

본 논문은 한국과학재단 산하 전북 대학교 메카트로닉스 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

전자 스페클 패턴 간섭법을 이용한 형상 측정에 관한 연구

강 영 준*, 김 계 성**

A Study on Shape Measurement by Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

Young-June Kang* and Gye-Sung Kim**

ABSTRACT

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) has been used to measure surface deformations of engineering components and materials in industrial areas. ESPI, a non-contact and non-destructive technique, is capable of providing full-field results with high spatial resolution and high speed. One of the important application using electronic speckle pattern interferometry is electronic speckle contouring of a diffused object for 3-D shape analysis and topography measurement. Generally the electronic speckle contouring is suitable for providing measurement range from millimeters to several centimeters. In this study, we introduce the contouring method by modified dual-beam speckle pattern interferometer and the shift of the two illumination beams through optical fiber in order to obtain the contour fringe patterns. We also describe formation process of depth contour fringes and grid contour fringes by shifting direction of the two illumination beams. Before the experiments, we performed the geometric analysis for dual-beam-shifted ESPI contouring, and then, the electronic speckle contouring experiment with various specimens. For quantitative analysis of the contour fringes, we used 4-frame phase shifting method with PZT. Finally, good agreement between the geometric analysis and experimental results is obtained.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자 스페클 패턴 간섭법), Non-destructive Technique(비파괴 기술), Contouring Method(등고선 추출법), Optical Fiber(광섬유), Dual-beam(이중빔), Geometric Analysis(기하학적 해석)

1. 서 론

홀로그래피의 필름 대신 TV target을 기록매질로 하고

재생을 위해 전자 처리과정을 거치는 in-line 결상 홀로그래피인 전자 스페클 패턴 간섭계⁽¹⁾는 1969년에 물체의 전체 변위장을 관찰하기 위한 비접촉, 비파괴 방법으로서

* 전북대학교 기계공학부, 메카트로닉스 연구센터

** 전북대학교 대학원

Butters와 Leendertz에 의해 개발되었다. 간섭무늬의 질은 홀로그래피에 비해 다소 떨어지나 정량적인 실시간 측정이 가능하여 70년대 후반부터는 산업현장에 응용하기 위한 상용화가 이루어지고 있다. 그리고 스펙클 간섭무늬의 정량적 해석을 위해 각 화소의 상대적 위상값을 계산하는 위상 이동법⁽²⁾은 1984년에 K. Creath에 의해 처음 소개되었다. 스펙클 간섭법을 이용한 측정방법은 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 측정 민감도 및 정밀도가 우수하고, 비접촉식으로서 검사대상에 대해 전혀 영향을 주지 않는다. 실시간 측정이 가능하고 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분 전면적의 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 전자 스펙클 패턴 간섭법은 측정 물체의 변형이나 형상에 대한 정보를 갖고 있는 간섭 무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 이용하기 때문에 홀로그래피 간섭법보다 데이터의 저장 및 관리가 용이하다는 장점을 가지고 있고, 홀로그래피 간섭법의 필름 처리과정이 제거되었으며 재생과정이 불필요해졌다. 이와 같은 장점들을 바탕으로 전자 스펙클 간섭법은 자동차 산업, 항공기 산업, 전자 산업, 원자력 산업 등에 이용되고 있으며, 최근에는 용접플룸의 가시화 및 유체 흐름의 가시화, 잔류응력의 측정, adaptive optics, 형상측정에 의한 조도 측정 등에 널리 이용되고 있다.

전자 스펙클 간섭법을 이용한 등고선 추출법(contouring method)은 대상 물체의 높이와 형상에 대한 일정 등고선 간격(contour interval)의 간섭무늬를 얻고, 이를 통하여 3차원 물체의 형상에 대한 정보를 얻는 광학적 방법이다.⁽³⁾ 현재 존재하는 형상측정 방법은 거시적으로 무아래 방법, 삼차원 형상측정기에 의한 방법, 홀로그래피 방법, 전자 스펙클 패턴 간섭법 등이 있다. 이중 레이저를 이용한 광학적 방법인 전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 형상측정은 국외에서 80년대 중반부터 현재까지 전자 스펙클 간섭법의 중요한 응용분야로서 활발히 진행되어져 오고 있으며, 간섭무늬의 벡터해석, 오차보정, 및 측정정밀도 향상을 위한 기법들을 이용하여 예술품의 결함측정 및 표면조도 등에 활발히 이용되고 있다. 이 형상측정을 위한 현존하는 방법으로는 두 파장의 조사빔을 이용한 방법, 물체 조사빔을 변화시키는 방법, 물체를 변화시키는 방법, 두 물체빔을 이동시키는 방법이 있다.^{(4),(5),(6)} 이 중에서 본 연구는 면내 변형을 측정하는 전자 스펙클 패턴 간섭계를 약간 변형하여 두 물체빔을 동시에 이동시키는 방법에 의해 기존의 방법들에 비해 좀 더 간단한 이동방법을 취함으로써 3차원 물체의 형상측정을 하였다. 두 물

체빔의 이동은 마이크로미터 위에 설치되어 있는 광섬유에 의해 수행되었으며 본 연구에서는 이 두 물체빔의 이동방향에 의한 높이 등고선 간섭무늬(depth contour fringes)와 격자 등고선 간섭무늬(grid contour fringes)의 형성과정을 벡터해석에 의하여 설명한다. 등고선 간섭무늬(contour fringe)를 통한 물체의 높이와 형상에 대한 정보를 얻기 위하여 간섭계의 두 물체빔 중 하나에 압전 변환기(piezo-electric transducer, PZT)를 부착하여 정량화를 수행하였다. 그리고 조사빔의 이동에 의한 등고평면(contour plane)의 형성을 벡터와 기하학적으로 완전히 해석하였다.⁽⁷⁾

2. 스펙클 패턴의 상관 간섭

스펙클 간섭법에서도 홀로그래피 간섭법에서처럼 물체 파와 참조파의 간섭을 기록한다. 참조파는 균일빔 또는 스펙클파를 사용할 수 있다. 스펙클파를 참조광으로 사용하는 계에서는 물체 자체에서 오는 스펙클파를 쓰기도 하는데 이 경우 물체에는 다른 각도로 입사되거나 물체의 상이 서로에 대해 shift된다. 그래서 그림 1과 같은 스펙클 간섭계 구성을 생각해 볼 수 있다. 그림에서 평행광면 U_0 는 광분할기에 의해 동일한 세기로 이분되고 이들은 광학적으로 거친 두면 D_1 과 D_2 를 조사한다. 그림 1은 Michelson 간섭계에서 두 거울을 거친 면으로 대치하고 두 면의 상을 결상면에 맺도록 한 것이다. D_1 과 D_2 에서 산란된 두 파면 U_1 과 U_2 는 광분할기에서 다시 결합되어 렌즈-구경의 결상면에 기록된다. 그 면에서 세기분포는 D_1 과 D_2 상의 스펙클 패턴들 사이의 간섭패턴으로 나

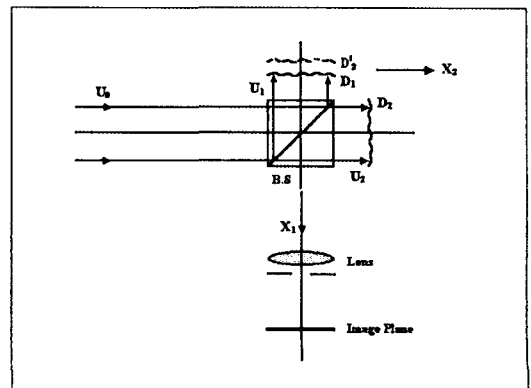


Fig. 1 Speckle pattern correlation interferometer

타난다. 이 때 u_1, u_2 와 ϕ_1, ϕ_2 를 임의로 변하는 개개의 결상면 스펙클의 세기와 위상이라 하면 이 두 파면의 복소 진폭은

$$\begin{aligned} U_1 &= u_1 \exp i(\phi_{s1} + \phi_{m1}) \\ U_2 &= u_2 \exp i(\phi_{s2} + \phi_{m2}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

- u_1, u_2 : 빔의 진폭
- ϕ_{s1}, ϕ_{s2} : 불규칙한 위상
- ϕ_{m1}, ϕ_{m2} : 광경로와 연관된 위상

따라서 결상면의 한 점에서의 빔의 강도 I_A 는

$$I_A = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + \Psi_m] \quad (2)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} I_1 &= U_1 U_1^*, \quad I_2 = U_2 U_2^* \\ \Psi_m &= \phi_{m1} - \phi_{m2} \end{aligned}$$

이다. D_1 이 D'_2 로 면에 수직하게 평행 이동하여 두 조사빔의 상 ϕ_{m1} 과 ϕ_{m2} 와 ϕ'_{m1} 가 ϕ'_{m2} 로 이동되었다면 변화된 빔의 강도 I_B 는

$$I_B = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + \Psi'_m] \quad (3)$$

여기에서,

$$\Psi'_m = \phi'_{m1} - \phi'_{m2}$$

강도 I_A 와 I_B 사이의 상관관계는 CCD 카메라의 비디오 신호의 차이에 의해서 표현된다. 간섭계 상면의 스펙클 패턴 I_A 는 전기적인 신호로 바뀌어 이미지저장기(frame grabber)내로 들어와 디지털 정보로 저장되고, 변화된 스펙클 패턴 I_B 와의 차에 의해 간섭무늬가 생성되어 모니터 상에 나타나게 된다. CCD 카메라를 통한 간섭무늬의 강도는 출력 전압의 변화에 비례하기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_s &= (V_A - V_B) \propto (I_A - I_B) \\ &= 4\sqrt{I_A I_B} \sin[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + (\Psi_m + \Psi'_m)/2] \times \sin(\Delta\Psi_m/2) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,

$$\Delta\Psi_m = \Psi'_m - \Psi_m$$

따라서, 모니터상의 밝기 B 는

$$B \propto (V_1 - V_2)^2 > \frac{1}{2} \quad (5)$$

와 같이 정의되고, 식 (4)에서 ϕ_{s1} 과 ϕ_{s2} 를 포함한 불규칙 위상 항은 평균법(averaging)과 고역 필터링(high pass filtering)에 의해 제거되고 다음과 같이 된다.

$$B \propto \left(I_A I_B \sin^2 \frac{\Delta\Psi_m}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

위의 식 (6)으로부터 $\Delta\Psi_m = 2n\pi$ 일 때는 극소의 상관관계로서 어두운 상관 간섭무늬가 발생하고 $\Delta\Psi_m = 2(n+1)\pi$ 일 때는 극대의 상관관계가 발생함을 알 수 있다.

3. 벡터에 의한 기하학적 해석

간섭무늬 간격은 두 간섭 스펙클 패턴의 위상차에 의해 결정된다. 이 위상차가 물체의 높이와 관계가 있을 때 물체의 형상은 간섭무늬의 해석을 통하여 얻을 수 있다. 조사빔의 이동을 바탕으로 한 변형된 이중빔 전자 스펙클 간섭계에 의한 등고선 추출법에서 물체의 형상과 위상차 사이의 관계를 다음의 기하학적 해석을 통하여 알아본다.

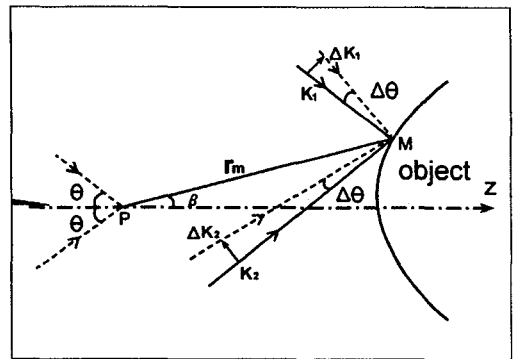


Fig. 2 Vector geometry of the contouring

그림 2를 보면 물체는 관찰 방향축 Z에 대해 같은 각도로 양쪽에서 두 빔에 의해 조사되어 진다. 이때 K_1 과 K_2 는

이 두 빔의 단위 방향 벡터이다. M은 물체상의 임의의 점이고, P는 CCD카메라의 관찰점이다. r_m 은 M에서 P까지의 위치벡터이고, β 는 r_m 과 Z축사이의 각도이다. K'_1 와 K'_2 는 조사빔이 이동된 후의 단위벡터이며, $\Delta\theta$ 는 변화된 후의 두 스펙클 패턴에 대한 조사빔의 각도차이다. 두 조사빔은 같은 광경로를 가지고 조사되며 M을 통하여 P로 들어오게 되므로, 이 때 광경로에 따른 두 빔의 위상은 각각 거리와 거리벡터, 및 단위 방향벡터로서 표현할 수가 있으므로 두 빔의 위상 ϕ_{m1} 과 ϕ_{m2} 는

$$\phi_{m1} = \frac{2\pi}{\lambda} (r_m + r_m \cdot K_1) \quad (7)$$

$$\phi_{m2} = \frac{2\pi}{\lambda} (r_m + r_m \cdot K_2) \quad (8)$$

으로 주어진다. 여기에서, r_m 은 r_m 의 스칼라 크기이고, λ 는 사용된 레이저의 파장이며, $\frac{2\pi}{\lambda}$ 는 파수이다. 그러므로, 이 두 빔의 위상차를 계산함으로써 변형전의 참조 스펙클 패턴을 얻을 수 있게 된다. 따라서, 간섭 스펙클 패턴의 위상 Ψ_m 은

$$\begin{aligned} \Psi_m &= \phi_{m1} - \phi_{m2} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1 - K_2) \end{aligned} \quad (9)$$

으로 주어지게 된다. 또한 물체 조사빔이 이동을 한 후 변형된 간섭 스펙클 패턴도 이동된 후의 두 빔의 위상차를 계산함으로써 얻을 수 있으므로 이동후 간섭 스펙클 패턴의 위상 Ψ'_m 는

$$\Psi'_m = \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K'_1 - K'_2) \quad (10)$$

으로 주어진다. 따라서 2장의 스펙클 패턴의 상관간섭에 의한 간섭무늬 형성과정에서 알아 보았듯이 물체빔의 이동으로 인한 변화된 전과후의 두 스펙클 패턴의 차에 의해 얻고자 하는 최종적인 등고선 간섭무늬를 얻을 수 있다. 따라서 식 (9)와 식 (10)의 이동 전과 후의 두 스펙클 패턴의 차에 의한 위상차는

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_m &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (\Delta K_1 - \Delta K_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_m| |\Delta K_1 - \Delta K_2| \cos\beta \end{aligned} \quad (11)$$

이 된다. 여기에서,

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &= K'_1 - K_1, \quad \Delta K_2 = K'_2 - K_2 \\ |\Delta K_1| &= |\Delta K_2| = \Delta\theta |K_1| = \Delta\theta |\Delta K_2| = \Delta\theta \\ |K_1| &= |K_2| = 1 \end{aligned}$$

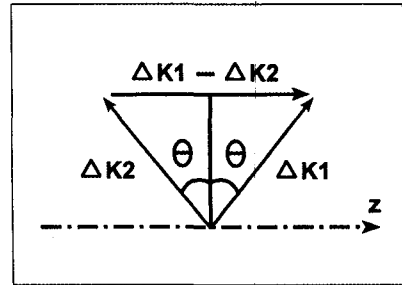


Fig. 3 Vector geometry of the contouring

그림 3으로부터

$$|\Delta K_1 - \Delta K_2| = 2 \sin\theta |\Delta K_1| = 2 \sin\theta \Delta\theta \quad (12)$$

이 되므로, 식 (12)를 식 (11)에 대입함으로써 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\Psi_m = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin\theta) r_m \cos\beta \Delta\theta \quad (13)$$

여기에서, $r_m \cos\beta$ 를 우리가 알고자하는 물체의 형상과 관계된 높이 h 라 놓으면

$$\Delta\Psi_m = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin\theta) h \Delta\theta \quad (14)$$

$$h = r_m \cos\beta \quad (15)$$

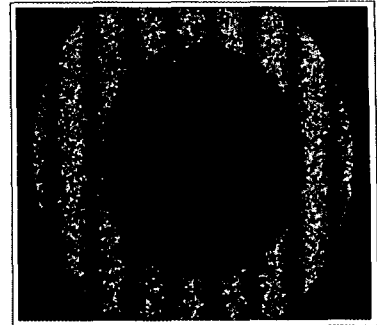
이 된다. 간섭계에서 두 조사빔이 같은 각도로 조사되게 구성을 하였으므로 두 단위 방향 벡터의 차 ΔK_1 과 ΔK_2 는 간섭계의 구성상 축대칭이 되어 h 는 Z축을 따라 물체의 높이를 나타낸다. 따라서 등고선 간격을 d 라하면, d 는 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\theta \Delta\theta} \quad (16)$$

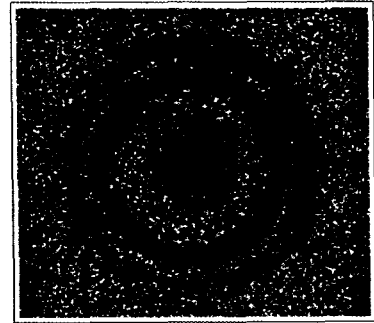
4. 등고선 간섭무늬 (contour fringe)

물체의 형상에 대한 정보를 갖고 있는 등고선 간섭무늬 (contour fringe)는 그림 4-(a)와 같이 격자 형태의 격자 등고선 간섭무늬(grid contour fringe)와 그림4-(b)와 같이 물체의 형상을 직접적으로 표현하는 높이 등고선 간섭무늬(depth contour fringe)의 두 가지로 나눌 수 있다. grid contour fringe는 물체의 표면상위에 격자형태로 나타나는 간섭무늬로서 간섭무늬 자체가 물체 위에 평행한 형태를 보이기 때문에 이해하는데 다소 어려움이 있고 정량적 해석 시에는 간섭무늬의 차수를 요구하며, 데이터를 보간하기 위한 curve-fitting routines을 사용하여야 한다. 반면에 depth contour fringe는 물체에 평행한 평면형태의 간섭무늬로서 일정한 물체의 형상과 높이를 직접적으로 서술하기 때문에 간섭무늬가 물체의 형상에 맞게 생성이 되어 간섭무늬만으로도 물체의 형상이 어떻게 생겼는지를 바로 한 눈에 알 수가 있다. 그리고 변위 해석시와 같은 기법을 사용하여 바로 해석이 가능하다. 간섭무늬의 형태를 얻는 과정은 그림 5의 간섭계 구성도의 벡터해석을 통하여 알 수가 있다. 먼저 그림 4(a) grid contour fringe는 마이크로 미터의 이동에 의하여 두 물체빔 K_1 과 K_2 가 서로 다른 방향, 즉 두 물체빔이 같이 안쪽으로 이동하거나 바깥쪽으로 이동하게 되는 경우로서, 이와 같이 이동시에는 벡터 ΔK_1 과 ΔK_2 가 그림 5의 (a)와 같은 형태를 이루게 되고 간섭무늬는 두 벡터 ΔK_1 과 ΔK_2 에 의해 형성되는 벡터 d 에 수직인 P 방향으로 형성된다. 그림 4의 (b)의 depth contour fringe는 마이크로미터의 이동에 의해 두 물체빔이 서로 같은 방향으로 이동되도록 하면 얻을 수가 있는데, 본 연구에서는 이를 위해 미러 3을 설치하여 두 물체빔 K_1 과 K_2 가 같은 방향으로 이동되도록 하였다. 그래서 마이크로미터의 이동에 의해 벡터 ΔK_1 과 ΔK_2 가 그림 5의 (b)와 같은 형태를 이루게 되고 간섭무늬는 d 에 수직인 P 방향으로 형성된다. P' 는 간섭계상의 두 물체 조사빔의 각이 다른 경우를 보이는 경우로서 마이크로미터를 이동했을 때 ΔK_1 과 ΔK_2 의 이동 양이 달라져 그림처럼 기울어진 형상을 보인다.

본 연구에서는 물체의 형상을 직접 서술해 주는 depth contour fringe를 이용하여 3차원 물체에 대한 형상정보를 얻고, 그 형상정보를 바탕으로 물체의 3차원적 형상을 구현하였다.



(a) grid contour fringe



(b) depth contour fringe

Fig. 4 Contour fringe pattern of the object

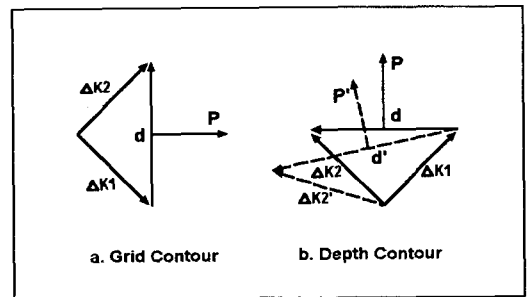


Fig. 5 Vector geometry of the contour fringe pattern

5. 실험 구성 및 방법

그림 6은 실험에 사용되었던 전자 스펙클 간섭계와 화상 획득 및 데이터 처리 시스템의 구성도이다. 파장 532 nm의 Nd:YAG 레이저 (CW 500 mW)가 가간섭 광원으로서 사용되었고, CCD 카메라는 interline 방식의 단색 비디오 카메라인 PULNiX TM-7EX 카메라를 사용

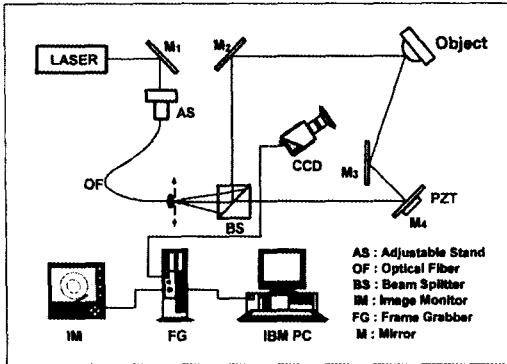


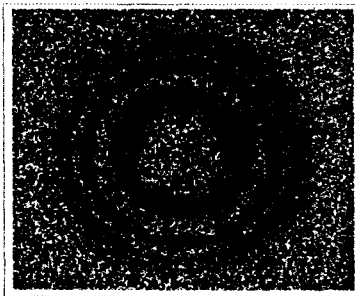
Fig. 6 Experimental arrangement for dual-beam-shifted ESPI contouring

하였다. 두 물체빔 중 하나에 PZT를 부착하여 일정 크기의 전압을 주어 $\pi/2$ 씩 위상차를 가지도록 PZT driver를 컴퓨터와 연결하여 자동적으로 위상 이동이 실행되도록 시스템을 구성하였다. 획득된 화상은 DT2861 frame grabber board가 부착된 컴퓨터에 의해 처리되었다.

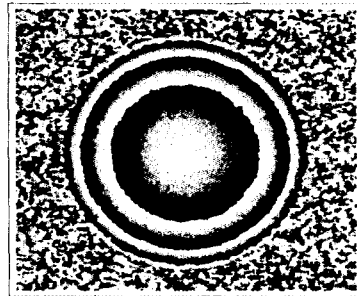
그림 6의 실험 개략도를 보면 레이저 빔은 광섬유를 통하여 전달되고, 광분할기에 의하여 2개의 물체빔으로 나뉘어 같은 각도로 물체를 조사하게 된다. 물체 조사빔은 마이크로미터 위에 부착된 광섬유에 의하여 축에 수직한 방향으로 이동되었다. 빔의 두 경로중 한 경로에 다르게 설치된 미러 M3는 같은 방향으로 K벡터를 이동하도록 함으로써 정확한 등고평면(contour plane)을 형성하기 위한 방향 보정자의 역할을 한다. 두 빔의 조사각 θ 는 23.5° 이고 두 빔의 광경로는 $l_1 = l_2 = 141\text{cm}$ 이다.

6. 실험 결과

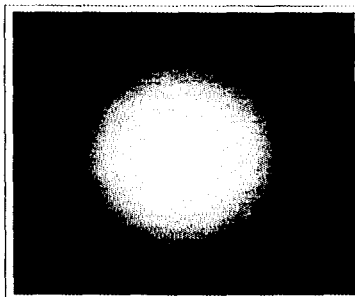
본 실험에서는 기존의 면내 변위 측정 전자 스펙클 간섭계를 변형하여 3차원 물체의 형상측정법을 연구하였다. 미러 M3를 사용하여 적절한 등고선 간섭무늬와 등고평면의 방향을 보정하였다. 광섬유를 사용하여 물체빔의 전달과 이동을 간편하고 편리하게 하였으며 빔의 이동으로 등고선 간섭무늬를 얻기 위하여 물체를 움직일 필요가



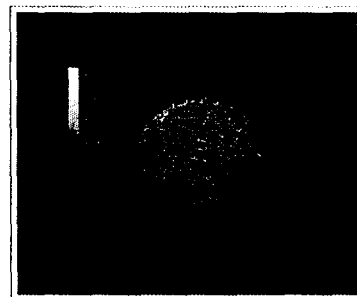
a. contour fringe



b. phase map



c. unwrapping



d. 3-D plot

Fig. 7 Results obtained when the angle difference $\Delta\theta$ is 0.1773 mrad : (a) contour fringes, (b) phase map, (c) unwrapping, (d) 3-D plot.

없다. 본 연구를 위해 구성된 간섭계를 통한 물체의 형상 측정은 물체 크기가 각각 센티미터, 밀리미터, 및 마이크로미터 단위의 물체를 대상체로 하여 실험을 하였다.

그림 7의 결과는 물체 크기가 센티미터 단위의 대상체인 탁구공의 형상측정 결과이다. 마이크로미터에 의한 광섬유의 250 μm 이동에 의해 변화된 각도 $\Delta\theta$ 가 0.1773 mrad 일 때로서 식 (15)를 이용하여 계산한 등고선 간섭무늬간격은 $d = 3.75\text{mm}$ 이다. 측정은 두 조사빔이 탁구공의 양쪽 바깥 부분에서 간섭무늬를 형성하기 위한 상관 효과를 보이는 부분까지인 약 1cm 까지 측정이 되고 있음을 그림 6을 통하여 알 수 있다.

(a)는 0.1773 mrad의 변화에 의해 생긴 등고선 간섭무늬를 보여주고 있으며, (b)는 그림 5의 M4에 부착된 PZT에 의해 정량적 해석을 위해 $\pi/2$ 씩 위상 이동되어진 변형전과 후의 각각 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 조합하여 구한 위상도를 보여주고 있다. 위상도는 아크 탄젠트의 조합을 통하여 얻어지기 때문에 2π 간격으

로 불연속성을 보인다. 이 위상도는 2π 불연속성을 제거시켜 주는 작업을 하여야 하는데 그 작업을 위상도 펼침 (unwrapping)⁽⁶⁾작업이라 한다. (c)는 위상도를 위상도 펼침 작업을 통해 얻은 위상도 펼침도이다. (d)는 측정된 물체를 3차원적으로 표현한 그림을 보여주고 있다.

그림 8의 결과는 밀리미터 단위의 구형 대상체의 측정결과이며, 이 때의 마이크로미터에 의한 광섬유의 이동은 1050 μm 이고, 변화된 각도 $\Delta\theta$ 는 0.75 mrad 일 때로서 이 때의 등고선 간섭무늬 간격은 $d = 0.893\text{mm}$ 이다.

그림 9의 결과는 마이크로미터 단위의 대상체인 한 계단의 높이가 200 μm 이고, 계단의 넓이가 1 mm 인 마이크로미터 단위의 시편으로서 1500 μm 이동에 의한 $\Delta\theta$ 가 1.064 mrad 일 때로서 이 때의 등고선 간섭무늬 간격은 $d = 0.625\text{mm}$ 이다.

그림 10의 결과는 마이크로미터단위의 대상체인 25센트 동전에 대한 형상측정 결과이다. 1050 μm 이동에 의한 $\Delta\theta$ 가 0.75 mrad 일 때로서 이 때의 등고선 간섭무

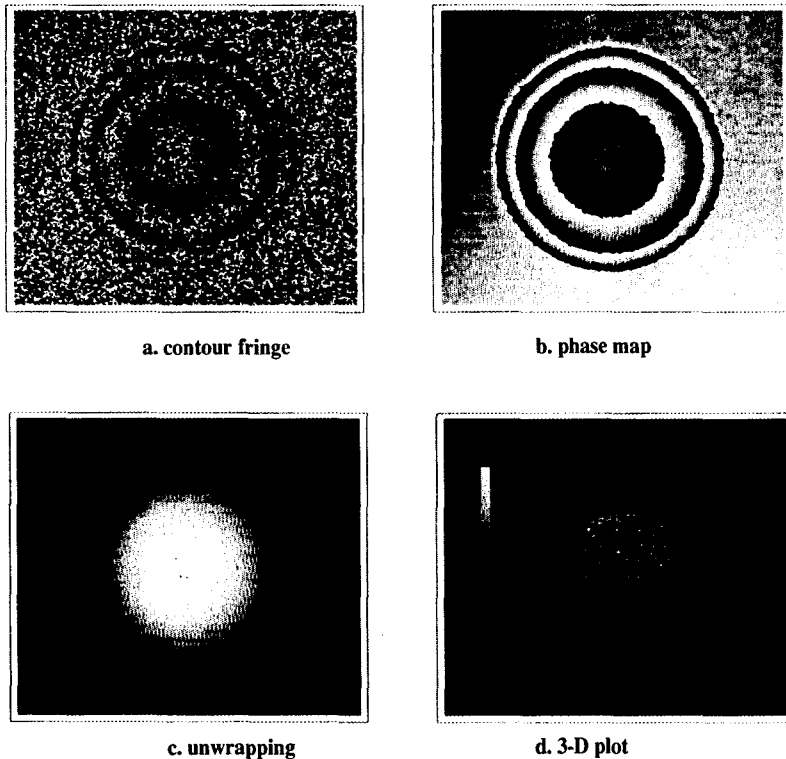


Fig. 8 Results obtained when the angle difference $\Delta\theta$ is 0.75 mrad : (a) contour fringes, (b) phase map, (c) unwrapping, (d) 3-D plot.

의 간격은 $d = 0.893 \text{ mm}$ 이다.

위의 결과들은 벡터와 기하학적 해석을 근거로 하여 얻은 결과들로 정확한 등고평면의 형성을 통하여 물체의 형상에 맞는 등고선 간섭무늬를 얻고, 이를 이용하여 3차원 물체의 형상을 측정할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 등고선 추출법의 민감도(sensitivity)와 측정 정밀도는 조사각 θ 와 변화되는 각 $\Delta\theta$ 에 의존한다. 그리고 간섭무늬의 질은 두 조사빔의 빔비율 (beam ratio), 스펙클 크기, 비상관 효과(decorrelation effect), 카메라로 들어오는 이미지의 강도, 그리고 물체와 카메라 사이의 정확한 이미지 형성관계 등에 의해 영향을 받는데, 그 최적 조건은 실험을 통하여 알 수가 있다.

7. 결 론

본 실험은 기존의 면내 변형 측정 간섭계를 약간 변형하여 조사빔의 이동을 통해 물체의 등고선을 추출함으로

써 3차원 물체의 형상을 측정할 수 있음을 보였다. 완전한 기하학적 해석을 바탕으로 물체의 형상에 맞는 등고선 간섭무늬를 얻었다. 물체를 변화시키는 방법, 두 파장의 조사빔을 사용하는 방법, 물체빔을 변화시키는 방법 등 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 다른 등고선 추출법보다 훨씬 더 쉽게 물체의 등고선 패턴을 얻을 수 있었고, 실제적 응용의 관점에서 볼 때 더 유용한 방법이 될 것으로 생각된다. 아래에 마이크로미터가 부착된 광섬유를 사용하여 등고선 간섭무늬를 얻기 위해 두 조사빔 머리를 연속적으로 움직일 필요가 없었고, 광섬유 자체가 공간 필터의 기능도 할 수 있기 때문에 공간 필터를 사용할 필요가 없었다. 그리하여 간섭계를 좀 더 간단화시켰다. 결과에서 보듯이 물체의 형상측정은 센티미터, 밀리미터는 물론 마이크로 단위에서도 잘 측정이 됨을 알 수 있다.

본 연구는 물체에 대한 정확한 형상정보를 바탕으로 물체의 형상학적 특성을 요구하는 로보틱스, CAD/CAM, NC machine, on-line inspection 등에 그 응용분야를 들 수 있다.

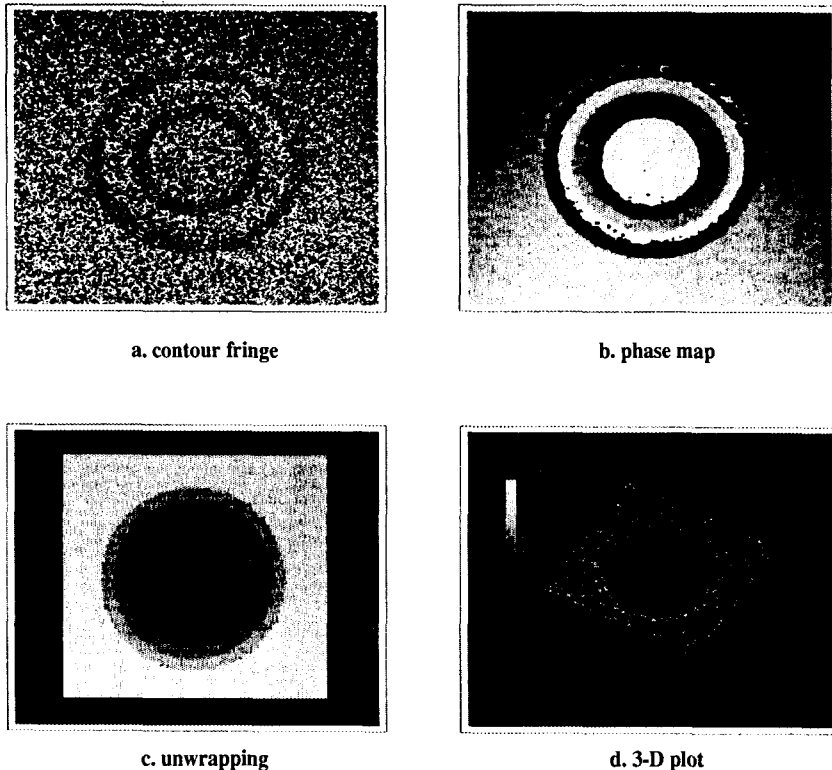


Fig. 9 Results obtained when the angle difference $\Delta\theta$ is 1.064 mrad : (a) contour fringes, (b) phase map, (c) unwrapping, (d) 3-D plot.

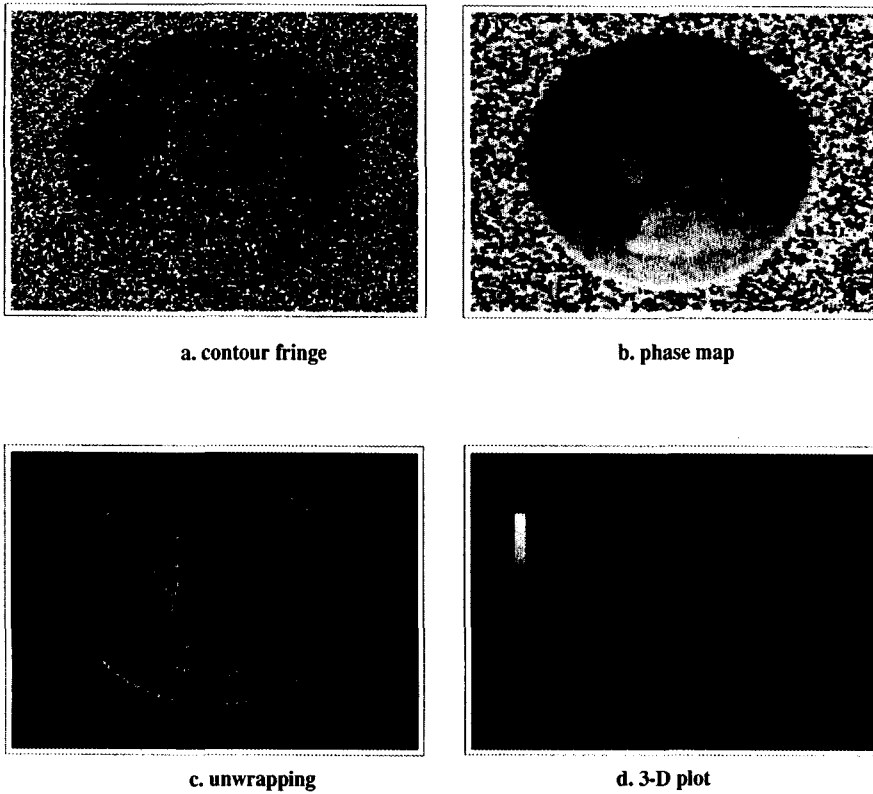


Fig. 10 Results obtained when the angle difference $\Delta\theta$ is 0.75 mrad : (a) contour fringes, (b) phase map, (c) unwrapping, (d) 3-D plot.

참 고 문 헌

1. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed," Cambridge Univ. Press, PP. 165-196, 1989.
2. K. Creath, "Phase-shifting speckle interferometry," Appl. Opt., Vol. 24, pp. 3053-3058, 1985.
3. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, "Contouring by modified dual-beam ESPI based on tilting illumination beams," Optik(Stuttgart), Vol. 90, pp. 61-64, 1992.
4. C. Joenathan, B. Pfister, and H. Tiziani, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual-beam illumination," Appl. Opt., Vol. 29, pp. 1905-1911, 1990.
5. R. Rodriguez-Vera, D. Kerr, and F. Mendoza-Santoyo, "Electronic speckle contouring," Opt. Soc. Am., Vol. 9, pp. 2000-2008, 1992.
6. B. D. Bergquist and P. Montgomery, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Vol. 599, pp. 185-195, 1985.
7. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, "Geometry for contouring by electronic speckle pattern interferometry based on shifting illumination beams," Appl. Opt., Vol. 31, pp. 6616-6621, 1992.
8. P. Hariharan, "Basic of Interferometry," Academic Press, pp. 95-98, 1992.