

ESPI 입사광의 기하구조에 따른 Sensitivity Vector 분석

홍석경 · 백성훈 · 조재완 · 김철중

한국원자력연구소

(1994년 5월 10일 받음)

ESPI에서 물체를 비추는 입사광의 각도 및 거리에 따른 sensitivity vector를 구하고, 입사광이 평행광일 때와 발산광일 때 두광원의 파면차이에 의한 변위의 민감도 차이를 비교하였다. In-plane 및 out-of-plane 변위에 민감한 ESPI 광학계 구성에 대해서 각각 분석하였다. 이 결과로부터 ESPI에서 입사광을 광학계의 구성이 용이한 발산광으로 하고, 변위량의 계산에서는 물체 전면에서 sensitivity vector가 일정하다고 근사하는 것이 큰 오차가 없이 유용함을 알 수 있었다.

I. 서 론

홀로그래피 간섭 계측법(Holographic Interferometry; HI)이나 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 같은 광학 기술은 표면 변위 계측에 유용한 기술로 알려져 있다. 이들 간섭법에서는 공히 일정한 변위의 등고선을 나타내는 밝고 어두운 간섭무늬가 변형된 물체의 상 위에 중첩되어 나타난다. 이러한 변위의 방향은 간섭계의 광학적 구성에 의해 결정되는 sensitivity vector (민감도 벡터)에 평행하게 나타난다. 그림 1에서와 같은 일반적인 구성에서 물체를 비추는 빔의 wave vector k_i 와 물체에서 관측자에게 오는 wave vector k_o 에 대해 민감도 벡터 S 는

$$S = k_o - k_i \quad (1)$$

로 정의된다.^[1,2] 따라서 간섭무늬를 영상처리하여 물체상의 각 위치에서 원하는 위상정보가 얻어지면, 변위의 양은 민감도 벡터에 의해 결정된다. 여기에서는 이러한 민감도 벡터가 광학적인 구성에 따라 어떻게 변화하는지를 살펴보고, 전산 해석 및 광학적 구성의 용이성을 논함으로써 ESPI의 실용성을 높이고자 하였다.

홀로그래피 및 스펙클 간섭계에서 간섭무늬의 전산 해석을 용이하게 하기 위해서는 물체를 시준빔(collimated beam)으로 비추는 것이 편리할 것으로 생각되었다.^[3,4] 그러나 실제로 시준빔을 사용하여 ESPI 간섭계를 광학 테이블 위에 구성하거나 또는 그러한 간섭계를 제작하고자 할 때에는 대형의 광학 요소가 필요하게 되어 간섭계의 부피가 커지고 시준빔을 만드는 광학 요소의

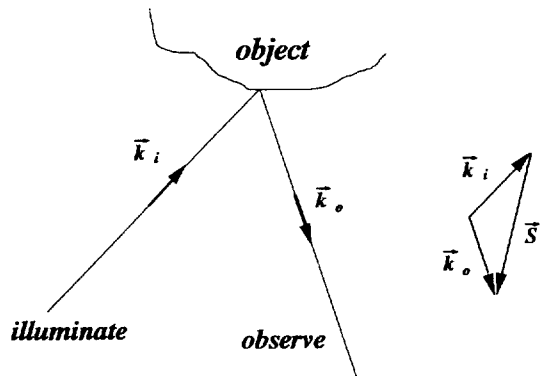


그림 1. 민감도 벡터(sensitivity vector)의 정의

크기에 따라 관측 물체의 크기가 제한받는 등의 불편한 점이 있다. 그래서 실제로 구성된 많은 간섭계는 발산하는 빔을 물체에 조사하도록 구성되어 있다.^[5-7]

한편, DISI를 이용한 F.M. Santoyo 등의 논문에는 발산하는 물체빔을 사용하여 광학적인 구성의 용이성을 도모하고, 이때의 오차에 대해 언급하였다.^[6] 이들의 논문에서는 80 mm 너비의 물체를 300 mm 정도의 거리에서 45°로 입사하였을 때 물체의 모서리에서 민감도 벡터의 크기가 시준빔을 사용하였을 때에 비해서 1.4% 정도의 오차를 보여, 실제로는 발산빔을 사용하고, 간섭무늬의 계산은 시준빔을 사용하였을 경우로 근사하더라도 별 문제가 되지 않는다고 보고하고 있다.

일반적인 HI 및 ESPI 구성의 기하학적 구조에 대한 민감도 벡터의 방향 및 크기는 간단한 계산에 의해 얻

어질 수 있는 물리량이다. 그러나 실제의 간섭계 구성에 기여하는 그 역할의 중요성을 고려할 때 민감도벡터에 대한 정량적인 분석 자료가 미흡할 뿐만 아니라, 실제로 제작중인 ESPI 간섭계 제작에서의 필요성에 의해 이 연구가 수행되었다. 여기에서는 out-of-plane 변위에 민감한 ESPI 간섭계(OOP) 및 in-plane 변위에 민감한 ESPI 간섭계(DISI)에서의 민감도 벡터에 대하여 계산하고 그 의미를 논하고자 한다.

II. 기하학적 구조에 따른 고찰

1. Out-of-plane 변위에 민감한 ESPI

그림 2와 같은 OOP 구조는 물체의 out-of-plane 변위성분을 측정하고자 하는 구성이므로, 일반적으로 물체와 관측면 사이에 BS(beam splitter)를 사용하여 시준빔을 수직으로 조사하는 것이 가장 이상적인 구조가 될 것이다. 그러나 실제적인 면에서는 그림에서와 같이 물체와 관측면을 잇는 선과 θ 의 각을 이루며 비스듬히 조사되는 발산광을 이용하는 것이 편리하다. 그래서 그림 2와 같은 구성은 물체의 특성상 그림자를 형성하거나 하는 경우가 아니면, 일반적으로 많이 사용되는 구조인데 이 경우 물체빔이 구면파이므로 물체의 x축상 각점에서 민감도 벡터의 크기와 방향이 변하게 되므로 간섭무늬 해석시에 이러한 점을 고려해야 한다(OOP 구조에서는 시준빔을 사용하여도 관측방향의 변화에 따라 민감도 벡터의 크기와 방향이 변화한다). 그림 2(a)에서 물체 중심에 입사되는 각도 θ 와 물체까지의 거리 D , 그리고 물체의 x축 방향 크기 A 에 대해 z 와 u 는

$$z = D \cos \theta \tag{2}$$

$$u = D \sin \theta - \frac{A}{2} \tag{3}$$

와 같이 주어지고, 물체를 조사하는 빔의 각도 θ_0 와 관측하는 각도 θ_s 는

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{u+x}{z}, \quad \theta_s = \tan^{-1} \left[\frac{c+A}{2} - \left(x + \frac{x}{m}\right) \right] / D_0 \tag{4}$$

이 된다. 여기에서 x 는 원점 O 에서 u 를 지나 물체가 시작되는 점부터이다. 그리고 c 는 관측면에서 상의 크기이고, m 은 배율($mc=A$), D_0 는 물체에서 관측면까지의 거리이다. 이때 변형 d 가 관측자에게는 입사방향과 관측방향의 wave vector \vec{k}_i, \vec{k}_o 의 단위 벡터 \hat{n}_i, \hat{n}_o 에 대해

$$d \cdot (\hat{n}_i - \hat{n}_o) \tag{5}$$

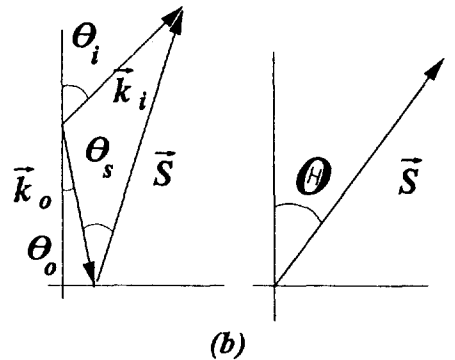
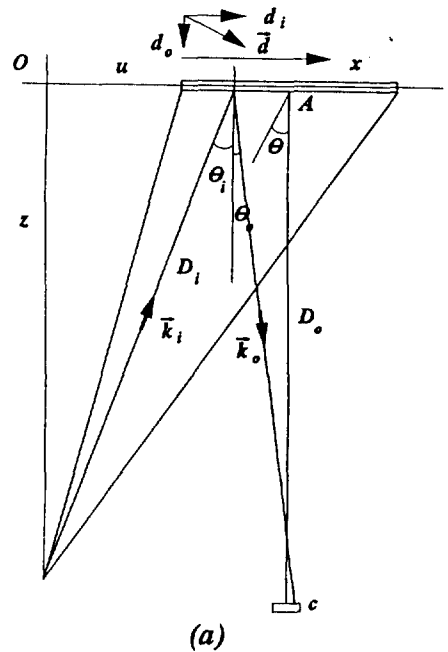


그림 2. OOP 구조에서의 민감도 벡터 (a) Out-of-plane 변형 ESPI에서 입사 및 관측 구조, (b) 민감도 벡터

크기로 나타낸다. 그리고 그림 2(b)에서와 같이 민감도 벡터에 대한 각도 θ_s 와 θ_0 및 크기는

$$\Theta = \theta_s - \theta_0, \quad \theta_s = \frac{\theta_i + \theta_o}{2}, \quad |S| = 2 \cos \theta \tag{6}$$

와 같이 주어진다. 이때 변형 d 는 다음식과 같이 x축 성분(관측방향과 수직인 면, in-plane) d_i 와 z축 성분(관측방향과 평행, out-of-plane) d_o 로 나뉘는데, 실제로는 민감도 벡터의 방향과 크기에 따라

$$\hat{d}_o \cdot \hat{S} = \cos \Theta, \quad \hat{d}_i \cdot \hat{S} = \sin \Theta \tag{7}$$

와 같이 변형의 관측되는 감도가 달라진다. Electronic Speckle Shearing Interferometer에서도, 점광원을 물체 빔으로 사용하였을 때의 민감도 벡터는 OOP에서와 비슷하게 나타낸다.

2. In-plane 변위에 민감한 ESPI

그림 3은 물체를 비추는 광원으로 발산빔을 사용하는 DISI에서의 민감도 벡터를 나타내고 있다. 여기에서 두 입사빔에 의한 총위상차 ϕ 는 입사하는 wave vectors k_i, k_i' 및 입사빔에 의한 각각의 위상차 ϕ, ϕ' 에 대해

$$\begin{aligned} \phi &= (k_i - k_o) \cdot d, \quad \phi' = (k_i' - k_o) \cdot d \\ 2\Phi &= \phi - \phi' = (k_i' - k_i) \cdot d \end{aligned} \tag{8}$$

이므로 민감도 벡터 S 는 그림 3(b)와 같이 주어진다. 여기에서 z 와 u 는 OOP에서와 같고, 이때 두빔의 입사각 θ 와 θ' 는 각각

$$\theta = \tan^{-1} \frac{u+x}{z}, \quad \theta' = \tan^{-1} \frac{u+A-x}{z} \tag{9}$$

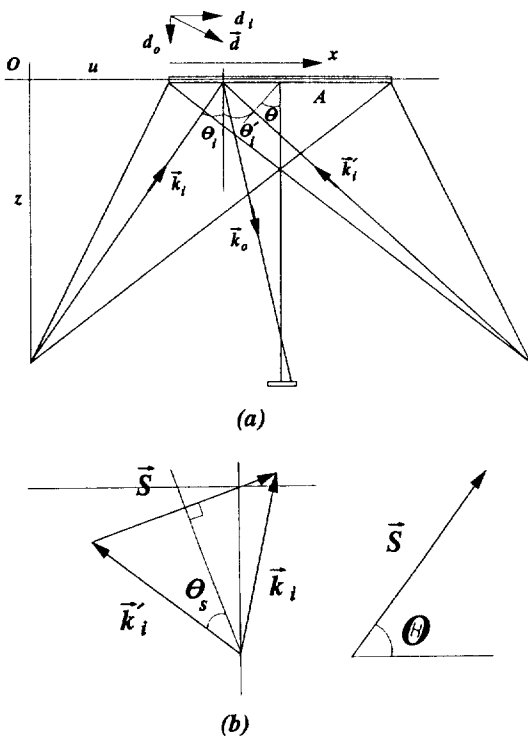


그림 3. DISI에서의 민감도 벡터
(a) In-plane 변형 ESPI에서 입사 및 관측 구조,
(b) 민감도 벡터

이다. 그림 3(b)에서와 같이 민감도 벡터의 방향 및 크기는

$$\Theta = \frac{\theta - \theta'}{2}, \quad \theta_s = \frac{\theta + \theta'}{2}, \quad |S| = 2\sin\theta \tag{10}$$

이다. 따라서 관측되는 변형의 양은

$$\hat{d}_o \cdot \hat{S} = \sin\Theta, \quad \hat{d}_o \cdot \hat{S} = \Theta \tag{11}$$

으로 주어지므로, 그림 3과 같은 DISI에서의 민감도 벡터는, 두 빔의 입사각도 θ 와 θ' 에만 의존하고 관측방향 k_o 의 변이에는 무관하다. 따라서 입사빔이 평행광이면 민감도 벡터는 물체면 어디에서나 일정하게 유지된다.

III. 계산 결과

점광원을 물체빔으로 사용할 때, 민감도 벡터에 영향을 주는 기하구조의 변수들은 입사 각도 및 물체까지의 거리, 물체 및 관측상의 크기, 물체와 관측면 사이의 거리, 배율 등이 있다. 여기에서는 OOP 및 DISI에서 발산하는 물체빔의 입사각도 및 거리에 의한 민감도 벡터를 구하고, 관측되는 변형량과의 관계를 살펴보고자 한다. 먼저, 그림 2와 같은 OOP에서 각도 θ 의 변화에 따른 민감도 벡터의 방향 및 크기를 보자. 평행광을 입사빔으로 사용할 경우, OOP에서는 그림 2에서와 같이 θ 가 θ_0 로 일정한 값을 갖게 되지만 민감도 벡터의 방향 및 크기는 θ_0 의 변화에 따라 달라지므로 x 축에서 물체위치에 따라 민감도 벡터의 변화를 볼 수 있다. 그러나 평행광 입사시에, DISI에서는 민감도벡터가 오직 두 입사빔의 각도에만 의존하므로 민감도 벡터의 크기 및 방향은 일정하다.

1. Out-of-plane 변위에 민감한 ESPI

그림 4는 OOP에서 배율 m 이 20 측 물체 크기 및 D_o, D_i 가 각각 16 cm 정도, 80 cm, 100 cm일 때 입사빔의 각도 변화에 대한 민감도 벡터의 변화이다. 그림 4(a)는 물체중심으로 입사되는 광로에서의 민감도 벡터를 단위 크기로 한 규격화된 민감도 벡터의 크기이다. 입사빔의 각도가 커질수록 민감도벡터의 크기의 변화가 심해진다. 이때, 그림 4(b)는 민감도 벡터들의 각도(Θ) 변이로서, 입사각의 변화에 따른 Θ 의 변화를 보여주고 있다. HI 및 ESPI의 주된 관심은 이와 같은 민감도벡터의 방향과 크기 변화로부터 실제로 일어난 물체의 변형에 대한 관측량의 변화가 어떠한가 하는 것일 것이다. 그림 4(c), 4(d)는 변위 d 의 out-of-plane(z 축) 및 in-plane(x 축) 성

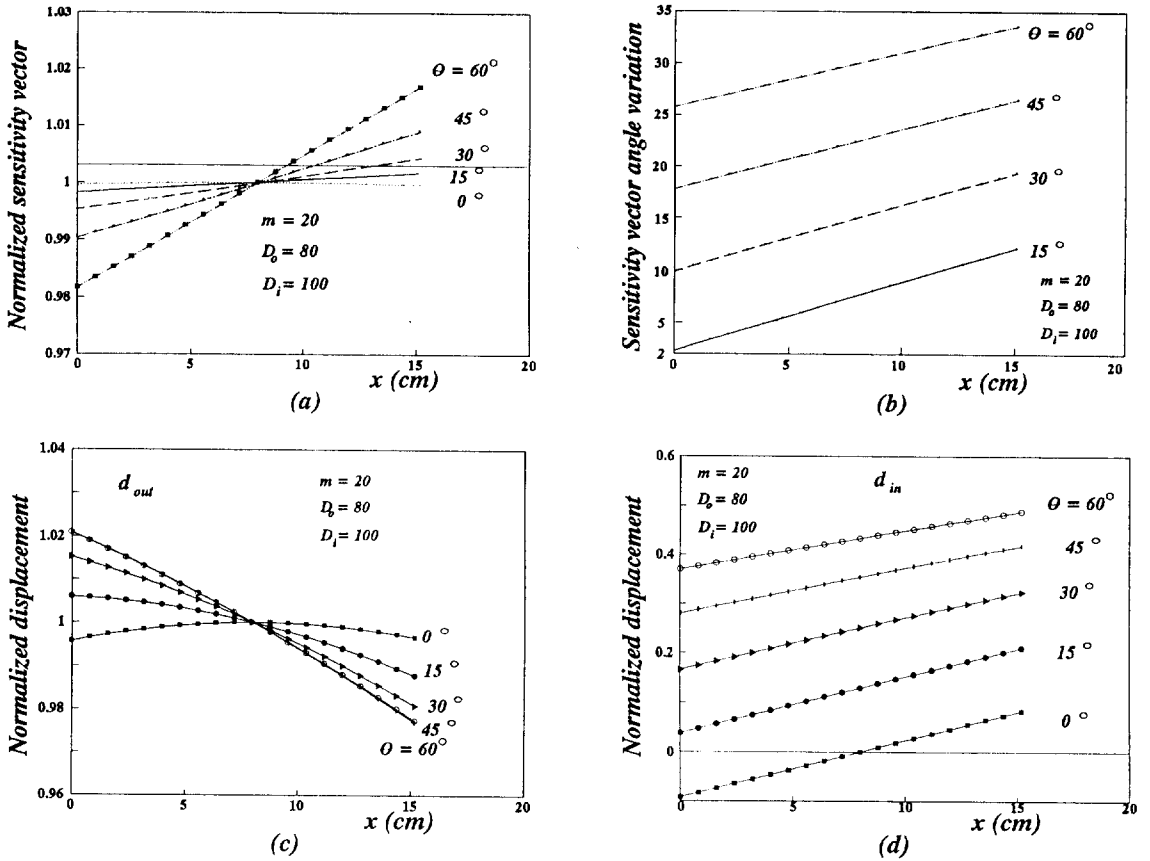


그림 4. OOP에서 민감도 벡터. (a) 민감도 벡터의 크기 변화, (b) 민감도 벡터의 방향 변화, (c) 변위의 out-of-plane 민감도 변화, (d) 변위의 in-plane 민감도 변화

분에 대해 실제로 간섭무늬에 기여하는 변위량을 각각 규격화하여 보여주고 있다. 즉, 변위 d 의 out-of-plane 및 in-plane 성분의 민감도를 나타내고 있다. 그림 4의 결과는 그 정성적인 경향에 있어서 이미 직관적으로 예측하는 바와 다르지 않을 것이다. 여기에서 관심을 기울일 부분은 그 경향이러기보다 변화의 정도가 얼마인가에 있다. 그림 4(b)를 보면 입사각의 크기 변화에 따른 민감도벡터의 각도 변화는 비슷하지만, 그림 4(c), 4(d)를 보면 입사각이 커질수록 규격화된 민감도벡터의 크기변화가 심화된다는 것을 알 수 있다. 한편, 변위 d 의 out-of-plane 성분에 대해, 위와 같이 민감도 벡터의 변화가 있을 때와 민감도 벡터가 x축 상의 모든점에서 일정(물체중심에서의 민감도벡터값으로 일정)하다고 가정할 때와의 최대차이는 수직입사시에는 0.4%(100%, 이하 괄호안의 숫자는 물체 중심에서의 out-of-plane 감도)이고, 15°, 30°, 45°, 60°에서는 각각 0.6%(98.3), 1.4%(93.3%),

1.8%(85.4%), 1.6%(75%)이다.

이때 그림 4(d)에서 보는 바와 같이, 구면파면의 특성에 의해 in-plane 변위성분에 대한 감도가 수직입사시에는 없던 것이 생성되고, 그외에서는 증가하는데, 그 폭이 최대값이 수직입사시에는 9.2%(0%, 이하 괄호안의 숫자는 물체 중심에서의 in-plane 감도)이며, 15°, 30°, 45°, 60°에서는 각각 9.0%(12.9%), 8.4%(25%), 7.4%(35.4%), 6.3%(43.3%)이다. OOP에서는 입사각의 변화에 따른 부수적 효과, 즉 in-plane 변위 성분이 간섭무늬에 많이 나타난다는 것을 알 수 있다. 그리고 out-of-plane 변위 성분의 민감도도 입사각도가 클수록 많이 줄어들지만, 변이폭은 60°에 이르기까지 거의 2% 정도 이내가 된다는 점에 유의할 필요가 있을 것이다.

2. In-plane 변위에 민감한 ESPI

그림 5는 DISI에서 입사각의 각도 변화에 대한 민감도

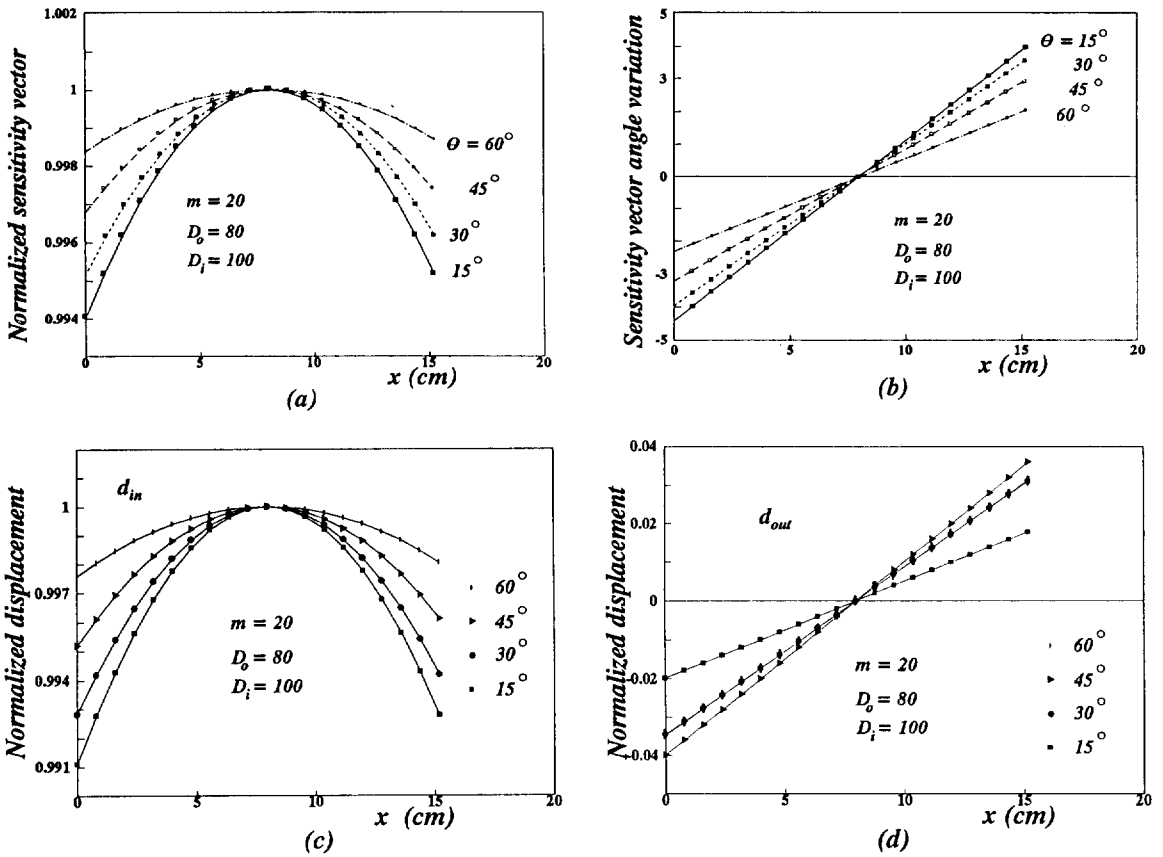


그림 5. DISI에서 입사각의 변화에 대한 민감도 벡터. (a) 민감도 벡터의 크기 변화, (b) 민감도 벡터의 방향 변화, (c) 변위의 in-plane 민감도 변화, (d) 변위의 out-of-plane 민감도 변화

벡터의 변화이다. 조건은 그림 4에서와 마찬가지로 물체의 크기가 16 cm 정도이고, D_o 가 80 cm, D_i 가 100 cm이다. 그림 5(a)는 규격화된 민감도 벡터의 크기이고 그림 5(b)는 이 민감도 벡터들의 각도 변이이다. 그리고 그림 5(c), 5(d)는 그림 4(c), 4(d)에서와 마찬가지로 변위 d 에 대한 in-plane 및 out-of-plane 변위의 민감도 변화이다. DISI에서 in-plane 변위성분에 대한 감도는 입사각이 커질수록 높아지는데 그림 5에서 입사각이 커질수록 민감도 벡터의 크기 및 방향의 변화가 작아진다는 것을 볼 수 있다. 그림 5(c)에서 민감도 벡터의 변화에 따른 변위 d 의 in-plane 변위성분 크기의 변화를 시준빔을 사용했을 때와 비교하여 그 차이를 보면 최대값이 15°, 30°, 45°, 60°에서 각각 0.9%, 0.7%, 0.5%, 0.2%이다. 이때 out-of-plane 변위성분에 대해서는, 그림 5(d)에서와 같이 15°, 30°, 45°, 60°에서 각각 2.0%, 3.4%, 4.0%, 3.5%의 감도가 생긴다.

DISI에서는 입사각의 변화에 대한 민감도 벡터의 변화와 함께 물체와 입사빔 사이의 거리변화에 따른 민감도 벡터의 변화에 대해서도 살펴보았다. 그림 6은 그림 5에서와 같은 광학 구성으로 입사각이 45°일 때, 입사빔의 거리 D_i 의 변화에 대한 민감도 벡터의 변화이다. 그림 6(a)는 규격화된 민감도 벡터의 크기이고 그림 6(b)는 이 민감도 벡터들의 각도 변이이다. 그리고 그림 6(c), 6(d)는 변위 d 의 in-plane 및 out-of-plane 성분의 민감도 변화이다. 그림 6에서 입사빔의 거리가 멀어질수록 민감도 벡터의 크기 및 방향의 변화가 작아진다는 것을 볼 수 있다. 그림 6(c)에서 D_i 의 변화에 의한 민감도 벡터의 변화에 따른 d 의 in-plane 변위성분 크기의 변화를 시준빔을 사용했을 때와 비교하여 그 차이에 대해서 보면 최대값이, D_i 가 120, 100, 80, 60 cm에서 각각 0.3%, 0.5%, 0.8%, 1.3%이다.

그리고 이때 그림 6(d)는 out-of-plane 변위성분에 대해

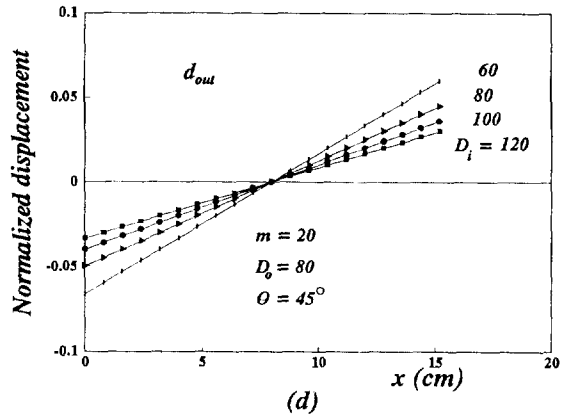
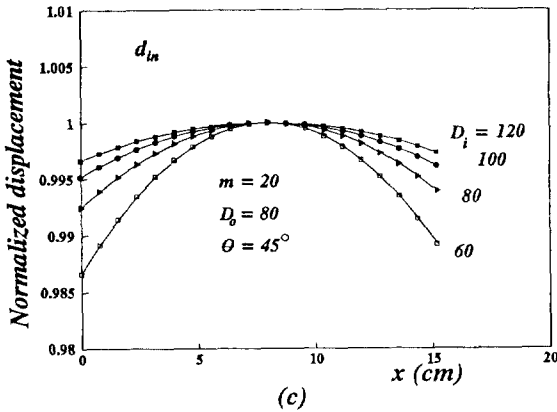
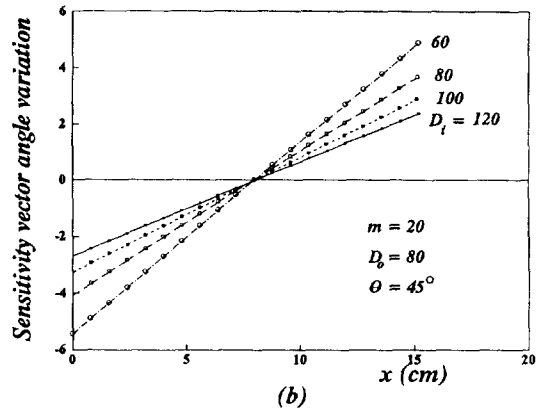
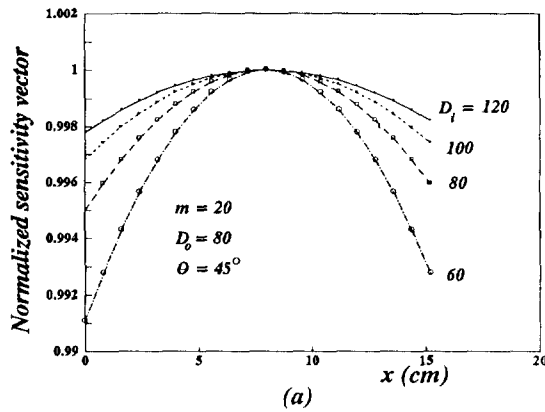


그림 6. DISI에서 입사빔의 거리변화에 대한 민감도 벡터. (a) 민감도 벡터의 크기 변화, (b) 민감도 벡터의 방향 변화, (c) 변위의 in-plane 민감도 변화, (d) 변위의 out-of-plane 민감도 변화

생성된 감도를 보여 주고 있는데, 120, 100, 80, 60 cm 거리에서 각각 3.3%, 4.0%, 5.0%, 6.6%가 생성된다. 그래서 물체를 비추는 입사빔이 일정할 때 입사빔의 거리에 따라 in-plane 변위성분의 비교차이는 그림에서와 같이 거리가 두배 가까와지면 4배 이상의 변화가 생긴다.

계산에 사용된 변수들의 크기는 일반적으로 상용화된 또는 모듈화하는 ESPI 장치의 크기를 고려할 때, 실용성을 어렵잡을 수 있도록 적절한 값을 택하고자 한 것이다. 이와같은 계산결과로부터, 입사빔의 각도 및 거리 변화에 대한 in-plane 변위성분의 변화정도(시준빔을 사용했을 때와의 비교차이)는 일반적으로 구성되는 DISI의 경우, 1% 내외 정도라는 것을 알 수 있다. 물론 구면파면의 특성에 의해 가시적인 양의 out-of-plane 변위성분에 대한 감도가 생성되어, 간섭무늬에는 in-plane 변위성분과 아울러 out-of-plane 변위성분이 나타나서 정성적으로 복잡하게 보이지만 실제로 주어진 간섭무늬

패턴으로부터 in-plane 변위성분에 대해서만 해석한다면 민감도벡터가 물체전면에서 일정하다고 근사해도 1% 정도의 오차가 있을 뿐이다.

IV. 논 의

HI나 ESPI의 간섭무늬 해석에서 추출된 위상정보로부터 물리량을 얻기위해서는 민감도 벡터가 필요하다. CCD를 기록 매체로 사용할 때 시험대상물체의 상에 해당되는 각화소에 대해 그에 대응되는 민감도 벡터가 존재한다. OOP에서 민감도벡터는 비록 물체에 평행광을 입사할 때의 경우가 발산되는 빔을 입사시킬 때의 경우보다 변화의 폭이 작기는 하지만 여전히 일정한 값을 가지지는 않는다. 이와는 달리 DISI에서는 평행광을 사용하면 어디에서나 일정한 민감도 벡터를 얻을 수 있다. 그러나 실용성을 고려할 때, 물체 입사빔으로 평행광을

사용하고자 하면 많은 불편함이 따른다. 그래서 물체빔으로 시준빔 대신 발산빔을 사용하면 장치의 간편성으로는 실용성이 있으나 민감도 벡터의 변이에 따른 해석이 복잡해진다. 그러나 발산빔을 사용하는 간섭계의 광학 구성에서, 이러한 점을 고려하여 프로그램을 만들 경우 복잡한 것은 물론이고, 더우기 일반적으로 광학적인 지식이 많지 않은 사용자에게 극히 불편한 점이 될 것이다. 실제로, 일반적으로 대부분의 HI 및 ESPI 간섭무늬 해석 software 에서도 물체상의 위치에 따른 민감도 벡터의 변이를 고려하지 않고 있다. 그래서 모든 민감도 벡터의 크기와 방향이 같다고 가정할 때와 실제와의 차이를 계산하여 그 오차가 허용 가능한 계측 대상물체에 대해서는 앞에서와 같은 분석으로부터 그 오차의 정도를 예측하여 그에 적절한 구성을 구상할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. Jones and C. Wykes, *Holography and Speckle Interferometry*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1989) pp. 79-164.
 [2] A. J. Moore, J. R. Tyrer, *Meas. Sci. Technol.*, **1**, 1024(1990).
 [3] G. Gulker, K. Hirsch, C. Holscher, A. Kramer, H. Neunaber, *Opt. Engineer.*, **29**, 816(1990).
 [4] A. A. M. Maas, H. A. Vrooman, *SPIE*, **1162**, 248 (1989).
 [5] D. L. Mader, *SPIE*, **1162**, 227(1989).
 [6] F. M. Santoyo, M. C. Shellabear, J. R. Tyrer, *Appl. Opt.* **30**, 717(1991).
 [7] B. N. Dobbins, S. P. He, S. Kapasi, L. S. Wang, B. L. Button, X. P. Wu, *SPIE*, 1554A, 772(1991).

The Analysis of Dependence of Sensitivity Vector of ESPI on the Illumination Geometry

Suc Kyoung Hong, Sung Hoon Baik, Jai Wan Cho, and Cheol Jung Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-606, Korea

(Received: May 10, 1994)

The sensitivity vector which depends on geometry of object illumination angles and distances of ESPI was analyzed. And the sensitivities of in-plane and out-of-plane displacements have been investigated. From these results, we have the conclusion that it is useful to use the diverging beam for object illumination. With diverging object illumination, only little errors are occurred when we approximate the sensitivity vector to constant all over the object surface.