

### 3차원 형상측정을 위한 전자 스페클 등고선 추출법에 관한 연구

#### A Study on Electronic Speckle Contouring for 3-D Shape Measurement

김계성\*(전북대 대학원) , 강영준(전북대 공대)

G. S. Kim (Graduate School, Chonbuk Univ.) , Y. J. Kang (Chonbuk Univ.)

#### ABSTRACT

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) is an optical technique to measure surface deformation of engineering components and materials in industrial areas. ESPI, a non-contact and non-destructive measuring method, is capable of providing full-field results with high spatial resolution and high speed. One of important application aspects using electronic speckle pattern interferometry is to generate contours of a diffuse object in order to provide data for 3-D shape analysis and topography measurement. 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 a shift of the two illumination beams through optical fiber in order to obtain the contour fringe patterns. Before the experiments, we performed the geometric analysis for dual-beam-shifted ESPI contouring. And by this geometric analysis, we performed the electronic speckle contouring experiment. We used 4-frame phase shifting method with PZT for quantitative analysis of contour fringes. Finally, we showed good agreements between the geometric analysis and experimental results.

**Key Words** : ESPI(전자 스페클 패턴 간섭법), Non-destructive Measuring Method(비파괴 측정 방법), Contouring Method(등고선 추출법), Optical Fiber(광섬유), Shift of Illumination Beams(조사빔 이동), Dual-beam(이중빔), Phase Shifting(위상이동), Geometric Analysis(기하학적 해석),

#### 1. 서 론

스페클 간섭법을 이용한 계측방법은 광계측 기술로서 홀로그래피 간섭법과 같이 레이저빔에 의해 조사되는 전영역을 비접촉으로 표면의 응력, 변형 및 진동 등을 파장 단위로 측정할 수 있다. 또한 삼차원 정보 추출이 가능해서 주어진 간섭 무늬로부터 전영역의 변형을 구할 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다. 홀로그래피의 사진 처리 과정 대신에 전자 처리 과정을 거치는 전자 스페클 간섭법<sup>(1)</sup>은 1969년에 물체의 전체 변위장을 관찰하기 위한 비접촉, 비파괴 방법으로서 Butters와 Leendertz에 의해 개발되었다. 그리고 스페클 간섭무늬의 정량적 해석

을 위해 각 화소의 상대적 위상값을 계산하는 위상이동법<sup>(2)</sup>은 1984년에 K. Creath에 의해 처음 소개되었다. 전자 스페클 간섭법은 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 측정 민감도가 우수하고, 비접촉식으로 검사대상에 대해 전혀 영향을 주지 않는다. 또한, 측정 물체의 변형이나 형상에 대한 정보를 갖고 있는 간섭 무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 이용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 용이하다고 실시 시간 계측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 전자 스페클 패턴 간섭계를 이용한 측정방법은 홀로그래피 간섭법의 필름 처리과정이 제거되었고 재생과정이 불필요해졌다. 이와 같은 장점들을 바탕으로 전

자 스펙클 간섭법은 자동차 산업, 항공기 산업, 전자 산업, 스피커 산업, 원자력 산업 등에 널리 이용되고 있다.

전자 스펙클 패턴 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.<sup>(3)</sup> 현재 존재하는 등고선 추출법은 거시적으로 무아레 방법, 홀로그래피 방법, 전자 스펙클 패턴 간섭법이 있는데 본 실험에서 이용한 전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 형상 측정 방법은 다시 두 파장의 조사빔을 이용한 방법, 물체 조사빔을 변화시키는 방법, 물체를 변화시키는 방법, 두 물체빔을 이동시키는 방법으로 나뉜다.<sup>(4),(5),(6)</sup> 본 연구는 면내 변형에 민감한 면내 변형 전자 스펙클 패턴 간섭계를 약간 변조하여 두 물체빔을 이동(shift)시키는 방법에 의해 3차원 물체의 형상측정을 하였다. 실험 수행전 조사빔의 이동에 의한 적정 등고평면(contour plane)을 형성하기 위해 간섭계에서의 두 물체빔에 의한 간섭무늬 형성에 관한 벡터와 기하학적 해석<sup>(7)</sup>을 수행하여 이론적 토대를 마련하였고, 이를 바탕으로 스펙클을 이용한 형상측정을 실시하였다. 물체빔의 이동은 마이크로미터 위에 설치되어 있는 광섬유에 의해 수행되었다. 등고선 간섭무늬(contour fringe)를 통한 물체의 높이와 형상에 대한 정보를 얻기 위하여 간섭계의 두 물체빔 중 하나에 위상 이동장치인 PZT를 부착하여 정량화를 수행하였다.

## 2. 스펙클 패턴의 상관 간섭

면내 변형에 민감한 스펙클 간섭계는 두 물체빔이 상관간섭하여 형상정보를 내포하고 있는 간섭무늬를 형성하게 되는데 두 물체빔은 광 분할기에 의해 동일한 세기로 이분된다. 그림 1은 두물체빔의 상관간섭에 의해 결상면에 상을 맺는 상관 간섭계를 보여 주고 있다. 두 물체 조사빔  $U_1$ 과  $U_2$ 는 같은 각도  $\theta$ 로 광학적으로 거친 물체면을 조사한 뒤에 렌즈를 통하여 상을 맺게 되는데, 이때 각 빔의 복소 진폭은

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

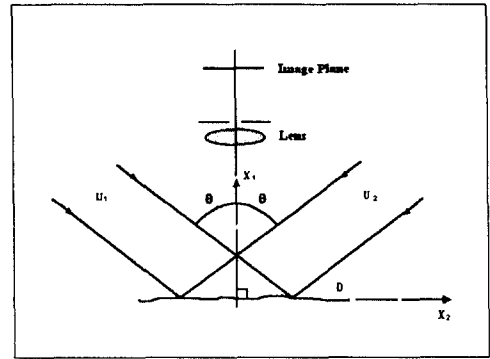


Fig 1. The in-plane displacement arrangement of speckle pattern correlation interferometer

이다. 여기에서,

$$\begin{aligned} u_1, u_2 &: \text{random amplitudes} \\ \phi_{s1}, \phi_{s2} &: \text{random phases} \\ \phi_{m1}, \phi_{m2} &: \text{광경로와 연관된 phases} \end{aligned}$$

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,

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

두 조사빔의 상  $\phi_{m1}$ 과  $\phi_{m2}$ 가  $\phi'_{m1}$ 와  $\phi'_{m2}$ 로 이동되었다면, 변화된 빔의 강도  $I_B$ 는

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

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

CCD 카메라를 통한 간섭무늬의 강도는 출력 전압의 변화에 비례하기 때문에 다음과 같이 표현된다.

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

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

모니터상의 밝기  $B$ 는

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

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

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. 기하학적 해석

스펙클 패턴의 위상차에 의해 형성된 간섭무늬가 물체의 형상 및 높이와 관계가 있을 때 물체의 형상에 대한 정보는 상관간섭에 의해 생긴 간섭무늬의 해석을 통하여 얻을 수 있다. 조사빔의 이동을 통해 물체의 위상차를 유발시키고 이 위상차에 의해 형성된 등고선 간섭무늬의 해석을 통해 변조된 이중빔 전자 스펙클 간섭계에서 물체의 형상과 위상차 사이의 관계를 다음의 완전한 기하학적 해석을 통하여 알아본다.

먼저, 그림 2를 보면 물체는 관찰 방향축  $Z$ 에 대해 같은 각도  $\theta$ 로 양분된 두 파에 의해 조사된다.  $K_1$ 과  $K_2$ 는 이 두 파의 단위 방향 벡터이며  $M$ 은 물체상의 임의의 한 점이고,  $P$ 는 CCD카메라의 관찰점이다.  $r_m$ 은  $M$ 에서  $P$ 까지의 위치벡터이고,  $\beta$ 는  $r_m$ 이  $Z$ 축과 이루는 각도이다.  $K_1'$ 과  $K_2'$ 는 조사빔이 이동된 후의 단위벡터이며,  $\Delta\theta$ 는 변화된 후의 두 스펙클 패턴에 대한 조사빔의 각도차이다. 두 조사빔은 같은 광경로를 가지고 조사되며 물체상의 한점  $M$ 을 조사한후  $P$ 로 들어오게 되는데, 이 때 두 빔의 위상은

$$\begin{aligned} \phi_{m1} &= \frac{2\pi}{\lambda} (r_m + r_m \cdot K_1) \\ \phi_{m2} &= \frac{2\pi}{\lambda} (r_m + r_m \cdot K_2) \end{aligned} \quad (7)$$

으로 주어진다. 여기에서  $r_m$ 은  $r_m$ 의 스칼라 크기이고,  $\lambda$ 는 사용된 레이저의 파장이다.

간섭 스펙클 패턴의 위상  $\Psi_m$ 은

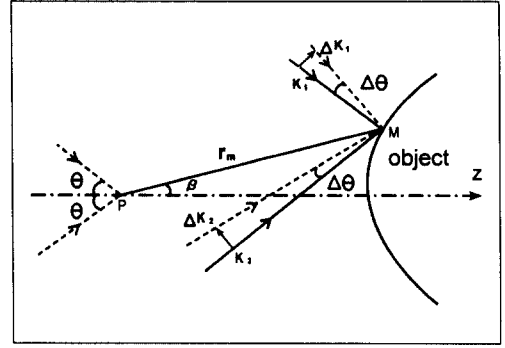


Fig 2. Geometry of dual-beam-shifted ESPI contouring

$$\begin{aligned} \Psi_m &= \phi_{m1} - \phi_{m2} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1 - K_2) \end{aligned} \quad (8)$$

으로 주어지고, 이동된 후의 변형된 간섭 위상은

$$\Psi_m' = \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1' - K_2') \quad (9)$$

으로 주어진다. 그리하여 변형된 전과후의 위상차는

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_m &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (\Delta K_1 - \Delta K_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_m| |\Delta K_1 - \Delta K_2| \cos \beta \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 여기에서,

$$\Delta K_1 = K_1' - K_1$$

$$\Delta K_2 = K_2' - K_2$$

$$|\Delta K_1| = |\Delta K_2| = \Delta \theta |K_1| = \Delta \theta |K_2| = \Delta \theta$$

$$|K_1| = |K_2| = 1$$

그림 3으로부터

$$|\Delta K_1 - \Delta K_2| = 2 \sin \theta |\Delta K_1| = 2 \sin \theta \Delta \theta \quad (11)$$

이 되고, 최종적으로 다음 식을 얻을 수 있다.

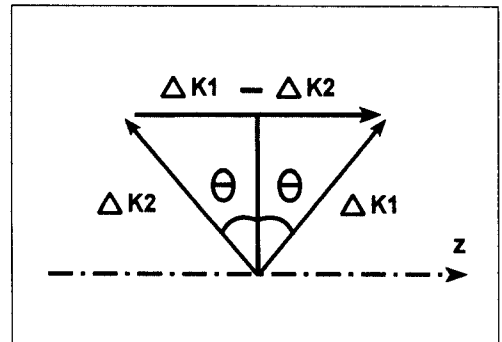


Fig 3. Vector geometry of the contouring

$$\Delta \psi_m = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin \theta) h \Delta \theta \quad (12)$$

$$h = r_m \cos \beta \quad (13)$$

여기에서,  $\Delta K_1$ 과  $\Delta K_2$ 가 축대칭일 때  $h$ 는  $Z$  축을 따라 물체의 높이를 나타낸다. 그리하여 등고선 간격은 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta \Delta \theta} \quad (14)$$

#### 4. 실험 구성 및 방법

그림 4는 본 연구를 수행하기 위해 구성된 이중빔 면내 변형 전자 스펙클 간섭계와 화상 획득 및 데이터 처리 시스템의 구성도이다. 간섭성 광원으로 Nd:YAG 레이저와 Interline 방식의 단색 비디오 카메라를 사용하였다. 위상이동을 통해 정량화를 수행하고자 두 물체빔 중 하나에 위상이동장치인 PZT를 미러 M4에 부착하였다. 그리고 이 PZT에 일정 크기의 전압을 주어  $\pi/2$ 씩 위상차를 가지도록 PZT driver를 컴퓨터와 연결하여 자동적으로 위상 이동이 실행되도록 시스템을 구성하였다. 획득된 화상은 프레임 그래버가 부착된 컴퓨터에 의하여 처리되었다.

간섭계에서 광원으로부터 출발한 레이저 빔은 빔의 이동을 간편화하기 위해 광섬유를 통하여 전달되고, 광분할기에 의하여 2개의 물체빔으로 나뉘어 진 후 같은 각도로 물체를 조사하게 된다. 물체 조사빔은 마이크로미터 위에 부착된 광섬유에 의하여 축에 수직한 좌우방향으로 이동되도록 구성되었다. 빔의 두 경로중 한 경로에 다르게 설치된 미러 M3는 같은 방향으로 K벡터를 이동하도록 함으로써 정정한

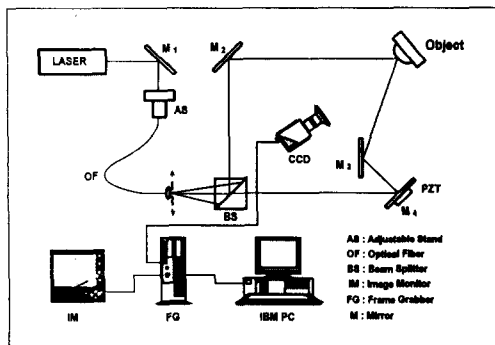


Fig 4. Experimental arrangement for dual-beam-shifted ESPI contouring

등고평면(contour plane)을 형성하기 위한 방향 보정자의 역할을 한다. 두 빔의 조사각  $\theta$ 는  $23.5^\circ$  이고 두 빔의 광경로는  $l_1 = l_2 = 141 \text{ cm}$  이다.

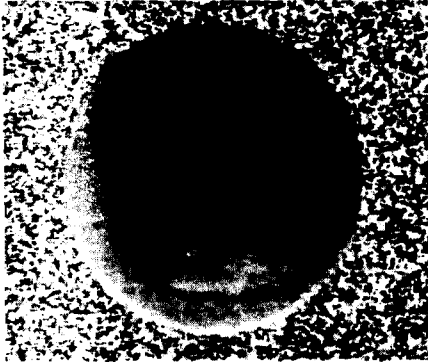
#### 5. 실험 결과

전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 연구분야 중 중요한 응용분야로서 형상측정을 들 수 있다. 본 실험에서는 기존의 변위 측정 전자 스펙클 간섭계를 변형하여 정보전달자인 스펙클을 이용하여 물체의 형상을 측정하는 법을 연구하였다. 미러 M3를 사용하여 물체의 형상을 직접적으로 표현해 주는 적절한 등고선 간섭무늬의 형성과 등고평면의 방향을 보정하였다. 자체에 공간필터의 기능을 가지고 있는 광섬유를 사용하여 물체빔의 전달과 이동을 간편하고 편리하게 하였으며 빔의 이동으로 등고선 간섭무늬를 얻기 위하여 물체를 움직일 필요가 없다. 스펙클 패턴의 상관 간섭을 이용하였을 때의 적정 측정 범위는 밀리미터에서 수센티미터까지이다. 그림 5의 결과는 25센트 동전에 대한 형상측정 수행 결과이다. 마이크로미터에 의한 광섬유의  $1050 \mu\text{m}$  이동에 의해서 변화된 각도  $\Delta \theta$ 가  $0.75 \text{ mrad}$  일 때로서 등고선 간격  $d = 0.893 \text{ mm}$  이다. (a)는  $0.75 \text{ mrad}$ 의 이동과  $\pi/2$ 씩 위상 이동되어진 변형전.후의 각각 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 조합하여 구한 위상도를 보여주고 있다. 위상도는 아크탄젠트의 조합을 통하여 얻어지기 때문에  $2\pi$ 간격으로 톱니모양의 불연속성을 보이므로 이 불연속성을 제거시켜 주어야 하는데 이 작업을 위상도 펼침(demodulation)작업이라 한다. (b)는 불연속성을 제거한 위상 펼침도이고 (c)는 측정된 물체의 3차원 형상을 보여준다.

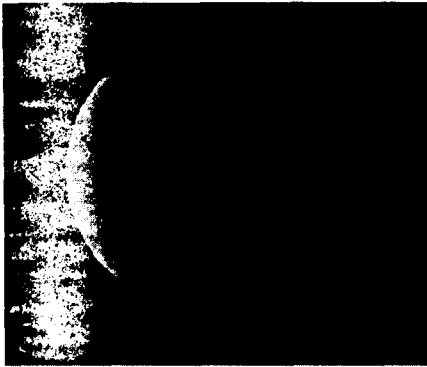
그림 5의 결과들은 벡터와 기하학적 해석을 근거로 하여 얻은 결과들로 스펙클을 이용한 3차원 물체의 형상측정을 할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 등고선 추출법의 민감도(sensitivity)와 측정 정밀도는 조사각  $\theta$ 와 변화되는 각  $\Delta \theta$ 에 의존한다. 그리고 간섭무늬의 질은 두 조사빔의 빔비율(beam ratio), 스펙클 크기, 비상관 효과(decorrelation effect), 카메라로 들어오는 이미지의 강도, 그리고 물체와 카메라 사이의 정확한 이미지 형성관계 등에 의해 영향을 받는데, 그 최적

조건은 실험을 통하여 알 수가 있다.

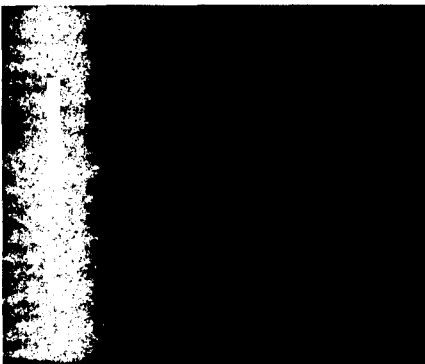
## 6. 결 론



(a) phase map



(b) demodulation image



(c) 3-D plot

Fig 5. Results obtained when the illumination angle  $\theta$  is  $23.5^\circ$  and the angle difference  $\Delta\theta$  is 0.75 mrad : (a) phase map, (b) demodulation image, (c) three-dimensional plot.

본 연구는 3차원 형상측정기나 무아레 패턴 등이 아닌 레이저 스페클을 이용한 3차원 물체의 형상측정법을 보였다. 면내 변형 측정 스페클 간섭계를 이용하여 조사빔의 이동을 통해 물체의 등고선을 추출함으로써 3차원 물체의 형상측정을 수행하였다. 완전한 기하학적 해석을 바탕으로 물체의 형상에 맞는 등고선 간섭무늬를 얻었다. 물체를 변화시키거나 두 파장의 조사빔을 사용하거나 물체빔을 변화시키는 등 전자 스페클 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. 마이크로 미터가 부착된 광섬유를 사용하여 등고선 간섭무늬를 얻기 위해 두 조사빔 미러를 연속적으로 움직일 필요가 없었고, 광섬유 자체가 공간 필터의 기능도 할 수 있기 때문에 공간 필터를 사용할 필요가 없었다.

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

## REFERENCE

1. R. Jones and C. Wykes, 1989, "Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed.", Cambridge Univ. Press, PP. 165-196.
2. K. Creath, 1985, "Phase-shifting speckle interferometry.", Appl. Opt., Vol. 24, pp. 3053-3058.
3. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, 1992, "Contouring by modified dual-beam ESPI based on tilting illumination beams.", Optik(Stuttgart), Vol. 90, pp. 61-64.
4. C. Joenathan, B. Pfister, and H. Tiziani, 1990, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual-beam illumination.", Appl. Opt., Vol. 29, pp. 1905-1911.
5. R. Rodriguez-Vera, D. Kerr, and F. Mendoza-Santoyo, 1992, "Electronic speckle contouring.", Opt. Soc. Am., Vol. 9, pp. 2000-2008.

6. B. D. Bergquist and P. Montgomery, 1985, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry.", Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Vol. 599, pp. 185-195.
7. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, 1992, "Geometry for contouring by electronic speckle pattern interferometry based on shifting illumination beams.", Appl. Opt., Vol. 31, pp. 6616-6621.