

상호상관성을 이용한 망상형 유리섬유 복합체의 속도분석 연구

이영희, 이승희

계명대학교 물리학과

요약 본 논문은 상호 상관관계 함수의 특성을 이용하여 이 함수 특성인 입력파와 출력파의 상관관계를 구하여 Lamb파의 A₀ mode의 속도를 알루미늄(6061-T651)에서 측정하여 본 결과 정확한 값을 구하였기에 일반적으로 속도 측정이 매우 힘든 망상형 유리섬유 복합체에 대한 음파의 전파속도를 측정하였다. 본 상호 상관 관계 함수의 특징은 외부의 어떠한 잡음에도 영향을 받지않고 쉽고 정확히 측정할 수 있으므로 그 응용면에 상당한 가치가 있고 또한 여러가지 입력파에 대한 입력파 원천 및 전파 경로 분석이 용이하여 본 복합체의 섬유구조 형태도 조사하여 본 결과 정량적 분석도 가능함을 알 수 있었다.

1. 서론

상관관계 특성을 이용한 신호분석 연구는 1960년 대부터 활성화 되어 현재 수중 음파탐지 및 레이더의 응용, 항공학 및 기계공학에서의 잡음 및 음원추적¹⁾ 건축학에서 음의 반사 및 전파 경로 추적²⁾ 등 많이 응용되어지고 있으나 물질의 특성 연구엔 상관관계 함수 성격상 물리적 현상을 구체적으로 정확히 기술할 수 없는 단점을 갖고 있기 때문에 현재 까지 물질 분석 연구에 그 응용 효과를 거두지 못했다. 그러나 현재는 신소재의 개발로 복합물질이 많이 개발되어 이 복합물질로 제조된 재료들의 비파괴적 분석방법을 많이 요구하고 있다. 물론 방사선을 이용한 사진이나 초음파를 이용한 분석 방법등 여러 가지가 있으나 모두 장단점을 갖고 있다. 즉 방사선에 의한 방법은 경제적인 부담과 위험성이 뒤따르고 초음파의 경우는 물질 특성등 신호분석의 정확성을 갖고 있지만 복합재료의 특성상 물질내부에서 파의 경로 혹은 파의 산란등의 복잡성 때문에

신호분석에 난해성이 뒤따른다.

본 실험은 복합재료의 물리적 특성 연구보다는 상호상관 관계 함수의 특성을 이용하여 소재의 구조분석과 음파전달 속도를 측정해 보았다. 이 방법은 복합재료로 제작되어 작동되고 있는 소재에 대한 비파괴검사가 연속적으로 가능하며 외부의 수많은 잡음이 있어도 이에 관계없이 정확히 측정 가능함으로 현장에서 측정이 용이하다.

망상형 유리섬유 복합체에서 응력파의 속도를 측정하여 본 결과 아주 쉽고 정확히 측정 가능함을 알 수 있었고 이 복합체의 섬유구조도 속도의 의존성을 이용하여 용이하게 분석 가능함을 알 수 있다.

2. 이 론

물질의 신호전파 특성을 분석하는데 사용된 관측 현상에는 일정시간 경과후 그 현상을 예측할 수 있는 결정적 현상(deterministic phenomena)와 예측이 불가능한 확률적 현상³⁾ (stochastic phenomena)이 있

(접수 : 1993. 11. 1)

는데 확률적 현상의 신호분석은 1969년 White⁴⁾가 분산 및 비분산 신호에 이르기까지 상관관계 함수를 계산하였다. 본 이론에 의하면 자기 상관관계 함수는⁵⁾

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) x(t+\tau) dt \dots\dots\dots (1)$$

이고 상호 상관관계 함수는

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) y(t+\tau) dt \dots\dots\dots (2)$$

로 정의된다. 이식을 무차원 상관관계 계수로 규격화 할 수 있는데 이는

$$C(\tau) = R_{xy}(\tau) / [R_{xx}(0) R_{yy}(0)]^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

로 정의한다. 만일 y(t)가 어떠한 시간변환 (지연시간 τ_1)과 관계가 있다면

$$y(t) = Ax(t-\tau_1) \dots\dots\dots (4)$$

이 되고 이때 상호 상관관계 함수는 다음과 같다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) Ax(t-\tau_1+\tau) dt \dots\dots\dots (5)$$

$$= A R_{xx}(\tau-\tau_1) \dots\dots\dots (6)$$

이는 선원 x(t)가 비분산 매질에 전파 되었을 경우 에 적용된다.

Weiner - Khintchine 관계식에서⁶⁾ 상호 스펙트라와 상호 상관관계는 아래와 같다.

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \dots\dots\dots (8)$$

만일 선원 x(t)가 반응함수 h(τ)를 갖는 선형계에 작용하면 y(t)는 x(t)와 선형관계를 갖는다. 그러나 위상과 진폭이 변하고 신호 또한 변하므로

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots (9)$$

convolution 이론에 의한 상호 상관관계는

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) R_x(t) dt \dots\dots\dots (10)$$

로 표현되고 이식은 알려지지 않은 계의 반응특성 h(τ)를 결정하는데 유용하다.

분산파의 경우 진동수 ω를 갖는 정현파의 위상속도는³⁾

$$C_{ph} = [Et^2/12\rho]^{1/4} \omega^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

이 되고 신호가 경로 ℓ을 진행함에 따른 위상 변환은

$$\phi(\omega) = \ell\omega / C_{ph}(\omega) \dots\dots\dots (12)$$

이고 이 경로의 입력파와 출력파의 상호 스펙트럼은

$$G_{xy}(\omega) = G_x(\omega) A(\omega) e^{-i\phi(\omega)} \dots\dots\dots (13)$$

로 주어지며 상관관계는

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} G_x(\omega) A(\omega) \cos[\omega\tau - \phi(\omega)] d\omega \dots\dots\dots (14)$$

로 된다. 규격화된 상호 상관관계 및 상호 스펙트럼은

$$\bar{C}_{xy}(\tau, \ell) = \frac{\int_0^{\infty} G_x(\omega) A(\omega) \cos[\omega\tau - \phi(\omega)] d\omega}{[\int_0^{\infty} G_x(\omega) d\omega \int_0^{\infty} A^2(\omega) G_x(\omega) d\omega]^{1/2}} \dots\dots\dots (15)$$

$$G'(\omega) = G_x(\omega) A(\omega) / [\int_0^{\infty} G_x(\omega) d\omega \int_0^{\infty} A^2(\omega) G(\omega) d\omega]^{1/2}$$

로 나타나므로

$$\bar{C}(\tau, \ell) = \int_0^{\infty} G'(\omega) \cos[\omega(\tau - \frac{a}{\omega^{1/2}})] d\omega \dots\dots\dots (17)$$

이다. 여기서 $a = \ell / 1.86(c_{lt})^{1/2}$ 이다.

만일 G'(ω)가 유한한 영역 이라면

$$G'(\omega) = 1 \quad \omega_0(1-\Delta/2) < \omega < \omega_0(1+\Delta/2) \\ = 0 \quad \text{그외의 모든 영역} \dots\dots\dots (18)$$

$$C_{xy}(\tau, \ell, \omega, B) = \frac{1}{B} \int_{\omega_0(1-\Delta/2)}^{\omega_0(1+\Delta/2)} \cos(\omega\tau - a\omega^{1/2}) d\omega \dots (19)$$

이며 여기서 $B = \Delta\omega$ 이다.

또한 주파수 대역이 한 옥타브 보다 작다면 약간의 가정을 통하여 다음과 같은 중요한 결과에 도달한다. 즉,

$$\omega = \omega_0(1 + \varepsilon) \dots \dots \dots (20)$$

이고 (19)식을 이용하여 $\omega_0(1 + \varepsilon)^{1/2}$ 을 Taylor 급수로 전개하면

$$C_{xy}(\tau, \ell, \omega_0, B) = \frac{\omega_0}{B} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \cos[\omega_0\tau - a\omega_0^{1/2} + (\omega_0\tau - \frac{a\omega_0^{1/2}}{2})\varepsilon] d\varepsilon \dots \dots \dots (21)$$

로 된다. 또한 cosine을 전개하여 적분하면

$$C_{xy}(\tau, \ell, \omega_0, B) = \cos[\omega_0(\tau - \frac{a}{\omega_0^{1/2}})] \frac{\sin[\frac{B}{2}(\tau - a/2\omega_0^{1/2})]}{B/2(\tau - a/2\omega_0^{1/2})} \dots \dots \dots (22)$$

되어 이 함수는 다음과 같은 그림 특성을 갖는다.

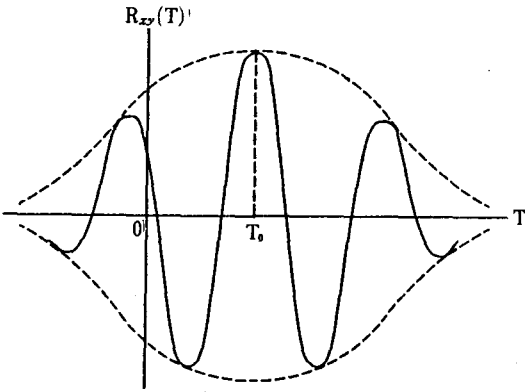


Fig. 1. Cross correlation of dispersive waves

식 (22)에서 두 입력파와 출력파 간의 시간 지연은

$$\tau_1 = a/\omega_0^{1/2} = \ell/c_{ph}(\omega_0)$$

$$\tau_2 = a\omega_0^{1/2}/2 = \ell/c_g(\omega_0) \dots \dots \dots (23)$$

이므로 cosine항은 위상속도에 의존되는 위상지연에 해당되고 변조함수 $\sin\chi/\chi$ 의 최대진폭은 군속도에 해당되는 시간지연에서 발생된다. 그러므로 본 상관관계 함수 특성으로서 군속도를 측정할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

앞서 계산된 식(22)의 상호 상관관계를 이용한 군속도의 시간지연을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 설치하고 시험 시료로써 알루미늄 합금(6061-T651) (116×123×1.28cm)과 실험용 복합재료로는 일반적으로 속도분석이 까다로운 망상형 유리섬유 복합체 [118.3×70×0.235cm]를 택하였다. 시료 위의 두 변환기 (AET SFG 57A 2276)(T1)와 (AET PAC WD-346)(T2)는 시료와 변환기 사이의 접촉저항과 공기를 최소로 줄이기 위하여 실리콘 그리스(SC-6)을 바르고 54g의 무게를 수직되게 주었다.

- T1, T2 : transducer
- A.E.S.: acoustic emission simulator
- W.B.G.S. : wide bend signal generator
- W.A. : waveform analyzer.
- AMP : amplifier.
- OSC : oscilloscope

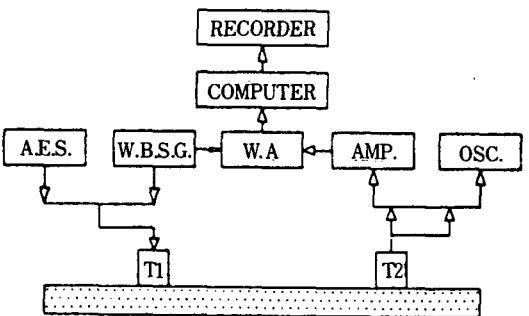


Fig. 2. Block diagram of measurement system

광대역 신호발생기에서 생성된 신호를 acoustic emission simulator (SFG 57A 2439)로 받아 원하는 주파수와 신호형태로 만든파를 광대역 변환기(SFG 57A)(T1)를 통하여 시료에 응력파를 주고 이 신호를 다음 변환기 (PAC)(T2)로 받아 증폭기를 거쳐 wave form analyzer (D6000)로 상호 상관관계를 구하여 computer로 시간지연을 측정하고 기록하였다.

T2에 검출된 신호의 FFT를 보기위하여 오실로스코프를 연결하여 전파된 파의 파형을 조사하였다. Fig. 3은 시험시료인 알루미늄과 실험용 시료인 망상형 유리섬유 복합체의 속도를 측정하는 방법으로 변환기 T1, T2 사이의 거리변화와 각도변화에 따라 상호상관관계의 최대진폭의 값을 computer에 받아 시간지연을 측정한 방법이다. 실험대위에 평면으로 놓은 시료면에 그림과 같이 거리와 각의 변화를 그린후 T1변환기를 고정시키고 T2변환기를 상호거리 5cm-15cm, 또한 각을 0°-180° 까지 변화하면서 그 위치와 각에서 속도를 측정하였다. 처음 알루미늄 시료에 대한 속도를 측정하고 그 상부에 유리섬유 복합체를 놓고 실험을 계속하였다. 이론에서 본 결과대로 본 실험은 외부의 어떠한 잡음에도 영향이 없기 때문에 실험장치의 외부잡음엔 관심을 가질 필요가 없다. 이때 측정된 상호 상관관계의 군속도는 400 kHz 이하의 신호에서 잡은 값이고 또한 시료 두께가 0.235cm이므로 Lamb파의 A₀ 모드에 속한다.

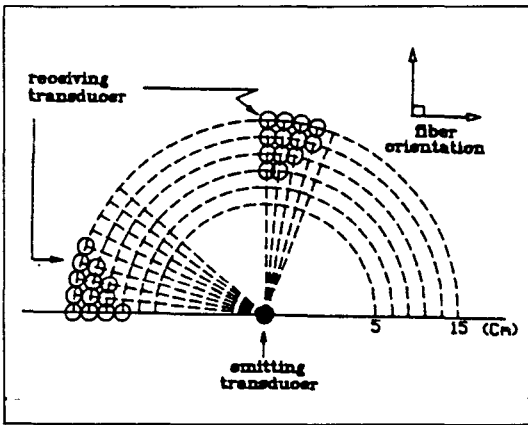


Fig. 3. The schematic diagram for velocity measurement and composite fiber arrangement

4. 결과 및 고찰

일반적으로 시료에 보낸 파를 검출하면 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하나의 파원에 대하여 검출되는 파는 여러가지의 파형과 시작점의 위치요동이 아주 심하여 두 파의 시작점으로서 시간지연을 측정하기란 매우 어렵다. Fig. 5는 이러한 파의 검출된 파형을 3가지 유형으로 보인것이다. Fig. 4의

경우 파원이 291.1kHz에서 전파된 파를 복합체의 90° 섬유방향에서 측정하였고 두 변환기 사이의 거리는 8cm이다.

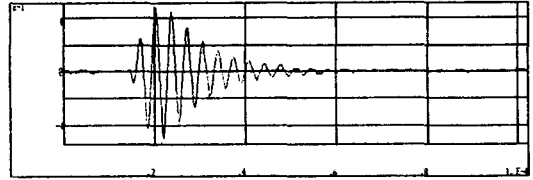
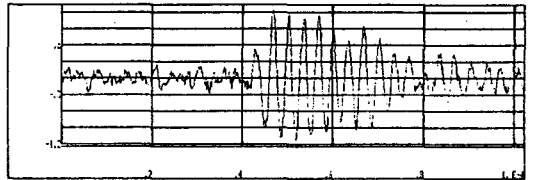
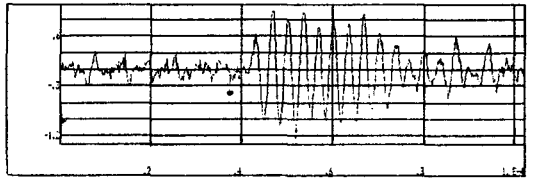


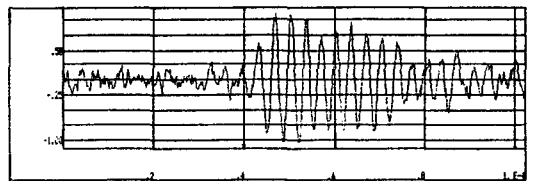
Fig. 4. The wave form of input signal



5(a). One of output signal to Fig. 4



5(b). One of output signal to Fig. 4

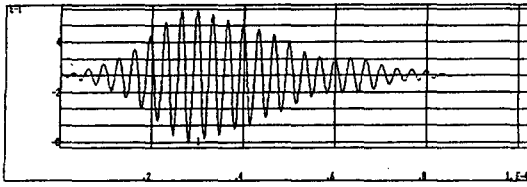


5(c). One of output signal to Fig. 4

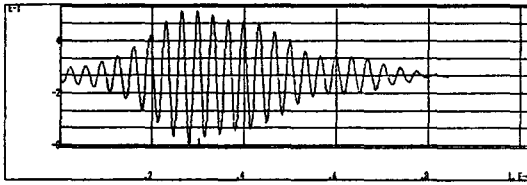
Fig. 5. Typical three kind of wave form of received signals

그러나 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Fig. 4와 Fig. 5의 상호 상관관계를 구하면 파의 최대진폭의 값(시간지연)은 전혀 요동을 갖지않고 또한 외부의 잡음이 있다 하여도 이와 상호 상관관계가 없기 때문에 본 함수 신호에 관계없이 정확한 시간 지연값을 나타내어준다.

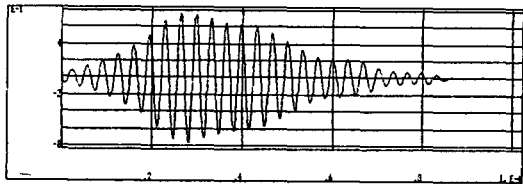
본 실험의 검출 오차시간은 Fig. 7에서 보는 바와



6(a). Cross-correlation of Fig. 4 with 5(a)



6(b). Cross-correlation of Fig. 4 with 5(b)



6(c). Cross-correlation of Fig. 4 with 5(c)

Fig. 6. The cross correlation of Fig. 4 with each of Fig. 5

같이 한 주기 동안의 시간이 $2.61\mu\text{s}$ 이고 또한 오차가 이의 반을 초과하지 않기 때문에 $1.3\mu\text{s}$ 이하로 기술된다. 복합체에서 실험한 두 검출기 거리 8cm에서 계산된 시간 지연이 $34.78\mu\text{s}$ 이기 때문에 2.87%의 오차를 갖고 있다.

본 실험의 확실성을 규명하기 위하여 이미 속도가 잘 알려져 있는 A1(6061)에 대하여 실험해 본

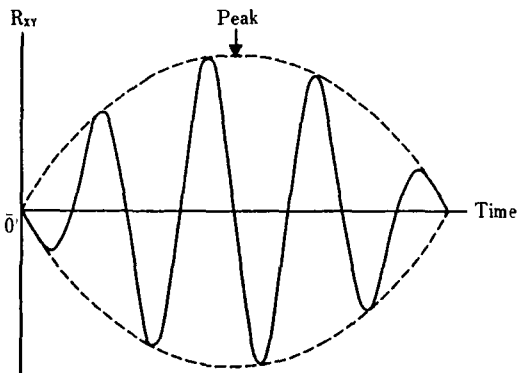


Fig. 7. The expected error in measuring point

결과는 Fig. 8과 같다. 560kHz에서 그 속도가 2200m/s 값을 얻어 L. Zabal⁴⁾의 계산값과 정확히 일치함을 입증하였다. 이와같은 방법으로 망상형 유리섬유 복합체의 속도를 각도 별로 측정된 결과는 Fig. 9와 Fig. 10과 같다.

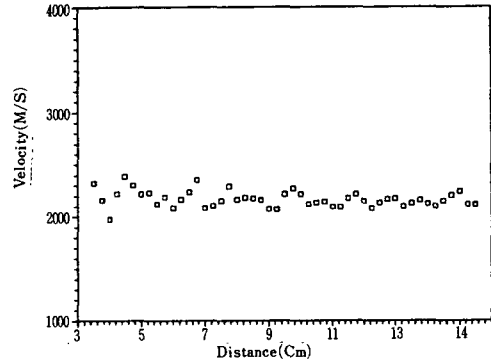


Fig. 8. Velocity distribution depending on distance for aluminium (Frequency=560kHz)

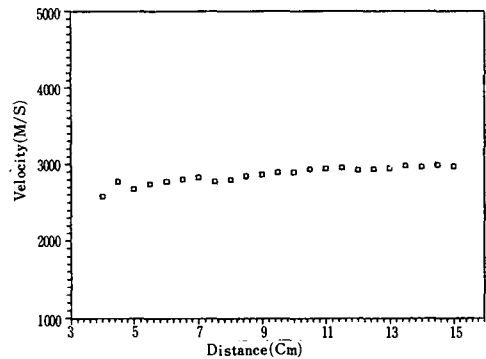


Fig. 9. Velocity distribution depending on distance for the woven glass fiber composite(90°)

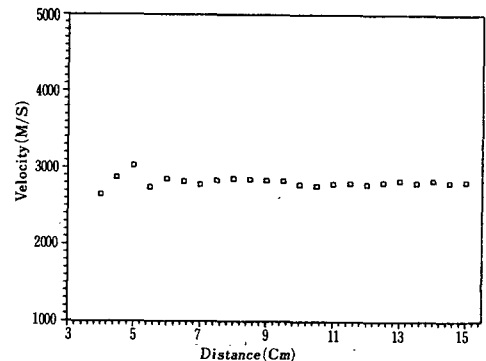


Fig. 10. Velocity distribution depending on distance for the woven glass fiber composite(45°)

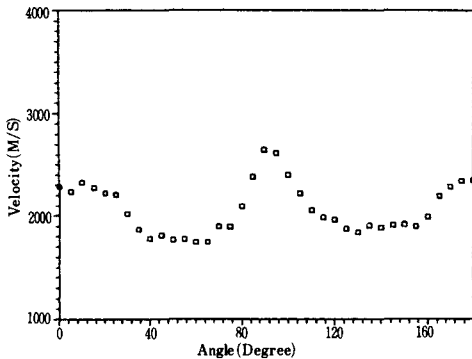


Fig. 11. Velocity propagation properties according to the fiber direction

5. 결 론

이상의 실험결과 상호 상관관계를 이용한 속도 측정법은 복합체의 정성분석 보다는 이의 정량적 분석이 가능하며 비파괴적으로 섬유 위치 및 이의 절단유무 등을 쉽고 간편히 찾을 수 있음을 알았다. 특히 단 한번의 측정으로 정확한 속도값을 찾을 수 있었고 그 오차값도 3%이하로 측정 가능함을 알았다. 또한 외부의 어떠한 잡음이나 진동에도 측정이 용이하므로 기기동작 중에도 쉽게 측정이 가능한 좋은 점을 갖고 있다.

6. 부 언

본 논문은 문교부 연구비에 의하여 실행 되었으며 본 실험을 위해 적극 조언해 주시고 도와주신 한국과학기술원의 김호철 교수님과 UCLA의 Kanji Ono 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

1. B.A. Bolt, Seismology, 11, 1321, (1972)
2. K.W. Goff, JASA, 27, 236 (1955)
3. J.S. Bendat, & A.G. Piersol, Random Data, (Wiley N.Y.), (1986)
4. P.H. White, JASA, 45, 1118 (1964)
5. A. Paoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Process, (McGraw-Hill N.Y.), (1965)
6. G. Pavic, ISVR Tech, Rep., 52, DEC., (1974)
7. R.L. Fleischer, R.S. Gilmore & R.J. Zavala, Acta Metall, 37, 10, 2801, (1989)
8. A.K. Novikov, Sov., Phys-Acoust, 7,374, (1962)

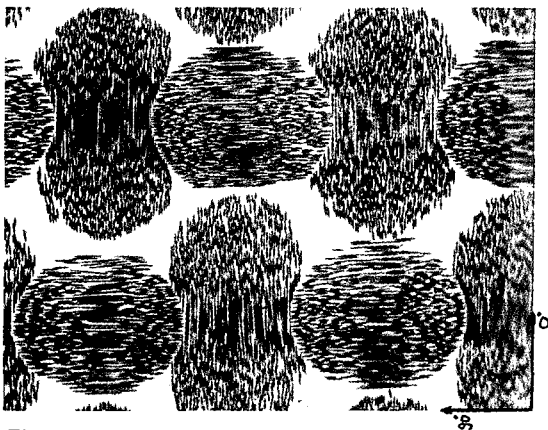


Fig. 12. The photography of surface of the woven glass fiber composite

유리섬유방향에서 90°인 방향의 전파 속도는 381 Hz에서 2450m/s, 145.6kHz에 2494m/s를 얻었고 섬유 방향에선 236.5kHz에서 2510m/s, 301.5kHz에서 2820m/s 그리고 343.1kHz 에서 2810m/s를 얻었다. Fig. 11은 섬유의 방향을 찾아보기 위해 모든 방향의 속도를 찾아본 것이다. 그림에서와 같이 섬유의 방향이 100과 10에 놓여 있음을 알 수 있는데 100°에서의 속도가 10°에서의 속도보다 15% 정도 빠른 이유는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 100°방향의 섬유가 10°방향보다 밀도가 높고 또한 장력이 크기 때문인 것으로 추정된다.

The Velocity Analysis of Woven Glass Fiber Composites Using Cross-correlation Properties

Y. H. Lee and S. H. Lee
Dept. of Physics, Keimyung University

Abstract This paper discusses experimental results obtained by the potentiality of cross-correlation function as a tool for analyzing propagation of wave in an aluminum and a woven glass fiber composite. Each propagated wave has its own characteristic time delay, and examination of the cross-correlation of input and output signal give the most proper wave velocity and significant path. Using the above distinctive features, we observed the propagation velocity for the aluminum alloy and a woven glass fiber composite more accurately and easily than the common methods. The fiber locations of this composite also determined by the basis of these results.

(Received : November 1, 1993)