

論文

복합재 적층판에서 기공으로 인한 강도 감소와
기공 부피분율의 비파괴적 평가

정 현 조*

Mechanical Strength Degradation due to Voids and
Nondestructive Evaluation of Void Contents in Composite Laminates

Hyunjo Jeong*

ABSTRACT

The effect of voids on the ultrasonic attenuation and mechanical strength has been investigated on a number of composite laminate structures and it was shown that both the void content and the strength may be evaluated nondestructively. An ultrasonic measurement technique has been developed to acquire the attenuation as a function of frequency. The interlaminar shear strength(ILSS) was obtained through short beam shear tests. The measured attenuation increased with porosity and showed a linear behavior over the frequency range used. The ILSS was decreased exponentially with increasing porosity. Pore morphologies were different in different laminate structures and found to have a great effect on the attenuation slope and strength decrease rate. It is shown that the void content can be estimated from the measured attenuation slope and based on the mutual dependence of attenuation slope and strength on the porosity the ILSS may also be estimated nondestructively.

초 록

복합재 적층판에서 기공이 초음파 감쇠와 기계적 강도에 미치는 영향을 여러 종류의 적층 구조를 통하여 체계적으로 연구하였으며, 이를 기초로 기공율과 강도의 비파괴적 평가가 가능함을 실험적으로 보였다. 초음파의 감쇠를 주파수의 함수로 측정하는 기법을 개발하였으며, short beam shear test를 통하여 층간 전단 강도를 측정하였다. 기공율의 증가는 강도의 지수적 감소를 가져왔다. 적층 구조에 따라 기공의 형태는 큰 차이를 보였으며, 기공의 기하학적 특성은 감쇠, 감쇠 기울기와 강도 감소율에 서로 다른 영향을 미치는 것으로 나타났다. 감쇠 기울기와 기공율의 상관 관계로부터 기공율의 비파괴적 평가가 가능하며, 기공율과 강도 사이의 관계로부터 기계적 강도의 평가가 가능함을 보였다.

* 국방과학연구소

1. 서 론

섬유강화 고분자 복합재료에서 기공은 일반적으로 제조과정에서 가장 흔하게 발생하며 복잡한 형상을 갖는다. 적층판의 층간에 발생하는 큰 기공은 그 사이에 갇힌 공기나 습기로 인한 것이며, 섬유와 수지의 계면에 존재하는 작은 기공은 경화 과정 중에 휘발성 개스가 제대로 제거되지 못하여 발생한다. 기공은 복합재료의 기계적 강도에 나쁜 영향을 미친다. 특히 지지재에 의해 지배되는 성질인 압축 강도, 횡방향 인장 강도 및 층간 전단 강도 등에 가장 큰 영향을 미친다. Judd와 Wright[1]은 기존 데이터를 분석하여 기공이 기계적 강도에 미치는 영향을 연구하였다. 많은 연구 결과에서 기공이 증가함에 따라 강도는 지수적으로 감소함이 관찰되었다[2~6]. Yoshida등[7]은 기공으로 인한 위험의 기준을 결정하는데 있어서 통계학적인 방법을 사용하였으며, 0~6% 기공범위에서 층간 전단 강도는 선형적으로 감소함을 보였다.

기공은 탄성파의 강한 산란 요인으로 작용하므로 기공의 비파괴적 평가를 위하여 초음파의 감쇠가 널리 사용되고 있다. 복합재료에서 초음파의 감쇠와 기공율 사이의 상관 관계는 잘 알려져 있다. 즉, 기공율이 증가할수록 감쇠는 증가하며 주파수가 커질수록 감쇠량도 커진다. 따라서 기공율을 알고 있는 일련의 표준 시편을 제작하므로써 특정 복합재료의 기공율을 정량적으로 결정할 수 있다. 최근에 광대역 펄스를 이용하여 주파수의 함수로 초음파의 감쇠를 측정하는 기법이 개발되었으며, 감쇠의 기울기로부터 기공율을 평가할 수 있음이 보고되었다[8~10].

탄소섬유강화 복합재의 제조과정에서 발생하는 기공은 그 모양이 일반적으로 아주 복잡하다. 기공의 크기 및 모양이 여러 연구 결과에서 발표되었다. Stone과 Clarke[11]의 결과에 의하면 낮은 기공율(1.5% 이하)에서 기공은 작은 구형의 모양을 보이며 높은 부피분율에서 층간의 기공은 더 크고 납작하며 길쭉한 모양을 하고 있다. Yuh[12]는 기공이 거의 담배 모양에 가까우며 기공율이 증가할수록 그 크기가 증가함을 발견하였다. 구조용으로

사용되는 복합재는 대부분이 적층 형태이므로 기공의 형태는 프리프레그의 조직에 의해 크게 좌우된다.

본 논문에서는 기공이 복합재 적층판의 초음파 감쇠와 기계적 강도에 미치는 영향을 다양한 구조의 적층판에 대하여 분석하였으며, 이를 기초로 기공율과 강도를 비파괴적으로 평가할 수 있음을 보였다. 일방향 프리프레그와 직조 테이프를 사용하여 최대 약 11%의 기공율을 함유하도록 여러 종류의 적층판을 특별히 제작하였다. 기공의 기하학적 특성을 현미경과 영상 분석을 통하여 검사하였으며, 기공의 형태를 초음파 감쇠와 강도의 데이터 해석에 이용하였다. 초음파의 감쇠는 물속에서 투과법을 사용하였고, 신호의 스펙트럼 분석으로부터 주파수의 함수로 측정하였다. Short beam shear test를 통하여 시편의 층간 전단 강도(ILSS)를 측정하였으며, 기공율과의 관계를 구하였다. 감쇠계수를 이용하여 기공의 부피분율을 정량적으로 평가할 수 있으며 이로부터 강도의 비파괴적 평가가 가능함을 보였다.

2. 재료 및 시편

기공 평가에 있어서 중요한 것은 다양한 기공율을 갖는 시편의 제작과 기공이 시편 전체에 걸쳐 균일하게 분포하도록 하는 것이다. Gürdal등[5]은 AS4/3501-6 복합재의 표준 적층 공정중에 용제 또는 수분 첨가와 저압 경화과정을 통해 1.75~5.32%의 균일 분포 기공 시편을 제작하였다. Bowles와 Frimpong[13]은 경화압력을 변화시켜 AS4/PMR-15 복합재에서 0~10% 범위의 기공시편을 제작하였다. Stone과 Clarke[11]은 탄소/에폭시 적층판에서 높은 양의 기공 시편을 얻기 위하여 오토클레이브 압력 P_0 와 진공백의 내부압력 P_1 를 조절하였다. $(P_0 - P_1)$ 를 일정하게 유지하면서 P_1 를 변화시키므로써 0.5~4.0% 범위의 기공 시편을 얻을 수 있었다. Almeida와 Neto[14]는 시편의 두께 및 섬유 부피분율에 대한 제어가 아주 우수한 백(bag) 시스템을 고안하여 1.34~5.86%의 기공율을 갖는 탄소/에폭시 직조 시편을 제작하였다.

탄소 섬유 강화 적층판에서 섬유 부피분율이 초음파의 감쇠에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보인다. Kim과 Park[15]은 50~72%의 섬유 부피분율을 갖는 탄소/에폭시 복합재의 감쇠를 주파수의 함수로 구하였다. 그들의 결과에 의하면 2~12 MHz 주파수 범위에서 섬유의 산란으로 인한 감쇠는 기지재의 점탄성에 의한 감쇠에 비해 아주 작은 것으로 나타났다. 더우기 본 연구 결과에서 보인 바와 같이 기공이 거의 없는 시편의 감쇠는 기공 시편의 감쇠에 비하여 무시할 정도로 작다.

본 연구에서는 세 그룹의 적층판이 사용되었다. 각 그룹의 시편에 대한 상세한 내용은 3절에서 설명한 산 용해법(acid digestion)으로 구한 기공의 부피분율과 함께 Table 1에 나와 있다. 이들 시편은 서로 다른 제작사에 의하여 다른 양의 기공율을 함유하도록 특별히 제작되었다. 그룹 A와 그룹 D 시편은 미국의 Rohrs Industry로부터 공급받았으며, 그룹 6240시편은 General Electrics사로부터 제공되었다. 이들 시편에 대한 상세한 제작과정은 알 수 없다.

첫째 그룹(Group A)은 모두 4개의 시편으로 구성되어 있으며, 16플라이의 일방향 탄소/에폭시 프리프레그를 적층하여 만들었다. 산 용해법으로 각 시편의 섬유 부피분율을 측정하였으며, 4개의 시편에 대한 평균값은 $62 \pm 1.5\%$ 로서 시편간의 부피분율 차이는 크지 않았다. 두번째 그룹(Group B)은 4개의 시편으로 구성되어 있고, 8플라이의

직조 탄소/에폭시 테이프를 제작한 적층판이다. 세번째 그룹(Group 6240)에는 5개의 시편이 있고 8플라이의 탄소/폴리이미드 직조 테이프(8매 주 자직)로 제작하였다. 이 그룹의 시편 두께는 기공율이 낮은 경우 약 2mm에서 기공율이 높은 경우 약 2.5mm까지 변하고 있다.

3. 실험

3-1. 기공 부피분율 측정

기공의 부피분율을 구하기 위하여 먼저 ASTM D-792(Water buoyancy technique)에 따라 복합재 시편의 밀도를 측정하였다. 물의 밀도를 아는 경우, 시편의 무게를 공기중에서와 물속에서 측정함으로써 시편의 부피와 밀도를 계산할 수 있다. 물의 밀도는 온도에 대하여 보정해 주었다. 시험이 끝난 후에 시편의 섬유 부피분율과 기공의 부피분율을 ASTM D-3171(Matrix digestion)에 따라 결정하였다. 시편을 황산 용액에 넣고 가열하여 수지를 용해시킨 다음 여과, 건조시켜 섬유의 무게를 측정하였다. 섬유의 밀도를 알면 시편속의 섬유 부피분율은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V_f = \frac{(W_f / \rho_f)}{(W_c / \rho_c)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 W_f 는 섬유무게, W_c 는 시편의 무게, ρ_f 는 섬유밀도, ρ_c 는 시편의 밀도이다. 수지의 밀도 ρ_m 를 알면 이로부터 기공의 부피분율을 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$V_v = 1 - \frac{[W_f / \rho_f + (W_c - W_f) / \rho_m]}{W_c / \rho_c} \dots\dots (2)$$

각 시편으로부터 3개의 시편을 취하여 그 평균값을 구하였다.

3-2. 기공의 미시구조 분석

각 그룹의 시편에서 기공의 기하학적 형태에 대한 통계적 자료를 얻기 위하여 광학현미경과 영상 분석을 사용하였다. 또한 Deply 방법을 사용하여

Table 1. Sample description and void contents

Group	Material	Lay-up	Void content(%)
A1	carbon/epoxy	unidirectional	6.51
A2	carbon/epoxy	unidirectional	2.04
A4	carbon/epoxy	unidirectional	1.14
A5	carbon/epoxy	unidirectional	0.20
D1	carbon/epoxy	woven	5.09
D2	carbon/epoxy	woven	1.58
D3	carbon/epoxy	woven	3.41
D5	carbon/epoxy	woven	0.01
6240-4	carbon/polyimide	woven	1.2
6240-7	carbon/polyimide	woven	2.9
6240-8	carbon/polyimide	woven	5.4
6240-10	carbon/polyimide	woven	9.0
6240-13	carbon/polyimide	woven	11.2

층간에 존재하는 기공의 분포를 관찰하였다. 자세한 실험절차와 결과는 참고문헌[9,16]에 수록되어 있다.

3-3. 초음파 시험

초음파의 감쇠는 물 탱크 속에서 두 탐촉자를 정렬시켜 투과법으로 측정하였다(Fig.1참조). 송신 탐촉자의 펄스는 광대역의 spike voltage pulse로 발생시켰으며 파의 전파 방향은 시편의 두께 방향으로 하였다. 감쇠는 시편없이 물속을 통과한 신호와 시편을 통과한 신호의 진폭 스펙트럼을 비교하므로써 구할 수 있다.

먼저 시편없이 물속을 통과한 신호를 참조신호라고 하면 이 신호의 진폭 스펙트럼은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$S_r = A_i(f) D_r e^{-\alpha_w(f)L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서 $A_i(f)$ 는 송신 탐촉자의 초기 신호 스펙트럼, D_r 은 빔 퍼짐으로 인한 회절 보정, $\alpha_w(f)$ 는 물의 감쇠, L 은 두 탐촉자 사이의 거리이다. 이제 시편을 두 탐촉자의 중앙에 넣고 시편의 두께 방향으로 전파하여 수신된 시편 신호의 진폭 스펙트럼은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$S_s = A_i(f) D_s T_s e^{-\alpha_w(f)(L-h)} e^{-\alpha_s(f)h} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 D_s 는 시편 신호의 회절 보정, T_s 는 계면에서의 손실 보정, $\alpha_s(f)$ 는 시편의 감쇠, h 는 시편의 두께이다. T_s 는 다음 식으로 주어지며

$$T_s = \frac{4 Z_r Z_s}{(Z_s + Z_r)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $Z_r = \rho_w V_w$, $Z_s = \rho_s V_s$, ρ_w 와 ρ_s 는 물과 시편의 밀도, V_w 와 V_s 는 물과 시편의 종파 속도를 각각 나타낸다.

두 탐촉자 사이의 거리가 시편의 두께보다 훨씬 크면 회절 보정 D_r 과 D_s 는 거의 같다. 또한 물에서의 감쇠 $\alpha_w(f)$ 는 무시할 정도로 작다. 이러한 경우 시편의 감쇠는 각 스펙트럼의 로그값의 차이로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha_s(f) = \frac{1}{h} [\ln S_r - \ln(S_s/T_s)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

초음파의 감쇠 측정을 위하여 중심 주파수 10 MHz, 직경 6.3mm의 평면 종파 탐촉자를 사용하였다. 송신 및 수신 탐촉자 사이의 거리는 약 15 cm로 유지하였다. 광대역 초음파 펄스는 Panametrics 5052PR pulser/receiver의 spike voltage pulse로 발생시켰으며, 최대 신호를 얻도록 두 탐촉자를 정렬시켰다. 두 탐촉자의 중앙에 시편을 넣고 시험할 때는 시편의 면이 두 탐촉자 면과 평행하도록 하였다. 시험 장치에 대한 개략도가 Fig.1에 나와 있다. 수신 탐촉자를 통하여 얻은 신호는 LeCroy 9400 디지털 오실로스코프에서 100회 평균한 값을 컴퓨터로 이송시켜 주파수 영역에서의 필요한 신호처리를 하였다. 시편없이 물속을 통과한 신호는 참조 신호로 저장한다. 다음에 시편을 두 탐촉자의 중앙에 설치하고 맨처음 통과한 신호를 시편 신호로 저장한다.

주파수 영역에서의 계산은 시스템 소프트웨어가 제공하는 고속 Fourier 변환(FFT) 알고리즘을 사용하였다. 식(6)의 감쇠를 계산하기 위하여 먼저 시편 신호의 스펙트럼에 대하여 계면에서의 투과

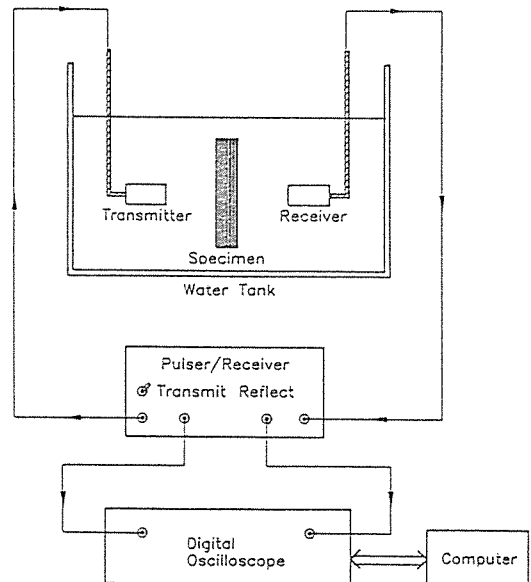


Fig. 1. Experimental setup for the measurement of ultrasonic attenuation.

손실을 보정해 준 다음, 두 신호의 진폭 스펙트럼 각각에 log를 취하여 차를 구하고 시편 두께로 나누어 준다. 결과적으로 탐촉자의 전 밴드폭에 걸친 주파수의 함수로 감쇠를 구할 수 있다. 기공은 일반적으로 공간적으로 불균일한 분포를 보이므로 시편의 여러 위치에서 5~10회 감쇠를 측정하여 그 평균값을 구하였다.

3-4. 기계적 시험

시편의 층간 전단 강도(ILSS)를 측정하므로써 기공이 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. ILSS는 ASTM D-2344에 따라 short beam shear test로부터 구하였다[17]. 전단시험에 사용한 시편의 크기는 길이 25.4 mm, 폭 6.3 mm이다. 시험에 사용한 치구는 span-to-depth비가 4가 되도록 제작하였다. 시편을 치구에 설치하고 하중 지지능력을 상실할 때까지 일정한 속도로 횡방향 하중을 가하고 이때의 하중을 기록하여 다음 식을 사용하여 겉보기 ILSS를 계산하였다.

$$\sigma = \frac{3}{4} \frac{P_{\max}}{A} \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 P_{\max} 은 최대 지지하중이며 A는 시편의 단면적이다. 시험과정 중에 시편이 지지하는 하중은 때로 떨어지다가 다시 상승하는 양상을 몇 번 반복하다가 최종 파손에 이르게 된다. 이는 최종 파손 전에 작은 크랙과 층간분리 등이 먼저 발생함을 가리킨다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 기공의 미시구조

각 그룹에서 가장 높은 기공율을 가진 시편에 대한 광학현미경 단면 사진이 Fig.2에 나와 있다. Figure 2a에 보인 일방향 보강 시편(A-1)의 경우 섬유방향과 평행하게 절단한 면에서 층간에 존재하는 기공은 인접한 섬유방향으로 길게 늘어나 있다. 대부분의 기공은, 특히 크기가 큰 경우, 납작한 타원형의 단면을 갖고 있었으며 장축(또는 폭)의 방

향은 층간의 계면과 평행하였다. 그룹 A의 시편들에서 기공 단면의 크기는 큰 분포를 보였다. 폭 b는 수 마이크로에서 수백 마이크로의 범위를 갖는 반면에 높이 a는 수 마이크로에서 수십 마이크로에 이르며, 평균 형상비 ($\overline{a/b}$)는 0.3~0.45였다. 단면의 폭과 높이는 lognormal 분포를 보여 주었다[16].

Figure 2(b)와 2(c)에 보인 바와 같이 직조 탄소/에폭시(D-1) 및 탄소/폴리이미드(6240-13) 시편의 기공은 수지가 풍부한 부분에 국부적으로 위치하고 있다. 그러나 전체적으로 모양과 크기의 분포는 약간 다르다. 6240-13 시편에서 대부분의 기공은 구형인데 비하여 D-1 시편에서 일부 기공은 작은 구형이나 다른 기공은 길고 납작한 타원형의 단면을 갖고 있다. 직조 적층판에서 이와 같이 기공의 모양이 다른 것은 무엇보다 프리프레그의 구조에 그 원인이 있다. 즉, 탄소/폴리이미드 시편의 프리프레그가 더 치밀한 조직을 갖고 있기 때문이다.

탄소 섬유 보강 복합재에서 기공의 모양은 구성 재료의 성질과 경화 과정 등을 포함하여 여러가지 원인에 의해 결정되나 이와 같이 프리프레그의 형

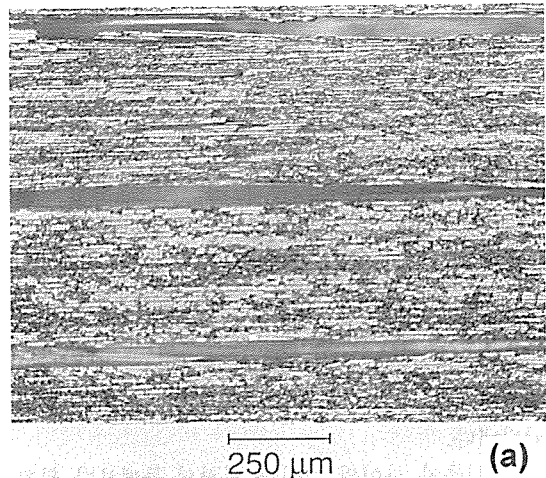


Fig.2. Pore morphology of the three groups of composite samples: (a)Unidirectional carbon/epoxy laminate(Sample A-1), (b)Woven carbon/epoxy laminate(Sample D-1), and (c)Woven carbon/polyimide laminate (Sample 6240-13).

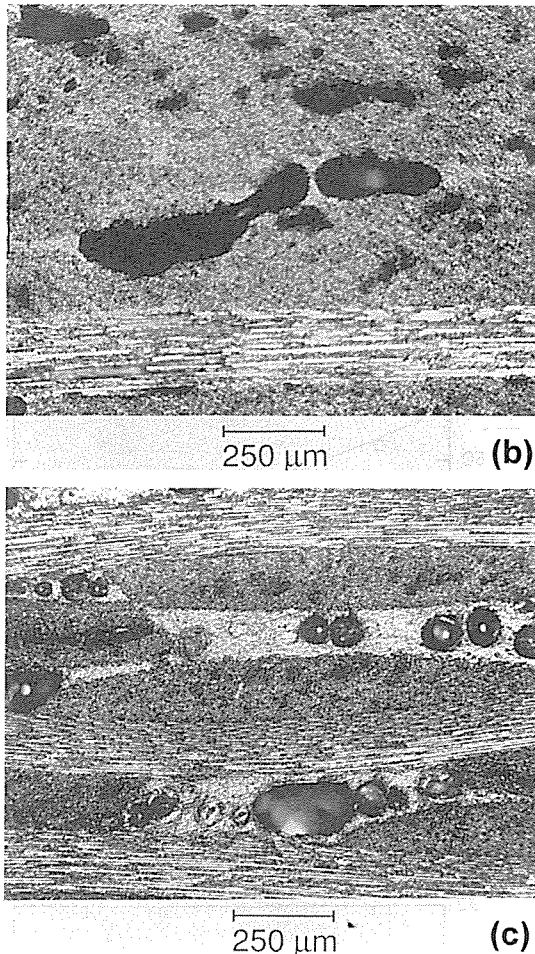


Fig. 2. (Continued)

태에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 기공의 특성을 이해하면 초음파의 감쇠와 강도 측정 결과를 해석하는데 도움이 될 것이다.

4-2. 초음파 시험

Figure 3는 시편의 두께 방향으로 전파한 종파의 감쇠 측정 결과를 주파수의 함수로 보여주고 있다. 이 결과는 적조 탄소/에폭시(D그룹) 시편에 대한 것이다. Fig.3를 살펴보면 감쇠는 주파수가 증가함에 따라 커지고 주어진 한 주파수에서 기공율이 클수록 더 크다. 또한 감쇠곡선은 주파수에 대하여 거의 선형성을 보이며 그 기울기는 기공율이 높을

수록 더 크다.

기공을 함유한 복합재 적층판의 감쇠 측정에서 유효한 주파수의 범위는 저 주파수 한계는 시편의 두께에 의해 제한 받으며, 고주파수 한계는 기공에 의한 감쇠에 영향을 받는다. 여기서는 이러한 영향을 고려하여 비교적 선형관계가 좋은 1~9 MHz 범위의 측정 결과를 이용하였다. 측정 주파수 범위에서 감쇠 기울기(da/df)를 linear fit으로 구하였으며 그 값을 기록하였다(Fig.3의 제목 참조). 여기서 주목할 것은 일반적으로 저주파수 영역에서 Rayleigh 산란에 의한 감쇠는 f^2 에 비례하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서 기공으로 인한 감쇠는 측정 주파수 범위에서 f 에 비례하는 것으로 나타났다. 기공이 거의 없는 D-5 시편(0.01% 기공)의 감쇠는 다른 기공 시편에 비하여 아주 작다. 다른 두 그룹의 시편도 이와 유사한 감쇠-주파수 거동을 보였으나 감쇠와 감쇠 기울기의 크기는 아래에 설명한 것처럼 각 그룹간에 큰 차이를 보였다.

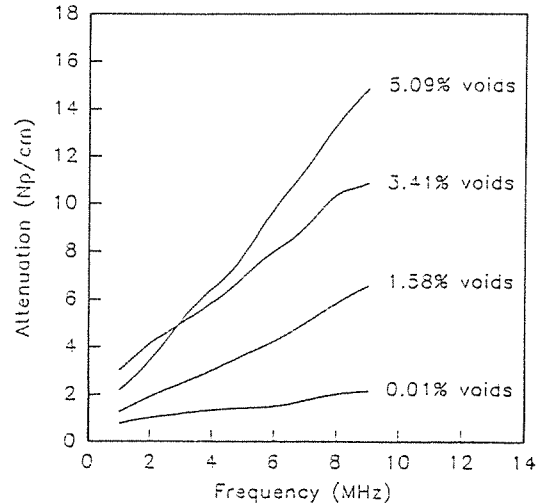


Fig.3. Attenuation curves of the woven carbon/epoxy laminates(Group D). The attenuation slopes(da/df) obtained from the linear fit to the data are 1.606, 1.03, 0.655, and 0.165 Np/cm MHz for 5.09, 3.41, 1.58 and 0.01% samples, respectively.

4-3. 기계적 시험

각 그룹의 시편에 대한 층간 전단 강도 실험 결

과를 Figs. 4~6에 도시하였다. 이들 그림에서 강도 값은 3개의 시편에 대한 평균값이다. 각 그룹에서 ILSS는 기공율이 증가함에 따라 감소하고 있다.

측정 데이터는 Ryshkewitch[18]와 Duckworth [19]가 제안한 식(8)의 경험적인 강도-기공율 모델에 fit하여 그 결과를 이들 그림에 같이 도시하였다.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-bP} \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 σ_0 는 기공율 0에서의 강도, b 는 경험적 상수, P 는 기공율(%)을 나타낸다. Brown등[20]에 의하면 b 는 기공의 크기, 모양 및 방향과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 원형 단면의 원기둥(circular cylinder) 기공에서 b 는 형상비에 의해 결정된다. 상수 b 는 강도의 감소율을 나타내는 지수로서 Figs. 4~6에 나와 있는 바와 같이 A, D, 6240그룹에서 b 값은 각각 0.094, 0.065, 0.0285였다. 세 그룹의 시편들의 강도 감소를 Fig. 7에 비교하였다. 각 시편의 강도값은 기공율 0에서의 값으로 나누어 주므로써 무차원화 시켰다. 이 때 각 그룹의 기공율 0에서의 강도값은 측정강도값을 식(8)에 모델 fit하여 외삽법으로 구하였다. 이 그림에서 보듯이 같은 기공율에서 A그룹의 시편이 가장 높은 감소

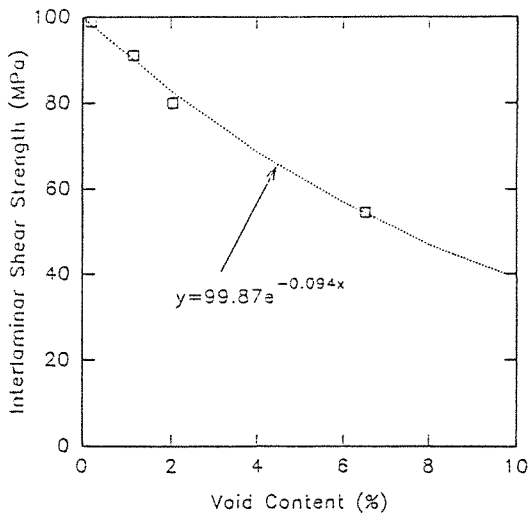


Fig. 4. Interlaminar shear strength versus void content for unidirectional carbon/epoxy laminates(Group A).

율을 보이며 6240 그룹이 가장 낮고 D그룹은 이 두 그룹 사이에 위치하고 있다. 이러한 차이는 기공의 모양이 강도에 미치는 영향으로부터 정성적으로 설명할 수 있다. 즉, 일방향 시편(A 그룹)에서 타원 단면을 가진 원기둥(elliptic cylinder) 모양의 기공은 6240그룹의 구형 기공에 비하여 더 큰 b 값을 가지며 결과적으로 높은 감소율을 가져온다. 이러한

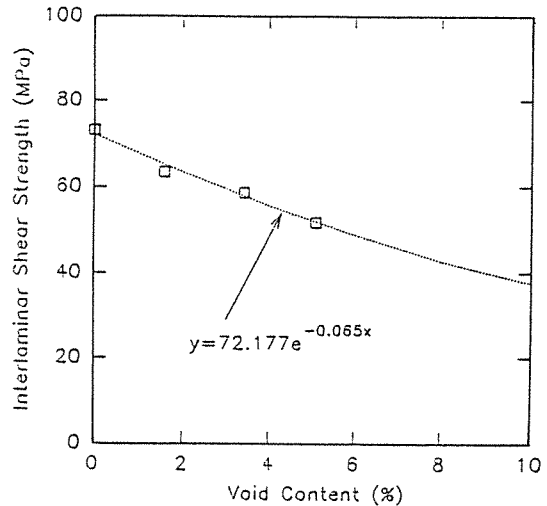


Fig. 5. Interlaminar shear strength versus void content for woven carbon/epoxy laminates (Group D).

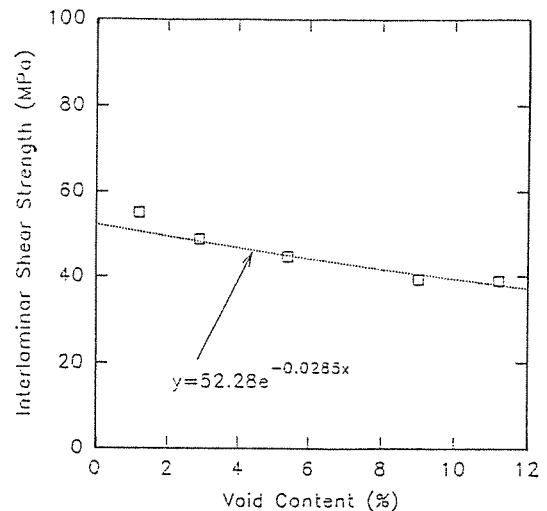


Fig. 6. Interlaminar shear strength versus void content for woven carbon/polyimide laminates(Group 6240).

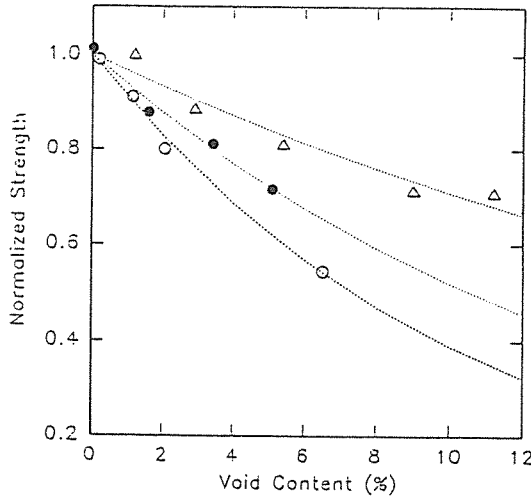


Fig. 7. Normalized shear strength versus void content. ○ unidirectional laminates, ● woven carbon/epoxy laminates; △ woven carbon/polyimide laminates.

현상은 Bowles와 Frimpong[18]의 모델 예측과 일치한다.

5. 기공 부피분율 평가

감쇠와 기공율과의 상관관계를 구하기 위하여 감쇠 곡선에 대한 linear fit으로부터 감쇠기울기 da/df 를 구하였다. Figure 8에 da/df 를 산 용해법으로 측정한 기공율의 함수로 그렸다. 세 그룹에 대한 결과가 모두 나와 있으며 각 그룹에서 실험 결과는 좋은 선형관계를 보이고 있다. 주어진 기공율에서 da/df 의 크기는 일방향 적층판(A 그룹), 직조 탄소/에폭시 적층판(D 그룹), 직조 탄소/폴리이미드 적층판(6240 그룹)의 순서이다. 이러한 차이는 기공모양과 초음파 사이의 상호작용을 통하여 설명할 수 있다. 일방향 적층판의 기공은 납작한 타원형의 단면을 가지므로 음파 에너지를 차단하는데 매우 효과적이다. 반면에 탄소/폴리이미드의 기공은 구형으로서 감쇠와 감쇠 기울기는 가장 낮다. 직조 탄소/에폭시 적층판의 감쇠 기울기는 이 두 그룹 사이에 위치한다. 이러한 현상은 산란 단면적이 기공의 모양에 의존하는 것과 일치한다[8]. 즉, 산란 단면적이 거의 선형적으로 증가하는 중간 주파수 범위에서 납작한 리본 크랙의

산란 단면적의 기울기는 구형기공의 기울기보다 더 크다.

감쇠 기울기와 산 용해법으로 결정된 부피분율 사이의 선형 관계로부터 기공율(%)은 다음 식에 의하여 정량적으로 결정할 수 있다.

$$\text{Void content}(\%) = \text{Constant} \times \frac{da}{df} \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 da/df 의 단위는 Np/cm MHz이다. Fig.8으

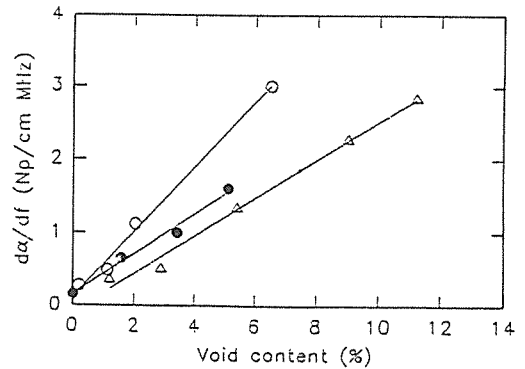


Fig. 8. Attenuation slope (da/df) versus void content determined by acid digestion. Comparison between: ○ unidirectional laminates, ● woven carbon/epoxy laminates; △ woven carbon/polyimide laminates.

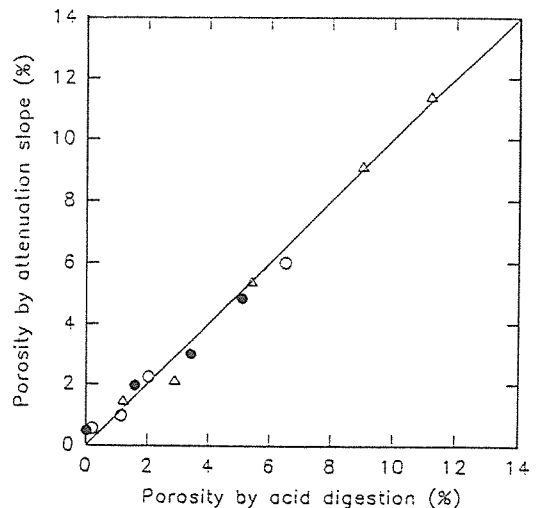


Fig. 9. Comparison of estimated void contents and measurements. ○ unidirectional laminates, ● woven carbon/epoxy laminates; △ woven carbon/polyimide laminates.

로부터 감쇠 기울기는 기공의 모양에 의존하므로 비례상수는 각 그룹에 대하여 서로 다른 값을 사용해야 한다. 식(9)에 의해 계산한 기공율과 산용해법으로 측정된 기공율을 Fig.9에 비교하였다. 이 비교에서 사용한 비례상수는 A, D, 6240 그룹에 대하여 각각 2, 3, 4를 사용하였다. 이 결과는 기공의 모양에 의존하는 적절한 비례상수를 사용함으로써 복합재 적층판의 기공율을 초음파의 감쇠 기울기로부터 직접 평가할 수 있음을 가리킨다.

6. 층간 전단 강도 평가

기공의 존재는 초음파의 감쇠와 감쇠 기울기에서 영향을 미치며 따라서 기공율을 감쇠기울기로부터 평가할 수 있음을 보였다. 또한 층간 전단강도와 같이 수지에 의해 지배되는 기계적 성질도 기공에 의해 영향을 받으므로 이들 성질도 초음파의 감쇠 기울기로부터 평가할 수 있어야 한다. 이는 감쇠 기울기-기공율-강도 사이의 상관 관계로부터 가능하다. 즉, 기공율-강도 사이의 관계를 아는 경우 감쇠 기울기로부터 이미 결정된 기공율을 가지고 강도를 구할 수 있다. Figures 10~12에 세 그룹의 시편에 대하여 이들 사이의 관계를 도시하였다.

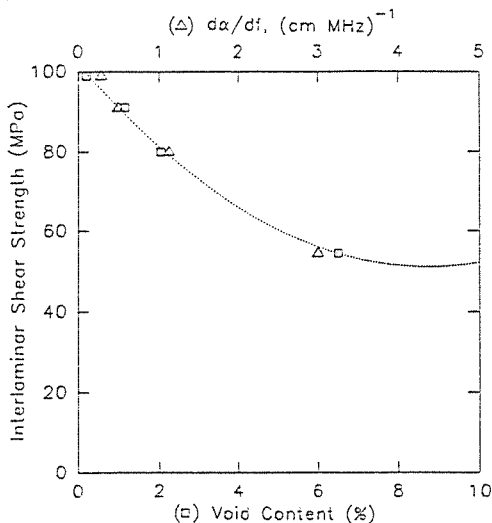


Fig.10. Correlation of attenuation slope with void content and interlaminar shear strength for unidirectional carbon/epoxy laminates (Group A).

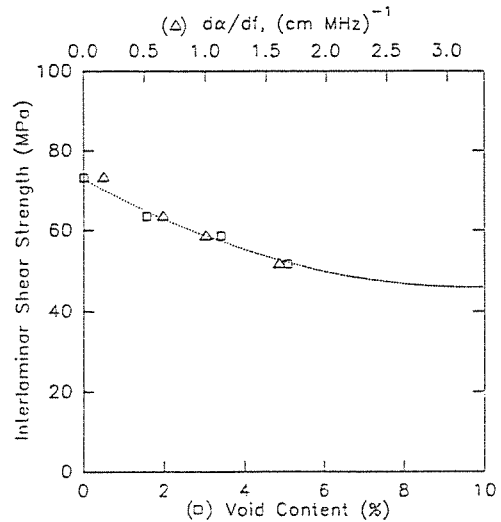


Fig.11. Correlation of attenuation slope with void content and interlaminar shear strength for woven carbon/epoxy laminates (Group D).

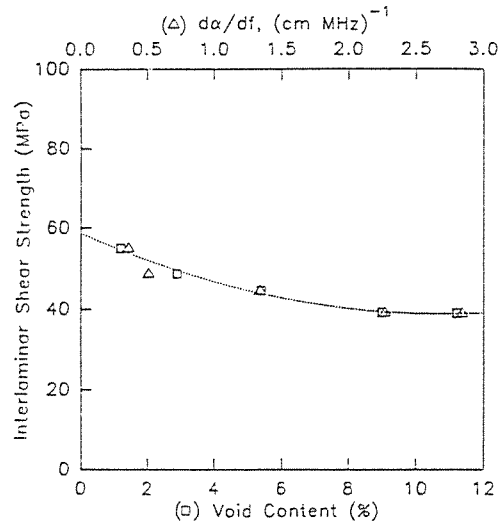


Fig.12. Correlation of attenuation slope with void content and interlaminar shear strength for woven carbon/polyimide laminates (Group 6240).

이들 그림에서와 같이 초음파의 감쇠 기울기를 측정하므로써 기공율 뿐만 아니라 층간 전단 강도의 평가가 가능함을 보여준다.

7. 결 론

복합재 적층판에서 기공이 초음파 감쇠와 기계적

성질에 미치는 영향을 서로 다른 기공율을 함유한 다양한 적층 형태의 시편에 대하여 연구하였다. 주파수 의존 초음파 감쇠는 광대역 펄스에 대한 스펙트럼 분석으로부터 구하였으며, 기계적 강도로서 층간 전단강도를 short beam 전단 시험으로부터 측정하였다. 기공으로 인한 초음파 감쇠는 측정 주파수 1~9 MHz 범위에서 거의 선형성을 보였으며, 감쇠 및 감쇠 기울기는 기공율이 증가할수록 커졌다. 전단 강도는 기공율의 증가와 함께 지속적으로 감소하였다. 기공의 모양은 적층 형태에 따라 아주 다르게 나타났으며, 감쇠 기울기와 강도 감소율에 서로 다른 영향을 미쳤다. 기공율은 감쇠 기울기 da/df 에 기공의 모양에 의존하는 비례상수를 곱하므로써 정량적으로 평가할 수 있었다. 또한 감쇠 기울기-기공율-강도의 상관 관계로부터 층간 전단 강도를 감쇠 기울기로부터 비파괴적으로 평가할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. Judd, N.C.W., and Wright, W.W., "Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites - An Appraisal," SAMPE Journal, Vol.14, No.1, 1978, pp.10-14.
2. Brassel, G.W., Horak, J.A., and Butler, B.L., "Effects of Porosity on Strength of Carbon-Carbon Composites," Journal of Composite Materials, Vol.9, 1975, p.228.
3. Perov, Y.Y., Loshkin, V.A., and Lyanpina, N.V., "Effect of Technological Factors on the Bending Strength of Carbon Reinforced Plastics," Mechanics of Composite Materials, No.4, 1988, p.660.
4. Boey, F.Y.C., "Reducing the Void Content and Its Variability in Polymeric Fibre Reinforced Polypropylene Composite: An Acousto-Ultrasonic Study," Journal of Materials Science, Vol.25, 1990, p.1104.
5. Gürdal, Z., Tomasino, A.P., and Biggers, S.B., "Effects of Processing Induced Defects on Laminate Response: Interlaminar Tensile Strength," SAMPE Journal, Vol.27, No.4, 1991, pp.39-49.
6. Ghiorse, S.R., "Effect of Void Content on the Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Laminates," SAMPE Quarterly, January 1993, pp.54-59.
7. Yoshida, M.J., Ogase, J., and Hayashi, R., "Statistical Approach to the Relationship between ILSS and Void Content of CFRP," Composites Science and Technology, Vol.25, 1986, pp.3-18.
8. Nair, S.M., Hsu, D.K., and Rose, J.H., "Porosity Estimation Using the Frequency Dependence of the Ultrasonic Attenuation," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.8, 1989, pp.13-26.
9. Hsu, D.K., "Ultrasonic Measurements of Porosity in Woven Graphite Polyimide Composites," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.7B, 1987, pp.1063-1068.
10. Jeong, H., and Hsu, D.K., "Experimental Analysis of Porosity-Induced Ultrasonic Attenuation and Velocity Change in Carbon Fibre Composites," Ultrasonics, In Press.
11. Stone, D.E.W. and Clarke, B., "Ultrasonic Attenuation as a Measure of Void Content in Carbon-Fiber Reinforced Plastics," Non-Destructive Testing, Vol.8, 1975, pp.137-145.
12. Yuhas, D.E., Vores, C.L. and Roberts, R.A., "Variations in Backscatter Attributed to Porosity," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.5B, 1986, pp.1275-1284.
13. Bowles, K.H., and Frimpong, S., "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites," Journal of Composite Materials, Vol.26, No.10, 1992, pp.1487-1509.

14. Almeida, S.F.M. and Neto, Z.S.N., "Effect of Void Content on the Strength of Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol.28, 1994, pp.139-148.
 15. Kim, H.C. and Park, J.M., "Ultrasonic Wave Propagation in Carbon Fibre-Reinforced Plastics," *Journal of Materials Science*, Vol.22, 1987, pp.4536-4540.
 16. Hsu, D.K. and Uhl, K.M., "A Morphological Study of Porosity Defects in Carbon-Epoxy Composites," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.6B, 1987, pp.1175-1184.
 17. Uhl, K., Lucht, B., Jeong, H., and Hsu, D.K., "Mechanical Strength Degradation of Graphite Fiber Reinforced Thermoset Composites due to Porosity," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.7B, 1988, pp.1075-1082.
 18. Ryshkewitch, E., "Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia," *Journal of American Ceramic Society*, Vol.36, No.2, 1953, p.65.
 19. Duckworth, W., "Discussion of Ryshkewitch Paper," *Journal of American Ceramic Society*, Vol.36, No.2, 1953, p.68.
 20. Brown, S.D., Biddulph, R.B., and Wilcox, P.D., "A Strength-Porosity Relation Involving Different Pore Geometry and Orientation," *Journal of American Ceramic Society*, Vol.27, No.7, 1964, p.320.
-