

홀로그래픽 간섭법을 이용한 미소변형 측정법

The Measurement Method of Small Deformation by using Holographic Interferometry

姜永準·文相媛·崔張燮

Kang, Young-June · Moon, Sang-Joon · Choi, Jang-Seob

(全北大學校) (全北大學校 大學院) (全北大學校 大學院)

ABSTRACT

Conventional measurement methods for non-destructive testing(NDT) in nuclear power plants and other industrial plants have been performed as the methods of contact with objects to be inspect, but those methods have been taken relatively much time to be inspected. Holographic interferometry which is a non-contact optical measurement method using a coherent light can overcome these demerit, and also has an advantage that the quantitative measurement of small deformation for large areas can be accomplished at a time with high precision. In this paper the comparisons of the experimental results from holographic interferometry with those from the finite element method(FEM) and the analytical solutions of the elastic equation are discussed.

1. 서론

발전소나 일반 공장에 있어서 돌발적인 파괴는 생산성을 격감시키고 파괴에 따르는 수리비용 등의 과다 지출을 발생시키며, 심지어 인간의 생명까지도 위협할 수 있는 요인이 된다. 이와 같은 파괴는 파괴에 이르기 전 흠집이나 크랙의 계속으로써 예측이 될 수가 있다. 비파괴 검사의 목적은 바로 파괴가 일어나기 전에 파괴의 가능성을 진단하여 적절한 보수, 유지를 거쳐 적은 비용으로 설비들이 안전하게 운용될 수 있도록 하는 것이다.

이에 본 연구는 원자력 발전소 설비나 기타 다른 설비에서 크랙이나 흠집의 계속을 하기 위한 목적으로 홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry)에 의하여 재료 내부의 미소 결함을 정량적으로 계속하려는 연구의 예비 단계로서 외팔보와 양단 고정보에 대한 실험의 결과와 공학 분야에서 널리 쓰이고 있는 구조물의 해석기법인 유한요소법(finite element method)에 의한 이론해석의 결과를 비교함으로써 홀로그래픽 간섭법이 미소 변형의 측정에 유용한 계속법이라는 것을 확인하고자 한다.

2. 측정원리

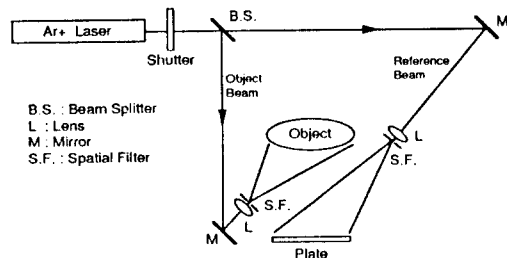


Fig.1 Optical Arrangement for Recording Hologram

물체나 사진건판의 위치, 기록 물질의 종류, 두 빔의 입사각 등에 따라 여러 종류의 홀로그래피가 이루어지나 홀로그래피를 기록하는 가장 기본적인 구성이 Fig.1에 나타나 있다. 단색성(monochromaticity)과 간섭성(coherence)이 좋은 레이저빔은 확대된 후 빔스플리터(beam splitter)에 의해 두 갈래로 나뉘어져 그 중 하나는 직접 기록 매체에 조사되며, 다른 하나는 물체에 비추어져 그 반사된 빛이 기록매체에 조사되어 두 파는 간섭을 일으키게 된다. 일반적인 사진(photography)이 렌즈 등의 광학계를 사용하여 사진건판에 물체의 상의 강도를 기록하는 것에 비해 홀로그래피(holography)에서는 물체의 상이 아닌 물체파(object beam)와 기준파(reference beam)와의 간섭무늬(interference fringe)를 사진건판에 기록함으로써 빛의 강도 뿐만 아니라 위상에 대한 정보도 기록하게 된다. 그래서 기록된 강도와

위상에 관한 정보로부터 3차원의 상을 재생할 수 있다. 일반적으로 홀로그래피는 두 빛의 중첩에 의해 생긴 간섭무늬를 사진건판 등의 기록매체에 기록하는 과정과 그 간섭무늬가 기록된 기록매체(hologram)에 빛을 투과시켜 물체의 상을 재생하는 과정으로 구성되어 있다.

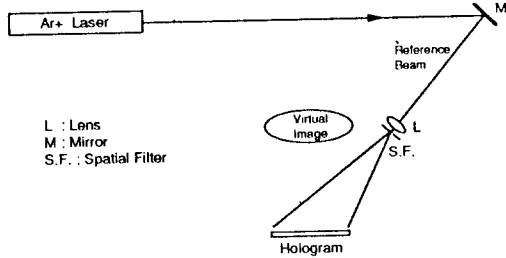


Fig.2 Optical Arrangement for Reconstruction of Hologram

Fig.2는 제작된 홀로그램으로부터 기준파(reference beam)를 사용하여 재생하는 기본적인 구성을 나타낸다. Fig.2의 구성에서 간섭성이 있는 단색광으로 홀로그램을 비추면 이 빛은 홀로그램의 간섭 무늬에 의해 회절을 하게 되고, 이 회절된 빛은 방향에 따라 2개의 상을 형성하게 되는데 하나는 홀로그램의 뒤면 원래 물체가 있었던 위치에 허상(virtual image)을 형성하게 되고, 다른 하나의 공역파(conjugated beam)가 홀로그램의 앞면, 즉 기준파의 진행 방향으로 실상(real image)을 형성하게 된다. 만일 이 물체에 변형이 일어나게 되면 변형된 물체의 파면(wavefront)이 홀로그램에 의하여 재생된 파면과 간섭을 일으키게 되어 실시간으로 그 물체의 변형을 나타내는 간섭무늬를 만들어낸다. 또한 2개의 홀로그램이 같은 사진건판에 기록될 수가 있는데, 하나는 초기상태, 즉 변형이 되기 전의 물체를 나타내며, 다른 하나는 변형된 물체의 상을 나타낸다. 따라서 앞의 경우와 비슷한 간섭무늬가 2개의 홀로그램의 중첩에 의해 만들어진 파면에 의해서 만들어진다.

홀로그래피 간섭법에 이용되는 방법의 하나인 이중노출(double exposure) 간섭법은 가장 많이 사용되고 있는 방법의 하나로 홀로그램 기록매체로 사용되는 사진건판이 고정된 상태에서 2번의 노출을 하므로 정렬의 어려움이 없어지고, 현상(developing) 후 유제의 수축 등이 큰 영향을 미치지 못하므로 실험이 쉽고, 두번의 노출 사이의 물체 변형을 영구적으로 기록해 둘 수 있는 장점을 지닌다. 이중노출 간섭법의 과정은 첫번째 노출로써 변형전의 물체의 상을 사진건판에 기록하고, 이 물체에 변형을 가한 후 두번째 노출로써 변형된 물체의 상을 동일한 사진건판에 기록함으로써 이루어진다. 그리고 현상과 표백(bleaching) 또는 정착(fixing)의 과정을 거친 후, 제작된 홀로그램에 기준파를 조사시키면 원래

물체의 허상과 변형된 물체의 허상이 동시에 한 홀로그램에서 재생되면서 두 상은 서로 간섭을 하게 된다. 따라서 이때 관측되는 간섭무늬로부터 변형 전의 물체와 변형 후의 물체의 표면에서 발생된 변형의 차이를 알 수 있다.

첫번째 노출시, 사진건판에서의 빛의 강도는 I , 그리고 두번째 노출시의 강도를 I' 라 놓으면 다음과 같다.

$$I = |R(x,y) + S(x,y)|^2 = |R|^2 + |S|^2 + R^*S + RS^*$$

$$I' = |R(x,y) + S'(x,y)|^2 = |R|^2 + |S'|^2 + R^*S' + RS'^*$$
(1)

여기서 R 은 기준파이고, 변형 전의 물체파 S 는

$$S(x,y) = S_0 \exp[-i\phi(x,y)]$$
(2)

와 같이 나타낼 수 있으며 물체의 변형이 매우 작을 경우 진폭의 변화는 위상의 변화로 나타낼 수 있으므로 변형 후의 물체파 S' 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S'(x,y) = S_0 \exp[-i\phi'(x,y)] = S_0 \exp[-i\phi(x,y) - i\delta\phi]$$
(3)

화학적 처리를 거친 후 홀로그램의 진폭 투과율(amplitude transmittance)은 다음과 같다.

$$t(x,y) = t_0 + BT(I + I')$$
(4)

여기서 B 는 사진건판의 노출특성에 따르는 상수이고 T 는 노출시간이다.

이 홀로그램을 기준파 R 로 비추는 경우 진폭 투과율은 다음과 같다.

$$u(x,y) = R t(x,y) = R [t_0 + BT(I + I')]$$
(5)

여기서 $I + I'$ 는 다음과 같다.

$$I + I' = |S|^2 + |S'|^2 + 2|R|^2 + R^*(S + S') + R(S^* + S'^*)$$
(6)

위 식에서 홀로그래피 간섭에 관계하는 항인 $R^*(S + S')$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$u_3(x,y) = BTR^2 S_0 \{ \exp[-i\phi(x,y)] + \exp[-i\phi(x,y) - i\delta\phi(x,y)] \}$$
(7)

따라서 상의 재생에 관계되는 빛의 세기는

$$I_r = |u(x,y)|^2 \propto |u_3(x,y)|^2 \propto |S + S'|^2$$
(8)

라 할 수 있으므로

$$I_r \propto S_0^2 \{ 1 + \cos[\delta\phi(x,y)] \}$$
(9)

이 된다. 물체의 변형에 따라 $\delta\phi(x,y)$ 가 달라지므로 이 $\delta\phi(x,y)$ 의 변화에 따라 I_r 은 등고선(contour) 형태의 간섭무늬를 이루게 된다. 이 간섭무늬 패턴으로부터 $\delta\phi(x,y)$ 의 정보

를 얻을 수 있고, Fig. 3과 같이 광원에서 관찰자까지의 광경로(path length)차를 계산하여 물체의 변위를 계산할 수 있다. 입의 간섭무늬에 대하여 두 파의 광경로차는 다음과 같이 계산할 수 있다.

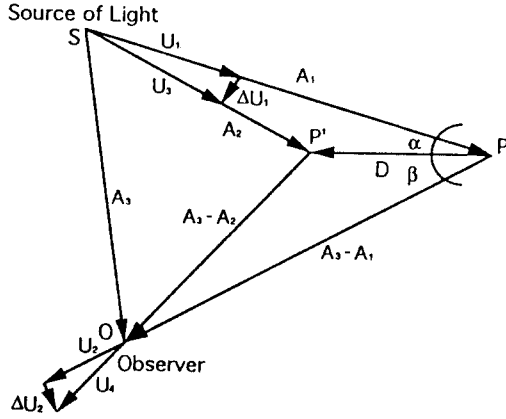


Fig. 3 Determination of Displacement by Holographic Interferometry

Fig. 3에서 물체의 한점 P가 P'로 이동되었을 경우 광경로는 SP+PO에서 SP'+P'O로 변화된다. SP를 A₁, SP'를 A₂ 그리고 SO를 A₃라 하면 PO와 P'O는 A₃-A₁, A₃-A₂로 나타낼 수 있다. SP, SP', PO, P'O의 길이를 구하려면 단위벡터 U₁, U₂, U₃, U₄를 각각 A₁, A₃-A₁, A₂, A₃-A₂에 내적하면 된다. 광경로 SPO와 SP'O의 위상을 각각 φ₁, φ₂라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} (i|SP| + |PO|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_1 + \vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_1)] \\ \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} (i|SP'| + |P'O|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{U}_3 \cdot \vec{A}_2 + \vec{U}_4 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 + \Delta\vec{U}_1) \cdot \vec{A}_2 + (\vec{U}_2 + \Delta\vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)]\end{aligned}\quad (10)$$

위상의 차이 φ₁-φ₂를 δ라 하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}\delta &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2) - \Delta\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 - \Delta\vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)]\end{aligned}\quad (11)$$

이때 물체의 변위가 아주 작다면 ΔU₁·A₂=0, 그리고 ΔU₂·(A₃-A₂)=0이므로 위 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D}\end{aligned}\quad (12)$$

변위는 2πn의 위상차에 의한 간섭무늬의 갯수로써 결정이 되므로 δ를 2πi라 놓으면 간섭무늬 갯수에 대한 변위가 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$n\lambda = (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D}\quad (13)$$

위 식은 3차원 공간상의 벡터로 표현된 식이므로 3개의 식이 필요하게 되지만 광학계를 구성할 때 β를 0°로 하고, 측정하려는 변위를 PO의 방향과 일치시키면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$d = n\lambda / (\cos\alpha + \cos\beta) = n\lambda / (\cos\alpha + 1)\quad (14)$$

3. 실험방법과 유한요소해석

3.1 실험방법

홀로그래프의 제작은 앞에서 설명된 이중노출 간섭법에 의해 Fig. 1의 광학계에서 이루어졌다. 그리고 이때 사용된 레이저는 514.5 nm의 파장을 갖는 Ar⁺레이저였다. 실험의 대상으로 일단 고정부와 양단 고정부를 정하였으며 이들의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of specimens

Specimen	Cantilever	Fixed
Length	0.37	0.18
Width	0.07	0.16
Thickness	0.005	0.001
Young's Modulus	200GPa	200GPa
Poisson's Ratio	0.3	0.3

홀로그래픽 간섭계의 기준파와 물체파의 비(beam ratio)는 약 5:1로 하여, 기준파의 강도는 2.8μW, 물체파는 0.5μW로 하여 첫번째 노출의 경우와 두번째 노출 모두 0.5초의 노출 시간을 주어 홀로그래프를 제작하였다.

변형을 여기시키기 위한 하중의 방법으로서 마이크로미터(micrometer)를 사용하였다. 여기서 마이크로미터에 의한 하중은 일단 고정부의 경우, 오른쪽 끝에서 관측점 방향으로 그리고 양단 고정부의 경우 중앙에서 가해주었다. 이때 마이크로미터에 의해 가해진 변위는 일단 고정부의 경우 10.7 μm였다.

3.2 유한요소해석

홀로그래픽 간섭법을 이용하여 변형 형태가 측정된 대상물을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위해서는 우선 대상물의

크기와 형태, 구속조건과 경계조건 그리고 하중조건 등이 정해져야 하고 사용된 재료의 물성치가 입력되어야 한다. 본 실험에서 사용되었던 시편의 가로길이와 세로길, 두께를 측정하여 입력 데이터로 사용하였고 재질은 stainless steel 이었다. 해석에 사용된 요소(element)의 종류로는 셸(shell) 구조의 8절점 4각형 요소를 사용했고 일단 고정보의 경우는 542개의 4각형요소와 5개의 3각형요소로 구성이 되어있으며 절점(node)의 수는 1760개였다. 왼쪽 부분은 고정되어 있는 부분이기 때문에 변형이 많이 생기지 않는 부분이고 오른쪽 부분은 하중을 받으면서 구속이 되어있지 않으므로 왼쪽에 비해 훨씬 큰 변형을 보일 것으로 예상되었으므로 더 세밀하게 요소를 나누어 줌으로써 보다 정밀한 결과를 얻으려 하였다. 양단 고정보의 요소의 수는 288개였고 933개의 절점을 가지고 있다. 모델의 왼쪽 변과 오른쪽 변은 구속이 되어있는 변으로 실제의 구속조건과 일치시켰다.

4. 결과 및 고찰

Fig.4는 실험의 결과로서 일단 고정보의 간섭무늬 패턴을 보여주고 있다. 이것은 일단 고정보의 자유단에서 마이크로미터를 사용하여 하중을 가해준 것으로 물체의 변형의 정도에 따라 간섭무늬의 분포 정도가 다르게 나타나고 있다. 즉 자유단쪽의 변형이 많은 곳은 간섭무늬의 등고선 간격이 비교적 조밀하여 왼쪽에 비해 많은 변형이 일어났음을 말해주고 있으며 반면에 고정단인 왼쪽은 상대적으로 적은 갯수의 넓은 간섭무늬들이 나타나 있다.

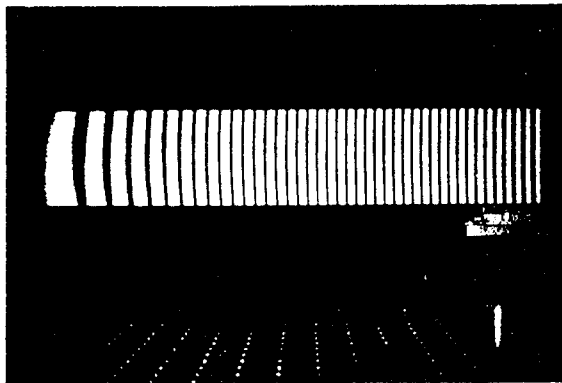


Fig.4 Holographic Fringe Pattern for Cantilever Beam

Fig.5는 유한요소법에 의한 일단 고정보의 해석 결과로서, 발생한 변위를 일정 간격으로 나타낸 그림으로 홀로그래픽 간섭법에 의해 나타나는 간섭무늬의 형태와 유사하다는 것을 알 수 있다. 왼쪽에서 오른쪽으로 진행할수록 등고선의 폭이 적어지고 있는데 이는 오른쪽으로 진행할수록 변위가 증가하

고 있음을 나타내고 있다.

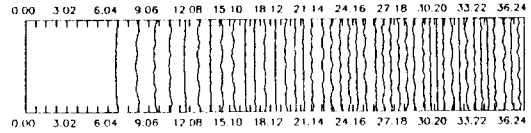


Fig.5 Contour Map from FEM for Cantilever Beam

Fig.6은 실험에 의한 양단 고정보의 간섭무늬 패턴으로 이것은 양단 고정보의 중앙에 마이크로미터를 사용하여 하중을 가해 간섭무늬 패턴을 생성해낸 것이다. 중앙에 하중을 가하였으므로 중앙부를 중심으로 하여 간섭무늬 패턴이 타원의 형태로 분포하고 있음을 볼 수 있다.

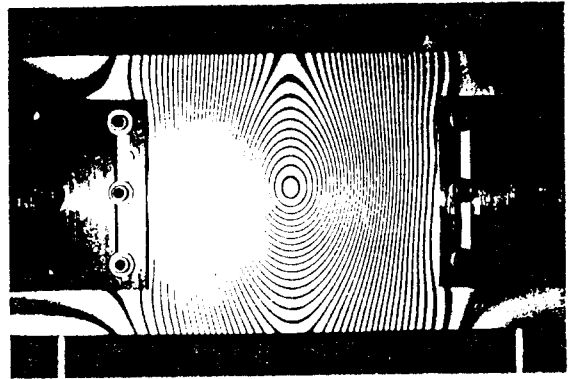


Fig.6 Holographic Fringe Pattern for Fixed Beam

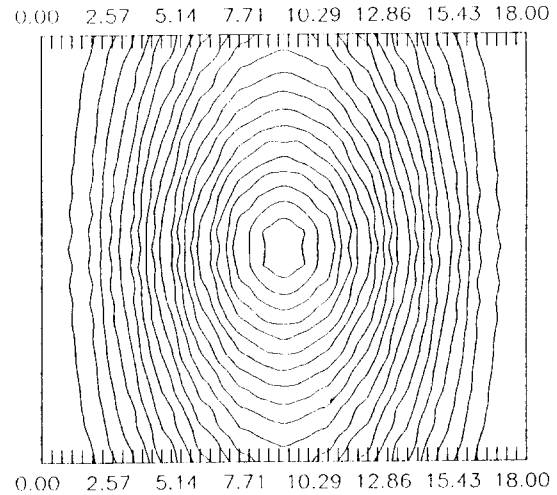


Fig.7 Contour Map from FEM for Fixed Beam

Fig.7은 양단 고정보에 대한 유한요소법의 해석 결과를 나타내는 그림으로 하중이 가해진 중앙부를 중심으로 타원이 보이고 있어 홀로그래픽 간섭법으로 실험을 한 양단 고정보

의 변형 결과와 일치하는 형태를 보여주고 있다.

실험의 정량적인 해석은 일단 고정보에 대하여 이루어졌다. 일단 고정보에 대한 탄성곡선방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$y = \frac{P}{6EI}(x^3 - 3lx^2) \quad (15)$$

위의 식(15)에서 일단 고정보의 자유단($x=L=37\text{cm}$)의 변위 y 는 마이크로미터에 의해 여겨된 변위이므로 $10.7\mu\text{m}$ 이고 표 1로부터 E 와 I 를 대입하여 하중 P 를 구한후 유한요소법의 하중조건에 대입하여 해를 얻었고 일단 고정보의 지지점에서의 변위를 구하였다. 홀로그래픽 간섭법에 의한 간섭무늬로부터의 변형량은 식(14)로부터 구하였다. Fig.4에서 간섭무늬의 갯수를 세어보면 42개이고, 구성된 광학계로부터 식(14)에 대입할 α 와 β 의 값이 정해지므로 간섭무늬의 1개에 해당하는 변위를 구한 뒤 Fig.4에 보이는 간섭무늬 42개를 곱해주어 최대변위를 구하였고 각 간섭무늬의 간격을 측정함으로써 일단 고정보 전체에서의 변위 분포를 계산하였다.

$$\begin{aligned} d_{\max} &= n\lambda/(\cos\alpha + \cos\beta) \\ &= \frac{42 \cdot 0.514}{(\cos 0^\circ + \cos 10^\circ)} \\ &= 10.87\mu\text{m} \end{aligned} \quad (16)$$

홀로그래픽 간섭법에 의해 계산된 변위와 마이크로미터에 의해 측정된 최대변위는 약 1.58%의 오차를 보였다.

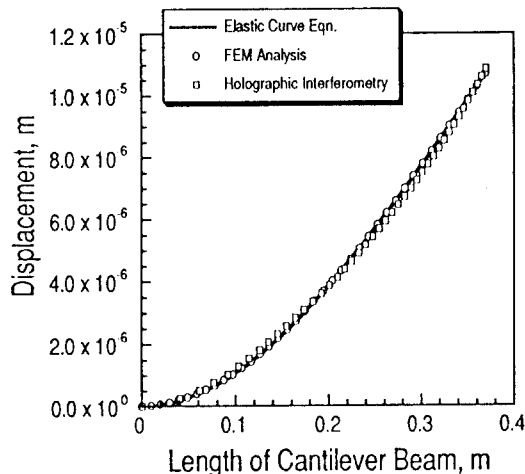


Fig.8 Comparison of Results from Holographic Interferometry and FEM

Fig.8은 일단 고정보에서 홀로그래픽 간섭법을 이용한 실험의 결과와 유한요소법 그리고 탄성곡선방정식의 결과를 비교하는 도표로서 잘 일치된 결과를 보여주고 있다. 실선은 탄성곡선방정식을 나타내고 있고 원형의 점으로 표시된 곡선

은 유한요소법에 의한 변위의 값을 나타내고 있다. 홀로그래픽 간섭법에 의한 변위는 사각형 점으로 표시된 곡선으로, Fig.5에 나타나 있는 간섭무늬의 차수를 직접 헤이림으로써 작성되었다. Fig.8에서 보이는 오차는 홀로그래픽 간섭무늬를 직접 헤이림으로써 발생하는 오차와 유한요소 해석 상의 시편의 하중조건과 경계조건이 실제의 조건과의 불일치 등에 의해 발생된 오차로 추정된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이종노출을 통한 홀로그래픽 간섭법을 이용하여 하중이 가해진 물체의 간섭무늬패턴을 관측함으로써 일정한 하중에 수반하는 변형을 측정할 수 있었다. 이 결과를 실험에 사용된 시편의 형태를 모델링하여 유한요소법의 수치해법적인 해석과 이론적인 탄성곡선방정식과 비교하여 보았는데 변형의 형태가 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 홀로그래픽 간섭법의 결과와 유한요소법의 결과를 정량적으로 비교할 수 있다는 것을 확인하였다. 그리고 홀로그래픽 간섭법은 레이저빔이 조사되는 부분에 대해 비접촉식으로 한 번에 변형의 측정이 가능하였으며 아주 높은 정밀도로 측정이 가능함을 보여주었다. 따라서 레이저빔의 조사범위를 확장시키면 보다 넓은 부분에 대해서도 단시간에 걸쳐 변형이 측정될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 본 실험의 시편과 같은 단순한 형태의 물체 뿐만 아니라 복잡한 형태의 물체에 대해서도 각 부분의 변형이 정밀하게 측정이 가능하리라 예측된다. 그리고 본 연구에서는 연속 발진 레이저(Continuous Wave Laser)를 사용하여 안정된 물체에 대한 실험을 수행하였으나 펄스 레이저(Pulse Laser)를 사용하면 진동을 하는 물체 그리고 광학계에 대한 외란의 영향이 심한 현장에서도 본 해석 방법을 적용시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. D.Gabor, "A New Microscopic Principle", Nature (London), Vol.161, 1948, pp.777-778
2. Robert K.Erf, "Holographic Nondestructive Testing", Academic Press, 1974, pp.87-97
3. P. Hariharan, "Optical Holography", Cambridge University Press, 1984, pp.207-231
4. R.Jones, C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, 1989, pp.90-106
5. Thomas M. Kreis, "Automatic Evaluation of

- Interferometry Patterns", SPIE Vol. 1026 Holography Techniques and Applications, 1988, pp.80-89
6. Th. Bischof, W. Juptner, "Determination of the adhesive load by holographic interferometry using the results of FEM-calculations", SPIE Vol.1508 Industrial Applications of Holographic and Speckle Measuring Techniques, 1991, pp.90-95
7. W. Schumann, J.-P. Zurcher, D. Cuchè, "Holography and Deformation Analysis", Springer-Verlag, 1985, pp.151-183
8. W. Schumann, M. Dubas, "Holographic Interferometry", Springer-Verlag, 1979, pp.77-92
9. H.M. Smith, "Holographic Recording Materials", Springer-Verlag, 1977, pp.75-99
10. Robert D.Cook, David S.Malkus, Michael E.Plesha, "Concept and Application of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, 1974, pp.573-588
11. Robert Guenther, "Modern Optics", John Wiley & Sons, 1990, pp.473-479