Study on the Guided Wave Mode Conversion using Self-calibrating Technique

박정철*, 조윤호**
 Jung-Chul Park* and Younho Cho**

초 록 유도초음파의 모드전이현상에 관한 연구가 박판구조물의 두께변화에 대한 비파괴평가를 위해 수행된다. 탐촉자와 시험체간의 접촉상태에 따른 불안정성을 제거하여 보다 신뢰도높은 방법으로 유도초음파실험결과를 얻을 수 있도록 하는 자가교정과정을 통해 반사와 전달계수의 비(R/T)가 측정된다. R/T에 관한 결과들은 구조물의 두께감소를 결정하는 데 사용될 수 있다. 실험측정값과 두께변화간의 의미있는 연관성을 도출하기 위해서는 자가교정 유도초음파검사에 입사모드뿐만 아니라 전이된 이종모드까지도 함께 고려되어야 함이 증명되었다. 이 연구를 통해, 정량적 비파괴 검사기법으로서의 유도초음파검사기법의 가능성이 유도초음파 산란문제에 있어 자가교정과 다중모드전이를 함께 고려함으로써 검토되었다.

주요용어 : 유도초음파, 모드전이, 자가교정, 정량적 비파괴평가기술

Abstract The guided wave mode conversion phenomena were investigated for the NDE of a plate-like structure with thickness variation. The ratios of reflection and transmission (R/T) were measured via the self-calibrating procedure which allows us to obtain experimental guided wave data in a more reliable way regardless of the coupling uncertainty between transducer & specimen. The results on R/T could be used to determine the thickness reduction of the structure. It was shown that not only the incident modes but also the converted ones need to be considered in the self-calibrating guided wave inspection to extract a reasonable correlation between experimental data & the thickness variation. Through this study, the potential of guided wave inspection as a quantitative NDE technique was explored based on the combined concept of self-calibration & multi-mode conversion in guided wave scattering problems.

Keywords: guided wave, mode conversion, self-calibration, quantitative NDE technique

1. 서 론

최근 유도초음파는 대형 판 및 관 구조물의 비파괴 평가에 있어 검사의 효율성과 결함검출민감도의 우수함이 여러 연구를 통해 입증되면서 기존의 bulk wave 국부 검사법을 보완하여 대체될 수 있는 새로운 비파괴 검사 기법으로 부각되고 있다. 유도초음파는 주파수, 구조물

의 두께 그리고 입사각도에 따라 서로 다른 입자움직임을 갖는 다양한 모드들로 존재하며 그 진행방향이 판의 길이 방향으로 유도되는 특성을 갖고 있다[1]. 이 같은 유도초음파의 특성을 비파괴검사에 이용할 경우, 다양한 유도초음파 모드를 이용한 검사 민감도의 향상 및 탐촉자의 접근이 어려운 검사부위에 대한 원거리 검사, 그리고 대형 구조물에 대한 검사시간단축 및 비용절감 등의

많은 장점을 기대할 수 있다[2-6]. 특히, 기존의 bulk파를 이용한 수직입사법이나 사각입사법으로는, 신호 중첩으로 인해 검사가 어려운 얇은 판 구조물의 검사에 적합한 특성을 갖고 있다. 이와 같은 이유로, 최근 유도초음파를 이용한 비파괴검사의 개발 및 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

비파괴검사에 대한 유도초음파의 응용연구는 1980년대 이후에 Rose, Cawley 등의 연구를 통해 관심을 끌기 시작했다[2-4]. 특히, Rose, Cho 등은 판파나 판파를 이용하여 원자력 발전소나 항공기같이 안전도에 민감한 실제 대형 구조물에 유도초음파기법이 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다[4-6]. 최근 들어, 유도초음파거동 및 산란장의 수치해석을 통해 복합재료와 같은 신소재의 물성 평가나 적층 구조물의 강도평가등에 이르기까지 관련 연구가 광범위하게 확대되는 추세에 있다[4-6, 9, 10].

유도초음파는 적용주파수와 입사각도 그리고 시험체의 두께에 따라 다양한 파형모드를 갖게 되며 또 이 모드들 사이의 복잡한 다중모드전이현상을 수반한다. 따라서, 시험체의 재료나 결합형상에 따른 모드전이현상을 분산이론을 통해 예측하고 이를 실험적으로 규명하는 일은, 유도초음파 응용연구에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나라고 할 수 있다[4-6].

초음파 비파괴검사에 있어 검사결과와 신뢰도확보는 검사자의 숙련도나 탐촉자와 시험체간 coupling조건외 불안정성 등의 이유로 항상 제기되는 중요한 문제이며 보다 안정적인 검사결과를 획득을 위한 연구가 계속되어 왔다. 이러한 노력의 하나로 제시된 기법이 자가교정기법(self calibrating technique)으로서, Tittmann은 bulk wave를 이용한 용접부탐상에 이 기법을 적용하였으며, Komsky와 Achenbach는 유도초음파를 이용한 판구조물 탐상에 이 기법을 적용하여 결함의 검출 및 분류에 안정적인 결과를 제시할 수 있는 실험기법임을 증명하였다[7,8].

유도초음파를 이용한 판구조물의 탐상에 Self-calibrating technique을 적용하여 보다 정확하고 신뢰도 높은 검사방법을 제시하고자 한다. 특히 기존의 이 기법을 이용한 유도초음파연구는 두께가 일정한 판재에 대하여 모드전이현상을 고려하지 않은 상태에서 수행된 반면에 본 연구에서는 접합구조물이나 부식환경에서 흔히 발견되고 모드전이양상이 보다 복잡한 판재의 두께가 변화하는 경우에 대하여 이 기법을 적용하고 유도초음파의 산란현상에 필수적으로 야기되는 다중모드전이현상을 규명, 예측하여 전이된 이종모드들 까지도 포함하여 종합적으로 해석함으로써 결과분석의 정확성을 높이고 산란체

의 효과적 검출과 형상변화와 연관된 다양한 특징추출의 기법이 제안된다.

2. 유도초음파의 모드전이와 Self calibrating technique

2.1. 유도초음파의 모드전이

판재나 판과 같이 두께가 얇은 구조물에 bulk형 초음파가 경사입사하게 되면 Fig. 1과 같이 내부에서의 다중 반사와 간섭을 통해 새로운 Lamb형 유도초음파가 생성되게 된다. 이 Lamb형 유도초음파는 주파수, 두께, 입사각도에 따라 전파속도 및 진행형태가 변화하는 분산적 성격을 띄고 있다(Fig. 2 참조). 즉 초음파의 진행방향과 수직이거나 평행한 입자의 운동만을 수반하는 종파, 횡파와는 달리 Lamb파는 그 모드에 따라 다양한 방향으로의 입자운동을 가지므로, 탐상목적에 적합한 모드를 가진 시킴으로써 원하는 탐상을 수행할 수 있다.

분산선도상의 적용 주파수(f : MHz)와 시험체 두께(d : mm)의 곱으로 표현된 각 fd 값에서 생성가능한 Lamb파 mode들은 wedge의 입사각을 변화시켜줌으로써, 원하는 속도의 모드를 가진시켜 줄 수 있는 데 각 모드의 적정 입사각도는 Snell의 법칙(식 (1)참조)을 따른다.

$$\frac{V_{wedge}}{\sin \alpha_{incident_angle}} = \frac{C_{ph}}{\sin 90^\circ} \quad (1)$$

판재 내에서의 유도초음파산란문제는 입사모드, 주파수, 판재두께 그리고 반사체의 형태에 따라 상이한 모드전이현상을 나타낼 수 있다. 이는 판재형상의 변화가 특정의 입사모드와 주파수하에서 다양한 산란현상을 초래한다는 것을 의미한다. 판재의 전체두께가 일정한 경우는 주파수에 따라 분산선도상의 각 fd 값에 해당하는 지점에

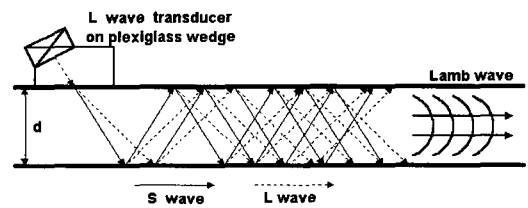


Fig. 1 The oblique incidence method for the generation of guided waves

서 수직방향으로의 모드전이만이 일어나며 이때 각 모드의 송, 수신은 wedge의 적정 각도를 조정해 줌으로써 가능하고 동일 모드에 대해서는 송, 수신각도가 같다. 판구조물은 부분적 코팅이나 부식 그리고 판구조물끼리의 결합등으로 인해 그 두께가 변화하게 되고 이러한 두께변화는 두께가 일정한 양단의 각 해당 fd값 지점에서의 수직방향 모드전이 뿐만 아니라 양단 해당 fd값 지점간의 수평방향 모드전이까지도 복합적으로 수반하게 되므로 유도초음파 산란현상 해석을 난이하게 하는 주된 요인이 된다.

Komsky와 Achenbach는 전체 두께가 일정한 판재내의 유도초음파 결합측정에 대한 Self-calibrating technique의 적용에 있어, 입사모드의 산란특성만을 고려한데 비해 본 연구에서는 산란 후 다중 전이된 이중모드들의 산란현상을 고려하여 보다 정량적인 유도초음파의 자가교정기법을 제안하고자 한다.

2.2. 자가교정기법 (Self Calibrating Technique)

일반적으로 초음파탐상을 통한 결함형태분류나 크기산정은 결함에서의 초음파 반사나 투과정도를 나타내는 반사계수(R: reflection coefficient)와 전달계수(T: transmission coefficient)를 측정하여 비교한다. 그러나 couplant상태, 탐촉자의 성능, 시편표면상태 및 탐촉자를 누르는 압력등이 매 검사마다 변화함에 따라 안정적이고 신뢰도 높은 반사계수(R)와 전달계수(T)를 측정하는 데 많은 어려움

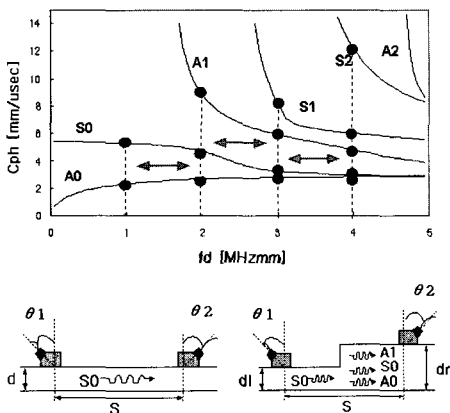


Fig. 2 The horizontal mode shifting in the phase velocity dispersion curves due to plate thickness variation

이 제기되어왔고 자가교정기법은 이 문제의 효과적인 해결책이 될 수 있다.

Fig. 3에서와 같이 두 개의 가변각 탐촉자(variable angle beam transducer)를 이용하여 판구조물의 결합이나 특정 산란체의 양측으로부터 탐상할 경우 위에 언급된 실험적 불안정성을 크게 개선할 수 있다. 이 경우 초음파 송, 수신을 모두 수행하게 됨으로써 pulse-echo와 through transmission 탐상방식을 동시에 적용하게 된다. 양측 탐촉자 각각에 의해 수신되는 유도초음파 신호들 사이의 분리를 위해 산란체로부터 두 탐촉자(l: left side, r: right side) 각각의 탐상거리를 달리 하였다.

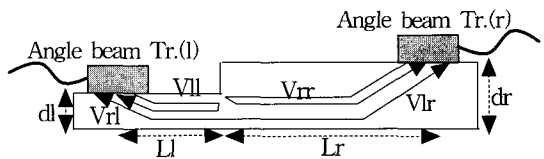


Fig. 3 A schematic for the self-calibration concept

먼저 두께가 일정한 판재에서 동일모드만을 송, 수신하는 경우, 좌측 탐촉자(l)로부터 송신되어 산란지점에서 반사되어 다시 좌측 탐촉자(l)로 수신되는 신호의 voltage는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ll} = P_l \cdot S_l \cdot R \cdot S_l \cdot C_l \tag{2}$$

여기서, P_l = 탐촉자(l)에서 검사체로의 전파상태를 나타내는 탐촉자(l)의 전달함수

S_l = 탐촉자(l)의 지점과 산란지점사이의 검사체 내 감쇠와 회절을 포함한 초음파전파에 관한 전달함수

R = 결함의 반사계수

C_l = 검사체에서 탐촉자(l)로의 전파상태를 나타내는 탐촉자(l)의 전달함수

이와 같은 방식으로,

$$V_{rr} = P_r \cdot S_r \cdot R \cdot S_r \cdot C_r \tag{3}$$

$$V_{lr} = P_l \cdot S_l \cdot T \cdot S_r \cdot C_r \tag{4}$$

$$V_{rl} = P_r \cdot S_r \cdot T \cdot S_l \cdot C_l \tag{5}$$

이다.

이제 (V_{ll} · V_{rr}) / (V_{lr} · V_{rl})를 고려해 보면,

$$\cdot \frac{R}{T} = \left| \frac{V_{ll} \cdot V_{rr}}{V_{lr} \cdot V_{rl}} \right|^{1/2} \quad (6)$$

인데, 만약 탐촉자(l)과 탐촉자(r)이 각기 서로 다른 모드 A, B를 송신하고 산란후 전이된 모드 C, D를 수신하는 경우라면 식(6)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\frac{R_{AA} \cdot R_{BB}}{T_{AC} \cdot T_{BD}} = \frac{V_{ll(AA)} \cdot V_{rr(BB)}}{V_{lr(AC)} \cdot V_{rl(BD)}} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 알 수 있듯이 단지 측정된 각 신호의 voltage 자체만으로 나타낸 R/T를 이용하면 탐촉자와 검사체사이의 접촉상태나 검사체 내부감쇠와 같은 인자가 자동 소거되어 반사계수와 전달계수의 비에 대한 실험적 측정이 자가교정 된다.

3. Self-calibrating technique을 이용한 R/T의 실험적 측정

이번 연구에서는 판재내 유도초음파의 모드전이 현상을 자가교정법을 이용해 해석하는 데 있어 분산선도상의 수직, 수평방향의 모드전이가 복합적으로 일어나는 판재 두께변화에 따른 유도초음파모드의 산란특성을 각 전이 모드의 전달계수 대 반사계수의 비 (R/T)를 측정함으로써 실험적으로 규명하였다.

Fig. 4와 같이, 고출력 초음파발생기(RAM-10000)에서 tone burst 형태의 입사파가 cycle 수와 주파수 그리고 출력에너지등이 조절되어 두께변화가 있는 판재시편의 양측에 설치된 2 MHz 가변각 탐촉자(variable angle beam transducer)들로 병렬연결을 통해 똑같은 전기적 진폭으로 보내지게 되고 두 탐촉자에서 나온 종파는 특정 모드 가진을 위해 분산선도에서 해석된 적정입사각도로 판재에 입사된다. 이 과정에서 입사된 종파형 초음파는 Lamb형 유도초음파로 변환되어 판재를 진행한 후 pulse echo와 through transmission 방식으로 두 탐촉자에 의해 다시 수신된다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy 9310A)로 관찰된다. 이때 측정되는 모드는 양측의 입사모드와 동일 모드의 반사, 전달 신호이며 전이된 이종의 모드들을 측정하기 위해서는 다시 각각 through transmission 탐상 방식으로 수신측의 수신각을 변화시키면서 전이된 각 이종 모드들의 전달신호를 측정한다. 측정된 이종모드의 전달신호는 동일 모드를 측정할 때와

회로 연결상의 차이로 인한 신호 진폭의 변화를 각 모드 별로 보정해 주었다.

두께 2 mm의 알루미늄판재에 0.5 mm차이로 다단 층을 만들어 3가지의 두께변화 경우를 가지는 인공판재시편을 제작하였으며 측정시 두 탐촉자의 위치는 수신신호들의 효과적인 분리를 위해 두께변화지점으로부터 각각 40 mm와 120 mm로 서로 다르게 위치시켰다(Fig. 5 참조).

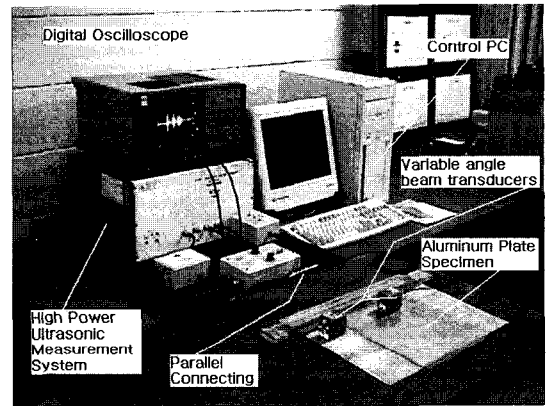


Fig. 4 The experimental set-up of the self-calibrating technique

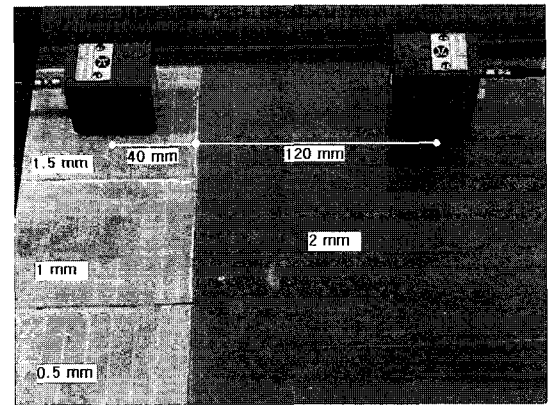


Fig. 5 The aluminum specimen with various step discontinuities

4. 결과 및 검토

4.1. 판재두께변화에 따른 유도초음파의 모드전이

두께가 다른 시편 양측에 동일 모드를 가진 시킬 경우, 전체 두께가 일정한 판재에서와 같이 판재 양단에 같은

각도로 bulk파를 입사시켜서는 양측에 동일모드를 가진 시켰다고 판단할 수 없으며 양측의 두께값 변화로 발생하는 분산선도상의 변화된 각각 fd값지점에 해당하는 모드의 적정입사각으로 조정해 주어야 한다. 예를 들어, 시편좌측의 두께가 1mm이고 우측의 두께가 2mm인 경우에 두 탐촉자의 송, 수신각을 37° 로 똑같이 맞추어 Fig. 6과 같이 세 개의 분리된 측정신호를 깨끗하게 얻어냈고 해서 양측이 동일모드라고 판단할 수 없으며 이때 실제 가진된 모드는 좌측이 fd=2 (MHzmm)에서의 S0모드이고 우측이 fd=4 (MHzmm)에서의 A1모드이다. 양측을 동일 모드로 가진시키기 위해서는 좌측 탐촉자의 송, 수신각을 18° 로 조정해야 판재 양측 모두 A1모드로 가진되며 Fig. 7과 같은 측정신호를 얻게되는데 Fig.6의 경우와 차이를 확인할 수 있다. 즉 같은 산란체에 대해서도 입사각의 조정을 통해 입사되는 모드에 따라 상이한 산란결과를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 7에 나타난 동일 모드의 세 개 신호중 시간상 가장 앞의 신호는 송, 수신거리가 짧은 좌측 탐촉자에서 측정된 반사신호(V_R)이며 마지막 신호는 송, 수신거리가 상대적으로 긴 우측 탐촉자에서 측정된 반사신호(V_R)이고 가운데 신호는 결합좌측에서 우측으로의 전달신호(V_T)와 산란지점우측에서 좌측으로의 전달신호(V_R)가 합쳐져 나타나는 중복신호이다. Fig. 7에는 나타나지 않지만 산란지점에서 전이되어 양측으로 전달되는 각 이종 모드들을 수신각을 조정하면서 측정하여 각각을 모두 동시에 표현하면 Fig. 8과 같다. 오히려 입사모드와 동일모드로 전달되는 신호보다 큰 voltage로 전파하는 전이된 이종모드를 관찰할 수 있는데 이것은 전이된 이종모드를 무시한 상태에서 유도초음파 신호측정이 갖게 되는 실험적 오류의 개연성을 나타낸다. 여기서 $V_R(A1S0)$ 은 좌측 탐촉자에서 A1모드로 가진

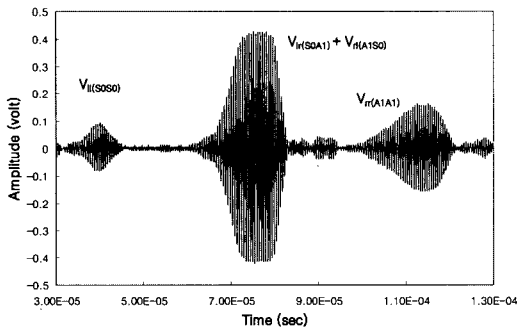


Fig. 6 RF wave signal in a plate with thickness variation for $(dr-dl)/dr=0.5$ (incident modes: left-S0, right-A1)

되어 산란지점을 거쳐 전이된 S0모드가 우측 탐촉자로 수신되는 신호이며 같은 방식으로 $V_R(A1A1)$, $V_R(A1S1)$, $V_R(A1S2)$, $V_R(A1S0)$, $V_R(A1A1)$ 이 정의된다. 이번 실험에서는 수신각도가 너무 커서 실험적으로 수신이 어려운 모드들은 측정대상에서 제외되었다.

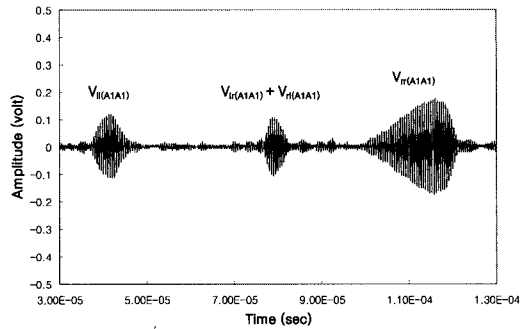


Fig. 7 RF wave signal in a plate with thickness variation for $(dr-dl)/dr=0.5$ (incident modes: left-A1, right-A1)

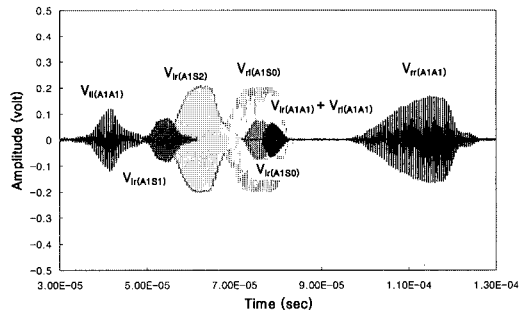


Fig. 8 RF wave signals showing multi-mode conversion in a plate with thickness variation for $(dr-dl)/dr=0.5$ (incident modes : left-A1, right-A1)

4.2. 모드전이와 자가교정기법을 적용한 판재 두께차이 비 산정

판재의 두께차이비($(dr-dl)/dr$)가 0.25(1.5mm-2mm), 0.5(1mm-2mm), 0.75(0.5mm-2mm)로 변화하는 세 가지 경우에 대해 좌측입사모드를 S0, 우측입사모드를 A1으로 측정된 결과와 좌측입사모드를 S0, 우측입사모드를 S2로 측정된 결과를 가지고 각 모드의 R/T를 계산하여 두께 차이비 산정과의 연관성을 규명하였다. 이때 R/T의 측정에서 좌측 입사모드의 반사신호 voltage(V_R)와 우측 입사

모드의 반사신호 voltage(V_r) 그리고 우측 입사모드가 좌측 입사모드로 전이되어 좌측 탐촉자로 수신된 신호 voltage(V_{rl})는 고정대입하고 좌측입사모드가 산란후 전이되어 우측탐촉자로 수신되는 이종의 모드들의 voltage(V_{lr})를 바꿔가며 대입해 두께차이비 변화에 따라 그 변화추이를 살펴보았다.

Fig. 9의 결과그래프는 좌측입사모드를 S0, 우측입사모드를 A1으로 측정 한 결과로 양측의 입사모드와 동일모드로 송, 수신하여 얻은 $[R_{il(S0S0)} \cdot R_{rr(A1A1)}] / [T_{lr(S0A1)} \cdot T_{rl(A1S0)}]$ 값(symbol : \blacklozenge)이 판재 두께차이비 변화와 선형적으로 비례하여 두께차이비 산정에 효과적으로 이용될 수 있음을 보여준다. 이 결과는 Komsky와 Achenbach의 연구결과와 일치한다. 그런데 전이된 이종 모드의 voltage값을 대입한 R/T중 우측에 S1로 전이된 모드의 voltage($V_{lr(S0S1)}$)를 대입한 $[R_{il(S0S0)} \cdot R_{rr(A1A1)}] / [T_{lr(S0S1)} \cdot T_{rl(A1S0)}]$ 값(symbol : \blacksquare)의 변화 역시 두께차이비 변화에 선형적으로 비례하므로 두 모드의 결과를 함께 사용하면 보다 신뢰도 높은 두께차이비 산정이 가능하다.

좌측입사모드를 S0, 우측입사모드를 S2로 측정 한 결과는 결과그래프 Fig. 10에 나타나 있는데, 이 경우 위의 좌측 S0, 우측 A1모드 입사경우와 달리, 양측의 입사모드와 동일모드로 송, 수신하여 얻은 $[R_{il(S0S0)} \cdot R_{rr(S2S2)}] /$

$[T_{lr(S0S2)} \cdot T_{rl(S2S0)}]$ 값(symbol : \bullet)은 판재 두께차이비 변화와 비례하지 않아 두께차이비 산정에 이용될 수 없다. 그러나 오히려 전이된 이종 모드의 voltage값을 대입한 R/T중 우측에 S0로 전이된 모드의 voltage($V_{lr(S0S0)}$)를 대입한 $[R_{il(S0S0)} \cdot R_{rr(S2S2)}] / [T_{lr(S0S0)} \cdot T_{rl(S2S0)}]$ 값(symbol : \blacktriangle)의 변화양상을 주목할 경우, 두께차이비 변화에 선형적으로 비례하므로 두께차이비 산정이 가능하였다. 이를 통해, 유도초음파 모드전이현상을 고려한 자가교정기법의 적용으로 정량적 비파괴 평가를 위한 최적의 검사조건이 제시될 수 있음이 입증되었다.

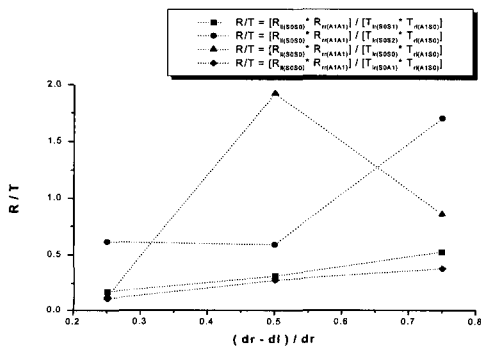
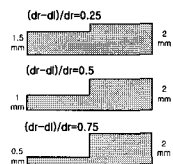


Fig. 9 Variation of R/T for the incidence of S0(left) and A1(right)

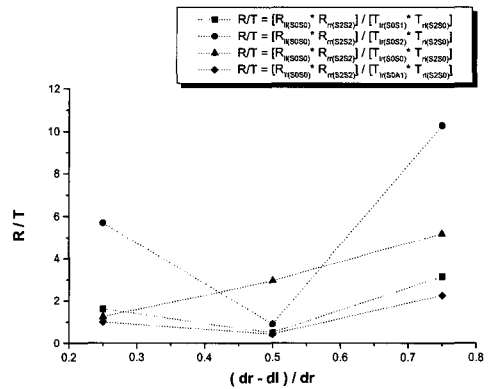


Fig. 10 Variation of R/T for the incidence of S0(left) and S2(right)

5. 결론

유도초음파의 모드전이특성을 파악하기 위해 초음파 분산이론해석과 두께가 변화하는 구조물에 대한 자가교정평가기법의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 판재의 두께변화에 따른 유도초음파모드의 전이현상이 초음파 분산선도의 해석으로 예측되고 송, 수신 각도의 조절을 통한 각 전이모드의 실험적 측정으로 확인할 수 있었다.
- 2) 전달계수 대 반사계수의 비(R/T)로 검사결과가 산출되는 자가교정기법을 판재 두께차이비산정에 적용하여 이 기법이 안정적이고 신뢰도 높은 평가기준이 될 수 있음을 제시하였다.
- 3) 유도초음파를 이용한 비파괴 평가에 자가교정기법을 적용할 때 검사결과에 대한 오관을 막고 다양한 특징 추출을 위해서는 전이모드들을 포함한 종합적인 고려가 요구되며 이를 위해 정확한 유도초음파 전이현상

의 해석이 필수적임을 증명하였다.

- 4) 위 연구결과를 통해 모드전이해석과 자가교정측정기법이 적용된 유도초음파 비파괴평가법이 박판구조물의 결합형태분류와 위치 및 크기산정에 우수한 신뢰도를 가지고 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

6. 후기

본 연구는 인제대학교 98년도 학술연구조성비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표한다.

7. 참고문헌

- [1] H. Lamb, "The Flexure of an Elastic Plate," *Proceedings of London Mathematical Society*, pp. 85-90, (1989)
- [2] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The interaction of Lamb waves with defects," *IEEE Trans. Ultrasonic., Ferro. Freq. Cont.*, vol. 39, no. 3, pp. 381-397, (1992)
- [3] J. L. Rose and J. J. Ditre, "Waves in solid media: A focus on ultrasound," *Penn. State Univ.*, (1996)
- [4] J. J. Ditre, J. L. Rose, and G. Chen, "Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves," *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, Vol. 11, pp. 2109-2115, (1992)
- [5] Y. Cho, D. D. Hongerholt and J. L. Rose, "The Lamb Wave Scattering Analysis for Reflector Characterization," *The IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 44-52, January (1997)
- [6] Y. Cho, J. L. Rose, D. D. Hongerholt, "Defect characterization and sizing potential with guided waves: theory," presented at *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Seattle, WA, (1995)
- [7] B. R. Tittmann, B. H. Hosten, "A Self-Calibrating Technique for the Ultrasonic Discrimination of Solid-State Welds," *Journal of NDE*, Vol. 7, Nos. 3/4, (1988)
- [8] J. D. Achenbach, I. N. Komsky, Y. C. Lee, and Y. C. Angel, "Self-Calibrating Ultrasonic Technique for Crack Depth Measurement," *Journal of NDE*, Vol. 11, No. 2, (1992)
- [9] 조윤희, 박정철, "Tube내 Lamb형 유도초음파 가진용 Wedge를 이용한 비파괴 평가 연구," *한국 비파괴검사학회 춘계논문집*, pp. 48-56, (1998)
- [10] 조윤희, 박정철, "판재의 두께변화에 따른 탄성판파의 모드특성," *한국 비파괴검사학회춘계 논문집*, pp. 90-98, (1999)