

論文98-35T-12-16

## 고주파대역에서 피크값, Time Average 및 Depth Profile 초음파 영상처리

(The Ultrasonic Image Processing by Peak Value, Time Average and Depth Profile Technique in High Frequency Bandwidth)

李鍾昊 \*

(Chong Ho Yi)

### 요 약

본 논문에서는 25MHz대역에서 피크값 검출, time average 및 depth profile 알고리즘을 초음파현미경에 적용하였고 각 알고리즘의 성능을 비교, 분석하였다. time average 알고리즘에서는 동전 한 지점에서 반사된 펄스파가 시간영역에서 디지털값으로 변환되고 변환된 512개 데이터의 평균값이 계산된다. time average영상은 샘플의 스캐닝영역에서 획득된  $N \times N$  매트릭스 평균값들이 그레이레벨에 의해 획득된다. 시간영역에서 smoothing효과를 갖는 이 기술은 산란현상을 많이 일으키는 영역의 초음파영상을 향상시킬 수 있다. depth profile 기술에서는 기준신호와 검출신호의 시간차가 최소 2ns의 분해능을 갖고 검출되므로 스캐닝영역의 3차원적인 실제 형태가 상대적인 크기로 검출된다. 이러한 실험을 통하여 피크값 검출, time average 및 depth profile 알고리즘이 분석되었고 각 알고리즘의 잇점이 제시되었다.

### Abstract

In this paper, ultrasonic images of 25MHz bandwidth were acquired by applying peak value variation, time average and depth profile algorithm to acoustic microscopy and its performance was compared and analysed with each other. In the time average algorithm, total reflecting pulse wave from a spot on the coin was converted to digital data in time domain and average value of the converted 512 data was calculated in computer. Time average image was displayed by gray levels colour of acquired  $N \times N$  matrix average data in the scanning area on the sample. This technique having smoothing effects in time domain make developed an ultrasonic image on a highly scattering area. In depth profile technique, time difference between the reference and the reflected signal was detected with minimum resolution performance of 2ns, thus we can acquired real 3 dimensional shape of the scanning area in accordance with relative magnitude. Through these experiments, peak value, time average and depth profile images were analysed and advantages of each algorithm were proposed.

\* 正會員, 仁荷工業專門大學 電子計算機科

(Inha Technical Junior College)

\* 본 논문은 1998년도 인하공업전문대학의 연구지원에 의해 연구된 것임.

接受日字: 1998年12月4日, 수정완료일: 1998年12月14日

### I. 서론

최근 첨단기술의 급속한 발전으로 소자, 반도체, 정밀기계등 산업전반에 물질의 미시적인 영역을 관찰할 수 있는 정밀측정기술이 대두되고있으며 이에관한 많은 연구가 수행되고 있다. 정밀측정기술 중 음향현미

경기술은 항공기, 정밀기계, 반도체, 재료산업등에서 물질의 탄성특성을 이용하여 표면 및 내부의 미세구조나 특성을 연구하는 기술로써 널리 사용되어진다<sup>[1,2]</sup>. 이 기술은 물질 표면 및 내부의 기하학적인 구조나 결합에 따른 음향에너지의 특성변화를 검출하여 탐상체의 제반특성을 밝히는 기술이며 음향현미경에서 새로운 신호처리 및 S/W알고리즘에 대한 많은 연구가 국내외적으로 수행되어지고있다. 이 초음파현미경 기술은 대개 펄스를 샘플에 조사하고 반사신호를 검출하는 펄스에코방식을 많이 채택하며 이러한 초음파현미경기술은 크게 반사신호의 진폭 또는 위상변화를 검출하는 방식으로 연구되어왔다.<sup>[3,4]</sup> 시스템에 사용되는 센서로서 large 및 small aperture형 변환기를 사용하여 각 변환기의 성능이 발휘될 수 있는 최적의 분야에 적용되어 연구되고있다. 또한 다양한 신호처리 및 S/W 알고리즘이 많은 응용에 적용하기 위해 연구되고 있으며 시스템에 적용되고있다.<sup>[5,6]</sup>

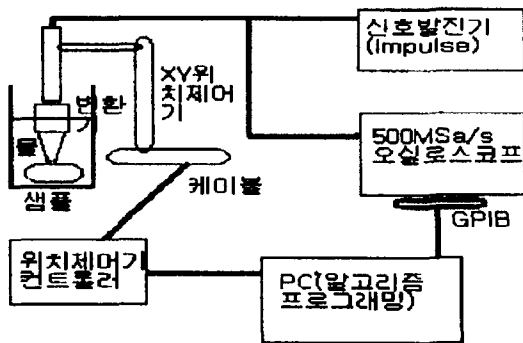


그림 1. 초음파영상처리 시스템의 구성도  
Fig. 1. Layout of the Ultrasonic Image Processing System.

본 연구에서는 초음파현미경시스템을 구성하여 25MHz 고주파대역에서 동작시켰으며 신호의 smoothing기법으로서 사용되는 time average기술과 depth profile 기술로 구성된 초음파 영상처리 시스템을 최초로 구성하고 이 알고리즘을 이용하여 동전표면을 영상처리하였으며 그 특성과 응용분야를 제시하는 새로운 방법을 제안하였다.

## II. 영상처리 시스템의 구성

집속형 초음파 변환기의 렌즈에서 발전되어 표면에서 검출되는 파는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 직접

반사파와 표면파 형식으로 나타나며 직접반사파는 매질(물)과 샘플(동전)표면 사이의 경계치조건에 의해서 전파방향을 z라하면 반사파의 변위는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1,3]</sup>.

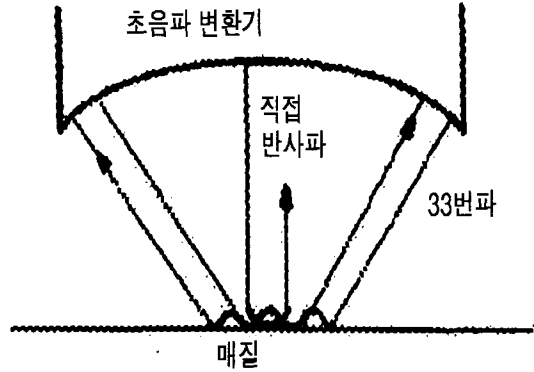


그림 2. 음향파의 전달모델  
Fig. 2. Model of the Acoustic Wave Propagation.

$$u_b = u_F (e^{-i\beta z} + \Gamma e^{i\beta z}), \Gamma = \frac{Z_c - Z_w}{Z_c + Z_w} \quad (1)$$

여기서,  $u_F$  : 경계면에서 투과파의 변위,  
 $u_b$  : 경계면에서 반사파의 변위,  
 $\Gamma$  : 반사계수,  
 $Z_c, Z_w$  : 동전과 물의 음향 임피던스

식 (1)에서  $u_b$ 는 매질(물)에서 샘플파의 고유 음향임피던스 차에 의해 반사되어 변환기로 되돌아오는 파이고  $u_F$ 는 샘플에 투과되어 전달되어지는 투과파이다. 또한 변환기는 포커스형태이고 샘플표면에 접촉되는 파들은 입사각에 따라 입계각도에서 표면파로 모우드 변환될 수 있다. 이때 표면파의 변위는 샘플표면과 수직방향인 z방향과 표면과 접선방향인 x방향으로 나누어 식 (2), (3)과같이 나타낼 수 있다.

$$u_x = C [e^{\beta b_1 z} - A e^{\beta b_2 z}] e^{i\beta(x-v, t)} \quad (2)$$

$$u_z = -i\beta b_1 C [e^{\beta b_1 z} - A^{-1} e^{\beta b_2 z}] e^{i\beta(x-v, t)} \quad (3)$$

여기서, C : 상수,

$$b_1 = \{1 - (v_r/v_1)^2\}^{1/2}, b_2 = \{1 - (v_r/v_t)^2\}^{1/2}, A = (b_1 b_2)^{1/2},$$

$v_r$  : 표면파속도,  $v_1$  : 종파속도,  $v_t$  : 횡파속도

Snell 의법칙을 이용하여 종파와 표면파의 입계각을 구하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\sin 90^\circ \cdot v_w/v_c) \quad (4)$$

여기서,  $v_w$  : 물의 종파속도(1500m/s),  $v_c$  : 동전(백동)의 종파속도(4430m/s).

(5)와 같이 512개값의 평균값을 계산한다.

$$A_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(A_i)^2}}{n}, \quad (5)$$

여기서  $n : 512$ ,

$A_i : T=i$ 에서의 진폭값.

식 (5)에서  $A_i$ 는 그림 3의 X축  $i$ 에 대응되는 진폭값이며  $A_{avg}$ 는 스캐닝면적의 한 지점에서 512개 데이터를 time average 취하여 나타낸 하나의 값이며 전체 스캐닝면적에 대해서는 이  $A_{avg}$ 의  $N \times N$ 데이터값을 취하여 영상처리한다.

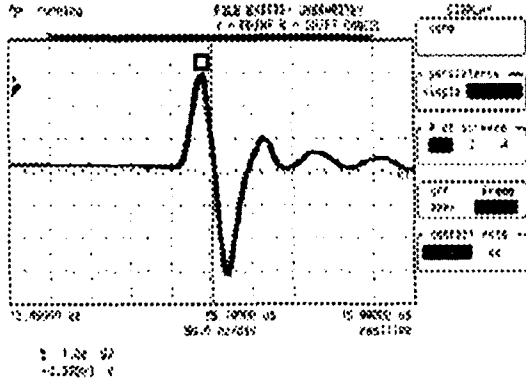


그림 3. 검출 데이터 윈도우(□: 피크값)  
Fig. 3. Window of the Detected Data(□: peak value)

본 시스템에서는 지름이 0.25", 초점거리 0.5" 인 25MHz small aperture형 초음파변환기를 사용하여 고분해능의 고주파대역에서 영상검출 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 초음파변환기의 개구면 직경과 초점거리가 1:2 이므로 식 (4)에 의해 표면파를 제외한 종파만을 발진시켜 실험을 수행하였다. 그림 1에서는 구성된 시스템의 구성도를 나타냈다. 그림 1에서 신호발진기로부터 impulse 신호가 초음파변환기로 입력되며 펄스에코방식을 이용하여 한 지점으로부터 반사된 신호는 500MSa/s 디지털 오실로스코프에 입력된다. 스크프의 time range는 검출하고자 하는 반사신호를 나타낼 수 있도록 그림 3과같이 시간축을 적절히 조절하여 윈도우를 설정하였으며 설정된 윈도우에서 GPIB를 통하여 피크데이터 및 512개의 진폭 데이터값이 컴퓨터로 입력된다. 또한 depth profile 알고리즘을 수행하기 위해 그림 4에서와 같이 기준신호에 대한 반사신호의 시간지연값  $\Delta t$  를 컴퓨터내에서 계산하여 저장한다. 컴퓨터는 GPIB에 의해 스크프로부터 데이터들을 입력함과 동시에 XY위치제어기를 한 스텝씩 스캐닝하도록 전용 인터페이스로 제어한다. 제어 및 데이터검출, 처리 알고리즘은 C 언어로 프로그래밍하였으며 검출된 신호는 컴퓨터내에 프로그래밍된 time average, depth profile 알고리즘 및 피크값 검출알고리즘으로 처리된다.

time average 알고리즘에서는 그림 3에서 나타낸 바와 같이 한 지점에서 512개의 데이터를 취하고 식

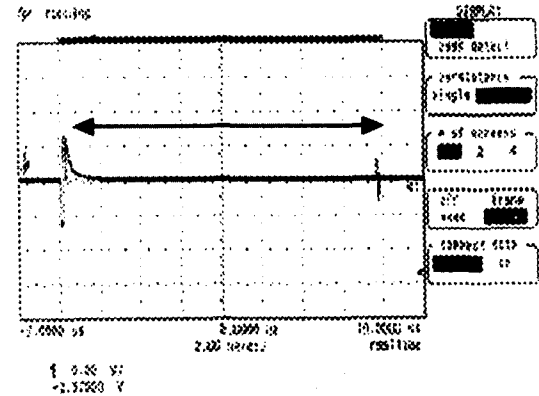


그림 4. 기준신호와 반사신호의 시간차( $\Delta t$ )  
Fig. 4. Time Difference of the Reference and the Reflect Signal( $\Delta t$ )

식 (6)에 나타낸 것처럼 depth profile 알고리즘에서는 시간영역에서 초음파변환기에 입력되는 기준신호에 대한 반사신호 피크지점과의 시간차,  $\Delta t$ 를 검출하며 분해능은 2ns를 갖고 검출하였다.

$$\Delta t = T_{peak} - T_{ref}. \quad (6)$$

여기서,  $T_{peak}$  : 피크지점의 시간값,

$T_{ref}$  : 기준신호의 시간값.

피크지점의 시간값,  $T_{peak}$ 은 반사된 첫번째 피크를 지정하였으며 이 값은 일정한 시간간격을 갖는 두 지점사이의 기울기가 zero가 되는 1/2지점으로 취하여 검출하도록 프로그래밍되었다. 이 depth profile 을 이용한 기술에서 반사된 음향파가 샘플의 각 지점에 도달하는 실제 시간적인 차를 검출할 수 있으므로 실제 제거리로 환산될 수 있고 이것은 실제 상대적인 깊이를 영상으로 나타낼 수 있는 특성이있다. 피크값 검출

기술은, 일반적인 초음파 현미경에서 사용되는 방법으로서 샘플에서 산란되고 반사되어 돌아온 반사파의 피크값을 검출하여 스캐닝영역의 상대적인 진폭변화를 영상처리한 기술이다.

본 연구에서는 25MHz 초음파변환기를 이용하여 고주파 대역에서 실험하였으며 위에서 제시된 time average, depth profile 기술과 피크값 검출기술로 동일한 영역의 영상을 검출하고 각 알고리즘의 특성을 비교, 분석하였다.

### III. 알고리즘 영상 획득

그림 1과 같이 수~수십 MHz대역에서 동작할 수 있는 초음파 영상처리 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템에서 500MSa/s의 성능을 갖는 디지털 오실로스코프로 반사신호를 검출하도록하므로써 저주파와 고주파대역에 걸쳐 모두 검출할 수 있도록 하였다. 검출된 데이터는 컴퓨터내에서 프로그래밍된 time average, depth profile, 피크검출 알고리즘으로 영상처리되도록 구성하였다. 본 시스템의 분해능은 초음파 변환기의 타입과 중심주파수, XY위치제어기의 스텝간격 및 디지털 스코프의 정밀도로써 나타낼 수 있다. 실험에서 사용된 초음파변환기는 지름 0.25", 초점거리 0.5" 인 25MHz 고주파 변환기를 사용하였다. 스캐너로는 최소스텝간격 1 $\mu$ m 성능의 XY위치제어기를 사용하였는데 실제 실험에서는 초음파의 집속면적을 고려하여 스텝당 100~150 $\mu$ m로 동작하도록 하였다. 또한 초음파변환기와 샘플과의 최적거리를 조정하기 위해 XY위치제어기의 Z축 거리조정기(마이크로미터)를 설치하고 이를 스코프화면에서 최대반사신호가 나타나도록 조정하였다. 컴퓨터에서는 XY위치제어기로 동전 표면을 스캐닝함과 동시에 각 스텝에서 검출하고자 하는 신호를 500MSa/s 디지털 오실로스코프로 GPIB를 통해 검출하고 검출된 데이터는 C언어로 프로그래밍된 time average, depth profile 알고리즘 및 피크값 검출 알고리즘으로 영상신호처리하여 영상화하였다.

그림 3에서는 구성된 초음파현미경 시스템으로 샘플 한 지점에서 검출된 반사신호의 윈도우를 나타낸 것이다. 검출신호를 스코프화면에 나타날 때 진폭과 시간축을 적절히 조절하여 윈도우를 설정한다. 그림 5와 6은 500원 동전 후면의 숫자 "500"을 피크값 검출 알고리즘으로 영상처리한 것이고 그림 7과 8에서는 동일

한 실험환경에서 time average 알고리즘으로 영상처리된 것을 나타냈다. 또한 그림 9와 10은 depth profile 알고리즘으로 영상처리된 것이다.

실험에서 10.5mm $\times$ 10.5mm 영역을 한 스텝당 150 $\mu$ m로 스캐닝하면서 각 스텝에서 데이터를 검출하고 검출된 각각의 데이터는 컴퓨터내에 프로그래밍된 피크값 검출, time average 및 depth profile 알고리즘에 의해 처리되었으며 그림 5, 그림 7, 그림 9에서와 같이 gray level과 그림 6, 그림 8, 그림 10과 같이 표면영상으로 영상처리되었다.

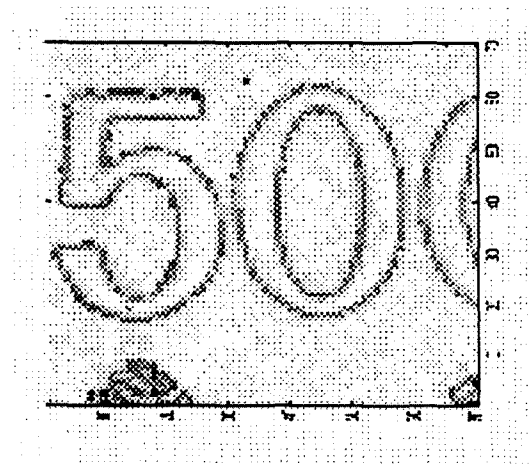


그림 5. 동전 "오백원" 후면의 피크값 영상(25MHz)  
Fig. 5. Peak Value Image of Rear Area on the "500 Won" Coin(25MHz).

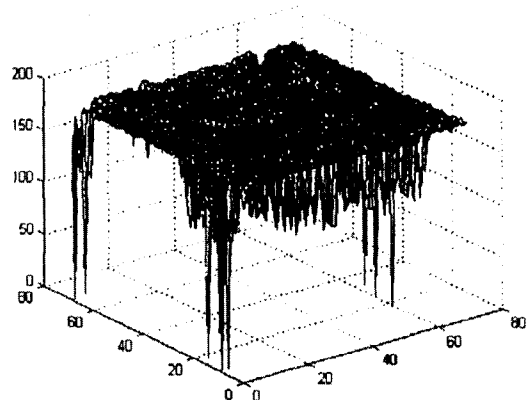


그림 6. 동전 "오백원" 후면 피크값의 표면영상 (25MHz)  
Fig. 6. Peak Value Surface Image of Rear Area on the "500 Won" Coin(25MHz).

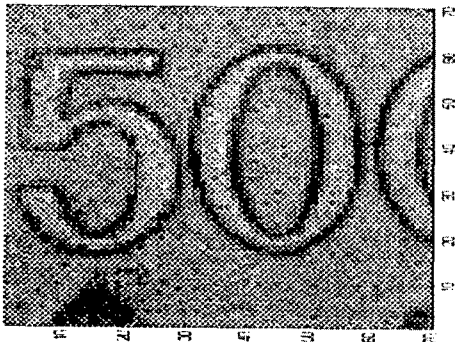


그림 7. 동전 “오백원” 후면의 time average영상 (25MHz)

Fig. 7. Time Average Image of Rear Area on the “500 Won” Coin(25MHz).

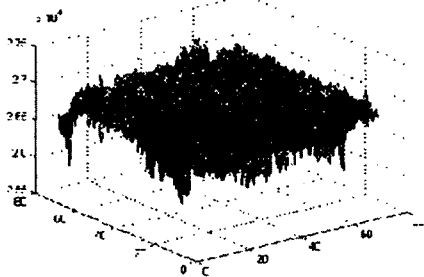


그림 8. 동전 “오백원” 후면 time average의 표면영상(25MHz)

Fig. 8. Time Average Surface Image of Rear Area on the “500 Won” Coin(25MHz).

그림 5, 6과 그림 7, 8을 비교해보면 초음파 현미경에서 일반적으로 사용되는 피크값 검출기술은 샘플표면에서 물체와의 산란 및 반사를 이용하므로 경계면에서의 분해능은 좋으나 그림 6의 5×10, 5×70 및 60×30부분의 일부영역에서 산란이 심하여 spurious신호가 나타나는 현상이 발생되며 이는 표면영상에서도 나타난다. 반면에 그림 7, 8은 그림 5, 6과 동일한 환경에서 실험한 영상이고 피크 검출기술에 비해 이와같은 spurious신호가 크게 나타나지 않았음을 볼 수 있다. 그림 8에서 전체적으로 적지않은 산란신호가 나타난 것은 고분해능을 나타내기 위해 입력신호를 매우 짧은 임펄스신호로 입사하여 안정되지 않은 원도우를 취하였기 때문이다. 하지만 그림 7에서 나타난 것처럼

gray영상은 전체적으로 smoothing한 효과를 얻을 수 있었다. time average 알고리즘에서는 한 지점에서 512개의 데이터를 취하고 이 값들의 평균값을 취하므로써 신호의 smoothing효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그림 9와 10에서는 위의 두 알고리즘과 동일한 실험환경에서 depth profile 알고리즘을 이용하여 영상처리하였다. 펄스에코방식의 초음파시스템에서 샘플을 스캐닝할 때 각 지점에서 반사되어 돌아온 신호는 그 지점의 기하학적인 구조, 특히 depth에 따라 그림 4와 같이 시간적인 차이가 나타난다. 이를 이용하여 본 연구의 depth profile 알고리즘에서는 초음파변환기에 입력된 기준신호와 반사된 신호의 시간적인 차이를 디지털 오실로스코프를 통하여 최소 2ns 분해능으로 검출하였고 영상화하였다. 그림 9와 10에서 보인 것처럼 depth profile기술은 샘플의 실제 기하학적인 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 성능을 보인다. 그림 10의 표면 영상에서 z축방향의 크기값은 기준신호와 반사신호의 시간차이므로 이것은 문자 “500”의 실제 상대적인 높이임을 알 수 있다. 이 기술은 초음파의 산란 및 반사량의 상대적인 변화를 이용하는 기존의 초음파 영상기술과는 달리 시간적인 미세한 차이를 검출하는 것으로 샘플의 미세적인 영역의 두께 및 체적측정등 실제 기하학적인 형태를 관찰할 수 있는 특징이 있다.

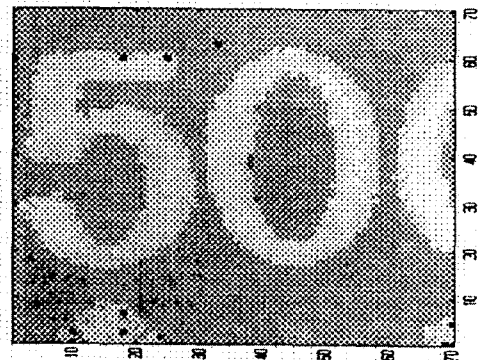


그림 9. 동전 “오백원” 후면의 depth profile영상 (25MHz)

Fig. 9. Depth Profile Image of Rear Area on the “500 Wpm” Coin(25MHz).

위에서 분석된 실험은 25MHz 초음파 변환기를 이용하여 고주파대역에서의 실험을 수행하였다. 본 실험

에서 구성된 초음파 영상처리 시스템은 500MHz 디지털 오실로스코프에서 신호를 직접 컴퓨터 인터페이스하여 검출하므로 수십 MHz의 고주파에서도 신호를 검출할 수 있도록 구성되었다. 그림 11~14에서는 지름 0.25", 초점거리 0.5" 인 25MHz 고주파 변환기를 사용하여 영상처리한 백원동전의 전면영상이다. 그림 13은 depth profile 알고리즘을 이용하여 처리한 영상이고 그림 11은 기존의 피크값 변화를 이용하여 처리한 영상이다.

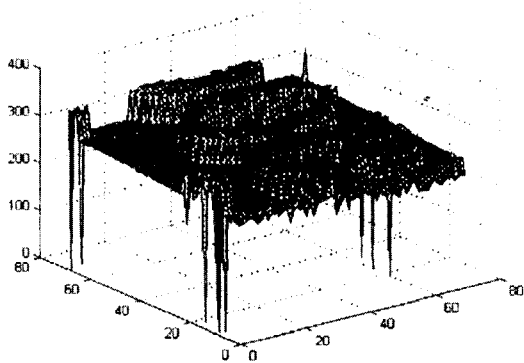


그림 10. 동전 "오백원" 후면의 depth profile의 표면 영상(25MHz)

Fig. 10. Depth Profile Surface Image of Rear Area on the "500 Won" Coin(25MHz).

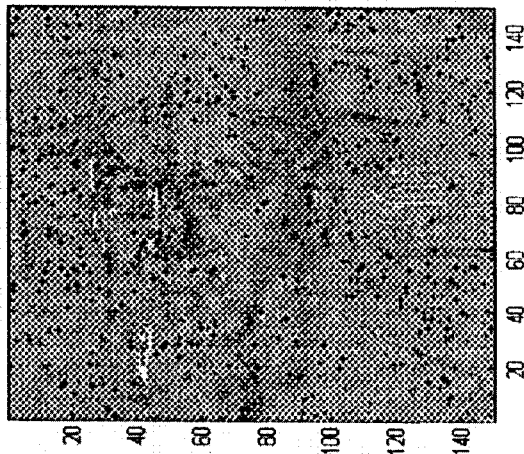


그림 11. 동전 "백원"전면의 피크값 영상(25MHz)

Fig. 11. Peak Value Image of Front Area on the "100 Won" Coin(25MHz).

두 영상에서 볼 수 있듯이 피크값 영상에서는 구조 경계면에서의 반사 및 산란의 변화량을 영상처리로 이용하여 검출 영상이 확실히 분해되지만 depth profile

영상에서는 동전구조의 실제 크기에 비례하는 시간지연 데이터값을 검출하므로 실제 영상에 가장 근접하게 나타난다. 이는 그림 12와 그림 14의 표면영상에서도 그 성능이 잘 나타난다. 그림 12의 피크값 영상에서는 경계면의 산란이 심하게 나타난 것을 볼 수 있으며 그림 14에서는 실제 구조의 높이 변화가 진폭값으로 잘 나타난 것을 알 수 있다. 또한 스캐닝 면적 전체에 나타난 잡음은 실제 동전표면이 물에 부식된 것이 고주파에서 분해된 것이다. time average 및 depth profile 기술을 초음파 신호처리에 적용한 것은 본 논문에서 처음으로 제시되었고 기존의 피크검출 알고리즘에 비해 각각 산란이 많은영역의 영상검출과 실제 depth를 정밀하게 측정하는데에 강력한 새로운 방법을 실험적으로 알 수 있었다.

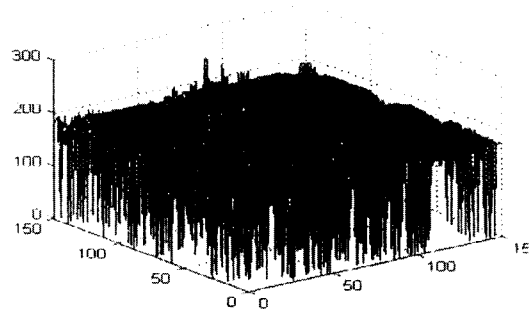


그림 12. 동전 "백원"전면 피크값의 표면영상 (25MHz)

Fig. 12. Peak Value Image of Front Area on the "100 Won" Coin(25MHz).

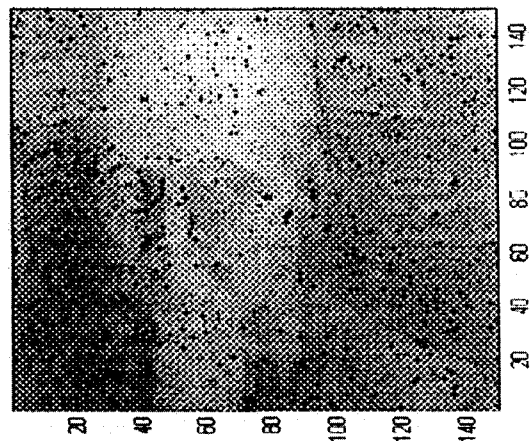


그림 13. 동전 "백원"전면의 depth profile영상 (25MHz)

Fig. 13. Depth Profile Image of Front Area on the "100 Won" Coin(25MHz).

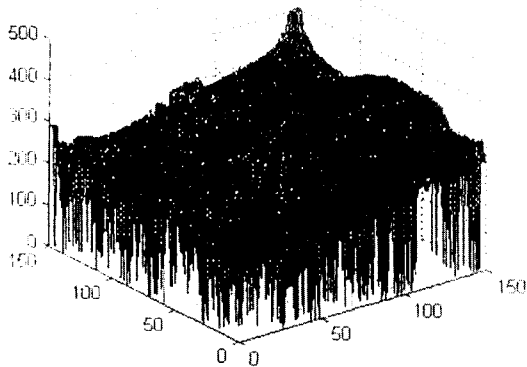


그림 14. 동전 “백원”전면 depth profile의 표면영상 (25MHz)

Fig. 14. Depth Profile Surface Image of Rear Area on the “100 Won” Coin(25MHz).

#### IV. 결 론

본 연구에서는 25MHz 고주파 대역에서 time average 및 depth profile 알고리즘을 적용하여 초음파 영상처리 시스템을 구성하였으며 기존의 초음파 영상처리 알고리즘인 피크값 검출기술과 상호 비교하고 분석하였다.

시험에서는 500원동전 후면의 숫자 “500”의 10.5mm×10.5mm를 150 $\mu$ m간격으로 70×70 스캐닝 하였고 샘플 각지점에서의 반사신호는 500MSa/s 디지털 스코프로 검출하고 컴퓨터내에 프로그래밍된 각 알고리즘으로 신호처리하고 영상화하였다. 또한 25MHz 대역에서는 백원동전 전면을 15mm×15mm 영역을 150×150으로 스텝당 100 $\mu$ m로 스캐닝하였고 이를 위와 동일한 방법으로 영상처리하여 각 알고리즘에서의 실험과 비교, 분석하였다.

실험결과 시스템에 적용된 time average 기술은 시간영역에서 smoothing효과를 나타내므로 피크값 검출기술에 비해 산란이 심한 영역에서 spurious신호가 많이 줄어드는 특징이 있다는 것을 보였다. time average 기술은 시간영역의 데이터 평균값을 취하는 연산을 수행하므로 피크값 검출기술보다 연산시간이 길어진다는 단점이 있지만 컴퓨터 및 전자장비의 고속성으로 이는 극복될 수 있으며 이 기술은 산란이 많이 발생하는 특성을 갖는 재질의 탐상에 매우 유용할 것으로 기대되어진다. 또한 depth profile기술은 기준신호와 반사된 신호의 시간차를 2ns의 고분해능으로 검

출하므로 축방향으로 수 $\mu$ m 이하의 차이를 분해할 수 있는 성능을 갖는다. 실제 실험결과 그림 10에서 나타난 것 처럼 500원 동전 문자 “500”을 실제 기하학적 크기로 잘 분해한 것을 알 수 있다. 이러한 알고리즘의 성능은 동전전면 영상에서도 동일하게 나타났으며 그림 11~그림 14의 그레이영상과 표면영상에서도 잘 나타났다. 본 연구에서 새롭게 제시된 depth profile 기술은 초음파를 이용하여 여러 재료나 다층구조물의 형태, 두께 및 체적등을 높은 분해능으로 정밀하게 측정할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 time average 영상처리 기술은 산란이 심한영역의 초음파 영상검출에 좋은 방법으로 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] G.S. Kino, “Acoustic Waves”, prentice hall.
- [2] D.W. Fitting, “Ultrasonic Spectral Analysis for NDE”, plenum press.
- [3] R.S.Gilmore, “Acoustic Microscopy from 10 to 100MHz for Industrial Applications”, Phil. Trans. R.Soc. Lond. A320, 215-235, 1986.
- [4] A.Atalar, “Phase Imaging in Reflection with the Acoustic Microscope”, Appl. Phys. Lett. 31(12), 15 Dec., pp. 791, 1977.
- [5] K.Liang, “Phase Measurement in Acoustic Microscopy”, Ult. Symp. pp. 599, 1983.
- [6] P.A. Reinholdtsen, “Removing the Effects of Surface Roughness from Low-Frequency Acoustic Images”, Review of Progress in Quantitative NDE, pp. 111, 1988.
- [7] K.Liang, “Materials Characterization by Inversion of V(z)”, IEEE Trans. on Ult., Ferr., vol. 32, no. 2, March, 1985.
- [8] O.R. Gericke, “Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing, J. Acoust. Soc. Am. 35, pp. 364-368, March, 1963.
- [9] H.L.Whaley, “Flaw Characterization by Ultrasonic Frequency Analysis, Mater. Eval. 29(8), pp. 182, 1971.
- [10] Simpson, “Time Frequency Domain

Formulation of Ultrasonic Frequency Analysis”, J.Acoust. Soc. Am., 56(6), pp. 1776, 1974.  
[ 11 ] Papadakis, “Ultrasonic Attenuation by

Spectrum Analysis of Pulses in Buffer Rods: Method and Diffraction Corrections”, J.Acoust. Soc. Am., 53, pp. 1336, 1973.

---

저 자 소 개



李 鍾 昊(正會員)

1988년 경희대학교 전자공학과 졸업. 1990년 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1990년 ~ 1991년 한국전자통신연구소 연구원. 1995년 경희대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1994년 ~ 현재 인하공업전문대학 전자계산기과