

(論 文)

초음파의 감쇠를 이용한 복합재료의 기공함량 평가

정 현 조*

(1993년 12월 31일 접수)

Void Contents Evaluation of Composite Laminates by Ultrasonic Attenuation Measurements

Hyunjo Jeong

Key Words : Composite Laminates(복합적층판), Nondestructive Evaluation(비파괴 평가), Voids(기공), Broadband Pulse(광대역 펄스), Ultrasonic Attenuation(초음파 감쇠), Attenuation Slope(감쇠기울기), Pore Morphology(기공형태)

Abstract

The void content of carbon fiber reinforced composite laminates was determined by the ultrasonic nondestructive technique. The ultrasonic immersion, through-transmission method developed stresses the utilization of spectral analysis and frequency dependence of the attenuation due to porosity. The measured attenuation shows approximately linear behavior over the frequency range investigated. The linear relationship between the void content and the attenuation slope ($d\alpha/df$) is found to hold, but the constant of proportionality is quite different for samples with different pore morphology. The void volume fraction determined by the attenuation slope agreed very well with that obtained by the acid digestion analysis.

1. 서 론

기공(voids or porosity)은 섬유보강 고분자 복합재료의 제조시에 가장 흔하게 나타나는 결함 가운데 하나이다. 기공은 부적절한 경화, 프리프레그의 수분 등에 의해 발생한다. 기공의 양과 형태는 섬유의 양과 배열, 수지성질과 압력, 온도, 시간과 같은 제작 조건에 좌우된다. 일방향 보강적층판에서 기공의 형상은 인접한 섬유방향으로 늘어나 있다.⁽¹⁾ 이와 반대로 직조적층판의 기공은 구형에 가까운 모양을 갖는다. 많은 실험적 연구결과에 의하면^(2,3) 기공으로 인하여 복합재의 강도에 떨어지며, 수분 확산에 더욱 민감한 것으로 알려져 있다. 따라서 비

파괴적 방법에 의한 기공의 정량적 평가가 절실히 요구된다.

기공의 음향임피던스는 무시할 정도로 작기 때문에 초음파에 대한 강한 산란인자로 작용하며 따라서 감쇠에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 감쇠는 주파수의 함수로서 기공량이 증가할수록 커진다. 산업체에서는 품질보증의 수단으로서 특정 복합재 시스템의 표준시편으로부터 구한 기공과 감쇠사이의 교정곡선을 활용하고 있다.

탄소섬유강화플라스틱(CFRP)의 제작과정에서 발생하는 기공은 일반적으로 복잡한 모양을 갖고 있다. Stone and Clarke⁽⁴⁾에 의하면 낮은 기공 부피분율(1.5% 이하)에서 기공의 모양은 작고 구형이며 높은 부피분율에서 층간기공은 더 크고 납작하며 길게 늘어진 경향을 보이고 있다. 또한 대부분의 구조용 복합재는 적층형태이기 때문에 기공의

*정회원, 국방과학연구소

모양은 프리프레그 테이프의 섬유조직에도 큰 영향을 받는다.

본 논문에서는 CFRP에서의 기공량을 초음파의 감쇠를 이용하여 정량적으로 평가할 수 있는 실험적 방법을 연구하였다. 사용된 재료는 탄소/에폭시와 탄소/폴리이미이드 적층판으로서 일방향 프리프레그와 직조 프리프레그가 사용되었다. 개발된 방법은 광대역 초음파 펄스의 스펙트럼분석과 주파수의존 감쇠의 이용에 주안점을 두었다. 이러한 접근법은 몇가지의 장점을 갖는다. 복합적층판의 비파괴 평가(NDE)에 있어서 판의 두께가 일반적으로 얇기 때문에 짧은 지속시간의 광대역 초음파 펄스가 자주 사용된다. 기공에 의한 초음파 감쇠는 주파수의 함수이므로 두께를 투과한 펄스의 주파수 성분(frequency contents)은 기공의 모양과 기공량에 좌우된다. 고주파수 성분은 저주파수 성분보다 더욱 심하게 감쇠를 일으킨다. 따라서 주파수에 대한 감쇠의 증가율(즉, 감쇠기울기 또는 da/df)은 기공량과 관련지을 수 있다. 광대역 펄스의 사용은 1회 측정으로 넓은 주파수 범위의 감쇠측정을 가능하게 하며 신호/잡음의 비(S/N ratio)와 감쇠기울기와 기공량사이의 상관관계를 향상시켜 준다. 본 연구에서는 서로 다른 양의 기공을 함유한 여러 종류의 복합재 적층판에 대해 초음파의 감쇠를 주파수의 함수로 측정하였으며, 기공의 모양이 감쇠기울기에 미치는 영향을 관찰하였다. 또한 감쇠기울기와 기공 부피분율 사이의 선형관계로부터 기공량은 이 기울기에 적절한 상수를 곱하여 구할 수 있음을 보였다. 비파괴적 방법으로 구한 기공의 부피분율을 산용해법(acid digestion analysis)으로 측정된 것과 비교하였다.

2. 이론적 배경

여러가지의 다른 주파수 성분으로 구성되어 있는 초음파 펄스가 기공을 가진 복합재료를 전파할 때, 기공에 의한 산란때문에 감쇠와 이에 상응하는 파의 속도분산(velocity dispersion)이 생긴다. 이와 같은 재료에서 파의 전파특성 해석을 위해 복합재는 선형시스템으로 구성되고 이들은 $e^{i(k(\omega)x - \omega t)}$ 형태의 1차원 평면파를 지지할 수 있다고 가정한다. 여기서, $k(\omega)$ 는 유효파수(effective wave number), ω 는 원주파수이다. 위에서 언급한 거동을 묘사하기 위하여 복소파수 $k(\omega)$ 를 정의하며, 여기

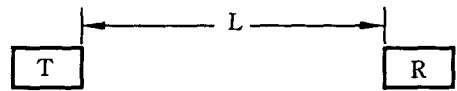
서, 실수부는 주파수 의존 위상속도 $V(\omega)$ 와 관련되는 분산부이고 허수부는 주파수 의존 감쇠 $\alpha(\omega)$ 를 나타내는 감쇠부이다. 이 관계식은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$k(\omega) = \frac{\omega}{V(\omega)} + i\alpha(\omega) \tag{1}$$

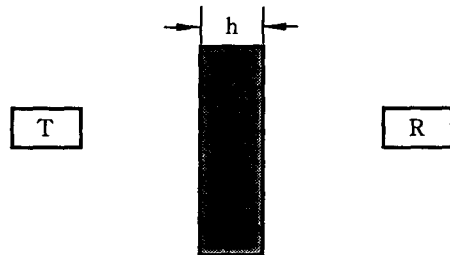
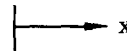
여기서, 구하고자 하는 것은 큰 감쇠와 분산을 갖는 재료의 $V(\omega)$ 와 $\alpha(\omega)$ 에 대한 식을 유도하는 것이다. 물속에 잠겨있는 두께 h 의 복합적층판을 고려해 보자. 투과시험법에서 시편의 속도와 감쇠는 초음파의 전달 경로상에 시편이 없는 경우와 있는 경우에 각각의 파형을 구함으로써 계산할 수 있다. 시편없이 물속을 통과한 펄스는 대비용 파형(reference waveform)으로 사용되며 두 탐촉자 사이에 위치한 시편을 통과한 신호는 시편파형(sample waveform)으로 사용된다. Fig. 1은 대입법(substitution method)의 측정형태를 나타내고 있다. 양의 x 방향으로 전파하는 광대역 종파펄스 $u(x, t)$ 는 모든 평면 조화파(plane harmonic wave)의 선형 합으로서 다음과 같이 표시할 수 있다.^(5,6)

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_0(\omega) e^{i(kx - \omega t)} d\omega \tag{2}$$

$F_0(\omega)$ 는 $u(0, t)$ 의 Fourier변환이다. 물속에서 감쇠는 없고, 속도는 비분산적이라고 가정하는데,



(a) For reference waveform acquisition



(b) For sample waveform acquisition

Fig. 1 Measurement configuration of the substitution method

다시 말하면 파수 $k_w(\omega)$ 는 실수이고 위상속도 $V_w = \omega/k_w$ 는 상수이다. Fig. 1(a)를 참고하면, $x=L$ 에서 얻은 대비 파형은 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$u_r(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F_0(\omega) D_1(\omega) e^{i\omega L/V_w}] e^{-i\omega t} d\omega \quad (3)$$

$D_1(\omega)$ 는 초음파 빔의 회절(diffraction)에 대한 보정이다. Fourier 변환의 정의로부터 식(3)의 브라켓 속에 있는 항은 $u_r(L, t)$ 의 Fourier 변환이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(u_r(L, t)) = F(\omega) = F_0(\omega) D_1(\omega) e^{i\omega L/V_w} \quad (4)$$

이제 시편을 두 탐촉자 사이에 설치하고 처음 투과된 신호를 시편파형으로 기록한다. 여기서 사용하는 시편의 두께는 비교적 두꺼워서 시편을 통과한 모든 투과펄스는 시간영역에서 분리된다고 가정한다. Fig. 1(b)와 식(1)을 참조하면 시편 파형 $u_s(L, t)$ 는 식(5)와 같이 표시할 수 있으며

$$F(u_s(L, t)) = G(\omega) = F_0(\omega) T(\omega) D_2(\omega) e^{-a_s h} e^{i\omega((L-h)/V_w + h/V_s)} \quad (5)$$

여기서, $T(\omega)$ 는 투과시에 일어나는 물/시편/물의 계면손실이고 $D_2(\omega)$ 는 회절에 대한 보정이며, a_s 와 V_s 는 주파수에 의존하는 시편의 감쇠와 위상속도이다.

식(4)와 (5)로부터 식(6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{G(\omega)}{F(\omega)} = \frac{T(\omega) D_2(\omega) e^{-a_s h} e^{i\omega h(1/V_s - 1/V_w)}}{D_1(\omega)} \quad (6)$$

빔의 회절이 초음파 신호의 위상변화에 미치는 영향은 작으므로 위상속도의 계산에서 회절로 인한 위상보정은 무시할 수 있다. 시편의 위상속도는 대비 파형과 시편 파형의 위상 스펙트럼의 차이로부터 계산할 수 있다. $F(\omega)$ 와 $G(\omega)$ 의 위상 스펙트럼을 각각 $-\phi_r$ 과 $-\phi_s$ 로 표시하면 식(7)을 얻는다.

$$-\phi_s(\omega) + \phi_r(\omega) = -\Delta\phi(\omega) = \omega h \left[\frac{1}{V_s(\omega)} - \frac{1}{V_w} \right] \quad (7)$$

식(7)로부터 식(8)을 구할 수 있다.

$$V_s(\omega) = \left[\frac{1}{V_w} - \frac{\Delta\phi(\omega)}{\omega h} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\text{또는, } V_s(f) = \left[\frac{1}{V_w} - \frac{\Delta\phi(f)}{2\pi f h} \right]^{-1} \quad (9)$$

시편의 위상속도를 구하였으므로 식(6)의 $T(\omega)$, $D_1(\omega)$, $D_2(\omega)$ 를 계산할 수 있고, 궁극적으로 시편의 감쇠는 식(10)과 같이 구할 수 있으며

$$a_s(\omega) = \frac{1}{h} \left[\ln \left[1 - \frac{F(\omega)}{D_1(\omega)} \right] - \ln \left[1 - \frac{G(\omega)}{T(\omega) D_2(\omega)} \right] \right] \quad (10)$$

여기서, $|\cdot|$ 는 진폭 스펙트럼을 나타낸다.

$D_1(\omega)$, $D_2(\omega)$ 는 회절보정으로서 참고문헌(7)로부터 식(11)과 (12)로 각각 주어지며

$$D_1(\omega) = D_0 \left[\frac{2\pi V_w L}{\omega a^2} \right] \quad (11)$$

$$D_2(\omega) = D_0 \left[\left((L-h) V_w + h V_s \right) \frac{2\pi}{\omega a^2} \right] \quad (12)$$

여기서, $D_0(s)$ 는 식(13)으로 주어진다.

$$D_0(s) = 1 - \exp \left[-i \frac{2\pi}{s} \right] \left[J_0 \left[\frac{2\pi}{s} \right] + \left[i J_1 \frac{2\pi}{s} \right] \right] \quad (13)$$

식(11), (12)에서 a 는 탐촉자의 반경을 나타내며, 식(13)에서 J_0 와 J_1 은 제1종 Bessel 함수이다. $T(\omega)$ 투과시의 계면손실로서 식(14)로 주어지며

$$T(\omega) = \frac{4Z_r Z_s(\omega)}{[Z_r + Z(\omega)]^2} \quad (14)$$

Z_r 과 $Z_s(\omega)$ 는 각각 물과 시편에서의 음향 임피던스(acoustic impedance)로서 $Z_r = \rho_w V_w$, $Z_s(\omega) = \rho_s V_s(\omega)$ 이다.

3. 실험

초음파 시험은 중심주파수 10 MHz, 직경 6.3 mm의 평면탐촉자로써 수침, 투과법으로 측정하였다. 송신 및 수신 탐촉자 사이의 거리는 약 15 cm로 유지하였다. 광대역의 펄스는 Panametrics 5052 PR pulser/receiver의 spike voltage 펄스로 발생시켰으며 최대 신호를 얻도록 두 탐촉자를 정렬시켰다. 두 탐촉자의 중앙에 시편을 설치하고 시험할 때는 시편의 면이 두 탐촉자의 면에 수직이 되도록 하였다. 시험장치에 대한 개략도가 Fig. 2에 도시되어 있다.

수신탐촉자를 통해 받은 신호는 LeCroy 9400 디지털 오실로스코프에서 100번 평균하여 얻은 다음

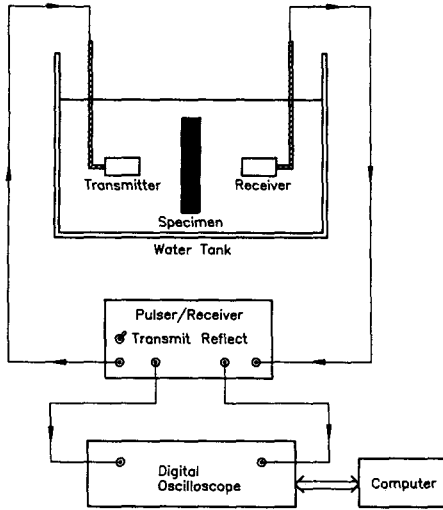


Fig. 2 Experimental setup for the measurement of ultrasonic attenuation and phase velocity

퍼스널컴퓨터 파일로 이송시켜 주파수 영역에서의 필요한 신호처리를 하였다. 시편없이 물속을 통과한 신호는 대비신호로 저장한다. 다음에 시편을 두 탐촉자의 중간에 설치하고 맨 처음 통과한 신호를 시편신호로 저장한다. 제일 먼저 투과한 시편신호만을 얻기 위하여 Rectangular window를 사용하였다.

주파수영역에서의 계산은 시스템 소프트웨어가 제공하는 고속 Fourier 변환(FFT) 알고리즘을 사용하였다. 초음파의 감쇠를 주파수의 함수로 측정하기 위하여 먼저 시편의 위상속도를 구해야 하며 이에 관한 상세한 절차는 참고문헌(8)에 나와 있다.

식(10)의 감쇠를 계산하기 위하여 시편신호의 주파수 스펙트럼은 계면에서의 투과손실을 보정하고, 시편 및 대비신호에 대해서 모두 회절(빔퍼짐) 효과를 보정해 주었다. 필요한 보정을 한 후에 두 신호의 진폭 스펙트럼의 각각에 \log 를 취하여 차를 구하고 시편두께로 나눈다. 결과적으로 탐촉자의 전 밴드폭에 걸쳐 주파수의 함수로 초음파의 감쇠를 구할 수 있다. 특별히 주파수에 대한 감쇠기울기(da/df)에 주의를 기울였다. 기공의 공간적 분포가 불균일하므로 복합재 적층판의 여러 곳에서 측정된 감쇠는 가끔 큰 차이를 보인다. 따라서 한 시편편의 서로 다른 위치에서 5~10회의 da/df 를 측정할 후 그 평균값을 구하였다.

4. 시 편

세 그룹의 복합재료 시편이 본 연구에 사용되었다. 이 시편들은 서로 다른 양의 기공을 함유하도록 특별히 제작되었다. 시편 A1, A2, A3 및 A4는 16플라이의 일방향 탄소/에폭시 적층판으로서 제조업체에서 실시한 산용해시험(acid digestion test) 결과에 의하면 각각 6.51, 2.04, 1.14 그리고 0.2%의 기공 부피분율을 갖고 있다. 시편 B1, B2, B4 및 B5는 16플라이의 준 등방성(quasi-isotropic) 탄소/에폭시 적층판으로서 4.05, 2.82, 1.25 그리고 0.34%의 기공을 각각 포함하고 있다.

두번째 그룹의 시편은 8플라이의 탄소/에폭시 적층 프리프레그적층판이며, 시편 D1, D2, D3 및 D5는 각각 5.09, 1.58, 3.41, 0.01%의 기공 부피분율을 갖는다.

세번째 그룹은 5개의 탄소/폴리이미드 시편으로서 6플라이의 8매 주자직으로 적층되어 있다. 시편 6240-4, -7, -8, -10 및 -13은 각각 1.2, 2.9, 5.4, 9.0, 11.2%의 기공량을 갖고 있다.

위 시편들의 두께는 기공량이 낮은 시편의 2mm에서 기공량이 높은 경우 2.5mm까지 변하며, 산용해시험 결과 섬유 부피분율은 약 60~65%인 것으로 나타났다.

4.1 기공의 미세구조 분석

위에서 언급한 시편의 기공형태를 관찰하기 위하여 광학현미경과 영상분석을 사용하였다. 일방향 보강적층판(A series)의 단면 사진이 Fig. 3(a)에 나와 있다. 섬유방향과 평행하게 절단한 면에서 층간에 존재하는 기공은 인접한 섬유방향으로 길게 늘어나 있다. 대부분의 기공은, 특히 크기가 큰 경우, 타원형의 단면을 갖고 있었으며 장축(또는 폭)의 방향은 층간의 계면과 평행하였다. 준 등방성 적층판(B series)의 기공도 그 배열이 적층면내의 섬유방향으로 늘어진 것을 제외하고는 일반적으로 유사한 경향을 보였다. 이 시편들에서 기공의 단면 크기는 큰 분포를 갖고 있다. 폭 b 는 수 마이크로에서 수백 마이크로의 범위를 가지는 반면에 높이 a 는 수 마이크로에서 수십 마이크로이며, 평균 형상비($\bar{a/b}$)는 0.3~0.45이다. 기공 단면의 폭과 높이는 lognormal 분포를 갖는다.⁽¹⁾

Fig. 3(b)와 3(c)에 보인 바와 같이 직조 탄소/

에폭시 (D series) 및 탄소/폴리이미드 (6240 series) 적층판의 기공은 수지가 풍부한 부분에 국부적으로 위치하고 있다. 그러나 전체적인 모양과 크기의 분포는 약간 다르다. 탄소/폴리이미드 시편 (Fig. 3 (c))에서 대부분의 기공은 구형인 반면에 탄소/에폭시 시편 (Fig. 3(b))에서 어떤 기공은 작고 구형

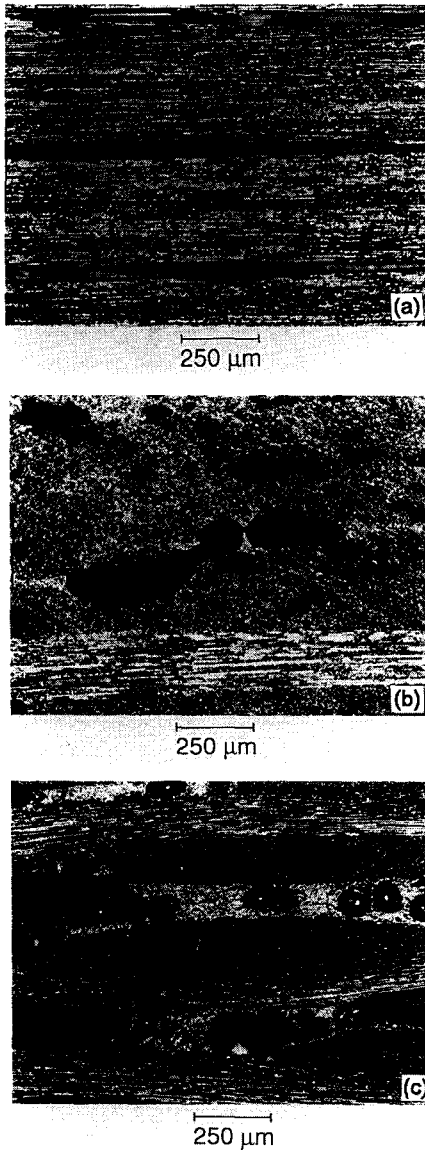
이나 다른 기공은 납작하고 타원형의 단면을 갖고 있다. 직조적층판에서 이와 같이 기공의 모양이 다른 것은 무엇보다도 프리프레그의 구조에 원인이 있다. 즉, 탄소/에폭시 시편의 프리프레그가 더 성긴 조직을 갖고 있기 때문이다.

탄소섬유 보강복합재에서 기공의 모양은, 구성재료의 성질과 경화과정 등을 포함하여 여러가지 원인에 의해 결정되나, 이와 같이 프리프레그의 형태에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 기공의 특성을 이해하면 초음파 감쇠 측정결과를 해석하는데 도움이 될 것이다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 4는 시편의 두께방향으로 전파한 종파의 감쇠 측정결과를 주파수의 함수로 보여주고 있다. 이 결과는 직조 탄소/에폭시 (D series) 시편에 대한 것이다. Fig. 4를 살펴보면 감쇠는 주파수가 증가함에 따라 커지고 주어진 한 주파수에서 기공이 많을수록 더 크다. 또한 감쇠곡선은 주파수에 대하여 거의 선형거동을 보이며 그 기울기는 기공 퍼분율이 높을수록 크다.

기공을 함유한 복합재 적층판의 시험결과해석에 있어서 유효한 주파수의 범위는 저주파수 한계는 시편의 두께에 의해 제한을 받으며, 고주파수 한계



(a) Unidirectional carbon/epoxy laminates
 (b) Woven carbon/epoxy laminates
 (c) Woven carbon/polyimide laminates

Fig. 3 Pore morphology in the three groups of samples

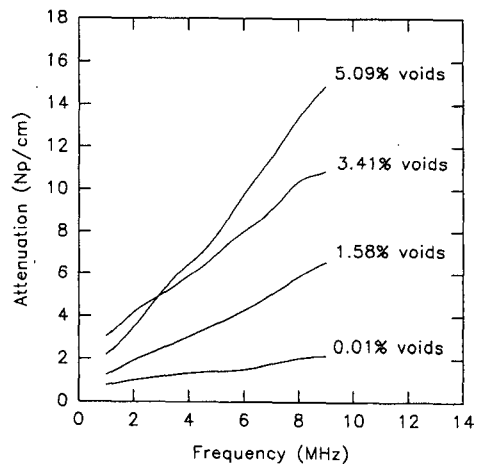


Fig. 4 Attenuation curves of the woven carbon/epoxy laminates. The attenuation slope (da/df) obtained from the linear fit to the data are 1.606, 1.03, 0.655 and $0.165 \text{ cm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ for 5.09, 3.41, 1.58 and 0.01% porosity samples, respectively.

는 기공에 의한 감쇠에 영향을 받는다. 여기서는 이러한 영향을 고려하여 비교적 선형관계가 좋은 1~9 MHz 주파수 범위의 측정결과를 이용하였다. 사용 주파수 범위에서 감쇠기울기(da/df)를 linear fit으로부터 구하였으며 그 값이 수록되어 있다. (Fig. 4의 제목 참조) 여기서 주목할 것은 일반적으로 저주파수 영역에서 Rayleigh 산란에 의한 감쇠는 f^4 에 비례하는 것으로 알려져 있으나,⁽⁹⁾ 본 연구에서 기공의 산란으로 인한 감쇠는 사용 주파수 범위에서 f 에 비례하는 것으로 나타났다. 기공이 거의 없는 시편(0.01% 시편)의 감쇠는 기공이 있는 시편의 감쇠에 비해 매우 작다. 다른 두 그룹에 있는 시편도 이와 유사한 감쇠-주파수 거동을 보였으나, 감쇠와 감쇠기울기의 크기는 아래에 상세히 언급한 것처럼 각 그룹간에 큰 차이를 보였다.

5.1 기공의 모양이 감쇠기울기에 미치는 영향

감쇠와 기공 부피분율과의 상관관계를 구하기 위하여 감쇠곡선에 대한 linear fit 으로부터 감쇠기울기를 구하였다. Fig. 5에 감쇠기울기(da/df)를 산용해법으로 구한 기공량의 함수로 그렸다. 세 그룹에 대한 결과가 모두 나타나 있으며 각 그룹에서 실험결과는 거의 선형관계를 보이고 있다. (6.5% 기공량을 가진 일방향 복합적층판의 경우 감쇠가 너무 심하여 신뢰성있는 결과를 얻기 어려워 여기에는 포함시키지 않았다) 주어진 기공량에서 감쇠기울기의 크기는 일방향과 준 등방성 적층판, 직조

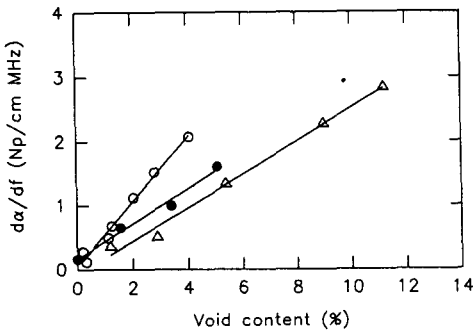


Fig. 5 Attenuation slope (da/df) versus void content determined by acid digestion. Comparison between : ○ unidirectional and quasi-isotropic laminates; ● woven carbon/epoxy laminates; △ woven carbon/polyimide laminates.

탄소/에폭시 적층판, 직조 탄소/폴리이마이드 적층판의 순서이다. 이러한 차이는 기공모양과 초음파 사이의 상호작용을 통하여 설명할 수 있다. 일방향과 준 등방성 적층판의 기공은 납작하고 타원형의 단면을 가지므로 음파에너지를 차단하는데 매우 효과적이다. 반면에 직조 카본/폴리이마이드 적층판의 기공은 더 구형에 가깝다. 따라서 같은 기공양에 대하여 직조 카본/폴리이마이드 적층판의 감쇠와 감쇠기울기는 더 낮다. 이러한 경향은 산란 단면적(scattering cross-section)이 기공의 모양에 의존하는 것과 일치한다.⁽¹⁰⁾ 즉, 산란 단면적이 거의 선형적으로 증가하는 중간 주파수 범위에서 납작한 리본 크랙의 산란 단면적의 기울기는 구형 기공의 기울기보다 더 크다.

5.2 기공 부피분율의 평가

감쇠기울기와 산용해법으로 결정한 기공 부피분율 사이의 선형 상관관계로부터 기공량(%)은 다음식에 의하여 정량적으로 구할 수 있으며

$$\text{Void content (\%)} = \text{Constant} \times \frac{da}{df} \quad (15)$$

여기서, da/df 의 단위는 Np/cm MHz이다. Fig.

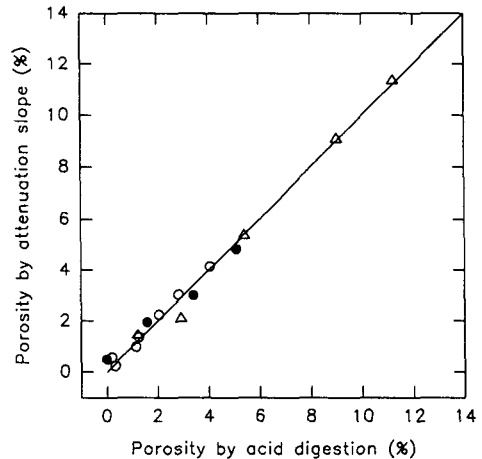


Fig. 6 Comparison between the predicted void contents using the relation "void=constant × (da/df)" and the void contents measured by acid digestion. The constant 2, 3 and 4 was used for three groups of samples, i.e., ○ unidirectional and quasi-isotropic laminates; ● woven carbon/epoxy laminates; △ woven carbon/polyimide laminates

5로부터 감쇠기울기는 기공의 모양에 의존하므로 비례상수는 각 시편 그룹에 대하여 서로 다른 값을 사용해야 된다. 식(15)에 의하여 계산한 기공량과 산용해법으로 측정된 기공량을 Fig. 6에 비교하였으며 두 방법으로 구한 기공 부피분율은 서로 잘 일치하고 있다. 이 비교에서 비례상수는 처음 그룹(A and B series), 두번째 그룹(D series), 세번째 그룹(6240 series)에 대하여 각각 2, 3, 4를 사용하였다. 이 결과는 기공의 모양에 의존하는 적절한 비례상수를 사용하므로써 CFRP의 기공량을 초음파의 감쇠기울기로부터 직접 평가할 수 있음을 가리킨다.

6. 결 론

초음파 스펙트럼 분석을 이용하여 기공을 함유한 복합적층판의 감쇠를 주파수의 함수로 측정하였으며, 기공의 미세구조 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 특정 복합재 시스템에서 기공으로 인한 감쇠는 1~9 MHz의 측정범위에서 주파수에 거의 선형적으로 의존하였으며 그 크기와 기울기는 기공량이 많은 시편에서 더 크게 나타났다.
- (2) 기공의 모양은 적층판의 프리프레그 조직에 큰 영향을 받았다. 일방향 프리프레그 적층판의 기공은 납작한 타원형의 단면인데 비해 직조 프리프레그 적층판에서는 더 구형의 경향을 보였다.
- (3) 감쇠기울기(da/df)와 기공량 사이에 선형 상관관계가 성립하였으며, 적절한 비례상수를 곱하여 기공의 부피분율을 정량적으로 구할 수 있다. 비례상수는 기공의 모양에 좌우되었다. 따라서 감쇠기울기로부터 기공량을 평가할 경우 적층구조와 기공형상에 대한 사전 지식이 필요하다.
- (4) 감쇠기울기를 이용하여 비파괴적 방법으로 평가한 기공의 부피분율은 산용해법으로 구한 값과 잘 일치하였다.

참고문헌

- (1) Hsu, D. K. and Uhl, K. M., 1987, "A Morphological Study of Porosity Defects in Carbon-Epoxy Composites," *In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 6B, Plenum Press, New York, pp. 1175~1184.
- (2) 정현조, 1993, "기공으로 인한 복합적층판의 강도감소와 기공량의 비파괴적 평가," 한국복합재료학회 추계학술발표회 논문집, pp. 89~94.
- (3) Harper, B. D., Staab, G. H. and Chen, R. S., 1987, "A Note on the Effects of Voids Upon the Hygral and Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy," *J. Comp. Mater.*, Vol. 21, pp. 280~289.
- (4) Stone, D. E. W. and Clarke, B., 1976, "Ultrasonic Attenuation as a Measure of Void Content in Carbon-Fibre Reinforced Plastics," *Non-Destr. Test.*, Vol. 20, pp. 137~145.
- (5) Sachse, W. and Pao, Y.-H., 1978, "On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids," *J. Appl. Phys.*, Vol. 49, pp. 4320~4327.
- (6) Pialucha, T., Guyott, C. C. H. and Cawley, P., 1989, "Amplitude Spectrum Method for the Measurement of Phase Velocity," *Ultrasonics*, Vol. 27, pp. 270~279.
- (7) Thompson, R. B. and Gray, T. A., 1983, "Analytical Diffraction Corrections to Ultrasonic Scattering Measurements," *In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 2A, Plenum Press, New York, pp. 567~586.
- (8) Jeong, H. and Hsu, D. K., 1993, "Experimental Analysis of Porosity-Induced Ultrasonic Attenuation and Velocity Change in Carbon Fibre Composites," *Submitted to Ultrasonics*.
- (9) 임형택 외, 1993, "탄소섬유/페놀수지 복합재료에서의 초음파 감쇠 특성," 한국비파괴검사학회 춘계학술 발표회, pp. 24~32.
- (10) Nair, S. M., Hsu, D. K. and Rose, J. H., 1989, "Porosity Estimation Using the Frequency Dependence of the Ultrasonic Attenuation," *J. Nondestr. Eval.*, Vol. 8, pp. 13~26.

(1) Hsu, D. K. and Uhl, K. M., 1987, "A Morphol-