

펄스형 초음파 신호에서 비선형 파라미터의 정밀 추정

Precise Estimation of Nonlinear Parameter in Pulse-Like Ultrasonic Signal

하유*, 장경영**†, Kimio Sasaki***, Hiroaki Tanaka****

Job Ha*, Kyung-Young Jhang**†, Kimio Sasaki*** and Hiroaki Tanaka****

초 록 초음파 비선형성은 적층 구조물 내부의 미세크랙이나 계면 들뜸을 검출하기 위한 수단으로 주목받고 있다. 비선형 초음파의 특징적인 현상은 전파 과정에서 고조파가 발생하는 것이다. 그러므로 비선형성의 정량화를 위해서는 수신된 초음파 신호에 포함된 고조파 성분의 검출이 중요하며, 일반적으로 2차 조화 성분과 기본 주파수 성분의 진폭비가 비선형 파라미터로 이용되고 있다. 그러나 이 비선형 파라미터를 정확하게 추정할 수 있는 방법이 확립되어 있지 않기 때문에 현재까지는 현장적용에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 초음파 비선형 파라미터의 정밀 추정을 위한 신호 처리 기술을 제안하고자 한다. 이 기술은 파워 스펙트럼과 바이스펙트럼 분석에 기초하며, 특히 본 연구에서는 초음파 현미경(SAM, scanning acoustic microscope)에 사용되는 펄스형 신호로부터 고조파를 검출하는데 주목하였다. 제안된 기법의 유효성은 틸새의 크기가 접촉 중심에서 반경 방향으로 일정하게 증가하는 뉴턴링(Newton-ring)과 칩의 윗면에 국부적인 들뜸을 가진 반도체 샘플에 대한 실험을 통해 검증되었다. 결과적으로 제안된 신호처리기법에 의해 획득된 비선형 파라미터는 계면 들뜸과 좋은 상관성을 보였다.

주요용어: 초음파 비선형성, 비선형 파라미터, 신호처리, 파워 스펙트럼, 바이스펙트럼, 피리어드그램

Abstract Ultrasonic nonlinearity has been considered as a solution for the detection of microcracks or interfacial delamination in a layered structure. The distinguished phenomenon in nonlinear ultrasonics is the generation of higher-order harmonic waves during the propagation. Therefore, in order to quantify the nonlinearity, the conventional method measures a parameter defined as the amplitude ratio of a second-order harmonic component and a fundamental frequency component included in the propagated ultrasonic wave signal. However, its application in field inspection is not easy at the present stage because no standard methodology has yet been made to accurately estimate this parameter. Thus, the aim of this paper is to propose an advanced signal processing technique for the precise estimation of a nonlinear ultrasonic parameter, which is based on power spectral and bispectral analysis. The method of estimating power spectrum and bispectrum of the pulse-like ultrasonic wave signal used in the commercial SAM (scanning acoustic microscopy) equipment is especially considered in this study. The usefulness of the proposed method is confirmed by experiments for a Newton ring with a continuous air gap between two glasses and a real semiconductor sample with local delaminations. The results show that the nonlinear parameter obtained by the proposed method had a good correlation with the delamination.

Keywords: Ultrasonic Nonlinearity, Nonlinear Parameter, Signal Processing, Power Spectrum, Bispectrum, Periodogram

1. 서론

초음파 비선형성의 발생 메커니즘은 (1) 재료의 비선형적 탄성거동에 의한 것과 (2) 계면 접촉에 의한 것으로 구분될 수 있다[1-4]. 전자는 비선형 초음파의 고전적 메커니즘으로 비선형 탄성계수가 재료 물성의 작은 변화에도 민감한 특징을 이용하여 비파괴적으로 재료의 건전성을 진단하는데 응용되고 있다. 반면에 후자는 틈새 또는 크랙면의 개폐와 관련되므로 미세크랙의 평가에 효과적이다[5,6]. 이 두 가지 비선형 초음파 발생 메커니즘에서 공통된 특징은 재료 내부로 입사된 초음파를 수신하였을 때 기본 주파수 성분 이외에 고차의 조화 주파수 성분들이 발생하는 것이다. 그러므로 초음파 비선형성을 이용하는 기존 방법은 하나의 평가 지표로서 비선형성을 정량화하기 위해 수신된 초음파 신호에 포함된 2차 조화성분과 기본 주파수 성분의 진폭비로서 파라미터를 정의한다.

본 논문에서는 계면 접촉에 의한 비선형성을 반도체 패키지와 같은 얇은 적층형 구조물의 계면 미세 들뜸을 검출하는데 활용하고자 하며, 이를 위해 일반적으로 반도체 검사에 사용되는 초음파 현미경의 투과신호로부터 비선형 파라미터를 추정하여 이용하고자 한다.

주파수 성분을 측정하기 위해서는 푸리에 변환(Fourier transform)에 기초한 스펙트럼분석(spectrum analysis)이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 상용의 초음파 현미경은 펄스형태의 신호를 사용하고 있으며, 이런 펄스형 신호에 대해 단순 푸리에 변환에 기초한 고전적인 스펙트럼 분석법을 적용할 경우, 시간 평균(time averaging)을 취하는데 있어서 데이터 길이가 너무 짧기 때문에 조화 성분들의 정확한 추정이 어렵게 된다. 특히 잡음을 포함하는 신호일 경우에 2차 조화 성분의 추정에 있어서 매우 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 신호 처리 기술을 제안한다. 제안하는 기술에서, 비선형 파라미터는 파워 스펙트럼 밀도(power spectrum density, PSD)와 바이스펙트럼 밀도(bispectrum density, BSD)로부터 추정된다. 그리고 잡음의 영향을 억제하고 추정값의 변동을 감소시키기 위해 PSD와 BSD는 1차원과 2차원 스펙트럼 윈도우(spectrum window)를 이용해 평활화(smoothing)한 2차 및 3차 피리어드그램(periodogram)으로부터 추정된다.

제안된 신호 처리 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해, 곡면 유리 and 평판 유리 사이의 틈새 크기가 접촉 중심에서 반경 방향으로 일정하게 증가하는 뉴턴링과 칩의 윗면에 국부적인 들뜸을 가진 반도체 샘플에서의 비선형 거동에 관한 실험을 수행하였다.

2. 계면 접촉 비선형성에 의한 비선형 파라미터의 정의

Fig. 1에서와 같이 주파수 f_0 , 변위진폭 A_0 인 입사파가 재료 내부의 미세 들뜸을 투과할 때, 투과 신호는 파형의 왜곡에 따른 고조파(harmonics)성분을 포함하게 된다. 이러한 유형의 비선형 초음파는 고조파의 크기 측정에 의해 미세 들뜸과 같은 미세 결함의 검출을 가능하게 한다. 본 연구에서는 이러한 비선형성을 정량적으로 표현하기 위해 기본 주파수와 2차 고조파의 크기 비로 정의되는 식 (1)의 정규화 파라미터 β 에 주목한다[6].

$$\beta = A_2/A_1 \quad (1)$$

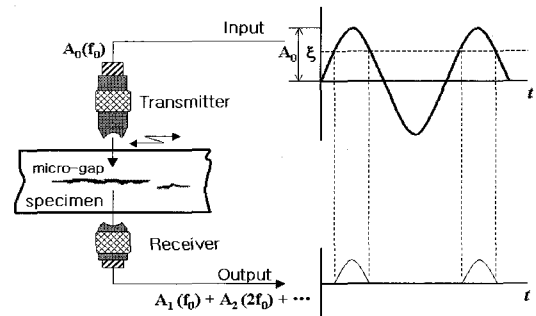


Fig. 1 Generation mechanism of nonlinear ultrasound due to contact acoustic nonlinearity

3. 파워 스펙트럼 밀도(PSD)와 바이스펙트럼 밀도(BSD)의 추정

3.1. 신호 처리 알고리즘

일반적으로 파워 스펙트럼 밀도와 바이스펙트럼 밀도는 2차 및 3차의 피리어드그램(periodogram)으로부터 다음과 같이 추정할 수 있다.

먼저 길이 N 인 시계열 신호 $x(n)$, 그리고 그것의 고속 푸리에 변환을 $X(f_k)$ 라 하면, 2차 피리어드그램, 즉 단순 PSD는 다음과 같이 정의된다.

$$P_x(f_k) = \frac{X(f_1)X^*(f_1)}{N^2} = \frac{|X(f_k)|^2}{N^2}, \quad (2)$$

$$k = 0, 1, \dots, N/2$$

반면에, 3차 피리어드그램 즉, 단순 BSD는 다음과 같이 정의된다.

$$B_x(f_1, f_2) = \frac{X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2)}{N^3}, \quad (3)$$

$$0 \leq |f_1|, |f_2|, |f_1 + f_2| \leq f_s/2$$

여기서 f_s 는 샘플링 주파수(sampling frequency)이고, X^* 는 X 의 공액 복소수(complex conjugate)를 나타낸다. BSD는 $f_1, f_2, f_1 + f_2$ 의 세개의 주파수 성분의 위상이 일치할 때만 유효한 값을 가진다. 그러므로 바이스펙트럼의 2차원 주파수 영역의 $f_1 = f_2$ 인 선상에서 BSD를 추정한다면, 비선형 효과에 의해 유발된 2차 조화 주파수 성분의 검출에 매우 유효할 수 있다. BSD의 보다 상세한 특성은 참고문헌 [7]과 [8]에 제시되어 있다. 그러나 피리어드그램은 통계적인 변동이 크기 때문에 좋은 추정값을 기대하기가 어렵고, 식 (2)와 (3)은 잡음에 의해 직접적으로 교란되어진다. 이러한 잡음의 영향과 변동을 줄이기 위해서, 피리어드그램은 스펙트럼 원도를 이용해 평활화되어야 한다. Fig. 2는 제안하는 신호 처리의 절차를 보여준다. 여기서 기호 \otimes 는 1차원 컨벌루션(convolution) 합을 의미하고, $\otimes\otimes$ 는 2차원 컨벌루션(convolution) 합을 나타낸다. 고속 푸리에 변환전에 행하는 제로 패딩(zero padding)과 해밍 윈도우(hamming window)는 짧은 데이터 길이로 인한 낮은 스펙트럼 분해능과 사각 윈도우(rectangular window)로 인한 주파수 누설 효과를 개선하기 위해 각각 사용되었다. 그런 다음 2차 및 3차 피리어드그램은 고속 푸리에 변환에 의해 얻어진 푸리에 계수로부터 계산된다. PSD는 1차원 스펙트럼 원도 W_1 을 가지고 2차 피리어드그램 P_2 를 평활화함으로써 추정되고, BSD는 2차원 스펙트럼 원도 W_2 를 가지고 3차 피리어드그램 P_3 를 평활화함으로써 추정된다. 여기서 윈도우의 최적 평활화 밴드폭(optimal smoothing bandwidth)은 Fig. 3에 보여지는 것과 같이 추정값의 제곱 평균 오차(mean square error, MSE)가 최소가 되도록 하였다[9,10].

1차원과 2차원 스펙트럼 원도인 $W_1(k), W_2(k,1)$ 은 그들의 양의 가중치(positive weight)의 각각의 합이 1을 가지도록 정규화되고, 추정값의 바이어스를 줄이기 위해 PSD와 BSD의 원도로서 동일한 대칭성을 가지도록 각각 가정된다.

최종적으로 식 (1)에서 정의된 비선형 파라미터는 다음과 같이 PSD와 BSD로부터 추정된다.

$$\beta = \frac{|\hat{B}(f_0, f_0)|}{[\hat{P}(f_0)]^{3/2}} \quad (4)$$

여기서 f_0 는 투과파 신호의 기본 주파수 성분을 나타낸다. 이 식에서, PSD 값이 신호의 푸리에 계수의 제곱값에 비례하므로 $[P(f_0)]^{3/2}$ 는 A_1^3 의 차수에 상응한다. 반면에, BSD값은 Fig. 2의 피리어드그램 P_3 의 정의에서 보여지듯이 푸리에 계수의 삼중곱(triple product)에 비례한다. 그러므로 BSD의 크기 $|B(f_0, f_0)|$ 는 $A_1^2 A_2$ 의 차수를 가진다. 결과적으로 식 (4)에 의해 추정된 파라미터는 식 (1)에 의해 정의된 파라미터의 추정값을 제공한다.

다음으로 고려하여야 할 것은 광대역(broad bandwidth) 신호로부터 어떻게 기본 주파수 f_0 를 선택하는가 하는 문제이다. 이 단계에서, 두 가지 방법이 있을 수 있다. 하나는 파워 스펙트럼의 피크(peak)의 평균에 의해 주파수 f_0 를 찾는 것이고, 다른 하나는 2차원 주파수 평면에서 바이스펙트럼의 피크에 의한 것이다. 바이스펙트럼은 이상적으로 가우스성 잡음을 가지지 않는 비가우스성(non-Gaussian) 파라미터들 중 하나이기 때문에 후자는 전자보다 잡음의 영향을 억제할 수 있어 보다 정확한 f_0 의 탐색이 가능할 것으로 기대된다.

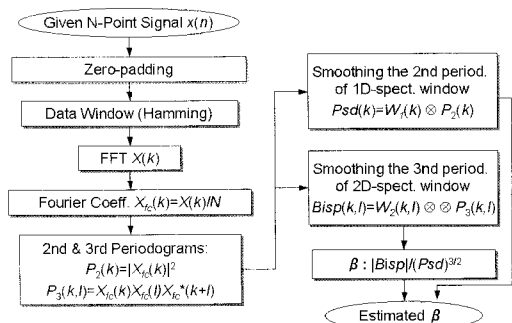


Fig. 2 Block diagram of the proposed algorithm for estimating nonlinear parameter

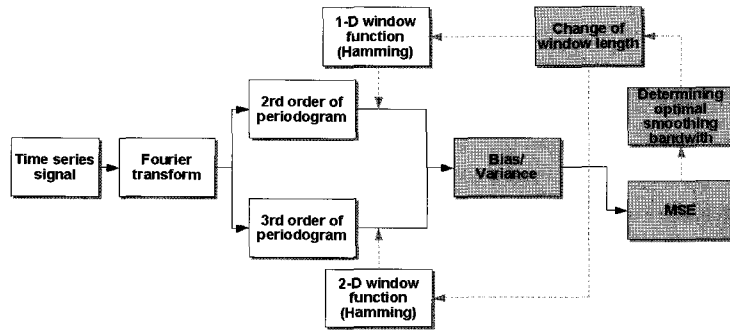


Fig. 3 Determination process of the optimal smoothing bandwidth by using MSE

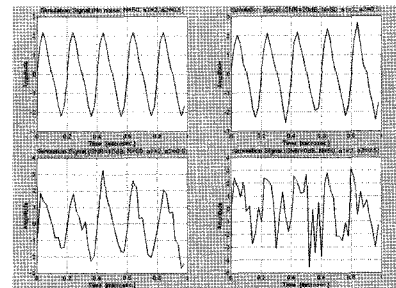
3.2. 시뮬레이션 분석

구현된 알고리즘의 비선형 파라미터 추정 성능을 검토·평가하기 위해 먼저 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 분석에 사용된 수치신호는 식 (5)와 같다.

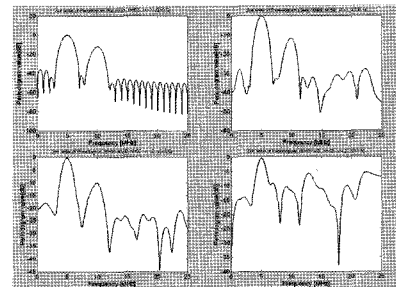
$$X(t) = A_1 \sin(2\pi f_0 t) + A_2 \sin(4\pi f_0 t + \theta) + n(t), \quad (0 \leq t \leq T) \tag{5}$$

여기서 $f_0=5\text{MHz}$, $f_s=50\text{MHz}$, $\theta=0$, $T=N/f_s$: 신호 길이이고, A_1 과 A_2 는 각각 기본 주파수 성분과 2차 조화 성분의 진폭이며, 잡음 $n(t)$ 는 신호대 잡음비에 따른 추정 성능을 고찰하기 위해 추가되었다. 시뮬레이션에서 주파수 성분의 진폭은 $A_1=2$ 와 $A_2=0.5$ 로 하였고, 신호의 길이 T 는 N 값이 50, 100, 250, 500, 1000일 때 각각 1, 2, 5, 10, $25\mu\text{s}$ 를 갖도록 하였다. 구현된 알고리즘의 비선형 파라미터 추정 성능은 각각의 신호가 No noise, 20dB, 10dB, 0dB의 신호대 잡음비를 가지는 경우에 대해 제안된 파라미터 A_2/A_1 를 추정함으로써 평가되었다. Fig. 4(a)~(c)는 N 값이 50인 신호에 대한 결과를 보여준다. (a)는 신호의 형태이고, (b)는 2차 피리어드그램에 의한 파워 스펙트럼, (c)는 3차 피리어드그램에 의한 바이스펙트럼 결과이다. 그리고 Table 1은 고려된 신호대 잡음비와 신호의 길이에 따른 바이스펙트럼 추정 결과를 정리한 것이다. 이 때 주어진 신호로부터 계산된 비선형성은 $A_2/A_1=2/0.5=0.25$ 이며, 이 값은 추정 결과의 검토를 위해 사용된다. 추정된 비선형성은 신호대 잡음비가 0dB인 경우를 제외하고는 이론값에 근접한 결과를 나타냈다. 또한 N 값이 1000인 경우에서 알 수 있듯이 신호의 길이가 충분히 길면 잡음의 영향

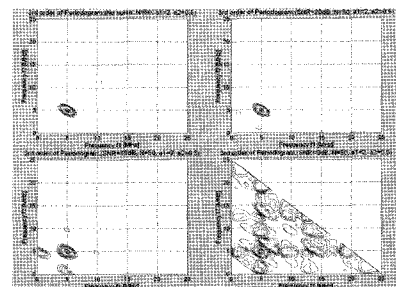
이 큰 신호라도 비교적 정확한 추정이 가능할 것으로 사료된다.



(a) Simulation signal



(b) Estimated power spectrum



(c) Estimated bispectrum

Fig. 4 Results estimated by using the proposed algorithm: $N=50$, $A_1=2$, $A_2=0.5$ (Upper left: no noise, Upper right: 20dB. Lower left: 10dB, Lower right: 0dB)

Table 1 Estimated nonlinearity by using the proposed algorithm

	N=50	N=100	N=250	N=500	N=1000
No noise	0.2507	0.2506	0.2532	0.2602	0.2436
SNR=20dB	0.2518	0.2347	0.2529	0.2556	0.2450
SNR=10dB	0.2945	0.2337	0.2509	0.2587	0.2401
SNR=0dB	0.4638	0.3427	0.1889	0.3317	0.2687

4. 실험 방법

실험은 두 유리면 사이의 틈새의 크기 변화가 일정한 뉴턴링과 인위적인 곡부 들뜸을 가진 실제 반도체 패키지에 대해 수행되었다. 뉴턴링은 비선형 파라미터 β 와 들뜸의 크기 사이의 기본적인 특성을 조사하기 위해 사용되었다. 뉴턴링은 Fig. 5에서와 같이 상부의 평판 유리와 하부의 곡면 유리 사이에 공기 틈새를 가지며, 이 틈새의 크기는 뉴턴링 중앙의 접촉 중심으로부터 반경 방향으로 점점 커진다. 그리고 표면 거칠기의 영향을 배제하기 위해 뉴턴링에 사용된 유리는 서브 나노미터 수준으로 연마 가공하였다. 한편 패키지 상부에 들뜸을 가진 실제 반도체 샘플은 제안된 비선형 기법의 실용화 성능을 검증하기 위해 사용되었다.

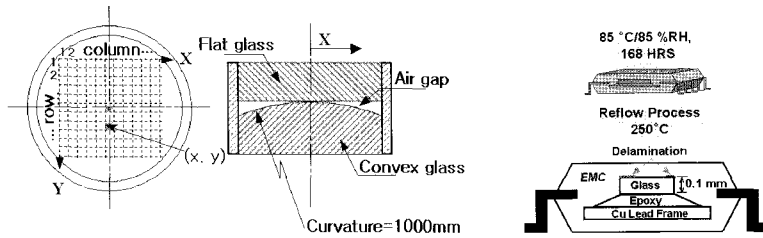


Fig. 5 Structure of the Newton ring and the semiconductor sample

이 때 패키지의 들뜸은 제조된 샘플에 대해서 JEDEC 표준에 따라 수행된 전조건시험 과정을 통해 만들어졌다[11]. 즉, 샘플은 흡습 레벨1 (85°C/85%RH/168HRs)에서 노출된 후 250°C의 리플로(reflow) 과정을 거쳤다.

실험에 사용된 초음파 현미경은 미국 소닉스(SONIX)사의 HS-1000기종이고, 트랜스듀서는 중심 주파수 15MHz의 집속형이 사용되었다. 각각의 시편에 대해 투과파 신호는 들뜸이 있는 제한된 영역에서 X와 Y방향으로 100 μ m스텝으로 획득되었다. 그런 다음 각각의 투과파에 대한 비선형 파라미터는 제안된 알고리즘을 통해 추정되었다. 그리고 실험 데이터로부터 추정된 비선형 파라미터는 2차원 영상화를 통해 T-scan 이미지와 비교평가되었다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 6은 뉴턴링에 대한 실험 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 뉴턴링의 접촉중심을 포함하는 42x42 픽셀에서 측정된 투과파 파위의 분포에 대한 컨투어 이미지(contour) 이미지를 보여준다. 투과파 파위는 들뜸이 없이 두 유리면이 접촉된 중심부근에서 매우 강하고 중심에서 멀어질수록 틈새의 크기가 커짐에

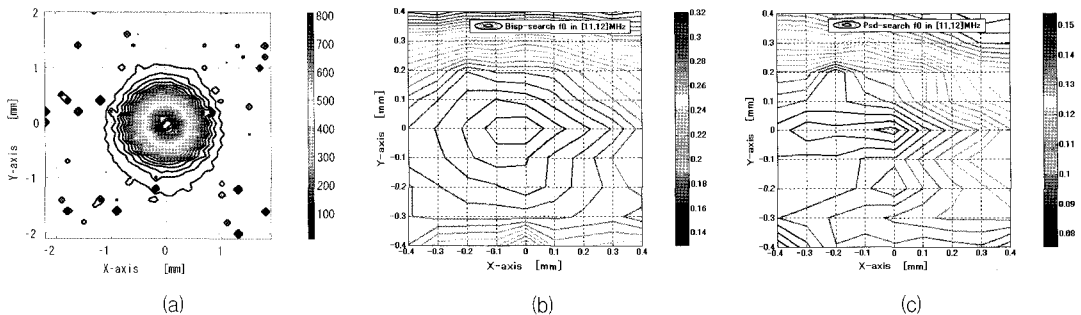


Fig. 6 Experimental results for the Newton ring; contour maps for (a) measured transmitted power distribution, (b) nonlinear parameter estimated based on the largest bi-spectral peak, and (c) nonlinear parameter estimated based on the largest power spectral peak

따라 투과파 파워는 감소한다. 따라서 중심에서 반경 1mm 이상 떨어진 위치에서 획득되는 신호는 물리적으로 의미가 없으며, 본 연구에서 고려한 유효한 신호는 반경 0.4mm 범위내의 미세 틈새 영역에서 얻어진 것으로 한정된다. 이 영역에서의 들뜸은 100nm 이하이다. Fig. 6(b)와 (c)는 중심에서 반경 0.4mm 범위내에서 9×9 픽셀로 획득된 2차원 비선형 파라미터 분포를 보여준다. 여기서 (b)는 바이스펙트럼 피크를 찾아서 추정된 2차원 비선형 파라미터의 컨투어 이미지이고, (c)는 파워 스펙트럼 피크를 찾아서 추정된 2차원 비선형 파라미터의 컨투어 이미지이다. 그림에서 알 수 있듯이 비선형 파라미터 이미지는 바이스펙트럼 피크에 의해 추정되었을 때 틈새의 패턴(pattern)과 좋은 상관성을 나타냈다. 즉, Fig. 6(b)는 중심으로 함몰하는 형상인데 이는 중심으로 가면서 비선형 파라미터의 값이 작아지는 것을 의미하고, 결과적으로 틈새의 크기가 작아지는 것을 나타낸다. 이는 실제 뉴턴링의 틈새의 분포와 일치하는 경향이 있다.

다음으로, 칩상면에 국부적인 들뜸을 가진 실제 반도체 패키지에 대한 비선형 파라미터 이미지를 획득하였다. Fig. 7은 반도체 패키지에 대한 영상화 결과를 보여준다. 여기서 이미지 크기는 100×100 픽셀이다. 그리고 (a)는 측정된 투과파 파워의 분포

에 대한 컨투어 이미지이고, (b)는 바이스펙트럼 피크를 찾아서 추정된 2차원 비선형 파라미터의 컨투어 이미지이며, (c)는 파워 스펙트럼 피크를 찾아서 추정된 2차원 비선형 파라미터의 컨투어 이미지이다. Fig. 7(a)에서, 세 개의 명확한 들뜸 영역 A, B, C를 볼 수 있다. 하지만 이 이미지로부터는 들뜸의 존재 여부만 알 수 있고, 들뜸의 정도까지는 구별하기 어렵다. 반면에 Fig. 7(b)에 제시된 비선형 파라미터 이미지는 세 들뜸 영역간의 차이를 확인할 수 있다. 즉, 그림에서 A 영역의 들뜸은 B 영역에 있는 들뜸보다 비선형 파라미터의 값이 크게 나타나므로 들뜸량이 더 크며, 마찬가지로 B 영역에서의 들뜸은 C 영역의 들뜸보다 클 것으로 판단할 수 있는 것이다. 그런데 실제 들뜸량을 알 수 없으므로 시편을 절단하여 SEM(scanning electron microscopy)을 통해서 관측하였다. 그 결과를 Fig. 8에 보여준다. 절단면을 따라서 A 영역에서 최대 들뜸은 537nm 이었고, B 영역에서의 최대 들뜸은 336nm이며, 평균적으로 A 영역의 들뜸이 B 영역보다 크다. 이는 비선형 파라미터에 의한 분석 결과와 일치하는 경향이다. 또한, 비선형 파라미터 이미지가 바이스펙트럼 피크에 의해 추정되었을 때 전반적인 들뜸 패턴과 좋은 상관성을 나타내는 것은 앞의 뉴턴링에 대한 실험결과와 동일하다.

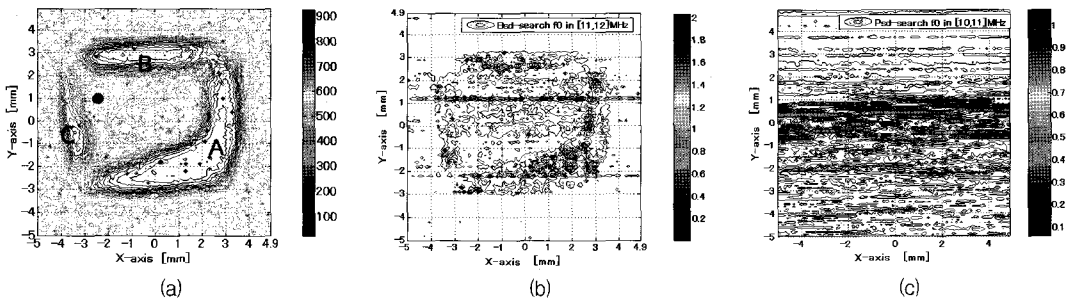


Fig. 7 Experimental results for the semiconductor package; contour maps for (a) measured transmitted power distribution, (b) nonlinear parameter estimated based on the largest bi-spectral peak, and (c) nonlinear parameter estimated based on the largest power spectral peak

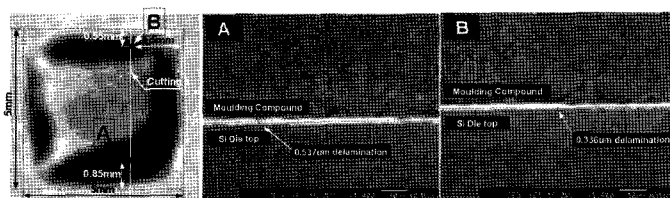


Fig. 8 SEM cross-section of delaminations on the chip

6. 결 론

본 논문에서는 초음파 현미경에서 사용되는 펄스형 신호에서 비선형 파라미터를 추정하고 이를 적층 구조물의 계면 미세 들뜸 검출에 이용하기 위한 신호 처리 기술을 제안하였다. 투과된 초음파 신호의 기본 주파수와 2차 조화성분의 진폭비로서 정의된 비선형 파라미터는 파워 스펙트럼 밀도(PSD)와 바이스펙트럼 밀도(BSD)로부터 추정되는데, PSD와 BSD는 잡음의 영향을 억제하고 추정값의 변동을 감소시키기 위해 각각 1차원과 2차원 스펙트럼 윈도우를 이용해 평활화한 2차 및 3차의 피리오드그램으로부터 추정하였다. 제안된 신호 처리 알고리즘의 유효성 및 미세 들뜸의 크기와 비선형 파라미터 사이의 상관성은 뉴턴링과 실제 반도체 샘플을 이용한 실험으로부터 확인되었다. 이러한 결과는 제안된 기법이 초음파 비선형 파라미터를 측정하는데 효과적임을 보여준다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)과 일본학술진흥회(JSPS)의 협력 프로그램에 의해 공동 연구로 수행되었습니다 (KOSEF-F01-2004-000-10412-0).

참고문헌

- [1] O. Buck, W.L. Morris and J.M. Richardson, "Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 33, pp. 371-373, (1978)
- [2] S. Hirose and J.D. Achenbach, "Higher harmonics in the far field due to dynamic crack-face contacting," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 193, pp. 142-147, (1993)
- [3] T.G. Muir, "Nonlinear effects in acoustic imaging," *Acoust. Imag.*, Vol. 9, pp. 93-107, (1980)
- [4] K.Y. Jhang, J. Ha and H.S. Jang, "Detection of micro-delamination in electronic packaging by using the ultrasonic nonlinearity," *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273 pp. 1761-1766, (2004)
- [5] I.Yu. Solodov, N. Krohn and G. Busse, "CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids," *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1/8, pp. 621-625, (2002)
- [6] J. Ha and K.Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic method to improve the evaluation reliability of micro-delamination in electronic packaging," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp. 813-818, (2005)
- [7] K.C. Kim and K.Y. Jhang, "Estimation of nonlinear acoustic parameter using bispectral analysis," *JSME International C*, Vol. 44, pp. 20-24, (2001)
- [8] C.L. Nikias and M.R. Raghuveer, "Multi-dimensional parametric spectral estimation," *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 9, No. 3, pp. 191-205, (1985)
- [9] K. Sasaki, "An automatic determination of smoothing bandwidth in B-T method for power spectral estimation," *J. Sound & Vib.*, Vol. 247, pp. 165-173, (2001)
- [10] K. Sasaki and T. Shirakata, "Observed data oriented bispectral estimation of stationary non-gaussian signals-automatic determination of smoothing bandwidth of bispectral windows," *Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 502-507, (2003)
- [11] Joint IPC/JEDEC Standard J-STD-020A, moisture/reflow sensitivity classification for nonhermetic solid state surface mount devices, (1999)