

홀로그래피 간섭계를 이용한 횡변위와 종변위의 동시 측정

김달우 · 임부빈

포항산업과학연구원 계측연구팀, 포항공과대학 물리학과

(1997년 2월 24일 받음)

서로 대칭되는 이중 조명을 이용한 홀로그래피 네파간섭계를 구성하여 횡변위와 종변위를 동시에 측정하였다. 물체파와 재생파의 간섭을 일으킨 후 위상이동법으로 변위위상도를 작성하였으며 최소제곱법맞춤으로 위상도의 잡음을 제거하였다. 이러한 방법으로 네파간섭계의 두 광로에 존재하는 위상의 차와 합에 대한 정보를 구하였으며, 파장 632.8 nm 인 헬륨-네온 레이저 광선에 대하여 종변위와 횡변위는 각각 정밀도 $\lambda/40$ 및 $\lambda/100$ 이내로 측정되었다.

I. 서 론

홀로그래피간섭계는 마하젠더(Mach-Zehnder) 간섭계에 홀로그래프를 도입함으로써 발전되었으며^[1], 그동안 간단하고 제한된 영역에서만 쓰이던 간섭계의 활용영역이 진동분석, 비파괴탐상, 유체 흐름의 가시화 등 여러가지 분야로 크게 확대되었다.^[2-4] 그 후 간섭계의 정밀도를 향상시키기 위해 Twyman-Green 간섭계를 구성하고 기준거울(reference mirror)을 PZT(Piezoelectric transducer)로 움직이면서 참조파의 위상을 변화시키는 위상이동법(phase-shifting method)으로 렌즈의 광로차(optical path difference)를 측정하는 기술이 개발되었다.^[5] 위상이동법은 열소성기록계(thermo-plastic recorder)와 CCD 카메라를 사용하여 간섭무늬를 기록, 재생하며 PZT를 이용해 재생파의 위상을 변화시키는 방법으로써 간섭무늬의 정량적인 해석이 가능하다.

일반적으로 간섭계의 성능은 피사체의 변위를 측정함으로써 알 수 있는데 피사체의 변위는 종변위(out-of-plane)와 횡변위(in-plane)로 구분할 수 있다. 대부분의 간섭계는 이들 두 가지 변위중 한가지의 변위에만 민감하도록 구성하여 간섭무늬를 해석하였으나 최근에 비교적 간단한 광학계로 횡변위와 종변위를 동시에 측정할 수 있는 네파간섭계(four-wave interferometer)가 Simova와 Stove 그리고 Rastogi에 의해 거의 동시에 제안되었다.^[7-11] 네파간섭계에서는 두 개의 물체파를 사용하여 각기 다른 두 개의 홀로그래프를 만든다. 이렇게 작성된 간섭무늬는 횡변위와 종변위의 두 변위에 대한 정보를 갖고 있으며 간섭무늬에서 각각의 성분을 구하기 위하여 물체파를 피사체와 관찰점을 연결하는 축에 대칭으로 두 개 사용한다. 피사체에 변위를 주고 홀로그래프를 재생하면 피사체에서 산란된 물체파와 재생상이 만드는 각기 다른 두개의 간섭무늬가 더해져서 moiré 무늬를 만들게 된다. 이때 PZT로 물체파의 위상을 이동시키면서 필요한 세기분포를 얻으면 두 변위에 대한 정보가 섞여 있는 간섭무늬로부터 각각의 변위에 대한 정보를 분리해 낼 수 있다. 본연구에서는 두 변위를 모두 측정하기 위해 네파간섭계를 구성하고 각각의 물체파가 만드는 간섭무늬에 대해 위상이동법을 적용하여 횡변위와 종

변위를 동시에 측정하고 각각의 오차를 구하였다.

II. 이 론

2.1. 홀로그래피간섭

홀로그래피간섭계는 비교하는 두 파중 적어도 하나는 홀로그래프로부터 재생되는데, 변형 전후에 피사체에서 산란된 두 파에 의한 세기 분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2 \\ &= |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_1 U_2^* \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\phi_2 - \phi_1] \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \end{aligned}$$

$$I_1 = |U_1|^2, \quad I_2 = |U_2|^2, \quad \phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (1)$$

여기서, 두 파의 위상차 ϕ 는 변위, 진동진폭, 변형 등과 같은 물리적인 양과 관계가 있다. 그림 1(a)에서 변위를 주기 전의 입사파의 파수벡터를 \vec{k}_1 , P점에서 산란되어 Q점에 도달하는 반사파의 파수벡터를 \vec{k}_3 , 위상을 ϕ_1 이라 하고, 변위를 준 후의 입사파와 반사파의 파수벡터 및 위상을 각각 $\vec{k}_2, \vec{k}_4, \phi_2$ 라 하고, 광원 O 또는 피사체에서 반사될 때 생기는 임의의 위상을 ϕ_0 이라고 하면 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_3 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \phi_0 \quad (2)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \vec{k}_4 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_2) + \phi_0 \quad (3)$$

이때, 변위를 준 후에 P점을 향하는 빛과 Q점을 향하는 빛의 방향이 조금 변했다면,

$$\vec{k}_2 = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1, \quad \vec{k}_4 = \vec{k}_3 + \Delta\vec{k}_3 \quad (4)$$

$$\phi = (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) + \Delta\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_2 + \Delta\vec{k}_3 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_2) \quad (5)$$

이 된다. 실제로 거의 모든 실험장치에서 $|\vec{r}_1|, |\vec{r}_2|$ 는 $|\vec{L}| = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|$ 보다 훨씬 크므로 근사적으로 $\Delta\vec{k}_1 \perp \vec{r}_2, \Delta\vec{k}_3 \perp (\vec{R} - \vec{r}_2)$ 라고 볼 수 있다. 이 관계를 고려하면 ϕ 는 다음과 같이 간단히 표현할

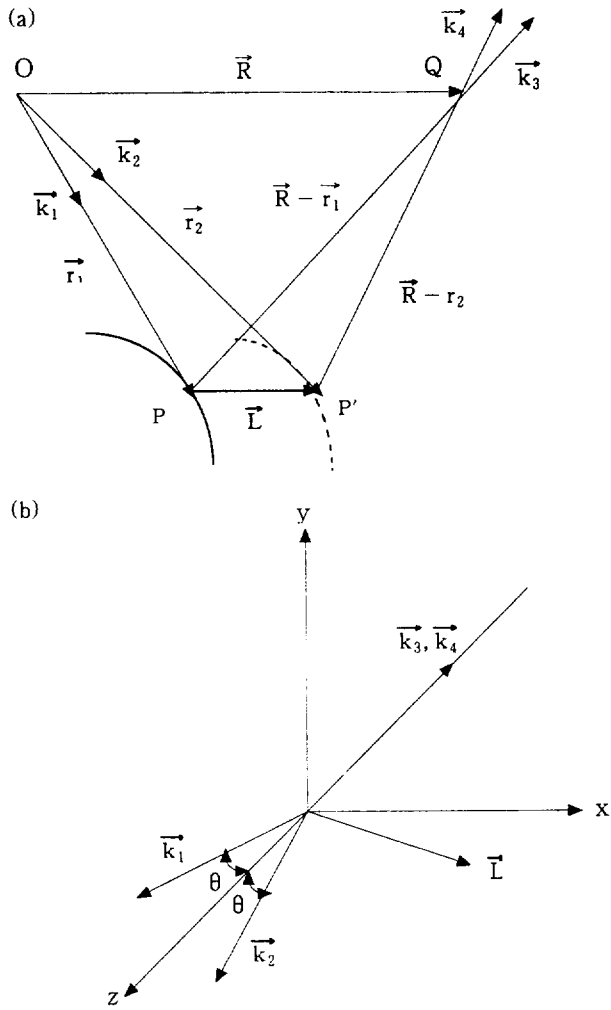


그림 1. 변위벡터와 파수벡터와의 관계. (a) 일반적인 경우. (b) 두 개의 입사파 \vec{k}_1, \vec{k}_2 가 z축에 대칭이며 xz평면 상에 있고 반사파 \vec{k}_3, \vec{k}_4 가 동일한 경우.

수 있다.

$$\phi = -(\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L} \quad (6)$$

식 (6)은 홀로그래피 간섭계의 간섭무늬를 양적으로 해석하는데 필요한 바탕을 이룬다.

이제 특수한 경우로써 크기가 같은 두 입사파의 파수벡터 \vec{k}_1, \vec{k}_2 가 xz 평면 상에 있고 z 축에 대하여 대칭인 경우를 생각하자 그림 1 (b) 그리고 입사파와 반사파의 위상 ϕ_1, ϕ_2 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L} \\ \phi_2 &= (\vec{k}_4 - \vec{k}_2) \cdot \vec{L} \end{aligned} \quad (7)$$

이때 두 반사파의 파수벡터는 그림 1 (b)에 나타난 바와 같이 $\vec{k}_3 = \vec{k}_4$ 이고, 모든 파수벡터의 크기는 같으므로 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= kL_x \sin \theta + kL_z \cos \theta + kL_z \\ \phi_2 &= -kL_x \sin \theta + kL_z \cos \theta + kL_z \end{aligned} \quad (8)$$

또한 식 (8)로부터 위상의 차와 합은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_1 - \phi_2 = 2kL_x \sin \theta \\ \Psi &= \phi_1 + \phi_2 = 2kL_z (1 + \cos \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서, 횡변위 L_x 와 종변위 L_z 는 각각 다음과 같이 두 위상의 차와 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_x &= \frac{\lambda \Phi}{4\pi \sin \theta} \\ L_z &= \frac{\lambda \Psi}{4\pi (1 + \cos \theta)} \end{aligned} \quad (10)$$

특히, 횡변위와 종변위를 동시에 측정하기 위해서는 두개의 물체파를 피사체에 같은 각도로 비추면서 두 물체파의 위상을 동시에 변화시키면 된다. 이제 식 (8)의 위상을 구하려면 이미 알고 있는 위상을 간섭무늬에 더해주는 위상이동법을 사용한다.^[12-13] 이를 위해서 참조파의 위상을 위상이동자(phase shifter)를 써서 변화시키면, 세기분포를 나타내는 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$I_i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \phi_i) \quad (11)$$

여기서 ϕ_i 는 참조파의 위상에 더해진 참조위상(reference phase)이며 빛의 세기에 관한 미지수가 2개, 위상에 관한 미지수가 1개이므로 세기분포를 구하기 위해서는 적어도 3개 이상의 정보가 필요하다. 이 3개의 정보를 얻기 위해서 참조파의 위상을 변화시키고 그 세기분포를 기록하는 과정을 세 번 되풀이하면 미지수를 구할 수 있다. 이제 평균세기를 I_0 라 하면

$$\begin{aligned} I_0 &= I_1 + I_2 \\ I_i &= I_0 [1 + V_0 \cos(\phi + \phi_i)] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 V_0 는 가시도(visibility)이다.

$$V_0 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (13)$$

2.2. 위상이동법

위상이동법은 세기 분포를 어떻게 저장하느냐에 따라 간섭무늬의 선명도에 차이가 있다. 세기분포를 구할 때 받아들이는 화면의 수가 3장이면 3단계법(3 buckets), 4장이면 4단계법(4 buckets)이라 하는데 보통 5장 이내의 화면을 받는다. 일반적으로 화면의 수가 R장인 R단계법(R buckets)을 사용한 해^[5]는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi &= -\arctan \frac{\sum_{i=1}^R I_i \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^R I_i \cos \phi_i} \\ \phi_i &= (i-1) \frac{2\pi}{R} \end{aligned} \quad (14)$$

변위를 측정하기 위해서 몇개의 화면, 즉 세기분포를 받느냐 하는 것은 측정하고자 하는 양의 정확도와 오차의 원인을

고려해서 결정한다. 일반적으로 잘 정돈된 광학계를 사용할 경우, 위상이동법에 의한 측정 오차는 $\lambda/100$ 보다 작으나 실제로는 공기의 흐름이나 진동, 광원의 불안전성, 참조파 위상 이동의 부정확, 검지기의 비선형성, 그리고 검지 신호의 양자화 등에 의해 오차가 발생하며 이러한 오차로부터 발생하는 부정확한 측정결과를 보정하기 위한 Rastogi 방법, 네단계법 등 많은 알고리즘이 개발되어 왔다.^[14-25]

2.2.1. Rastogi 방법

변위를 측정하기 위한 두 개의 물체파 중에서 열소성기록계를 기준으로 왼쪽으로 들어가는 물체파에 의해 생기는 간섭무늬에 첨자 1을, 오른쪽으로 들어가는 물체파에 의해 생기는 간섭무늬에 첨자 2를 붙이면 식 (12)는 다음과 같이 된다.

$$I = I_1 + I_1 V_1 \cos \phi_1 + I_2 + I_2 V_2 \cos \phi_2 \quad (15)$$

위의 식에서 I_1, I_2 는 각각 왼쪽 경로와 오른쪽 경로에 의한 간섭무늬의 평균세기이고 V_1, V_2 는 각각의 가시도(visibility)를 나타내며 ϕ_1, ϕ_2 는 두 물체파에 의한 위상차다. 두 물체파에 $(0, 0), (0, \frac{2\pi}{3}), (\frac{2\pi}{3}, 0), (0, -\frac{2\pi}{3}), (-\frac{2\pi}{3}, 0)$ 의 위상을 주면 세기분포는 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_I &= I_1 + I_2 + I_1 V_1 \cos \phi_1 + I_2 V_2 \cos \phi_2 \\ I_{II} &= I_1 + I_2 + I_1 V_1 \cos \phi_1 + I_2 V_2 \cos(\phi_2 + \frac{2\pi}{3}) \\ I_{III} &= I_1 + I_2 + I_1 V_1 \cos(\phi_1 + \frac{2\pi}{3}) + I_2 V_2 \cos \phi_2 \\ I_{IV} &= I_1 + I_2 + I_1 V_1 \cos \phi_1 + I_2 V_2 \cos(\phi_2 - \frac{2\pi}{3}) \\ I_V &= I_1 + I_2 + I_1 V_1 \cos(\phi_1 - \frac{2\pi}{3}) + I_2 V_2 \cos \phi_2 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 각 위상을 ϕ_1, ϕ_2 라 하면 위상의 차와 합은 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_1 - \phi_2 = \tan^{-1} \\ \tan^{-1} & \frac{\sqrt{3}(I_I I_{III} - I_I I_{II} - I_I I_{IV} + I_I I_V - I_{II} I_V + I_{III} I_{IV})}{I_I(2I_I - I_{II} - I_{III} - I_{IV} - I_V) - I_{II} I_V - I_{III} I_{IV} + 2I_{II} I_{III} + 2I_{IV} I_V} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Psi &= \phi_1 + \phi_2 = \tan^{-1} \\ \tan^{-1} & \frac{\sqrt{3}(I_I I_{IV} - I_I I_{II} - I_I I_{III} + I_I I_V + I_{II} I_{III} - I_{IV} I_V)}{I_I(2I_I - I_{II} - I_{III} - I_{IV} - I_V) - I_{II} I_{III} - I_{IV} I_V + 2I_{II} I_V + 2I_{III} I_{IV}} \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 각각의 위상도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \arctan \frac{\sqrt{3}(I_V - I_{III})}{2I_I - I_{III} - I_V} \\ \phi_2 &= \arctan \frac{\sqrt{3}(I_{IV} - I_{II})}{2I_I - I_{II} - I_{IV}} \end{aligned} \quad (19)$$

Rastogi의 방법은 식 (16)과 같이 I_I 부터 I_V 까지 다섯장의 세기분포를 기록하지만 실제로는 식 (19)와 같이 ϕ_1 에서는 I_I, I_{III}, I_V 의 3장의 세기 분포, ϕ_2 에서는 I_I, I_{II}, I_{IV} 의 3장의 세기 분포 등 각각의 경로를 따라 3장씩의 홀로그램을 얻는 3단계법(3 buckets)에 해당한다는 것을 알 수 있다.

2.2.2. 네단계법(four buckets)

두 개의 물체파 중에서 오른쪽 경로의 빛을 차단하고 왼쪽 경로의 빛으로 4장의 세기분포를 얻은 후 왼쪽 경로의 빛을 차단하고 오른쪽 경로의 빛으로 4장의 세기분포를 구하면 각각의 독립적인 경로를 따라 구한 위상도를 따로 평가할 수 있다. 따라서 PZT의 이상행동으로 참조파 오차가 생기면 세기분포를 다시 구하면 되므로 PZT의 이상행동을 보정할 수 있다.

오른쪽 경로의 빛에 의해 생기는 간섭무늬에 네단계법을 적용해서, 네개의 세기분포 $I_I(\phi_I=0), I_{II}(\phi_{II}=\pi/2), I_{III}(\phi_{III}=\pi), I_{IV}(\phi_{IV}=3\pi/2)$ 를 얻고, 왼쪽 경로의 빛에 의해 생기는 간섭무늬에 네단계법을 적용해서, 네개의 세기분포 $I_V(\phi_V=0), I_{VI}(\phi_{VI}=\pi/2), I_{VII}(\phi_{VII}=\pi), I_{VIII}(\phi_{VIII}=3\pi/2)$ 를 얻으면, 각각의 위상은 식 (14)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_I &= I_1 + I_1 V_1 \cos \phi_1 \\ I_{II} &= I_1 + I_1 V_1 \cos(\phi_1 + \frac{\pi}{2}) \\ I_{III} &= I_1 + I_1 V_1 \cos(\phi_1 + \pi) \\ I_{IV} &= I_1 + I_1 V_1 \cos(\phi_1 + \frac{3\pi}{2}) \\ I_V &= I_2 + I_2 V_2 \cos \phi_2 \\ I_{VI} &= I_2 + I_2 V_2 \cos(\phi_2 + \frac{\pi}{2}) \\ I_{VII} &= I_2 + I_2 V_2 \cos(\phi_2 + \pi) \\ I_{VIII} &= I_2 + I_2 V_2 \cos(\phi_2 + \frac{3\pi}{2}) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 ϕ_1, ϕ_2 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \arctan \frac{I_{IV} - I_{II}}{I_I - I_{III}} \\ \phi_2 &= \arctan \frac{I_{VIII} - I_{VI}}{I_V - I_{VII}} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (20)과 (21)에서 I_1, I_2 는 오른쪽 경로와 왼쪽 경로에 의한 간섭무늬의 평균세기이고, V_1, V_2 는 각각의 가시도를 나타낸다. 각각의 위상을 따로 구한 후 위상의 합과 차를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \arctan \frac{(I_{IV} - I_{II})(I_V - I_{VII}) - (I_I - I_{III})(I_{VIII} - I_{VI})}{(I_I - I_{III})(I_V - I_{VII}) + (I_{IV} - I_{II})(I_{VIII} - I_{VI})} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Psi &= \phi_1 + \phi_2 \\ &= \arctan \frac{(I_{IV} - I_{II})(I_V - I_{VII}) + (I_I - I_{III})(I_{VIII} - I_{VI})}{(I_I - I_{III})(I_V - I_{VII}) - (I_{IV} - I_{II})(I_{VIII} - I_{VI})} \end{aligned} \quad (24)$$

2.3. Moiré 무늬의 형성

Moiré 무늬는 두 개 이상의 겹쳐진 회절격자에서 회절된 파가 이루는 무늬를 말하는데 홀로그램을 다양한 방향과 간격을 갖는 회절격자의 모임이라고 할 수 있으므로 홀로그램에서 재생되는 상도 moiré 무늬라고 할 수 있다.^[28] 네과간섭계

(four-wave interferometry)에서 나타나는 간섭무늬는 독립적인 두 간섭무늬가 더해져서 생기며 이들 각각의 무늬로부터 변위를 정성적으로 알아낼 수 있다. 식 (8)을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \phi_1 &= kL_x \sin \theta + kL_z \cos \theta + kL_z \\ &= kL_x \sin \theta + (k \cos \theta + k) L_z \\ &= aL_x + bL_z \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \phi_2 &= -kL_x \sin \theta + kL_z \cos \theta + kL_z \\ &= -aL_x + bL_z \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$\begin{aligned} a &\equiv k \sin \theta \\ b &\equiv k (\cos \theta + 1) \end{aligned} \quad (27)$$

이다. CCD 카메라는 640×480의 화소(pixel)로 구성되어 있고 피사체의 간섭무늬를 이 크기로 샘플링 한다. 이를 그림 화일로 저장할 때 나타나는 단위는 실제 좌표와는 같지 않다. 따라서, 실제 좌표는 (x, y)좌표계로 나타내고 피사체의 간섭무늬는 새로운 변수 (ξ, η)를 도입하여 표현하기로 한다 (그림 2). 새로운 좌표계 (ξ, η)에서 간섭무늬의 방향과 밀도, 즉 간섭무늬의 수에 대한 정보를 구하기 위하여 벡터 \vec{D}_1, \vec{D}_2 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \vec{D}_1(\xi, \eta) &= \nabla \phi_1(\xi, \eta) \\ \vec{D}_2(\xi, \eta) &= \nabla \phi_2(\xi, \eta) \\ \nabla &= \hat{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} + \hat{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (28)$$

식 (28)을 전개시키면 \vec{D}_1, \vec{D}_2 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \vec{D}_1(\xi, \eta) &= \hat{\xi} \left(a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \xi} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \xi} \right) \\ &\quad + \hat{\eta} \left(a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \eta} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right) \\ \vec{D}_2(\xi, \eta) &= \hat{\xi} \left(-a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \xi} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \xi} \right) \\ &\quad + \hat{\eta} \left(-a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \eta} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

특히 피사체가 강체이면 회전에 의해 생기는 횡변위는 x축

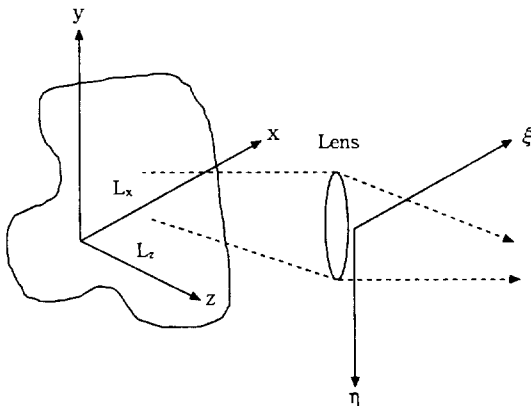


그림 2. 물체와 상의 좌표계.

을 따라 일정하므로 다음의 조건을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_x}{\partial \xi} &= 0, \\ \frac{\partial L_x}{\partial \eta}, \frac{\partial L_z}{\partial \xi}, \frac{\partial L_z}{\partial \eta} &= \text{constant for } (\xi, \eta). \end{aligned} \quad (30)$$

따라서, \vec{D}_1, \vec{D}_2 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \vec{D}_1(\xi, \eta) &= \hat{\xi} b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \xi} + \hat{\eta} \left(a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \eta} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right) \\ \vec{D}_2(\xi, \eta) &= \hat{\xi} b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \xi} + \hat{\eta} \left(-a \frac{\partial L_x(\xi, \eta)}{\partial \eta} + b \frac{\partial L_z(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

벡터 \vec{D}_1, \vec{D}_2 의 ξ축의 기울기는 서로 같으나 η축의 경우는 $\frac{\partial L_x}{\partial \eta}$ 의 부호가 서로 다르다. 따라서, \vec{D}_1 과 \vec{D}_2 의 η축 성분의 크기가 같고 방향이 서로 반대면 $|a \frac{\partial L_x}{\partial \eta}| \gg |b \frac{\partial L_z}{\partial \eta}|$, η축 성분의 크기와 방향이 모두 같으면 $|a \frac{\partial L_x}{\partial \eta}| \ll |b \frac{\partial L_z}{\partial \eta}|$ 임을 알 수 있다. 따라서 벡터 \vec{D} 를 이용하면 종변위 또는 횡변위가 어느 축을 중심으로 회전한 것인지 쉽게 판단할 수 있다.

III. 실험장치 및 방법

실험을 위한 광학계는 그림 3과 같다. 광원으로는 출력 10 mW, 파장 632.8 nm인 He-Ne 레이저를 사용했다. 레이저에서 나온 광선은 빔살가르계 (beam splitter)를 거쳐 물체파와 참조파로 나누어진 후 감쇠기 (attenuator)에 의해 세기가 조절된다. 물체파는 다시 빔살가르계를 거쳐 두 개의 물체파로 나누어진다. 이 때 사용하는 빔살가르계는 두개의 반파장판 (half-wave plate)과 편광 빔살가르계로 구성되어 있어 처음 통과하는 파장판의 광축을 조절하므로써 두 파의 세기 비 (intensity ratio)를 조절할 수 있다. 편광된 광선이 광축 (fast axis)의 각도를 조절할 수 있는 반파장판을 통과하고 편광 빔살가르계를 거치면 S파와 P파로 나누어진다. 투과하는 것이 P파인데, 이 빛은 다시 고정된 반파장판을 거치면서 반사하는 S파와 동일한 편광상태가 된다. 두 물체파는 각각의 경로를 따라 테이블의 한 변의 방향인 z축과 대칭이 되도록 동일한 각도(45°)로 피사체로 입사하고 광의 경로에 놓인 PZT를 이용해서 빛의 경로를 미세조정할 수 있게 하였다. 피사체를 향하는 빛은 평행광이고 광테이블의 면(xy평면)과 평행하다. 빛이 대물렌즈와 핀홀(pin-hole)을 거치면서 구면파가 형성되며 이 구면파는 초점거리 200 mm인 plano-convex 렌즈를 지나면서 평행광으로 바뀐다.

피사체로는 일반 광학실험용의 회전대(rotation stage)를 사용하였다. 회전대는 광학 테이블의 한 변(x축)과 평행하며 테이블의 면(xz평면)과는 수직방향으로 세운 후 광학 테이블에 고정시키고 회전원판만 회전할 수 있도록 하였다(그림 4). 회전원판은 직경 60 mm, 두께 5 mm 크기의 알루미늄 판으로써 회전축을 중심으로 테이블과 수직을 이루는 평면인 xy평면 상에서 회전하므로 x와 y변위가 모두 일어나지만 빛은 광학테이블 면과 수평인 xz평면에서만 움직이므로 y변위는 측정에 기여하지 못한

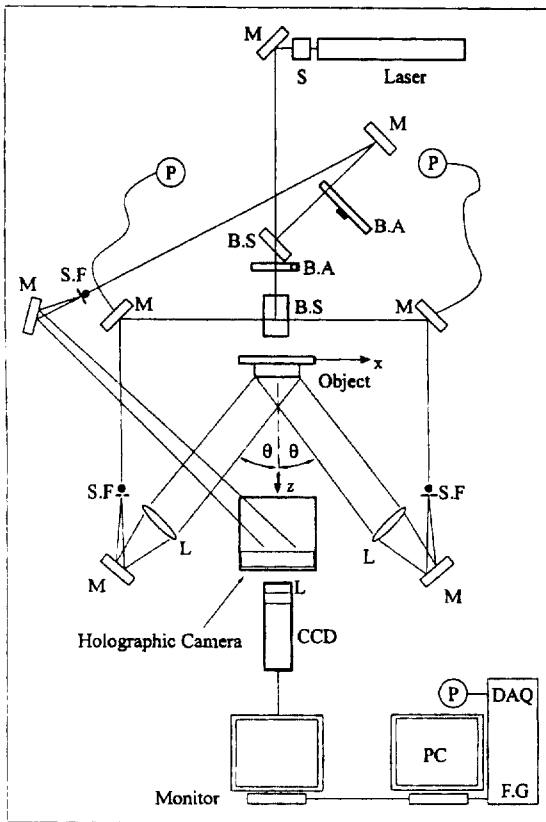


그림 3. 광학계 구성도(DAQ : data acquisition board, FG : frame grabber, SF : spatial filter, BA : beam attenuator, BS : beam splitter, M : mirror, L : lens, P : mirror on PZT, S : shutter).

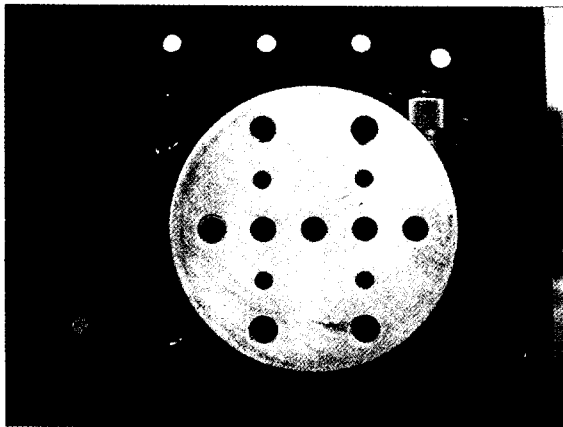


그림 4. 피사체(rotation stage).

다. 변위측정용 광학계 전체를 광학테이블 위에 설치하고 둘레에 알루미늄으로 만든 막대를 세운 후 커튼으로 막아서 외부의 빛과 공기의 흐름을 차단하여 오차의 요인을 감소시켰다.

위상이동자(PZT)의 입력전압은 가변적으로 바꿀 수 있도록 프로그램 상에서 입력하였다. PZT의 변위에 따른 간섭무늬의 변화를 실시간으로 확인하기 위해 CCD 카메라를 외부 모니터에 연결한 후 다시 컴퓨터의 frame grabber로 연결시켰으며 각각의 세기분포는 파일로 저장하였다. 위상이동자로는 전기

일그러짐 효과(electrostrictive effect)를 이용한 micro-translator(Queensgate사 MT30)를 사용하여 기존의 PZT에서 나타나는 비선형성과 겪음현상(hysteresis)에 의한 오차요인을 감소시켰다. 위상이동자의 입력전압은 data acquisition board (National Instruments사 AT-MIO-16)에서 아날로그 출력으로 조절했다. 위상이동자에 걸어주는 전압대 변위 특성을 구하기 위해서 측정하고자 하는 위상이동자가 있는 쪽의 빛만을 사용하여 홀로그래프를 찍고 피사체에 변위를 주지 않은 상태에서 PZT의 입력전압을 변화시켜 변위가 없는 실시간 홀로그래피 간섭계를 구성하였다. 세기분포를 CCD로 받고 전압을 변화시키면서 화면상의 한 점의 세기 정보를 얻어 위상이 변한 정도를 측정하였다.

홀로그래프를 기록하기 위하여 열소성기록계와 열소성판을 사용하여 홀로그래프의 기록과정을 자동화하고 노출에서 현상까지의 과정을 1분 이내로 줄이고 간섭무늬의 회절효율도 자동으로 검사하였다. 참조파와 물체파의 편광상태가 서로 ϕ 의 각을 이루면, 두 파에 의한 간섭무늬는 다음과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (32)$$

따라서, 높은 가시도를 얻기 위해서는 두 파의 편광상태가 같아야 한다($\phi = 0$). 광학테이블 면이 입사면이므로 편광을 이면에 수직인 방향(S파)이 되게 하면, 거울에 의한 반사에 대해서도 편광상태가 많이 변하지 않는다. 또한, 스펙클로 인한 비선형효과를 피하기 위해 보통 참조파의 세기를 물체파의 세기보다 크게 하였다.^[29]

홀로그래프를 찍은 다음 각각의 경로를 통해 재생된 상을 확인하였다. 상이 밝게 나타나면, 피사체에 변위를 가하고 간섭무늬를 관찰한다. 변위에 의한 간섭무늬를 CCD 카메라로 기록할 때, CCD 면에서 스펙클이 형성되는데 CCD pixel에서 평균(averaging)이 된다면 스펙클 효과를 없앨 수 있으므로 CCD 면에 생기는 스펙클의 크기도 되도록 작게 하였으며 이를 위해 홀로그래프나 렌즈를 통과할 때의 스펙클 크기는 피사체로부터 렌즈까지의 거리를 크게 하고 f수가 작은 렌즈를 사용하였다.

피사체의 처음 위치에서 홀로그래프의 제작과정이 완료된 후, 회전대를 조금씩 회전시키면서 모니터에 나타나는 간섭무늬를 관찰하였으며 간섭무늬의 간격이 적당하면 위상이동법을 적용하였다. 이때 Rastogi의 방법은 각각의 경로에 순차적으로 $2\pi/3$ 만큼 위상을 변화시키는데 두 경로에 의해 생긴 두 간섭무늬를 동시에 기록한다. 이에 반해 네단계법은 하나의 물체파를 가리고 남은 물체파에 의해 생기는 간섭무늬에 $\pi/2$ 만큼씩 위상을 이동시키면서 네 장의 세기분포를 얻은 후 다른 물체파에 대해서도 같은 방법으로 세기분포를 얻는다.

IV. 실험결과 및 해석

4.1. 변위에 따른 간섭무늬

그림 5는 피사체인 회전대를 임의의 각도로 조금씩 회전시키면서 얻은 간섭무늬이다. 그림에서 (a)는 왼쪽 경로의 빛을 차단하고 오른쪽 경로의 빛만으로 얻은 것, (b)는 오른쪽 경로

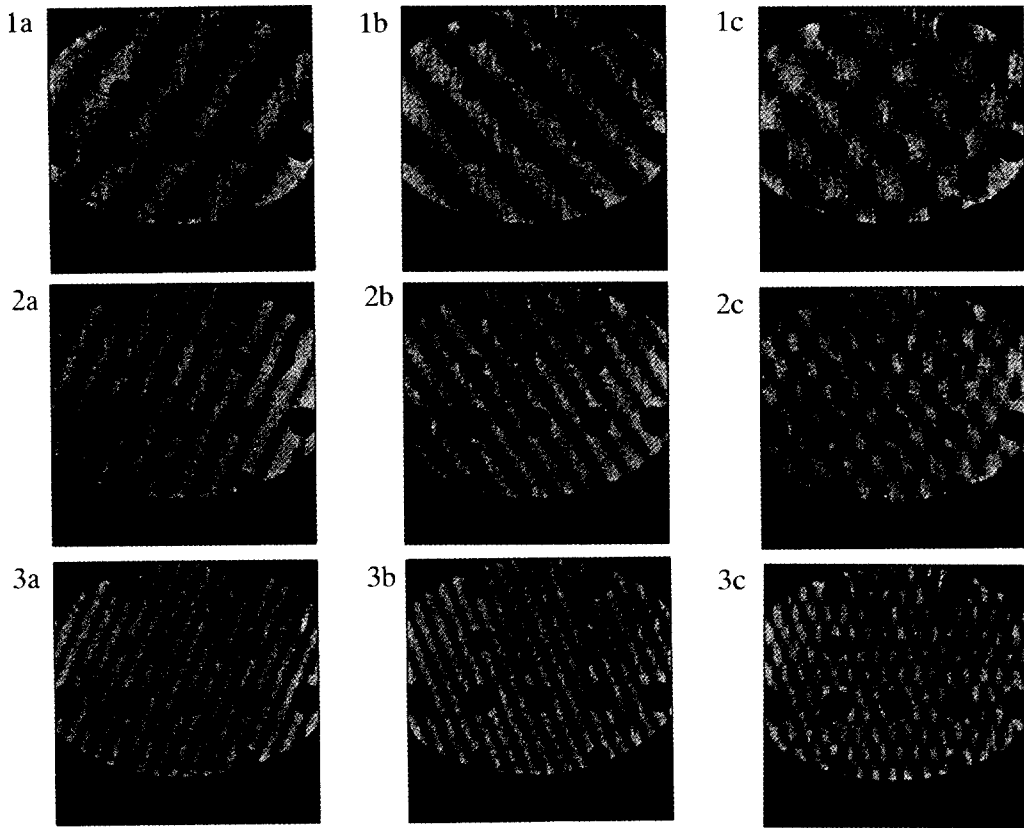


그림 5. 피사체의 회전에 의한 간섭무늬. (1a, 2a, 3a): 오른쪽 경로에 의한 간섭무늬, (1b, 2b, 3b): 왼쪽 경로에 의한 간섭무늬, (1c, 2c, 3c): 두 빛을 모두 사용해서 구한 간섭무늬.

의 빛을 차단하고 왼쪽 경로의 빛만으로 얻은 것, (c)는 두 경로의 빛을 모두 사용해서 얻은 moiré 무늬이며 그림의 번호중 같은 숫자가 포함되어 있는 그림은 동일한 회전각에서 측정된 것을 나타낸다. 그림 5에서 보는 바와 같이 회전원판을 회전시켜 회전각을 피사체 변위로 주면 간섭무늬의 방향은 서로 같고 무늬의 간격은 회전각의 크기에 따라 다르다. 이 간섭무늬에서 식 (31)에 정의된 \vec{D}_1 , \vec{D}_2 의 방향은 그림 6의 (a) 또는 (b) 중의 하나가 된다. 간섭무늬만으로는 식 (31)에서 정의한 \vec{D}_1 , \vec{D}_2 의 방향을 구별할 수 없는데, 결퍼진 위상도를 구하면 두 개의 가능한 방향중 하나를 결정할 수 있다. 위의 간섭무늬를 해석하는데 있어서 그림 5 (1a~3a)를 그림 6 (a)의 \vec{D}_1 이라고 가정하면 그림 5 (1b~3b)는 \vec{D}_2 에 해당된다. 그림 6 (a)의 좌표계에서 \vec{D}_1 과 \vec{D}_2 의 η 축 성분은 크기가 같고 방향이 서로 반대이므로 식 (31)에서 \vec{D}_1 과 \vec{D}_2 의 η 항을 비교하면 $|a \frac{\partial L_x}{\partial \eta}| \gg |b \frac{\partial L_z}{\partial \eta}|$ 임을 알 수 있다. 실험에서 입사각은 45° 이므로 식 (27)에서 $a \approx 0.41b$ 이 되며 $\frac{\partial L_x}{\partial \eta}$ 가 크지 않을 경우에는 $\frac{\partial L_z}{\partial \eta} \approx 0$ 이 된다. 따라서 종변위 L_z 는 η 축을 중심으로 움직임을 알 수 있다.

4.2. Rastogi의 방법과 네단계법의 비교

네파간섭계로 작성한 간섭무늬로부터 피사체의 변위에 의

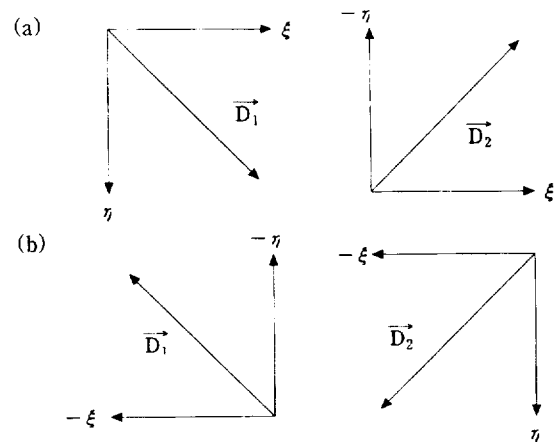


그림 6. 두 가지 가능한 변위벡터.

한 위상을 알아내기 위해서 위상이동법을 사용한다. 위상이동법중 Rastogi의 방법은 그림 5 (1c~3c), 즉 moiré 무늬를 이용해 위상도를 구하는 것이고, 네단계법은 그림 5의 (a)와 (b) 각각의 위상으로부터 횡변위와 종변위의 위상도를 구하는 것이다. 간섭무늬의 간격이 넓을수록 위상도를 평가하기가 쉬우므로 그림 5의 간섭무늬에 Rastogi의 방법과 네단계법을 적용한 결과를 비교했으며 위상도를 구하는 알고리즘은 최소자승추적법을 사용했다.^[26,27] 그림 7은 그림 5 (1c)에 Rastogi의 방법을 적용하여 구한 위상도이다. 그림중 (a)는 오른쪽 경로에 의한 위상도, (b)는 왼쪽 경로에 의한 위상도이다. 오른쪽

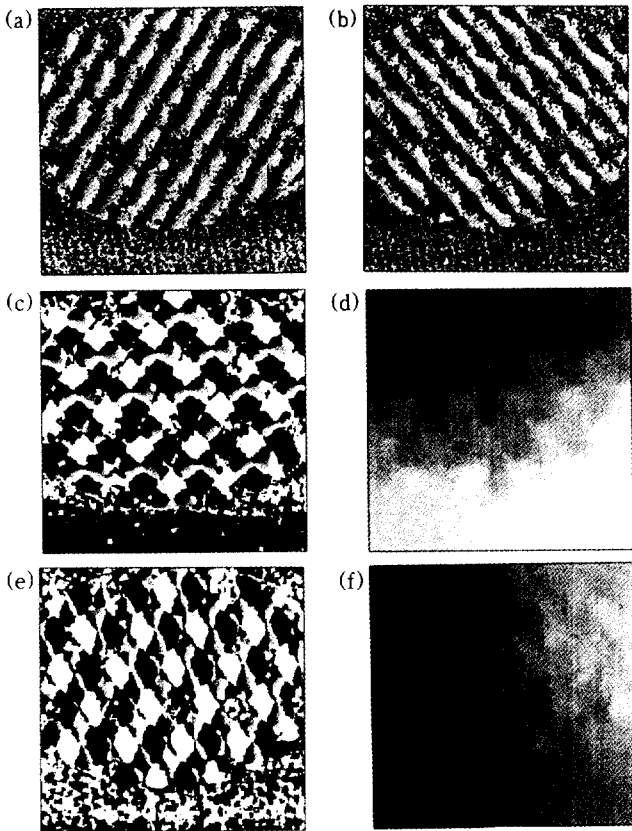


그림 7. Rastogi 방법을 적용한 위상도. (a) 오른쪽 경로에 의한 위상도, (b) 왼쪽 경로에 의한 위상도, (c) 횡변위 위상도, (d) 횡변위 결퍼진 위상도, (e) 종변위 위상도, (f) 종변위 결퍼진 위상도.

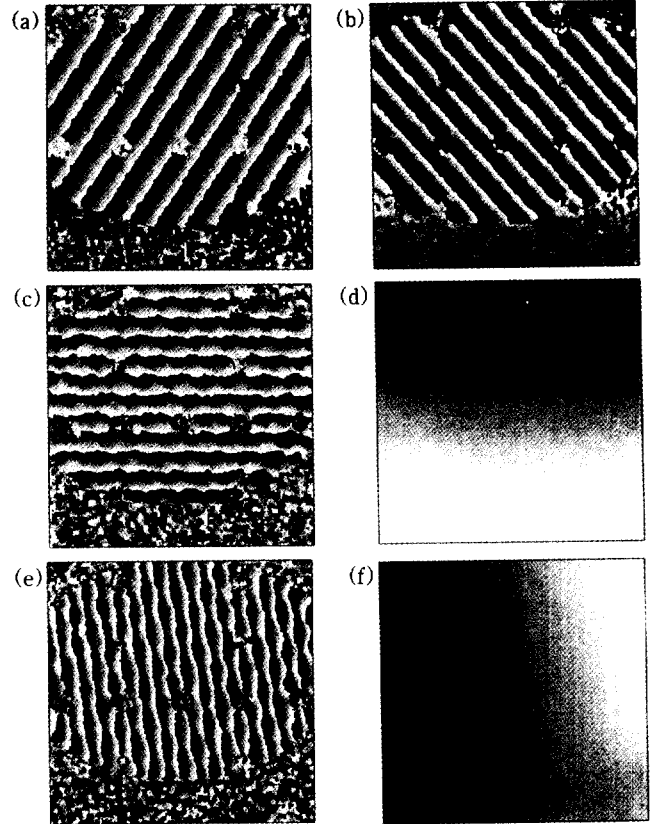


그림 8. 네단계법을 적용한 위상도. (a) 오른쪽 경로에 의한 위상도, (b) 왼쪽 경로에 의한 위상도, (c) 횡변위 위상도, (d) 횡변위 결퍼진 위상도, (e) 종변위 위상도, (f) 종변위 결퍼진 위상도.

경로의 위상도는 간섭무늬가 직선으로 나타났는데 왼쪽 경로의 위상도는 간섭무늬가 물결모양으로 나타났다. 이것은 참조 위상(reference phase)에 오차가 생겼기 때문이다. 또한 (c)는 횡변위의 위상도, (d)는 횡변위의 결퍼진 위상도를 나타내고 (e)는 종변위의 위상도, (f)는 종변위의 결퍼진 위상도를 나타낸다.

네단계방법을 적용하여 구한 위상도는 그림 8과 같다. 그림 8 (a)는 오른쪽 경로에 의한 위상도, 8 (b)는 왼쪽 경로에 의한 위상도인데 오른쪽 경로의 위상도에 비해서 왼쪽 경로의 위상도가 간섭무늬에 약간의 물결모양을 나타내고 있다. 이러한 물결 모양은 참조 위상의 오차에 기인한다. 그림 8 (c)와 8 (e)는 각각 횡변위 위상도 및 종변위 위상도이며 그림 8 (d)와 8 (f)는 이들 각각의 결퍼진 위상도를 나타낸 것으로서 Rastogi 방법을 사용했을 때보다 위상분포가 매끈하게 나타나 있음을 보이고 있다.

이상과 같이 두가지 방법을 비교하여 보면, Rastogi의 방법은 네단계방법에 비해 위상도를 구하는데 적합하지 못함을 알 수 있다. 이와 같이 Rastogi의 방법이 좋은 위상도를 구하지 못한 것은 실험장치에서 왼쪽 경로의 PZT가 이상행동을 보였을뿐 아니라 한 쪽 경로의 빛만을 사용할 때보다 양쪽 경로의 빛을 사용할 경우 밝은 간섭무늬의 세기는 두 배로 커져서 CCD가 포화되었기 때문이다.

4.3. 간섭무늬의 분석

그림 5의 횡변위와 종변위를 moiré 무늬를 사용하여 분석하였다. 그림 9는 그림 5 (1c)중 회전원판의 나사 구멍이 없는 중앙 상부의 가로 20 mm, 세로 20 mm인 사각형을 택하여 횡변위의 위상도와 변위도를 구한 것이다. 그림 9의 (a)는 횡변위 위상도, 9 (b)는 횡변위의 결퍼진 위상도이며, 9 (c)는 횡변위를 3차원적으로 나타낸 변위도이다. 전체 세기분포에서 얻어진 결퍼진 위상도에서 가장 작은 변위를 0으로 택하고 횡변위를 선형맞춤(linear fitting)한 결과, 횡변위의 ξ 및 η 축 방향의 기울기는 그림 9 (d) 및 9 (e)에서와 같이 각각 -1.768×10^{-4} , 1.306×10^{-2} 으로 측정되었으며 여기에 해당하는 변위는 ξ 축에 대하여 $0.02 \mu\text{m}$, η 축에 대하여 $1.50 \mu\text{m}$ 이다. 특히 ξ 축 방향의 기울기는 $\frac{\partial L_x}{\partial \xi} = -1.768 \times 10^{-4} \approx 0$ 으로 강체의 회전에 의하여 생기는 횡변위에 관한 식 (30)을 만족한다. 선형맞춤한 값과 실험값의 차이의 절대값을 평균한 오차평균은 ξ 축과 η 축의 경우 각각 0.021λ , 0.024λ 이다.

그림 10은 그림 5 (1c)의 종변위를 분석한 것이다. 그림 10 (a)와 10 (b)는 각각 종변위의 위상도 및 결퍼진 위상도를 나타낸 것이며, 그림 10 (c)는 실제의 종변위를 3차원적으로 나타낸 것이다. 그림 10 (d)와 (e)는 각각 ξ 및 η 축 방향의 기울기를 나타낸 것으로서 이들은 각각 4.632×10^{-3} , -2.853×10^{-4} 으로

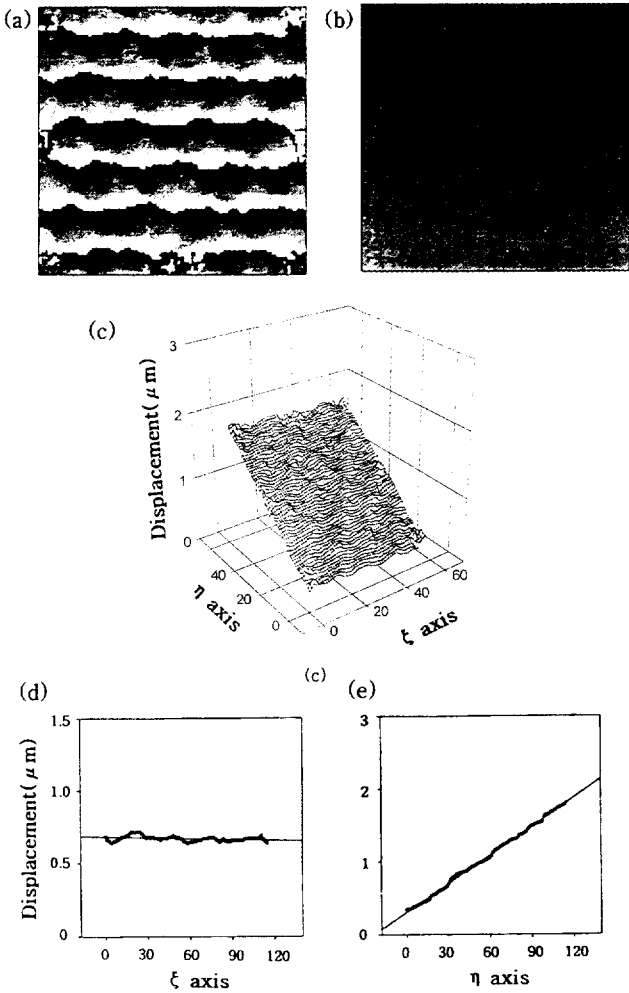


그림 9. 횡변위 위상도. (a) 위상도, (b) 걸려진 위상도, (c) 3차원 변위도, (d) ξ 축에 대한 변위, (e) η 축에 대한 변위.

로 측정되었는데 기울기의 부호중, 양은 회전원판이 시계방향, 음은 반시계방향으로 회전한 것을 의미한다. 또한 ξ 축 방향의 기울기가 훨씬 크게 나타난 것은 종변위가 주로 η 축을 중심으로 한 회전변위임을 의미한다. 기울기를 이용하여 종변위의 크기를 구하면 ξ 축에 대하여 $0.53 \mu\text{m}$, η 축에 대하여 $0.03 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며 회전각의 측정 오차평균은 모두 0.009λ 로 $\frac{\lambda}{100}$ 보다 작게 나타났다. 그림 5 (1c)와 마찬가지로, 그림 5 (2c)에 대한 변위를 분석하여 보면 횡변위의 기울기는 ξ 및 η 축 방향에 대하여 각각 -4.999×10^{-5} , -1.368×10^{-2} 이고 여기 해당하는 변위는 각각 0 , $1.57 \mu\text{m}$ 이었다. 또한, 종변위의 기울기는 ξ 및 η 축 방향에 대하여 각각 -4.401×10^{-3} , 3.410×10^{-4} 으로써 여기 해당하는 변위는 각각 $0.51 \mu\text{m}$, $0.04 \mu\text{m}$ 이었다. 그림 5 (2c)에서는 횡변위, 종변위에서 모두 η 축 방향의 기울기가 훨씬 크게 나타났는데 이는 횡변위, 종변위 모두 ξ 축을 중심으로 한 회전변위임을 의미한다. 회전각의 측정오차는 횡변위의 경우 ξ 및 η 축에 대하여 0.016λ , 0.026λ 이고, 종변위의 경우 ξ 및 η 축에 대하여 각각 0.012λ , 0.014λ 이었다. 이와 같이 횡변위보다 종변위의 정밀도가 양호한 것은 식 (27)에서 $a \approx$

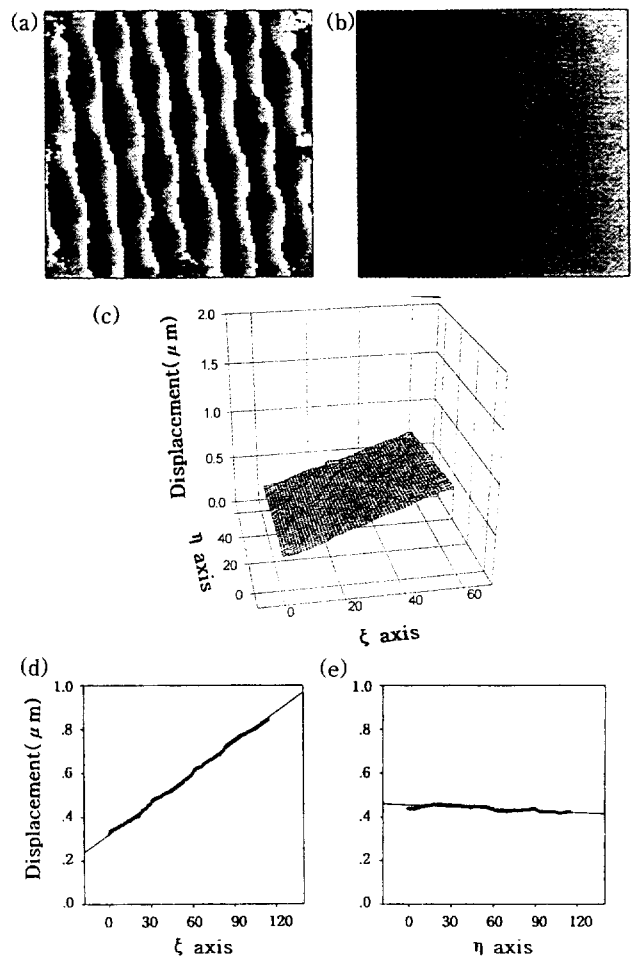


그림 10. 종변위 위상도. (a) 위상도, (b) 걸려진 위상도, (c) 3차원 변위도, (d) ξ 축에 대한 변위, (e) η 축에 대한 변위.

$0.41b$ 로써 횡변위보다 종변위에 대하여 위상이 더욱 민감하기 때문이다.

V. 결 론

본연구에서는 횡변위와 종변위를 동시에 측정하는 네파간섭계를 구성하고 물체파와 재생파의 간섭을 일으켜 위상이동법으로 두 물체파에 의한 위상변화를 구한 후 두 위상변화의 합과 차로 각각 종변위와 횡변위를 구별하여 측정하였다.

Rastogi가 제안한 위상이동 알고리즘은 참조위상(reference phase)의 오차에 민감했고 CCD의 좁은 sensitivity range는 moiré 무늬의 세기 범위보다 작아서 깨끗한 위상도를 얻지 못했다. 이에 반해 각각의 물체파에 의한 위상변화를 따로 구하는 네단계법은 위상변화를 따로 구하기 때문에 실험에 사용한 PZT가 이상행동을 보이더라도 정상적으로 작동하는 PZT로 구한 위상도는 다시 구할 필요가 없다는 장점이 확인되었다. 네파간섭계는 두 변위 모두를 측정할 수 있으며 물체로 입사하는 평행광이 z축과 이루는 각이 커지면 종변위의 민감도가 감소하고 횡변위의 민감도는 증가하는 특성이 있다. 실험에 사용한 네파간섭계는 종변위에 더욱 민감하게 구성되어

있으며 횡변위의 오차평균은 파장($\lambda=632.8$ nm)의 2~3% 정도 이고 종변위의 경우는 1~2% 정도로서 두 변위 모두 $\lambda/40$ 이상의 정밀도로 측정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. H. Horman, "An application of wavefront reconstruction to interferometry," *Appl. Opt.*, **4**, 333-336 (1965).
- [2] R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1593-1598 (1965).
- [3] R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric vibration analysis of three-dimensional objects by wavefront reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 612A (1965).
- [4] K. A. Stetson and R. L. Powell, "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects," *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1694-1695 (1965).
- [5] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and D. J. Brangaccio, "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Appl. Opt.*, **13**, 2693-2703 (1974).
- [6] P. Hariharan, B. F. Oreb, and N. Brown, "Real-time holographic interferometry : a microcomputer system for the measurement of vector displacements," *Appl. Opt.*, **22**, 876-880 (1983).
- [7] E. S. Simova and K. N. Stoev, "Phase-stepping holographic moiré : simultaneous in-plane and out-of-plane displacement measurement," *Appl. Opt.*, **31**, 2405-2408 (1992).
- [8] P. K. Rastogi, "Phase shifting applied to four-wave holographic interferometers," *Appl. Opt.*, **31**, 1680-1681 (1992).
- [9] P. K. Rastogi, "Phase shifting four-wave holographic interferometry," *J. Mod. Opt.*, **39**, 677-680 (1992).
- [10] P. K. Rastogi and E. Denarie, "Visualization of in-plane displacement fields by using phase-shifting holographic moiré : application to crack detection and propagation," *Appl. Opt.*, **31**, 2402-2404 (1992).
- [11] P. K. Rastogi, "Modification of the Carré phase-stepping method to suit four-wave holographic interferometry," *Opt. Eng.*, **32**, 190-191 (1993).
- [12] K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in optics XXVI*, 349-391 (1988).
- [13] J. von Wingerden, H.J. Frankena and C. Smorenburg, "Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **30**, 2718-2729 (1991).
- [14] B. Ovrin and E. M. Haacke, "Temporal averaging of phase measurements in the presence of spurious phase drift : application to phase-stepped real-time holographic interferometry," *Appl. Opt.*, **32**, 1087-1094 (1993).
- [15] Y.-Y. Cheng and J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **24**, 3049-3052 (1985).
- [16] C. Ai and J. C. Wyant, "Effect of piezoelectric transducer nonlinearity on phase shift interferometry," *Appl. Opt.*, **26**, 1112-1116 (1987).
- [17] K. Kinnstaetter, A. W. Lohmann, J. Schwider, and N. Streibl, "Accuracy of phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **27**, 5082-5989 (1988).
- [18] J. Schwider, "Phase shifting interferometry : reference phase error reduction," *Appl. Opt.*, **28**, 3889-3892 (1989).
- [19] K. G. Larkin and B. F. Oreb, "Design and assessment of symmetrical phase-shifting algorithms," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 1740-1748 (1992).
- [20] C. T. Farrell and M. A. Player, "Phase step measurement and variable step algorithms in phase-shifting interferometry," *Sci. Technol.*, **3**, 953-958 (1992).
- [21] J. A. Aparicio, J. L. Mopceceres, A. M. de Frutos, C. de Castro, S. Cáceres, and F. A. Frechoso, "Improved algorithm for the analysis of holographic interferograms," *Opt. Eng.*, **32**, 963-969 (1993).
- [22] G. S. Han and S. W. Kim, "Numerical correction of reference phases in phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting," *Appl. Opt.*, **33**, 7321-7325 (1994).
- [23] I. B. Kong and S. W. Kim, "General algorithm of phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting," *Opt. Eng.*, **34**, 183-188 (1995).
- [24] C. P. Brophy, "Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7**, 537-541 (1990).
- [25] J. Schwider, "Detection of undersampling from measured phase-shifting data," *Opt. Lett.*, **19**, 231-233 (1994).
- [26] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 107-117 (1994).
- [27] C. K. Hong, H. S. Ryu, and H. C. Lim, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase-shifting electronic speckle pattern interferometry," *Opt. Lett.*, **20**, 931-933 (1994).
- [28] R. J. Collier, E. T. Doherty, and K. S. Pennington, "Application of moiré techniques to holography," *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 223-225 (1965).
- [29] P. Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge University Press (1984).

Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane displacement using holographic interferometry

Dalwoo Kim and B.B.Yim

Instrumentation Research Team, RIST, Pohang 790-330, Korea

Physics Department, POSTECH, Pohang 790-330, Korea

(Received : February 24, 1997)

We set up a four-wave holographic interferometer using a symmetric dual-beam illumination which is to measure in-plane and out-of-plane displacement simultaneously. In order to acquire the displacement phase map we applied the phase-shifting method and removed the noise of the phase map with least-squares fitting. In this approach the access to information relative to both the difference and sum of phases existing in the two arms of the four-wave holographic interferometer was allowed. As a result, in-plane and out-of-plane displacement was measured to the accuracy of $\lambda/40$ and $\lambda/100$, respectively at $\lambda=632.8$ nm