

〈論 文〉

홀로그래피 간섭계를 이용한 미소변위 측정

이해중* · 황운봉** · 박현철**

(1991년 10월 22일 접수)

Small Displacement Measurement by Holographic Interferometry

Hae Jung Lee, W.B. Hwang and Hyun Chul Park

Key Words : Holography Interferometry(홀로그래피 간섭계), Double Exposure(이중노출), Two-Dimensional Displacement(2차원 변형), Out-of-plane Displacement(면외 변위), In-plane Displacement(면 변위)

Abstract

Two double-exposure holograms are made in the different view angle at the same time, using laser, by overlapping before and after the static deformation. These images are transferred to the computer. The fringe patterns of holograms are recognized by image processing and each component of the displacement and strain at each point of the specimen is obtained by vector analysis, and the results were presented in the graphical form. For the verification of all the ment process, the two experimental cases, the in-plane displacement by tension load and the out-of-plane displacement by bending load, are measured. These results are compared with the exact solution.

기 호 설 명

ϕ : 빛의 위상함수 (phase function)
 k : 빛의 전파 벡터 (propagation vector)
 r : 빛의 경로 벡터
 $\Delta\phi$: 변형에 의한 상대적 위상차
 k : Wave number ($2\pi/\lambda$)
 Δk : 전파 벡터의 차 ($k_1 - k_2$)
 m : 간섭무늬의 수 또는 순서 (fringe order)
 Ψ : 전파 벡터 k_1 과 k_2 가 이루는 각, 장치각
 λ : 레이저의 파장 ($0.6328\mu m$)
 d : 변위 벡터
 θ : d 와 Δk 가 이루는 각
 γ : xy 평면과 d 가 이루는 각
 v : y 방향 변위, 면변위 (in-plane displacement)
 w : z 방향 변위, 면외변위 (out of plane displacement)

placement)

E : 영률 (Young's modulus)
 G : 전단계수 (shear modulus)
 I : 면적 관성 모멘트 (area moment of inertia)
 ν : 포아송비 (poisson's ratio)
 P : 굽힘력 (bending force)
 L : 시편의 전체길이
 t : 시편의 두께

1. 서 론

측정기술의 개발은 첨단공학발전의 기본적인 과제라 할 수 있다. 홀로그래피 간섭계는 레이저의 강한 집속성과 짧은 파장을 이용한 정밀계측장치로서 변형측정^(1~4), 진동해석^(5~7), 결함측정^(8~9), 포와송비등의 물질특성측정^(10~11), 결정구조 성장의 가시화⁽¹²⁾ 등 공학의 많은 분야에서 그 응용이 연구

*정회원, 포항공과대학 기계공학과 대학원

**정회원, 포항공과대학 기계공학과

되어지고 있다.

그러나 홀로그래피 간섭계의 실제적인 응용분야는 정량적 측정의 어려움으로 인해 많은 제약을 받고 있으며 실질적으로 간섭무늬 자체만으로는 측정되는 변위의 방향을 알 수 없을 뿐 만 아니라 숙련된 기술자도 간섭무늬로부터 정량적 결과를 얻는데는 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다. 그러므로 홀로그래피 간섭계의 실용화에는 간섭무늬 해석의 용이성(simplicity)이 선행되어야 하며 이러한 노력들은 1980년 이후 홀로그래피 간섭계 연구의 주된 주제가 되어 오고 있다.^(13~16)

현대에 급속도로 발달한 컴퓨터와 각종 영상장치를 이용한 간섭무늬의 자동해석(automatic fringe pattern analysis)^(17~18) 기술은 간섭무늬해석의 용이성을 증가시켜 홀로그래피 간섭계의 실용화를 이룩하고 있다. 변형해석의 측면에서는 이러한 기술을 이용한 면외변위(out-of-plane displacement)의 측정은 이미 많은 연구들이 이루어졌으며, 현재는 임의의 2차원 혹은 3차원적 변형해석에 대한 연구가 진행되고 있다.^(19~20)

본 논문에서는 이중노출 홀로그래피 간섭계의 원리를 이용하여 임의의 2차원적 변형에 있어서 면외 변위와 면변위(in-plane displacement) 각각에 대한 홀로그래프를 제작하고 이를 컴퓨터에 입력하여 간섭무늬를 해석함으로써 변위와 변형률의 정량화를 시도하였다.

2. 이중노출 홀로그래피 간섭계의 측정원리

이중노출 홀로그래피 간섭계의 변형 전후의 광학계는 Fig. 1과 같다.

변형전의 점 P가 변형후 점 P'으로 되었을 때 이 변위 d는 매우 작으므로 r₁과 r'₁, r₂와 r'₂은 각

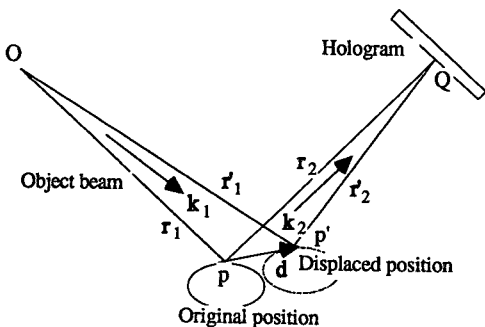


Fig. 1 System of the double exposure hologram

각 평행하며 점 P에 투사되는 전파벡터(propagation vector) k₁과 이점으로부터 홀로그래프의 Q점을 향한 전파벡터 k₂를 정의하면 변형전 빛의 위상 φ₁과 변형후의 위상 φ₂는 다음과 같다.

$$\phi_1 = k_1 \cdot r_1 + k_2 \cdot r_2 \quad (1)$$

$$\phi_2 = k_1 \cdot r'_1 + k_2 \cdot r'_2 \quad (2)$$

그러므로 변형에 의한 상대적 위상차 Δφ는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_2 - \phi_1 \\ &= k_1 \cdot (r'_1 - r_1) - k_2 \cdot (r_2 - r'_2) \\ &= (k_1 - k_2) \cdot d \\ &= \Delta k \cdot d \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Δk의 방향은 k₁과 k₂의 반각방향이므로 k₁과 k₂가 이루는 각을 Ψ라하면 Δk의 크기는 2k cos(Ψ/2)이며, 변위 d와 Δk가 이루는 각을 θ라 하

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \Delta k d \cos \theta \\ &= 2kd \cos(\Psi/2) \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$k = 2\pi/\lambda$: wave number

이다. 또한 이중노출 홀로그래프에서 Δφ(x, y) = 2πm, m=0, 1, 2, 3, … 일때 흰색 무늬가 발생하므로 이 흰색 무늬의 수(fringe order)가 m이라면 변위 d의 Δk 방향요소는

$$d \cos \theta \frac{m\lambda}{2 \cos(\Psi/2)} \quad (5)$$

이다. 즉 임의의 변형에 대하여 이중노출 홀로그래프의 간섭무늬로부터 m을 구하면 실제의 변위 d는 알 수 없지만 이 변위 d의 Δk 방향요소는 식(5)와 같음을 알 수 있다.

3. 2차원 변형의 측정^(1~4)

홀로그래피 간섭계를 이용한 2차원 변형의 측정 원리는 앞절에서 설명한 두개의 서로 다른 Δk를 가진 홀로그래프를 동시에 제작하여 이를 벡터해석함으로써 Δk₁과 Δk₂가 이루는 평면상의 변위를 측정하는 것이다. 즉, Fig. 2에서 홀로그래프 I에 의해서는 실제변위 d의 Δk₁ 요소를 알 수 있으며, 홀로그래프 II에서는 Δk₂ 요소를 알 수 있으므로 이 두개의 홀로그래프로부터 평면상의 실제변위 d의 크기와 방향을 알 수 있게 된다.

Fig. 2에서 홀로그래프 I, II에 대해 식(5)를 각각

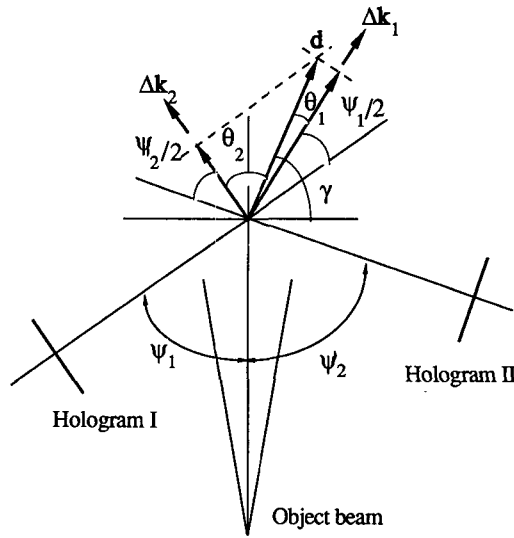


Fig. 2 Schematic diagram of the vector analysis

적용하면

$$d \cos \theta_1 = \frac{m_1 \lambda}{2 \cos (\psi_1 / 2)} \quad (6)$$

$$d \cos \theta_2 = \frac{m_2 \lambda}{2 \cos (\psi_2 / 2)} \quad (7)$$

$$|d| = \frac{m_1 \lambda}{2 \cos (\psi_1 / 2) \cos \theta_1} \quad (9)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{m_1 \cos \frac{\psi_1}{2} (1 - \cos \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}) - \cos \frac{\psi_1}{2} (m_1 \cos \frac{\psi_1}{2} - m_2 \cos \frac{\psi_2}{2})}{m_1 \cos \frac{\psi_1}{2} \cos \frac{\psi_2}{2} \sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}} \quad (10)$$

또한 두 홀로그래프의 장치각이 $\psi_1 = \psi_2 = \psi$ 일 경우에는

$$\tan \theta_1 = \frac{m_2 - m_1 \cos \psi}{m_1 \sin \psi} \quad (11)$$

와 같이 된다.

이러한 해석은 측정 대상물체의 각 위치마다 벡터 해석을 하여야 하므로 전체적인 변형과 이에 의한 변형률 및 응력의 해석은 컴퓨터를 이용한다.

4. 컴퓨터를 이용한 간섭무늬 해석⁽¹⁵⁻¹⁸⁾

Fig. 2와 같은 장치에서 제작된 홀로그램 I, II를 HP ScanJet Scanner를 이용하여 컴퓨터에 입력하고 이를 영상처리(image processing)하기 위한 프로그램을 개발하여 각 홀로그램에 대한 정보

이며, θ_1 과 θ_2 의 관계는

$$\theta_1 + \theta_2 = (\psi_1 + \psi_2) / 2 \quad (8)$$

이므로 식 (6), (7), (8)로부터 변위 d 의 크기와 방향을 구하면 다음 식과 같다.

를 컴퓨터에서 처리하고 변위 및 변형률의 계산을 자동화하였다. 이러한 홀로그램 간섭무늬 정량해석의 개략도는 Fig. 3와 같으며 프로그램의 기능은 Table 1과 같다.

벡터해석에서는 물체파가 평면파가 아님을 고려하여 측정대상의 각 점에 해당하는 전파벡터 Δk 의 방향을 홀로그램 제작시 장치의 설치상태를 입력함으로써 보정 하도록 하였다. 이러한 각도보정(angle adjustment)은 측정 대상물의 각 점에 해당하는 측정각도를 보정함으로써 측정오차를 크게 줄이게 된다.

Fig. 4는 시편 양단에서의 전파벡터 및 벡터해석 결과를 나타내는 것으로 시편의 위치에 따라 ψ_1 과 ψ_2 가 달라짐을 알 수 있다. 즉, 각도보정을 하지 않는다면 $\psi_1 = \psi_2 = \psi$ 로 항상 일정하나 각도보정을

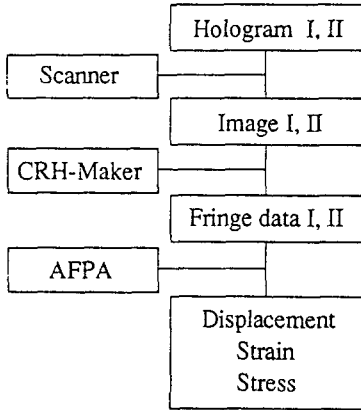


Fig. 3 Schematic diagram of the all work

Table 1 Roles of the programs

Program	Function
CRH-Maker	Analyze images accepted by the Scanner and recognize the fringes. Process the fringes and generate the output files.
AFPA	Perform the vector analysis from the accepted fringes and calculate the following quantities in graphical and numerical forms. (1) Displacements (2) Strains (3) Stresses.

한다면 ψ_1 과 ψ_2 는 시편의 위치에 따라 변하게 된다.

이러한 전파벡터의 변화는 시편의 길이나 홀로그래피 간섭계의 설치시 시편과 홀로그램과의 거리 등의 함수로 표현될 수 있으므로 시편의 각 위치에 따른 벡터해석에 앞서 전파벡터의 방향을 계산해 주어야 한다.

또한 이중노출 홀로그램의 경우 홀로그램상에서는 변위의 방향을 알 수 없으므로 두개의 간섭무늬를 벡터해석하는 것만으로도 변위의 크기는 구할 수 있으나 변위의 방향을 알 수는 없다. 즉 Fig. 5에서와 같이 홀로그램 I, II에 나타난 fringe order를 각각 + 또는 -로 가정하면 가능한 변위 방향은 4가지가 된다. Direction case란

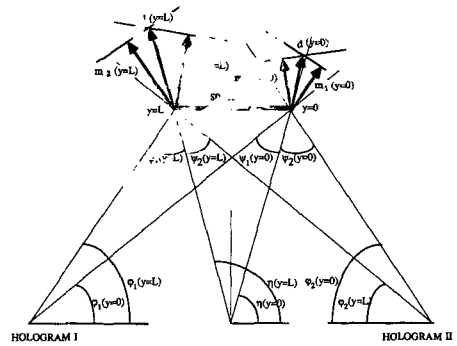


Fig. 4 Schematic diagram of the angle adjustment

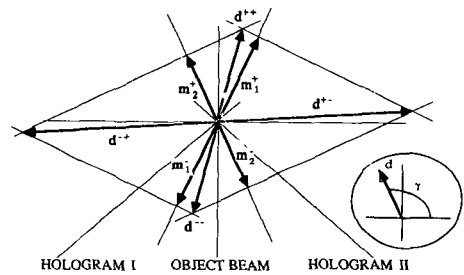


Fig. 5 Schematic diagram of the direction case in vector analysis

이 4가지 경우 중 하나를 나타내는 것으로 임의의 변형에 적합하도록 선택하여야 올바른 결과가 나올 수 있다.

실시간 홀로그램(real time hologram)의 경우나 세가지 이상의 홀로그램을 동시에 제작할 경우에는 이러한 direction case에 의한 문제점은 없거나 이중노출 홀로그램의 경우에는 측정결과에 큰 영향을 미친다. 결국 Fig. 5에서 각도보정과 direction case에 따른 벡터해석후 변위의 방향 γ 는 xy 평면을 기준으로 할때 다음과 같이 된다.

- (i) Dir case=1
 $\gamma_{++}=90-\psi_1/2+\theta_1$
- (ii) Dir case=2
 $\gamma_{+-}=-90+\psi_2/2+\theta_1$
- (iii) Dir case=3
 $\gamma_{-+}=270-\psi_1/2-\theta_1$
- (iv) Dir case=4
 $\gamma_{--}=270-\psi_1/2+\theta_1$

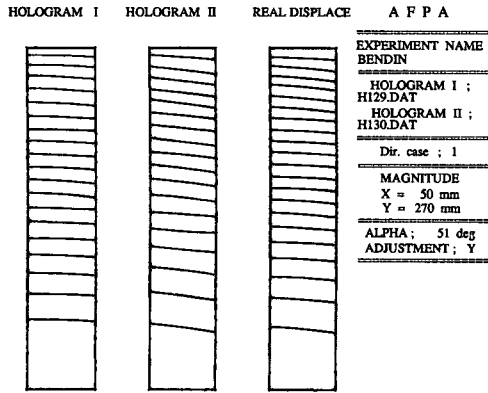


Fig. 10 Output of the vector analysis on AFPA (bending)

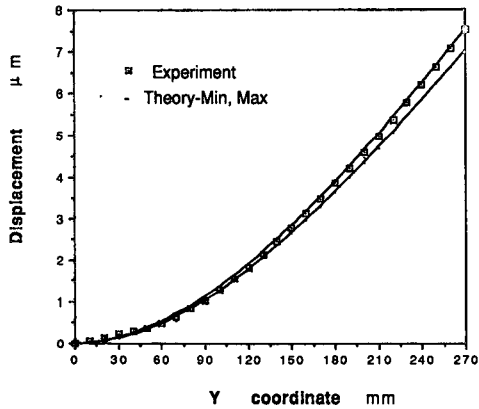


Fig. 11 Comparative graph of the experiment and theory ($w_{(y=270)} = 7.3 \pm 0.3 \mu m$)

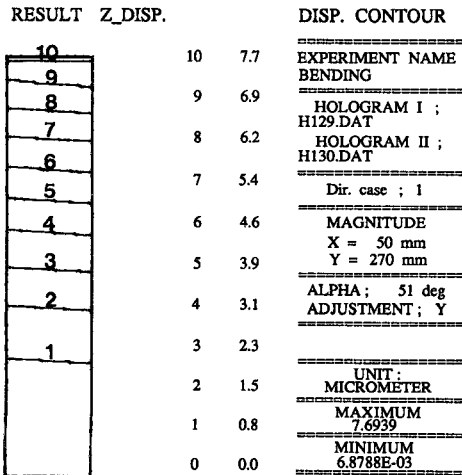


Fig. 12 Line contour of the out of plane displacement (bending)

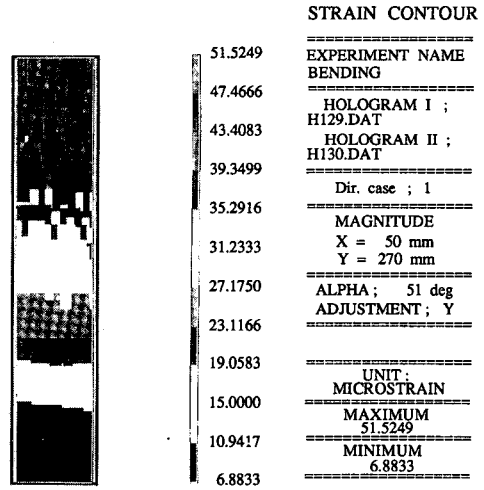


Fig. 13 Color contour of the out of plane strain ϵ_{yz} (bending)

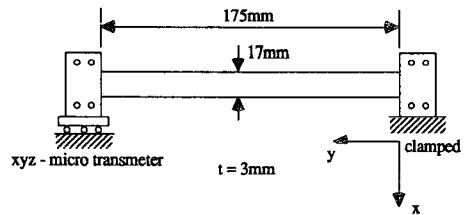
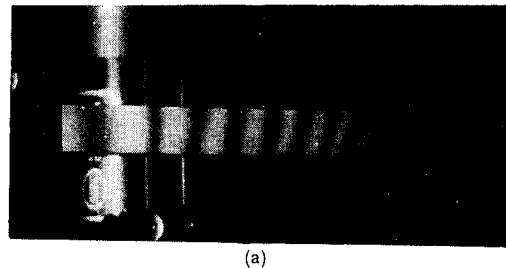


Fig. 14 Schematic diagram of the specimen in the tension experiment



(a)



(b)

Fig. 15 (a) Hologram I
(b) Hologram II
In the tension experiment

써 이론적 변위를 구할 수 있다.

측정결과로 Fig. 8은 $w_{(y=270)}=7.3\pm 0.3\mu\text{m}$ 의 굽힘변형을 가하여 제작된 홀로그램 I, II를 나타내며, Fig. 9는 컴퓨터에 입력된 홀로그램 I, II의 영상처리과정을, Fig. 10은 벡터해석 후 출력된 실제 변위량의 분포를 홀로그램 I, II와 함께 나타낸 것이며, Fig. 11은 면외변위(out of plane displacement)의 측정치를 그 이론치와 비교한 그래프를 나타낸다.

Fig. 12는 대상물 전체의 면외 변위의 line contour를 보여주는 것으로 단위는 μm 이다. Fig. 13는 대상물 전체의 면외변위에 의한 변형을 e_{yz} 의 color contour를 보인 것이다.

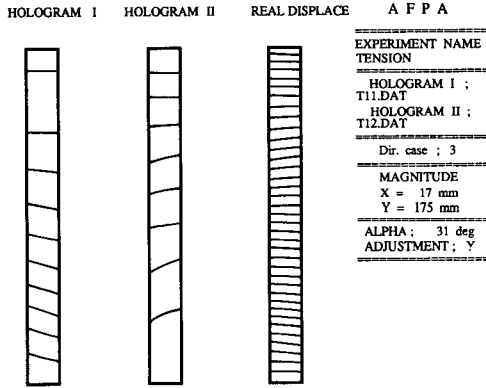


Fig. 16 Output of the vector analysis on AFPA (tension)

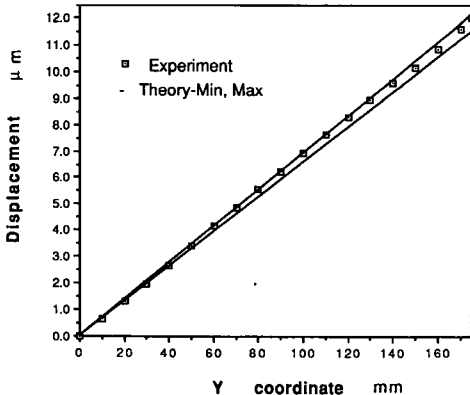


Fig. 17 Comparative graph of the experiment and theory ($v_{(y=175)}=11.8\pm 0.3\mu\text{m}$)

5.2 면변위의 측정

면변위의 측정치를 이론치와 비교하기 위해 한 쪽이 고정된 고무판의 인장변형에 대한 측정을 수행하였다. 측정 대상물은 Fig. 14에 나타내었으며 자유단에 고정된 세개의 마이크로미터를 이용하여 단순 인장변형을 가하도록 하였다.

단순 인장의 경우 변형의 이론치는 인장방향으

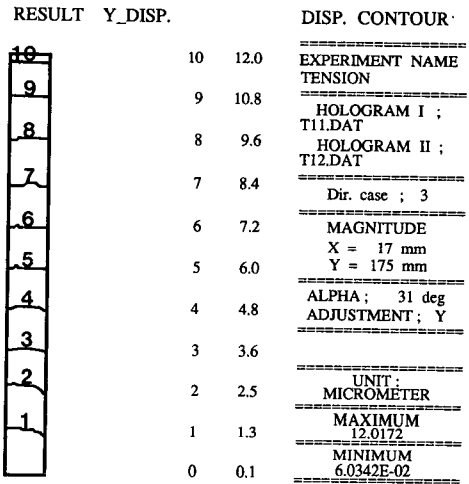


Fig. 18 Line contour of the in-plane displacement (tension)

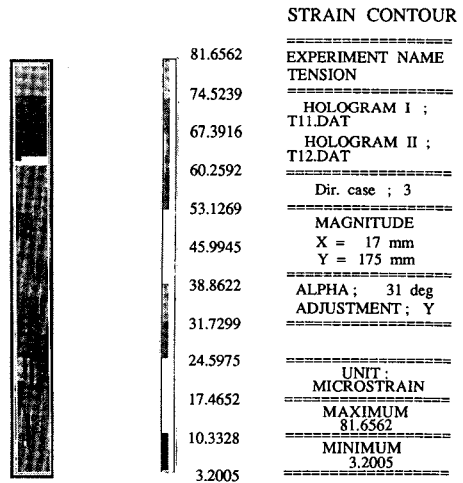


Fig. 19 Color contour of the in-plane strain e_{yy} (tension)

로 고정된

마이크로미터의 눈금($v_{y=L}$)에 선형이므로 다음식과 같다.

$$v = \frac{v(y=L)}{L} y \quad (15)$$

Fig. 15는 $v_{(y=175)} = 11.8 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 일 경우에 제작된 홀로그램 I, II를 나타내며, Fig. 16은 벡터해석 후 실제 변위량의 분포를 나타낸다.

또한 Fig 17에서 면변위의 측정치를 그 이론치와 비교하였고, Fig. 18은 대상물 전체의 면변위의 line contour, Fig. 19는 대상물 전체의 면변위에 의한 변형률 e_{yy} 의 color contour를 나타낸다.

6. 측정결과 고찰

Fig. 11과 Fig. 17의 그래프에서 볼 수 있듯이 측정치는 이론적 최소치와 최대치의 사이에 분포된다. 굽힘변형의 경우 면변위는 계산결과 최대값이 약 $0.007 \mu\text{m}$ 로 측정 해상도(resolution)보다 작으므로 결과분석을 하지 않았다.

면의변위의 측정을 위한 굽힘실험에서의 절대적 측정 최대오차는 $0.6939 \mu\text{m}$ 이며(Fig. 12 참조), 대상물 전체에 분포된 주된 변형율은 약 $6.8 \sim 51.1 \text{microstrain}$ 으로 이러한 값들은 스트레인게이지로는 측정이 불가능하며 Fig. 13과 같이 이론치와 잘 일치한다.

면변위의 측정을 위한 인장실험에서의 절대적 측정 최대오차는 $0.5172 \mu\text{m}$ 이며(Fig. 18 참조), 인장실험의 경우 균일한 재질의 시편에 대해 변형률의 이론치는 대상물 전체에 $65.7 \sim 68.6 \text{microstrain}$ 의 같은 값을 가져야하나 Fig. 19에 분포된 주된 변형률은 약 $52.0 \sim 74.2 \text{microstrain}$ 으로 이론치를 중심으로 분포되어 있으나 정확히 일치하지는 않는다. 이러한 변형률의 오차는 측정에 사용된 시편의 부분적인 결함에 기인된 것으로 판단된다. 또한 이점을 이용하여 시편의 미소결합측정도 가능하다.

홀로그래피 간섭계의 측정오차는 장치의 제작이나 하중장치의 제작, 영상처리, 벡터해석등의 종합적 오차로써 그 계산이 복잡하나 Fig. 11과 Fig. 17의 그래프에서 이론치와 측정치가 거의 일치하는 것으로 보아 작은 오차내에서 측정할 수 있음을 알 수 있다.

7. 결론

홀로그래피 간섭계의 기본원리를 이용하여 임의의 2차원적 미소변형을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 얻어진 홀로그램을 scanner를 이용하여 컴퓨터에 입력하여 이를 영상처리함으로써 홀로그램의 간섭무늬 패턴을 인식하는 프로그램을 개발하였다. 또한 이러한 프로그램으로부터 인식된 두개의 홀로그램에 대한 정보를 받아들여 이들을 홀로그래피 간섭계의 이론에 따라 벡터해석하여 실제 변위의 크기와 방향을 구하고 이것으로부터 변형률 및 응력을 계산하여 그래픽으로 출력하는 프로그램을 개발하였다.

전체적인 측정의 확인 방법으로 굽힘변형과 인장변형에 대한 측정치와 이론치를 각각 비교하였다.

홀로그램을 이용한 변위 측정법은 광탄성법처럼 측정대상의 형상에 조건이 있거나 스트레인게이지 방법같이 측정에 필요한 물질을 부착할 필요가 없으며 매우 정밀하며 대상물 전체를 동시에 측정한다는 장점이 있는 반면 측정장치의 복잡성 및 대형화의 단점이 있다.

참고문헌

- (1) Ennos, A.E., 1968, "Measurement of In-plane Surface Strain by Hologram Interferometry," Journal of Scientific Instruments, Series 2, Vol.1, pp. 731~734.
- (2) Fossati Bellani, V. and Soria, A., 1974, "Measurement of Three-Dimensional Displacements by Scanning a Double-Exposure Hologram," APPLIED OPTICS, Vol. 13, No. 6, pp. 1337~1341.
- (3) Krebsler, R., 1984, "Double-Exposure Hologram-Interferograms for the Measuring of Deformation on Moulding Machines," Industrial Applications of Lasers, pp. 253~268.
- (4) Sciammarella, C.A. and Narayanan, R., 1984, "The Determination of the Components of the Strain Tensor in Holographic Interferometry," Experimental Mechanics, pp. 257~264.
- (5) Stetson, Kari A. and Harrison, Irene R., 1978,

- "Computer-Aided Holographic Vibration Analysis for Vectorial Displacements of Bladed Disks," *APPLIED OPTICS*, Vol. 17, No. 11, pp. 1733~1738.
- (6) Suezou Nakadate, 1986, "Vibration Measurement using Phase-Shifting Time-Average Holographic Interferometry," *APPLIED OPTICS*, Vol. 25, No. 22, pp. 4155~4161.
- (7) Khadakkar, A. G., Narayanan, R., Ravi Sankar, K., Iyer N.R., and Appa Rao, T.V.R., 1988, "Free Vibration of a Cylindrical Shell by Holographic Interferometry," *Journal of Sound and Vibration* 121(1), pp. 169~180.
- (8) Pramod K. Rastogi, 1985, "Comparative Holographic Interferometry : A Nondestructive Inspection System for Detection of Flaws," *Experimental Mechanics*, pp. 325~337.
- (9) Koukash, M., Hobson, C.A., Lalor, M.J. and Atkinson J.T., 1986/87. "Detection and Measurement of Surface Defects by Automatic Fringe Analysis," *Optics and Lasers in Engineering* 7, pp. 125~135.
- (10) Ganesan, A.R., 1989, "Measurement of Poisson's Ratio Using Real-Time Digital Speckle Pattern Interferometry," *Optics and Lasers in Engineering* 11, pp. 265~269.
- (11) Kakunai, S., Masaki, J., Kuroda, R., Iwata, K. and Nagata, R., 1985, "Measurement of Apparent Young's Modulus in the Bending of Cantilever Beam by Heterodyne Holographic Interferometry," *Experimental Mechanics*, pp. 408~412.
- (12) Rowlands, R.E., 1990, "Optical Strain Analysis of Composite and Monolithic Materials," *Optics and Lasers in Engineering* 12, pp. 213~232.
- (13) Chaudhari, U.M., Ganesan, A.R., Chandra Shaker. Godbole P.B. and Sirohi R.S., 1989, "Investigation of In-Plane Stresses on Bolted Flange Joints Using Digital Speckle Pattern Interferometry," *Optics and Lasers in Engineering* 11, pp. 257~264.
- (14) David L, Mader, 1985, "Holographic Interferometry on Pipes : Precision Interpretation by Least-Squares Fitting," *APPLIED OPTICS*, Vol. 24, No. 22, pp. 3784~3790.
- (15) Steinbichler, H., Engelsberger, J., Sixt, W., Sun J. and Franz, Th., 1990, "Application of Computer-Aided Evaluation for Holography and Similar Techniques," *Optics and Lasers in Engineering* 13, pp. 39~50.
- (16) Marshall, S.J., Rixon, R.C., Caulfield M.M. and MacKenzie, P.M., 1986/87, "The Application of Automatic Fringe Analysis in Fracture Mechanics," *Optics and Lasers in Engineering* 7, pp. 175~193.
- (17) Reid, G.T., 1986/7, "Automatic Fringe Pattern Analysis : A Review," *Optics and Lasers in Engineering* 7, pp. 37~68.
- (18) Matthys, D.R., Gilbert, J.A., Dudderar T.D. and Koenig, K.W., 1988, "A Windowing Technique for the Automated Analysis of Holo-Interferograms," *Optics and Lasers in Engineering* 8, pp. 123~136.
- (19) Matsumoto, T., Iwata, k. and Nagata, R., 1974, "Measurement of Deformation in a Cylindrical Shell by Holographic Interferometry," *APPLIED OPTICS*, Vol. 13, No. 5, pp. 1080~1084.
- (20) Matthys, D. R., Dudderar, T.D. and Gilbert, J. A., 1988, "Automated Analysis of Holo-interferograms for the Determination of Surface Displacement," *Experimental Mechanics*, pp. 86~91.