

Holographic Interferometry를 이용한 고분자 필름의 Biaxial Stress 측정

장 진 해

1. 서 론

필름이나 코팅된 물질의 양방향(biaxial) 응력(stress)을 측정하는 방법은 이미 1800년대의 진동막을 이용한 이론으로부터 발전되었다.¹⁻⁴ 그 후 홀로그래픽 간섭기(holographic interferometry)를 이용한 현대적인 방법은 1960년대 중반에 본격적으로 시작되었다.⁵

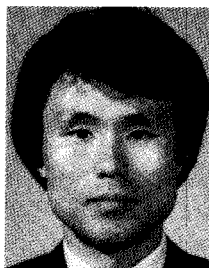
홀로그래픽 영상의 개념을 이용한 연구는 1948년 Gabor에⁶ 의해 처음으로 시도되었다. Gabor는 당시 겨우 12 Å에 머물던 전자 현미경의 분해 능력을 증가시키기 위한 시도로 두개의 광원을 이용한 회절발(diffraction grating)에 대해 연구하였다. 즉 한개의 광원은 그대로 기록판으로 가게하고, 다른 하나는 물체를 반사하여 기록판에 가게하여 판에서 만들어진 간섭 영상으로부터, 위상(phase)과 진폭(amplitude)을 갖는 원래 물체의 삼차원적 영상을 얻도록 기계를 고안하였다. 그는 얻은 영상을 그리스어인 holos(전체의 뜻)와 gram(그림의 뜻)을 본따 홀로그램(hologram)이라고 불렀다.⁷ 그러나 이런 연구는 좋은 간섭성 빛(coherent light)을 가지는 광원을 얻지 못하여 만족한 결과를 얻는데는 실패하고 말았다.

그 후 많은 연구자들 가운데 미시간 대학의 Leith와 Upatniek 등이⁸ 양질의 삼차원적 영상을 얻는데 성공하였으나, 작은 부분의 영상은 그리 선명하지 못하였다. 1966년에 Powell과 Stetson 등은^{9,10} 홀로그래프를 이용하여 평면 밖 변위(out of plane displacement)를 하는 물체의 진동 영상을 얻었다. 그들은 처음으로 진동을 분석하는데 홀로그래픽 간섭기를 사용하였다.¹¹ 그 후로 약 30여년 동안 진동이 가능한 물체의 분석에 홀로그래픽 간섭기가 많이 사용되었으며, 그 밖에도 복잡한 모양을 갖는 물질의 공명 주파수를 결정하거나,¹²⁻¹⁶ 원형 디스크에

생기는 공명 무늬 관찰,^{9,17,18} 복합재료의 해결합(debonding)이나¹⁹ 포아송비(Poisson's ratio)를²⁰ 결정하는 데에도 홀로그래픽 간섭기가 사용되었을 뿐 아니라, 물질의 열과 질량 전달의 연구 등에도²¹⁻²⁵ 널리 쓰이고 있다. 홀로그래픽 간섭 방법은 또한 응력을 측정하는 데에도 쓰이고, 진동을 이용한 물체의 평면 안과 밖의 변위(in-plane and out of plane displacement) 측정에도 많이 이용된다. 현재 홀로그래픽 간섭 방법을 이용한 거의 대부분은 물질의 변위나 응력을 구하기 위한 Hook의 법칙 등을 측정하는데²⁶⁻²⁹ 쓰이고 있다.

근본적인 원리는 현악기의 머리 부분에 있는 나사를 이용하여 줄을 조정하면 실에 장력(tension)을 주는 정도에 따라 각각 다른 공명이 일어나게 되어 특정한 소리가 만들어진다. 이는 실이 보여주는 진동 현상으로 설명이 가능하다(그림 1 참조). 만약 실의 장력을 변화시켜 주게 되면 여러 공명 주파수(resonant frequency)에서 들뜨게(excited) 되는데, 이때는 실을 들뜨게 만드는 공명 주파수에 의존하는 실의 길이에 따른 특정한 마디(node; 재료 변위 점) 수를 갖게 된다.

막(membrane)의 진동은 이미 설명한 실의 진동에 대해 이차원의 크기를 가지므로, 원형 막이 가지는 진동 마



장진해

1978 고려대학교 농화학과(농학사)
1980~ 고려대학교 화학과(이학석사)
1982
1985~ 고려대학교 화학과(이학박사)
1989
1990~ Univ. of Massachusetts
1991 고분자공학과 연구교수
1996~ Univ. of Massachusetts
1997 고분자공학과 연구교수
1983~ 금오공과대학교 고분자 섬유디자인 공학부 교수
현재

Biaxial Stress in Polymer Films with Holographic Interferometry

금오공과대학교 고분자 섬유디자인 공학부(Jin-Hae Chang, School of Polymer & Textile Design, Kum-Oh University of Technology, Kumi 730-701, Korea)

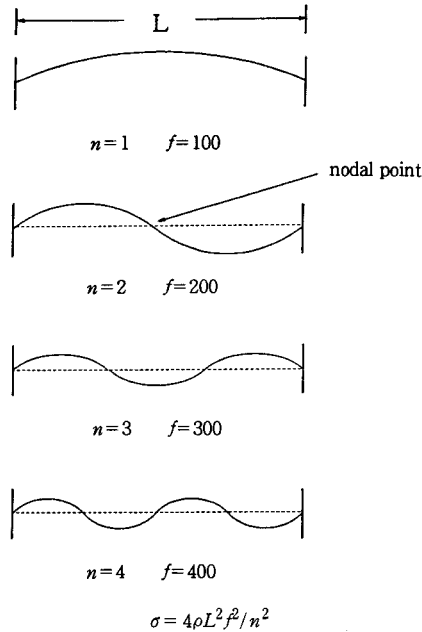


그림 1. Vibration of a string under forced sinusoidal vibration. f is the measured frequency in $\text{Hz}(\omega=2\pi f)$, and ρ is the density of the string.

이는 **그림 2**처럼 보일 것이다. 이런 현상을 수학적으로 설명하기 위해서는 막의 반지름이나 시료의 밀도, 공명 주파수 등의 관계를 이용하여 이차원 미분 방정식을 푼다면 가능할 것이다. 이런 관계를 이용하기 위해서는 막이 공명할 때 일어나는 진동 모드를 알아야 하는데, 이는 막의 진동을 보여주는 홀로그래픽 간섭 현상에 매우 중요하다. 진동 모드는 진동 무늬의 형태로부터 결정되는 Bessel 함수에 직접 관계하며, 이 Bessel 함수값은 곧바로 공식에 넣어져 진동하는 막의 응력값을 알아낼 수 있다. 간섭성 빛의 빔이 빔 분할기(splitter)에 의해 두 부분으로 나뉜다. 빔의 한쪽은(object beam) 물체로 직접 향한 후 홀로그래픽 판에 반사되고, 빔의 다른 하나는(reference beam) 위상과 진폭을 그대로 유지한 채 판에 직접 보내진다. 판에 도달한 물체의 접치는 점들은 모두 구면 파동(spherical wavefront) 형태로 빛을 반사하여, **그림 3**에서와 같이 삼차원의 영상을 만든다. 이것이 홀로그램이며 이런 과정을 “real-time holographic interferometry”라 한다.^{7,8} 실제 물체의 모양은 홀로그램으로부터 얻어진 영상과는 전혀 다르며 물체의 실제 영상은 기준 빔이(reference beam) 홀로그래픽 판에 만드는 영상으로만 볼 수 있다.³⁰

홀로그래픽 간섭 현상을 이용하여 고분자 필름이나 코팅된 재료들의 응력을 직접 구하려는 생각은 1989년 R. J. Farris에 의해 처음으로 시도되었다.³¹⁻³⁵ 고전적인 진동막 이론에 의하면, 이차원의 막이 갖는 응력은 그 자체

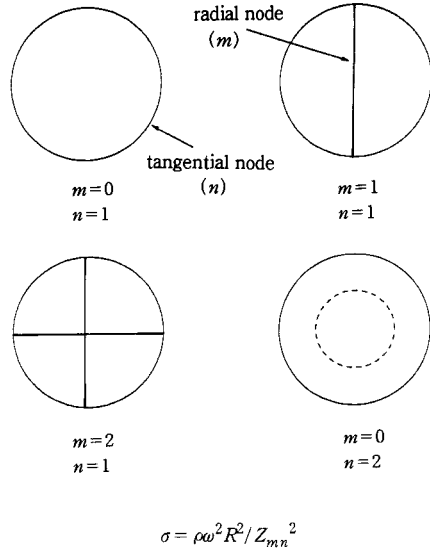


그림 2. Schematic representation of the vibration of a circular membrane, where the nodes in the radial and tangential directions are indicated.

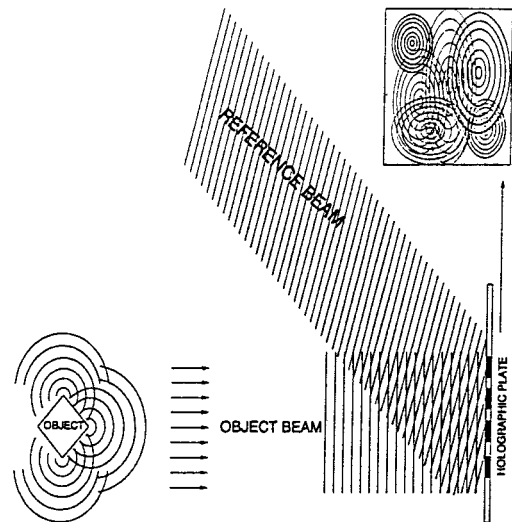


그림 3. Schematic of the construction of a reflection hologram. The pattern in the upper right hand corner represents the actual hologram as recorded on the holographic plate.

의 주파수에 직접 관계한다. 특히 막이 갖는 주파수는 응력의 제곱근에 비례하므로 구하고자 하는 막의 응력은 진동하는 홀로그래픽 간섭 현상을 이용하여 생기는 공명 주파수를 알면 쉽게 구할 수 있다. 다른 여러 방법과³⁶⁻³⁹ 비교해서 특히 코팅된 물질의 경우는 코팅막을 벗기거나, 고유한 자체 응력 상태에 손상을 주지 않고도 진동 모드나 시료의 진동 주파수로부터 동일한 방법으로 응력을 구할

수 있다. 또한 본 실험에 필요한 물질의 기본 성질은 시료의 밀도가 고작이므로 몇가지 필요한 값만 가지고도 공식을 이용하여 쉽고 정확하게 직접 응력값을 구할 수 있으며, 진동 영상을 분석하면 필름에 가해지는 응력의 방향까지도 알아낼 수 있다.

2. 이 론

2.1 등방성 응력(Isotropic Stress)의 측정

간단한 수학적식을 이용하면 막이 보이는 응력 상태를 쉽게 결정할 수 있다.^{30,32,40} 진공상태에서 막의 자유진동은 다음 미분식으로 쓸수 있다.

$$\sigma \nabla^2 u = \rho_A \partial^2 u / \partial t^2 \quad (1)$$

이때 σ = stress in the membrane(N/m²)

∇^2 = Laplacian operator

u = out of plane displacement(m)

ρ_A = real density(kg/m²)

$\partial^2 u / \partial t^2$ = second time derivative(acceleration) of the out of plane displacement(m/sec²)

윗식의 양변을 필름 두께인 h 로 나누면, 원통 좌표(cylindrical coordinate)에서 원형 막에 대한 미분식은 다음과 같이 된다.

$$\partial^2 u / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial u / \partial r + 1/r^2 \cdot \partial^2 u / \partial \theta^2 = k^2 \cdot \partial^2 u / \partial t^2 \quad (2)$$

이때 $u = f(r, \theta, t)$ = out of plane deflection(m)

θ = tangential coordinate

r = radial coordinate(m)

$k^2 = \rho / \sigma$: [ρ = mass per unit volume(kg/m³)

σ = biaxial stress(N/m²)]

t = time(sec)

만일 원형막이 지지체에 고정되어 있다면 $r=R$ 에서 (R 이 반지름일 때), 경계 조건(boundary condition)은 0이 된다. 따라서 반드시 0을 만족시키는 Bessel 함수를 Z_{mn} 으로 한다면, 필름이 받는 응력은 주파수와 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\sigma = \rho(\omega R / Z_{mn})^2 \quad (3)$$

식에 의하면, 막의 응력은 막의 지름의 제곱에 비례하고, 진동에 의해 보여지는 Bessel 함수의³⁰ 제곱에 반비례한다. 윗 식에서 구하고자 하는 응력 σ 는 필름의 밀도,

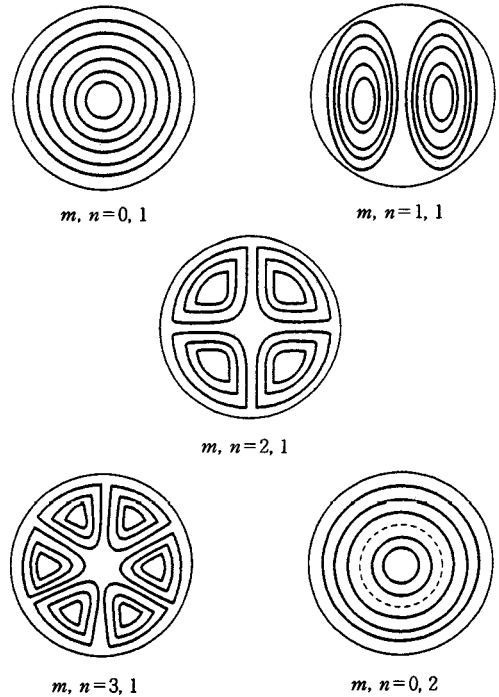


그림 4. Schematic representations of the holographic patterns observed during the vibration of a membrane at its resonant frequencies and the corresponding nodal indices. The solid lines represent the radial nodes and the dotted lines represent the tangential nodes.

ρ 와 각 주파수(angular frequency, sec⁻¹), 필름 시료의 지름, R 그리고 Z_{mn} 로 표시되는 Bessel 함수 등을 이용하여 구한다. 나타나는 막의 진동 형태는 진동 무늬의 모양으로 결정되는 Bessel 함수(공식에서 Z 값)에 직접 연관이 있으며, 이값은 진동하는 막의 응력을 구하기 위한 공식에 직접 이용된다. 만약 시료로 사용되는 필름의 두께가 크기에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다면 필름은 막으로도 간주할 수 있을 것이다. 각 진동에 따른 무늬와 Bessel 함수의 관계는 그림 4에 나타내었다. Bessel 함수의 지수는 주어진 주파수에서 관찰되는 진동 무늬로부터 얻을 수 있다. 즉, 0번째 진동은 대칭선이 없고 단지 둥근 진동 무늬만 볼 수 있으며, 1번째의 경우는 1개의 대칭선을 갖게 될 것이다(그림 2 참조). 표 1에 모드수에 따른 Z_{mn} 값을 나타내었다.

원형막과는 달리 정사각형 필름의 응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁴¹

$$\sigma = 4\rho L^2 \cdot \nu_{mn}^2 / (m^2 + n^2) \quad (4)$$

이때, ν_{mn} = resonant frequencies of vibration with mode[m, n]

표 1. Mode Numbers, Mode Shape Indices(m, n), and Zeroes of the Bessel Function, $J_m(Z_{mn})=0$

Mode Number	m, n	Z_{mn}
1	0, 1	2.405
2	1, 1	3.831
3	2, 1	5.136
4	0, 2	5.520
5	3, 1	6.380
6	1, 2	7.016
7	4, 1	7.586
8	2, 2	8.417
9	0, 3	8.654
10	5, 1	8.708
11	3, 2	9.760
12	6, 1	9.953
13	1, 3	10.173
14	4, 2	11.064
15	7, 1	11.115
16	2, 3	11.620
17	0, 4	11.792
18	8, 1	12.270
19	5, 2	12.339
20	3, 3	13.017

L = the side length of the sample
 m, n = integer mode numbers, 1, 2, 3, ...

그림 5에 등방성 상태의 원형막과 정사각형막에서의 응력값을 나타내었다. 두가지 결과는 모두 일정한 직선값을 보였다. 원형막과 정사각형막에서 응력값은 각각 1.11 MPa와 1.15 MPa이었으며, 두가지 막의 결과값은 오차 범위 내에서 서로 일치하였다. 결국 등방성 응력을 측정할 때는 막의 모양과 무관하게 거의 같은 값을 나타내었다.

2.2 비등방성 응력(Anisotropic Stress)의 측정

많은 경우에 고분자 필름이나 코팅 등에서 비등방성이 자주 보이는데, 이런 현상은 고분자 사슬의 배향(orientation)에 의한 것으로 알려져 있다. 비등방성 응력은 가공시에 고분자가 본래 갖고 있는 비등방성에 기인하는데, 특히 액정 고분자들이 다른 시료보다 더 큰 응력값을 가질 수 있다.

등방성 응력 상태를 설명할 때는 오직 한가지 변수만 있으면 된다. 그러나 비등방성의 응력 상태를 완전히 설명하려면 여러가지 변수가 필요하다. 이차원의 응력을 분석할 때는 주 응력 방향(principal stress direction)이라 불리는 두 직교 방향(orthogonal directions)이 생긴다. 그러면 전단 응력은 없어지고($\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0$), 두개의 일반 응력은 두개의 주 응력과 같은 σ_1 와 σ_2 가 된다.⁴¹ 이런 비등방성의 응력 상태에서는 전단 응력은 무시하고 두개의 주 응력만 가지고도 비등방성 상태의 응력을 완전히 설명할 수 있다. 만약 δ 를 두개의 주 응력의 비율로 정의한다면, $\delta = \sigma_1/\sigma_2$, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.⁴¹

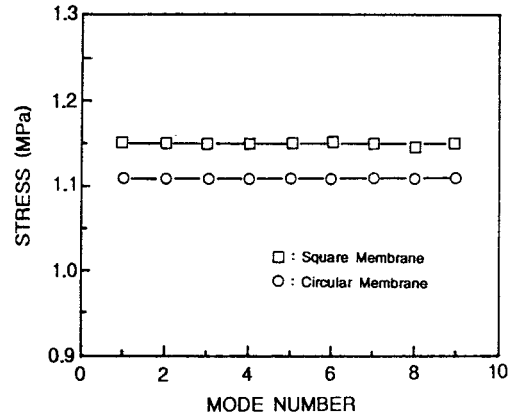


그림 5. Stress vs. mode number of a stretched latex film in the two membranes.

$$\sigma_1 = 4\rho L^2 \cdot \nu_{mn}^2 / (m^2 + \delta n^2) \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \delta \sigma_1 \quad (6)$$

여기에서 ν 는 진동 모드 (m, n)가 갖는 공명 주파수를 의미한다. 홀로그래픽 간섭기를 이용해서 얻은 ν 값을 이용하여 주 응력의 비율인 δ 값을 구할 수 있고, 이 값을 식 (6)에 대입하면 각각의 주 응력, σ_1 과 σ_2 를 구할 수 있다. 그림 6에 비등방성의 응력 상태를 갖고 있는 정사각형막의 진동 무늬를 실었다. 주 응력 방향은 그림 6(a)와 (b)에서 선으로 표시하였고, 진동 모드는 각각 (a)(2, 1), (b)(1, 2), (c)(3, 2) 및 (d)(3, 3)이다.

원형막에 대해서는 불행히도 비등방성의 응력 상태를 설명할 수 있는 이론이 아직은 없다. 단지 수학적인 계산만이 원형막의 주 응력과 공명 주파수 사이의 관계에 사용되기 때문에 혹시 필요하다면 다른 문헌을 참고 바란다.⁴¹

3. 실험

3.1 실험 장치

본 연구에 쓰인 홀로그래픽 측정 장치는 양방향 응력 측정을 위해 특별히 고안된 장치로, 일부 부품은 Newport Corporation 회사로부터 구입하여 조립하였고, 나머지 부품은 직접 설계하여 만들었다.

본 장치의 간단한 구조를 그림 7에 보였다. 시료 막은 Wilcoxon Research Piezoelectric Shaker에 고정되어 있고, Wavetek Model 190주파수 발생기와 Wilcoxon Research PA7 power amplifier 등이 Piezoelectric Shaker에 연결되어 있다. 홀로그래프를 나타내는 공명 주파수는 B & K Precision 80 MHz 주파수 측정기로 구하

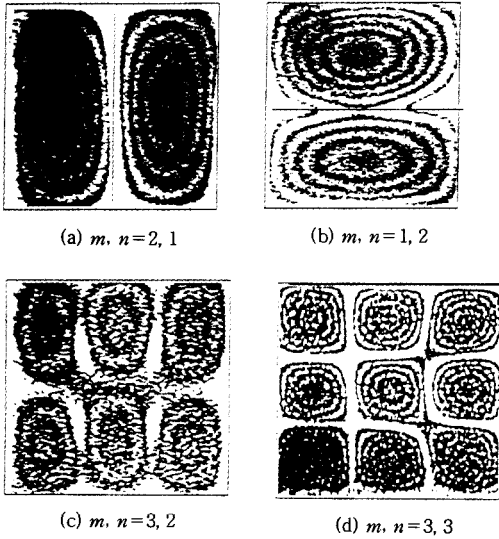


그림 6. Holographic patterns for a square membrane using polypropylene.

었다. 시료 막이 만든 여러가지 영상은 홀로그래픽 판에 일단 기억시킨 후, Newport Research Corporation HC301 홀로그래픽 카메라에 장착된 모니터를 이용하여 영상을 재생시키게 된다. 홀로그램에 사용된 광원은 6328 Å의 파장을 갖는 5 mW 헬륨-네온 레이저를 이용하였다. 레이저에서 나온 빛은 빔 분할기에서 두 갈래로 갈라지는데, 하나는 반사경을 통해 장착된 카메라로 직접 진행되고, 나머지 광원은 piezoelectric shaker에 의해 일정하게 진동하고 있는 시료를 통해 카메라로 진행한다. 두 빛은 적당한 공명 주파수에서 특정한 삼차원의 영상을 만들게 되는데, 이런 홀로그램을 이용하여 그때의 응력을 측정하게 된다. 측정된 값은 상당한 정확도와 정밀도를 보였다.

3.2 시료 준비

유리판 위에 적당한 농도로 만든 시료 용액을 부어 용매를 날려보낸 다음 오븐 속에서 24시간 이상 건조한다. 이런 방법으로 얻은 필름의 두께는 대개 약 10-15 μm였다. 순간 접착제를 이용하여 적당한 크기로 자른 필름을 원형 또는 네모형의 강철 와셔(steel washer)에 붙인다.

3.3 실험 방법

주파수 발생기를 이용하여 시료의 진동 주파수를 서서히 증가시키면, 시료 막이 공명 주파수에 도달하게 되어 뚜렷한 영상이 만들어진다. 만들어진 무늬는 비디오 카메라가 장착된 모니터를 통해서 볼 수 있으며, 시료의 진동 무늬는 그림 6과 그림 8에서 처럼 다양하게 나타난다. 밝고 어두운 줄무늬들은 같은 변위(displacement)의 선을 나타내며, 접선 방향이나 반지름선들은 진동 마디(제로 변위점)들을 나타낸다(그림 2 참조). 접선 방향이나

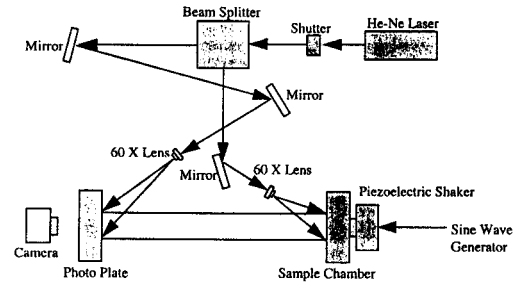


그림 7. Schematic of the holographic interferometry equipment.

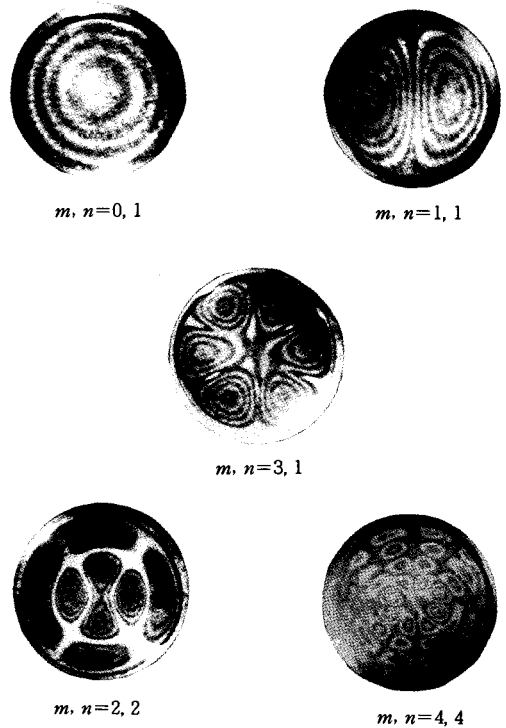


그림 8. Vibration patterns of a PMDA-ODA membrane.

반지름선들이 보여주는 마디 개수들은 공명 주파수에 해당하는 제로 Bessel 함수를 나타낸다.

4. 결과 및 논의

오래전 홀로그래픽 방법을 이용한 진동 응력 측정에는 여러가지 방법이 쓰였다. 매우 간단한 방법이긴 하지만 기존에 자주 쓰인 한가지 방법을 예로 들면, 양 축으로 잡아당긴 고무 막을 사인 곡선적(sinusoidal) 주파수를 높일 수 있는 스피커같은 간단한 장치를 이용해 막을 들뜨게 한 후, 막의 바로 앞에 장치된 마이크를 이용해 떨림을 감지한다. 들뜬 주파수에 따라 변화되는 각각의 진

폭은 오실로스코프를 이용해 측정할 수 있다.³² 그러나 이때 얻어진 최대 진폭값은 이론적으로 계산된 Bessel 함수와는 잘 맞지 않아서 정확한 응력값을 구하는데는 실패하고 말았다. 이러한 이유는 실험값 측정이 대기중에서 이루어 졌으며, 공기 하중 효과가 공명 진동을 정상보다 낮은 주파수에서 일어나게 하기 때문이었다. 그러나 이와는 달리 홀로그래픽 간섭기를 사용하면 photonics나 magneto-electric 감지기를 사용하는 다른 방법과는 달리 막의 진동을 정확하게 측정할 수 있다.

표 2에 400 °C 의 진공 상태에서 열처리한 PMDA-ODA 필름의 실험값을 모드수에 따른 응력값으로 나타내었다. 막의 진동 형태는 이론에 잘 맞았으며, 응력값을 구하는 각각의 진동 주파수값은 표준 편차 1% 내외에서 일치하였다. 본 시료에서는 약 35가지의 진동 무늬가 관찰되었다. 모드수는 막이 진동을 일으킨 모드의 순서를 정수로 나타내었고, 모드수가 증가함에 따라 얻어진 각 공명 주파수에서는 전체적으로 일정한 응력값을 보여 주었다. 이와는 달리 공기 중에서 측정된 폴리이미드 막의 응력값은 진공 속에서 행한 실험값들과 비교하여 큰 차이를 보였다. 우선 공기 중에서는 공기 하중에 의해 공명 주파수가 작아져서 응력값이 현저하게 낮아짐을 볼 수 있었으며, 또한 얻어진 결과들도 서로 일치하지 않았다. 이미 기술한 바와 같이, 실험을 공기 중에서 행할 때는 공기 하중에 의해 실험값이 많은 차이를 보이며, 그밖에 만곡강도(bending stiffness) 및 온도 등도 응력값에 영향을 주는 요인으로^{32,33,41} 작용한다. 특히 온도변화에 따라 필름의 물리적인 성질인 열팽창계수와 포아송 비 및 영률 등도 문헌치와⁴¹ 비교해서 비교적 정확하게 측정할 수 있다. 본 지에서는 원형막이 등방성 응력을 받는 상태에서 실험값에 많은 영향을 주는 요인 중 공기 하중과 온도 효과에 대해서만 서술하도록 하겠다.

4.1 공기 하중(Air Loading) 효과

공기 중에서 실험한 결과를 바르게 얻기 위해서는 막에 가해진 대기압을 고려해야 하므로, 뒷식 (1)의 왼쪽을 다음과 같이 고쳐야 한다.⁴⁰ 즉, 이상적인 막에서 응력이 같다면 ; $\sigma_{xx} = \Delta_{yy} = \sigma$

$$\sigma \nabla^2 u + P(r, \theta, t) / h = \rho \partial^2 u / \partial t^2 \quad (7)$$

식에서 $P(r, \theta, t)$ 은 주위로부터 막에 가해지는 압력, 즉 외부 하중이며, 식 (1)에서와 마찬가지로 σ 는 응력을 나타낸다.

실제로 고분자 막을 이용하여 공기 중에서 얻은 결과에 의하면, 막에 주어지는 대기 압력은 막이 공명에 필요한 진동수를 낮춘다. 즉 공기 중에서 측정된 공명 주파수는 진공 중의 값에 비해 약 80%를 보인다. 이런 효과는 낮은 진동 모드에서 특히 심하며, 진동 모드가 증가하거

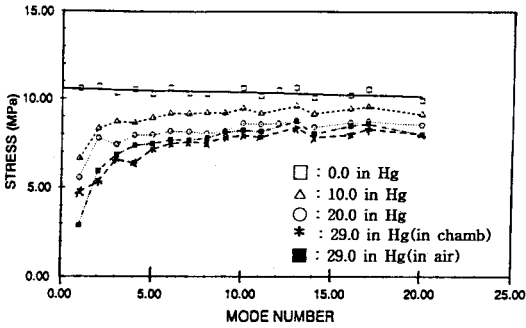
표 2. Value of Stress, Resonant Frequencies, Mode Numbers and m and n Values for PMDA-ODA Membrane Tested in Vacuum

Mode Number	m, n	$\omega_{m,n}$ (radians/sec)	Stress(MPa)
1	0, 1	25384	25.51
2	1, 1	40583	25.71
3	2, 1	54023	25.34
4	0, 2	58295	25.54
5	3, 1	67387	25.55
6	1, 2	74305	25.69
7	4, 1	80085	25.53
8	2, 2	88505	25.32
9	0, 3	91332	25.51
10	5, 1	92639	25.92
11	3, 2	103044	25.53
12	6, 1	104936	25.46
13	1, 3	107191	25.43
14	4, 2	116679	25.47
15	7, 1	117093	25.42
16	2, 3	122189	25.32
17	0, 4	124589	25.57
18	8, 1	128981	25.31
19	5, 2	130144	25.48
20	3, 3	137394	24.36
24	4, 3	151557	25.47
29	5, 3	165670	25.56
30	5, 4	200446	25.54

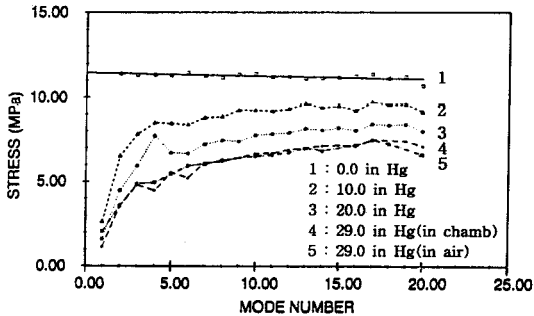
나 반지름이 감소하면 낮아진다. 이런 차이를 고려하기 위해 1) 진공과 공기 중에서 측정된 공명 주파수(Hz)의 비율인 β parameter를 이용하거나,^{33,40,41} 2) 진공에서 측정된 주파수 변수, f_n 과 공기 중에서 얻은 주파수 값인 F_N 의 비를 이용하여 보정하기도 한다.³³ 두 값의 비율인 $(f_n / F_N)^2$ 은 진공과 공기 중에서 각각 측정된 응력의 비율값에 직접 관계한다.

공명 주파수가 낮아지는 공기 하중 효과를 알기 위해, 지름이 각각 0.95, 1.27, 1.90, 2.54 cm가 되는 강철 와셔에 225 °C에서 열처리시킨 PMDA-ODA 필름을 고정시킨 후 공기와 진공 속에서 모드수의 증가에 따른 응력값을 측정하였다. 그림 9에 막의 지름이 a) 0.95와 b) 2.54 cm가 되는 시료의 결과 값을 나타내었다. 두가지 결과 모두 진공 상태에서의 결과값은 대체로 모드수에 무관하게 일정하였으나, 부분적인 진공이나 공기 중에서는 모드수에 따른 응력값이 불규칙 하였다. 또한 공기하중 효과는 진동 모드가 낮은 초기에는 컷으나 진동 모드가 증가할수록(증가 순서로 $m, n=0, 1; 1, 1; 2, 1; 0, 2; \dots$), 그리고 막의 지름이 작아질수록(β 값이 작을수록) 낮아짐을 알 수 있었다.^{40,41} 그러나 비록 아무리 높은 진동 모드에서도 진공이나 공기 중에서 얻은 두가지 응력값은 일치하지 않았다.

이미 설명한대로 공기 하중 효과는 필름의 두께가 얇고 낮은 진동 모드(처음에서 약 4-5까지)에 매우 중요한 영향을 미친다. 그러나 필름의 두께가 두꺼워지고 딱딱



(a)



(b)

그림 9. Stress vs. mode number for PMDA-ODA sample at different reduced pressures. The radii of samples are (a) 0.95 cm and (b) 2.54 cm, respectively.

할수록, 또는 높은 진동 모드(5-6 이상)에서는 만족강도가^{33,41,42} 더 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 두꺼운 막이나 급속으로 표면 처리된 막의 경우에는 이런 요인을 반드시 고려해야 된다. 그러나 연구에 사용된 대부분의 고분자 필름은 만족강도를 고려할 만큼 두께가 두껍지 않으므로 이에 대한 설명은 생략하도록 하겠다.

4.2 온도 효과

온도가 변화하게 되면 그에 따른 양축 응력의 변화는 다음 식과⁴³ 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma = -\Delta\alpha \cdot \Delta T E / (1 - \nu) \quad (8)$$

여기에서 $\Delta\sigma$ = Change in stress(Pa)

$\Delta\alpha$ = Difference in coefficient of thermal expansion

ΔT = Change in temperature(°C)

E = Young's modulus(Pa)

ν = Poisson's ratio

$\Delta\sigma/\Delta T$ 의 값은 온도에 따른 응력값의 기울기로부터 계산할 수 있고, 물질의 열팽창계수(coefficient of ther-

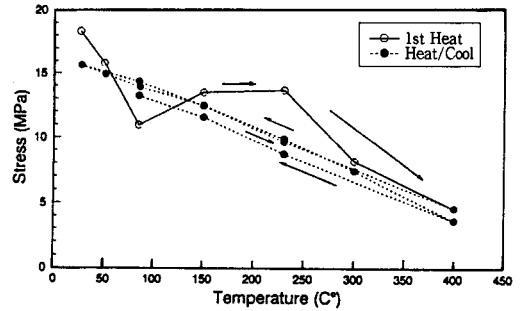


그림 10. Plot of stress vs. temperature for a PMDA-ODA film.

mal expansion, CTE)는 영률과⁴³ 포아송 비로부터²⁰ 알 수 있다. PMDA-ODA의 경우 E 와 ν 값을 이용하여 계산한 열팽창계수는 $14.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이었다. 이 값은 Bauer 등이⁴³ 계산한 CTE의 결과와도 비교적 잘 맞았다.

60 °C에서 열처리한 뒤 PMDA-ODA 시료의 온도 변화에 따른 응력값의 결과를 그림 10에 나타내었다. 실온에서 측정된 PMDA-ODA 막의 응력은 18.5 MPa이었으나, 온도가 80 °C 부근으로 증가함에 따라 응력이 10 MPa로 급격히 떨어졌다. 이때의 CTE 값은 $48.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이었고 윗식을 이용해 구한 포아송 비와 영률은 각각 0.42와 2 GPa로 역시 문헌치와⁴³ 일치하였다. 온도가 90 °C부터 150 °C까지 변화함에 따라 필름의 응력은 급격히 증가하다가 250 °C까지는 거의 일정한 값을 보인 후 다시 400 °C까지 가열시에는 다시 응력값이 감소하였다. 이런 현상은 이미드화(imidization) 반응이 90 °C부터 150 °C까지 주로 많이 일어남을 의미하며 150 °C 이후로 250 °C까지는 반응이 거의 없음을 뜻한다. 이미드화 반응이 완전히 일어난 2차 가열과 냉각 곡선의 평균 기울기로부터 구한 $\Delta\sigma/\Delta T$ 의 값은 0.031이었으며, 이때의 포아송 비와 영률을 각각 0.34와 3 GPa로 하여 계산한 CTE값은 $18.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이었다. 이값은 이미 발표된 문헌치인 $18.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 와 거의 일치하였다.⁴⁴

이미 서론에서 언급하였듯이 홀로그래픽 간섭기는 응력값 뿐만 아니라 포아송 비, 영률 그리고 이미 구한 값들을 이용하여 필름의 열팽창계수를 측정할 수 있는 매우 유용한 장치이다.

감사의 글: 본 연구를 위해 기꺼이 실험 장치를 제공해 주신 메사츄세츠 대학교 고분자 공학과의 R. J. Farris 교수께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E. F. F. Chladni, "Die Akustik", Leipzig: Breitkopf &

- Hartel, 1802.
2. S. D. Poisson, *Memoires de L'Academie de la Royale Institute des Sciences du France*, **8**, 357 (1829).
 3. F. A. Clebsch, "Theories der Elasticitat Fester Korper", Leipzig, 1862.
 4. M. J. Bourget, *Annales Scientifiques d'Ecole Normale Supérieure*, **III**, 55 (1866).
 5. M. Kak, *American Mathematics Monthly*, **73**, 1 (1966).
 6. D. Gabor, *Nature*, **161**(4098), 777 (1948).
 7. D. Gabor, *Science*, **177**(4046), 299 (1972).
 8. E. N. Leith and J. Upatnieks, *Scientific American*, **212**(6), 24 (1965).
 9. R. L. Powell and K. A. Stetson, *Journal of the Optical of America*, **55**(12), 1593 (1965).
 10. L. O. Heflinger, R. F. Wuerker, and R. E. Brooks, *J. Applied Physics*, **376**(2), 642 (1966).
 11. K. S. Pennington, *Scientific American*, **218**(2), 40 (1968).
 12. R. J. Parker and D. G. Jones, *Optical Engineering*, **27**(1), 55 (1988).
 13. B. Sharpe, *Industrial Photography*, **36**(8), A28 (1987).
 14. R. Garza and B. Sharpe, *Sensors*, September (1986).
 15. C. F. Lewis, *Materials Engineering*, **106**(1), 49 (1989).
 16. R. J. Pryputniwicz, *Optical Engineering*, **24**(5), 843 (1985).
 17. A. D. Wilson and D. H. Strobe, *J. Optical Society America*, **60**(9), 1162 (1970).
 18. C. E. Taylor, *Experimental Mechanics*, **19**(9), 339 (1979).
 19. M. Kimoto, I. Nagata, A. Miniwa, K. Moriwaki, and T. Watanabe, *J. Applied Polymer Science*, **40**(7), 1085 (1990).
 20. I. Yamaguchi and H. Saito, *Japanese J. Applied Physics*, **8**(6), 768 (1969).
 21. G. H. Kaufman and T. Kashiwagi, *Applied Optics*, **26**(5), 954 (1987).
 23. D. Tentori and M. Celaya, *Applied Optics*, **25**(16), 2707 (1986).
 24. Y. H. Yu and J. K. Kittleson, *NASA Technical Briefs, July/August*, 60 (1988).
 25. J. D. Trolinger, *Laser Focus/Electro-Optics*, **22**(7), 82 (1986).
 26. M. J. Engelstad, D. A. Chambless, W. F. Swinson, and J. L. Turner, *Experimental Mechanics*, **27**(1), 23 (1987).
 27. R. J. Sanford, *Experimental Mechanics*, **20**(12), 427 (1980).
 28. R. O'Regan and T. D. Dudderar, *Experimental Mechanics*, **9**(6), 241 (1971).
 29. R. J. Sanford, *Experimental Mechanics*, **11**(8), 330 (1973).
 30. G. Arfken, "Mathematical Methods for Physicists", 3rd ed., chapter 11, p. 572, Academic Press, 1985.
 31. M. A. Maden, Q. K. Tong, and R. J. Farris, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **203**, 39 (1991).
 32. M. A. Maden, A. Jagota, S. Mazur, and R. J. Farris, *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**, 625 (1994).
 33. Q. K. Tong, M. A. Maden, A. Jagota, and R. J. Farris, *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**, 636 (1994).
 34. M. A. Maden and R. J. Farris, *J. Experimental Mechanics*, June, 178 (1991).
 35. J. Vrtis and R. J. Farris, *Proceedings of 1994 MRS Spring Meeting*, San Francisco, CA, **338**, 527 (1994).
 36. N. Sato, H. Takahashi, and T. Kurauchi, *J. Mater. Sci. Lett.*, **11**, 365 (1992).
 37. M. Hetenyi, "Handbook of Experimental Stress Analysis", John Wiley and Sons, New York, 1950.
 38. A. Saarnak, E. Nilsson, and L. O. Kornum, *J. Oil. Col. Chem. Assoc.*, **59**, 427 (1976).
 39. D. Y. Perera and D. V. Eynde, *J. Coating Technol.*, **59**, 55 (1987).
 40. M. A. Maden, Ph.D. Dissertation. Univ. of Massachusetts at Amherst, 1992.
 41. Q. K. Tong, Ph.D. Dissertation. Univ. of Massachusetts at Amherst, 1993.
 42. M. Lax, *J. Acous. Soc. Am.*, **16**(1), 5 (1944).
 43. C. L. Bauer, Ph.D. Dissertation. Univ. of Massachusetts at Amherst, 1987.
 44. A. Wilmington, *Kapton Polyimide Film: Summary of Properties*, DuPont Company, 1986.