

〈技術論文〉

초음파 주파수 분석법에 의한 결함의 정량적 평가에 관한 연구

한응교* · 김성규** · 박준서** · 이범성** · 박익근***

(1991년 12월 20일 접수)

Quantitative Evaluation of Flaw by Ultrasonic Spectroscopy

Eung Kyo Han, Seong Kyoo Kim, Jun Seo Park,
Bum Sung Lee and Ig Gun Park

Key Words : Spectroscopy(주파수 분석법), Quantification(정량화) Fourier Transform(푸리에 변환) Ultrasonic Pulse(초음파 펄스) Central Frequency(중심주파수)

Abstract

In recent years, along with the development of ultrasonic probe with wide frequency range, the digitization of measuring instrument, and the development of operating process technics, it is possible to analyze ultrasonic pulse in frequency range. In this paper, applying to flaw model the ultrasonic spectroscopy method that can analyze ultrasonic pulse in frequency range, we examine the possibility of quantification of flaw and apply its result to the void and seperation in LSI package. Consequently, by using the change in frequency distribution and central frequency of ultrasonic pulse detected from flaw, the estimation of shape, size, and depth of flaw is possible. The change in central frequency is changed minutely by the sample materials and position of flaw, but changed mainly by the shape and size of flaw. And we can quantify the shape and size of flaw in LSI package using the experimental result through flaw model.

기 호 설 명

- A : 초음파 펄스 신호의 진폭
- $F(u(x,t))$: $u(x,t)$ 의 푸리에 변환
- k : 초음파 펄스 신호의 파수($k=\omega/C$)
- $u(x,t)$: 시간 영역에서의 초음파 펄스
- α : 감쇠 계수
- \emptyset : 초음파 펄스 신호의 위상
- ω : 초음파 펄스 신호의 각주파수

1. 서 론

종래부터 초음파 펄스를 이용한 비파괴적인 재료 평가 및 탐상에 관한 많은 연구가 진행되어 왔고,

*정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

**정회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

***정회원, 천안공업전문대학 용접기술과

이러한 대부분의 연구는 재료 내부를 전파하는 초음파 펄스 파형을 시간 영역에서 처리하여 초음파의 전파 시간 또는 수신 펄스의 강도 및 이러한 측정 인자들로부터 구한 음속, 감쇠율 등을 기초로 해서 전개되고 있다.^(1,2)

재료 내부에서 초음파에 의해 검출된 결함의 크기를 정량화하는 것은 중요한 문제로서, 일반적으로 큰 결함으로부터 반사되는 초음파 펄스는 작은 결함으로부터 반사되는 초음파 펄스보다 큰 강도를 가지므로, 재료내에서 결함으로부터 불연속적으로 간섭되어 반사되는 초음파 펄스의 강도는 결함의 크기로서 보통 사용된다. 매질속의 불연속면으로부터 반사되는 초음파 펄스의 강도는 결함과 같은 반사체의 물리적 크기 이외에도 수많은 인자들, 즉

반사체의 방향, 구성, 경계면의 재질, 감쇠에 의한 에너지 손실 및 음향 임피던스의 차 등에 영향을 받는다. 따라서 반사되는 초음파 펄스의 강도에 의한 결함 치수의 측정은 임의의 방향이나 구성을 갖는 특정한 결함에 대해서만 이용될 수 있다.^(3,4,5)

그러나, 최근에는 광대역 초음파 센서의 개발, 측정 기기의 디지털화, 고정도의 연산 처리 기술의 발전에 따라, 초음파 펄스 파형 중에서 필요한 정보를 선택, 추출하여 주파수 영역의 정보로서 처리가 가능하게 되었다.^(6,7,8,9) 이러한 주파수 분석법의 초음파 탐상에의 적용은 O.R. Gericke이 초음파 펄스의 주파수 분석에 의한 결함 치수의 측정 방법을 제창한 이래,⁽¹⁰⁾ 국내외에서 여러가지로 검토되고 있고,^(11,12,13,14) 결함의 크기 및 성질을 측정하는데 유효한 방법임이 입증되고 있다.^(15,16,17)

본 연구에서는 초음파 펄스 파형을 주파수 영역에서 해석하는 초음파 주파수 분석법을 결함 모델에 적용하여 결함의 정량화의 가능성을 검토하고, 그 결과를 반도체 패키지에 존재하는 보이드 및 박리에 응용함으로써 초음파 주파수 분석법에 기초한 결함의 정량화에 관하여 연구하였다.

2. 초음파 주파수 분석법의 원리

단 펄스법에 의한 초음파 주파수 분석법은 광대역 주파수 범위에서 초음파 펄스의 주파수 정보를 이용한 스펙트럼 해석법으로서 광대역 주파수 성분을 갖는 초음파 펄스를 시료에 입사시켜서 반사파의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화로부터 비파괴적인 재료 평가 및 결함 탐상을 하는 것으로서 그 원리는 다음과 같다.

균질 매질을 통해서 전파된 초음파 펄스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi \right\} \exp[i(\omega t - kx)] \exp[-ax] d\omega \quad (1)$$

이때, A, ω, k, ϕ, a 는 각각 펄스파의 진폭, 주파수, 파수($k = \omega/C$), 위상, 그리고 감쇠를 나타낸다.

한편, $x=0$ 일때 (1)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi \right\} \exp[i\omega t] d\omega \quad (2)$$

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} u(0, t) \exp[-i\omega t] d\omega \right\} \exp[i\omega t] d\omega \quad (3)$$

(2)식과 (3)식으로부터 $u(0, t)$ 의 푸리에 변환은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(u(0, t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(0, t) \exp[-i\omega t] dt = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) \exp[-i\phi] d\phi \quad (4)$$

그러므로, (4)식으로부터 $u(x, t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ F(u(0, t)) \exp[i(\omega t - kx)] \right\} \exp[-ax] d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ F(u(0, t)) \exp[-ikx] \right\} \exp[i\omega t] d\omega \quad (5)$$

또한, 균질 매질을 통하여 전파된 초음파 펄스의 주파수 성분은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.¹⁸⁾

$$F(u(x, t)) = F(u(0, t)) \exp[-ikx] \exp[-ax] \quad (6)$$

따라서 최종적으로 수신된 초음파 펄스의 주파수 특성 함수 $F(u(x, t))$ 를 시료의 재료 평가 및 결함 탐상, 결함의 정량화에 응용할 수 있다.

따라서 미지의 결함으로부터 반사된 초음파 펄스의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화량, 그리고 탐촉자의 이동 거리를 구함으로써 결함의 형상 및 크기 등을 알 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 블록

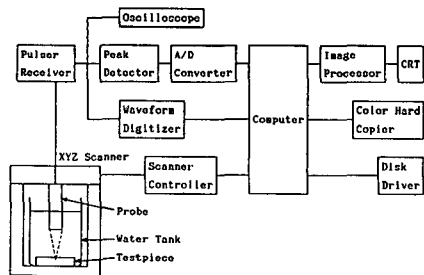


Fig. 1 Blockdiagram of experimental apparatus

선도로서 탐촉자(probe)를 거쳐 펄스발생기(pulser) 및 수신기(receiver)를 통해서 수신된 초음파 펄스는 피크 검출기(peak detector)를 통해서 컴퓨터로 전달되어 화상 처리되고, 스캐너 컨트롤러(scanner controller)에 의하여 원하는 위치에서 검출된 초음파 펄스를 파형 디지털라이저(waveform digitizer)로서 샘플링하고, 컴퓨터에서 FFT분석하여 초음파 펄스의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다. 또한 그 결과를 디스크 드라이버에 저장하거나 화상 처리기(image processor)를 통해서 모니터상에 나타내고 칼라 하드 복사기(color hard copier)로써 프린트한다.

본 실험에서 사용한 초음파 탐촉자는 광대역 수침식 점집속형 탐촉자로서, 초점 거리는 10 mm이고, 공칭 주파수는 25MHz이다.

3.2 시험편

본 실험에서 사용된 시험편의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of testpiece

No.	Specification
Testpiece ①	Diameter of Ball[mm]=1,2,4,6,10 Material : Stainless steel(SUS 304)
Testpiece ②	(Ball and Step in Acryl) Diameter of Balls[mm]=3 Depth of Ball[mm]=3 Depth of Ball[mm]=0.6, 1.07, 1.54, 1.94, 2.77 Height of Step [mm]=0.5 Material : Stainless stell (SUS 304)
Testpiece ③	(Ball in Acrylic Resins) Diameter of Ball [mm]=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 Material : Stainless stell (SUS 304)
Testpice ④	(Void in LSI Package) JAPAN 8848 HM6264P-10 U0727990
Testpiece ⑤	(Seperation in LSI Package) MALASTA 8749 HM6265P-10 U0427880

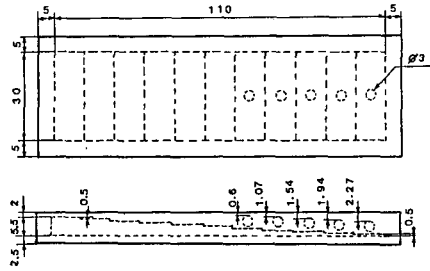


Fig. 2 Dimensions of testpiece ② (unit : mm)

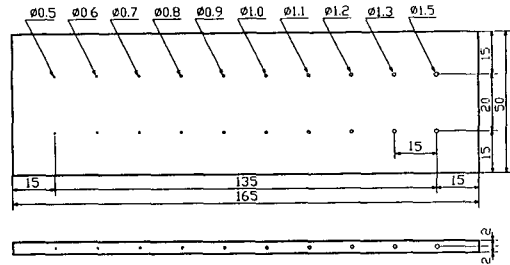


Fig. 3 Dimensions of testpiece ③ (unit : mm)

시험편 ①의 재질은 스테인레스 볼(Stainless steel ball)로서, 그 직경은 각각 1 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 10 mm이다.

시험편 ②는 직경이 3 mm인 스테인레스 볼이 아크릴 속에 5개 내재되어 있고, 그 깊이는 각각 0.6, 1.07, 1.54, 1.94, 2.27 mm이다. 스텝(Step)의 재질은 볼과 같고, 높이는 각각 0.5 mm이며, 자세한 치수는 Fig. 2에 나타내었다.

시험편 ③은 아크릴 수지 속에 직경이 각각 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 mm인 스테인레스 볼이 일정한 깊이로 내재된 것으로서, 자세한 치수는 Fig. 3에 나타내었다.

시험편 ④와 ⑤는 Table 1에 나타낸 바와 같이, 위에서 실험한 수증 및 아크릴 수지 속에 내재된 결함 모델에 대한 실험 결과를 실제로 반도체 패키지 속에 내재된 보이드 및 박리의 정량화에 응용하기 위해서 사용된 시험편으로서 시험편 ④는 보이드가 내재된 것이고, 시험편 ⑤는 박리가 내재된 반도체 패키지이다.

3.3 실험방법

결함 모델 및 반도체 패키지내의 결함에 대한 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정하기 위한 전반적인 실험 순서를 블럭선도로써 Fig. 4에 나타

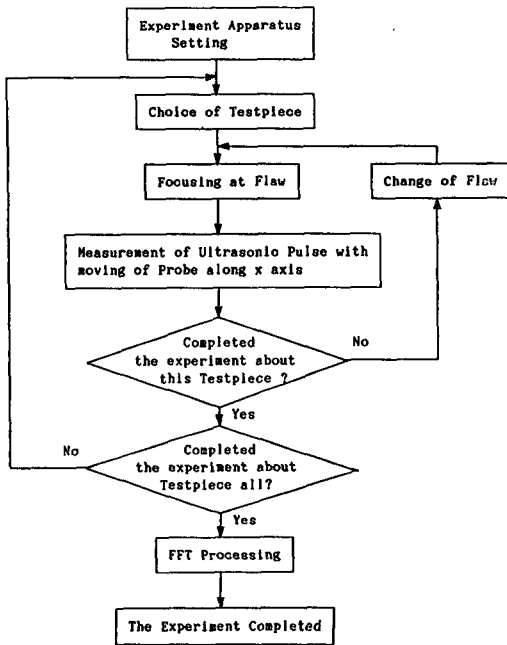


Fig. 4 Blockdiagram of experiment process

내었다.

(1) 결함 모델에 대한 주파수 분포 측정

(가) 결함 모델의 형상에 따른 주파수 분포 측정
 수조 속에 직경 1mm인 구형 결함 모델, 즉 시험편 ①의 첫번째 볼을 넣고, 스캐너 콜트roller를 이용해서 탐촉자를 이동시켜 볼의 표면 중심에 맞춘 후, 탐촉자의 높이를 조정하여 에코우(echo)가 최대가 되도록 한다. 이와같이 탐촉자의 초점을 결함 모델의 표면 중심에 맞춘 상태에서 탐촉자의 높이, 즉 스캐너 콜트roller의 Z값을 일정하게 유지시키면서, 탐촉자를 50 μm씩 수평으로 이동시켜 수신되는 초음파 펄스를 샘플링한다. 이때 샘플링 간격은 0.5 ns이고, 샘플링 포인트의 수는 1024로 한다. 샘플링이 끝나면 각 지점에서 샘플링된 초음파 펄스의 데이터를 FFT분석하여 각 지점에서의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다.

직경이 2 mm, 4 mm, 6 mm, 10 mm인 구형 결함 모델에 대해서도 위와 같은 방법으로 탐촉자를 50 μm씩 이동시켜 가면서 결함 모델의 형상에 따른 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다.

(나) 결함 모델의 위치에 따른 주파수 분포 측정
 아크릴 속에 내재된 깊이가 각각 0.6, 1.07, 1.54, 1.94, 2.27 mm이고, 직경이 3mm인 결함

모델에 대하여 위와 같은 방법으로 탐촉자를 50 μm씩 이동시키면서 각 결함 모델의 표면으로부터 반사되는 초음파 펄스를 샘플링하고 FFT분석하여, 결함 모델의 위치에 따른 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다. 또한, 0.5 mm 스텝, 즉 박리 모델에 대해서도 위와 같은 방법으로 탐촉자를 이동시켜 가면서 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다.

(다) 결함 모델의 미소한 크기 변화에 따른 주파수 분포 측정

아크릴 수지속에 내재된 깊이가 일정하고, 직경이 각각 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 mm인 미소 결함 모델에 대해서도 위와 같은 방법으로 탐촉자를 10 μm씩 이동시키면서 각 볼의 표면으로 부터 반사되는 초음파 펄스를 샘플링하고 FFT분석하여, 아크릴 수지속의 결함 모델의 미소한 크기 변화에 따른 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 측정한다.

(2) 반도체 패키지내의 결함에 대한 주파수 분포 측정

반도체 패키지내에 존재하는 보이드 및 박리로부터 반사되는 초음파 펄스를 이용하여 결함의 위치를 측정한다. 측정된 보이드 및 박리의 중심에 위와같은 방법으로 탐촉자의 초점을 맞추고 탐촉자를 10 μm씩 이동시키면서 보이드 및 박리로부터 반사되는 초음파 펄스를 샘플링하고, FFT분석하여 보이드 및 박리에 대한 주파수 분포, 중심 주파수의 변화를 측정하여, 반도체 패키지에 내재된 보이드 및 박리와 같은 결함에 대하여 위에서 구한 실험 데이터를 토대로 결함의 크기 및 형상을 정량화한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 결함 모델의 형상과 주파수와의 관계

Fig. 5은 시험편 ①을 이용하여, 결함 모델의 형상에 따른 탐촉자의 이동 거리와 중심 주파수의 변화량과의 관계를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 초음파 펄스의 중심 주파수는 탐촉자가 이동함에 따라서 점차 감소하고, 그 변화량은 결함 모델의 직경이 작아짐에 따라 큰 폭으로 변화한다. 이것은 탐촉자가 이동함에 따라서 초음파 펄스의 반사면이 일정한 각도로 변화되고, 결함 모델의 직경이 작아짐에 따라서 탐촉자의

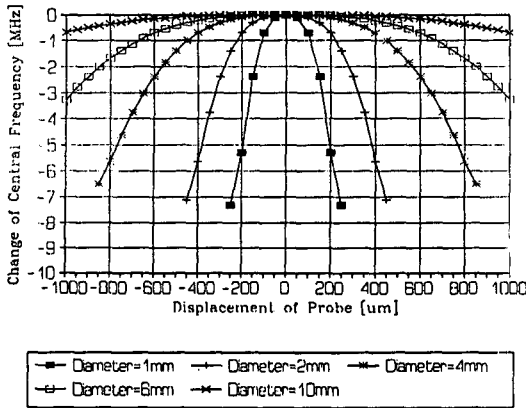


Fig. 5 Relation between frequency and size of flaw model

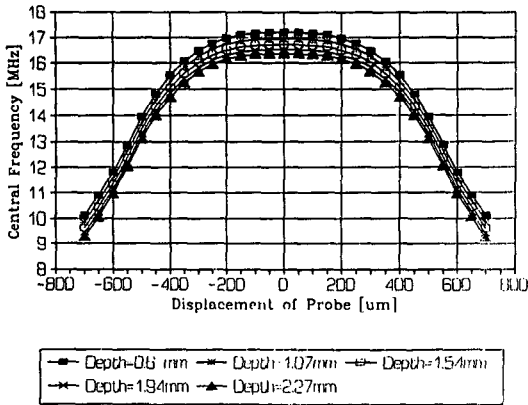


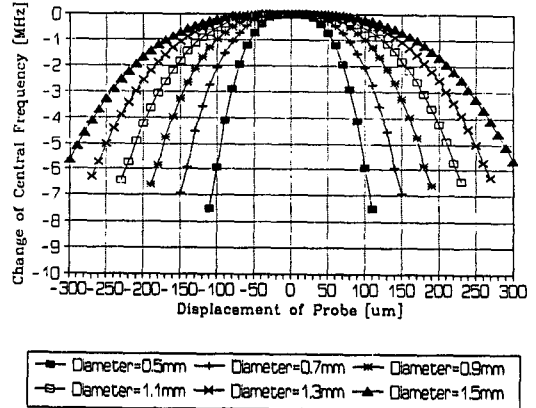
Fig. 6 Relation between frequency and position of flaw model

이동량에 대하여 반사면이 큰 쪽으로 변화되기 때문이다. 따라서 결함 모델의 직경과 탐촉자의 이동에 따른 중심 주파수의 변화량의 관계로부터 임의의 구형 결함의 크기를 추정할 수 있다.

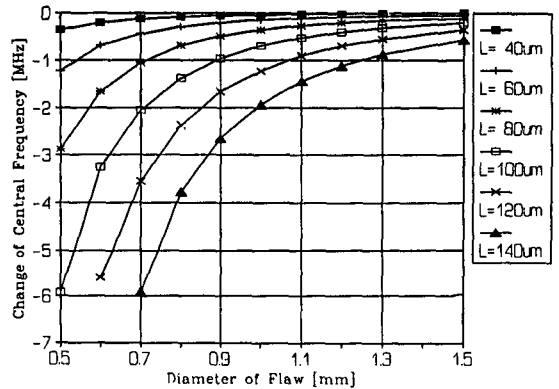
4.2 결함 모델의 위치와 주파수와의 관계

Fig. 6은 시험편②를 이용하여, 결함 모델의 깊이 에 따른 탐촉자의 이동 거리와 중심 주파수의 변화량과의 관계를 나타낸 것이다.

결함모델의 형상에 따른 측정결과와 마찬가지로 아크릴 속의 결함 모델에서도 탐촉자가 이동함에 따라 초음파 펄스의 중심 주파수가 감소하고, 결함 모델의 깊이가 증가함에 따라라도, 즉 아크릴의 표면에서 결함까지의 깊이가 깊을수록 미소한 쪽으로 감소하지만, 탐촉자의 이동에 따른 중심 주파수의



(a) At Constant Size of Flaw



(b) At Constant Movement of Probe

Fig. 7 Relation between frequency and size of small flaw model

변화량은 결함 모델의 깊이가 각각 다른 5개의 결함 모델에서 거의 일치하고 있다. 따라서 탐촉자의 이동에 따른 중심 주파수의 변화량은 결함 모델의 위치보다는 결함 모델의 크기에 주로 의존함을 알 수 있다.

4.3 미소 결함 모델의 크기와 주파수와의 관계

Fig. 7(a)는 시험편 ③을 이용하여, 결함 모델의 미소한 크기 변화에 따른 탐촉자의 이동 거리와 중심 주파수의 변화량과의 관계를 나타낸 것이다.

결함모델의 형상에 따른 측정결과와 마찬가지로 아크릴수지 속의 미소 결함 모델에서도 탐촉자가 이동함에 따라서 초음파 펄스의 중심 주파수는 점차 감소하고, 그 변화량은 볼의 직경이 작아짐에 따라서 큰 쪽으로 감소한다. 또한 결함 모델의 크

기가 작으므로 미소한 탐촉자의 움직임에도 초음파 펄스의 중심 주파수는 큰 폭으로 변화한다.

Fig. 7(b)는 위와 같은 시험편에 대하여 탐촉자의 이동 거리가 일정할때 결함 모델의 크기와 작으므로 미소한 탐촉자의 움직임에도 초음파 펄스의 중심 주파수는 큰 폭으로 변화한다.

Fig. 7(b)는 위와 같은 시험편에 대하여 탐촉자의 이동 거리가 일정할때 결함 모델의 크기와 초음파 펄스의 중심 주파수의 변화량과의 관계를 보여 주고 있으며, Fig. 7(a)의 데이터를 가지고 X축만 바꾸어 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 탐촉자의 이동량이 일정할 때, 결함 모델의 크기와 초음파 펄스의 중심 주파수의 변화량 사이의 관계를 이용하여 크기를 모르는 미지의 결함에 대하여 초음파 펄스의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화 등을 측정하여 결함의 크기 및 형상 등을 추정할 수 있다.

4.4 반도체 패키지내의 결함과 주파수와의 관계

Fig. 8은 시험편④를 이용해서 반도체 패키지 속에 내재된 보이드에 대하여, 보이드에 대한 탐촉자의 이동 거리와 중심 주파수의 변화량과의 관계를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 보이드에서의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화는 결함 모델에서와 비슷한 경향을 나타내므로 구형임을 알 수 있고, 중심 주파수의 변화 곡선의 기울기는 각각 0.8 mm, 1 mm 스테인레스 볼의 경우와 비슷하다. 따라서 그 결과를 Fig. 7(b)에 적용함으로써 결함 모델과 보이드와의 상관관계로부터 보이드의 크기를 추정할 수 있고, Fig. 9에 그 결과를 나타내었다. Fig.

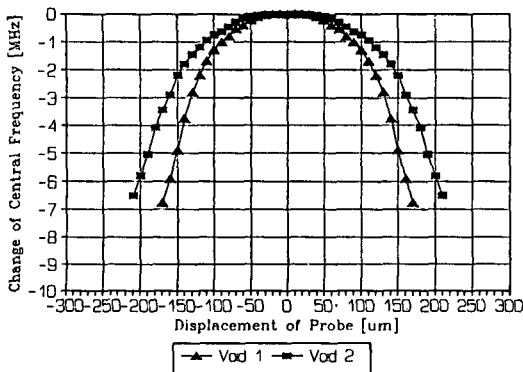


Fig. 1 Relation between central frequency and void

9에서 보는 바와 같이 보이드의 크기가 각각 0.8 mm와 1 mm임을 추정할 수 있었고, 이때 0.8 mm 보이드는 약 0.05 mm의 오차 범위 내에서, 1 mm 보이드는 약 0.03 mm의 오차 범위 내에서 그 크기를 구할 수 있으므로 약 5%이내에 측정 오차로서 보이드의 크기를 정량화할 수 있었다.

Fig. 10은 시험편②의 박리 모델과 시험편⑤의 반도체 패키지 속에 내재된 박리에 대하여 위와 같은 방법으로 측정된 결과를 나타낸 것이다.

아크릴 속의 박리 모델에서는 탐촉자가 박리 모델의 평탄부를 이동할 때, 초음파 펄스의 중심 주파수는 변화가 없고, 박리 모델의 선단부에서는 탐촉자의 이동에 따라서 초음파 펄스의 중심 주파수가 급격히 감소된다. 그러나 실제의 박리에서는 탐촉자가 이동함에 따라 초음파 펄스의 중심 주파수가 미소한 변화를 하다가, 박리의 선단부에서 급격히 감소한다. 박리 선단부에서의 중심 주파수의 변화량이 0.5 mm 박리 모델의 선단부에서의 중심 주

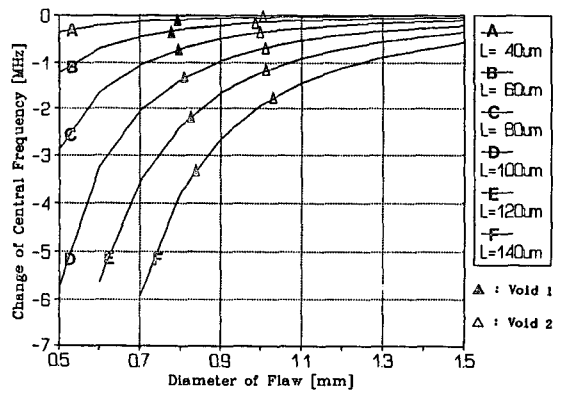


Fig. 9 Relation between flaw model and void

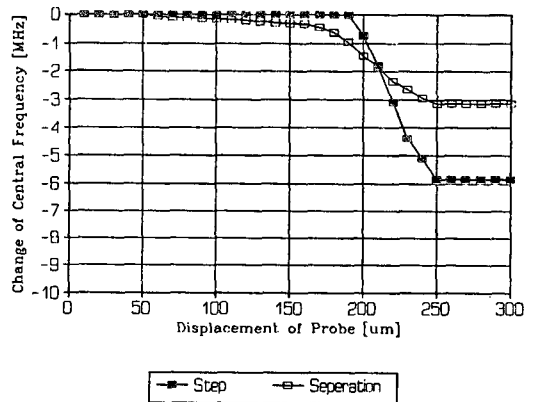


Fig. 10 Relation between frequency and seperation

파수의 변화량 0.5 mm 박리 모델의 선단부에서의 중심 주파수의 변화량의 절반이 되므로 박리의 두께가 약 0.25 mm임을 추정할 수 있고, 또한 중심 주파수의 변화 곡선으로부터 박리의 형상과 박리의 선단부를 알 수 있었다.

5. 결 론

초음파 펄스 파형을 주파수 영역에서 해석하는 초음파 주파수 분석법을 결함 모델에 적용하여 결함의 정량화의 가능성을 검토하고, 그 결과를 반도체 패키지내의 보이드 및 박리에 응용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 결함으로부터 검출된 초음파 펄스의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 통하여 결함의 형상, 크기 및 깊이 등을 추정할 수 있다.

(2) 초음파 펄스의 중심 주파수의 변화는 시료의 재질 및 결함의 깊이 등에 의해서는 미소한 변화를 하고, 결함의 형상 및 크기에 의해서 주로 변화한다.

(3) 결함 모델로부터 구한 결함의 형상 및 크기에 따른 초음파 펄스의 주파수 분포 및 중심 주파수의 변화를 통하여 반도체 패키지 내의 보이드 및 박리의 크기를 5% 이내의 오차로서 정량화가 가능하였다.

이상과 같은 결론을 통하여 앞으로는 좀 더 미소한 결함의 정량화에 대해서도 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Thompson, R.B., 1983, "Quantitative Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods," Journal of Applied Mechanics, Vol.50, pp.1191~1201.
- (2) Gericke, R., 1963. "Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing," Journal of Acoustical Society of America, Vol.35, pp.346~368.
- (3) 仙田富男, 廣瀬貞雄, 1971, "超音波探傷試験による缺陷の定量化について (I, II)", 非破壊検査, 第20卷, 第8號, pp.378~381.
- (4) Krautkramer, J., 1959, "Determination of the size Defects by the Ultrasonic Impuls Echo Method," British Journal of applied Physics, Vol. 10, pp.240~245.
- (5) 廣瀬貞雄, 1987, "一探解子における模型缺陷エコー高さの計算法", 非破壊検査, 第36卷, 第12號, pp.881~887.
- (6) Whaley, H.L, and Cook K.V, 1979, "Application of Frequency Analysis in Ultrasonic Testing," Materials Evaluation, Vol.37, No.1, pp.19~24.
- (7) Whaley, H.L, and Cook, K.V, 1970, "Ultrasonic Frequency Analysis," Materials Evaluation, Vol. 28, No.3, pp.61~66.
- (8) Fitting, D.W, and Adler, 1981, "Ultrasonic Spectroscopy Analysis for Nondestructive Evaluation," Plenum Press, NY.
- (9) 松重和美, 1990, "二次元超音波スペクトロスコピーシステムの開発と非破壊検査への應用", 非破壊検査, Vol.39, No.9, pp.767~768
- (10) Gericke, O.R, 1966, "Defect Determination by Ultrasonic Spectroscopy" Journal of Metals, Vol.18, pp.932~937.
- (11) 太田耕二, 木村勝美, 1977, "超音波周波數分析法による缺陷高さの測定", 非破壊調査, 第26卷, 第5號, pp.331~335.
- (12) 杉山 榮, 1980, "超音波スペクトル法による缺陷エコーと異種金屬境界エコーの識別法", 非破壊検査, 第29卷, 第5號, pp.324~328.
- (13) Whaley, H.S, and Adler, L, 1971, "Flaw characterization by Ultrasonic Frequency Analysis," Materials Evaluation, Vol.29, pp.182~192.
- (14) 韓應教, 朴翼根, 1991, "초음파 Spectroscopy에 의한 물질평가를 위한 다중반사파의 시뮬레이션", 한국비파괴학회 춘계학술대회논문집, pp. 18~27.
- (15) 西藤勝之, 1987, "複合材料缺陷☆別のための周波數解析(II)", NDI資料21193, pp.79~83.
- (16) 本壓克彦, 1989, "超音波スペクトル法による金屬材料構造の評價", 非破壊検査, 第38卷, 第2號, pp.145~146.
- (17) 増田順一, 1989, "超音波スペクトルによる金屬材料構造の評價", 非破壊検査, 第38卷, 第2號, pp.145~146.
- (18) Sachse, W and Pao, Y.H, 1978, "On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids", Journal of applied physics, Vol. 49, No.8, pp.4320~4327.