

초음파 Spectroscopy에 의한 두께측정을 위한 다중반사파의 시뮬레이션

박 익 근* · 한 응 교** · 최 만 용***

Computer Simulation of Multiple Reflection Waves for Thickness Measurement by Ultrasonic Spectroscopy

I. G Park*, E. K Han**, M. Y Choi***

Abstract Ultrasonic spectroscopy is likely to become a very powerful NDE method for detection of microfects and thickness measurement of thin film below the limit of ultrasonic distance resolution in the opaque materials, provides a useful information that cannot be obtained by a conventional ultrasonic measuring system.

In this paper, we considered a thin film below the limit of ultrasonic distance resolution sandwiched between two substances as acoustical analysis model, demonstrated the usefulness of ultrasonic spectroscopic analysis technique using information of ultrasonic frequency for measurements of thin film thickness, regardless of interference phenomenon and phase reversion of ultrasonic waveform.

By using frequency intervals(Δf) of periodic minima from the ratio of reference power spectrum of reflective waveform obtained a sample to power spectrum of multiple reflective waves obtained interference phenomenon caused by ultrasonic waves reflected at the upper and lower surfaces of a thin layer, can measured even dimensions of interest are smaller than the ultrasonic wave length with simplicity and accuracy.

1. 서 론

최근 각종 재료의 비파괴평가에 초음파를

정보매체로한 새로운 초음파 계측기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(1,2,3)

일반적으로 초음파에 의한 두께측정은 물

* : 천안공업전문대학 용접기술과(CheonAn Technical College)

** : 한양대학교 정밀기계공학과(HanYang University)

*** : 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science)

접수 : 1991년 11월 3일(Received November 3, 1991)

질 중을 전파하는 초음파의 왕복전파시간의 측정에 의존하고 있다. 그러나 초음파 파형의 위상반전이나, 간섭이 있는 경우, 초음파 펄스의 거리분해능 이하의 미소결합 검출이나 박막두께 측정에는 초음파의 에코높이나 전파시간의 정보만을 이용하는 펄스반사식 탐상기법으로는 그 한계가 있다. 특히 세라믹, 복합 재료, IC Package 등의 접합면에 존재하는 미소결합 검출이나 접착층의 박막 두께 측정등을 위한 새로운 비파괴평가기법의 확립이 강력히 요구되고 있다.^(4,5,6,7)

음향 임피던스가 다른 박막 접착층에서 초음파가 반사할 때 서로 간섭을 일으키며 이때 간섭반사 파형을 주파수 해석하면 반사체에서 새로운 정보를 얻을 수 있다.^(8,9,14) 즉, 초음파 Spectroscopy법⁽¹⁵⁾은 불투명한 재료 내부에서 초음파 펄스의 거리분해능 이하의 박막두께 측정이나 미소결합 검출에 유력한 비파괴평가기법으로, 종래의 초음파 측정 시스템으로는 얻을 수 없는 유용한 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 초음파 펄스의 거리분해능 이하의 박막 접착층을 갖는 3층 구조물질을 음향 해석모델로 생각하고, 초음파 파형의 위상반전이나 간섭의 영향으로 이제까지 측정이 어려웠던 중간층 물질의 박막두께 측정, 음속측정 등에 초음파 Spectroscopy 측정 기법의 유용가능성에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 시도하였다. 초음파 Spectroscopy법은 광대역의 주파수 성분을 갖는 초음파 파형을 Fourier 변환하여 진폭스펙트럼이나 위상스펙트럼을 얻기 때문에 MEM-Cepstrum 해석^(19,20,21)에 비해 데이터 해석, 분해능, 안정성의 면에서 훨씬 우수한 장점이 있다. 시뮬레이션 결과 미리 측정하여 놓은 중간층 상면으로부터 간섭하지 않은 초음파 반사파형의 진폭 스펙트럼과 중간층 양면으로부터 간섭한 반사파형의 진폭스펙트럼과의 비로부터 구한 주기적인 극대치 또는 극소치 간의 주파수 차를 사용하는 것으로부터 종래의 측정법으로는 측정이 어려웠던 초음파의 파장보다 얇은 두께까지를 간단하고 정확히 측정하는 것이 가능함을 알 수 있으며, 앞으로 접착층을

갖는 물질의 두께측정이나 음속측정등의 비파괴평가에 응용할 수 있는 새로운 비파괴 측정기법이 활용될 수 있다. 또 주기적인 극대치 또는 극소치의 Pattern으로부터 3층 구조물질의 3층째의 음향임피던스의 대소관계를 아는 것이 가능하다.

2. 고속 Fourier변환을 사용한 두께측정 원리

Fig.1과 같은 음향모델을 가정하고 시험체 표면에 압축 평면파가 제 1 매질에서 제 2 매질로 진행해 갈 때 음압 반사율 $r_{1,2}$ 는 식 (1)과 같이 표시되며,

$$r_{1,2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (1a)$$

$$r_{1,2} = -r_{2,1} = r \dots\dots\dots (1b)$$

음압 통과율은

$$t_{1,2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (2)$$

로 표시되며 Z_i 는 매질 i 의 음향 임피던스이다.

표면 에코가 단위 진폭이라면 n 번째의 다중반사 에코의 진폭은

$$K_n = t_{1,2} \cdot t_{2,1} \cdot r^{2(n-1)} \dots\dots\dots (3a)$$

또는

$$K_n = (1 - r^2) \cdot r^{2(n-1)} \dots\dots\dots (3b)$$

로 표시 가능하며, 만약 $s(t)$ 와 $f_n(t)$ 를 각각 표면 에코, 저면에서의 n 번째의 다중반사 에코의 시간에 대한 함수라할 때 검출된 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = s(t) + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \dots\dots\dots (4)$$

그리고 매질 II 재료에서 감쇠를 무시할 수 있다면 식(4)는 다음과 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$r(t) = s(t) + \sum_{n=1}^{\infty} K_n s(t - n\tau) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 τ 는 매질 II에서 초음파의 1회 반

사파에 대한 2회 이상의 반사파의 시간지연 $\tau(k = 1, 2, \dots, n)$ 는 초음파 왕복전파시간의 양의 정수배 값만 취하기 때문에 다중 반사파 상호의 시간차도 식(6)로 결정되는 값만을 잡는다.

$$\tau = \frac{2\ell}{V} \cdot k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

만약 $S(\omega)$ 와 $R(\omega)$ 가 각각 $s(t)$, $r(t)$ 의 Fourier 변환이라 하면 식(5)는 주파수 함수로 쓸 수 있다.

$$R(\omega) = S(\omega) + \sum k_n \cdot S(\omega) \cdot \exp(-2i\pi\omega\tau) \quad (7)$$

또는 $R(\omega) = S(\omega) \cdot M(\omega)$ 라 놓으면

$$M(\omega) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} k_n \cdot \exp(-2i\pi\omega\tau) \quad \dots (8)$$

여기서 $M(\omega)$ 는 매질 II 박판의 전달함수이며, 실제적으로는 박판저면에서의 한정된 에코의 수 N 만이 고려될 수 있기 때문에 식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M(\omega) = 1 + \frac{(1-R^2) \cdot \exp(-ia)(R^{2N} \cdot \exp(-iNa) - 1)}{(1 \div R^2) \cdot \exp(\div ia)} \quad (9)$$

여기서 $a = 2\pi\omega\tau$ 이다.

다중 반사로 간섭한 펄스 초음파 파형을 Fourier 변환에 의해 구한 진폭 스펙트럼은 다중반사파 상호의 시간차에 의한 위상 지연의 영향을 반영한 정보를 갖고 있다. 다시말해 다중 반사파의 진폭 스펙트럼은 다중반사파 상호의 시간차가 180° 양의 정수배의 위상 지연에 상당하는 주파수에서 극대치 또는 극소치를 잡는다. 그리고 극대치 또는 극소치를 일으키는 주파수는 주기성을 갖기 때문에 이 주기적인 파워 스펙트럼의 극대치 또는 극소치의 주파수 차를 구하면 시험체의 두께는 식(10)으로부터 측정이 가능하다.

$$L = \frac{V}{2(f_n - f_{n-1})} \quad \dots (10)$$

즉 다중 반사하여 간섭한 펄스 초음파 파형이라도 FFT로 얻어진 진폭 스펙트럼의 주기적인 극대치 또는 극소치의 주파수 차를

이용하면 물질의 두께 측정이 가능해진다.

3. 다중반사파의 시뮬레이션

일반적으로 음향 임피던스가 큰 물질을 통해 온 초음파가 음향 임피던스가 작은 물질의 경계에 반사된 경우에는 위상이 반전되지 않으나 역의 경우에는 반전된다. Fig.1에서 알 수 있듯이 음향 임피던스 Z_2 의 양면에 반사된 2개의 초음파가 다시 변환자에 되돌아올 때 위상이 반전하는 경우와 반전하지 않는 경우를 생각하고, 음향 임피던스 Z_2 의 물질(두께 또는 거리 L , 음속 V)의 양면으로부터 2가지의 반사파가 간섭하는 경우의 초음파 파형의 파워 스택트럼과 변환자로 부터 음향 임피던스 Z_1 에 반사되어 간섭하지 않는 초음파의 파워 스펙트럼의 비를 구하여 보았다.

Table.1 Simulation condition of multiple reflection wave

	$Z_1 : Z_2 : Z_3$	Thickness of Medium II (mm)	Velocity of Medium II (m/s)	Numbers of reflection
A	1 : 10 : 1	0.10	6,000	1
B	1 : 10 : 1	0.10	6,000	2
C	1 : 10 : 1	0.10	6,000	3
D	1 : 10 : 1	0.10	6,000	4
E	1 : 10 : 1	0.10	6,000	5
F	1 : 10 : 100	0.10	6,000	2
G	1 : 10 : 100	0.10	6,000	3
H	1 : 10 : 100	0.10	6,000	4
I	1 : 10 : 100	0.10	6,000	5

Fig.1과 같이 다중 반사파의 음향 모델로 음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 의 비가 ($Z_1 < Z_2 > Z_3$)와 ($Z_1 < Z_2 < Z_3$)의 경우를 예로하여 다중반사파를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 파형은 이상적인 펄스 초음파 파형(20MHz의 정현파 1파장의 펄스파형)으로 하고 다중반사파의 왕복 전파시간차가 초음파 파장의 2/3이 되도록 Table.1과 같은 조건으로 다중반사파에 의한 간섭파형을 시뮬레이션하였다.

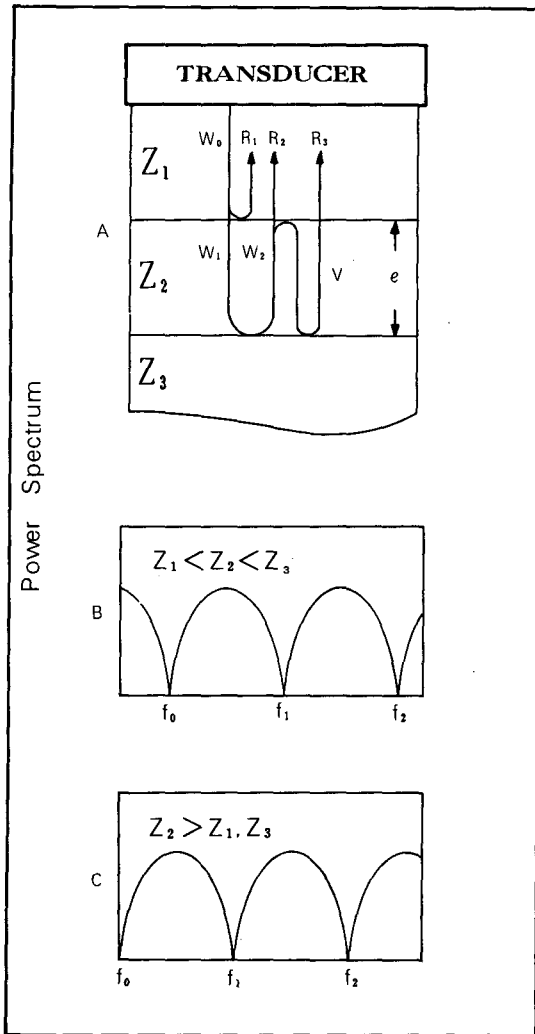
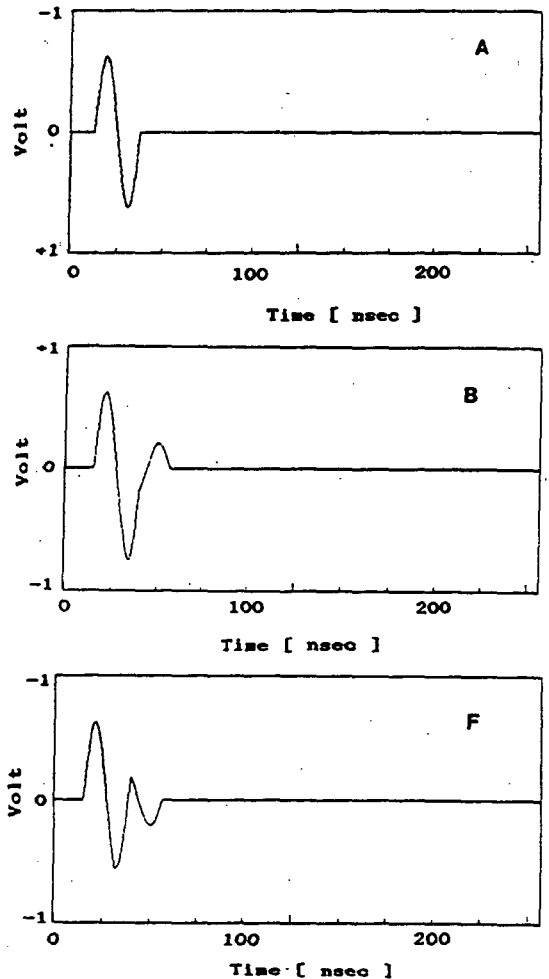


Fig.1 Schematic view of the interference phenomenon by reflected ultrasonic wave and two types of power spectra (B,C) depending on the acoustic impedance difference

Fig.1 B, C는 두께 L , 음향 임피던스 Z_2 , 음속 V_2 를 가지는 샘플이 음향 임피던스 Z_1, Z_3 를 갖는 물질에 끼워져 있을 때 음향 임피던스 값에 의존하는 간섭현상의 두 형태를 파워 스펙트럼으로 보여주고 있다. 간섭의 첫 번째 형태는 $Z_1 < Z_2 < Z_3$ 인 경우로 $f_0 = V/4L$ 로 정의되는 기본 주파수 F_0 의 기수배의 주

파수에서 간섭에 의한 주기적인 파워 스펙트럼의 극소값을 갖고, 간섭의 두 번째 형태는 $Z_2 > Z_1, Z_3$ 의 경우로 파의 위상이 바뀌었고 $f_1 = V/2L$ 의 정수배인 주파수에서 주기적인 파워 스펙트럼의 극소값을 갖는다. 이 두 경우에서 V 를 알면 시험체의 두께 또는 거리 L 은 식(10)으로부터 구할수 있다. 그러나 실제의 진폭 스펙트럼은 복잡한 형을 하여 간섭에 의한 극소치 또는 극대치를 판별하는 것은 어렵기 때문에 간섭에 주기적인 극대치 또는 극소치를 명확히하기 위해 간섭한 반사파형의 진폭 스펙트럼과 간섭하지 않은 초음파 반사파형의 진폭 스펙트럼과의 비를 잡고 규격화하는 것으로 하였다.



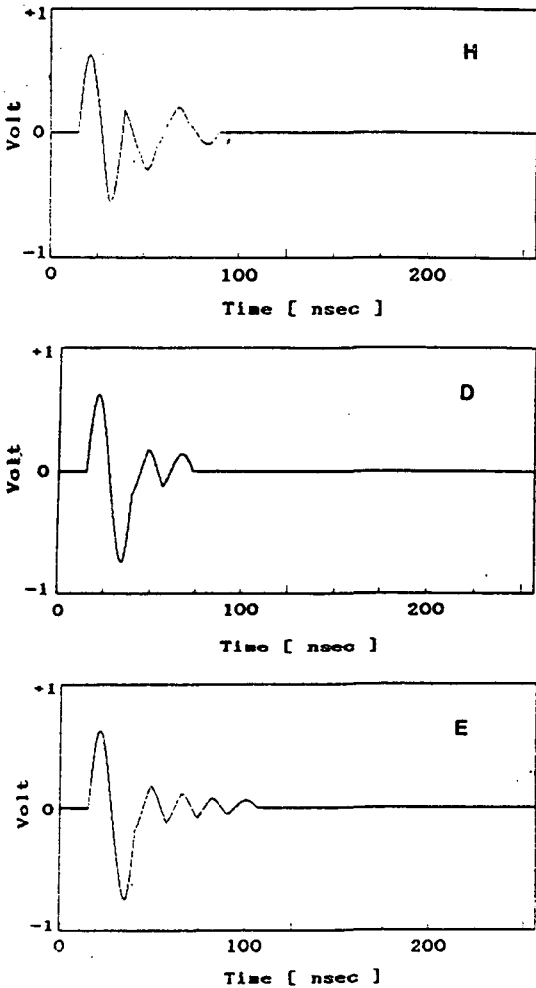


Fig.2 Multiple reflection waveform simulated

Fig.2는 다중반사에 의한 간섭파형을 시뮬레이션 한 것으로 반사파형 A는 Table.1(a)의 조건으로 20MHz의 정현파 1주기의 펄스파가 음향 임피던스 Z_2 의 물질 상면으로부터 반사한 모델을 표시한다.

Fig.2(B)~(H)는 Table.1(B)~(H)의 조건으로 1회 반사파형을 기본으로 음향임피던스 Z_2 의 물질로부터 시뮬레이션한 다중 반사 파형을 표시한다. 입사 음압 W_0 는 음압반사율, 투과율의 식을 이용하면 1회 반사 파형 R_1 으로부터

$$W_0 = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2 - Z_1} \cdot R_1 \dots\dots\dots (11)$$

과 같이 표시된다. 또 W_1, W_2, R_2 는

$$W_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot W_0 \dots\dots\dots (12)$$

$$W_2 = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot W_1 \dots\dots\dots (13)$$

$$R_2 = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot W_2 \dots\dots\dots (14)$$

과 같이 표시된다. 동일한 방법으로 3회 이하의 초음파 반사파형의 음압도 간단히 구해진다. 그리고 반사파형 $R_1, R_2, R_3 \dots$ 을 식(10)에 의해 구한 시간과 겹치지 않게하여 다중 반사 파형을 합성하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig.3는 Fig.2 B~H 파형의 진폭스펙트럼과 Fig.2 A 파형의 진폭스펙트럼과의 비이다. Fig.3으로부터 반사회수가 증가함에 따라 다중반사파 상호 시간 차의 위상 지연에 의한 진폭스펙트럼의 주기적인 극대치와 극소치가 증가함을 알 수 있다. 또 음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 의 비가 $(Z_1 < Z_2 > Z_3)$, $(Z_1 < Z_2 < Z_3)$ 의 경우 모두 1회 반사와 2회 반사의 간섭파형으로부터 진폭스펙트럼에 극소치가 생기는 주파수에서 주기적인 극소값이 특히 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다.

이것은 다른 반사파형에 비해 진폭이 큰 1회 반사와 3회 반사 이하의 파형과의 간섭으로부터 진폭스펙트럼에 극소치가 일어나는 주파수와 1회 반사와 2회 반사파의 간섭으로부터 진폭스펙트럼에 주기적인 극소치가 일어나는 주파수 간의 차 Δf 는 다중반사파의 왕복 전달시간차 $(2L/V)$ 의 역수에 일치한다. 따라서 음속 V 의 물질 두께 L 은 식(10)으로부터 간단히 구해지고 Fig.3으로부터 구한 Δf 와 음속 $V(=6,000\text{m/s})$ 를 식(10)에 대입하고 두께 L 을 구한 결과는 Table.1의 조건과 잘 일치하였다.

음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 비의 조건이 $(Z_1 > Z_2 < Z_3)$, $(Z_1 > Z_2 > Z_3)$ 의 경우에 대해서도 조사해 본 결과 1회 반사와 2회 반사의 간섭에 의한 진폭스펙트럼의 주기적인 극소치는 음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 의 비가 $(Z_1 > Z_2$

$\langle Z_3 \rangle$ 의 경우에 대해서도 조사해 본 결과 1회 반사와 2회 반사의 간섭에 의한 진폭스펙트럼의 주기적인 극소치는 음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 의 비가 ($Z_1 > Z_2 < Z_3$)일 때는 최초로 극소가 되는 주파수의 양의 정수배의 주파수에서, 또 음향 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 의 비가 ($Z_1 > Z_2 > Z_3$)일 때는 최초로 극소가 되는 주파수의 기수배로 되는 것을 알았다. 그리고 두께 L 도 Δf 를 구하는 것으로 부터 식(10)를 사용하여 구하였다. 이상의 결과 초음파의 간섭이나 위상의 반전으로 종래 두께 측정이 곤란했던 경우에 대해서도 정확히 두께 측정이 가능함을 보여준다. 그리고 1회 반사와 2

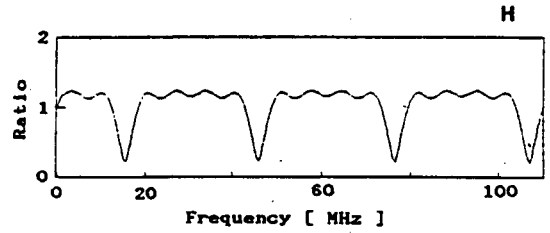


Fig.3 Ratio of the power spectrum of multiple reflected waveform and base waveform
 Δf : Frequency intervals of periodic minima

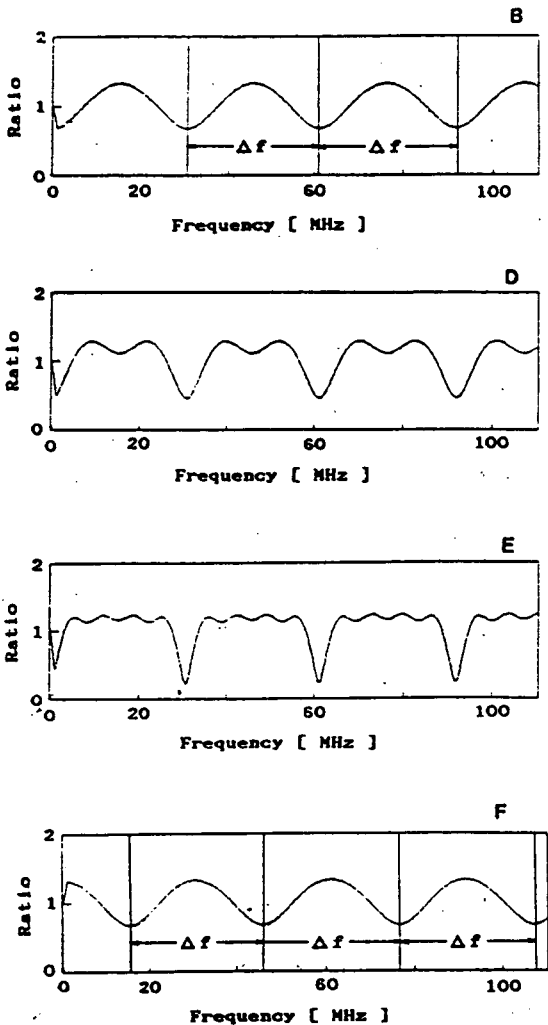
회 반사의 간섭으로부터 진폭 스펙트럼에서 발생한 주기적인 극소치가 나타나는 패턴으로부터 미리 음향 임피던스 Z_1 과 Z_2 의 대소 관계를 알고 있으면 Z_3 의 Z_2 에 대한 대소 관계도 구해진다.

5. 결 론

초음파 Spectroscopy에 의한 두께측정을 위한 다중반사파의 시뮬레이션을 한 결과 종래의 단일 주파수를 이용하는 초음파 측정 시스템으로 얻을 수 없는 다음과 같은 유용한 정보들을 얻을 수 있었다.

- (1) 3층 구조물질의 중간층에서 일어나는 다중반사파를 시뮬레이션하고 FFT해석하여 중간층의 두께를 구하는 두께 측정법의 유용 가능성을 확인하였다.
- (2) 미리 측정하여 놓은 간섭이 없는 중간층 상면으로 부터의 초음파 반사파형의 진폭 스펙트럼과 간섭한 중간층 양면으로 부터의 반사파형의 진폭스펙트럼과의 비로부터 주기적인 극소치 간의 주파수 차 Δf 를 구하므로써 종래의 측정법으로는 측정할 수 없었던 초음파의 파장보다 얇은 중간층의 두께를 구하는 것이 가능하였다.
- (3) 3층 구조 물질의 제1층과 제2층의 음향 임피던스의 대소 관계를 알고 있으면 주기적인 극소치의 패턴으로부터 제3층 음향임피던스의 제2층에 대한 대소도 알 수 있다.

앞으로의 초음파 Spectroscopy에 의한 연구과제로서는 광대역 주파수 성분을 갖는 초



음파 파형을 이용하여 박판 상태의 접착층을 갖는 각종재료의 물질 평가나 복합 재료등의 미소 결함 평가에 적용하여 새로운 비파괴계측 기법을 확립하는데 있다.

References

1. 後藤 輝孝 藤村 忠雄, 1987, "超音波感度音速測定装置の開発と超音波スペクトロスコピー" 超音波スペクトロスコピーとその物質工学への應用, 文部省科學研究費補助金 特定研究 研究成果報告書, (昭和62年 9月), pp. 180~183.
2. 中鉢 憲賢, 1987, "物質・資料評價のための超音波映像工学" 超音波 スペクトロスコピーとその物質工学への 應用, 文部省科學研究費補助金 特定研究 研究成果報告書, (昭和62年 1月), pp. 1~4.
3. L. Paradis, Y. Serruys, and R. Saglio, 1986, "Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurements and Detection of Near-Surface Defects" *Materials Evaluation*. Vol. 44, October, pp. 1344~1349.
4. 石川 潔, 1987, "超音波顯微鏡による加工變質層の厚さ計測", 非破壊検査 第 36 卷, 第 3 號, pp. 195~200.
5. 書藤 勝之, 1987, "接合材缺陷弁別のための周波數解析(II)", NDI 資料 21193, pp. 79~83.
6. 野中 壽夫, 1988, "超音波による新素材の缺陷檢出", 新素材及びその製品の非破壊試験シンポジウム論文集, 日本非破壊検査協會, pp. 126~130.
7. 石川 潔, 1988, "超音波顯微鏡によるセラミックス金屬接合部の評價", 新素材及びその製品の非破壊試験シンポジウム論文集, 日本非破壊検査協會, pp. 126~130.
8. W. A. Simpson. 1974, "Time-Frequency-Domain Formulation of Ultrasonic Frequency Analysis", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, pp.1776~1781.
9. Otto R. Gericke, 1966, "Defect Determination by Ultrasonic Spectroscopy" *Journal of Metals*, August, pp. 932~937.
10. L. Paradis et al, 1986, "Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurements and Detection of Near-Surface Defects", *Materials Evaluation*, Vol. 44, October, pp. 1344~1349.
11. H. L. Whaley and L. Adler, 1971, "Flaw characterization by Ultrasonic Frequency Analysis", *Materials Evaluation*, august, pp. 182~192.
12. 増田 順一, 1989, "超音波スペクトル法による金属材料構造の評價", 非破壊検査 第 38 卷, 第 2 號, pp. 145~146.
13. 増田 順一, 1990, "超音波スペクトル法による金属材料構造の評價", 非破壊検査 第 39 卷, 第 7 號, pp. 587~593.
14. W. A. Simpson, 1986, "Time-Domain Deconvolution", *Materials Evaluation*, Vol. 44, pp. 998~1003.
15. W. A. Simpson, 1976, "A Fourier Model for Ultrasonic Frequency Analysis", *Materials Evaluation*, Vol. 34, No. 12, pp. 261~274.
16. S. Takeshita, 1990, "Application of Two-Dimensional Ultrasonic Spectroscopy to Nondestructive Inspection", *Materials Evaluation / December*, pp. 1473~1477.
17. H. L. Whaley and K. V. Cook, 1970, "Ultrasonic Frequency Analysis", *Materials Evaluation*, Vol. 28, No. 3, pp. 61~66.
18. H. L. Whaley and K. V. Cook, 1979, "Application of Frequency Analysis in Ultrasonic Testing", *Materials Evaluation*, Vol. 37, No. 1, pp. 19~24.
19. M. Houze et al, 1984, "Measurement of the Thickness of thin layers by Ultrasonic Interferometry", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 23, January.
20. T. J. Ulrich and T. N. Bishop, 1975, "Maximum Entropy Spectral Analysis and Autogressive decomposition", *Rev. Geophysics and Space Phys.*, Vol. 13, pp. 183~200.
21. J. G. Ables, 1974, "Maximum Entropy Spectral Analysis", *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, Vol. 15, pp. 383~393.
22. J. P. Burg, 1967, "Maximum Entropy Spectral Analysis", Paper presented at 37th Annual International SEG Meeting.
23. A. Vandenbos, 1971, "Alternative interpretation of Maximum Entropy Spectral Analysis", *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.IT-17, pp. 493~494.