

초음파의 에코 높이를 이용한 微小 剝離 두께 측정에 관한 연구

한 응 교*, 장 경 영*, 황 병 일**, 이 범 성**, 박 익 근***

Measurement of Infinitesimal Delamination Thickness by Echo Amplitude of Ultrasonic Wave

E. K. Han, K. Y. Jang, B. I. Hwang, B. S. Lee and I. G. Park

Abstract If the infinitesimal delamination exists and the two waves can hardly be distinguished from each other on account of being much closer, we cannot measure the thickness of delamination by the time difference method.

On this study, we calculated the thickness of infinitesimal delamination model by means of measuring echo height due to the deflection of material particles and utilized Newton Ring for optical measurement as a delamination model.

From the result of Newton Ring expressed in the delamination model, we can calculate the infinitesimal delamination thickness up to $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ due to the difference of acoustic impedance by the ratio of the echo height to the total reflection.

1. 서 론

초음파를 이용하여 반도체 패키지 內 접합부의 剝離 두께 측정은 현재까지는 剝離部 양쪽 경계면에서의 반사파에 대한 시간의 차로써 측정을 했으나, 이것은 수신된 두 반사파의 구별이 뚜렷해야지만 올바른 측정값을 얻을 수 있으며, 만일 微小 剝離가 존재하여 두 반사파가 거의 인접하여 나타나 서로 구별하기 곤란할 정도가 되면 이러한 방법으로

는 微小 剝離 두께를 측정할 수가 없다.

또한, 微小 剝離 두께 측정의 정량화라는 측면에 있어서도, 아직은 이렇다할 연구결과 는 없다.

초음파가 매질 內를 전파해 갈 때는 매질의 밀도 변화로 인해 반드시 매질 입자의 변위를 동반하게 된다.^{1), 2), 3), 4)} 어떤 매질에 존재하는 剝離가 초음파에 의한 밀도 변화로 매질 입자가 剝離의 저면에 닿을 정도로 微小 剝離일 경우, 音壓과 剝離 두께, 그리고 표면

* : 한양대 정밀기계 공학과 (Han Yang University)

** : 한양대 대학원 (Han Yang University)

*** : 천안공전 용접기술과 (Cheon An Technical College)

접 수 : 1992년 12월 19일 (Received December 19, 1992)

거칠기에 따라 접촉 면적이 달라지게 되고, 이러한 요인에 의해 에코 높이의 차이가 생기게 된다.

본 연구는 剝離모델로서 광학용 뉴우튼 링(Newton Ring)을 이용하여, 이러한 매질 입자의 변위에 따른 에코 높이를 측정하여 微小 剝離의 두께를 구하고자 한다.

뉴우튼 링을 이용하여 剝離를 측정하고자 하는 연구는 있었으나,⁵⁾ 뉴우튼 링을 이용하여 매질 입자의 변위에 따른 微小 剝離 두께 측정에 대한 연구는 아직 없는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 剝離 두께 측정에 있어서 음향 임피던스(acoustic impedance)를 달리해 가면서, 탐촉자 인가 펄스 전압, 매질 입자의 변위, 그리고 에코 높이와의 관계를 살펴 보고, 微小 剝離 두께의 측정을 보다 정밀하고 정확하게 하여, 그 정량화의 기초적 토대를 마련하고자 한다.

2. 이 론

2.1. 파동時 매질 입자의 舉動 狀態 表現 式

음압과 입자 속도를 X방향 만인 1차원 파동방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial X^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial X^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \dots \dots \dots (1)$$

이러한 1차원 파동이 정현 변화를 한다면 時間項은 複素數 형태로 표현할 수 있고, 물리적으로는 X의 陽의 방향 만을 고려해야 하므로 音場中 微小부분의 음압과 입자 속도, 그리고 평균 위치로부터의 입자 변위에 대한 式은 다음과 같이 주어진다.⁶⁾

$$p(x, t) = p_+ \exp j(\omega t - kx)$$

$$u(x, t) = u_+ \exp j(\omega t - kx) \dots \dots \dots (2)$$

$$\zeta(x, t) = \int u \, dt = \frac{u_+}{j\omega} = \frac{u_+}{j\omega} \exp j(\omega t - kx)$$

$$u_+ = \frac{p_+}{\rho c}, \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式(2)는 실제 응용에 있어서는 실수부만 취하게 된다.

2.2. 뉴우튼 링을 박리모델로 한 박리 두께 측정 및 응용 원리

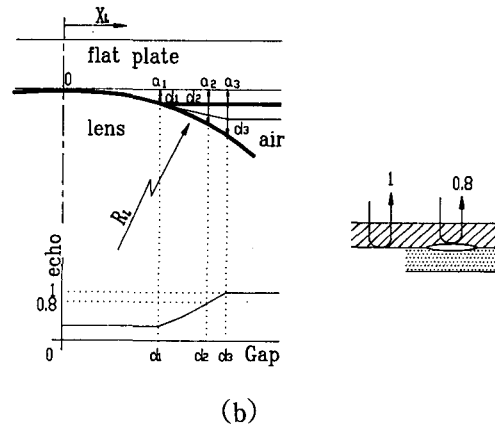
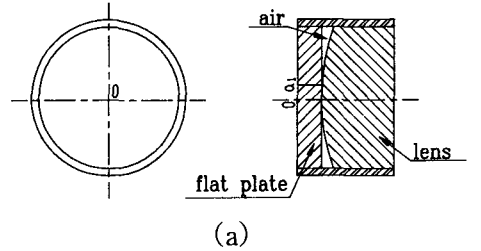


Fig. 1 Schematic model of delamination at Newton Ring

탐촉자 인가 펄스 전압에 의해 생기는 초음파는 에너지를 가지고 있으므로, 이 초음파가 매질 內에 가해지면, 매질의 입자들은 변위를 하게 된다.^{1), 2), 3), 4)} 그 변위의 정도는 탐촉자 인가 펄스 전압에 비례하며, Fig. 1에서 보여준 것과 같이 된다.

Fig. 1(a)는 평판(flat plate)과 一定한 곡률을 가지는 球面 상태의 렌즈를 조합한 시험편을 보여주고 있으며, 水浸 실험중 물이 스며들지 않도록 하고, 초음파 압력으로 생길 수 있는 평판의 모우멘트의 영향을 제거하기 위해, 시험편의 가장자리 전체에 걸쳐서 강력 접착제로 평판과 렌즈를 밀폐 및 고정

을 시킨다. 이런 상태에서 시험편은 Fig. 1 (b)에서 보여준 것과 같이 시험편 제작시 압력과 평판의 무게에 의해 침하량 d_1 이 생기게 된다. 횡축 중심점 o에서 a_1 점까지는 제작시 압력과 자중에 의해 두 매질이 접촉되어 있기 때문에 초음파를 가해도 접촉면에서의 입자의 변위는 제한을 받게 된다.

그리고 a_1 이상의 영역에서도 탐촉자 이동 거리에 따른 평판의 입자의 변위가 일정하기 때문에, 즉 입자가 렌즈면과 어떠한 형태로든 접촉을 하고 있지 않기 때문에 탐촉자 이동 거리에 따른 에코 높이의 함수관계가 성립하지 않는다.

그러나 a_1 에서 a_2 까지의 영역에서는 초음파에 의해 평판의 입자가 변위를 하고, 입자가 렌즈면과 접촉을 하게 된다. 이 때, 접촉 강도는 박리모델 두께에 따라 반비례하며, 가해진 초음파 펄스 전압의 강도에 따라 평판의 입자의 변위도 다르고, 표면 거칠기에 따라 접촉 면적의 차이가 생기기 때문에 초음파 에코 높이에 따른 未知의 박리 두께에 대한 함수관계가 성립한다.

시험편의 중심으로부터 반경 방향으로의 이동 거리에 따른 평판과 렌즈면 사이의 간격, 즉 박리모델 두께는 두 가지 방법으로 구할 수 있다.

하나는 光의 간섭무늬에 의한 방법이고, 또 하나는 기하학적인 형상에서의 렌즈의 곡률반경으로부터 구할 수 있는데, 렌즈의 곡률반경으로 박리모델 두께 d 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$d = R_L - \sqrt{R_L^2 - X_L^2} \dots\dots\dots (3)$$

그런데 이 두 가지 방법에 있어서 실험 결과는 거의 일치하고 있다.⁵⁾

이에 본 연구에서는 임의의 박리모델 두께를 구할 수 있는 식(3)을 사용하였다.

이러한 측정원리에 이어 응용원리는 다음과 같다.

임의의 초음파를 박리모델에 가했을 때, 박리모델 두께에 따른 반사파의 크기는 절반사하는 영역의 값을 1로 하였을 때 Fig. 1(b)

와 같이 나타난다.

이 때의 박리모델과 같은 음향 임피던스를 갖는 매질의 접촉면 등에 박리가 존재할 경우, 박리모델에서 가한 펄스 전압과 똑같은 전압을 박리부에 가했을 때 0.8이라는 반사파가 수신되었으면, 이 때 박리의 두께는 Fig. 1(b)에서 나타난 바와 같이 $(d_2 - d_1)$ 이 된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험 장치인 일본 日立建機(株)의 AT-7000의 블록 다이어그램으로서 펄스 발생기의 탐촉자 인가 전압에 의해 발생된 초음파는 탐촉자를 통해서 수신되는데, 이 수신된 초음파 펄스는 피이크 검출기를 통해서 컴퓨터로 전달되어 화상 처리되고, 스캐너 콘트롤러에 의하여 원하는 위치에서 검출된 초음파 펄스를 파형 디지타이저로써 샘플링하고, 컴퓨터에서 파형 분석을 하여 반사파 강도의 변화를 측정한다. 또한 그 결과를 디스크에 저장하거나 이미지 프로세서를 통해서 화면상에 나타내고, 또한 이것을 프린트한다.

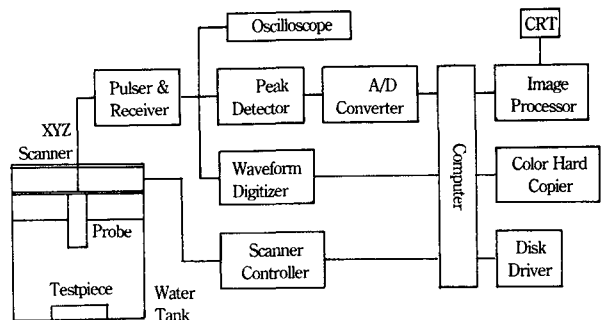


Fig. 2 Block diagram of experimental apparatus

3.2. 탐촉자와 시험편

Table 1에서는 탐촉자의 시험 성적표를, 그리고 Table 2에서는 시험편의 제원을 나타내었다.

Table 1. Probe performance documentation

| | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------|
| Probe Details | Normal Frequency | | 25 MHz | |
| | Element Diameter | | 6.35 mm | |
| | Focal Length | | 15 mm | |
| | Focus Type | | Spherical | |
| | Class | | Immersion | |
| Test Setup for Return Pulse | | Target | 1.5875 mm (steel ball) | |
| | | Water Path | 20.1μs | |
| | | | 1.4986 mm | |
| Pluse Echo Evaluation | Pulser | Energy Level | 11(140 Vp-p) | |
| | | Receiver | Receiver | 18 dB |
| | | | Attenuation | +2db sys loss |
| | | | Gain | 40 dB |
| | | | High Pass Filter | Out |
| | Results | Transmit Pulse | 140 Vp-p | |
| | | Reflection | 0.27 Vp-p | |
| | | Loop Gain | -54.295 dB | |
| | | Peak Frequency | 235 MHz | |
| | | Sound Field Evaluation | Pulser | Energy Level |
| Receiver | Receiver | 26 dB | | |
| | Attenuation | +2db sys loss | | |
| | Gain | 40 dB | | |
| | High Pass Filter | Out | | |
| | Results | Beam Diameter (at Focal Point 15 mm) | -2dB | 0.1524 mm |
| -3dB | | | 0.2032 mm | |
| -6dB | | | 0.2540 mm | |
| Depth of Field | | FP±6dB | 3.7592 mm | |

Table 2. Specification of Testpieces

| No. | Specification | |
|------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Testpiece① | Flat Plate | Material : Flint Glass Acoustic Impedance : $15.4 \times 10^9 \text{kg/m}^2\text{s}$ Thickness : 5mm Weight : 21g |
| | Lens | Material : Flint Glass Radius of Curvature : 460mm |
| Testpiece② | Flat Plate | Material : Flint Glass |
| | Lens | Material : Soda Glass Acoustic Impedance : $14.1 \times 10^9 \text{kg/m}^2\text{s}$ Radius of Curvature : 519mm |

| No. | Specification | |
|------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Testpiece③ | Flat Plate | Material : Flint Glass |
| | Lens | Material : SUS316 Acoustic Impedance : $45.6 \times 10^9 \text{kg/m}^2\text{s}$ Radius of Curvature : 519mm |
| Testpiece④ | Flat Plate | Material : Flint Glass |
| | Lens | Material : Acrylic Resin Acoustic Impedance : $3.2 \times 10^9 \text{kg/m}^2\text{s}$ Radius of Curvature : 519mm |

3.3. 실험방법

3.3.1. 접촉 매질이 서로 같은 박리모델에서의 에코랑 측정

수조 속에 평판과 렌즈의 매질이 플린트 글라스(flint glass)로 서로 같은, 즉 음향 임피던스가 서로 같은 시험편①을 넣고, 스캐너 콘트롤러를 이용해서 탐촉자의 높이를 조정하여 평판의 저면에서 에코가 최대가 되도록 한 다음, 탐촉자를 수평으로 이동시켜 시험편의 접촉면의 중심점에 맞추며, 이 때 이득(gain)은 24dB로 하였다. 이 때 시험편은 평판과 렌즈를 맞댄 상태에서 가장자리 전체에 걸쳐 강력 접촉체로 밀폐 및 고정을 시키고, 21g의 평판을 위로 향하게 놓는다. 이와 같이 탐촉자의 초점을 중심점에 맞춘 상태에서 탐촉자의 높이를 일정하게 유지시키면서, 탐촉자를 50μm씩 수평으로 이동시켜 수신되는 초음파 펄스를 샘플링한다. 이 때 샘플링 주기(sampling time)는 0.5ns이고, 샘플링 데이터(sampling point)의 수는 1,024로 한다. 샘플링이 끝나면 이동한 각 지점에서의 샘플링된 초음파 펄스의 데이터에서 반사파 전압의 첨두치(peak-to-peak)를 구한다.

3.3.2. 접촉 매질이 서로 다른 박리모델에서의 에코랑 측정

평판과 렌즈의 매질이 서로 다른, 즉 음향 임피던스가 서로 다른 박리모델인 시험편②, ③, ④,를 시험편①,과 똑같은 조건과 방법으로

로 실험을 한다.

시험편②, ③, ④의 평판은 플린트 글라스로 同一하고, 렌즈만 각각 달리한 것이다.

그리고 시험편①에서와 같이 평판을 위로 향하게 하여 시험편을 수조에 놓고, 탐촉자를 50 μm 씩 이동시키면서 수신되는 초음파 펄스를 샘플링하고 그 데이터에서 반사파 전압의 첨두치(peak-to-peak)를 구한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 접촉 매질이 서로 같은 박리모델에서의 박리 두께와 측정된 에코 높이와의 관계

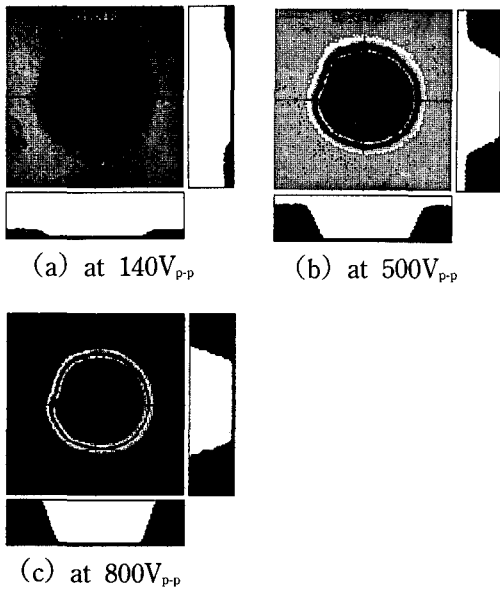
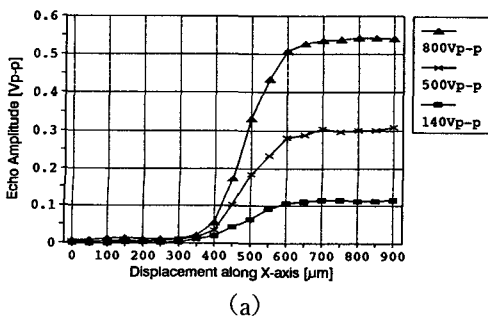
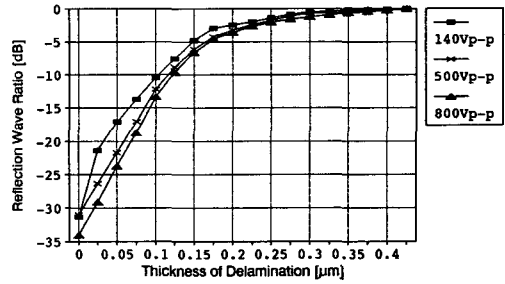


Fig. 3 C-scan of testpiece ①



(a)



(b)

Fig. 4 Results of testpiece ①

Fig. 3과 4는 평판과 렌즈의 매질이 플린트 글라스로 음향 임피던스($15.4 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$)가 서로 같은 시험편①에서의 결과이며, 이론적으로는 음압 반사가 없다.

Fig. 3은 탐촉자 인가 펄스 전압을 140V_{p-p}, 500V_{p-p}, 800V_{p-p}로 했을 때의 에코 높이에 대한 C-스캔 像이다.

두 매질이 접촉되어 있는 면에서의 초음파는 두 매질의 음향 임피던스가 같기 때문에 이론상으로는 全透과되어 접촉면에서의 에코 높이는 微小하나, 평판 매질 입자가 변위를 하더라도 렌즈면과 접촉을 하지 않는 부분은 공기가 항상 内在되어 있기 때문에 全반사하여 一定한 에코 높이를 가지게 된다. 그러므로, Fig. 3에서 나타난 것과 같이 탐촉자 인가 펄스 전압을 높일수록 全반사하는 영역의 에코 높이는 비례적으로 높아지고 있다. 여기에서 에코의 구배가 존재하는 영역은 평판의 매질 입자가 변위를 하여 렌즈면과 접촉을 하는 영역으로 접촉강도와 표면 거칠기에 따라 에코 높이의 差가 존재하게 된다.

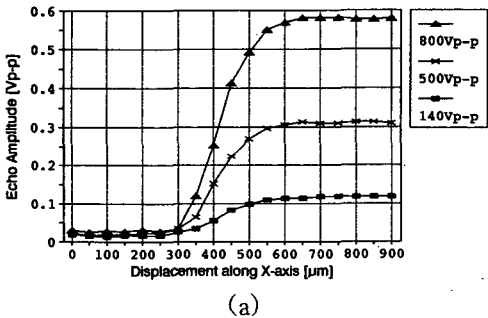
Fig. 4(a)는 Fig. 3을 다시 나타낸 것으로 횡축 중심점에서의 이동거리 300~400 μm 사이에서 에코의 구배가 시작되고 있고 탐촉자 인가 펄스 전압이 클수록 접촉면이 더 넓게 나타나고 있으며, 이는 펄스 전압에 의한 초음파가 매질의 입자를 변위시키며, 인가 전압이 클수록 입자가 비례적으로 크게 변위한다는 것을 알 수 있다.

그리고, 탐촉자 인가 펄스 전압에 따라서 全반사하는 영역에서 에코 높이의 差가 존재함을 알 수 있다.

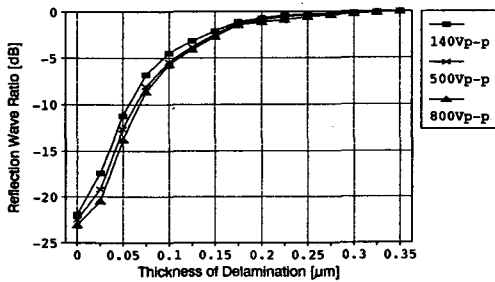
Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)를 박리모델 두께에 대한 수신 반사파의 비로 다시 나타낸 것이며, 이는 전반사 영역의 에코 값에 대한 입자 변위의 접촉에 의한 에코 높이의 비이다. 여기에서 $0.3\mu\text{m}$ 정도까지의 박리 두께는 수신 반사파의 비만 알면 바로 구할 수 있다.

또한, 탐촉자 인가 펄스 전압이 높을수록 곡선이 우측으로 가는 경향을 보이고 있고, 이것으로 보아 탐촉자 인가 펄스 전압이 클수록 측정 정밀도가 높아지고, 측정범위도 넓어진다는 것을 알 수 있다.

4.2. 접촉 매질이 서로 다른 박리모델에서의 박리 두께와 측정된 에코 높이와의 관계



(a)



(b)

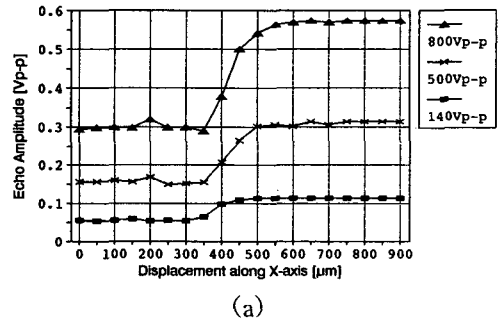
Fig. 5 Results of testpiece ②

Fig. 5는 평판과 렌즈의 매질이 각각 $15.4 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 와 $14.1 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 의 음향 임피던스를 갖는 플린트 글라스와 소다 글라스인 시험편②에서의 결과이며, 이론적인 음압 반사율은 0.044이다.

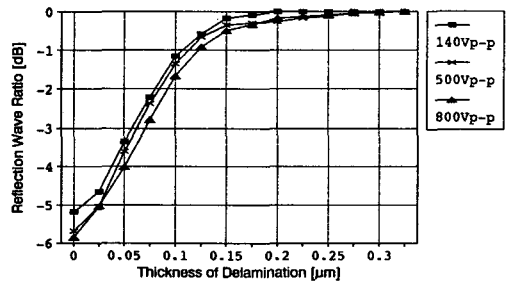
Fig. 5(a)를 보면 횡축 중심점에서의 이동 거리 $250 \sim 300\mu\text{m}$ 사이에서 에코의 구배가 시작되고 있고 탐촉자 인가 펄스 전압이 클수록 접촉면이 더 넓게 나타나고 있으며, 탐촉자 인가 펄스 전압에 따라서 접촉면에서 음향 임피던스의 차이가 없는 시험편①보다 에코 높이가 약간 크게 나타나며, 전반사하는 영역에서 에코 높이의 차이가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)를 박리모델 두께에 대한 수신 반사파의 비로 다시 나타낸 것이며, 여기에서 $0.2\mu\text{m}$ 정도까지의 박리 두께는 수신 반사파의 비로써 바로 구할 수가 있다.

또한, 탐촉자 인가 펄스 전압이 높을수록 곡선이 우측으로 가는 경향을 보이고 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 Results of testpiece ③

Fig. 6은 평판과 렌즈의 매질이 각각 $15.4 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 와 $45.6 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 의 음향 임피던스를 갖는 플린트 글라스와 스테인레스강인 시험편③에서의 결과이며, 이론적인 음압 반사율은 0.495이다.

Fig. 6(a)에서 횡축 중심점에서의 이동거리 300~350 μm 사이에서 에코의 구배가 시작되고 있고 탐촉자 인가 펄스 전압이 클수록 접촉면이 더 넓게 나타나고 있으며, 두 접촉 매질의 음향 임피던스의 차이가 크기 때문에 탐촉자 인가 펄스 전압에 따라서 접촉면과 소반사하는 영역의 에코 높이의 차이가 동시에 크다는 것을 알 수가 있다.

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)를 박리모델 두께에 대한 수신 반사파의 비로 다시 나타낸 것으로, 0.2 μm 정도까지의 박리 두께는 수신 반사파의 비로써 바로 구할 수가 있다.

또한, 탐촉자 인가 펄스 전압이 높을수록 곡선이 우측으로 가는 경향을 보이고 있다는 것도 알 수 있다.

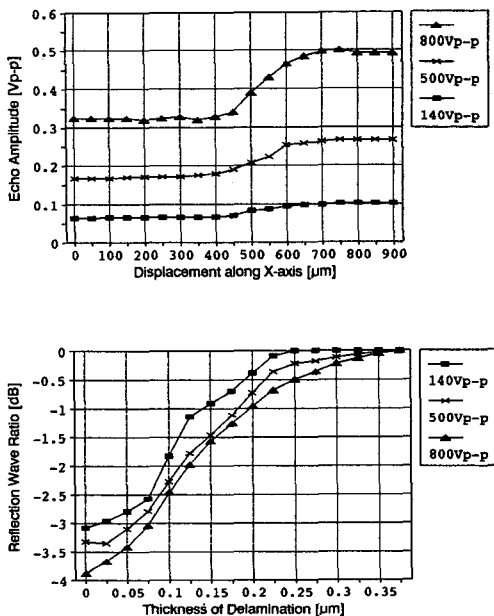


Fig. 7 Results of testpiece ④

Fig. 7은 평판과 렌즈의 매질이 각각 $15.4 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 와 $3.2 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 의 음향 임피던스를 갖는 플린트 글라스와 아크릴 수지인 시험편④에서의 결과이며, 이론적인 음압 반사율은 0.656이다.

Fig. 7(a)에서 횡축 중심점에서의 이동거리 300~450 μm 사이에서 에코의 구배가 시작되고 있고 탐촉자 인가 펄스 전압이 클수록 접촉면이 더 넓게 나타나고 있으며, 두 접촉 매질의 음향 임피던스의 차이가 크기 때문에 시험편③에서와 같이 탐촉자 인가 펄스 전압에 따라서 접촉면과 소반사하는 영역의 에코 높이의 차이가 동시에 크다는 것을 알 수가 있다.

Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)를 박리모델 두께에 대한 수신 반사파의 비로 다시 나타낸 것으로, 0.25 μm 정도까지의 박리 두께는 수신 반사파의 비로써 바로 구할 수가 있고, 탐촉자 인가 펄스 전압이 높을수록 곡선이 우측으로 가는 경향을 보이고 있다는 것도 알 수 있다.

5. 결 론

탐촉자 인가 펄스 전압에 따른 매질 입자의 변위에 있어서 미소 박리 두께 측정의 가능성을 검토하고, 박리모델로서 광학용 뉴우튼 링을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

음향 임피던스에 따른 음압 반사가 없는 플린트 글라스의 조합인 박리모델에서는 0.3 μm 정도까지의 박리 두께를 측정할 수 있으며, 음압 반사율이 0.044인 플린트 글라스와 소다글라스의 조합에서는 0.2 μm 정도까지, 음압 반사율이 0.495인 플린트 글라스와 스테인레스강의 조합에서는 0.2 μm 정도까지, 음압 반사율이 0.656인 플린트 글라스와 아크릴 수지의 조합에서는 0.25 μm 정도까지의 미소 박리 두께를 소반사에 대한 에코 높이의 비만 알면 바로 측정할 수 있다.

실제에 있어서는 박리를 이루는 매질의 표면 거칠기에 따라서 접촉 면적의 차이가 존재하므로, 본 연구를 통하여 분석한 탐촉자 인가 펄스 전압과 음향 임피던스의 차이에 의한 에코 높이와 표면 거칠기와의 상관 관계를 해석하고, 이에 따른 정량화의 연구가 이루어야 할 것이다.

References

- 1) J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlagn, 3rd ed. (1983)
- 2) 山本美明, 超音波基礎工學, 日刊工業新聞社, 1st ed. (1981) pp 40-53
- 3) 野村昭一郎, 振動・波動入門, コロナ社, 1st ed. (1977) pp 106-109
- 4) 韓應教, 黃汐泰, 李範成, 朴緒俊, 高分子 PVDF 振動子を 利用한 点集束超音波 振動子の 特性, 韓國非破壞檢查學會, 제22호 Vo1, 12 No. 2(1992)
- 5) 下平貴之, 早川泰夫, 超音波信號のFFT解析による接着. 剝離評價の検討, 日本非破壞檢查協會資料 No. 21297 (1990) pp 45-50
- 6) 西山靜男, 音響振動工學, コロナ社, 1st ed. (1979) pp 40-49