

초음파스펙트럼해석법을 이용한 고정도 결함평가

노승남*, 윤종학*

A Study on Highly Accurate Evaluation Technique using Ultrasonic Spectrum Analysis Method

Ro Sing Nam*, Yoon Jong-Hak*

Abstract

The discrimination of flaw shape and sizing is very important subject in the material evaluation for semiconductor and new materials. The aim of this paper is to investigate the spectrum analysis of artificial defect signal captured from steel ball embedded in the resin. The results show that it can be evaluated quantitatively the size of artificial defect, from the amplitude variation of same frequency if the probe with same diameter and focal length is used. Comparing with the amplitude variation of the high frequency component and low frequency component obtained from the distance of defect center position, it can be estimated steel ball and flat bottom defect.

1. 서 언

초음파계측에 의한 각종 재료의 특성 평가는 컴퓨터 등에 의한 신호처리기술의 발달과 함께 반도체 등의 전자부품에서부터 세라믹 등의 첨단 신소재를 이용한 기계부품의 품질보증을 확보하는 수단으로 그 활용 범위가 점차 넓어지고 있다. 세라믹이나 IC패키지 내부의 결함의 존재 여부는 알 수 있으나, 신뢰성 평가에 중요 항목인 결함의 크기나 형상의 추정은 아직 확립되어 있지 않다.^{2),3),5)} 초음파파형이 가지고 있는 에코 높이나 전파시간의 정보만을 이용하는 펄스반사식 초음파계측기법에 대한 신소재

등의 재료평가에는 그 한계가 있으며, 이러한 재료의 품질보증을 확보하기 위한 새로운 고기능, 고정밀 재료평가를 위한 계측기법에 대한 연구가 급속도로 진행되고 있다.^{1),4)}

즉, 이제까지 초음파펄스를 이용한 재료평가, 결함탐상은 초음파를 시간영역에서 초음파의 전파시간(Time of flight), 수신한 펄스의 강도의 측정으로부터 재료의 음속, 감쇠율 또는 결함크기를 측정하는 방법에 기초를 두고 있다. 그러나, 최근에는 광대역 초음파탐촉자의 출현, 측정기기의 디지털화, 고정도 연산처리기술의 진보와 함께 초음파펄스파형중 필요한 정보만 선택, 추출하고 주파

* 서울산업대학교 기계공학과

수영역에서 해석하면 재료평가와 결합탐상에 관련한 새로운 많은 정보를 얻고 있다.^{6),7),8),9),10)}

본 연구에서는 수지내에 강구와 같은 인공결합 시험편을 만들고 FFT에 의한 스펙트럼해석을 응용하는 탐상기술로 결합 형상과 크기를 추정하는 기술 및 분해능 향상 기법을 소개한다. 구형결합에서는 결합에코와 같은 주파수성분의 강도 변화로부터 수지내부의 결합크기를 정량적으로 추정할 수 있다. 또, 2개의 주파수성분을 이용하는 것에 의해 구형 및 원판형결합의 형상추정이 가능하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치구성

본 연구에 사용한 초점형초음파파형해석시스템(HITA CHI AT 7000)의 개략도를 Fig. 1에 나타내고 있다.

시스템 구성에는 탐촉자에 펄스전압을 가하여 발생된 초음파를 수신하는 Ultrasonic Pulsar / Receiver, 에코의 임의 부분에 게이트를 걸고 게이트내 신호의 마이너스 최대치를 검출하는 Peak Detector, 에코를 모니터링하고 파형데이터를 전송하는 파형기억장치, 탐촉자를 3차원 주사시키는 XYZ-Scanner와 흑백모니터에 영상을 표시하는 영상 입출력장치, 칼라 프린터 등으로 구성된다.

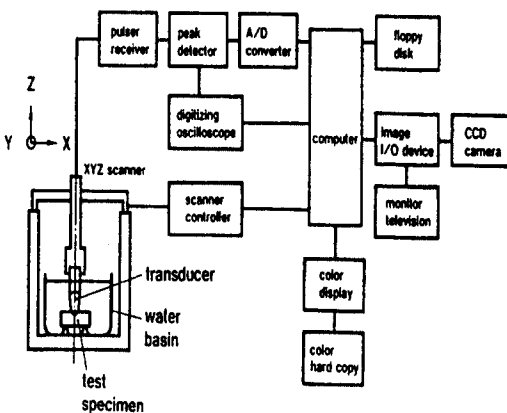


Fig 1. Configuration of ultrasonic measuring system

2.2 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 합성수지 내에 의사(擬

似)결합을 만든 것을 사용했다. 합성수지는 주제(主劑) 및 경화제를 혼합 경화시킨 에폭시계 냉간혼입수지를 사용했다. 의사결합은 스테인레스강구를 사용했다. 강구가 저면과 계면의 근방에서는 각각의 반사파가 간섭을 일으켜 주파수에 영향을 미칠 우려가 있기 때문에 이들을 완전히 분리하여 계측을 할 수 있도록 하였다. 따라서, 강구를 수지내 중앙부근에 위치하게 하고, 우선 용기에 절반 정도 수지를 넣고 표면이 완전히 경화되지 않고 점도가 남아있는 상태에서 강구를 수지위에 놓고, 다시 수지를 부어서 경화시키는 방법으로 하였다. 경화시간은 주제와 경화제와의 혼합비 및 보존온도에 의해 결정되기 때문에, 본 연구에서는 수지내의 기포가 없고, 급속한 경화에 의한 수지의 뒤틀림이 생기지 않게 하기위해 실온(약 20℃)에서 경화시간을 약 1~1.5시간으로 하였다.

2.3 샘플링 방법

수지 내의 의사결합의 반사파를 샘플링하는 방법은 먼저 ① C-Scope탐상으로 의사결합의 위치를 확인하고, ② 화상에서의 커서 기능으로 측정을 원하는 위치에 탐촉자를 설정시키고, ③ 모니터링하는 파형을 파형기억장치로부터 GPIB인터페이스로 컴퓨터에 전송하게된다. 파형을 샘플링할 때 다음의 3가지를 유의하였다.

- i) 샘플링 파형은 피크검출기의 주파수 특성에 의한 영향을 받지않도록 피크검출기를 거치지않고, 펄스리시버 출력을 직접 파형기억장치에 입력한 파형으로 하였다.
- ii) 펄스리시버의 특성으로 출력이 0.6V 이상에서 파형이 찌그러지는 성질이 있기 때문에 이 전압 이하가 되도록 게인을 조정하였다.
- iii) 샘플링한 파형데이터에 대해 FFT를 이용한 해석을 하기 위해 파형데이터의 1포인트 당의 시간 ΔT 는 샘플링정리에 의해 탐촉자가 갖는 주파수대역의 상한값을 F 라 했을 때, $\Delta T \leq 1/2F$ 가 되도록 파형 기억장치의 모니터상의 시간축을 설정했다.

2.4 실험방법

본 연구에 사용한 초음파 주파수해석시스템의 신호처리 과정은 다음과 같다. Pulse Generator로 부터 발생한 초음파 펄스는 광대역 초점형 변환자에 의해 초음파

로 변환되어 시험체로 진행해 간다. 진동자로부터 발신된 초음파는 음향렌즈에 의해 집속되고 수중의 피검체에 입사된다. 시험체의 표면이나 음향임피던스가 다른 재료의 경계면에서 반사한 초음파는 동일 변환자에 검지되고 전기적인 신호로 변환된다. 그리고 초음파 진동자에서 전기신호로 역변환된 RF 초음파 신호는 미약하기 때문에 초음파 Receiver에서 증폭되고 초음파 Peak detector는 게이트 설정에 의해 필요한 초음파 파형을 잡는다. 그리고, 광대역 주파수 범위에서 초음파의 주파수정보를 얻기 위해 모든 파형에 대해 FFT 해석을 하였다.

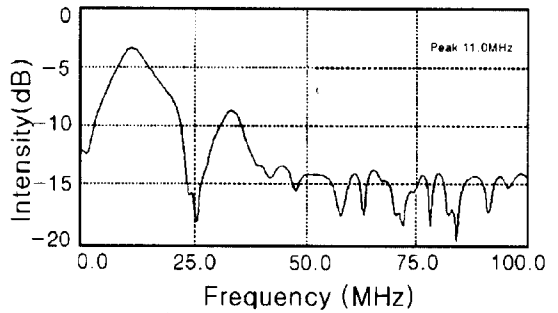
본 실험에 앞서 FFT 알고리즘의 유용성 검증을 위하여 시험체의 표면에 초점거리를 맞추고 실험장치를 Calibration 한후 광대역 주파수 범위에서 초음파 RF 파형 정보를 얻고 그 파형에 대해 FFT 해석을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

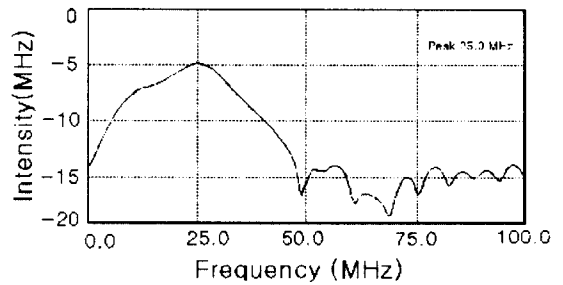
3.1 탐촉자의 특성

본 연구에 사용한 10, 25, 50MHz 3종류의 초점형 탐촉자의 주파수특성을 조사한 결과를 Fig. 2에 나타내고 있다. 측정은 수조의 저면에 두께 0.5mm의 유리판을 놓고 그 표면으로부터 반사파의 피크값이 최대가 되도록 탐촉자의 높이를 조정하여 반사파형을 샘플링하고, FFT에 의해 주파수해석을 했다. 그림으로부터 10, 25, 50MHz 각 탐촉자 중심주파수는 각각 11, 25, 27MHz임을 알았다. 10, 25MHz 탐촉자에서 중심주파수는 공칭주파수와 잘 일치하나, 50MHz에서는 50MHz부근의 성분은 비교적 약하고, 중심주파수 강도의 -3dB 대역을 조사하여보면 Fig. 2(c)로부터 그 대역은 43MHz이고, 상한값 부근은 약 50MHz 임을 알 수 있다. 이와같이 고주파성분이 약한 원인으로는 수중에서 고주파성분의 감쇠라 생각된다. 따라서, 수중에서 주파수의 감쇠를 조사하기 위해 다음을 측정하였다. 50MHz 탐촉자에서는 탐촉자 내부의 지연재에서 반사파를 관찰할 수 있으므로 반사파와 수중의 유리표면의 반사파의 주파수해석 결과를 비교해 보았다. 지연재에서 주파수분석 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 이 그림으로부터 탐촉자 내부에서 반사파의 중심주파수는 36MHz로 수중의 유리표면의 반사파에 비해 9MHz 높은 주파수가 되는 것을 알았다. 한편, 중심주파

수의 강도에서 -3dB 범위의 주파수대역을 비교해보면 Fig. 2(c) 및 Fig. 3에 의해 수중을 통과하는 경우는 43MHz 탐촉자내부에서는 55MHz이 되고, 수중을 통과한 경우는 주파수대역이 협대역이 된다. 또, 각각의 주파수대역의 상한값이 55 및 75MHz인 것으로부터 수중에서 감쇠하는 것은 고주파성분일수록 현저하다는 것을 알 수 있다.



(a) 10MHz (f : 10mm, D : 6.4mm)



(b) 25MHz (f : 12.4mm, D : 6.4mm)

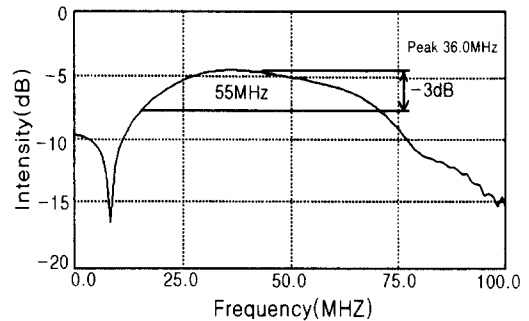


Fig. 2 Frequency characteristics of Probe

이상과 같이 초음파가 수중을 통과하면서 고주파수성분이 감쇠하기 때문에 수거리에 따라서는 공칭주파수가 50 MHz 이상의 탐촉자를 사용하여도 종래의 탐상방법으로는 그 효과를 기대할 수 없다는 것을 알 수 있다.

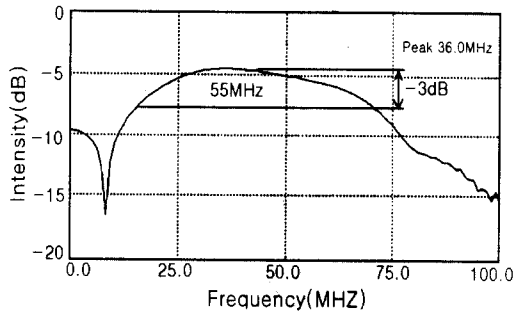


Fig. 3 Frequency characteristics of probe(50MHz)

3.2 수지의 음속

본 연구에서 사용한 수지의 음속을 조사하기 위해서 기포를 포함하지 않은 수지를 두께 4.4mm의 블록 상태로 잘라서, 1.5MHz 탐촉자를 이용해서 표면에코와 저면에코 사이의 시간차를 측정했다. 이 시간차는 초음파가 표면과 저면간을 왕복하는데 필요한 시간이기 때문에 두께의 2배거리와 시간차로부터 음속을 구할 수 있다. 측정은 5개소에서 하고 시간차의 평균은 3.44nsec였다. 판두께가 4.4mm이기 때문에 음속을 계산하면 약 2560m/sec가 된다.

시간차의 측정오차는 $\pm 0.03nsec$ 이고, 음속으로 환산하면 $\pm 22m/sec$ 의 오차가 생긴다.

3.3 치수측정

시험편은 직경이 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 2.0 mm 7가지의 스테인레스강구를 깊이가 일정하도록 수지 내에 넣은 것을 사용했다. 탐촉자는 초점거리 및 진동자 직경이 같은 10, 25, 50MHz와 초점거리와 초점거리가 다른 25MHz의 초점형을 사용했다. 먼저, C-scan탐상을 하고 결함크기를 추정하는 방법에 대해 검토 하였다. 결함 크기는 결함상단면(像斷面) 에코분포의 최대에코높이에서 -6 dB drop한 범위로 하고, 각 탐촉자에 대해 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내고 있다.

그림에서 실제 결함직경과 측정에서 얻어진 결함직경과의 관계를 보면 각 탐촉자에서 그 변화양상이 다르고,

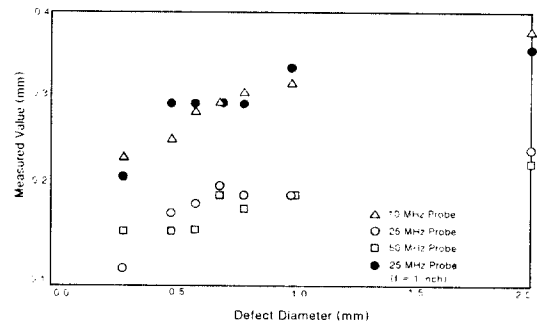


Fig. 4 Result of defect measurement by conventional method

또 편차도 크다는 것을 알 수 있다. 이 관계로부터 결함 직경의 추정이 가능하다고 생각되지만, 이것은 탐촉자 고유의 특성이 내재되어 있기 때문에 탐촉자마다 그 관계를 구하여야하는 번거로움이 있다. 따라서, 주파수영역에서 검토를 하였다. 측정방법은 각 결함의 정점에 초점을 맞추고 그곳에서의 반사파를 샘플링하여 주파수해석을 하여 10 및 25MHz 성분의 강도를 구했다. 측정결과를 Fig. 5에 나타낸다.

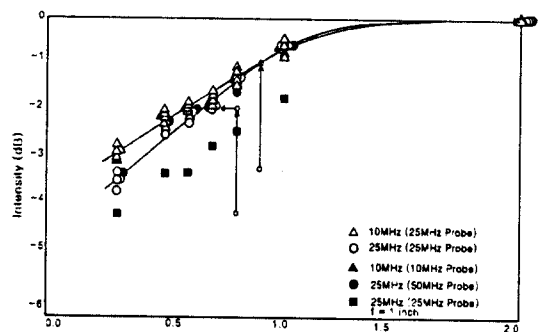


Fig. 5 Relationship between the amplitude of frequency component and defect diameter.

그림에서는 직경이 2.0mm에서의 각 주파수성분의 강도를 0dB가 되게 기준화하고 있다. 초점거리 및 진동자 직경이 같은 탐촉자를 사용하면 주파수가 달라도 각 주파수성분의 변화양상은 거의 같다. 또, 직경이 0.3~1.0mm 범위에서 주파수성분의 차에 의해 기울기가 달라진다. 한편, 초점거리가 다른 탐촉자를 사용한 경우, 직경이 1.

0~2.0mm범위에서 기울기가 커지는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 초점거리 및 진동자 직경이 같은 탐촉자의 경우 동일 주파수성분의 변화에 착안하면, 탐촉자의 주파수에 의한 변화는 없기 때문에 어떤 주파수의 탐촉자에서도 이 관계를 이용해서 결함직径의 추정이 가능하다. 그림에서 직경이 1.0~2.0mm범위에서는 주파수성분의 강도변화는 작고, 결함직径의 추정이 어려울 것 같으나 신소재 등에서 1.0mm 이상 크기의 보이드는 거의 존재하지 않기 때문에 본 측정법은 충분히 사용 가능하다고 생각된다. 직경이 2.0mm일 때의 반사파의 주파수성분 강도로 기준화해석은 정량적으로 결함직径을 추정할 수 없다. 따라서, 측정하고자하는 결함 및 그것과 같은 깊이 에 미리 크기를 알고 있는 결함의 2점을 측정할 필요가 있다. 크기를 알고 있는 결함직径 2.0mm 보다 작은 경우는 반사파의 주파수성분의 강도(그림중 A)를 동일 주파수성분의 선상까지 이동 한다(A'). 다음에 크기를 알 수 없는 결함의 반사파의 주파수성분의 강도(B)를 같은 만큼 이동시켜 그 때의 강도와 동일 주파수성분의 선과 교차한 위치(B')가 그 결함직径이 된다. 이상은 각 주파수성분에서 가능하다.

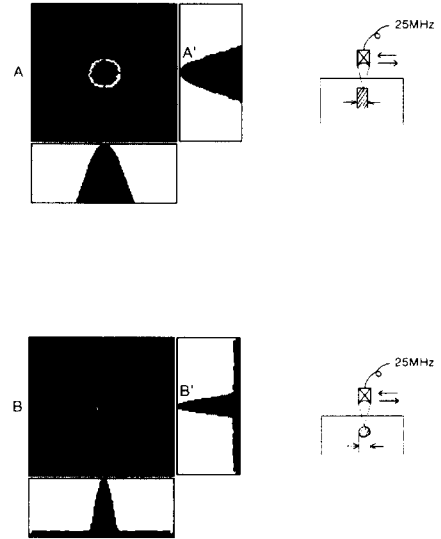


Fig. 6 C-Scope image (ϕ 0.3)

3.4 형상추정

시험편은 수지 내에 직경 0.3mm 스테인레스 강구 및 동일 직경의 평저 환봉을 넣은 것으로 하였다. 이 2개의 시험편은 각각 구형 및 원판형결함(균열)으로 가정하는 것이 가능하다. 이 2종류의 결함형상의 차이는 파괴역학적으로 보면 큰 차이가 있다. 특히 원판형결함은 구형에 비해 외력이나 열응력이 가해졌을 때 균열의 발생원인이 되기 쉽다. 그 예로 2개의 시험편에 대해 종래의 방법으로 탐상한 결과를 Fig. 6에 나타내고 있다. 탐촉자는 25MHz를 사용하여 각 의사결함의 정점 및 중심에 초점을 설정하고 탐상하였다. 그림에서 원판형결함과 구형결함 탐상결과의 상이점은 결함상(像)의 크기 뿐이라는 것을 알 수 있다. 원판형 결함의 직경이 충분히 큰 경우 결함상 면이 평평하다는 것로부터 결함상 단면의 에코분포는 결함상 중심부근에서 평평하다고 생각한다.

다음에 반사파의 시간영역에서의 검토를 시도하였다. Fig. 7과 같이 구형결함에서는 정점(T) 및 정점에서 떨어진 위치(S)에서는 탐상면에서 거리가 다르다. 이 2점에서의 반사파는 탐상면에서 거리차의 2배에 해당하는 시

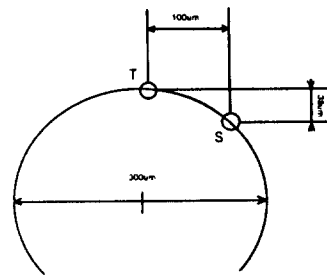


Fig. 7 Spherical defect model

간의 차가 생긴다. Fig. 7에서 직경 300 μ m의 구에서는 정점 및 정점에서 100 μ m떨어진 위치에서는 깊이방향으로 약 38 μ m의 차가 생긴다. 수지의 음속이 2560m/sec이기 때문에 2점간 시간의 차는 약 29nsec이다. 한편, 원판형 결함에서는 중심에서 100 μ m떨어진 위치에서도 반사파의 시간차는 생기지 않는다. 이상으로부터 시간영역에서의 파형해석에 의한 형상추정이 가능하다. 그래서, 수지중의 의사구형결함에서 정점 및 정점으로부터 100 μ m떨어진 위치에서의 반사파를 측정된 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에 따르면 2점간의 시간차는 약 2.8nsec이고, 예상한

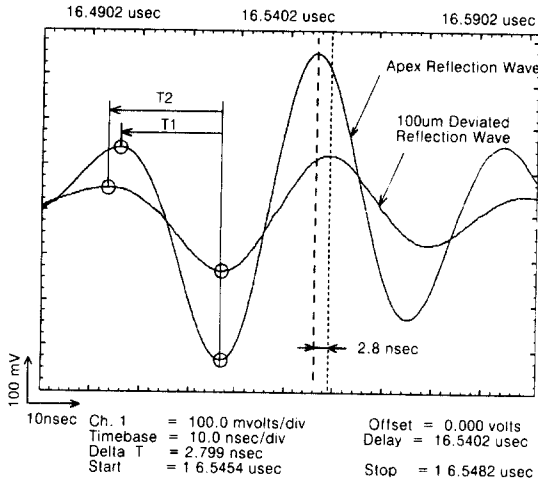


Fig. 8 Reflected waveform of spherical defect

시간차(29nsec)보다 작다. 따라서, 앞에 기술한 주파수의 변화에 착안하여 주파수영역에서의 검토를 하였다. Fig. 9는 Fig. 6에서 2개의 시험편에 대해 A-A' 및 B-B' 상의 반사파를 10 μm 피치로 샘플링하고 각파형의 주파수해석을 한 결과를 나타내고 있다. 이 분포도로부터 중심에서 멀어짐에 따라 원판형 결함에서는 각 주파수 성분과 일치해서 감쇠해가는 것에 대하여 구형결함에서는 고주파수성분의 감쇠가 현저히 나타난다. 중심 및 정점으로부터의 거리와 각 주파수성분의 강도와와의 관계를 10 및 25MHz성분을 파라미터로 하여 비교한 결과를 Fig. 10에서 나타내고있다. Fig. 10(a)에서 원판형결함에서는 양주파수성분 최대치로부터 6dB 감쇠한 위치는 중심에서 약250 μm 떨어져 있고, Fig. 10(b)의 구형결함에서는 10MHz 성분은 정점으로부터 약 200 μm , 25MHz성분에서는 150 μm 의 위치였다. 이로부터 구형결함의 경우에는 고주파수성분과 저주파수성분에는 감쇠방식이 다르고, 고주파수성분일수록 정점에서 멀어짐에 따라서 급속히 감쇠한다. 이상으로부터 결함중심 위치로부터 거리에 대한 고주파수 성분과 저주파수성분의 강도 변화를 비교하는 것에 의해 구형 및 원판형의 결함형상추정이 가능하게 된다.

4. 결 언

초음파스펙트럼해석법을 이용한 수지내부의 결함검출기술에 대해 실험적 고찰을 한 결과 이상의 결과를 얻었다.

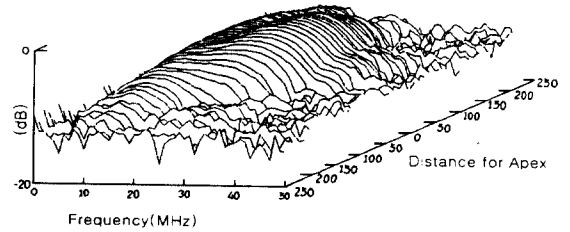
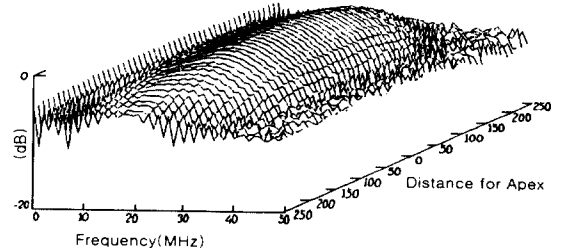
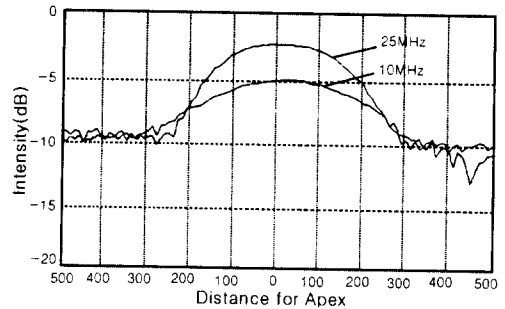
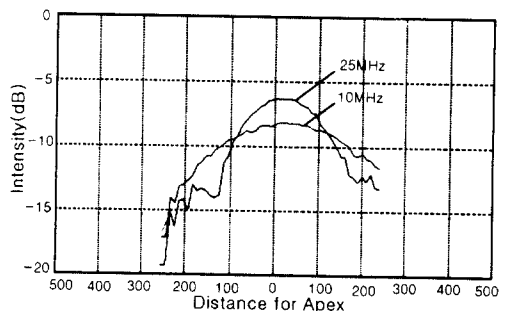


Fig. 9 Spectrum distribution



(a) Flat bottom defect (A-A')



(b) Spherical defect (B-B')

Fig. 10 Frequency variation

1. 초점거리 및 진동자 직경이 같은 탐촉자를 이용하면 주파수가 달라도 동일 주파수성분의 강도변화로부터 수지내부의 결함크기를 정량적으로 파악하는 것이 가능함을 알았다.
2. 결함중심으로부터 거리에 대한 고주파수성분과 저주파수성분의 강도 변화를 비교하는 것에 의해 구형 및 원판형의 결함형상의 추정이 가능하였다.

후 기

“이 논문은 1996학년도 서울산업대학교 공모과제 학술연구비에 의하여 연구되었음.”

참고문헌

1. L.Paradis, Y.Serruys, and R.Saglio, “Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurements and Detection of Near-Surface Defects” Materials Evaluation, Vol.44, October, pp 1344-1349. 1986.
2. W.A.Simpson, “Time-Frequency-Domain Formulation of Ultrasonic Frequency Analysis”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.56, pp 1776-1781, 1974.
3. W.A.Simpson, “A Fourier Model for Ultrasonic Frequency Analysis”, Materials Evaluation, Vol.34, No.12, pp 261-274, 1976
4. S.Takeshita, “Application of Two-Dimensional Ultrasonic Spectroscopy to Nondestructive Inspection”, Materials Evaluation/December, pp 1473 - 1477, 1990.
5. Sachse, W and Pao, Y.H, “On the determination of Phase and Group velocities of dispersive waves in solids”, Journal of Applied Physics, Vol.49, No.8, pp 4320-4327, 1978.
6. Pialucha, T. and Guyott, C.C.H, “Amplitude Spectrum Method for the Measurement of Phase Velocity” Ultrasonics, Vol 2, Sep., pp 270-279, 1989.
7. L.Paradis et al, “Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurements and Detection of Near Surface Defects”, Materials Evaluation, Vol.44, October, pp 1344-1349, 1986.
8. H.L.Whaley and L.Adler, “Flaw characterization by Ultrasonic Frequency Analysis”, Materials Evaluation, august, pp 182-192, 1971.
9. W.A.Simpson, “Time-Domain Deconvolution”, Materials Evaluation, Vol.44, pp 998-1003, 1986
10. H.L.Whaley and K.V.Cook, “Application of Frequency Analysis in Ultrasonic Testing”, Materials Evaluation, Vol.37, No.1, pp 19-24, 1979.