

## 후방 복사된 초음파를 이용한 표면 지역의 평가 기술

권성덕

안동대학교 자연과학대학 물리학과

**요 약** 액체/고체 경계면에서 후방 복사된 초음파의 주파수 분석에 의해 Si layer/mesh Au/Si substrate 시편에 존재하는 표면 탄성파의 주파수 의존성이 측정되었다. 사용된 광역 탐촉자(2, 5, 10MHz)의 주파수에 따라 다르게 나타난 후방 복사의 입사각 의존성은 이 현상이 표면 지역에 발생된 표면파로부터의 에너지 복사에 의한 것임을 보여주었다. 후방 산란된 초음파의 입사각 의존성을 연속적으로 측정하기 위한 초음파 각도계가 제작되었고 다른 비율의 구리 분말이 섞인 에폭시에 의해 접착된 Ni layer/Al substrate 시편에 대해 후방복사 세기의 입사각 의존성이 측정되었다.(5MHz) 후방 복사의 폭과 패턴은 표면파 속도의 주파수 의존성, layer 접합의 질 그리고 표면 지역의 구조 등 여러 정보를 가지고 있음이 밝혀졌다.

### 1. 서 론

초음파 빔(*beam*)이 액체/고체 경계면에 Rayleigh 각으로 입사할 때 고체의 표면 지역에는 리키(*leaky*) 레일리 표면파가 발생된다. 이 리키 표면파는 공기나 진공같은 자유 경계에서의 순수 레일리 표면파와 거의 같은 특성을 가지고 있으나 파의 진행동안 액체로의 에너지 복사로 인해 반사율은 Schoch 변위, 최소 반사율, 후방 복사 등의 현상들을 포함한 비대칭 패턴을 보여준다.(Fig. 1 참조) 지금까지는 이 현상은 표면지역에 발생된 리키 표면파의 존재와 기하학적으로 예견되는 대칭적 반사법과의 간섭 현상으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 그러나 후방 복사 현상은 그 현상의 다양한 응용 가능성<sup>3,4)</sup>에도 불구하고 생성 원인에 대해서는 Sasaki<sup>5)</sup>가 이 현상을 처음으로 발견한 이래 많

은 논란이 있어왔다.<sup>6-8)</sup> 표면파는 에너지의 대부분이 한과장 이내에 한정된 채로 진행하는 특성으로 인해 표면지역의 물성 변화에 민감하게 반응하며 그 변화를 후방 산란의 증가나 최소 반사율을 이용한 간접 측정을 통해 표면 지역의 비파괴적 평가에 이용하는 연구가 많이 수행되었다.<sup>9-11)</sup>

대부분의 상업 제품들은 도금, 증착, 도색 그리고 접합(*bonding*) 등의 방법으로 표면에 얇은 고체층 (*layered substrate*)을 두어 내화성, 경도 그리고 미관을 향상해 상품의 질을 높인다. 특히 항공 재료, 반도체 재료 등으로 최근 활발히 개발되고 그 용도가 확대되어 가고 있는 복합재료나 세라믹 등의 첨단 소재들은 제조 과정의 불량한 재현성과 어려움 때문에 접착제(*adhesive*)를 이용한 복잡한 구조물의 구성과 제작이 필수적이며 표면 처리의 어려움으로 도금이나 도

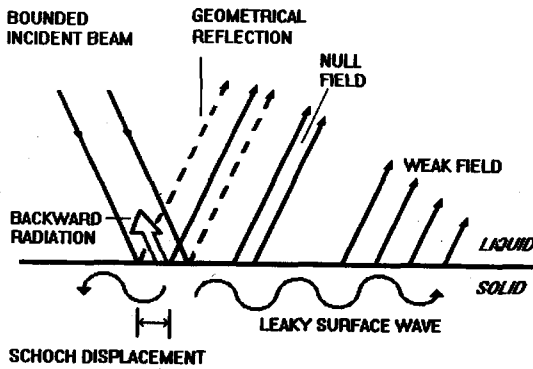


Fig. 1. Nonspecular reflectim field on liquid/solid interface.

색 그리고 접합 등의 방법으로 표면 처리를 하게 된다. 따라서 이때 얇은 고체층과 그 아래 재질 사이의 접합의 질의 평가는 매우 중요하며 특히 비파괴적이면서 정량적인 평가는 최근 세계적으로 관심의 대상이 되어있다.<sup>12,13)</sup>

위와 같이 표면 처리를 하게된 경우 표면 지역의 경계는 얇은 고체층/고체층(layered substrate)에 해당한다. 초음파가 이런 표면 지역을 통과할 때는 일반화 람 표면파가 존재하며 얇은 판상에 존재하는 람(lamb) 표면파와 그 전파 특성이 유사하다.<sup>14)</sup> 일반화 람파나 레일리(rayleigh) 표면파 등은 액체속에 담겨진 상태에서 초음파가 액체/고체 경계면으로 입사할 때 발생되며 이때 표면파의 에너지 복사로 인해 반사면에 후방 산란의 증가같은 경계면 현상(Fig. 2)을 이용한 표면파 속도의 간접적 측정 기술이 개발되어 있다.<sup>11,12)</sup> 얇은 고체층과 고체층의 경계면 상태와 고체층의 물성 변화는 일반화 람 표면파의 전파 특성에 큰 영향을 주게되고<sup>5,16,17)</sup> 이 표면파는 속도의 주파수 의존성(dispersion)을 가지게 된다. 이때 경계면에 광역 주파수 특성을 가진 초음파가 입사하게 되면 주파수 의존성이 없는 시편에서는 레일리 각에서만 후방 복사 현상이 나타나는 것과는 달리 표면파는 입사각에 따라 다른 주파수를 가지게 될 것이고 탐촉자의 주파수 영역에 대응되는 입사 범위에서 후방 복사가 나타날 것이 예상된다.

본 연구에서는 기존 연구에서 반사파의 주파수 성분 분석법에<sup>12,13)</sup> 의해 표면파 속도의 주파수 의존성이 밝혀져 있는 인위적인 불완전 접합 시편인 Si 파 layer/mesh Au/Si substrate 시편에 대해 후방 산란

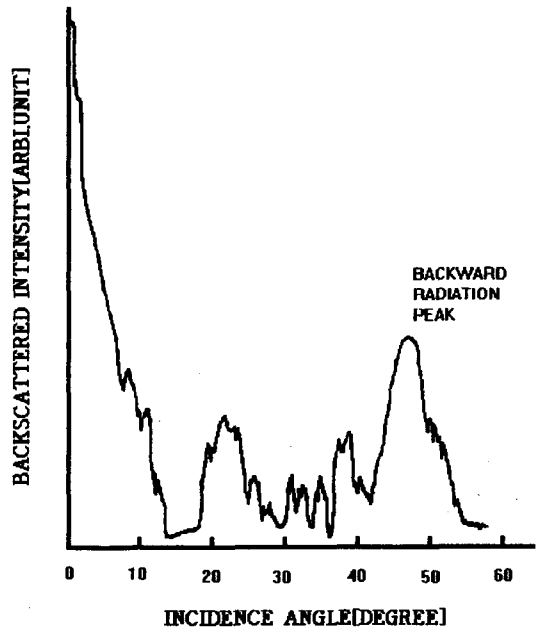


Fig. 2. Angular dependence of backward radiation on water/brass substrate.

의 세기 및 주파수 성분의 입사각 의존성을 측정한다. 후 비교 분석을 통해 후방 복사 현상을 이용한 표면 지역의 비파괴적 평가 대상을 살펴본다. 후방 산란의 각도 의존성을 연속적으로 측정하기 위한 초음파 각도계의 자동화 측정 시스템을 구성하고 Ni layer와 Al substrate를 구리 분말이 여러 배합 비율로 섞여진 에폭시 접착제로 접착한 시편을 제작하여 후방 복사 세기의 입사각 의존성을 측정한다. 주파수 의존이론, C-Scan 결과, 반사 파형 등을 비교 분석하여 경계면의 접합의 질, 입사 지역의 구조 그리고 표면파 속도의 주파수 의존성 등을 쉽게 평가할 수 있는 비파괴 기술을 개발하고자 한다.

2. 후방복사의 주파수 성분

실험에 사용된 불완전 접합면을 가진 layered substrate 형태의 시편은 layer와 substrate 사이 접합면의 질을 람(Lamb) 표면파를 이용해서 정량적으로 평가하는 기술 개발을 목적으로 제작된 것이다.<sup>13)</sup> 본 연구에서는 불완전 시편 표면에 존재하는 일반화 람 표면파 중 최소 속도 mode를 대상으로 속도의 주파수 의존성을 입사한 초음파 탐촉자로 되돌아오는

후방 산란파 주파수 성분 분석으로 구하고 반사파의 주파수 성분 분석법으로 측정된 기존 결과(Fig. 8)와의 비교 분석을 통해 경계면 현상인 후방 복사의 주파수 성분 분석을 이용한 시편의 표면 지역의 비파괴적 평가 기술을 개발한다.

2.1. 실험

후방 산란파의 측정 장치도는 Fig. 3에 보여진다 시편은 물속에 잠겨지고 역시 물속에 잠겨진 광대역 탐촉자(중심 주파수 2, 5, 10MHz)로부터 초음파가 시편에 입사하고 물과 시편 경계면에서 후방 산란된 초음파는 펄스-에코 방식으로 다시 탐촉자로 되돌아와 파형 분석 장치에 의해 주파수 성분과 산란파의 세기가 측정된다. 입사각의 변화는 1° 간격으로 변경되었다. 시편은 Fig. 3에서 보듯이 Si layer(283 μm)와 Si substrate 사이에 그물 형태의 금(mesh Au, 3 μm)을 두고 diffusion bonding으로 결합시켜 인위적인 불완전 접합을 만든 뒤 그물의 폭과 간격의 변화를 통해 불완전 접합면의 정량화를 시도한 것이다.<sup>13)</sup>

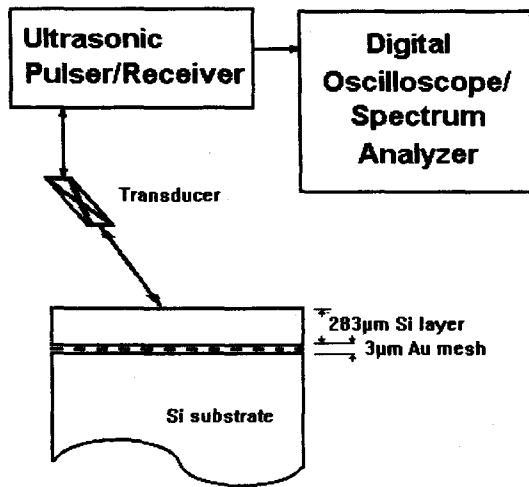


Fig. 3. Measuring system of backscattered ultrasound and specimen.

2. 2. 결과 및 분석

Fig. 4에는 후방 산란된 초음파 세기의 입사각 의존성이 사용된 주파수별로 나타나 있다. 입사각이 수직에서 증가함에 따라 급격한 산란파의 감소가 나타

나다가 20° 이상에서 후방 산란파의 세기가 급격히 증가하는 후방 복사 현상을 볼 수 있고 그 폭과 패턴은 사용된 주파수에 따라 많이 다르며 특히 2MHz에서는 증가된 세기가 입사각 증가에 따라 매우 천천히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 2에서 보여진 순수 brass substrate 시편의 후방 복사와는 많은 차이가 있음을 알 수 있다

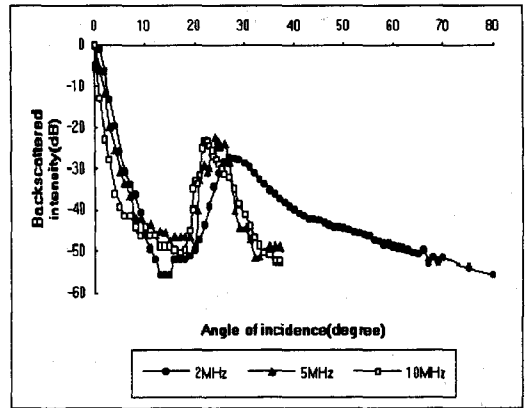


Fig. 4. Angular dependence of backscattering on water/imperfect Si layered substrate (2, 5, 10MHz broadband transducer).

Fig. 5에는 5MHz 탐촉자 사용때 입사각 22°와 28°에서 측정된 초음파의 파형과 그 주파수 성분이다. Fig. 6에서 보듯이 사용된 탐촉자의 주파수 반응 특성은 5MHz를 중심으로 넓은 범위의 주파수 성분이 연속적으로 포함되어 있음에도 불구하고 입사각에 따라 특정 주파수 성분만이 살아남는 band pass filter의 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 광대역 탐촉자로부터 여러 성분의 주파수가 함께 물로부터 시편으로 입사하면 입사각에 대응되는 속도의 표면파가 mode conversion에 의해 발생될 수 있는 조건이 된다. 이때 기존의 연구에서 제시된 바와 같이 시편의 표면파 속도가 주파수 의존성을 가지고 있으므로 발생된 표면파의 주파수 성분은 입사각에 따라 달라진다. 후방 복사가 표면에 발생된 표면파로부터의 leaky 에너지이므로 측정된 후방 복사의 주파수 성분은 발생된 표면파의 주파수 성분이 된다. 따라서 스넬(Snell)의 법칙을 이용해 특정 입사각에 대응되는 표면파의 속도가 계산되면 일반화 램 표면파 속도의 주파수 의존성이

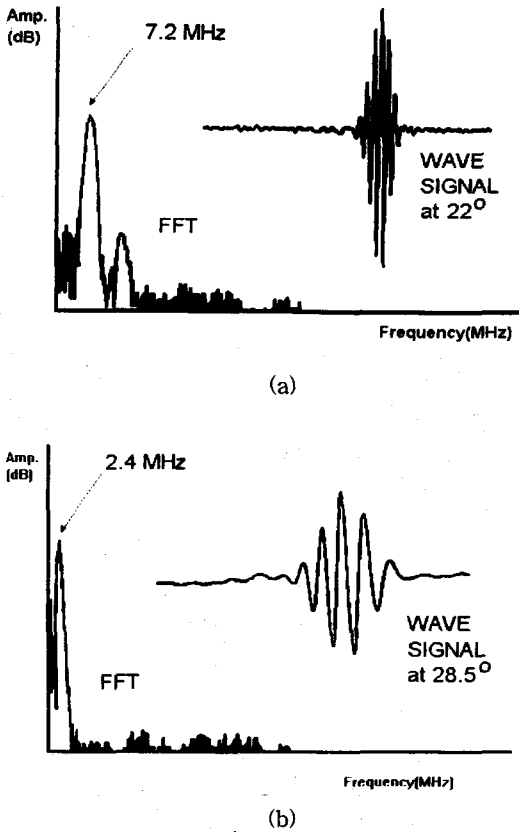


Fig. 5. Backward radiated signals and frequency spectra at (a) 22° and (b) 28°.

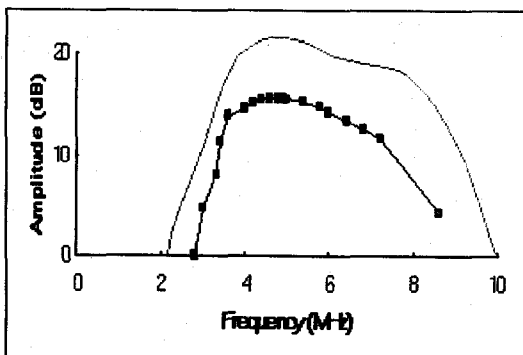


Fig. 6. Backward radiation depending on the frequency response of 5MHz transducer (Solid line: response curve of transducer, Black square: backward radiation data).

획득되게 된다.<sup>11)</sup>

한편 Fig. 4에서 처럼 사용된 탐촉자의 주파수에 따라 후방 복사의 폭과 패턴의 차이는 Fig. 7을 이용해 설명될 수 있다. 사용된 광역 탐촉자 A와 B는 그림에서와 같이 중심 주파수는 다르나 폭은 동일하다고 가정한다. 탐촉자 A 지역의 주파수 의존성 커브는 B 지역에 비해 더 급격하게 변하기 때문에 대응되는 속도축의 범위가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 대응된 속도 범위는 그 속도를 가진 표면파를 유발할 수 있는 입사각 범위와 일치하므로 탐촉자 A는 그만큼 넓은 지역에서 후방 복사 현상이 나타남을 의미한다. Fig. 8에 Si layer/mesh Au/Si substrate 시편에서 일반화람 표면파중 최소 속도 모드의 주파수 의존성 커브가 보여진다. 이론치와 실험치 모두 실험에 사용된 2MHz 탐촉자의 주파수 영역에서는 5MHz와 10MHz의 영역에 비해 급격한 기울기를 보여주므로 훨씬 큰 영역에서 후방 복사 현상이 나타날 것이며 Fig. 4의 결과와도 잘 일치하고 있다. 후방 복사의 주파수 성분 분석기술을 이용해 획득된 표면파의 주파수 의존성 커브가 Fig. 8에 기존 결과와 함께 그려져 있다. 낮은 주파수 영역에서의 약간의 차이를 제외하면 좋은 일치를 보여주고 있다. 이는 후방 복사의 주파수

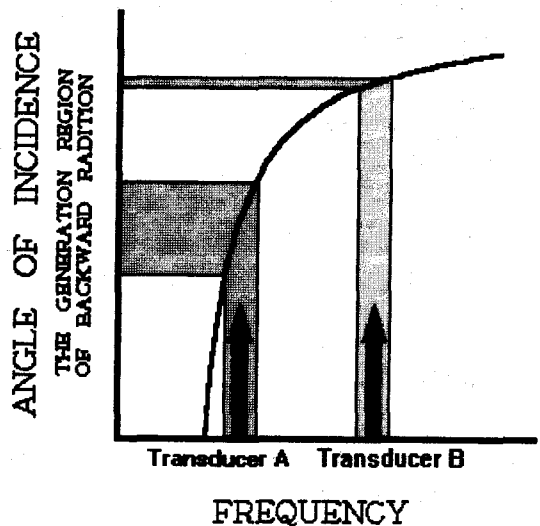


Fig. 7. The relation of an angle extent of incidence showing backward radiation and frequency spectrum of transducer in dispersion materials.

분석 기술의 정당성을 보여주는 것이며 실험의 간편성이나 시편 구조에 대한 제약이 덜한 면에서 많은 응용이 기대된다.

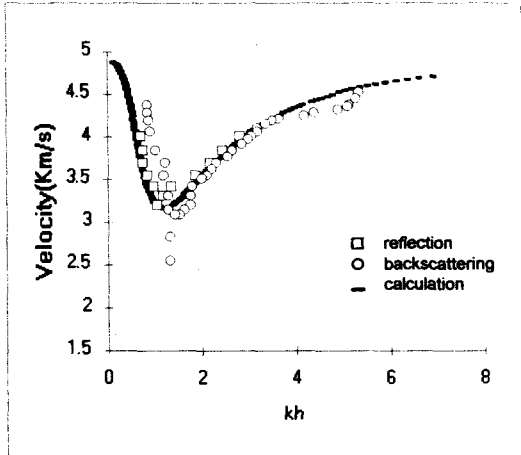


Fig. 8. Comparison between reflection and backward radiation frequency measurements for dispersion curve of an imperfect Si layered substrate [after Ko et al,13] ( $k$ : wavenumber of surface wave,  $h$ : thickness of layer).

### 3. 후방 복사 세기의 입사각 의존성

앞장의 논의에서 보듯이 후방 복사의 폭과 패턴 즉 후방 복사 세기의 입사각 의존성은 사용된 탐촉자의 주파수 응답 특성과 표면파 속도의 주파수 의존성 커브에 대한 이론적 배경이나 기존 측정치를 참조함으로써 쉽게 그 시편에 존재하는 표면 탄성과 속도의 주파수 의존성을 개략적으로 파악할 수 있으며 이렇게 구해진 주파수 의존성 커브와 후방 복사의 패턴으로부터 접합의 질, 표면 지역의 구조 그리고 layer의 두께와 성분등 여러 정보를 얻을 수 있는 기술의 개발 가능성을 보여준다.

#### 3.1. 실험

Si 시편과 유사하게 표면파 속도의 주파수 의존성이 역동적인 커브를 보여주는<sup>18)</sup> 니켈(nickel) 얇은층과 알루미늄(aluminum) 고체층의 조합이 본 실험의 시편 조합으로 선택되었다. 준비된 니켈 layer의 두께는 0.2 mm였고 알루미늄 substrate의 크기는 20x60x

120 mm<sup>3</sup> 이었다. 두 재료는 상업용 에폭시로 접합되었으며 경계면에 인위적으로 접합의 질을 조절하기 위해 구리(copper)분말(Junsei Chemical Co.,Ltd # 200)의 비를 바꾸어 가며 에폭시와 섞은 다음 접합재로 사용했다. 이는 분말의 비가 클수록 접합력은 떨어질것을 예상한 것이며 분말의 양이 접합의 불완전도와 완전히 비례한다고는 말할 수 없으나 충분한 개연성을 가지고 있다.

사용된 에폭시(YD-126)와 경화제(G-0240)는 국도 화학 제품으로 밀도는 각각 1.0278 g/cm<sup>3</sup>와 0.873 g/cm<sup>3</sup> 였다. 시편 제작의 조건은 다음과 같다.

- 1) Curing 온도; 80°C, Holding time; 2시간, Air Cooling
- 2) NA10 시편 ; 33%, 에폭시(15ml)+ 경화제(5ml)에 구리분말(10ml) 추가  
NA20 시편 ; 50%, 에폭시(15ml)+ 경화제(5ml)에 구리분말(20ml) 추가
- 3) 접합 후 최종 표면 연마; mesh # 1200

액체/고체 경계면에 초음파가 입사할때 입사한 방향으로 되돌아 오는 후방 산란 초음파의 세기의 연속적 입사각 의존성을 자동으로 측정하기 위하여 먼저 입사각 조절이 수동 및 자동으로 가능한 초음파 각도계가 장착된 물탱크가 제작되었다. Fig. 9에는 실험 시스템의 개략도와 제작된 초음파 각도계가 그려져 있다. 그림에서 보인 바와 같이 시편이 고정된 축에 따라 탐촉자가 연결되어 있고 장착된 DC 모터를 이용해 탐촉자가 회전함으로써 입사각이 변화도록 되어있

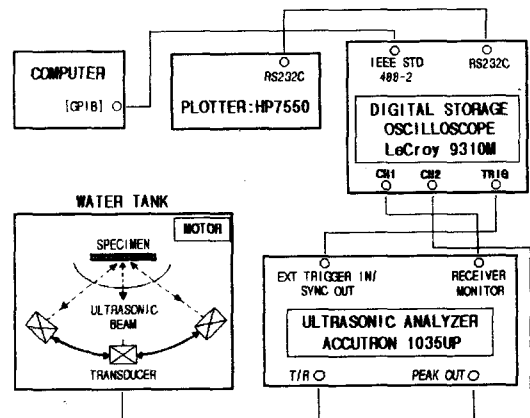


Fig. 9. Measuring system of angular dependence of backscattering

다. 이 장치는 동일축에 연결된 반사판을 이용해서 시편의 반사율 측정도 가능하도록 설계되었다.

필스-에코 방식에 의해 시편의 경계면에서 되돌아온 초음파는 탐촉자에 의해 RF 신호로 전환되고 초음파 발생 장치인 1035UP에서 증폭된 후 디지털 오실로스코프에 입력된다. 이때 gate에 의해 선택된 범위내의 최대값인 peak out도 동시에 입력된다. CRT 상 RF 신호를 관찰하여 후방 산란파를 gate한다. 초음파 각도계의 모터를 작동시켜 입사각이 변하도록 하면서 후방 산란된 신호의 크기는 오실로스코프의 auto-roll mode(2s/div)를 통해 저장되도록 했다. 따라서 시간축은 모터의 회전 속도와 비교해서 입사각으로 쉽게 환산될 수 있다. 이때 중요한 것은 수직 입사때의 신호와 후방 복사 신호와의 크기가 너무 차이가 나서 한 화면상에 같이 표현이 불가능하므로 이를 극복하기 위해 미리 조사된 증폭값(시편에 따라 10에서 50dB)만큼을 순간적으로 증폭시켜야 하는 것이다. 이렇게 저장된 후방 산란파의 각도 의존성은 HP 7550(RS 232C)을 통해 screen dump되고 GPIB를 통해 컴퓨터에 저장된다.

제작된 시편의 전반적인 신뢰도와 접합면의 지역별 일관성을 살펴보기 위해 순수 알루미늄, NA00, NA10 그리고 NA20 시편에 대해 C-Scan(model LS-01)이 수행되었다. 사용된 탐촉자는 공명진동수 5MHz의 촛점형(촛점 거리 7cm)이었고 분해능은 0.01 inch에서 수행되었다. 물과 시편의 경계면에서 반사된 첫번째 신호가 gate 되었고 탐촉자와 시편의 거리는 촛점 거리와 일치시켰다.

3.2. 결과 및 논의

Fig. 10에 NA10시편에서 후방 산란의 입사각 의존성의 연속적 측정이 보여진다. 정점 각도가 45°에 11°의 폭으로 정점의 세기가 12.4dB나 되는 강한 후방 복사가 나타났다. 또한 23° 정도에 다른 고차 모드에 의한 것으로 생각되는 10° 폭의 또 다른 복사 현상이 보여지며 정점의 세기는 약 18.2dB였다. Fig. 11은 NA20시편의 결과이다. 나타난 후방 복사는 정점의 세기가 34dB, 각도는 49.2° 그리고 폭은 11° 정도였다. NA20시편 역시 NA10시편과 유사하게 29° 정도에 후방 복사가 나타나며 세기는 37.3dB 그리고 폭은 9° 정도였다. Fig. 12-(a),(b)는 각기 NA10과 NA20시편에 대해 촛점용 탐촉자로 수직 반사된 초음파 신호의 C-Scan 결과들이다. NA10의 결과는 대부분의 지역에서 접착의 질이 균질함을 알 수 있다.

그러나 NA20 시편의 결과는 접착의 질이 중심부와 외곽지가 다를 뿐 아니라 중심 지역도 지역별로 접합의 질에 변화가 큼을 알 수 있다. 이런 지역은 불량한 접합일 가능성이 높고 부분적인 접착층의 박리의 존재도 예상된다.

Fig. 10과 Fig. 11에 보여진 후방 산란된 초음파의 입사각 의존성은 많은 정보를 가지고 있다. 후방 복

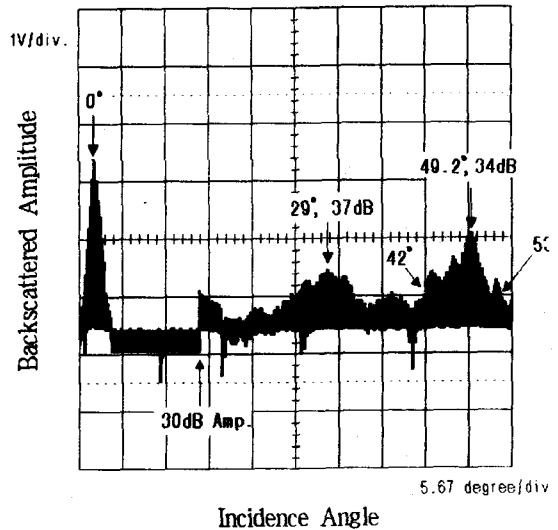


Fig. 10. Backward radiation of NA10 specimen

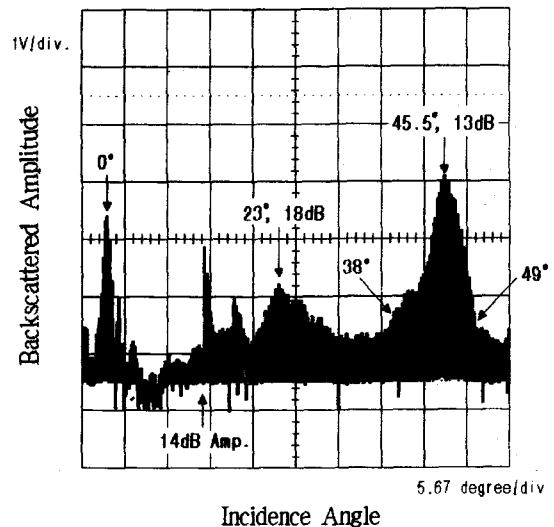


Fig. 11. Backward radiation of NA20 specimen

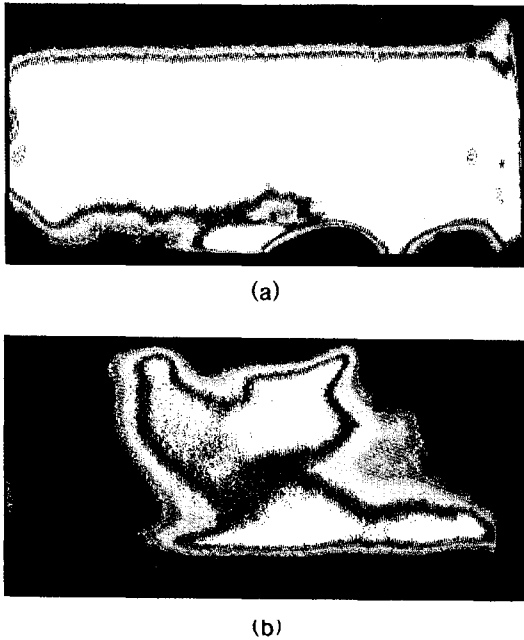


Fig. 12. C-SCAN result of (a)NA10 and (b)NA20 specimens

사가 나타나는 각도에서는 표면 지역에 그 각도에 대응되는 속도의 표면파가 발생됨을 보여주며<sup>18)</sup> 그 속도는 스넬의 법칙,  $V_R = V_w / \sin\theta$ 에 의해 결정된다. 여기서  $V_R$ 은 표면파의 속도,  $V_w$ 는 물속 종파의 속도 그리고  $\theta$ 는 후방 복사가 나타날 때의 입사각이다.

Fig. 13에는 수직 입사된 초음파가 알루미늄 substrate로부터 첫번째 반사된 RF신호와 그 주파수 성분이다. 알루미늄을 강체로 가정하면 측정된 주파수 성분은 사용된 탐촉자의 주파수 응답 특성으로 볼 수 있고 그 중심 주파수는 4.3MHz이며 10dB에서 주파수 값은 2.95와 5.35MHz이다. 여기서 10dB가 선택된 것은 Fig. 10와 Fig. 11에 나타난 후방 복사의 정점 세기와 후방 복사가 나타나기 시작하는 최소 세기의 비가 약 10dB이기 때문이다. 후방 산란파의 입사각 의존성 측정에서 입사된 탐촉자의 모든 주파수 성분은 표면파 속도의 주파수 의존성에 따라 대응된 각도에서 후방 복사를 유발하나 10dB 이하의 주파수 성분은 순수 후방 산란파의 세기보다 작아 해당 후방 복사가 측정되지 않고 10dB 범위에 속하는 2.95에서 5.35MHz의 성분에 대응된 입사각 범위에서만 후방 복사 현상이 발견된다. 후방 복사의 정점의 입사각에서 발생하는 표면파의 주파수는 바로 탐촉자의 중심

주파수 4.3MHz일 것이다. 2장의 분석에서와 같이 광역 주파수 폭의 초음파가 시편에 입사하면 표면파의 주파수 의존성에 의해 그 입사각에 대응된 속도를 가진 표면파는 특정 주파수를 가져야 한다. 이때 입사된 초음파의 주파수 성분이 그 특정 주파수를 포함하고 있지 않으면 해당 표면파는 발생될 수 없고 후방 복사 현상도 나타날 수 없다. 특정 주파수 성분을 가지고 있더라도 그 성분의 크기가 상대적으로 작아 산란신호에 가려진 경우도 마찬가지이다.

NA10시편에서 표면파 속도의 주파수 의존성은 Fig. 14에 보여진 순수 Ni/Al 시편의 주파수 의존성 이론 커브와 매우 비슷한 경향을 보여주며 그림에 나타난 우물 모양의 곡선도 가질 것이다. Fig. 10에 나타난 후방 복사의 정점에 해당하는 45°의 입사각에서 표면 지역에 탐촉자의 중심 주파수인 4.3MHz에 속도 2106m/s의 일반화 람 표면파가 발생했음을 간접적으로 알려준다. 이는 NA10시편의 주파수 의존 커브에 보여지는 우물 모양의 곡선의 깊이가 순수 시편에 비해 더 깊음을 의미한다. 폭 11°로 넓은 지역에서 나타난 후방 복사는 주파수 의존성 커브의 기울기가 급격함을 말해주며 비대칭적 후방 복사 패턴은 바로 그 기울기가 45°를 중심으로 작은 입사각쪽이 큰 쪽보다 더 급격함을 보여주는 것이다. Fig. 14의 의존성 커브에서 기울기의 큰 변화가  $kd=1.2$ 의 전환점 근처에서 나타나는 것으로 보아 측정된 후방 복사는 이 부근의 정보를 가지고 있음을 알 수 있다. 여기서  $k$ 는 표면파의 파수이며  $d$ 는 얇은 고체층의 두께이다. 45°의 표면파 속도 2106m/s와 4.3MHz의 주파수 그

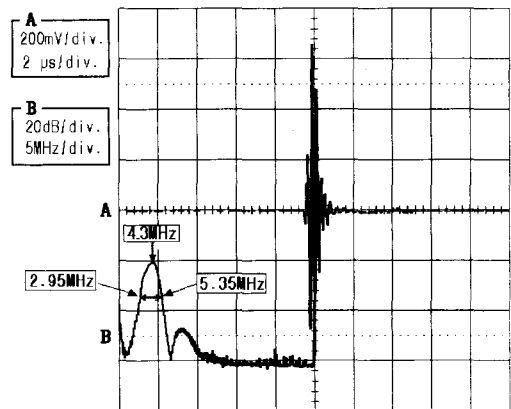


Fig. 13. Frequency response characteristics of transducer.

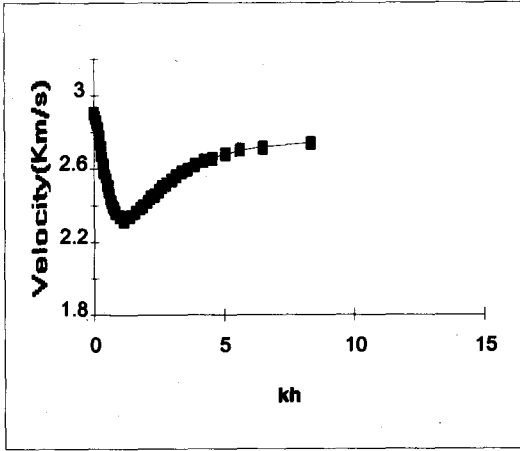


Fig. 14. The theoretical dispersion relation of Ni layer/ Al substrate ( $k$ : wavenumber of surface wave,  $h$ : thickness of layer).

리고 니켈층의 두께 0.2mm로부터 주파수 의존성 커브의 수평축 값,  $kd$ 가 2.56임을 알 수 있다. 실제 후방 복사를 유발하는 효과적인 주파수 범위는 약 3 - 5.3MHz이므로  $kd$ 의 범위가 1.8 - 3.2에 해당하며 이는 전환점의 오른쪽 부분에 해당된다.

Fig. 11에 나타난 NA20의 복잡한 후방 산란 패턴은 바로 입사 지역에 후방 복사를 유발하는 지역적 산란 및 반사요인이 많음을 말하며 이는 C-Scan 결과 (Fig. 12-(b))와도 잘 일치하는 바다. 비율에서 약간의 차가 있지만 구리 분말이 추가된 접착재 층을 보유한 NA10과 NA20시편은 각기 45°와 49°에서 후방 복사의 정점을 가진다. 앞의 논의에 따르면 비슷한 접착재 층의 탄성을 가졌음에도 NA20시편의 주파수 의존성 커브의 전환점의 깊이가 즉 존재할 수 있는 표면파 속도의 최소값이 훨씬 작게 나타나는 것이며 초음파가 주사된 지역의 평균적 접합의 질이 NA10시편에 비해 상대적으로 많이 떨어짐을 보여주는 척도이다.<sup>13,18)</sup>

지금까지의 결과와 논의를 종합할 때 NA10과 NA20시편 존재하는 일반화 램 표면파의 주파수 의존성 커브는 Fig. 13으로부터 후방 복사가 나타날 수 있는 입사 초음파의 효과적 주파수 영역 3 - 5.3MHz와 정점의 주파수 4.3MHz 그리고 주파수 의존 커브의 기본틀로써 Fig. 14에 보여진 순수 Ni/Ai에서의 이론적 커브를 참고할 때 초음파의 주파수 영역과

후방 복사가 나타나는 입사각 영역과의 관계에 대한 도식적인 설명과 함께 추정된 NA10과 NA20시편의 주파수 의존 커브가 Fig. 15에 보여진다. 실험치와의 쉬운 비교를 위해 수평축을  $kd$  대신에 주파수  $f$ 로 선택했다. 측정 지역인 효과적 주파수 3 - 5.3MHz가  $kd$ 의 범위 1.8 - 3.2에 해당하며 속도가 니켈 layer의 값(2750m/s)에 수렴하기 시작하는  $kd = 8$ 은 주파수 약 20MHz에 해당한다. 간단히 후방 복사 세기의 입사각 의존성의 측정만으로 시편내 일반화 램 표면파 속도의 주파수 의존성 커브가 추정되어 layer와 substrate사이 접합의 질을 평가할 수 있을 뿐 아니라, 후방 복사 패턴의 분석을 통해 표면 지역의 구조와 상태를 평가할 수 있음이 밝혀졌다.

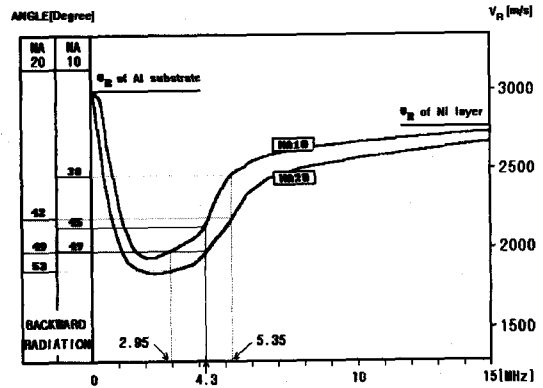


Fig. 15. The dispersion relation and the generation of backward radiation of NA10 and NA20 specimens.

#### 4. 결론

액체/고체 경계면에서 후방 산란된 초음파 현상인 후방 복사의 주파수 성분 분석과 입사각 의존성의 위치와 폭 그리고 패턴으로부터 일반화 램 표면파 속도의 주파수 의존성, 경계면 접합의 질, 다층 경계면의 구조와 상태등을 파악할 수 있었으며 특히 후방 복사의 측정과 분석 기술은 측정에 앞서 주파수 의존성에 대한 이론적 고려가 선행될 때 매우 유의한 비파괴적 평가 기술이 될 것임을 보였다. 제작된 초음파 각도계와 구성된 후방 복사 측정 시스템과 그리고 축적된 후방 복사의 분석 기술은 향후 다층 구조 표면 지역의 평가에 매우 효율적으로 응용될 것으로 본다.



## 감사의 글

이 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심 전문 연구비(과제번호 951-0204-043-01)의 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) W. G. Neubauer, "Ultrasonic Reflection of a Bounded Beam at Rayleigh and Critical Angle for a Plane Liquid-Solid Interface," *J. Appl. Phys.*, 44(1)(1973), pp. 48-55
- (2) H. L. Bertoni and T. Tarnir, "Unified Theory of Rayleigh Angle Phenomena for Acoustic Beams at Liquid - Solid Interfaces," *Appl. Phys.*, 2(1973), pp. 157-172
- (3) P. B. Nagy, A. Jungman and L. Adler, "Measurements of Backscattered Leaky Lamb Waves in Composite Plates," *Materials Evaluation*, 46, January(1988), pp. 97-100
- (4) M. de Billy, L. Adler and G. Quentin, "Measurements of Backscattered Leaky Lamb Waves in Plates," *J. Acoust. Soc. Am.*, 75(3)(1984), pp. 998-1001
- (5) S. Sasaki, "Back Reflection of Ultrasonic Wave Obliquely Incident to Solid Surface in Water," *Jpn. J. Appl. Phys.* 2(1963), pp. 198
- (6) "Ultrasonic Waves from a Liquid-Solid Interface," *J. Acoust. Soc. Am.*, 73(2)(1983), pp. 27-434
- (7) H. C. Kim and S. D. Kwon, "The Back Reflection Effects of an Ultrasonic Beam with a Gaussian Profile at the Liquid-Solid Interface," *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(4)(1985), pp. 1384-1386
- (8) P. B. Nagy and L. Adler, "On the Origin of Increased Backward Radiation from a Liquid-Solid Interface at the Rayleigh Angle," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(3)(1989), pp. 1355-1357
- (9) A. Hecht, R. Thiel, E. Neumann, And E. Mundry, "Nondestructive Determination of Grain Size in Austenitic Sheet by Ultrasonic Backscattering," *Materials Evaluation*, 39, September(1981), pp. 934-938
- (10) L. Adler, S. W. Wang, K. Bolland, M. de Billy and G. Quentin, "Rayleigh Angle Backscattering of Ultrasonic Beam from Single Crystal Nickel in 111 and 110 Planes," *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(5) (1985), pp. 1950-1953
- (11) S. D. Kwon, R. T. Ko and L. Adler, "Evaluation of an Imperfect Layered Substrate Using Backscattering Technique," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Edited by D. O. Thompson and D.E. Chimenti, vol. 13B Plenum Press, New York, (1994), pp. 1579-1586
- (12) R. T. Ko, P. B. Nagy and L. Adler, "Experimental Study of Interface Properties Between Layer and Substrate," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 11B, Plenum Press, New York, (1992), pp. 1967-1973,
- (13) R. T. Ko, S. D. Kwon and L. Adler, "Ultrasonic Evaluation of Interfacial Properties in Layered Substrate," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Edited by D.O.Thompson and D.E. Chimenti, vol. 12B, Plenum Press, New York, (1993), pp. 1459-1466
- (14) I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York, (1967).
- (15) W. G. Mayer, "Determination of Ultrasonic Velocities by Measurement of Angles of Total Reflection," *J. Acoust. Soc. Am.*, 32(10)(1960), pp. 1213-1215
- (16) M. de Billy, L. Adler and G. Quentin, "Para-meters Affecting Backscattered Ultrasonic Leaky-Rayleigh Waves from Liquid-Solid Interfaces," *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(3) (1982), pp. 1013-1020
- (17) S. D. Kwon and H.C. Kim, "The Dispersion of Acoustic Surface Waves by Velocity Gradients," *J. Appl. Phys.*, 62(7)(1988), pp. 2660-2664
- (18) S. D. Kwon, "The Generalized Lamb Surface Wave in Characterized Surface and Subsurface of Solid", 1992.1.13-1993.1.12, KOSEF Postdoc. Report

## The Evaluation Technique of Surface Region using Backward-Radiated Ultrasound

S. D. Kwon

Dept. of Physics, College of Nature Science  
Andong University, Andong 760-749

**Abstract** The velocity dispersion of surface acoustical wave(SAW) of Si layer/mesh Au/Si substrate was measured by the frequency analysis technique of backward radiation at liquid/solid interface. The difference of backward radiation patterns depending on used transducers (2, 5, 10MHz) confirmed that the backward radiation phenomenon was caused by the energy radiation from SAW generated in surface region. An ultrasonic goniometer was constructed to measure continuously the angular dependence of backscattered intensity. The angular dependences of backward radiation(5MHz) were measured for Ni layer/Al substrate specimens that were bonded by epoxy involving different content of Cu powder. It was known that the width and pattern of backward radiation had informations such as the velocity dispersion, bonding quality and structure of surface region.

---

(Received : September 13, 1996)