

# 홀로그래픽 간섭법을 이용한 미소변형 측정법

강 영 준,\* 문 상 준\*\*

## The Measurement Method of Small Deformation by using Holographic Interferometry

Young-June Kang,\* Sang-Joon Moon\*\*

### 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.

**Key words** : Holographic interferometry(홀로그래픽간섭법), Holographic non-destructive tesing(홀로그래픽비파괴검사), FEM(유한요소법), Small deformation(미소변형), Non-contact measurement(비접촉측정)

### 1. 서 론

발전소나 일반 공장에 있어서 돌발적인 파괴는 생산성을 격감시키고 파파에 따르는 수리비용 등의 파다 지출을 발생시키며, 심지어 인간의 생명까지도 위협할 수 있는 요인이 된다. 이와 같은 파파는 파파에 이르기 전 흠집이나 크랙의 계측으로써 예측이 될 수가 있다. 비파괴

검사의 목적은 바로 파파가 일어나기 전에 파파의 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 계측을 하기 위한 목적으로 홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry)에 의하여 재료 내부의 결함을 정량적으로 계측하려는 연구

\* 전북대학교 기계설계학과

\*\* 전북대학교 대학원

의 예비 단계로서 외팔보와 양단 고정정보에 대한 홀로그래픽 간섭법의 결과와 공학 분야에서 널리 쓰이고 있는 구조물의 해석기법인 유한요소법(finite element method)에 의한 이론해석의 결과를 비교함으로써 홀로그래픽 간섭법이 미소 변형의 측정에 유용한 측정법이라는 것을 확인하고, 변형의 측정이 기존의 접촉식 방법에서와 같이 탐촉자의 위치로 제한받지 않고 레이저 빔이 확산, 조사되는 전역적인 범위에서 비접촉으로 가능함을 밝히고자 한다. <sup>(1)(2)(3)</sup>

## 2. 측정원리

물체나 사진건판의 위치, 기록 물체의 종류, 두 빔의 입사각 등에 따라 여러 종류의 홀로그래피(holography)가 이루어지나 홀로그래피를 기록하는 가장 기본적인 구성이 Fig. 1에 나타나 있다. <sup>(4)(5)</sup> 단색성(monochromaticity)과 간섭성(coherence)이 좋은 레이저 빔은 확대된 후, 빔 스플리터(beam splitter)에 의해 둘로 나뉘어져 그 중 하나는 직접 기록 매체에 조사되며, 다른 하나는 물체에 비추어져 그 반사된 빛이 기록 매체에 조사되어 두 파는 간섭을 일으키게 된다. 일반적인 사진(photography)이 렌즈 등의 광학계를 사용하여 사진건판에 물체의 상의 강도만을 기록하는 것에 비해 홀로그래피에서는 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. <sup>(6)</sup> 그러므로 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 기록

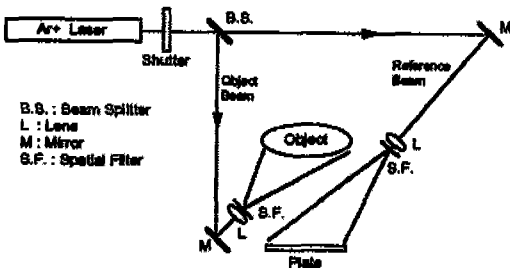


Fig. 1 Optical Arrangement for Recording Hologram

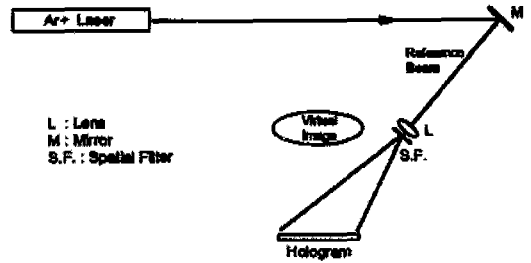


Fig. 2 Optical Arrangement for Reconstruction of Hologram

된 기록매체(hologram)에 빛을 투과시켜 물체의 상을 재생하는 과정으로 구성되어 있다.

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 뒤편 원래 물체가 있었던 위치에 허상(virtual image)을 형성하게 되고, 다른 하나의 공역파(conjugate beam)가 홀로그램의 앞편, 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.

홀로그래픽 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 유체의 수축동이 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 물

체의 상을 동일한 사진건판에 기록함으로써 이루어진다. 그리고 현상과 표백(bleaching) 또는 정착(fixing)의 과정을 거친 후, 제작된 홀로그래프에 기준파를 조사시키면 원래 물체의 허상과 변형된 물체의 허상이 동시에 한 홀로그래프에서 재생되면서 두 상은 서로 간섭을 하게 된다. 따라서 이때 관측되는 간섭무늬로부터 변형 전의 물체와 변형 후의 물체의 표면에서 발생된 변형의 차이를 알 수 있다.<sup>7)</sup>

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

$$\begin{aligned}
 I &= |R(x, y) + S(x, y)|^2 \\
 &= \{R(x, y) + S(x, y)\} \{R^*(x, y) + S^*(x, y)\} \\
 &= RR^* + SS^* + R^*S + RS^* \\
 &= |R|^2 + |S|^2 + R^*S + RS^* \\
 \\
 I' &= |R(x, y) + S'(x, y)|^2 \\
 &= \{R(x, y) + S'(x, y)\} \{R^*(x, y) + S'^*(x, y)\} \\
 &= RR^* + S'S'^* + R^*S' + RS'^* \\
 &= |R|^2 + |S'|^2 + R^*S' + RS'^* \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서  $R$ 은 기준파이고, 변형 전의 물체파  $S$ 는

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

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.

$$\begin{aligned}
 S(x, y) &= S_0 \exp[-i\phi(x, y)] \\
 &= S_0 \exp[-i\phi(x, y) - i\delta\phi] \quad (3)
 \end{aligned}$$

그리고, 식(1)에서  $R^*$ ,  $S^*$ ,  $S'^*$ 는  $R$ 과  $S$  그리고  $S'$ 의 공액파(conjugate wave)이다.

일정시간동안 노출을 주고, 화학적 처리를 거친 후의 홀로그래프의 진폭 투과율(amplitude transmittance)은 다음과 같다.

$$t(x, y) = t_0 + \beta T(I + I') \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 사진건판의 노출특성에 따르는 상수이고,  $t_0$ 는 노출이 없는 필름을 현상했을 경우의 진폭투과율에 해당하는 상수이며  $T$ 는 노출시간이다.

이 홀로그래프를 기준파  $R$ 로 비출 경우 재생되는 파면

은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u(x, y) &= Rt(x, y) \\
 &= R[t_0 + \beta T(I + I')] \\
 &= Rt_0 + R\beta T(I + I') \quad (5)
 \end{aligned}$$

이때  $I+I'$ 는 식(1)로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 I + I' &= 2|S_0|^2 + 2|R|^2 + R^*(S + S') \\
 &\quad + T(S^* + S'^*) \quad (6)
 \end{aligned}$$

식(6)에서 간섭무늬에 관계되는 세번째 항인  $R^*(S+S')$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_3(x, y) &= \beta T |R|^2 S_0 \left\{ \exp[-i\phi(x, y)] \right\} + \\
 &\quad \exp[-i\phi(x, y) - i\delta\phi(x, y)] \quad (7)
 \end{aligned}$$

최종적인 결과의 강도는  $I_r = |u(x, y)|^2$  이 되고 이때  $u(x, y)$ 에서 실제 관측의 대상이 되는 항인  $u_3(x, y)$ 를 제외한 나머지 항들을 상수로 놓을 수 있다. 그리고  $u_3(x, y)$ 에서  $\beta T |R|^2$ 은 홀로그래프의 제작과 재생에서 결정되는 값이므로 상수로 놓는다면  $u_3(x, y)$ 는  $(S + S')$ 에 비례하게 되고,  $u(x, y)$ 는  $u_3(x, y)$ 에 비례하게 되므로 간섭무늬가 관측되는 상의 재생에 있어서 빛의 강도는

$$I_r \propto |S + S'|^2 \quad (8)$$

라 할 수 있으므로, 식(8)을 다시 정리하면

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

이 된다. 물체의 변형량에 따라 위상차  $\delta\phi(x, y)$ 가 달라지므로 이  $\delta\phi(x, y)$ 의 변화에 따라  $I_r$ 은 코사인함수의 진폭을 지나는 등고선(contour) 형태의 간섭무늬를 이루게 된다.<sup>8)9)</sup> 이 간섭무늬 패턴으로부터  $\delta\phi(x, y)$ 의 정보를 얻을 수 있고, Fig. 3과 같이 광원에서 관측점까지의 광경로차(optical path difference)를 계산하여 물체의 변위를 계산할 수 있다. 임의의 간섭무늬에 대하여 변형전과 변형후의 두 파의 광경로차는 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>10)11)</sup>

Fig. 3에서  $S$ 는 광원의 위치이고  $O$ 는 관측점이다. 이때 변형에 의하여 물체의 한점  $P$ 가  $P'$ 로 이동되었을 경우 광경로는  $SP+PO$ 에서  $SP'+P'O$ 로 변화된다.  $SP$ ,  $SP'$ , 그리고  $SO$ 를 각각 벡터  $\vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_2$  그리고  $\vec{A}_3$ 로 나타내면  $PO$ 와  $P'O$ 는  $\vec{A}_3 - \vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_3 - \vec{A}_2$ 로 표현할 수 있다. 그리고 단위벡터  $\vec{U}_1$ ,  $\vec{U}_2$ ,  $\vec{U}_3$ ,  $\vec{U}_4$ 를 도입하

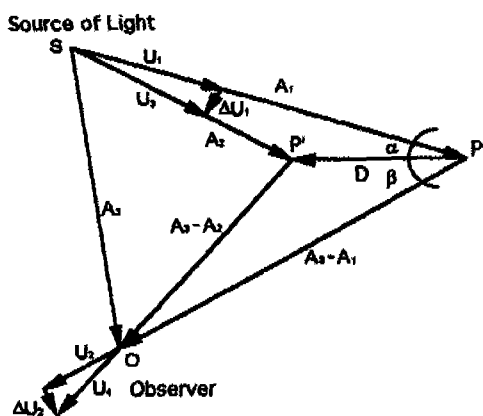


Fig. 3 Determination of Displacement by Holographic Interferometry

여 각각  $\vec{A}_1, \vec{A}_3 - \vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{A}_4 - \vec{A}_2$ 에 내적하면 SP, SP', PO, P'O의 길이를 나타낼 수 있다. 광경로 SPO와 SP'O의 위상을 각각  $\phi_1, \phi_2$ 라 하면 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $\lambda$ 는 광원으로 사용된 레이저의 파장을 나타낸다. 광경로가 물체의 변형으로 인하여 SPO에서 SP'O로 변경되었을 경우의 위상차  $\phi_1 - \phi_2$ 를  $\delta$ 라 하면 다음과 같이 정리된다.

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

이때 물체의 변위가 아주 작다면  $\Delta\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 = 0$ , 그리고  $\Delta\vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2) = 0$ 이라 놓을 수 있으므로 식(11)은 다음과 같이 할 수 있다.

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

여기서  $\vec{D}$ 는 변위벡터를 의미한다.

변위는  $2\pi$ 의 위상차에 의한 간섭무늬의 갯수로써 결정이 되므로  $\delta$ 를  $2\pi n$ 이라 놓으면 간섭무늬 갯수에 대한 변위가 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$n\lambda = (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (13)$$

식(13)은 3차원 공간상의 벡터로 표현된 식이므로 3개의 식이 필요하게 되지만 광학계를 구성할 때  $\beta$ 를  $0^\circ$ 로 하고, 측정하려는 변위를 PO의 방향과 일치시켜 면외(out-of-plane) 변위, 즉 관측방향과 평행한 변위를 측정한다면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} d &= n\lambda / (\cos \alpha + \cos \beta) \\ &= n\lambda / (\cos \alpha + 1) \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (14)$$

### 3. 실험방법과 유한요소해석

#### 3.1 실험방법

홀로그래프의 제작은 앞에서 설명된 이중노출 간섭법에 의해 Fig. 4의 광학계에서 이루어졌다. 그리고 이때 사용된 레이저는 514.5nm의 파장을 갖는 Ar 레이저였

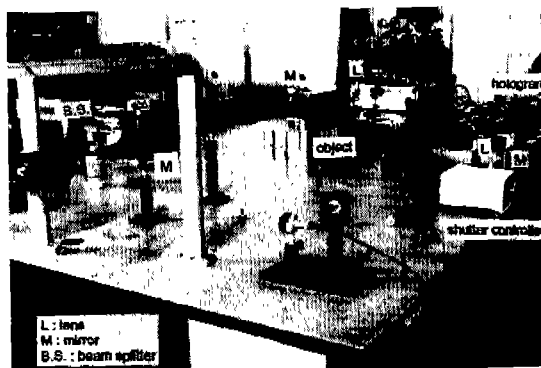


Fig. 4 Photography of optical arrangement

Table 1 Specifications of specimens

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

다. 레이저 빔은 빔 스플리터를 지나면서 두개의 경로로 나뉘어지고 한 빔은 거울에서 반사된 후 현미경 대물렌즈를 통과하고 핀홀을 통과시켜 필터링을 한 후 물체에 조사되는 물체파가 된다. 그리고 다른 한 빔은 기준파로서 렌즈 통과후 필터링되고 사진건판에 확산, 조사되게 된다. 사진건판에는 기준파와 물체파가 만나게 되고 미세한 간섭무늬를 형성함으로써 홀로그램이 만들어지게 된다. 적정노출시간은 빔의 강도에 따라 결정되며, 본 실험에서는 광경로내에 셔터를 위치시켜 노출시간을 조절할 수 있도록 하였다.

실험의 대상으로 외팔보와 양단 고정보를 정하였으며 이들의 제원은 Table 1과 같다.

홀로그래픽 간섭계의 기준파와 물체파의 강도비 (beam ratio)는 약 5:1로 하여, 기준파의 강도는  $2.8 \mu W/cm^2$ , 물체파는  $0.5 \mu W/cm^2$ 로 하여 첫번째 노출의 경우와 두번째 노출 모두 0.5초의 노출 시간을 주어 홀로그램을 제작하였다.

변형을 여기서시키기 위한 하중의 방법으로 마이크로미터 (micrometer)를 사용하였다. 여기서 마이크로미터에 의한 하중은 일단 고정보의 경우, 오른쪽 끝에서 관측점 방향으로 그리고 양단 고정보의 경우 중앙에서 가해주었다. 이때 마이크로미터에 의해 가해진 변위는 일단 고정보의 경우  $10.7 \mu m$ 였다.

### 3.2 유한요소해석

홀로그래픽 간섭법을 이용하여 변형의 차이가 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 가로 길이와 세로길이, 두께를 측정하여 입력 데이터로 사용

하였고 재료는 스테인레스스틸이었다. 해석에 사용된 요소 (element)의 종류로는 쉘 (shell)구조의 8절점 (node) 4각형 요소를 사용했고 외팔보의 경우는 542개의 4각형요소와 5개의 3각형요소로 구성하였으며 절점의 수는 1760개였다. 본 실험에서 사용된 외팔보의 왼쪽 부분은 고정되어 구속된 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 절점으로 구성이 되었다. 모델의 왼쪽과 오른쪽은 구속이 되어있는 변으로 실제의 구속조건인 볼트체결 부위에 해당하는 절점의 변위를 구속시켰다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 홀로그래픽 간섭법에 의한 실험의 결과로서 외팔보의 간섭무늬 패턴을 보여주고 있다. 이것은 외팔보의 자유단인 오른쪽에서 마이크로미터를 사용하여 관찰자 방향으로 미소하중을 가해준 것으로 시편의 변형에 따른 각 지점의 면외변위의 크기에 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 값의 넓은 간섭무늬들이 보이고 있다.

Fig. 6은 유한요소법에 의한 외팔보의 해석 결과로서, 발생된 변위를 일정 간격으로 나타낸 그림으로 홀

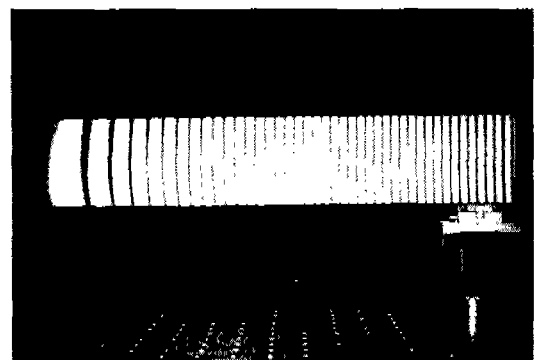


Fig. 5 Holographic Fringe Pattern for Cantilever Beam

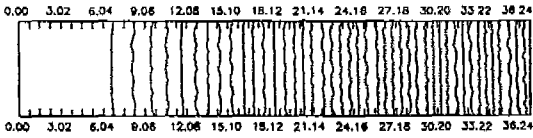


Fig. 6 Contour Map from FEM for Cantilever Beam

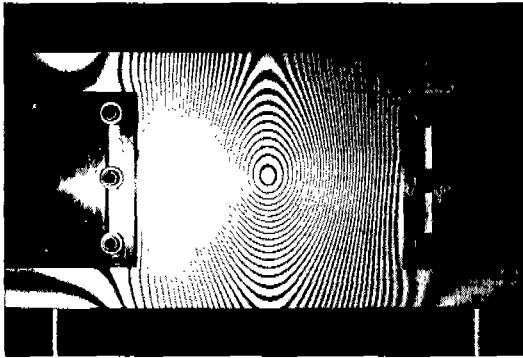


Fig. 7 Holographic Fringe Pattern for Fixed Beam

로그래픽 간섭법에 의해 나타나는 간섭무늬의 결과와 그 형태가 같음을 알 수 있다. 왼쪽에서 오른쪽으로 진행할수록 등고선의 폭이 적어지고 있는데 이는 오른쪽으로 진행할수록 왼쪽에 비해 변위가 더 크게 증가하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 7은 실험에 의한 양단 고정부의 간섭무늬 패턴으로 이것은 양단 고정부의 중앙에 마이크로미터를 사용하여 관찰자 방향으로 하중을 가해 이때의 변위를 간섭무늬 패턴으로서 가시화해낸 것이다. 중앙에 하중을 가하였으므로 중앙부를 중심으로 하여 간섭무늬 패턴이 타원의 형태로 분포하고 있음을 관찰 할 수 있다.

Fig. 8은 양단 고정부에 대한 유한요소법의 해석 결과를 나타내는 그림으로 하중이 가해진 중앙부를 중심으로 타원이 보이고 있어 홀로그래픽 간섭법에 의한 실험의 변형 결과와 일치하는 형태를 보여주고 있다.

실험의 정량적인 해석은 외팔보에 대하여 이루어졌다. 외팔보에 대한 탄성곡선방정식은 다음과 같이 주어진다. 여기서 P는 하중, x는 외팔보의 한지점의 위치, L은 외팔보의 길이, E는 영의 계수 그리고 I는 단면2차모멘트이다.

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

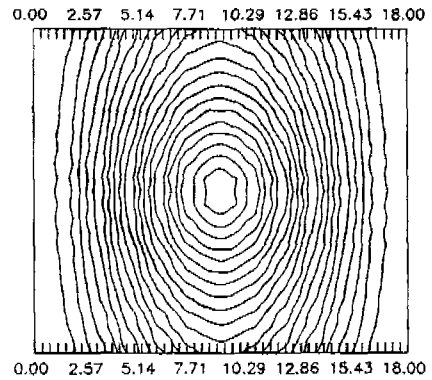


Fig. 8 Contour Map from FEM for Fixed Beam

위의 식 (15)에서 외팔보의 자유단 (x=L=37cm)의 변위 y는 마이크로미터에 의해 여기된 변위이므로 실험 시 측정된 변위 10.7μm이고 Table 1로부터 E와 I를 대입하여 하중 P를 구한후 유한요소법의 하중조건에 대입하여 해를 얻었고 외팔보의 각지점에서의 변위를 구하였다. 홀로그래픽 간섭법에 의한 간섭무늬로부터의 변형량은 식 (14)로부터 구하였다. Fig. 5에서 간섭무늬의 갯수를 세어보면 42개이고, 구성된 광학계로부터 식 (14)에 대입할 α와 β의 각도가 정해지므로 간섭무늬 42개에 해당되는 변위를 구한 뒤 Fig. 5에 보이는 간섭무늬 42개를 곱해주어 최대변위를 구하였고 각 간섭무늬의 간격을 측정함으로써 외팔보의 길이방향(x축 방향)에 대한 변위의 분포를 계산하였다.

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

홀로그래픽 간섭법에 의해 계산된 변위와 마이크로미터에 의해 측정된 최대변위는 약 1.6%의 오차를 보였다.

Fig. 9는 외팔보에서 홀로그래픽 간섭법을 이용한 실험의 결과와 유한요소법 그리고 탄성곡선방정식의 결과를 비교하는 도표로서 잘 일치된 결과를 보여주고 있다. 실선은 탄성곡선방정식을 나타내고 있고 원형의 점으로 표시된 곡선은 유한요소법에 의한 변위의 값을 나타내고 있다. 그리고 홀로그래픽 간섭법에 의한 변위는 사각형 점으로 표시된 곡선이다. Fig. 9에서 보이는 오차는 홀로그래픽의 간섭무늬의 차수를 결정할 때 발생하는 오차와 유한요소 해석 상의 시편의 하중조건과 경계

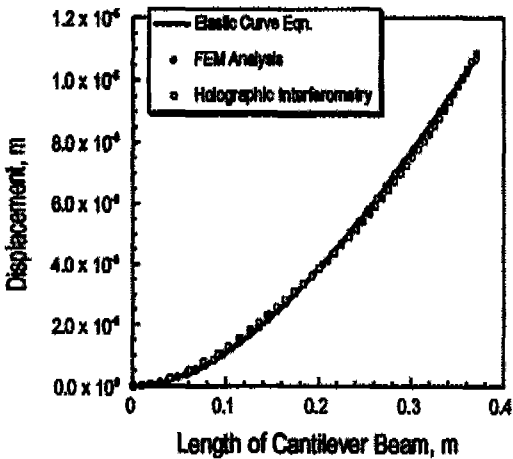


Fig. 9 Comparison of Results from Holographic Interferometry and FEK

조건이 실제의 조건과의 불일치 등에 의해 발생된 오차로 추정된다.

### 5. 결 론

본 연구에서 전술된 바와 같은 실험과 해석을 비교해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 홀로그래픽 간섭법을 이용하여 변형으로 인한 외팔보의 자유단에서의 변위를 1.6%정도의 정밀도로 측정이 가능하였다.

2. 간섭무늬의 2차원적인 분포를 한번에 해석함으로써 관찰되는 면 전체에 대한 변위의 측정이 가능함을 보였다.

3. 유한요소해석과 홀로그래픽 간섭법의 결과가 일치됨을 알 수 있어서 정량적인 실험의 도구가 될 수 있음을 보였다.

그리고 본 연구에서는 연속 발진 레이저(Continuous Wave Laser)를 사용하여 실험실 내의 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. Robert K. Erf, "Holographic Nondestructive Testing", Academic Press, 1974, pp.87~97
2. Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, "Concept and Application of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, 1974, pp.573~588
3. 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
4. D. Gabor, "A New Microscopic Principle", Nature (London), Vol.161, 1948, pp.777~778
5. Robert Guenther, "Modern Optics", John Wiley & Sons, 1990, pp.473~79
6. H. M. Smith, "Holographic Recording Materials", Springer-Verlag, 1977, pp.75~99
7. Thomas M. Kreis, "Automatic Evaluation of Interferometry Patterns", SPIE Vol. 1026 Holography Techniques and Applications, 1988, pp.80~89
8. P. Hariharan, "Optical Holography", Cambridge University Press, 1984, pp.207~231
9. R. Jones, C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, 1989, pp.90~106
10. W. Schumann, J.-P. Zurcher, D. Cuhe, "Holography and Deformation Analysis", Springer-Verlag, 1985, pp.151~183
11. W. Schumann, M. Dubas, "Holographic Interferometry", Springer-Verlag, 1979, pp.77-92