

〈論 文〉

홀로그래피 간섭계를 이용한 복합적층판의 결함측정

김석중* · 김재형* · 박현철**

(1994년 6월 7일 접수)

Nondestructive Inspection Method of Composite Laminated Plates by Holographic Interferometry

S. J. Kim, J. H. Kim and H. C. Park

Key Words: Holographic Interferometry(홀로그래피 간섭계), Time-Average(시간 평균), Real-Time(실시간), Composite Laminate Plate(복합적층판), Mode Shape(모드 형상), Debond(섬유와 기지층간의 분리), Membrane Resonance(막공진)

Abstract

Mode shapes and natural frequencies of vibrating laminated composite plates are taken using real-time and time-average holographic interferometry. Debonds and delamination in the laminated plates are measured nondestructively. During holographic testing of composite plates, it has been found that the conditions for the local resonance in debonds are strongly dependent on the frequency of excitation. A membrane resonance model was proposed to describe this behavior. Relations between characteristic length according to the size, shape of debonds and membrane resonance frequency are presented. Several experiments were performed to verify the membrane resonance model. The agreements between the predicted excitation frequency and the observed resonance frequency are good. The experimental results show that higher stresses and strains due to local resonance lead to the debond detection.

I. 서 론

복합재료는 높은 비강도, 비강성을 가지는 신소재로서 경량화를 요구하는 여러 구조물에의 사용이 확대되고 있다. 그러나 접착에 의한 접합으로 제작되는 복합적층판에서 흔히 발생하는 결함은 섬유와 기지층간의 분리(unbond), 기공(void), adhesive unbond 등으로 다양하며 접합부의 극한강도에 영향을 주는 요인도 접착부의 두께, 접합표면의 화학적인 조건, 접착방식, 습도와 노화효과(aging effect) 등으로 다양하기 때문에 적용된 접합의

신뢰도를 향상시키기 위한 검사의 필요성이 제기된다.⁽¹⁾ 이에 따라 접착에 의한 접합부위에서의 강도 예측과 결함의 측정을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 최근 들어 복합적층판에 대한 신뢰성을 높이기 위한 비파괴검사의 필요성이 증대되고 있는 추세이다.⁽²⁾

홀로그래피 간섭계는 물체의 표면에서 발생하는 변위의 양상을 간섭무늬의 형태로 측정하는 광학기술의 하나이며⁽³⁾ 오늘날에는 진동해석,^(4,5) 비파괴검사,^(6~8) 변형측정,⁽⁹⁾ 물질상수 측정,⁽¹⁰⁾ 유동의 가시화⁽¹¹⁾ 등 공학의 여러분야에 응용되고 있다. 홀로그래피 간섭계의 일종인 실시간 홀로그래피 간섭계(real-time holographic interferometry)와 시간평균 홀로그래피 간섭계(time average holographic

*정회원, 삼성종합기술원 광전자연구실

**정회원, 포항공과대학교 기계공학과

interferometry)로 진동 물체를 측정하면 진동 모드 형상과 고유 진동수 등을 직접 구할 수 있다.⁽¹²⁾ 또한 측정 대상물에 외부 응력을 가한 경우에 표면에서 일어나는 탄성 변형이 내부 구조와 관련을 맺고 있으므로 홀로그래피 간섭계를 이용하여 비파괴적인 방법으로 복합적 층판의 내부에 존재하는 결함을 측정하는 것이 가능하다.^(13~14) 지금까지 홀로그래피 간섭계를 이용하여 복합적 층판의 내부 결함을 측정한 예는 다양하지만 주로 결함 존재여부 및 위치 확인 등의 정성적인 측정에 국한되어 있는 것이 대부분이며^(15~17) 최근 들어 내부 결함을 정량적으로 측정하기 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있다.^(18~20)

본 연구에서는 결함이 내재된 복합적 층판에 동적인 응력인 진동 가진을 가하고^(21,22) 홀로그래피 간섭계로 고유 진동수 및 내부 결함을 측정한 결과를 제시하였다. 또한 결함 발견을 위한 가진 주파수 예측을 위해 막공진(membrane resonance)의 모델을 제시하였고 이를 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 시간 평균 홀로그래피 간섭계

본 연구에서는 주로 실시간 홀로그래피 간섭계 및 시간 평균 홀로그래피 간섭계를 이용하였다. 시간 평균법은 홀로그램이 기록되는 동안 측정 물체는 하나의 정지된 상으로 존재하는 것이 아니라 임의의 주파수에서 정현 진동(sinoidal vibration)하면서 필름이 노출되는 시간 동안 무수한 진동 주기를 가지게 된다. 이 방법을 이용하여 얻어진 홀로그램은 고유 진동수와 그 진동수에서의 진동 모드에 대한 정보를 포함하고 있으며 이 때의 간섭 무늬는 진동 진폭의 크기에 대한 정보를 가지고 있으므로 실험적으로 진동 해석을 수행하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

측정 대상물이 Fig. 1과 같이 정현 진동하고 있는 경우에 물체파는 다음과 같이 정의된다.

$$U_s(x, y, t) = U_s \exp[ik\gamma a(x, y) \cos \omega t] \quad (1)$$

여기서, $a(x, y)$ 는 측정 대상물 표면의 임의 점에서 진동 진폭을 나타내고 ω 는 측정 대상물의 고유 진동수이며 $\gamma = \cos \theta_1 + i \sin \theta_1$, $k = 2\pi/\lambda$ 이다. 이때 θ_1 은 적층 판의 수직변위 벡터 $a(x, y)$ 와 홀로그램으로부터 측정 대상물을 잇는 선(the line of sight of

the observer) 사이의 각을 나타내고 θ_2 는 수직변위 벡터 $a(x, y)$ 와 측정 대상물에 입사되는 물체파 간의 각을 나타내며 λ 는 사용된 레이저 광의 파장을 나타낸다. 대상물에서 진동이 측정되는 평면과 홀로그램이 평행하고 이들 간의 거리가 측정 대상물 두께의 5배가 넘는 경우에는 θ_1 의 값이 매우 작아지게 되며 그 결과 $\cos \theta_1 \approx 1$ 이 된다. 또한 측정 대상물에 조사되는 물체파가 홀로그램과 매우 가깝게 위치해 있고 진동이 측정되는 평면과 홀로그램 간의 거리가 측정 대상물 두께의 5배가 넘을 경우에는 θ_2 도 매우 작아지게 되고 $\cos \theta_2 \approx 1$ 로 가정할 수 있다. 물체파는 다음과 같이 정리된다.

$$U_s(x, y, t) = u_s \exp[i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t] \quad (2)$$

여기서, 측정 대상물이 정지해 있을 때 물체파의 복소 진폭 U_s 는

$$U_s = u_s \exp[i\phi_s] \quad (3)$$

이다. 또한 참조파의 복소 진폭 U_r 은

$$U_r = u_r \exp[i\phi_r] \quad (4)$$

이다. 여기서, ϕ_s 와 ϕ_r 은 각각 물체파와 참조파의 위상이다. 그러면 임의의 시간 t 일 때 홀로그램 평면에서의 강도 $I(t)$ 는

$$\begin{aligned} I(t) &\propto |U_r + U_s(t)|^2 \\ &= U_r U_r^* + U_s(t) U_s^*(t) + U_r^* U_s(t) + U_r U_s^*(t) \end{aligned}$$

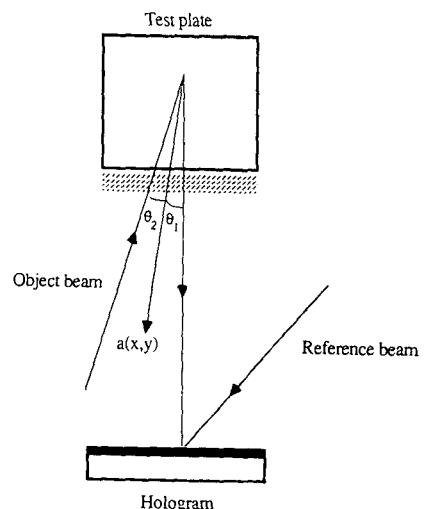


Fig. 1 Vibrational model

$$\begin{aligned}
 &= u_r^2 + u_s^2 + U_r^* U_s \exp\left\{i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right\} \\
 &\quad + U_r U_s^* \exp\left\{-i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

이다. 시간평균 홀로그래피 간섭계의 경우에는 전동주기 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 보다 충분히 긴 시간동안 노출하여 홀로그램상에는 진동주기중에 연속적으로 변하는 여러 위치에서의 대상물에 해당하는 간섭무늬를 기록하게 된다.

따라서 실제 기록된 홀로그램 평면에서의 강도는 전동주기에 대한 $I(t)$ 의 평균값인 $\langle I \rangle$ 가 타당하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \langle I \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt \propto u_r^2 \\
 &\quad + u_s^2 + \frac{U_r^* U_s}{T} \int_0^T \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right] dt \\
 &\quad + \frac{U_r^* U_s}{T} \int_0^T \exp\left[-i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right] dt
 \end{aligned} \tag{6}$$

이때 첫째항과 둘째항은 참조파와 같은 방향으로 회절없이 그대로 통과하는 빛을 나타내며 세째항은 참조파로부터 회절되어 원래 대상물의 허상을 나타낸다. 또한 네째항은 위상의 음의 요소로 실상을 나타낸다. 여기서, 대상물의 허상을 나타내는 세째항은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\int_0^T \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right] dt \\
 &= \frac{1}{\omega} \int_0^{2\pi} \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right] dt
 \end{aligned} \tag{7}$$

식(7)는 0차의 Bessel 함수로 표현할 수 있다. 즉

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{\omega} \int_0^{2\pi} \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \cos \omega t\right] d(\omega t) \\
 &= \frac{2\pi}{\omega} J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)\right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

그러면 재생을 위해 홀로그램에 참조파를 조사했을 때 대상물의 허상을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$U_{rec} = U_r^2 U_s J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)\right] \tag{9}$$

홀로그램 재생시 필름을 통하여 나오는 빛강도 (intensity)는 다음과 같다.

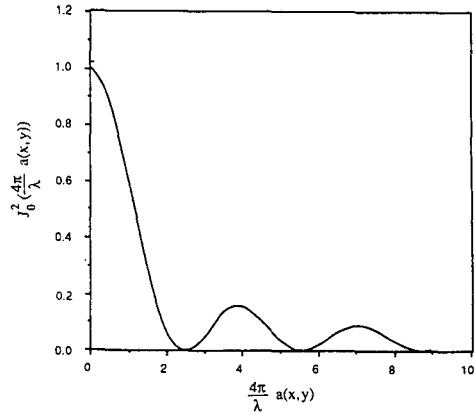


Fig. 2 Plot of $J_0^2\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)\right)$

$$I \propto U_{rec} U_{rec}^* = k J_0^2\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)\right) \tag{10}$$

이 식을 통해 시간평균 홀로그램에서 재생상의 강도는 J_0^2 분포에 의해 결정됨을 알 수 있다. $\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)$ 에 대한 $J_0^2\left(\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)\right)$ 함수의 극한값과 영점에 대한 과정을 Fig. 2에 표시하였다. Fig. 2의 그래프로부터 재생상에서 가장 밝은 부분은 $\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) = 0$, 즉 $a(x, y)$ 가 0이 되는 부분으로 적층판의 경우에 표면으로부터 수직방향으로 움직이지 않는 부분을 나타낸다. 또한 검은색 간섭 줄무늬들은 식(9), 식(10)에서 보는 바와 같이 진동진폭 $a(x, y)$ 를 변수로 갖는 Bessel 함수가 0이 되도록 하는 측정대상물 표면의 각 지점에 위치하게 된다.

3. 실시간 홀로그래피 간섭계

실시간법은 물체가 응력을 받지 않아 변형을 일으키기 전의 상태를 필름에 기록한 후 현상하여 원래의 위치에 필름을 정확하게 고정시킨 후에 참조파를 조사시키면서 물체에 변형을 주면 변형전의 파면과 변형되고 있는 상태의 파면이 서로 중첩을 일으켜서 간섭무늬를 형성하게 되므로 변형이 일어나고 있는 순간을 관찰하는 방법이다. 측정대상물이 표면수직 변위운동과 단순조화운동 (simple harmonic motion)을 동시에 하게 되는 경우를 실시간 홀로그래피 간섭계로 측정하게 되면 관찰되는 순간의 빛강도 분포 (beam intensity distribution)가 유도되고 이를 관찰하는 시간에 대해 적분한 값의 평균을 구하면 실시간법에서 실제로 관찰되는 간섭무

뇌에 대한 관계식을 얻을 수 있다. 시간평균법에서 와 같은 방법으로 실시간 홀로그램 재생시 필름을 통하여 나오는 빛강도에 대한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$I_R \propto 2k \left\{ 1 + \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} a_1(x, y) \right) J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} a_2(x, y) \right) \right\} \quad (11)$$

여기서, $a_1(x, y)$ 은 측정대상물의 표면수직변위를 나타내고 $a_2(x, y)$ 는 가진주파수에 영향을 받는 단순조화운동의 진폭을 나타낸다. 이 방법은 간섭무늬를 확인하는 시간이 적게 들 뿐만 아니라 진동주파수가 계속 변화하는 상태에서의 간섭무늬 측정이 가능하다는 잇점을 갖고 있기 때문에 측정대상물의 고유진동수 및 진동모드의 확인을 위한 유용한 방법으로 활용되고 있다.

4. 막공진을 이용한 결합측정의 원리

강제진동은 외부가진을 통해 어떤 계에 에너지를 전달하는 경우에 해당되는데 일반적으로 강제진동의 진폭은 가진력의 주파수가 그 계 자체의 고유진동수와 가까워지면 매우 커지게 된다. 이러한 상황은 공진(resonance)으로 정의되며 이때 야기되는 응력과 변형률은 매우 크다. 이를 적층판 내부의 결합확인에 응용할 수 있다. 즉 섬유와 기지간의 분리(debond)와 같은 결함이 위치한 부분의 상층을 하나의 등방성인 계로 가정한다. 이때 계 자체의 고유 진동수와 가진력의 주파수가 일치하도록 하면 공진때문에 측정표면에서도 결함이 위치한 부분을 다른 부분과 구분하는 것이 가능하다.

Fig. 3(a)와 같이 상층이 하중과 분리되어 있는 부분을 찾기위해 대상물에 가진을 할 경우의 수학적인 모델은 Fig. 3(b)와 같다.

국부적인 결함은 대상물 전체의 동적인 특성에 거의 영향을 미치지 못하나 국부적인 강성의 크기는 매우 큰 범위로 줄어든다. 따라서 결함은 Fig. 3(b)와 같이 측정대상물의 물성을 크게 변하지 않고 스프링의 강성은 결함의 둘레를 따라 지지되는 상층부의 정적인 강성에 의해 주어진다. 이러한 상황에서 결함이 위치한 부분의 상층에 의해 구성되는 판은 외부가진이 주어지면 시편 전체와는 별도로 공진이 가능해진다. 이 현상을 시간평균 홀로그래피

간섭계로 파악함으로써 내부 결함을 비파괴적인 방법으로 검사하는데 이용될 수 있다. 결함의 경계조건은 단순지지와 고정의 중간이라고 알려져 있지만 계산상의 편의를 위해 결함이 존재하는 부분의 상층부는 주변부가 고정된 판으로 가정하였다. 결함의 수학적인 모델은 얇은 원형판(circular diaphragm)으로 가정하였으므로 복원력은 판 자체에 의해 야기되며 두께가 일정한 얇은 원형판의 경우에 성립하는 운동방정식(constitutive equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{g_r^2 E}{\rho(1-\mu^2)} \nabla^2 (\nabla^2 y) \quad (12)$$

여기서, ρ 는 밀도, μ 는 푸아송비, E 는 영률(Young's modulus), g_r 는 원형판의 표면반지름(radius of gyration)을 나타내며 원형판의 두께가 h 일 때 $g_r = \frac{h}{12}$ 이다. 실제 실험에 사용된 시편은 복합재료 적층판으로 만들어져서 정확하게는 직교이방성재료이므로 해석적인 해를 구하는 방법으로는 등방성의 운동방정식인 식(12)을 사용할 수 없다. 그러나 여기에서는 실험에 필요한 정성적인 참조치를 구하고자 하는 것이므로 비교적 단순한 등방성재료에 관한식을 채택하였다. 가정된 원형판

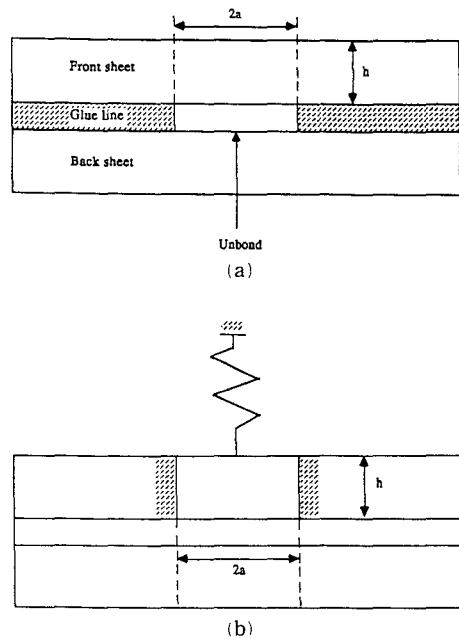


Fig. 3 (a) Typical model
(b) Mathematical model of a typical defect

이 정현진동하고 있다면 변위식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(r, q, t) = \Psi(r, q, t) e^{j\omega t} \quad (13)$$

변위식을 구성방정식에 대입하여 유도된 식의 해는 0차의 Bessel함수 J_0 와 수정된 1차의 Bessel함수인 I_0 의 항으로 표현되며 다음과 같다.

$$\Psi = AJ_0(Kr) + BI_0(Kr) \quad (14)$$

식(14)으로 주어진 해에 원형판의 경계조건을 대입하여 K 값을 구한 다음 고유진동수 ω 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\omega = k^2 K^2 \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} \quad (15)$$

주변부가 고정된 원형판의 막공진주파수는 다음과 같이 정리된다.

$$f_n = \frac{hn\pi}{2\sqrt{12}a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

여기서, h 는 결합의 상층부를 구성하는 층의 두께를 나타내며 a 는 원형판의 반지름, E 는 원형판 자체의 강성계수, ρ 는 밀도, μ 는 프와송비를 나타낸다. 식(16)은 Cawley의 실험식과 거의 같음을 알 수 있다.⁽²²⁾

5. 결합의 모양에 따른 막공진 주파수의 계산

실험에서는 홀로그래피를 이용한 비파괴검사에서 결합의 모양에 따른 차이를 관찰하기 위하여 결합의 모양을 직삼각형, 직사각형, 정사각형으로 만들었다. 결합의 모양이 직삼각형, 직사각형, 정사각형이므로 막공진 주파수에 대한 식(16)을 바로 적용할 수가 없었다. 결합의 막공진 주파수를 확인하기 위해서는 이를 결합을 원형 결합으로 유추(analogy)하여 반지름 a 인 원형결합과 이를 결합의 특성길이(characteristic length)와의 관계를 구한 다음 원형결합의 막공진주파수에 대한 식을 이용하여 각각 모양이 다른 결합의 막공진주파수를 구할 수 있다.

인접한 양변이 a 와 b 인 등방성 사각평판의 경계조건이 고정인 경우 박판이론(Thin plate theory)으로부터 구해지는 최대변위에 관한 식과 반지름이 R 인 원형평판의 경계조건이 고정될 경우 최대변위

에 관한 식을 깊이 h 에 관한 식으로 수정하면 다음과 같다.

$$h = \left[\delta \frac{12(1-\mu^2) Pa^4}{Ew_{\max}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

$$h = \left[\delta \frac{3(1-\mu^2) PR^4}{16Ew_{\max}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

여기서, P 는 평판에 적용되는 정압을 뜻하고 δ 는 단면 종횡비(aspect ratio)에 따른 상수이다. 적층판 단면의 종횡비가 1인 경우 $\delta=1.26 \times 10^{-3}$ 이고 단면 종횡비가 2인 경우 2.54×10^{-3} 이다.

원형모양의 결합과 사각형 모양의 결합이 시편의 측정표면을 중심으로 같은 깊이에 위치하고 있는 경우에는 앞의 두 식이 같다고 볼 수 있다. 이로부터 원형결합의 반지름 R 과 사각형결합의 한변의 길이 a 의 관계를 알 수 있다. 즉 단면 종횡비가 1인 정사각형 결합의 경우 $R=0.53289a$ 이고 단면 종횡비가 2인 직사각형결합의 경우 $R=0.63497a$ 이다. 모양이 다른 결합에 대해서도 같은 방법으로 원형결합의 반지름 R 과 특성길이간의 관계를 구하였다.

원형결합(반지름 R), 정삼각형 결합(한변의 길이 L), 직삼각형 결합(넓이 d^2), 직사각형 결합(aspect ratio가 2이고 짧은변의 길이가 a), 정사각형 결합(한변의 길이 a)의 막공진 주파수에 대한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$f_n = \frac{hn\pi}{2\sqrt{12}R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

여기서, 정삼각형 결합이면,

$$R=0.35529L$$

직삼각형 결합이면,

$$R=0.53992d$$

직사각형 결합이면,

$$R=0.63497a \text{ (aspect ratio=2)}$$

직사각형 결합이면,

$$R=0.5328a$$

식(19)에서 결합이 내재된 깊이를 0.67 mm로 할 때 주변부가 고정된 원형판의 막공진주파수와 특성길이의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 결합의 모양은 원형이고 $h=0.67$ mm의 조건이 주어졌을 때 식(19)을 이용해서 막공진주파수 f_n 와 특성길이 R 과의 관계를 n 의 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 그림으로부터 결합의 깊이가 깊고 크기가

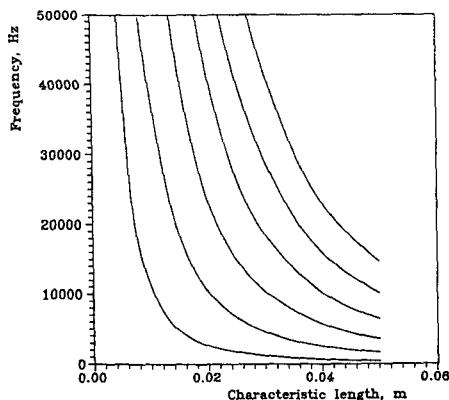


Fig. 4 Frequency vs. Characteristic length relation, given $h=0.67$ mm, in circular debond

작을수록 결함을 발견할 수 있는 가진주파수의 값이 커지게 됨을 알 수 있다. 주어진 결함의 깊이에서 결함크기에 따른 막공진주파수를 실험을 통해 찾아내어 막공진 주파수와 특성길이와의 그래프인 Fig. 4에서 실험과 이론에서의 막공진주파수를 비교할 수 있다. 내재된 결함을 찾는데 있어서 제약 조건은 결함의 깊이와 크기에 관련되어 있다. 즉 결함이 깊을수록 찾기가 힘들고 크기는 작을수록 찾기가 힘들어진다.

6. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 재료는 한국화이바(주)에서 만든 유리섬유 prepreg를 [0/90/0/90], [0/90/0]으로 적층한 유리섬유강화 수지적층판(glass-epoxy laminate)이며 backing재료로 알루미늄판을 사용하였다. 여기에 사용된 유리섬유수지의 물성치는 단순 인장실험(simple tension test)을 통해 구하였고 Table 1과 같다. 그리고 시편의 밀도는 측정결과 1.97 g/cm^3 이었다. 복합적층판 시편은 가로×세로가 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 두께는 알루미늄의 두께

1.5 mm를 포함하여 2.5 mm와 4.0 mm의 두 종류로 되어있고 결합으로 적층판(glass-epoxy laminate)의 각층 사이 및 적층판과 알루미늄판 사이에 두께 0.2 mm의 테플론 테이프(Teflon tape)를 삽입하였다. 시편을 Fig. 5에 나타내었다. 결합의 깊이에 관한 조사를 위하여 결합의 모양과 깊이를 조합으로 하여 몇 가지의 경우(group)로 나누었다. 본 실험에서는 먼저 결합이 계획된 복합적층판의 한변을 고정시킨 후에 뒷면인 알루미늄판에 압전소자를 부착시켜 판을 가진시킴으로써 저주파수에서 고유진동수 및 진동모드의 확인을 하였다. Fig. 6은 진동 및 결함을 측정하기 위한 장치도를 나타낸 것이다. 실시간 홀로그래피 간섭계를 구성하는데는 thermoplastic recorder를 이용하였다. 가진장치에 대한 개략도는 Fig. 7에 나타내었고 사용된 가진기는 압전소자(Piezoelectric material)를 사용하였다.

고유진동수와 진동모드의 확인을 위하여 먼저 실시간법을 이용하여 실시간으로 간섭무늬를 관찰하

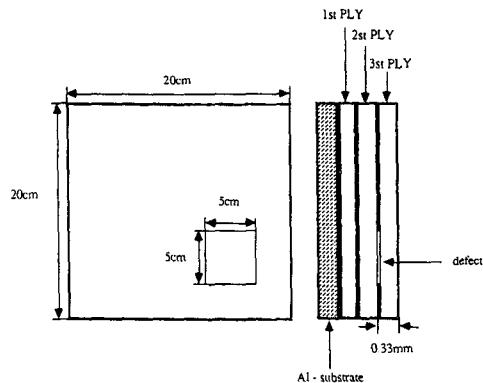


Fig. 5 Programed disbonds in glass-epoxy prepbonded to a Al-Substrate

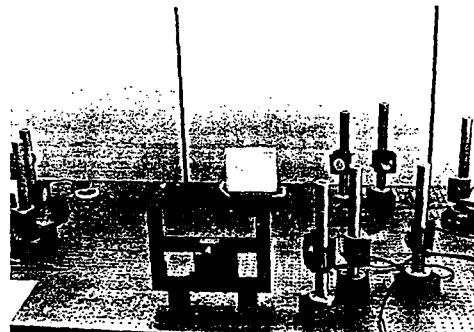


Fig. 6 Photograph of the holographic interferometry system

Table 1 Properties of glass/epoxy cross-ply laminates

	1ply	2ply	3ply
$E_L(\text{GPa})$	42	20	8.25
$E_T(\text{GPa})$	8.25	20	8.25
μ_{LT}	0.25	0.04	0.25

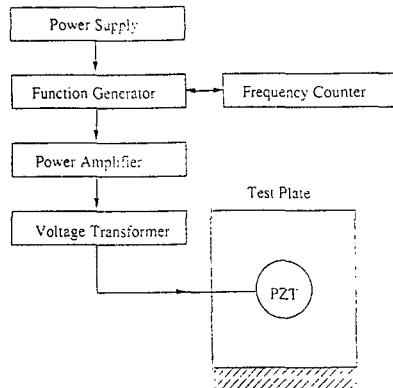


Fig. 7 Schematic diagram of excitation system

면 측정물체의 표면에 형성되는 래스터 줄무늬들 (raster fringes)이 시간평균법과 유사하게 0차의 Bessel함수로 표현되며 측정대상물에서 정지된 부분이 가장 높은 명암의 대조를 나타내므로 특정한 진동모드에서는 노드선(node line)이 존재하는 부분이 관찰하기가 가장 쉽다. 일반적으로 모드간의 분리는 가진위치를 적절하게 배치하는 방법이 효과적이다. 실제 실험과정에서 각각의 진동모드를 기록함에 있어서 가진기의 위치를 계속 재배치해야만 비교적 정확한 진동모드를 얻을 수 있다. 가진주파수를 변화시키면서 진동모드를 확인한 경우에는 그 때의 주파수를 기록하고 시간평균 홀로그램을 이용하여 정확한 모드측정을 하게 된다. 결함측정을 위한 주파수 대역은 측정대상물의 진동모드를 구하기 위한 주파수 대역과 구분된다. 복합적층판에 대해 중간 주파수 대역 이상에서 높은 주파수 대역으로 가진진동수를 증가시켜가면 결함이 존재하는 부분의 상층에 대한 막공진 주파수에 도달하고 그 때의 시간평균 홀로그램을 얻음으로써 결함의 위치, 크기, 모양등에 대한 정보를 얻게 된다. 실험에서 가장 주의깊게 찾아야 하는 것은 찾고자 하는 결함의 막공진이 일어나는 주파수를 알아내고 검사시편에 이 주파수를 적용하여 가진시키는 문제이다. 막공진 주파수는 결함의 크기(모양)와 깊이에 관계되는 계수이므로 넓은 주파수 대역에 대해 측정되어야 다양한 크기와 깊이에 걸친 결함이 파악이 가능해진다.

7. 복합적층판의 진동 및 결함측정

시간평균 홀로그램을 이용하여 저주파수 대역에

서 결함이 있는 복합적층판의 고유진동수와 그 때의 진동모드를 기록한 예를 Fig. 8에 나타내었다. 실험에 사용된 복합적층판은 터빈 블레이드나 임펠러 블레이드의 0차 모델로 생각할 수 있는 한변고정으로 이 고정단에 평행한 노드선(nodal lines)의 수를 n 으로 나타내고 수직인 노드선(nodal lines)의 수를 m 으로 나타내고 있다. 일반적으로 측정물체의 경계조건은 낮은 주파수 대역에서의 진동모드에 더 밀접한 관련을 맺고 있으므로 정확한 진동모드의 측정은 $(0, 0)$ 로부터 $(3, 3)$ 모드까지 총 16개의 진동모드 측정을 수행하였으며 측정된 진동모드들과 고유진동수를 Fig. 8에 나타내었다. 홀로그래피는 진동모드 형태를 간섭무늬의 형태로 나타내 주기 때문에 해석이 간단하고 정확한 정보를 얻을 수 있다. 클라드니형태(Chladni patterns)는 충분한 진동의 크기가 주어질 수 있는 상황에서 대상물의 외부평면에 대한 노드선(node lines)을 제공할 수는 있지만 진동의 비노드 지역(antinodes) 내의 진동크기에 대한 양상을 제공하지는 못한다. 간섭무늬와 변위와의 관계식은 식(10)의 I 값에서 결정되는데 $I=0$, 즉 $I \propto U_{rec} U_{rec}^* = k J_0^2 \left[\frac{4\pi}{\lambda} a(x, y) \right] = 0$ 이 되는 곳이 홀로그램상에서 변위가 있는 어두운 부분에 해당하고 나머지는 변위가 없는 nodal point인 밝은 부분에 해당한다. 움직이지 않는 고정부는 가장 밝은 무늬에 해당한다. 이 고정부분을 기준으로 해서 i 번째 어두운 무늬의 변위 $a(x, y)$ 는 Bessel함수의 i 번째 해인 $\xi_i [J_0(\xi_i) = 0, \xi_i = \frac{4\pi}{\lambda} a(x, y)]$ 을 통해 얻어진다. 이렇게 구해진 변위의 분포를 가장 큰 변위로 나누어서 normalized coordinate를 얻었다.⁽²⁰⁾

측정된 진동모드들 중에서 $[0, 0]$ 모드 및 $[2, 1]$ 모드에 대해 진폭분포의 양상을 기준선에 대한 그래프로 나타낸 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

홀로그래피 간섭계를 이용하여 구한 고유진동수와 단순인장실험을 통해 구한 물성치들을 사용하여 NASTRAN을 이용하여 수치적으로 구한 고유진동수의 비교를 Table 2에 나타내었다. 이중에서 $[1, 1]$ 모드가 나타나는 고유진동수는 약 10% 정도의 차이가 나는 반면에 나머지 모드들이 나타나는 고유진동수들은 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 고주파수로 갈수록 진동형상을 적층만의 물리적인 특성인 크기과 내부구조에 따라 민감하게 변화하므로 내부 결함의 측정을 위해서는 비교적 높은 주파수 대역에서 진동형상 모드와 고유진동수

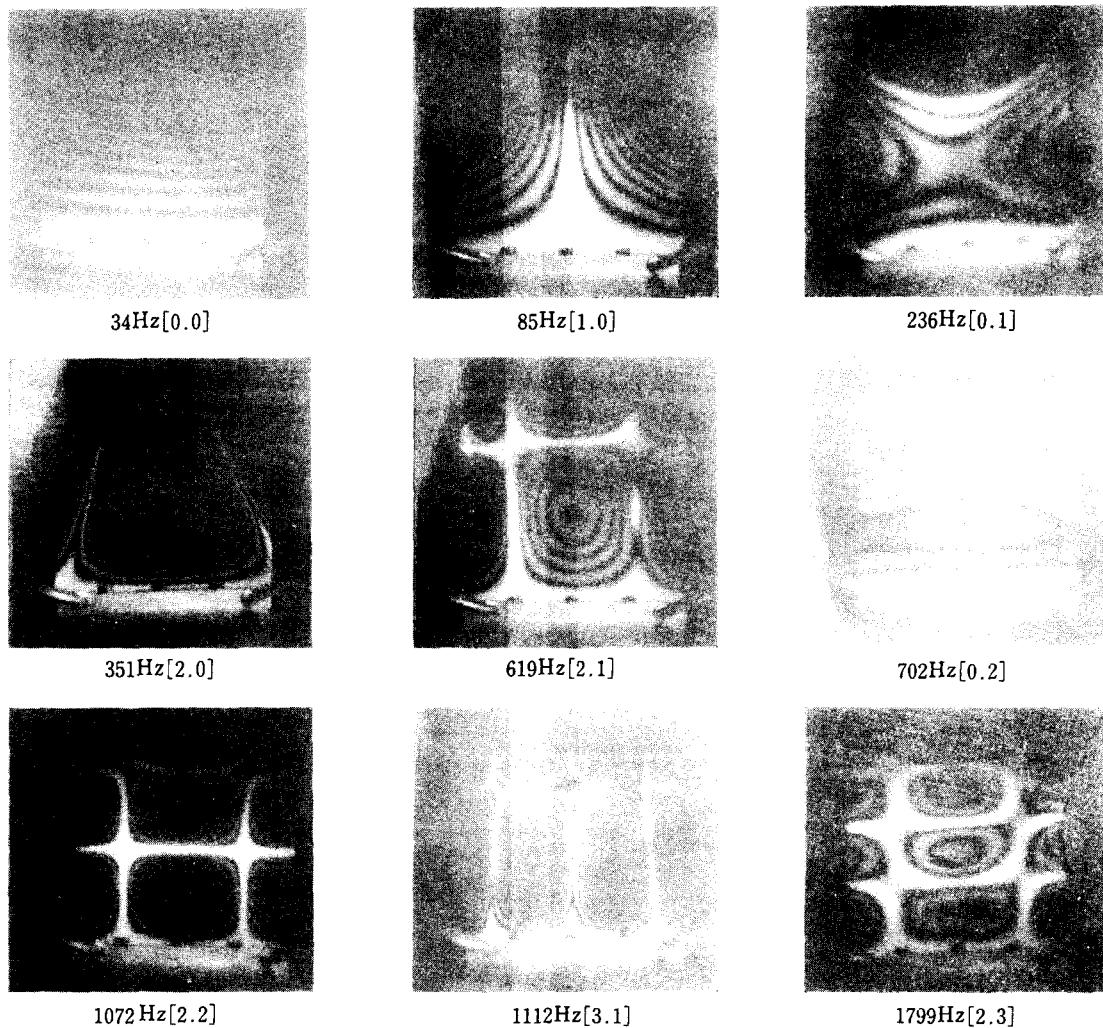


Fig. 8 Vibration modes of glass/epoxy cross-ply laminate with a Al-substrate having local debonds

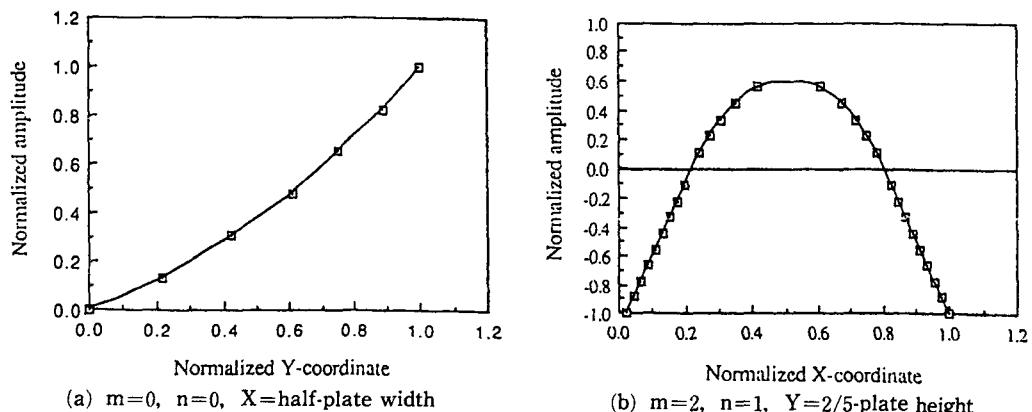


Fig. 9 Experimental mode shapes for the glass/epoxy cross-ply laminate with a Al-substrate having local debonds

측정이 필요하다. 본 실험에 사용된 복합적층판들의 경우에는 중간 주파수 대역인 6~7KHz 이상에

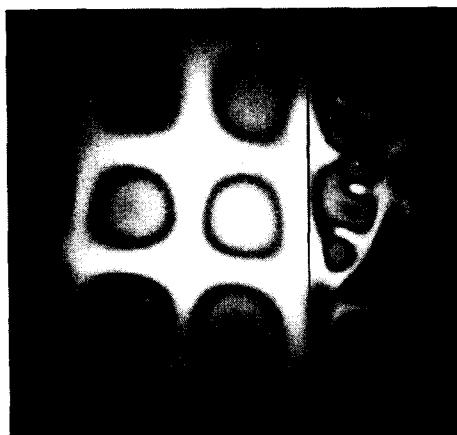
서 적층판 자체의 진동모드가 사라지게 되고 결함을 나타내는 국부적인 간섭무늬가 나타나는 것을 관찰할 수 있었으며 이를 통해 결함의 존재유무를 확인할 수 있었다.

그리고 적층판의 크기에 대한 결함의 상대적인 크기가 큰 층간분리의 경우에는 저주파수 대역에서는 진동모드에 일정정도의 교란이 나타나게 되며 이를 통해 결함의 존재여부를 확인할 수 있었다. 가로, 세로의 길이가 20cm인 적층판 면적의 1/4에 해당하는 면적에 대한 층간분리가 이루어진 경우에 이를 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

작은 결함을 확인하는데 먼저 실시간법을 이용하였다. 실시간법에서 관찰할 수 있는 간섭무늬는 정

Table 2 Comparison of the four lowest natural frequencies in experimental and analysis

	Experiment(Hz)	NASTRAN(Hz)
First bending	34	39
First torsion	85	85
Second bending	236	234
[1, 1]mode	321	294

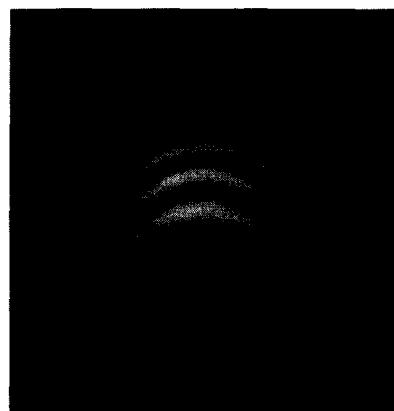


(a) 2967 Hz

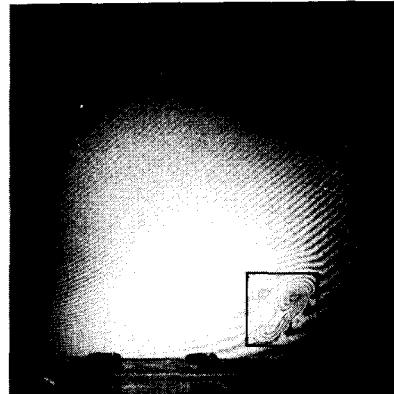


(b) 6007 Hz

Fig. 10 Holographic reconstruction of a sample having a 5 cm wide strip of debonded area across its entire width and being acoustically driven in 0.33 mm depth



(a)



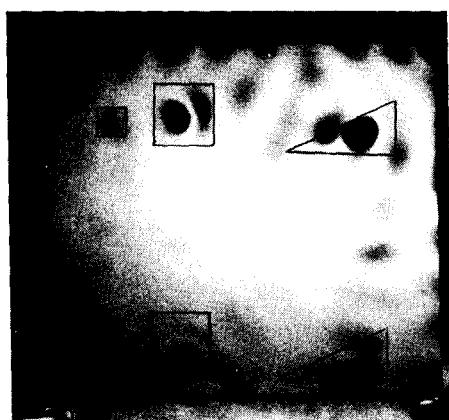
(b)

Fig. 11 Real-time holographic interferogram of a sample having (a) right-angled triangular area, 4 cm × 9 cm (height × base), of debond in 0.33 mm depth and (b) square area, 5 cm × 5 cm, of debond in 0.33 mm depth

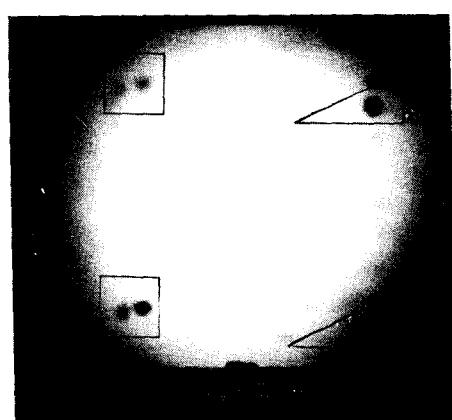
현진동으로 인한 간섭무의와 표면수직방향으로의 운동으로 인해 야기되는 간섭무늬의 중첩으로 이루어져 있음을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(b)는 밑변이 9 cm이고 높이가 4 cm이며 깊이가 0.33 mm에 위치한 직삼각형결합에 대해 시간의 변화에 따른 실시간 홀로그램을 나타내고 있으며 Fig. 11(a)에는 가로와 세로의 길이가 5 cm이고 깊이가 0.33 mm인 정사각형 결합에 대한 실시간 홀로그램을 나타내었다. 이때 표면수직방향의 운동으로 인해 야기되는 간섭무늬는 결함이 위치한 부분에서 일어나는 큰 변형률로 인해 국부적인 교란이 발생함을 알 수 있고 정현진동으로 인한 간섭무늬는 결함을 구성하는 판의 공진으로 인해 나타남을 측정할 수 있다.

외부가진에 의해 적층판이 진동할 때 낮은 주파수 대역에서 높은 주파수 대역으로 가진주파수를

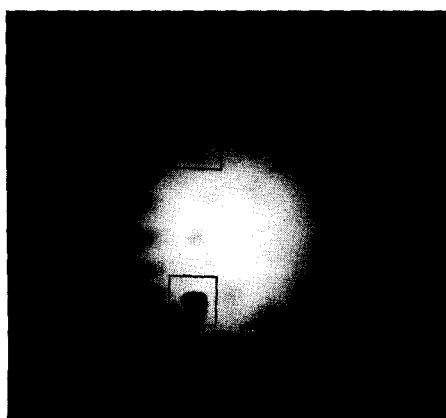
변화시키는 과정에서 결함이 위치한 부분은 특정한 주파수에서 급격한 공진현상을 나타나게 되며 그 결과 결함을 나타내는 반점모양을 관찰할 수 있다. 이와같이 실시간법을 이용하여 먼저 내재된 결함이 잘 나타나는 주파수를 확인한 다음 시간평균 홀로그래피 간섭계로 적층판 내부에 위치한 결함을 파악하였다. 결함을 잘 나타내는 주파수를 실시간법으로 구한 다음 적층판을 가지면서 시간평균 홀로그램을 얻은 결과 결함이 존재하는 부분에서는 결함이 위치한 부분의 상층부로 구성되는 판은 막공진으로 인하여 정상적인 부분에 비해 매우 높은 고유진동수를 가짐을 나타내는 일정한 크기의 반점으로 이루어진 간섭무늬를 얻음으로써 결함에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 특정 주파수에서 가로와 세로의 길이가 3 cm, 3 cm인 정사각형, 밑변의 길이가 6 cm, 높이가 3 cm인 직삼각형 결합을 [0/



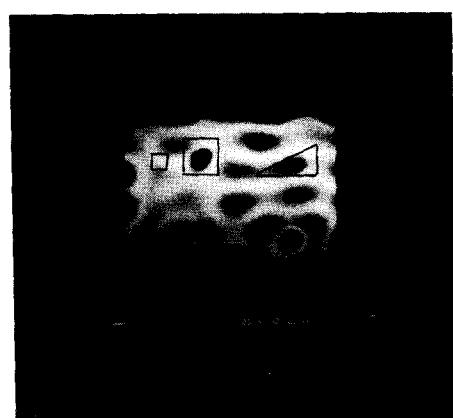
(a) 8 KHz in 0.99 mm depth



(c) 8 KHz in 1.98 mm depth



(b) 5 KHz in 0.99 mm depth

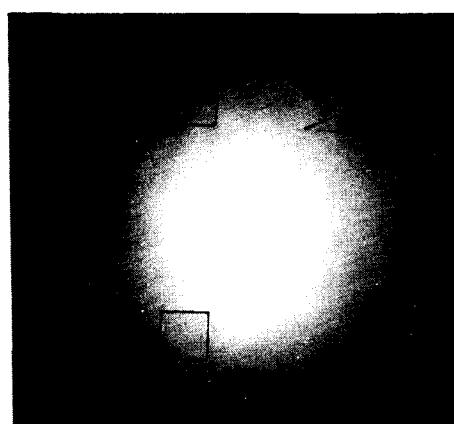


(d) 5 KHz in 1.98 mm depth

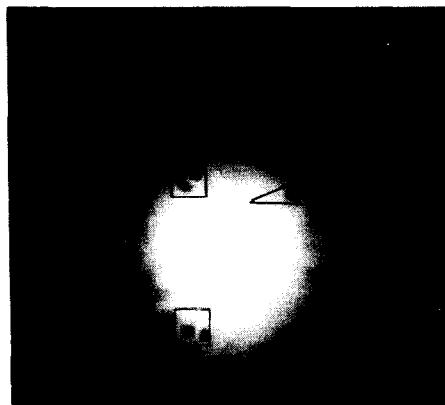
Fig. 12 Time-average holographic interferogram of a sample having debonds driven

$90/0/90]_s [0/90/0]$ 으로 적층한 적층판에 깊이가 0.99 mm , 1.98 mm 되도록 삽입한 시편에 대해 시간평균법으로 결합을 측정한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그리고 내재된 결합의 모양을 실선으로 추가하여 비교할 수 있게 표시하였다. 중간주파수 대역에서 시편을 가진하는 경우에는 결합의 크기와 모양, 깊이에 따른 막공진주파수들 간의 차이가 크지 않으므로 시편의 전영역에 대한 다양한 결합의 존재여부를 확인하는데 이용이 가능함을 그림을 통해 알 수 있다. 그러나 가진주파수가 높아짐에 따라 결합의 크기, 모양, 깊이 등에 의해 결정되는 막공진주파수의 차이가 커지므로 특정한 결합만을 측정할 수 밖에 없고 다른 모양이나 깊이의 결합을 측정할 가능성이 줄어들게 된다. 가진주파수의 진폭을 크게 해주면 어느 정도까지 결합을 나타내는 반점의 선명도는 향상이 되지만 적층판 자체의 진동으로 인한 간섭무늬가 나타나게 되므로 진폭의 크기는 적정한 수준에서 조정되어야 한다. Fig. 12와 동일한 복합적층판에 대해 가진주파수를 높였을 때의 홀로그램을 Fig. 13에 나타내었다.

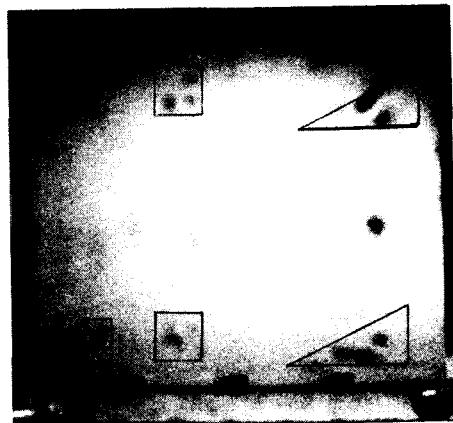
또한 결합의 크기와 모양, 깊이가 각기 다른 시편에 대해 홀로그램을 제작하였다. 가로와 세로의 길이가 각각 5 cm 이고 깊이가 0.33 mm 인 정사각형결합의 경우에 대한 측정결과는 Fig. 14(a), (b)에 나타내었고 Fig. 14(c), (d)에는 내재된 깊이가 0.67 mm 이며 동일한 크기를 가진 정사각형결합에 대해 측정한 결과를 나타낸 것이다. 밑변이 9 cm 이고 높이가 4 cm 이며 깊이가 0.33 mm , 0.67 mm 인 직삼각형결합들에 대한 측정결과는 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14와 Fig. 15에서 같은 모양의 결합의 경우 결합 깊이가 0.67 mm 일 때 가진주파수가 높음을 알 수 있다. 이로부터 막공진주파수는



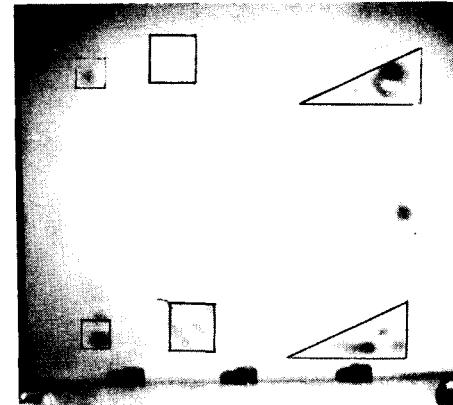
(a) 22.1 KHz in 0.99 mm depth



(b) 16.5 KHz in 0.99 mm depth



(c) 23.4 KHz in 1.98 mm depth



(d) 35.5 KHz in 1.98 mm depth

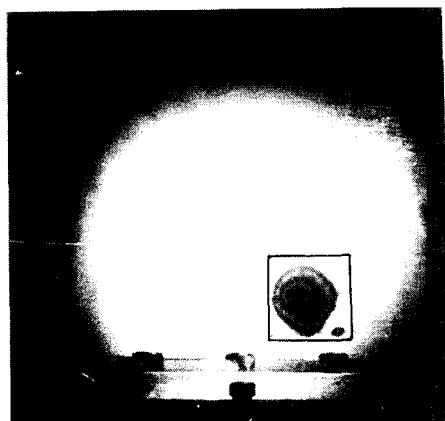
Fig. 13 Time-average holographic interferogram of a sample having debonds driven

결합깊이가 깊을수록 높아짐을 알 수 있다. Fig. 16에는 밀변의 길이가 10 cm이고 높이가 5 cm인 직삼각형 결함과 가로, 세로의 길이가 5 cm인 정사각형결함을 깊이 0.33 mm, 0.67 mm에 삽입한 시편에 대해 결함들을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 17은 깊이가 0.99 mm에 위치해 있고 밀변이 6 cm, 높이가 3 cm인 직삼각형 결함 2개와 가로, 세로의 길이가 3 cm이고 내재된 결함의 깊이가 1.98 mm인 정사각형 결함을 가지고 있는 시편에 대해 결함을 측정한 결과이다.

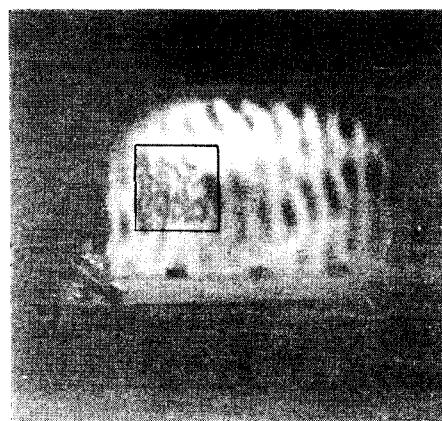
결함의 깊이가 측정표면으로부터 가까울수록 결함을 나타내는 반점이 조밀하므로 같은 크기와 모양을 가진 결함에서도 깊이가 깊을수록 높은 고유진동수를 가짐을 알 수 있다. 결함의 모양에 따른 차이를 비교한 결과 특히 삼각형 결함이 잘 측정됨

을 알 수 있었다. 이와같이 내재된 결함이 잘 나타나는 특정주파수 근처에서 적층판을 가진한 결과 결함의 크기와 모양등에 대한 정보를 획득할 수 있었다.

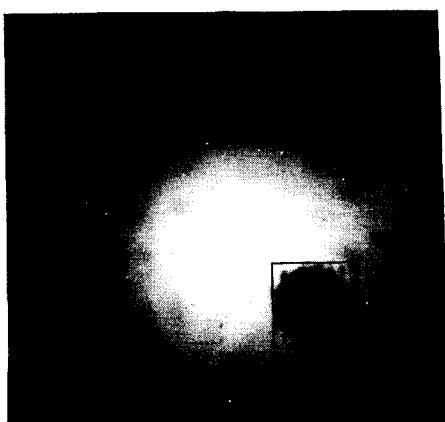
막공진의 원리를 통해 구해진 식(19)을 적용할 때 사용되는 상수는 결함의 깊이에 따라 달라진다. 결함이 위치한 부분을 하나의 등방성한 계로 가정하였으므로 식(19)을 적용할 때 E 의 값은 Table 1의 E_L 과 E_T 의 평균값을 썼다. 이 때 쓰이는 E_L 과 E_T 는 결함의 깊이에 따라 다르다. Table 1에 E_L 과 E_T , 푸아송비를 결함의 깊이가 0.33 mm일때는 1 ply에 0.67 mm일때는 2 ply에, 0.99 mm일때는 3 ply에 다르게 나타내었다. 그리고 밀도는 층에 관계없이 1.97 g/cm^3 을 썼다. 마지막으로 식(19)에 사용되는 상수를 결함의 깊이에 따라 Table 3에



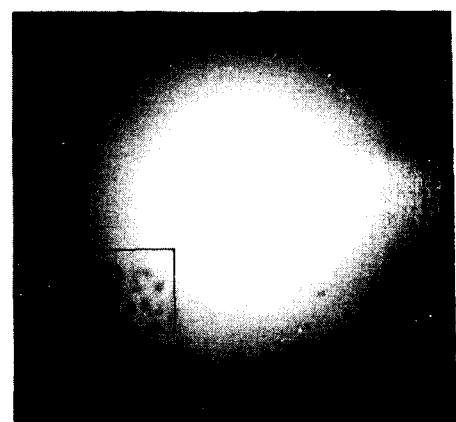
(a) 10 KHz in 0.33 mm depth



(c) 17.5 KHz in 0.67 mm depth



(b) 10.2 KHz in 0.33 mm depth



(d) 17.5 KHz in 0.67 mm depth

Fig. 14 Time-average holographic interferogram of a sample having square debond, $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, driven

Table 3 Physical constant in Membrane resonance frequency

h(mm)	E(GPa)	μ	$\rho(\text{Kg/m}^3)$
0.33	25.125	0.25	1970
0.66	20.000	0.04	1970
0.99	25.125	0.25	1970

나타내었다. R 의 값은 식(19)에 따라 결합의 모양에 다르게 적용하여 주었다.

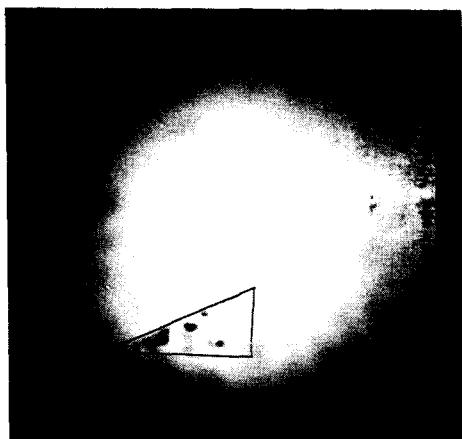
식(19)에 사용되는 정수 n 은 다음과 같이 결정된다. 결합깊이 h 는 복합적층판의 1 ply의 두께의 정수배가 된다. 이는 결합이 층간분리이기 때문이

다. 또 결합깊이 h 는 시편의 두께보다 클 수 없다. 그래서 h 가 가질수 있는 범위는 유한하게 정해진다. 결합의 깊이 h 는 mt 가 되고 m 은 유한한 개수의 정수이다. 각각의 h 에 대하여 강성계수 E , 밀도 ρ , 푸아송비 μ 는 구해진다.

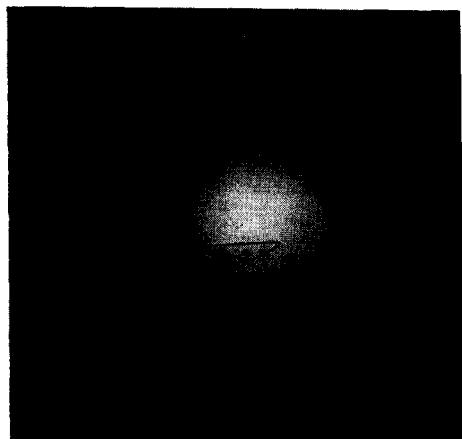
m 에 대해서 h 는 mt 가 되고 t 는 미리 측정할 수 있는 1 ply의 두께이다. 그리고 결합깊이 h 에 대하여 강성계수 E , 밀도 ρ , 푸아송비 μ 는 미리 구해진 값이다. 실험에서 구한 홀로그램에서 특성길이 R 은 구할 수 있다. 이런 조건에서 다음과 같은 관계식이 나온다.

$$hn = C$$

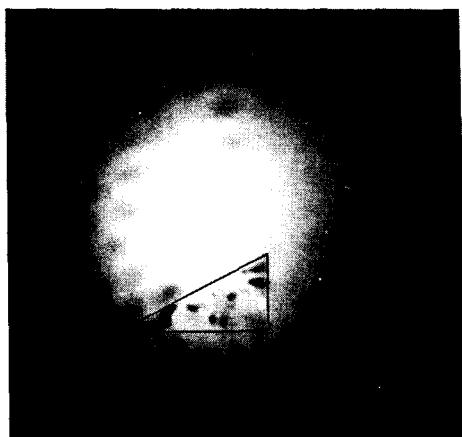
여기서, C 는 실험을 통해 구해지는 상수이다.



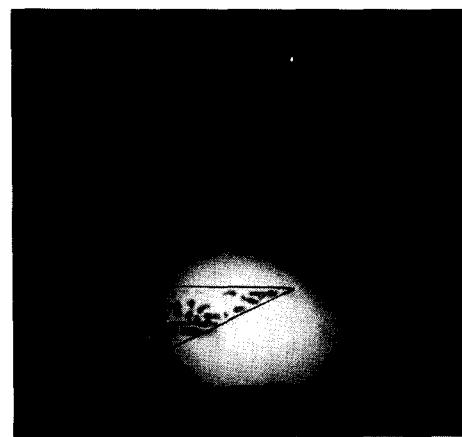
(a) 18.5 KHz in 0.33 mm depth



(c) 19.7 KHz in 0.67 mm depth



(b) 18.6 KHz in 0.33 mm depth



(d) 19.9 KHz in 0.67 mm depth

Fig. 15 Time-average holographic interferogram of a sample having right-angled triangular debond, 4 cm × 9 cm, driven

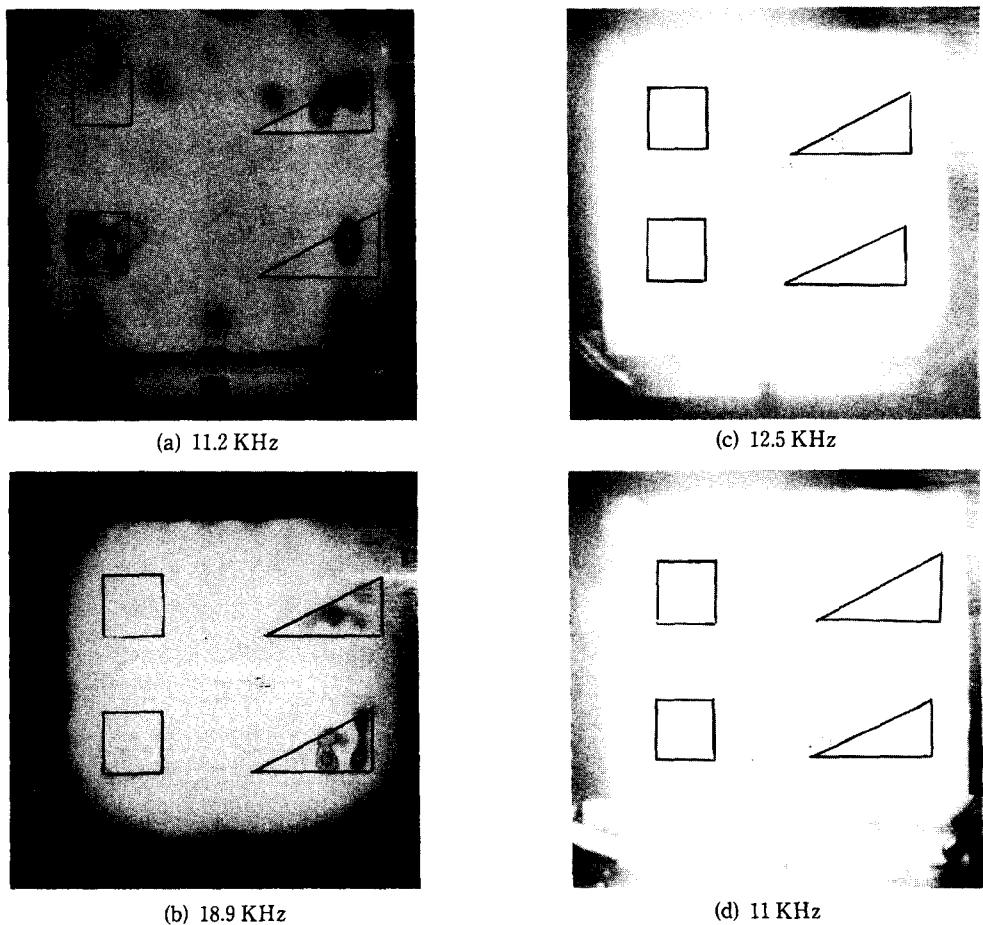


Fig. 16 Time-average holographic interferogram of a sample having right-angle triangular debonds, 5 cm \times 10 cm, and square debonds, 5 cm \times 5 cm, in 0.33 mm depth and in 0.67 mm depth

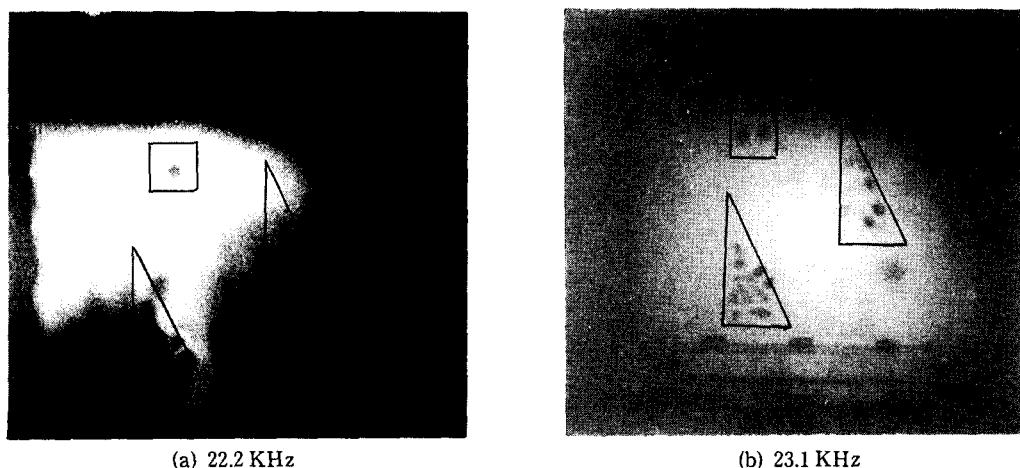


Fig. 17 Time-average holographic interferogram of a sample having right-angled triangular debond, 3 cm \times 6 cm, in 0.99 mm depth and one square debond, 3 cm \times 3 cm, in 1.98 mm depth, driven

$h=mt$ 임을 이용하면

$$mn=C/t$$

여기서, m , n 은 정수이고 C 는 실험에서 구해지는 상수이고 t 는 1 ply의 두께이다. m , n 이 정수이므로 C/t 는 정수가 되어야 한다. C/t 는 실험에서 미리 구할 수 있다. C/t 가 정확하게 정수가 되어야 실험에서 더욱 분명한 막공진현상을 관찰할 수 있다. 실험에서 삽입된 결합의 깊이를 알고 있으므로 m 은 구할 수 있다. m 에 대해 이 과정을 수행하여 정수인 n 을 구한다.

실험에서 구한 흔로그램 Figs. 14~17을 가지고 식(19)을 검증하였다. 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 특성길이를 구하는 방법은 식(19)의 조건에 따랐다. Fig. 15의 경우 식(19)에 나타나 있지 않은 결합의 모양이다. 그러나 결합의 면적을 d^2 으로 하는 d 를 가지고 직각삼각형 결합으로 여기고 식(19)을 적용하면 된다. Fig. 16, Fig. 17의 흔로그램을 식(19)에 적용하여 Table 4를 만들 때는 여러개의 결합 중에서 반점이 조밀한 결합의 특성길이와 물성을 썼다. 이는 반점이 조밀할 수록 공진이 정확히 일어났기 때문이다. 이런 사실을 통해 실험에서 결합을 잘 나타내는 특정주파수는 막공진

의 원리를 통해 구해진 식(19)에서 구한 막공진주파수와 거의 일치하는 값을 가짐을 알 수 있었다.

실제 실험에서 막공진주파수를 찾기 위해 넓은 주파수대역에서 시편을 가진시켜 주면서 실시간 흔로그램으로 간섭무늬를 관찰하였다. 이 과정은 많은 시간이 걸리고 막공진주파수가 순간적으로 발견되기 때문에 매우 힘이 든다. 그러나 식(19)에서 특성길이 R 과 정수 n 을 제외하고는 모두가 이미 구하여진 물성이므로 쉽게 막공진이 생길 수 있는 몇 개의 주파수를 구할 수 있다. 구해진 주파수로 가진시켜보면 막공진에 의해 생기는 결합무늬를 쉽게 찾을 수 있다.

또 결합의 깊이 예측의 가능성을 제공한다. 결합이 발견되는 가진주파수를 알고 흔로그램을 통해 특성길이를 측정하면 결합의 깊이를 예측할 수 있다. 깊이 예측의 과정은 다음과 같다.

결합의 깊이 예측은 정수 n 을 구하는 과정에서 사용했던 식 $mn=C/t$ 에서 할 수 있다. 결합의 깊이 h 는 mt 가 되고 m 은 유한한 갯수의 정수이다. 각각의 m 에 대하여 강성계수 E , 밀도 ρ , 포아송비 μ 는 구해진다.

각각의 m 에 대해 실험을 통해 C/t 를 미리 구할 수 있다. C/t 의 값이 정수이어야 가정한 m 이 맞

Table 4 Comparison of experimental and theoretical frequency

Hologram	Experimental frequency(KHz)	Theoretical frequency(KHz)	n
Fig. 14(a), (b)	10.2	10.1	13
Fig. 14(c), (d)	17.5	17.7	13
Fig. 15(a)	18.5	18.4	17
Fig. 15(b)	18.6	18.4	17
Fig. 15(c)	19.7	19.0	10
Fig. 15(d)	19.9	19.0	15
Fig. 16(a)	11.2	11.4	15
Fig. 16(b)	18.9	18.9	14
Fig. 16(c)	12.5	12.4	16
Fig. 16(d)	11.0	10.9	14
Fig. 17(a)	22.2	25.2	4
Fig. 17(b)	23.1	25.2	4

는 것이다. C/t 에서 미리 가정한 정수 m 을 나누어 주면 n 의 값은 구해진다. 구해진 n 의 값이 정수이면 결합깊이 $h=mt$ 가 가능하고 n 의 값이 정수가 아니면 m 의 가정이 잘못되어 가능한 결합의 깊이는 없음을 나타낸다. 각각의 m 에 대하여 같은 과정을 해보면 가능한 결합의 깊이가 나오게 된다.

결합의 깊이가 0.33 mm인 Fig. 14(a), (b)의 경우를 살펴보면 다음과 같다. 가능한 m 은 1, 2, 3이다. m 이 1일 때 C/t 가 13.12가 된다. 실험의 오차를 생각하여 C/t 를 13이라 하면 $n=13$ 이 되어 n 이 정수라는 조건에 만족한다. 그래서 예측된 결합의 깊이는 1 ply의 깊이가 된다. m 이 2일 때 C/t 가 15.15가 된다. C/t 를 15라 하면 $n=7.5$ 가 되어 n 이 정수라는 조건에 만족하지 못한다. m 이 3일 때 C/t 가 13.12가 된다. C/t 를 13이라 하면 $n=4.3$ 이 되어 n 이 정수라는 조건에 만족하지 못한다. 전체적으로 예측된 깊이는 0.33mm이다.

다른 경우에 대해서도 이 과정을 수행해 보면 실제 결합깊이와 예측된 결합 깊이가 비슷함을 알 수 있다. 정확한 깊이 h 는 C/t 값이 얼마나 정확한가에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

8. 결 론

홀로그래피 간섭계를 이용하여 복합적층판의 진동측정 및 결합측정을 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 저주파수 대역에서 정확한 진동모드와 고유진동수를 측정하였다. 그리고 삽입된 결합의 위치는 진동모드의 왜곡이 나타나는 위치와 일치함을 확인하였다.

(2) 큰 결합의 경우에는 저주파수 대역에서, 국부적인 결합의 경우에는 고주파수 대역에서 진동모드의 왜곡이 확인되었다. 이로부터 결합이 클수록 막공진주파수가 작아짐을 알 수 있었다.

(3) 결합의 깊이가 커짐에 따라 막공진 주파수가 증가함을 확인하였다. 그리고 결합의 막공진주파수는 결합의 모양과 크기에 따라 다름을 확인하였다.

(4) 결합의 크기와 모양에 따른 변수인 특성길이와 결합이 내재된 깊이와 막공진주파수의 관계를 막공진의 원리를 이용하여 제시하였고 실험을 통해 검증하였다. 이로부터 복합적층판에 있는 층간분리에 의한 결합의 깊이와 특성길이를 알면 결합에 공진을 일으키는 가진주파수를 구할 수 있게 되었다.

후 기

이 논문은 1993·1994년 교육부 지원 학술진흥재단의 학술연구 조성비에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Agarwal, B. D. and Broutman, L. J., 1980, *Analysis and Performance of Fiber Composites*, John Wiley & Sons.
- (2) Johnes, T. S. and Berger, H., 1989, "Application of Nondestructive Inspection Methods to Composites," *Materials Evaluation*, pp. 390~400.
- (3) Leith, E. N. and Upatnieks, J., 1963, "Wave Reconstruction with Continuous-Tone Object," *J. Opt. Soc. Amer.*, 53, A63, p. 1377.
- (4) Powell, R. L. and Stetson, K. A., 1965, "Interferometric Analysis by Wavefront Reconstruction," *J. Opt. Soc. Amer.*, 55, pp. 1593~1598.
- (5) Hazell, C. R. and Mitchell, A. K., 1992, "Separation of Closely Spaced Vibration Modes Using Holographic Interferometry," *Journal of Sound and Vibration*, 152(1), pp. 125~140.
- (6) Davis, R. S., 1989, "Nondestructive Evaluation with Optical Holography," *Materials Evaluation*, pp. 794~797.
- (7) Rastogi, P. K., 1985, "Comparative Holographic Interferometry : A Nondestructive Inspection System for Detection of Flaws," *Experimental Mechanics*, pp. 325~337.
- (8) Fallstrom, K. E., 1991, "A Nondestructive Method to Detect Delaminations and Defects in Plates," *NDT & International*, Vol. 24, No. 2.
- (9) 이해중, 황운봉, 박현철, 1992, "홀로그래피 간섭계를 이용한 미소변위 측정," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제5호, pp. 864~872.
- (10) Fallstrom, K. E. and Jonsson, M., 1991, "A Nondestructive Method to Determine Material Properties," *Polymer Composites*, Vol. 11, No. 5.
- (11) Nakatani, N., Kawata, K. and Yamada, T., 1974, "Flow Visualization by an Improved Double Exposure Method in Holography," *Optics and Laser Technology*, 6, pp. 82~83.

- (12) Wilson, A. D., 1970, "Characteristic Function for Time-Average Holography," *J. Opt. Soc. Amer.*, 60, pp. 1068~1071.
- (13) Rowlands, R. E. and Daniel, I. M., 1972, "Application of Holography to Anisotropic Composite Plates," *Experimental Mechanics*, pp. 75~82.
- (14) Erf, R. K., ed., 1974, *Holographic Nondestructive Testing*, Academic Press.
- (15) Edenborough, N. B. and Monnier, D. J., 1981, "Holographic Inspection for Thin Cover Sheet Bond Quality on Turbine Components," *Materials Evaluation*, pp. 643~646.
- (16) Grant, I., Wang, J. and Tan, Y., 1989, "Use of feedback Fringe Control in Holographic nondestructive Testing of Debonding," *Applied Optics*, Vol. 28, No. 10, pp. 1744~1745.
- (17) Rubayi, N. A. and Liew, S. H., 1989, "VAcuum Stessing Technique for Composite Laminates Inspection by Optical Method," *Experimental Techniques*, pp. 17~20.
- (18) Shang, H. M., Toh, S. I., Chau, F. S., Tay, C. J. and Tay, T. E., 1991, "Holographic Inspection of Laminated Plates Containing Two Fully-Overlapping Identical Debonds," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 10, No. 1, pp. 7~17.
- (19) Shang, H. M., Lim, E. M. and Lim, K. B., 1992, "Estimation of Size and Depth of Debonds in Laminates from Holographic Interferometry," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 114, pp. 127~131.
- (20) Shang, H. M., Lim, E. M. and Lim, K. B., 1992, "Estimation of Size and Depth of Debonds in Laminates from Holographic Interferometry," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 114, pp. 127~131.
- (21) Erf, R. K., Aas, H. G. and Waters, J. P., 1970, "Bond Inspection By Dynamic Time-Average Interferometric Holography of Ultrasonically Excited Plates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 47, No. 4, pp. 968~969.
- (22) Cawley, P., 1990, "Low frequency NDT techniques for the Detection of Disbonds and Delaminations," *British Journal of NDT*, Vol. 32, No. 9, pp. 454~461.
- (23) Charles M. Vest, 1979, *"Holographic Interferometry"*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 177~183.