

## 고무 접합이 후방복사된 리키 램파 프로파일에 미치는 영향

### Effects of Rubber Loading on the Ultrasonic Backward Radiation Profile of Leaky Lamb Wave

송성진\*, 김영환\*<sup>†</sup>, 권성덕\*\*, 정민호\*

Sung-Jin Song\*, Young H. Kim\*<sup>†</sup>, Sung-Duk Kwon\*\* and Min-Ho Jung\*

초 록 다층재료의 접합특성 평가는 오랫동안 많은 논의가 있어 왔는데, 본 연구에서는 후방복사 초음파 기술을 사용하여 여러 층이 있는 재료의 특성을 평가하기 위한 자동화된 시스템을 개발하고 스틸 판재와 고무가 접합된 스틸 판재의 후방복사 프로파일을 획득하였다. 후방복사의 rf 파형과 주파수 스펙트럼은 리키 램파 모드들의 특성을 나타내고 있다. 접합된 고무 두께의 증가에 따라 입사각이 13.4° 일 때의 후방복사 진폭이 지수적으로 감소함을 보이며 부분적으로 고무가 접합된 시편에서 선택되어진 입사각으로 입사위치를 바꾸어가며 스캐닝한 결과 정확하게 고무가 접합되어 있지 않은 지역을 결정할 수 있었다. 리키 램파에 의한 후방복사는 판재의 물성은 물론이고 다층 재료의 접합특성 평가에 활용할 수 있다.

**주요용어** : 후방복사 초음파, 얇은 판재, 접합고무, 리키 램파, 접합계면 평가

**Abstract** The characterization of adhesive property in multi-layer materials has been hot issue for a long time. In order to evaluate adhesive properties, we constructed fully automated system for the backward radiation of leaky Lamb wave. The backward radiation profiles were obtained for the bare steel plate and plates with rubber-loading. The rf waveforms and frequency spectra of backward radiation show the characteristics of involved leaky Lamb wave modes. As the thickness of rubber-loading increased, the amplitude of profile at the incident angle of 13.4° exponentially decreased. Scanning the incident position over the partially rubber-loaded specimen shows good agreement with the actual rubber-loading. The backward radiation of leaky Lamb wave has great potential to evaluate the adhesive condition as well as material properties of plates.

**Keywords:** backward radiated ultrasonic, thin plate, rubber loading, leaky Lamb wave, characterization of adhesive layer

#### 1. 서 론

구조물의 중요한 부분들에는 뛰어난 기계적 특성을 가지는 고성능 재료들이 사용된다. 단일 재료를 사용하여

고강도, 높은 절연성 그리고 내부식성과 같은 특성들을 동시에 만족시키기는 어렵지만, 다층접합 재료는 이러한 문제들을 해결할 수 있다. 예를 들면, 지하에 매설되는 고압가스관은 고압에 견디어야 함은 물론이고, 땅에 묻히

기 때문에 부식에도 강해야 한다. 이를 위해서 강관의 바깥에 폴리에틸렌을 코팅하여 압력과 부식을 동시에 견디도록 할 수 있다. 또한, 로켓의 연소관의 경우에는 높은 온도와 압력을 견디 내야 하므로 고강도의 높은 절연성을 가진 재료를 사용하여야 한다. FRP와 같은 복합재료는 절연성이 좋지만 연소관의 압력을 견디기에는 강도가 충분하지 못하고, 강재는 높은 강도를 가지나 연소관의 열을 절연할 수 가 없다. 그러므로 복합재료를 강으로 둘러싼 다층접합 재료는 연소관의 재료로 사용될 수 있는데, 복합재료 층은 연소열을 절연하며 강철 층은 연소관의 높은 압력을 견디어 낸다[1,2]. 이들의 두께는 연소가스로 인한 압력을 견딜 수 있는 범위 내에서 가급적이면 얇게 만들어서 그 무게를 감소시킨다.

이러한 다층재료가 제 기능을 발휘하기 위해서는 층간의 접합이 잘 이루어져야 한다. 다층재료의 접합특성 평가는 오랫동안 많은 논의가 있어왔으며 초음파법을 비롯하여 많은 기술들이 개발되어왔다. 초음파 검사법은 시험편의 손상이 없이 각 층의 특성 뿐만 아니라 접합 상태를 평가할 수 있는 잠재력이 있다. 초음파를 사용하는 대부분의 기술들은 초음파 신호의 전파시간과 수신된 초음파 신호의 크기로부터 파의 속도와 감쇠를 측정하는데 전통적인 초음파법은 가진하는 펄스 지속시간이 각 층을 전파하는 시간보다 길어서 얇은 층의 계면으로부터의 반사신호가 분리되지 않기에 다층구조물의 특성을 평가하는 데에는 적합하지 않다. 이러한 이유로 오랫동안 얇은 판재를 평가하는 데에 있어 전통적인 체적파보다 유도초음파가 적합하다고 알려져 있다[3].

무한공간의 고체 매질에서는 입자의 진동방향이 파의 진행방향과 평행한 종파와 입자의 진동방향이 파의 진행방향과 수직인 횡파가 존재하며 이들의 전파속도는 매질의 밀도와 탄성계수에 의해 결정된다. 판에서는 두 표면이 경계면으로 작용하여 반사가 일어나며, 판 내부에서 표면으로 입사하는 파와 표면에서 반사하는 파가 서로 결합하여 판을 따라 전파하는 탄성파를 형성한다. 이와 같이 두 경계면 내에서 형성되어 전파하는 탄성파를 유도파 모드(guided mode) 또는 유도 초음파라 하며 특히 판에서 전파하는 유도 초음파를 판파라고 부른다. 판파는 그 특성에 따라서 판에서 수평횡파가 전파하는 경우, 판에 무한매질이 접해있는 경우의 수평횡파 (Love 파), 판에서 종파와 수직횡파가 결합된 램(Lamb)파, 판에 무한매질이 접해있는 경우의 종파와 수직횡파가 결합된 일반화된 램파가 있다[4]. 램파는 탄성계수와 밀도뿐만 아니라

판재의 두께와 파의 주파수에 의해 결정되는 전파속도로 판재를 따라 전파하는 탄성파로, 주파수와 판재의 두께가 주어졌을 때 다른 속도를 가지는 몇 가지의 모드가 존재할 수 있으며, 속도가 결정되었을 때 다른 주파수를 가지는 몇 가지 모드들이 존재할 수 있다[5]. 램파의 위상속도와 군속도는 램파의 모드는 물론이고 두께와 주파수에 따라서 달라지는데 이를 분산성이라 한다.

이와 같이 램파는 두께와 주파수에 따라서 여러 모드가 다른 위상속도와 군속도로 전파하기 때문에 그 신호를 이해하고 분석하는 데에 많은 어려움이 있지만, 얇은 판재에 대한 비파괴평가나 광범위 탐상과 같은 분야에서 널리 사용된다. 램파는 복합재료의 두께측정[6], kissing bond의 검출[7], 접착층의 평가[8], 레이저초음파를 이용한 접합층의 평가[9], 중착시에 박막의 두께 측정[10] 등에 사용되고 있으며, 그 외에도 판재의 비파괴 평가에 램파를 이용한 사례는 참고문헌 [11]에 자세히 기술되어 있다.

매질이 물과 같은 액체에 잠겨있을 경우에 램파는 전파하는 동안에 판재로부터 물로 에너지가 누수되기에 리키(leaky) 램파라 불려진다. 리키 램파는 1984년 de Billy[12] 등에 의해 보고된 이후 이 리키 램파는 복합재료의 평가에 널리 적용되었다[13,14]. Fig. 1 은 리키 램파 발생의 개략도이다. 물에 잠긴 판에 초음파 펄스를 입사시키면, 램파 모드들 중에서 입사 초음파와 위상이 일치하는 모드의 램파가 발생되어서 판재를 따라 주어진 속도로 전파하게 된다. 이때 발생하는 램파의 위상속도,  $v_p$ 는

$$v_p = \frac{v_f}{\sin \theta_i} \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서,  $v_f$ 는 물에서의 음속으로 1,500 m/s이고,  $\theta_i$ 는 입사각이다. 판을 따라서 전파하는 램파는 물속으로 에너지를 방출하는데, 이를 리키 램파라 한다. 리키 램파는 직접 반사된 파와 간섭을 일으켜서 null 영역을 생성하며[15,16] 판의 반대 방향으로 누수되는 에너지는 투과 빔을 만든다. 또한, 매질내의 불균일등으로 인하여 진행방향과 반대로 되돌아가면서 다시금 리키 램파(후방 산란된 빔) 또한 생성된다. 근원적으로 후방 산란은 후방복사 신호를 지배하며 후방 산란된 빔은 후방복사로 불려져 진다 [17,18]. 후방복사를 측정하는 방법은 크게 세가지로 나누어진다. 첫째로는 입사점 근처에서 발생하는 직접법, 판재의 모서리와 같은 기하학적

반사체에 의해서 반사되는 평균법, 그리고 입사점이 모서리와 같은 기하학적 반사체 근처일 경우에 두 가지가 같이 존재하는 구석법이 있다.

다층 재료를 접합할 때에 널리 사용되는 접착제는 폴리머 계열로 점탄성을 지닌다. 접착제의 점탄성은 뎀핑을 유발하여 판재를 전파하는 유도 초음파의 진폭이 감쇠된

다. 유도초음파의 감쇠에 대한 연구는 고체 도파관에서 점성 액체로 파의 에너지가 빠져나간다는 관점에서 진행되었다[19]. 이러한 결과들은 유도 초음파가 얼마나 감쇠되는가를 측정하여 각 층간의 접착이 잘 되었는지 여부를 평가하는 데에 활용될 수 있다.

연구에서는 후방복사 초음파 기술이 다층 재료의 접합 특성을 평가할 수 있는지를 조사하기 위하여 고무 접착이 후방복사 리키 램파에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위하여 자동화된 후방복사 초음파 시험장치를 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 스틸 판재와 고무와 스틸이 접합되어 있는 판재에서 후방복사된 신호의 진폭이 입사각에 의존하는 후방복사된 초음파의 프로파일을 측정하였다. 이 때 사용된 측정법은 평균법으로 시험편의 모서리에서 반사된 후에 후방복사된 초음파를 측정하였다. 후방복사를 이용하여 고무가 떨어져 나간 부위를 찾을 수 있는지를 검토하기 위해서, 접합된 고무의 두께에 따라 후방복사가 가장 크게 변하는 입사각을 선택하여 부분적으로 고무가 접합된 시편에서 입사위치를 바꾸어 가면서 후방복사 초음파 신호를 측정하였다.

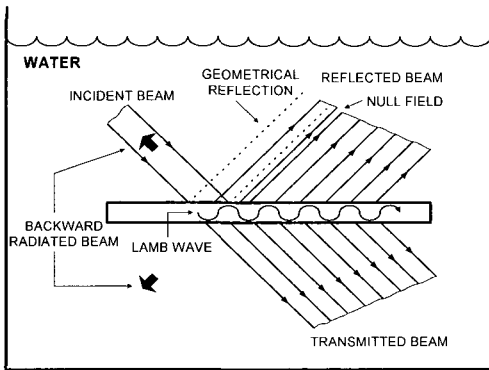


Fig.1 Schematic diagram of leaky Lamb wave generation

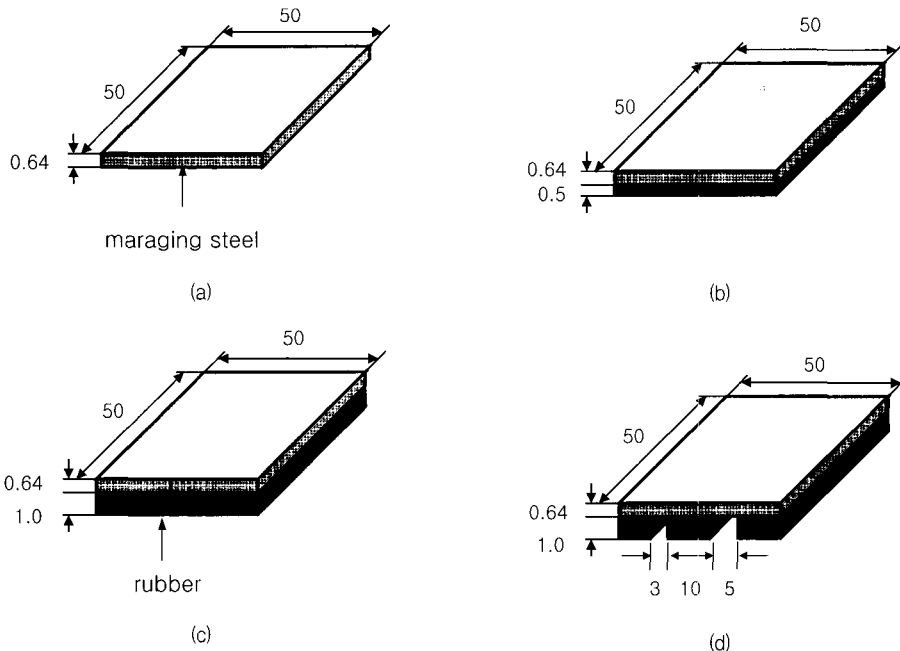


Fig. 2 Specimens under investigation. (a) bare steel plate, (b) steel plate with 0.5 mm thick rubber-loading, (c) steel plate with 1.0 mm thick rubber-loading, and (d) steel plate with partial rubber-loading

2. 실험장치 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편을 Fig. 2에 나타내었다. 유도 무기 연소관 조립체에 사용되는 두께가 0.64mm인 maraging 강과 여기에 0.5mm와 1.0mm 두께의 고무가 접합된 시험편, 그리고 부분적으로 고무가 접합된 시험편에 대하여 후방복사 시험을 수행하였다. 사용된 고무는 연소관 조립체에서 접착에 사용되는 Nitrile Butadiene Rubber (NBR)로서, 강관에 고무계 접착체를 도포한 후에 압력을 가하여 접합하였다. 고무를 접착한 시험편에서 고무의 일부분을 떼어내어 부분적으로 접합된 시험편으로 사용하였다[2].

자동화된 후방복사 실험장치를 Fig. 3에 나타내었다. 세 개의 마이크로 스텝모터를 사용하여 시편 홀더는 입사각을 바꿀 수 있도록 회전이 가능할 뿐만 아니라 입사 위치를 변화시켜가며 시편을 스캔할 수 있도록 하였다. 이러한 동작은 컴퓨터에 의해 제어되었으며, 회전운동 축과 병진운동 축의 정밀도는 각각 0.01°와 0.05mm이다.

여러 입사각에서 시편을 조사하기 위하여 Technisonic 5MHz의 광대역 초음파 탐촉자가 사용되었으며 초음파를 발진하고 수신하는 pulser-receiver는 Panametrics 5800을 사용하였다. 수신된 후방복사 신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy LT342)를 통해 획득되어지고 컴퓨터로 전송되어지며, 전송된 후방복사 초음파의 RF 파형과 주파수 스펙트럼은 저장되고 분석되었다.

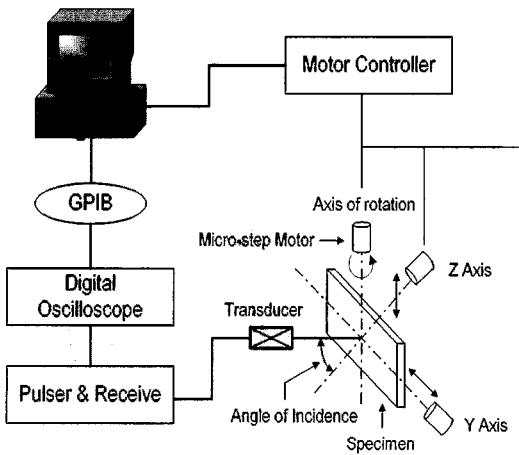


Fig. 3 Schematic diagram of automatic backward radiation experimental setup

3. 결과 및 토의

사용한 초음파 탐촉자의 특성을 조사하기 위해서 물과 스틸 블록사이의 경계면에서 반사한 에코의 신호를 획득하였고, RF 파형과 주파수 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과 사용한 탐촉자의 주파수 범위가 4 - 6 MHz 영역임을 알 수 있었다.

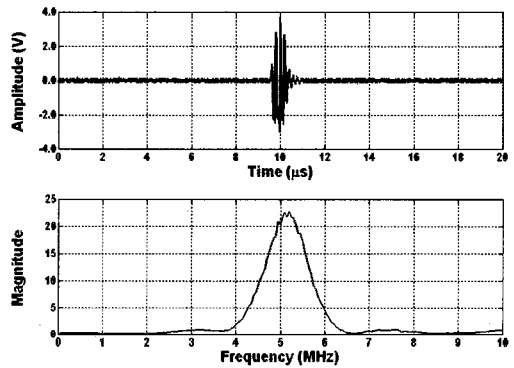


Fig. 4 The transducer characteristics in rf waveform and frequency spectrum obtained by interfacial echo between water and steel block

고무를 접합하지 않은 강판과 0.5 mm와 1.0 mm 두께로 고무가 접합된 시편에 대하여 입사각을 0.2° 간격으로 바꾸어가면서 초음파를 입사시키고 후방복사된 초음파 신호를 측정하였다. 후방복사 초음파의 최대진폭을 측정하였으며, 최대 진폭의 입사각 의존성을 Fig. 5에 나타내었다. 기본 스틸 판재에서 세 개의 후방복사 프로파일이 명확하게 관찰되었고 프로파일에서 피크가 발생하는 각도들은 13.4°, 14.8° 그리고 29.0°이며, 식 (1)으로부터 램파 모드에 대응하는 위상속도들은 각각 6,470, 5,870 그리고 3,090 m/s이다.

후방복사 프로파일에 나타나는 초음파의 모드를 규명하기 위해서 입사각이 프로파일에서 피크가 나타나는 13.4°와 14.8°, 그리고 두 피크 사이에서 후방복사 초음파의 크기가 최소가 되는 14.2°, 두 피크의 전후의 12.0°와 15.4°, 느린 속도모드에 해당하는 29.0°일 경우에 대하여 RF 파형과 주파수 스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. 입사각으로부터 위상속도를 알 수 있기 때문에, 입사각에 따라서 발생하는 후방복사 램파의 주파수 피크로부터 (주파수×두께)와 위상속도의 관계를 구할 수 있다 [20].

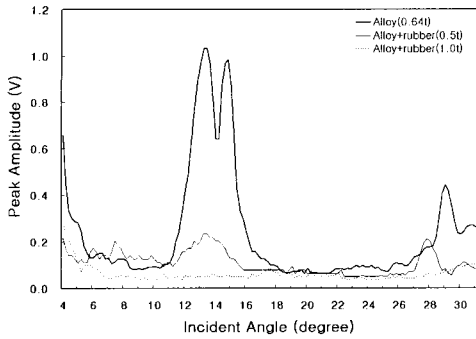


Fig. 5 Angular dependence of backscattered ultrasound involving backward radiation profiles for the bare steel and steel plates with 0.5 and 1.0mm thick rubber-loading

후방복사 램파의 모드를 규명하기 위해서 스틸에서의 위상속도 분산곡선을 구하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 분산곡선을 구할 때 사용한 종파와 횡파의 속도는 각각 5,900 m/s와 3,200 m/s이다. 입사각이 12.0° 일 때의 주파수 스펙트럼에서 4.5 MHz의 크기가 큰 피크와 3.8 MHz의 작은 크기의 피크가 나타나며 입사각이 13.4° 일 때, 이 피크들은 좀더 높은 주파수로 이동하여 간다. 입사각이 13.4° 일 때의 위상속도는 6,470 m/s이고 각각의 주파수 피크는 4.3과 4.7 MHz인데, 이를 Fig. 7의 위상속도 분산곡선에 나타내면 각각 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>에 각각 해당한다. 따라서, 낮은 주파수 성분은 A<sub>1</sub> 모드이고 높은 주파수 성분은 S<sub>1</sub> 모드이다. 입사각이 14.2° 일 때는 이 피크들이 높은 주파수로 이동하여 가고 14.8°의 입사각에서는 진폭

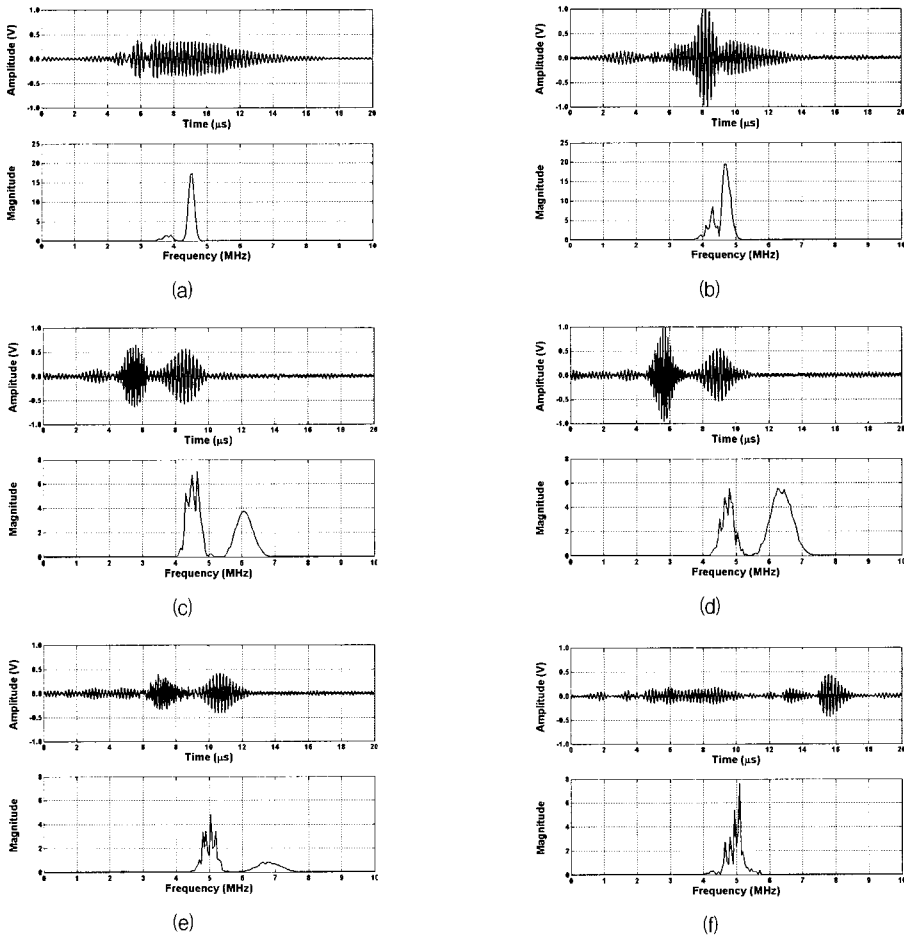


Fig. 6 The rf waveforms and frequency spectra of backward radiation for the bare steel plate at the incident angle of (a) 12°, (b) 13.4°, (c) 14.2°, (d) 14.8°, (e) 15.4° and (f) 29.0°

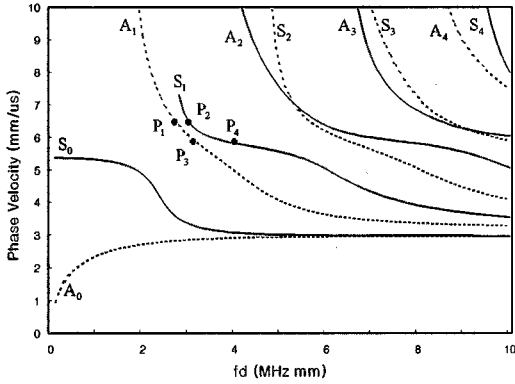


Fig. 7 Phase velocity dispersion curve for the steel plate

의 크기가 증가하면서 좀더 높은 주파수로 이동한다. 입사각이 14.8° 일 때의 위상속도는 5,870 m/s이고 주파수 피크는 4.8과 6.4 MHz인데, 이를 Fig. 7의 분산곡선에 나타내면 각각 P<sub>3</sub>과 P<sub>4</sub>에 각각 해당한다. 따라서, 낮은 주파수 성분은 A<sub>1</sub> 모드이고 높은 주파수 성분은 S<sub>1</sub> 모드이다. 15.4°의 입사각에서는 각각의 피크가 높은 주파수로 옮겨가고 그 진폭은 감소한다. 입사각이 29.0° 일 때에 나타나는 후방복사 초음파는 위상속도가 3,090 m/s로 이는 Rayleigh 초음파의 속도로, (주파수×두께)값이 커질 때에 S<sub>0</sub> 또는 A<sub>0</sub> 모드의 램파의 위상속도와 같다. 따라서, 입사각이 29.0° 일 때 발생된 후방복사는 S<sub>0</sub> 또는 A<sub>0</sub> 모드의 램파에 의한 것으로 판단된다. 이 현상은 후방복사가 분산성이 있는 초음파인 리키 램파와의 관련성을 보여준다. 여기에서 주목할 점은 입사각이 13.4° 일 때의 피크는 A<sub>1</sub> 모드에 의한 것이고, 14.8° 일 때의 피크는 S<sub>1</sub> 모드에 의한 것이라는 점이다[20].

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 고무가 접합되어 있는 강판에서의 후방복사된 초음파 프로파일의 진폭은 급속히 감소하는 경향을 보인다. 입사각이 13.4° 일 때보다 14.8°에서의 후방복사 진폭의 감소가 더욱 큰데, 이는 S<sub>1</sub> 모드가 고무부착에 의해 감쇠가 더 크게 일어나는 것을 의미한다. 그러나, Fig. 6의 RF 파형에서 알 수 있는 바와 같이 입사각 14° 이상에서의 후방복사 초음파 신호에는 여러 개의 피크를 포함하고 있으므로 13.4°의 입사각을 선택하였다. 입사각이 13.4° 일 때에 접합된 고무의 두께와 후방복사 진폭의 크기와의 관계를 Fig. 8에 나타내었는데, 접합된 고무의 두께가 증가함에 따라 후방복사된 초음파의 진폭의 크기가 지수적으로 감소함을 알 수

있다. 그러므로, 입사각이 13.4° 일 때의 후방복사의 진폭의 크기는 강판에 접합된 고무의 두께에 대한 정보를 제공해준다.

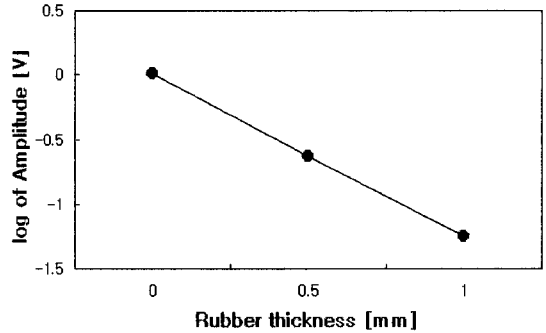


Fig. 8 Thickness of rubber-loading versus backward radiation amplitude at the incident angle of 13.4°

후방복사 초음파를 이용하여 고무가 있는 부위와 없는 부위를 판별하기 위해서 초음파 입사각을 13.4° 로하여 부분적으로 고무가 접합된 시편에서 입사위치를 바꾸어 가면서 후방복사 초음파 신호의 크기를 측정하였다. Fig. 8에서 고무가 부착되지 않은 경우의 후방복사 초음파의 크기를 기준으로 하였을 때에 이의 절반을 문턱전압으로 취하였으며, Fig. 9는 스캐닝 결과를 나타낸다. 그 결과로 부분적으로 고무가 접합된 시험편에 대하여 고무가 접합된 부분과 접합되지 않은 부분을 결정할 수 있었다.

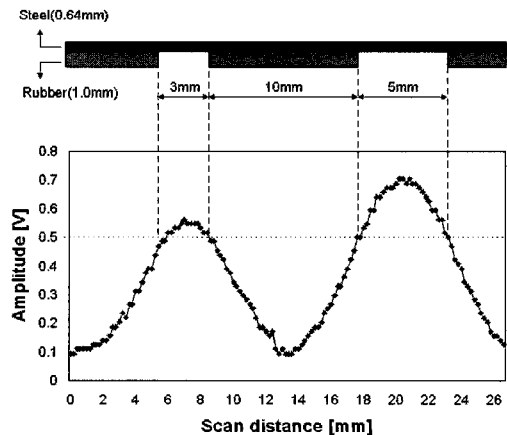


Fig. 9 Angle beam scanning results over the partially rubber-loaded specimen

#### 4. 결론

- 1) 입사위치 및 입사각을 컴퓨터로 제어할 수 있는 자동화된 후방복사 시스템을 개발하였으며 후방복사 신호를 획득, 저장하고 분석한 결과 모든 RF 파형과 주파수 스펙트럼을 분석할 수 있었다.
- 2) 고무가 접합되어 있지 않은 기본 시편과 고무가 접합된 시편에서의 후방복사 초음파의 프로파일을 획득하였고 후방복사 프로파일의 RF 파형과 주파수 스펙트럼은 리키 램파의 특성을 보인다.
- 3) 고무의 접합은 프로파일의 진폭크기를 감소시켰으며 피크위치도 이동하였다.  $13.4^\circ$ 의 입사각에서는 접합된 고무의 두께에 따라 프로파일의 진폭크기가 지수적으로 감소하였다.
- 4) 부분적으로 고무가 접합된 시편에서의 스캐닝 결과 실제 고무의 접합지역과 좋은 일치를 보였다.
- 5) 리키 램파의 후방복사는 판재의 물성뿐만 아니라 접합상태를 평가하는 데에도 매우 큰 가능성을 가지고 있다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원과 국방과학연구소의 시험편 제공으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 이상호, "항공용 복합재료에 대한 음향방출의 활용," 비파괴검사학회지, 제 21권 3호, pp. 313-318 (2001)
- [2] 박준수, 송성진, 김영환, 임수용, 윤남균, 조정표, "연소관 조립체 접합계면의 평가를 위한 비파괴시험에 관한 연구," 한국추진공학회 제 17회 학술발표회 논문초록집, pp. 90-93, 대전, (2001)
- [3] K. S. Tan, N. Guo, B. S. Wong and C. G. Tui, "Comparison of Lamb waves and pulse echo in detection of near surface defects in laminate plates," NDT & E Int., Vol. 28, pp. 215-223, (1995)
- [4] B. A. Auld, "Acoustic fields and waves in solids," Vol. II, Chap. 10, John Wiley & Sons, New York, (1973)
- [5] I. A. Victorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, (1967)
- [6] E. Moreno and P. Acevedo, "Thickness measurement in composite materials using Lamb waves," Ultrason., Vol. 35, pp. 581-586, (1998)
- [7] T. Kundu, A. Maji, T. Ghosh and K. Maslov, "Detection of kissing bonds by Lamb waves," Ultrason., Vol. 35, pp. 573-580, (1998)
- [8] P. B. Nagy and L. Adler, "Nondestructive Evaluation of adhesive joints by guided waves," J. Appl. Phys., Vol. 66, pp. 4658-4663, (1989)
- [9] K. Heller, L. J. Jacobs and J. Qu, "Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves," NDT&E Int., Vol. 33, pp. 555-563, (2000)
- [10] J. Pei, F. L. Degertekin, B. T. Khuri-Yakub and K. C. Saraswat, "In situ thin film thickness measurement with acoustic Lamb waves," Appl. Phys. Lett., Vol. 66, pp. 2177-2179, (1995)
- [11] 조윤희, "유도초음파에 대한 이해와 응용," 비파괴 검사학회지, 제21권 4호, pp. 446-460, (2001)
- [12] M. de Billy and L. Adler, "Measurements of backscattered leaky Lamb waves in plates," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 75, pp. 998-1001 (1984)
- [13] D. E. Cimenti and A. H. Nayfeh, "Leaky Lamb waves in fibrous laminates," J. Appl. Phys. Vol. 58, pp. 4531-4538, (1985)
- [14] P. B. Nagy, A. Jungman and L. Adler, "Measurements of backscattered leaky Lamb waves in composite plates," Mater. Eval., Vol. 46, pp. 97-100, (1988)
- [15] H. L. Bertoni and T. Tamir, "Unified theory of Rayleigh angle phenomena for acoustic beam at a liquid solid interfaces," Appl. Phys., Vol. 2, pp. 157-172, (1973)
- [16] L. E. Pitts, T. J. Polona and W. G. Mayer, "Theoretical Similarities of Rayleigh and Lamb modes of vibration," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 60, pp. 374-377, (1976)

- [17] 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.*, Vol. 85, pp. 1355-1357, (1989)
- [18] S. D. Kwon, M. S. Choi, and S. H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," *NDT & E Int.*, Vol. 33, pp. 275-281, (2000)
- [19] A. H. Nayfeh and P. B. Nagy, "Excess attenuation of leaky Lamb waves due to viscous fluid loading," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101, pp. 2649-2658, (1997)
- [20] 김영환, 송성진, 정민호, 권성덕, "판재에서 발생하는 후방복사 초음파의 분산성," *새물리*, 제45권, 제2호, pp. 135-141, (2002)